



ISSN 1859 - 4026



TẠP CHÍ

CÔNG NGHIỆP NÔNG THÔN

JOURNAL OF RURAL INDUSTRY

CƠ QUAN BÁO CHÍ CỦA HỘI CƠ KHÍ NÔNG NGHIỆP VIỆT NAM

CƠ GIỚI HÓA NÔNG NGHIỆP THÔNG MINH

CÔNG NGHỆ CHẾ BIẾN
VÀ VẬT LIỆU NĂNG LƯỢNG
BỀN VỮNG

HƯỚNG TỚI NET ZERO



HƯỚNG TỚI KỶ NIỆM 60 NĂM THÀNH LẬP
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM, ĐẠI HỌC HUẾ (1967 - 2027)



KHÓA HỌC



CÔNG NGHỆ



CÔNG NGHIỆP



PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

CÁC NGÀNH ĐÀO TẠO BẠC ĐẠI HỌC

CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT CƠ KHÍ



Kỹ sư Công nghệ kỹ thuật cơ khí có thể làm việc tại doanh nghiệp cơ khí, nhà máy sản xuất và cơ sở chế biến nông sản, thực phẩm; đảm nhiệm việc thiết kế, chế tạo, vận hành, bảo trì và cải tiến máy móc công nghiệp, máy nông nghiệp cùng thiết bị trong dây chuyền chế biến, đóng gói và bảo quản thực phẩm.

CÔNG NGHỆ THỰC PHẨM



Kỹ sư Công nghệ thực phẩm có thể đảm nhiệm các vị trí kỹ thuật sản xuất, quản lý và vận hành dây chuyền, kiểm soát chất lượng (QC), đảm bảo chất lượng (QA) hoặc Nghiên cứu và phát triển sản phẩm (R&D) tại các nhà máy chế biến, doanh nghiệp thực phẩm và đồ uống.

KỸ THUẬT CƠ ĐIỆN TỬ



Kỹ sư Kỹ thuật cơ điện tử có thể làm việc tại nhà máy, doanh nghiệp chế tạo thiết bị và cơ sở sản xuất nông nghiệp công nghệ cao; đảm nhiệm việc thiết kế, lắp đặt, lập trình, vận hành và bảo trì hệ thống tự động, robot, dây chuyền sản xuất và thiết bị điều khiển trong công nghiệp, nông nghiệp.

ĐẢM BẢO CHẤT LƯỢNG VÀ AN TOÀN THỰC PHẨM



Kỹ sư Đảm bảo chất lượng và an toàn thực phẩm có thể làm việc tại doanh nghiệp chế biến, phòng kiểm nghiệm và cơ quan quản lý; đảm nhiệm việc kiểm tra nguyên liệu, kiểm nghiệm sản phẩm, giám sát điều kiện vệ sinh và xây dựng hệ thống quản lý chất lượng, an toàn thực phẩm trong quá trình sản xuất và lưu thông.

KỸ THUẬT CƠ SỞ HẠ TẦNG



Kỹ sư Kỹ thuật cơ sở hạ tầng có thể làm việc tại doanh nghiệp tư vấn thiết kế, đơn vị thi công, ban quản lý dự án và cơ quan quản lý xây dựng; đảm nhiệm việc khảo sát, thiết kế, giám sát thi công và quản lý các công trình giao thông, cấp thoát nước cùng hạ tầng kỹ thuật đô thị, nông thôn.

ĐÀO TẠO SAU ĐẠI HỌC

THẠC SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Nghiên cứu, thiết kế, cải tiến thiết bị và quản lý kỹ thuật tại doanh nghiệp, viện nghiên cứu hoặc giảng dạy tại cơ sở đào tạo nghề, đại học.

THẠC SĨ CÔNG NGHỆ THỰC PHẨM

Nghiên cứu, phát triển sản phẩm, cải tiến quy trình chế biến và quản lý chất lượng tại doanh nghiệp, viện nghiên cứu hoặc tham gia giảng dạy.

TIẾN SĨ CÔNG NGHỆ THỰC PHẨM

Chủ trì nghiên cứu, phát triển công nghệ chế biến, giảng dạy và hướng dẫn nghiên cứu tại trường đại học, viện nghiên cứu.



TẠP CHÍ
CÔNG NGHIỆP NÔNG THÔN
NĂM THỨ 15: SỐ 62
NĂM 2026; XUẤT BẢN 4 KỲ/NĂM

HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP

Chủ tịch

GS.TS. NGUYỄN HAY

Phó chủ tịch

TSKH. BẠCH QUỐC KHANG

PGS. TS PHẠM ANH TUẤN

PGS.TS LÊ MINH LƯ

GS.TS. PHẠM VĂN CHƯƠNG

Ủy viên thường trực HĐBT

PGS.TS CHU VĂN THIÊN

ThS. NGUYỄN NGỌC BÌNH

TS. LÊ NGỌC ÁNH

TS. NGUYỄN ĐỨC LONG

Thành viên HĐBT

GS.TS NGUYỄN HUY BÍCH

PGS.TS ĐỖ MINH CƯỜNG

PGS.TS DƯƠNG VĂN TÀI

TS. LÊ VĂN BẢNH

ThS NGUYỄN CÔNG BÌNH

TS. TRẦN HỒNG THAO

PGS.TS NGUYỄN DUY LÂM

TS. NGUYỄN NĂNG NHƯỢNG

PGS. TS NGUYỄN ĐÌNH TÙNG

TS. PHẠM MINH ĐẠT

GS.TS ĐÌNH VĂN SƠN

PGS.TS LÊ QUỐC THANH

TS. NGUYỄN ĐỨC KHUYẾN

TS. NGUYỄN THANH NGHỊ



TỔNG BIÊN TẬP

TS. LÊ NGỌC ÁNH

PHÓ TỔNG BIÊN TẬP

PGS.TS CHU VĂN THIÊN

ThS. NGUYỄN NGỌC BÌNH

TS. NGUYỄN ĐỨC LONG

THƯ KÝ TÒA SOẠN

TS. TRẦN HỒNG THAO

Ủy viên ban biên tập

CỬ NHÂN. ĐỖ NGỌC AN

KS. NGUYỄN THANH DŨNG

KS. NGUYỄN HỒNG DƯƠNG

TÒA SOẠN

TẠP CHÍ CÔNG NGHIỆP NÔNG THÔN

<https://congnghiepnongthon.vn>

Địa chỉ: Số 54, ngõ 102, đường Trường Chinh,
P. Kim Liên, Hà Nội.

ĐT: 024.38688620 / 0865.988.388

Email: khoahocnnt@gmail.com

Giấy phép số: 29/GP – BVHTTDL

cấp lại ngày 03 tháng 03 năm 2026

In tại xưởng in NXBNN: Ngõ 167 phố Phương Mai,
P. Kim Liên, Hà Nội

MỤC LỤC

TẠP CHÍ CÔNG NGHIỆP NÔNG THÔN

	Trang
1 - Đỗ Minh Cường, Nguyễn Thị Ngọc, Bùi Xuân Nhật, Vệ Quốc Linh, Trần Đức Hạnh, Nguyễn Quốc Huy, Trần Võ Văn May, Phan Tôn Thanh Tâm, Nguyễn Văn Đức, Đỗ Thanh Tiến, Hồ Văn Quốc Huy, Nguyễn Thanh Quốc: Một số kết quả thiết kế và chế tạo mô hình thiết bị nhiệt phân liên tục sản xuất than sinh học từ trấu theo nguyên lý tự sinh nhiệt và hồi lưu khí nhiệt phân	4
2 - Do Minh Cuong, Ve Quoc Linh, Nguyen Thi Ngoc, Hoang Thi Thai Hoa, Tran Duc Hanh, Tran Vo Van May, Nguyen Van Hieu, Tran Thi Cam Nhung, Nguyen Huu Diem Ha, Nguyen Van Hung: Evaluation of a mechanized rice straw composting model for agricultural cooperatives in Hue city, Vietnam	15
3 - Phan Tôn Thanh Tâm, Vệ Quốc Linh, Trần Võ Văn May, Hồ Văn Dũng, Châu Văn Tài Nguyên: Một số kết quả nghiên cứu về máy cán bột mì phục vụ sản xuất quy mô nhỏ, năng suất 25 kg/h	26
4 - Nguyễn Văn Hải, Nguyễn Đức Tâm, Cao Văn Vinh, Nguyễn La Tuấn Anh, Hồ Văn Quốc Huy, Vệ Quốc Linh: Nghiên cứu, thiết kế, và chế tạo mô hình máy thu gom rác trên bãi biển theo nguyên lý trồng rừng cào tại thành phố Huế	36
5 - ThS. Nguyễn Thị Thanh, TS. Phạm Việt Hùng: Bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực trong hệ lõi – vách nhà cao tầng: phương pháp và định hướng nghiên cứu	45
6 - Nguyễn Xuân Trung, Phạm Văn Quang: Xe đạp điện ba bánh năng lượng mặt trời: tổng quan công nghệ và triển vọng tại Việt nam	62
7 - Lê Đình Hiếu, Đoàn Ngọc Hiệu, Lê Thị Kim Liên, Nguyễn Thị Phúc: Mô phỏng và đánh giá bộ điều khiển fuzzy-pid thích nghi cho hệ thống lái steer-by-wire	76
8 - Lê Đình Hiếu, Phan Đình Chử, Trần Văn Tấn Đạt, Trần Quang Hùng, Lê Đình Nguyên, Đoàn Thanh Sơn, Lê Thị Kim Liên: Thiết kế bộ lọc kalman tối ưu nâng cao độ chính xác ước lượng trạng thái sạc (soc) của pin trên xe điện	86
9. Lê Đình Hiếu, Trần Quang Hùng, Phan Đình Chử, Lê Thị Kim Liên: Thiết kế và mô phỏng hệ thống sạc không dây cộng hưởng từ tối ưu cho xe điện hiệu suất cao	97
10- Võ Công Anh, Trần Đức Hạnh, Hồ Sỹ Vương, Phạm Xuân Phương: Nghiên cứu tổng quan về hệ thống quản lý và điều khiển pin trên xe điện và xe hybrid: các tiến bộ gần đây và xu hướng phát triển	110

- 11 - Nguyễn Thanh Cường, Trần Nguyễn Minh Quốc, Hoàng Tấn Phúc:** 121
Thiết kế và chế tạo máy cắt sợi cho thân cây môn bạc hà với năng suất 100 kg/h, phục vụ món ăn truyền thống cơm hến Huế
- 12 - Nguyễn Xuân Thiết, Nguyễn Chung Thông:** Nghiên cứu ứng dụng quy 133
trình và hệ thống thiết bị cơ giới hóa đồng bộ canh tác cây cà rốt
- 13- TS. Đỗ Thanh Tiến, ThS. Đào Lê Minh Tuấn:** Chế tạo bột phát quang 143
 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7: \text{Sm}^{3+}$ giải pháp điều khiển phổ ánh sáng cho nông nghiệp thông minh
- 14 - Ngô Quý Tuấn, Lê Minh Đức:** Bê tông carbon thấp (low-carbon concrete): 149
xu hướng quốc tế và tiềm năng ứng dụng hướng tới mục tiêu net zero tại Việt Nam
- 15 - Phạm Văn Quang, Bùi Thị Minh Tú, Lê Minh Tiến, Nguyễn Xuân 157
Trung:** Đánh giá hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và giảm phát thải của hệ thống swb-hres cho cụm ao nuôi thủy sản vùng đầm phá tam giang – cầu hai
- 16 - TS. Phạm Việt Hùng, PGS.TS. Nguyễn Văn Toàn:** Tự tự động hóa đến 170
tự tối ưu có kiểm soát trong công nghiệp thực phẩm: tổng quan và khung chiến lược ai-iot dựa trên tính toàn vẹn của quyết định
- 17 - Hoàng Thân, Ngô Đức Kiên, Võ Thanh Bình, Trương Xuân Lộc, Lê 183
Quang Phú:** Đánh giá hiệu năng động cơ fi – ipm trong hệ truyền động máy kéo điện nông nghiệp sử dụng điều khiển foc
- 18 - Nguyễn Tiến Long, Nguyễn Quốc Hiệp, Trần Võ Văn May, Nguyễn 193
Thị Ngọc, Nguyễn Trường Giang, Đinh Vương Hùng:** Nghiên cứu ứng dụng công nghệ vi sóng trong chưng cất tinh dầu sả bằng phương pháp lôi cuốn hơi nước
- 19 - Khương Anh Sơn, Võ Công Anh1, Hồ Văn Dũng, Nguyễn Thị Kim 202
Anh, Nguyễn Quốc Toàn, Đặng Văn Vinh, Phạm Lương Hoàn:** Thiết kế và chế tạo máy phay CNC mini 3 trục
- 20 - Phan Hiếu Hiền:** Cơ giới hóa góp phần bảo vệ tài nguyên đất-nước và 214
tăng năng suất cây trồng ở các tỉnh nam trung bộ và tây nguyên
- 21 - Tạp chí Công nghiệp Nông thôn:** Cầu nối tri thức và kiến tạo phát triển 225
bền vững
- 22 - Thư mời** 226

MỘT SỐ KẾT QUẢ THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÔ HÌNH THIẾT BỊ NHIỆT PHÂN LIÊN TỤC SẢN XUẤT THAN SINH HỌC TỪ TRÁU THEO NGUYÊN LÝ TỰ SINH NHIỆT VÀ HỒI LƯU KHÍ NHIỆT PHÂN

Đỗ Minh Cường^{1*}, Nguyễn Thị Ngọc¹, Bùi Xuân Nhật¹, Vệ Quốc Linh¹,
Trần Đức Hạnh¹, Nguyễn Quốc Huy¹, Trần Võ Văn May¹, Phan Tôn Thanh Tâm¹,
Nguyễn Văn Đức¹, Đỗ Thanh Tiến¹, Hồ Văn Quốc Huy¹, Nguyễn Thanh Quốc²

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm thiết kế và chế tạo mô hình thiết bị nhiệt phân trấu định hướng vận hành liên tục, với năng suất than sinh học danh nghĩa 30 kg/h. Trên cơ sở kế thừa nguyên lý lò đứng bán liên tục, các bộ phận chính được tính toán, thiết kế 3D, lập bản vẽ và chế tạo. Hệ thống gồm vít cấp trấu và vít tháo than điều chỉnh độc lập, buồng phản ứng, đường thu và hồi lưu khí nhiệt phân, cyclone tách bụi, hệ thống giám sát nhiệt độ và điều khiển an toàn. Kết quả thiết kế xác lập lưu lượng trấu 50,0-55,6 kg/h và lưu lượng khí tính toán qua cyclone 200 m³/h. Các cụm cơ khí, điện và điều khiển đã được lắp ráp và kiểm tra không tải bước đầu. So với lò bán liên tục, điểm khác biệt của mô hình là chuyển thao tác nạp-tháo theo chu kỳ sang cấp-tháo liên tục tương đối kín bằng hai vít tải điều khiển độc lập. Đồng thời, một phần khí nhiệt phân được thu hồi và đưa trở lại vùng sinh nhiệt để đốt thử cấp tạo nhiệt cho quá trình nhiệt phân, qua đó hướng đến giảm lượng trấu và than phải oxy hóa trực tiếp trong buồng phản ứng và giảm khí phát thải. Kết quả thiết kế và chế tạo là cơ sở để tiếp tục thử nghiệm có tải, đánh giá năng suất, hiệu suất thu hồi và chất lượng than, khả năng tự duy trì nhiệt, hiệu quả tách bụi và phát thải; từ đó đồng bộ và tối ưu các thông số cấp-tháo liệu, cấp không khí và hồi lưu khí nhiệt phân và nhiệt độ nhiệt phân.

Từ khóa: Than sinh học; trấu; nhiệt phân liên tục; hồi lưu khí nhiệt phân; cyclone.

SOME RESULTS ON THE DESIGN AND FABRICATION OF A CONTINUOUS PYROLYSIS PROTOTYPE FOR RICE-HUSK BIOCHAR PRODUCTION BASED ON AUTOTHERMAL OPERATION AND PYROLYSIS-GAS RECIRCULATION

ABSTRACT

This study aimed to design and fabricate a rice-husk pyrolysis prototype intended for continuous operation, with a nominal biochar production capacity of 30 kg/h. Based on the principle of a semi-continuous vertical reactor, the main components were sized, modeled in three dimensions, detailed in fabrication drawings, and manufactured. The system comprises independently controlled screw conveyors for rice-husk feeding and biochar discharge, a reaction chamber, a pyrolysis-gas collection and recirculation line, a dust-separation cyclone, and a temperature-monitoring and safety-control system. The design specifies a rice-husk feed rate of 50.0–55.6 kg/h and a calculated gas flow rate through the cyclone of 200 m³/h. The mechanical, electrical, and control assemblies were installed and subjected to initial no-load testing. Compared with the semi-continuous reactor, the main difference of the proposed prototype is the conversion of cyclic feeding and discharging into relatively sealed, continuous solids handling using two independently controlled screw conveyors. In addition, part of the pyrolysis gas is recovered and recirculated to the heat-generation zone for secondary combustion, thereby supplying heat to the pyrolysis process. This configuration is intended to reduce the amount of rice husk and biochar that must be directly oxidized inside the reaction chamber and potentially reduce gaseous emissions. The design and fabrication results provide a basis for subsequent loaded experiments to determine the actual production capacity, biochar yield and quality, ability to sustain autothermal operation, cyclone dust-separation performance, and emissions. The experimental results will subsequently be used to coordinate and optimize the feeding and discharging rates, air supply, pyrolysis-gas recirculation, and pyrolysis temperature.

Keywords: Biochar; rice husk; continuous pyrolysis; gas recirculation; cyclone.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sinh khối nông nghiệp là nguồn nguyên liệu tái tạo lớn nhưng chưa được thu hồi tối ưu giá trị vật chất và năng lượng. Trong chuỗi lúa

gạo, trấu tập trung tại nhà máy xay xát nên thuận lợi hơn rơm rạ về thu gom, bảo quản. Năm 2023, sản lượng lúa thế giới đạt xấp xỉ 800 triệu tấn (FAOSTAT); trấu chiếm khoảng

¹ Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

² Trung tâm Nghiên cứu và Chuyển giao công nghệ Cơ điện nông nghiệp miền Trung

*Tác giả liên hệ: dmcuong@hueuni.edu.vn

20% khối lượng thóc, tương ứng 160 triệu tấn/năm (IRRI, n.d.). Tại Việt Nam, sản lượng lúa năm 2025 đạt khoảng 43,5 triệu tấn, phát sinh xấp xỉ 8,7 triệu tấn trấu (FAO, 2025; Cục Thống kê, 2026; IRRI, n.d.; Goodman, 2020). Nguồn nguyên liệu này đặt ra yêu cầu phát triển công nghệ chuyển hóa phù hợp với tính chất phân tán của vùng nguyên liệu và quy mô xay xát.

Trấu hiện được dùng để đốt cấp nhiệt, ép viên, khí hóa, làm vật liệu/chất hấp phụ, hoặc đốt thu tro giàu silica. Tuy giúp thay thế nhiên liệu và vật liệu truyền thống, hiệu quả các giải pháp phụ thuộc vào độ ẩm, quy mô, công nghệ và thị trường. Đốt hở gây ô nhiễm và thất thoát năng lượng, còn thu tro kỹ thuật đòi hỏi kiểm soát chặt nhiệt độ và tạp chất. Do đó, nhiệt phân trấu sản xuất than sinh học (biochar) là hướng đi vừa tạo sản phẩm giá trị, vừa tận dụng năng lượng trong quá trình nhiệt phân (Goodman, 2020; Karam và cs., 2022; Herrera và cs., 2022).

Than sinh học (Biochar) là vật liệu giàu carbon tạo ra từ phân hủy nhiệt sinh khối thiếu oxy. Cấu trúc xốp, diện tích bề mặt và thành phần khoáng giúp biochar cải thiện tính chất đất, giữ nước, dinh dưỡng, làm chất mang phân bón/vi sinh và hấp phụ chất ô nhiễm. Trấu giàu tro và silica giúp bổ sung silicon cho cây và chế tạo vật liệu hấp phụ (Joseph và cs., 2021; Karam và cs., 2022; Herrera và cs., 2022). Nhiệt phân trấu còn chuyển carbon sang dạng bền và giảm phát thải khí nhà kính toàn vòng đời nhờ tận dụng khí-nhiệt trong quá trình nhiệt phân. Lợi ích này chỉ đạt được khi sinh khối khai thác bền vững, khí nhiệt phân được đốt sạch, tận dụng nhiệt dư và than được sử dụng lưu giữ carbon thay vì đốt lại (Woolf và cs., 2010; Lehmann và cs., 2021; Chiaramonti và cs., 2024; Canatoy và cs., 2022).

Công nghệ nhiệt phân được chia thành công nghệ nhiệt phân chậm, trung bình (ưu tiên thu than) và nhanh (ưu tiên sản phẩm lỏng, đòi hỏi nghiêm ngặt về gia nhiệt, làm nguội và xử lý nguyên liệu). Về thiết bị gồm

có, Lò mẻ: Cấu tạo đơn giản nhưng năng suất thấp, chất lượng thiếu ổn định và tốn nhân công; Lò trục vít và lò quay: Vận hành liên tục, kiểm soát thời gian lưu tốt nhưng hệ thống truyền động, làm kín và xử lý tar-bụi phức tạp; Lò đứng: Tận dụng trọng lực, kết cấu gọn nhưng cần duy trì ổn định vùng phản ứng, phân phối khí và hạn chế cháy quá mức làm giảm hiệu suất than (Al-Rumaihi và cs., 2022; Moser và cs., 2023).

Các nghiên cứu trên trấu đã khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ, thời gian lưu đến hiệu suất, độ xốp, khả năng hấp phụ và phát triển hệ thống khí hóa-carbon hóa liên tục (Karam và cs., 2022; Homchat và Ramphueiphad, 2022). Chất bay hơi có thể đốt đồng sản xuất năng lượng nhưng cần kiểm soát bụi mịn và sản phẩm cháy dở (Dunnigan và cs., 2018a, 2018b). Hệ thống tự cấp nhiệt hoặc hồi lưu khí giúp giảm nhu cầu nhiên liệu ngoài nhưng phải cân bằng giữa cung cấp nhiệt, oxy, hiệu suất thu hồi và phát thải (Canatoy và cs., 2022; Ordonez-Loza và cs., 2024). Nhược điểm kỹ thuật chính của trấu là khối lượng thể tích thấp, lưu thông kém, tro-silica cao, dễ cuốn bụi và biến động chất lượng than.

Lò đứng theo mẻ/bán liên tục của Cường và cs. (2018, 2023) đạt hiệu suất thu than trấu 54–60% ở 500 °C. Tuy nhiên, hệ thống còn hạn chế: cấp/tháo/làm nguội thủ công; dễ lọt không khí gây cháy than khi mở cửa; thu hồi khí chưa ổn định; thông số phụ thuộc vận hành. Từ thực tế đó, nghiên cứu này đề xuất cấu hình lò đứng liên tục sử dụng hai vít tải cấp-tháo tương đối kín điều khiển độc lập, kết hợp cấp khí kiểm soát và hồi lưu khí nhiệt phân về vùng sinh nhiệt. Hệ thống được tính toán, thiết kế và chế tạo với năng suất than danh nghĩa 30 kg/h.

II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở dữ liệu thực nghiệm kế thừa

Nghiên cứu của Cường và cs. (2018) đã thiết kế, chế tạo và sản xuất thử nghiệm thiết bị tạo than sinh học từ rơm và trấu. Kết quả này được kế thừa ở cấp nguyên lý: nhiệt phân trong môi trường thiếu oxy; bố trí buồng phản

ứng đứng để vật liệu dịch chuyển nhờ trọng lực; duy trì vùng phản ứng bằng cấp không khí có giới hạn; và tháo than theo chu kỳ. Với nguyên lý tháo than bán liên tục được thực hiện bởi Cường và cs. (2023), các thông số cơ bản gồm đường kính buồng phản ứng 1,0 m, chiều cao 1,2 m, sức chứa danh nghĩa 100 kg trấu, nhiệt độ vận hành 400-600 °C; lần tháo than đầu sau khoảng 60 phút và các chu kỳ tiếp theo khoảng 30 phút. Hiệu suất thu hồi than trấu được ghi nhận trong khoảng 54-60%. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này tiếp tục phát triển nguyên lý lò đứng, theo hướng cấp - tháo bằng hai vít tải điều khiển độc lập, thu khí nhiệt phân, tách bụi và hồi lưu một phần dòng khí về vùng sinh nhiệt.

2.2. Phương pháp tính toán và xác lập thông số thiết kế

Năng suất than danh nghĩa được chọn $Q_c = 30$ kg/h. Với hiệu suất thu hồi than $Y_c = 0,54-0,60$, lưu lượng trấu khô yêu cầu được xác định theo công thức:

$$Q_f = \frac{Q_c}{Y_c} = \frac{30}{0,54 \div 0,60} = 50,0 \div 55,6 \text{ kg/h} \quad (1)$$

Trong đó: Q_c là năng suất thiết bị (kg/h), Q_f là lưu lượng cấp trấu (kg/h), Y_c là hiệu suất thu hồi (%).

Hệ thống được xác lập theo các yêu cầu: cấp và tháo liệu ổn định, điều chỉnh độc lập; hạn chế không khí xâm nhập; duy trì các vùng phản ứng; thu, tách bụi và hồi lưu khí nhiệt phân; giám sát nhiệt độ và dừng an toàn. Nhiệt độ thiết kế của vùng nhiệt phân là 500 °C, với dải khảo sát dự kiến 400-550 °C.

Năng suất lý thuyết của vít tải được xác định theo công thức (CEMA, 2021):

$$Q = 60\rho\psi k_\alpha \left[\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \right] S \cdot n \quad (2)$$

Trong đó: Q là năng suất khối lượng (kg/h); D , d và S lần lượt là đường kính cánh, đường kính trục và bước vít (m); n là tốc độ quay (vòng/phút); ρ là khối lượng thể tích xộp (kg/m³); ψ là hệ số điền đầy và k_α là hệ số hiệu chỉnh theo góc nghiêng; ψ và k_α không thứ nguyên.

Tốc độ quay sơ bộ của trục vít được xác định theo công thức:

$$n_{\text{vít}} = \frac{Q_{yc}}{60\rho\psi k_\alpha \left[\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \right] S} \quad (3)$$

Trong đó: $n_{\text{vít}}$ (vòng/phút), và Q_{yc} là năng suất yêu cầu (kg/h). Giá trị tốc độ tính toán chỉ được dùng để lựa chọn sơ bộ động cơ giảm tốc và dải điều chỉnh của biến tần. Do khối lượng thể tích xộp, hệ số điền đầy và độ trượt thay đổi theo trạng thái của trấu và than trấu, tốc độ làm việc phải được hiệu chuẩn bằng chạy nguội để xây dựng quan hệ thực nghiệm $Q = f(n)$. Đối với vít nghiêng trên 20°, cần kiểm tra bổ sung theo điều kiện làm việc thực tế.

Buồng nhiệt phân được chọn dạng trụ đứng. Thể tích hình học của phần trụ và thời gian lưu biểu kiến của lớp vật liệu được xác định theo:

$$V_r = \frac{\pi D_r^2 H_r}{4}; \tau = \frac{M_{hold}}{Q_f} \quad (4)$$

Trong đó: V_r là thể tích phần trụ (m³); D_r và H_r là đường kính và chiều cao hữu ích của buồng phản ứng (m); τ là thời gian lưu biểu kiến (h); M_{hold} là khối lượng vật liệu lưu giữ (kg). Thời gian lưu xác định theo công thức (4) là giá trị biểu kiến. Khi thử nghiệm, thông số này cần được hiệu chỉnh theo khối lượng vật liệu lưu giữ và lưu lượng cấp - tháo thực tế.

Đường kính ống dẫn khí được xác định từ lưu lượng thể tích Q_g và vận tốc thiết kế v_g theo phương trình liên tục:

$$D_g = \sqrt{\frac{4Q_g}{\pi v_g}} \quad (5)$$

Trong đó: D_g là đường kính trong của ống khí (m), Q_g là lưu lượng thể tích (m³/s) và v_g là vận tốc khí thiết kế (m/s). Cyclone được tính sơ bộ cho $Q_g = 200$ m³/h (tương đương 0,0556 m³/s). Đường kính thân và vận tốc cửa vào được xác định theo:

$$D_c = \sqrt{\frac{4Q_g}{\pi w_b}}; v_i = \frac{Q_g}{ab} \quad (6)$$

Trong đó: D_c , a và b có đơn vị m; w_b và v_i có đơn vị m/s. Các kích thước được xác lập theo tỷ lệ hình học của cyclone đã chọn (Hoffmann và Stein, 2008; Shepherd và Lapple, 1939). Trở lực được ước tính theo:

$$\Delta P_c = Eu \frac{\rho_g v_i^2}{2} \quad (7)$$

Trong đó: ΔP_c là trở lực cyclone (Pa), ρ_g là khối lượng riêng của khí (kg/m^3), v_i là vận tốc cửa vào (m/s) và E_u là số Euler không thứ nguyên. Trở lực và hiệu suất tách bụi thực tế phải được kiểm chứng bằng đo chênh áp và nồng độ bụi trước - sau cyclone khi vận hành thực tế.

2.3. Phương pháp thiết kế, chế tạo và kiểm tra

Thiết bị được thiết kế trên SOLIDWORKS 2017 với mô hình 3D và bản vẽ chế tạo cho các bộ phận chính: vít cấp trấu, buồng nhiệt phân, vít tháo than, cyclone, đường ống thu hồi khí và khung máy. Các chi tiết được gia công, lắp ráp và kiểm tra về kích thước, độ đồng tâm, khả năng quay của cơ cấu truyền động cùng độ kín đường khí.

Hệ thống điện-điều khiển giúp cấp nguồn, bảo vệ và vận hành độc lập các động cơ, quạt, cơ cấu cấp-tháo liệu. Biến tần điều chỉnh tốc độ vít tải để kiểm soát lưu lượng vật liệu và thời gian lưu. Cảm biến nhiệt giám sát nhiệt độ vùng phản ứng, kết hợp chương trình điều khiển thực hiện trình tự khởi động-dừng, cảnh báo và liên động an toàn. Sau chế tạo, thiết bị được kiểm tra ngoại quan, chạy thử không tải và đánh giá độ phù hợp với bản vẽ thiết kế; khả năng vận hành có tải sẽ được xác nhận trong nghiên cứu tiếp theo.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

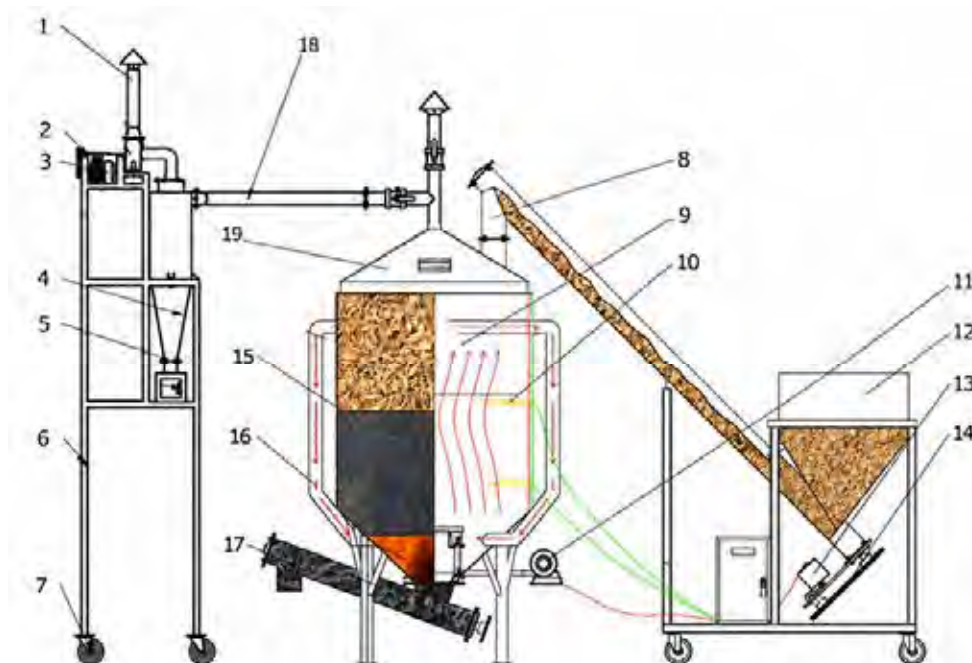
3.1. Lựa chọn nguyên lý, cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu thiết bị nhiệt phân lò đứng bán liên tục (Cường và cs., 2018; 2023), hệ thống được phát triển với các yêu cầu chính: năng suất than sinh học danh nghĩa 30 kg/h; cấp trấu và tháo than liên tục, có khả năng điều chỉnh độc lập; hạn chế không khí xâm nhập vào buồng phản ứng; duy trì hoạt động ổn định; thu bụi và hồi lưu một phần khí nhiệt phân để tận dụng nhiệt; giám sát nhiệt độ và trạng thái hoạt động của

các bộ phận truyền động; đồng thời bảo đảm cảnh báo, liên động và dừng thiết bị an toàn khi xảy ra sự cố. Khác với thiết bị theo mẻ phải dừng để nạp - tháo và thiết bị bán liên tục vẫn tháo than, nạp bù theo chu kỳ, nguyên lý này sử dụng vít cấp ở đỉnh và vít tháo ở đáy để duy trì dòng vật liệu theo chiều đứng, hạn chế mở buồng phản ứng và cho phép điều chỉnh độc lập lượng cấp, lượng tháo và thời gian lưu. Đặc biệt là một phần khí nhiệt phân được thu hồi và đưa trở lại vùng sinh nhiệt để đốt thứ cấp tạo nhiệt cho quá trình nhiệt phân, qua đó hướng đến giảm lượng trấu và than phải oxy hóa trực tiếp trong buồng phản ứng và giảm khí phát thải.

Hệ thống gồm phễu và vít cấp trấu, buồng phản ứng dạng trụ đứng được cách nhiệt bởi sợi thủy tinh, cụm cấp không khí hạn chế, vít tháo than, hệ thống thu hồi khí nhiệt phân, cyclone, cảm biến nhiệt độ và tủ điều khiển. Theo nguyên lý thiết kế, trấu được cấp kín từ đỉnh, lần lượt đi qua vùng sấy, nhiệt phân, sinh nhiệt/oxy hóa cục bộ và lấy than; than được tháo ở đáy và làm nguội trong điều kiện hạn chế oxy. Không khí được cấp có giới hạn nhờ quạt cấp khí vào vùng sinh nhiệt để duy trì oxy hóa một phần vật liệu và khí cháy; phần vật liệu còn lại được carbon hóa trong điều kiện thiếu oxy. Một phần khí và hơi nhiệt phân được hồi lưu về vùng sinh nhiệt để đốt, tận dụng năng lượng của dòng khí; phần khí còn lại được dẫn qua cyclone để giảm bụi trước khi thoát ra hoặc xử lý tiếp.

Sau giai đoạn môi, nhiệt từ oxy hóa cục bộ và đốt khí nhiệt phân hồi lưu dự kiến bù đủ nhu cầu nhiệt của quá trình. Khả năng tự duy trì nhiệt phụ thuộc tỷ lệ trấu-không khí, nhiệt trị và lưu lượng khí hồi lưu, tổn thất nhiệt cùng thời gian lưu; các thông số này cần xác định qua vận hành thực tế. Khi vận hành, cần kiểm soát tar và bụi trong đường khí, đồng thời phối hợp tốc độ hai vít tải để ổn định lượng cấp và thời gian lưu.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý hệ thống nhiệt phân liên tục có thu bụi và hồi lưu khí nhiệt phân
1. Ống thoát khí, 2. Quạt ly tâm, 3. Động cơ, 4. Cyclone, 5. Ống thu bụi, 6. Khung, 7. Bánh xe, 8. Vít tải, 9. Buồng phản ứng, 10. Cảm biến nhiệt, 11. Quạt cấp khí, 12. Phễu, 13. Động cơ, 14. Bộ truyền xích, 15. Vùng trấu, 16. Ống thu hồi khí nhiệt phân, 17. Vít tải tháo than, 18. Ống dẫn khí, 19. Nắp buồng phản ứng.

Hệ thống điện cấp nguồn cho động cơ vít cấp, vít tháo, quạt hút, quạt cấp khí và thiết bị đo. Cảm biến truyền nhiệt độ buồng phản ứng về bộ điều khiển: khi thấp hơn cài đặt, hệ thống tăng không khí cấp và/hoặc khí hồi lưu; khi vượt giới hạn, lượng không khí sẽ giảm để tránh quá nhiệt. Trường hợp quá nhiệt, mất tín

hiệu cảm biến hoặc quá tải động cơ, hệ thống sẽ cảnh báo và tự động dừng cấp liệu để bảo đảm an toàn.

Bảng 1 đối chiếu mô hình đề xuất với một số nghiên cứu tiêu biểu về thiết bị nhiệt phân liên tục, lò vít và hệ thống tận dụng năng lượng từ khí nhiệt phân.

Bảng 1. So sánh mô hình đề xuất với một số thiết bị nhiệt phân đã công bố

Cấu hình và ưu điểm	Hạn chế	Khác biệt của mô hình đề xuất	Nguồn tham khảo
Lò đứng theo mẻ, hoặc bán liên tục; kết cấu đơn giản; vùng phản ứng được duy trì qua các chu kỳ tháo than và nạp bù.	Cấp-tháo liệu còn thủ công; việc mở cửa có thể làm không khí xâm nhập; khí nhiệt phân chưa được thu hồi và sử dụng ổn định.	Cấp và tháo liệu bằng hai vít điều khiển độc lập, tương đối kín; tích hợp đường hồi lưu khí và cyclone tách bụi.	Cường và cs. (2018, 2023)
Trấu được vận chuyển bằng vít trong ống carbon hóa; sử dụng khí nóng từ lò khí hóa và đã được thử nghiệm ở chế độ liên tục.	Thiết bị có quy mô nhỏ; vít làm việc trực tiếp trong vùng nhiệt độ cao và cần nguồn khí nóng từ cụm khí hóa.	Sử dụng buồng phản ứng đứng, vật liệu dịch chuyển nhờ trọng lực; vít không chạy dọc vùng nhiệt phân.	Homchat và Ramphueiphad (2022)

Lò vít liên tục gia nhiệt ngoài; có thể kiểm soát nhiệt độ và thời gian lưu của vật liệu.	Quy mô phòng thí nghiệm, chưa đánh giá khả năng tự cấp nhiệt.	Hướng đến tự duy trì nhiệt nhờ oxy hóa có kiểm soát và đốt một phần khí nhiệt phân hồi lưu.	Rego và cs. (2022)
Phân tích tích hợp các giai đoạn sấy, nhiệt phân và đốt khí-hơi nhiệt phân; chỉ ra khả năng sử dụng sản phẩm khí để đáp ứng nhu cầu nhiệt của quá trình.	Chủ yếu là mô hình năng lượng dựa trên kết quả thực nghiệm phòng thí nghiệm	Ứng dụng nguyên lý tận dụng khí nhiệt phân vào mô hình chế tạo cụ thể	Ordenez-Loza và cs. (2024)
Buồng phản ứng đứng; hai vít cấp-tháo độc lập; cấp không khí có kiểm soát; hồi lưu khí nhiệt phân; cyclone và giám sát nhiệt độ.	Chưa thực nghiệm xác nhận khả năng vận hành liên tục, tự duy trì nhiệt và phát thải.	-	Nghiên cứu này

Đóng góp chính của nghiên cứu là phát triển lò đứng bán liên tục thành mô hình định hướng cấp-tháo liên tục bằng hai vít tải điều khiển độc lập, kết hợp cấp không khí có kiểm soát và hồi lưu một phần khí nhiệt phân về vùng sinh nhiệt. Khí hồi lưu được đốt để hỗ trợ cung cấp nhiệt, qua đó hướng đến giảm lượng trấu và than phải oxy hóa trực tiếp trong buồng phản ứng.

Điểm khác biệt của mô hình nằm ở việc tích hợp buồng phản ứng đứng, cơ cấu cấp-tháo tương đối kín, đường hồi lưu khí, cyclone và

giám sát nhiệt độ trong một hệ thống có năng suất than danh nghĩa 30 kg/h, không phải ở từng bộ phận riêng lẻ. Do thiết bị mới được kiểm tra không tải, khả năng vận hành liên tục, tự duy trì nhiệt, hiệu suất thu hồi, chất lượng than và phát thải cần được xác nhận bằng thử nghiệm nóng có tải.

3.2. Kết quả tính toán và thiết kế các bộ phận chính

Các thông số thiết kế chính được tổng hợp ở Bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp các thông số kỹ thuật thiết kế chính của hệ thống thiết bị

TT	Hạng mục	Thông số kỹ thuật thiết kế
1	Năng suất và chế độ làm việc	Than sinh học danh nghĩa: 30 kg/h; lưu lượng trấu khô: 50,0-55,6 kg/h; cấp-tháo liệu liên tục, điều chỉnh độc lập.
2	Chế độ nhiệt	Nhiệt độ thiết kế khoảng 500 °C; dải khảo sát dự kiến 400-550 °C; hình thành các vùng sấy, nhiệt phân, sinh nhiệt/oxy hóa và thu than theo chiều đứng.
3	Vít cấp trấu	D = 102 mm; d = 42,2 mm; S = 81 mm; L = 2,5 m; n = 50 vòng/phút; Q _{lt} = 57,15 kg/h; động cơ 1,1 kW.
4	Vít tháo than	D = 102 mm; d = 42,2 mm; S = 81 mm; L = 1,0 m; n tính toán ≈ 10,4 vòng/phút; dải hiệu chỉnh ban đầu 8–20 vòng/phút; động cơ 0,37 kW.
5	Buồng phản ứng	Đường kính danh nghĩa 1,0 m; chiều cao hữu ích khoảng 1,2 m; thể tích phần trụ 0,943 m ³ ; sức chứa hình học xấp xỉ 102 kg trấu ở ρ = 108,33 kg/m ³ .

6	Cyclone và đường khí	$Q_g = 200 \text{ m}^3/\text{h}$ (giả thiết thiết kế sơ bộ); $D_c \approx 168 \text{ mm}$; $d \approx 109 \text{ mm}$; cửa vào $\approx 77 \times 49 \text{ mm}$; chiều cao thân $\approx 767 \text{ mm}$; trở lực ước tính $\approx 202 \text{ Pa}$.
7	Thu và hồi lưu khí	Khí từ buồng phản ứng đi qua các nhánh hồi lưu đặt trong buồng phản ứng, van điều chỉnh, cửa kiểm tra và vị trí tháo vệ sinh.
8	Điện và điều khiển	Nguồn động lực 3 pha hoặc 1 pha; nguồn điều khiển 24 VDC; PLC/HMI và biến tần; cảm biến nhiệt độ, và trạng thái quá tải; có cảnh báo, liên động và dừng khẩn.
9	Kích thước bao hệ thống	$D \times R \times C = 4.230 \times 1.080 \times 2.950 \text{ mm}$; tích hợp cấp liệu, buồng phản ứng, tháo than, cyclone, quạt và tủ điều khiển.

Hệ thống thiết bị gồm cụm cấp trấu bằng vít tải, buồng nhiệt phân hình trụ đứng có cách nhiệt, cụm cấp không khí, vít tháo than, hệ thống thu và hồi lưu khí nhiệt phân, cyclone tách bụi, quạt hút, hệ thống đo nhiệt

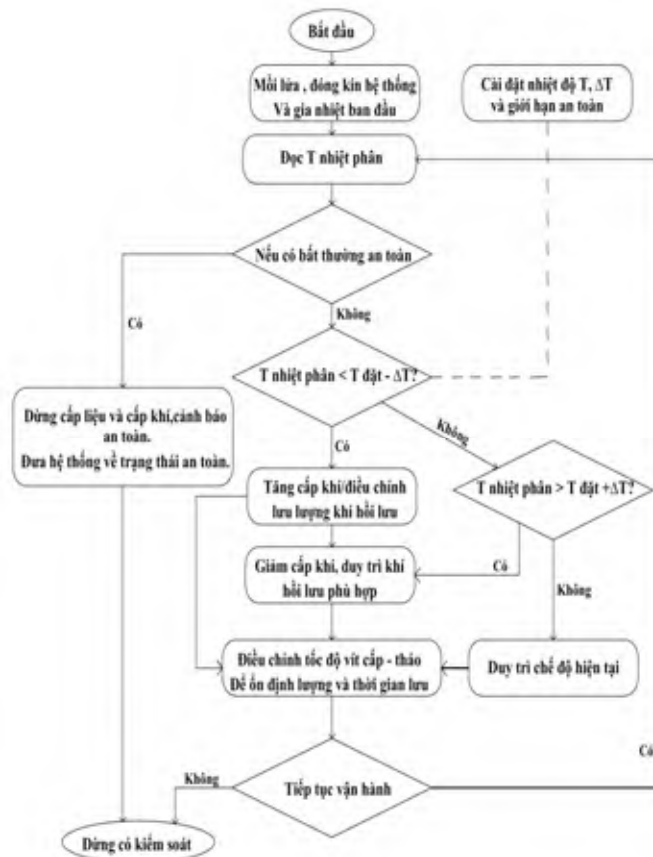
độ, tủ điện – điều khiển và các khung đỡ phụ trợ. Các cụm cấp liệu, tháo than và xử lý khí được bố trí liên hoàn nhằm hỗ trợ quá trình nhiệt phân liên tục và hạn chế không khí xâm nhập vào buồng phản ứng.



Hình 2. Bản vẽ lắp tổng thể và mô hình 3D của hệ thống thiết bị

1. Vít tải cấp liệu; 2. Phễu cấp liệu; 3. Khung vít tải cấp liệu; 4. Bộ truyền xích; 5. Động cơ giảm tốc; 6. Tủ điều khiển; 7. Ống thu hồi khí; 8. Quạt thổi khí; 9. Thân buồng phản ứng; 10. Đồng hồ nhiệt độ; 11. Cửa môi lửa; 12. Chân; 13. Đáy phản ứng; 14. Vít tải tháo than; 15. Mặt bích ghép vít tải; 16. Bánh xe; 17. Khung đỡ cyclone; 18. Hộp đựng bụi; 19. Mặt bích lắp hộp đựng bụi; 20. Đoạn côn cyclone; 21. Thân cyclone; 22. Động cơ; 23. Bộ truyền đai; 24. Truyền động quạt; 25. Ổ lăn; 26. Quạt hút ly tâm; 27. Ống dẫn khí; 28. Ống thoát khí; 29. Buồng tách bụi; 30. Ống dẫn khí vào cyclone; 31. Mặt bích lắp ống dẫn khí; 32. Van điều chỉnh; 33. Ống thoát khí trực tiếp; 34. Nắp buồng phản ứng; 35. Cửa cấp liệu; 36. Ống tháo dịch ngưng.

Mô hình 3D (hình 2) được sử dụng để kiểm tra vị trí lắp, không gian bảo trì và liên kết giữa các cụm. Cyclone, nhánh hồi lưu và nhánh xả được bố trí van điều chỉnh, cửa kiểm tra và vị trí tháo vệ sinh. So với lò bán liên tục, phương án tích hợp hai vít kín, thu bụi và hồi lưu khí khắc phục các hạn chế về thao tác cấp - tháo thủ công, thất thoát năng lượng theo khí và khó kiểm soát thời gian lưu. Tuy vậy, hiệu quả tách bụi và mức tận dụng nhiệt cần được xác định bằng thực nghiệm.



Hình 3. Quy trình vận hành và thuật toán điều khiển thiết bị: (a) quy trình vận hành; (b) lưu đồ thuật toán điều khiển.

Thuật toán điều khiển giám sát nhiệt độ và trạng thái hai vít tải (Hình 3b). Khi nhiệt độ thấp hơn $T_{đặt} - \Delta T$, hệ thống tăng có giới hạn lượng không khí cấp và/hoặc khí hồi lưu; khi nhiệt độ cao hơn $T_{đặt} + \Delta T$, lưu lượng khí được giảm để giảm quá trình cháy; trong dải cho phép, chế độ vận hành được duy trì. Khi xảy ra quá nhiệt, hoặc mất tín hiệu cảm biến, hệ thống dừng cấp liệu và phát cảnh báo.

3.3. Thiết kế quy trình vận hành và hệ thống điện - điều khiển

Quy trình vận hành được trình bày ở Hình 3a. Trấu khô được vít tải cấp liên tục vào buồng phản ứng. Sau khi mồi lửa, quạt cấp khí được điều chỉnh để duy trì quá trình nhiệt phân ở 400–550 °C. Than được vít tải tháo liên tục, làm nguội trong điều kiện hạn chế oxy và đóng bao khi đạt nhiệt độ an toàn.

Hệ thống điện gồm mạch động lực ba pha (hoặc 1 pha), mạch điều khiển 24 VDC, biến tần, cảm biến nhiệt độ, bảo vệ quá tải và dừng khẩn. Thiết bị phải được tiếp địa; tủ điện luôn đóng kín và nguồn điện phải được ngắt, khóa trước khi kiểm tra hoặc sửa chữa.

3.4. Kết quả chế tạo, kiểm tra không tải và đánh giá

Mô hình thiết bị đã được chế tạo và lắp ráp, gồm buồng phản ứng có lớp cách nhiệt, phễu và vít cấp trấu, vít tháo than, cửa môi, quạt cấp khí, đường thu hồi khí nhiệt phân,

cyclone, các bộ truyền động và tủ điều khiển (Hình 4). Các cụm được bố trí theo bản vẽ tổng thể; hai vít sử dụng bộ truyền động độc lập và tuyến khí được kết nối từ buồng phản ứng đến cyclone.



Hình 4. Mô hình thiết bị sau chế tạo và lắp ráp

1. Vít cấp liệu; 2. Buồng nhiệt phân; 3. Ống hồi lưu khí nhiệt phân; 4. Vít tháo than; 5. Cyclone tách bụi.

Kiểm tra không tải bước đầu cho thấy khung và các cụm thiết bị được lắp đúng vị trí; vít cấp và vít tháo quay ổn định, đúng chiều và có thể điều chỉnh độc lập; quạt, biến tần, tín hiệu đo và chức năng dừng hoạt động theo thiết kế. Tuyến thu hồi khí đã được kết nối, tuy nhiên cần tiếp tục thử kín và kiểm tra trở lực trước khi vận hành nóng.

Các cụm chính được liên kết bằng mối ghép tháo được, thuận lợi cho việc điều chỉnh, vệ sinh và bảo trì. Các van trên đường khí cho phép điều chỉnh lưu lượng khí cấp, khí hồi lưu và khí thải theo chế độ vận hành. Thiết bị sử dụng vật liệu và linh kiện phổ biến trong nước, tạo thuận lợi cho gia công, thay thế và sửa chữa tại địa phương.

Kết quả trên xác nhận mức độ hoàn thiện ban đầu về cơ khí, điện và điều khiển. Hiệu quả nhiệt phân, khả năng tự sinh nhiệt, mức

độ ổn định của quá trình, năng suất, chất lượng than và hiệu quả thu hồi khí chỉ có thể được đánh giá sau khi thử tải và vận hành thực nghiệm.

Về hướng thiết kế, việc cấp-tháo liên tục và kiểm soát dòng khí phù hợp với xu hướng phát triển thiết bị carbon hóa trấu liên tục của Homchat và Ramphueiphad (2022) và các phân tích về lò trực vít của Moser và cs. (2023). Tuy nhiên, mô hình trong nghiên cứu này mới được kiểm tra không tải; cần thiết phải có số liệu vận hành, để có thể đối sánh với các nghiên cứu trước đó.

3.5. Tồn tại và định hướng nghiên cứu

Nghiên cứu mới dừng ở giai đoạn thiết kế, chế tạo và kiểm tra không tải; chưa tiến hành vận hành thực nghiệm để đánh giá các thông số làm việc, năng suất, hiệu suất thu hồi than, chất lượng than, khả năng tự sinh nhiệt, hiệu

quả hồi lưu khí và các yếu tố môi trường. Vì vậy, kết quả hiện tại chưa khẳng định hiệu quả thực tế của hệ thống.

Cần tiếp tục triển khai thực nghiệm trên hệ thống, với các thông số thí nghiệm thay đổi, kiểm tra độ kín, độ ổn định, vận hành ở nhiệt độ 400–550 °C với các mức tải khác nhau để đánh giá phân bố nhiệt, thời gian lưu, năng suất, hiệu suất thu hồi than và khả năng tự duy trì nhiệt; đồng thời phân tích các chỉ tiêu chất lượng than; và thành phần khí, bụi, hắc ín, điện năng và mức độ an toàn khi vận hành kéo dài. Trên cơ sở đó, các thông số cấp-tháo liệu, cấp khí và hồi lưu khí sẽ được đồng bộ, hiệu chỉnh và tối ưu hóa.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này chỉ dừng lại ở việc thiết kế và chế tạo mô hình thiết bị nhiệt phân lò đứng định hướng vận hành liên tục, với năng suất than sinh học danh nghĩa 30 kg/h. Một số kết quả chính như sau:

1. Hệ thống sử dụng hai vít tải điều khiển độc lập để cấp trấu và tháo than, cyclone tách bụi và đường hồi lưu một phần khí nhiệt phân về vùng sinh nhiệt. Cấu hình này hướng đến tận dụng nhiệt từ quá trình đốt khí nhiệt phân, giảm lượng trấu và than phải oxy hóa trực tiếp để cung cấp nhiệt cho quá trình.

2. Các thông số thiết kế chính gồm lưu lượng trấu 50,0–55,6 kg/h; buồng phản ứng có đường kính danh nghĩa 1.000 mm và chiều cao hữu ích khoảng 1.200 mm; cyclone được tính toán sơ bộ cho lưu lượng khí 200 m³/h. Hệ thống điện-điều khiển cho phép điều chỉnh độc lập các truyền động, giám sát nhiệt độ và thực hiện các chức năng cảnh báo, liên động an toàn. Mô hình đã được lắp ráp và kiểm tra không tải bước đầu.

3. Nghiên cứu mới dừng ở kết quả thiết kế, chế tạo và kiểm tra không tải. Khả năng cấp-tháo liên tục, mức tự duy trì nhiệt, hiệu quả hồi lưu khí, hiệu suất tách bụi, năng suất, hiệu suất thu hồi và chất lượng than cần được xác nhận bằng thử nghiệm sản xuất, qua đó đồng bộ và tối ưu các thông số làm việc của hệ thống thiết bị.

Lời cảm ơn/Acknowledgement: Bài báo này được hỗ trợ kinh phí từ đề tài KH&CN cấp Bộ (B2026-DHH-04), năm 2026.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H. & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112715. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112715>
2. Canatoy, R.C., Jeong, S.T., Galgo, S.J.C., Kim, P.J. & Cho, S.R. (2022). Biochar as soil amendment: Syngas recycling system is essential to create positive carbon credit. *Science of the Total Environment*, 809, 151140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151140>
3. Chiamonti, D., Lehmann, J., Berruti, F. et al. (2024). Biochar is a long-lived form of carbon removal, making evidence-based CDR projects possible. *Biochar*, 6, 81. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00366-7>
4. Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA). (2021). ANSI/CEMA 350-2021: Screw Conveyors for Bulk Materials. <https://cemanet.org/ansi-standards/>
5. Cục Thống kê. (2026). Thông cáo báo chí tình hình kinh tế - xã hội quý IV và năm 2025. <https://www.nso.gov.vn/tin-tuc-thong-ke/2026/01/thong-cao-bao-chi-tinh-hinh-kinh-te-xa-hoi-quy-iv-va-nam-2025/>
6. Đỗ Minh Cường, Nguyễn Trung Kiên & Nguyễn Thị Ngọc. (2018). Nghiên cứu thiết kế, chế tạo thiết bị và sản xuất thử nghiệm than sinh học từ rơm, trấu. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 19, 66–74.
7. Đỗ Minh Cường, Trần Đức Hạnh, Nguyễn Thị Ngọc và cs. (2023). Xây dựng mô hình nông hộ sản xuất than sinh học từ phế phẩm nông nghiệp và ứng dụng trong canh tác cây trồng tại tỉnh Thừa Thiên Huế. *Báo cáo tổng kết dự án TTH.2019-KC.05*.
8. Dunnigan, L., Ashman, P.J., Zhang, X. & Kwong, C.W. (2018a). Production of biochar from rice husk: Particulate emissions from the combustion of raw pyrolysis

volatiles. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1639-1645.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.107>

9. Dunnigan, L., Morton, B.J., Ashman, P.J., Zhang, X. & Kwong, C.W. (2018b). Emission characteristics of a pyrolysis-combustion system for the co-production of biochar and bioenergy from agricultural wastes. *Waste Management*, 77, 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.004>

10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). FAOSTAT: Crops and livestock products. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>.

11. Goodman, B.A. (2020). Utilization of waste straw and husks from rice production: A review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 143-162. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.001>

12. Herrera, K., Morales, L.F., Tarazona, N.A. et al. (2022). Use of biochar from rice husk pyrolysis: Part A: Recovery as an adsorbent in the removal of emerging compounds. *ACS Omega*, 7, 7625-7637. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06147>

13. Hoffmann, A.C. & Stein, L.E. (2008). *Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design, and Operation* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74696-6>

14. Homchat, K. & Ramphueiphad, S. (2022). The continuous carbonisation of rice husk on the gasifier for high yield charcoal production. *Results in Engineering*, 15, 100495. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100495>

15. International Rice Research Institute (IRRI). (n.d.). Rice husk. Rice Knowledge Bank. <https://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/rice-by-products/rice-husk>.

16. Joseph, S., Cowie, A.L., Van Zwieten, L. et al. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to

biochar. *GCB Bioenergy*, 13, 1731-1764. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12885>

17. Karam, D.S., Nagabovanalli, P., Rajoo, K.S. et al. (2022). An overview on the preparation of rice husk biochar, factors affecting its properties, and its agriculture application. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 21, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.07.005>

18. Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C.A. et al. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14, 883-892. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8>

19. Moser, K., Wopienka, E., Pfeifer, C., Schwarz, M., Sedlmayer, I. & Haslinger, W. (2023). Screw reactors and rotary kilns in biochar production—A comparative review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 174, 106112. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106112>

20. Rego, F., Xiang, H., Yang, Y., Ordovás, J.L., Chong, K., Wang, J., & Bridgwater, A.V. (2022). Investigation of the role of feedstock properties and process conditions on the slow pyrolysis of biomass in a continuous auger reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161, 105378. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105378>.

21. Ordonez-Loza, J., Bamdad, H., Spataro, S., Papari, S. & Berruti, F. (2024). Self-energized pyrolysis process for sustainable biochar production. *Energy & Fuels*, 38 (20), 19598-19610. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c03039>

22. Shepherd, C.B. & Lapple, C.E. (1939). Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors. *Industrial & Engineering Chemistry*, 31(8), 972-984. <https://doi.org/10.1021/ie50356a012>

23. Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J. & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1, 56. <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>

- Ngày gửi bài: 12/08/2026

- Ngày phản biện: 26/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 26/09/2026

EVALUATION OF A MECHANIZED RICE STRAW COMPOSTING MODEL FOR AGRICULTURAL COOPERATIVES IN HUE CITY, VIETNAM

Do Minh Cuong¹, Ve Quoc Linh¹, Nguyen Thi Ngoc¹, Hoang Thi Thai Hoa¹,
Tran Duc Hanh¹, Tran Vo Van May¹, Nguyen Van Hieu²,
Tran Thi Cam Nhung³, Nguyen Huu Diem Ha³, Nguyen Van Hung^{3*}

ABSTRACT

Rice production generates large quantities of straw. Although rice straw is collected and used for various purposes, a considerable quantity remains unutilized. In particular, low-value straw—such as moldy or weather-damaged straw and rice straw previously used for mushroom cultivation—is often difficult to store, transport, and reuse. Consequently, these residues are commonly burned in open fields or incorporated directly into flooded soils, raising various environmental concerns. This study evaluated mechanized windrow composting as a practical option for rice-straw utilization at both farm-household and agricultural-cooperative scales. A 45-day field demonstration was conducted at An Lo Agricultural Cooperative in Hue City, Vietnam, using locally available rice straw, cattle manure, and rice-husk ash. The first mechanical turning was performed immediately after windrow formation and simultaneously provided mixing, aeration, and the application of water, molasses, and a *Trichoderma*-based inoculant. Five sequential samples indicated progressive stabilization of the composting material: the C/N ratio decreased from 27.83 to 13.97, while the final organic matter content reached 31.12%. A preliminary demonstration using the DT39 rice variety recorded an observed yield that was 14.1% higher than that of the commercial organic fertilizer treatment. At an assumed annual production scale of 48 t, the estimated simple payback period was 2.65 years. A preliminary screening estimate indicated that diverting 2.2 t of rice straw from open-field burning could avoid approximately 0.17 t CO₂-eq of CH₄ and N₂O emissions per batch. These findings provide a practical basis for replicated testing and scaling up of mechanized rice-straw composting among farm households and agricultural cooperatives within circular agricultural systems.

Keywords: Agricultural cooperatives; Circular agriculture; Farm households; Mechanized composting; Organic fertilizer; Rice straw.

1. INTRODUCTION

Vietnam remains one of the world's major rice-producing countries (FAO, 2024; USDA Foreign Agricultural Service, 2025). Large rice harvests generate substantial quantities of straw, and where collection and utilization systems are weak, the residue is commonly burned or incorporated into flooded soil. Open burning releases particulate matter and gaseous air pollutants (Oanh, 2021; Phan & Dinh-Tri, 2024), including greenhouse gases such as CH₄ and N₂O (Romasanta et al., 2017; Allen et al., 2020). Incorporation of rice straw into flooded soils can enhance anaerobic decomposition and seasonal methane emissions (Sander et al., 2014; Allen et al., 2020). These effects create a strong need for residue-management pathways that are technically feasible,

environmentally preferable, and economically compatible with smallholder and cooperative production systems (Gummert et al., 2020).

Rice straw is a lignocellulosic biomass dominated by cellulose, hemicellulose, lignin, and mineral ash. Reported composition varies with cultivar and production conditions, but cellulose commonly accounts for about one-third or more of dry matter, while hemicellulose and lignin form a structurally resistant matrix that slows biological degradation (Hung et al., 2020a; Goodman, 2020; Satlewal et al., 2018; Abraham et al., 2016). Loose straw also has low bulk density, increasing handling, transport, and storage costs; these constraints are amplified when straw is wet after rainfall (Balingbing et al., 2020; Nguyen et al.,

¹ University of Agriculture and Forestry, Hue University, Vietnam

² Tien Giang University

³ International Rice Research Institute (IRRI)

2016). For composting, the high structural-carbon content of straw is advantageous as a bulking and carbon source, but efficient decomposition requires balancing it with nitrogen-rich materials, adequate moisture, oxygen supply, and repeated mixing or aeration.

Aerobic composting can be implemented as turned windrows, aerated static piles, in-vessel systems, or combinations of these approaches. In-vessel and forced-aeration systems provide tighter control but require higher capital and technical inputs, whereas turned windrows are comparatively simple, scalable, and well suited to farm and cooperative settings when sufficient land is available (Lim et al., 2017; Michel et al., 2022). Across composting systems, temperature, moisture, initial C/N ratio, aeration, and turning frequency strongly influence degradation rate, nitrogen conservation, gaseous emissions, and compost maturity (Bernal et al., 2009; Guo et al., 2012; Ji et al., 2023; Kong et al., 2024). Mechanical turning additionally homogenizes heterogeneous feedstocks and restores porosity, although excessive or poorly timed turning may increase heat and gas losses (Michel et al., 2022).

Rice-straw composting studies have demonstrated that cattle manure, microbial inocula, and appropriate moisture management can accelerate decomposition and reduce the C/N ratio (Li et al., 2008; Rashad et al., 2010; Goyal & Sindhu, 2011;

Jusoh et al., 2013; Kausar et al., 2014; Nghi et al., 2020). Long-term field work in the Mekong Delta also indicates that repeated rice-straw compost application can support rice productivity and improve selected soil physical properties (Watanabe et al., 2009). However, most published studies focus on laboratory/pilot composting, maturity indicators, or regions with established straw logistics. Evidence remains limited for an integrated cooperative-scale model in humid Central Vietnam that links mechanized turning, sequential compost-quality monitoring, preliminary crop response, business feasibility, and environmental screening.

Agricultural production in Hue is relatively fragmented, which creates challenges for efficient rice-straw collection, transport, and utilization. At the same time, Hue City has increasingly promoted organic, circular agriculture, creating a favorable context for practical straw-recycling solutions at local scale (Ủy ban nhân dân tỉnh Thừa Thiên Huế, 2024). This study therefore developed and evaluated a mechanized windrow model using local rice straw, cattle manure, and rice-husk ash for farm-household and cooperative application. It assessed composting performance and product quality, response of DT39 rice to the fertilizer treatments, economic feasibility, scaling potential, and greenhouse-gas implications.

applied field demonstration rather than a replicated process experiment, it combined a single mechanized batch, sequential compost monitoring, a preliminary rice-field comparison, and scenario-based economic and greenhouse-gas calculations. The turning machine was provided by IRRI.

II. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study site

The study was conducted at An Lo Agricultural Cooperative, Phong Thái Commune, Hue City, using an approximately 1,000-m², flat, well-drained area for windrow preparation, turning, water supply, material handling, and product finishing. As an



Figure 1. *Mixing of raw materials using a turning machine.*

2.2. Composting materials, windrow preparation and process monitoring

Rice straw was mechanically baled in the An Lo fields, while cattle manure and rice-husk ash were sourced locally (Table 1). A single field-scale windrow was constructed using alternating layers of rice straw, cattle

manure and rice-husk ash. The windrow had a bottom width of approximately 1.2 m and a height of 0.8 m to match the operating specifications of the windrow turner. The feedstock mixture was formulated to achieve an initial C/N ratio of 25–30, with a recorded value of 27.8.

Table 1. Raw materials used for one mechanized rice-straw composting batch

Material	Amount	Recorded initial condition/function
Baled rice straw	2,200 kg	Approx. 14% moisture; main structural carbon source
Cattle manure	2,200 kg	Approx. 20–30% moisture; nitrogen source and microbial substrate
Rice husk ash	1,000 kg	Approx. 10% moisture; improves porosity and contributes mineral ash
Molasses	10 L	Readily available carbon source; diluted before spraying
Trichoderma-inoculant	5 L	Applied during the first mechanical turning
Water	As required	Adjusted to maintain target windrow moisture

Immediately after windrow formation, the first mechanical turning was conducted to mix and aerate the materials. During this operation, diluted molasses, a Trichoderma-based inoculant, and sufficient water were sprayed onto the mixture to adjust its moisture content. Subsequent turning was performed every 7–10 days or when the temperature approached 70°C to restore porosity and redistribute moisture.

Temperature, moisture content, and pH were monitored as operational indicators. During active composting, the target ranges

were 50–70°C, 50–60%, and 6.5–7.5, respectively. The windrow was covered with canvas when necessary, and water was added during turning to maintain the target moisture content. The composting process was monitored for 45 days.

Five composite samples were collected on days 7, 15, 25, 35, and 45. With no independent replicate windrows, the sequential measurements were interpreted descriptively as process observations rather than experimental replicates.

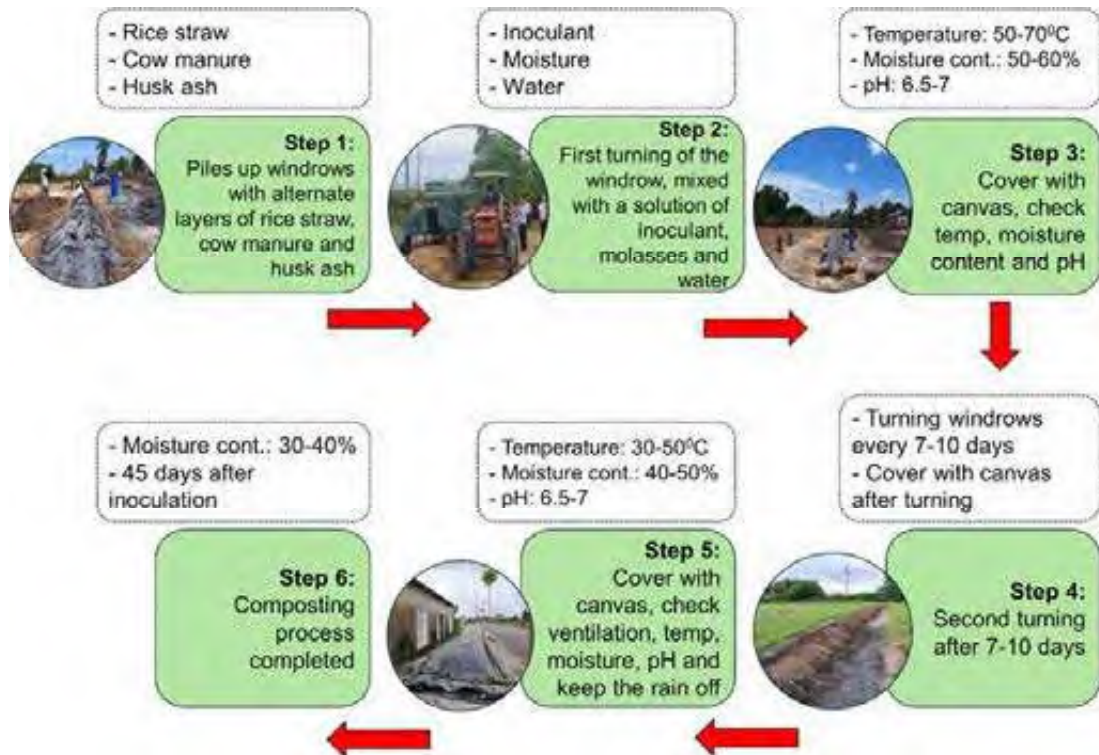


Figure 2. Process flow of mechanized rice-straw windrow composting.

2.3. Preliminary rice-field demonstration

A preliminary field demonstration with DT39 rice was conducted at An Lo field during the Winter-Spring 2024 season in two adjacent 500-m² plots. Two fertilizer treatments were compared: (T1) 400 kg of rice-straw compost per 500-m² plot and (T2) 400 kg of commercial organic fertilizer per 500-m² plot, both applied according to local farming practice. Each fertilizer was divided between basal and supplementary applications. Rice was transplanted on 8 January and harvested on 22 April 2024.

The two-treatment field layout was non-randomized and unreplicated; results were therefore interpreted descriptively without inferential statistical analysis. Yield-related measurements included panicles/m², filled grains/panicle, 1,000-grain weight, theoretical yield, actual yield, and unfilled-grain ratio, following relevant procedures referenced from TCVN 13381-1:2023.

2.4. Measurements and data analysis

Moisture content was determined gravimetrically by oven-drying to constant mass, and pH was measured using a calibrated pH meter. Organic matter (OM) and total carbon (C) were determined independently using the analytical procedures adopted by the Faculty of Agronomy laboratory, HUAF. Total N, P₂O₅, and K₂O were determined according to TCVN 8557:2010, TCVN 8563:2010, and TCVN 8562:2010, respectively. The C/N ratio was calculated from the measured total C and total N contents.

2.5. Statistical, economic, and environmental calculations

Results were analyzed descriptively without inferential statistics due to the unreplicated design of the composting batch and rice demonstrations. Economic feasibility was assessed for a base scenario of 4 t/batch and 48 t/year using production cost, annual net profit, simple payback, and sensitivity to selling price, material cost, and production scale.

Avoided greenhouse gas emissions from open-field burning were estimated using IPCC (2006) emission factors for CH₄ and N₂O and GWP₁₀₀ values from Forster et al. (2021). The estimate was based on 1,892 kg

dry matter derived from 2,200 kg baled straw and excludes emissions from composting, mechanized operations, transport, and other life-cycle processes.

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Process performance and operational feasibility

Following first-day turning and inoculation, windrow temperature rapidly entered the thermophilic range, peaked at approximately 58.2°C, and then declined during aeration and maturation. Moisture content of the windrow was adjusted with water as required. Because windrow temperature and moisture varied with weather, geometry, feedstock, and measurement position, they were treated as operational observations rather than tightly controlled variables. The initial C/N ratio of 27.8 and the thermophilic response were consistent with suitable rice-straw/manure composting conditions (Li et al., 2008; Nghi et al., 2020; Guo et al., 2012).

The mechanized windrow turner integrated raw material mixing, active aeration, liquid amendment application, and porosity restoration in a single pass, representing the model's main technical contribution. Compared with in-vessel or forced-aeration systems, turned windrows require less infrastructure but depend on timely turning and moisture control (Lim et al., 2017; Michel et al., 2022). The windrow-turner improved material handling and operational feasibility (Hashim et al., 2024), IRRI/CGIAR field demonstrations indicate practical use of mechanized straw-composting technology (CGIAR, 2023).

3.2. Compost maturation and preliminary agronomic performance

3.2.1. Temporal changes in compost properties

Five compost samples collected on days 7, 15, 25, 35, and 45 showed progressive stabilization (Table 2; Figure 3). Mean

windrow moisture was 50.34%, within the 50–60% target. Moisture content from 47.51% on day 7 to 55.22% on day 15 and 67.11% on day 25 following water addition during turning, temporarily exceeding the target, before declining to 43.46% on day 35 and 38.42% on day 45 as water addition decreased and aeration and evaporation continued. Windrow pH remained relatively stable at 7.46–7.91. These observations emphasize adding water according to measured moisture content and avoiding prolonged over-wetting that may restrict aeration (Li et al., 2008; Nghi et al., 2020).

By day 45, total C decreased from 51.21% to 30.74% and total N increased from 1.84% to 2.20%, reducing the C/N ratio from 27.83 to 13.97. P₂O₅ and K₂O increased from 0.32% to 0.51% and from 1.22% to 1.39%, respectively, while final organic matter reached 31.12%. These trends indicate microbial mineralization of degradable organic matter and relative nutrient concentration as dry matter was lost, consistent with previous rice-straw composting studies using manure or microbial inoculants (Goyal & Sindhu, 2011; Jusoh et al., 2013; Kausar et al., 2014; Rashad et al., 2010).

The final C/N ratio of 13.97 fell within the 10.3–16.1 range reported by Jusoh et al. (2013) for stabilized rice-straw compost. The day-35 observations (moisture content of 43.46%, pH of 7.89, and C/N ratio of 14.93) suggest that a 35–40-day composting cycle may be feasible under favorable conditions. Composting duration also depends on the type and prior condition of the rice straw (Department of Crop Production, 2023). Further replicated trials using clearly defined maturity criteria are needed to determine the

optimal duration for different rice-straw feedstocks (Bernal et al., 2009; Ji et al., 2023; Kong et al., 2024).

Table 2. Temporal changes in physicochemical properties of rice-straw compost

Day	Moisture (%)	pH	OM (%)	C (%)	N (%)	C/N	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
7	47.51	7.66	28.12	51.21	1.84	27.83	0.32	1.22
15	55.22	7.65	29.21	45.25	2.08	21.76	0.40	1.25
25	67.11	7.46	30.01	38.37	2.11	18.19	0.42	1.34
35	43.46	7.89	31.14	32.24	2.16	14.93	0.50	1.37
45	38.42	7.91	31.12	30.74	2.20	13.97	0.51	1.39
Mean	50.34	7.71	29.92	39.56	2.08	19.34	0.43	1.31

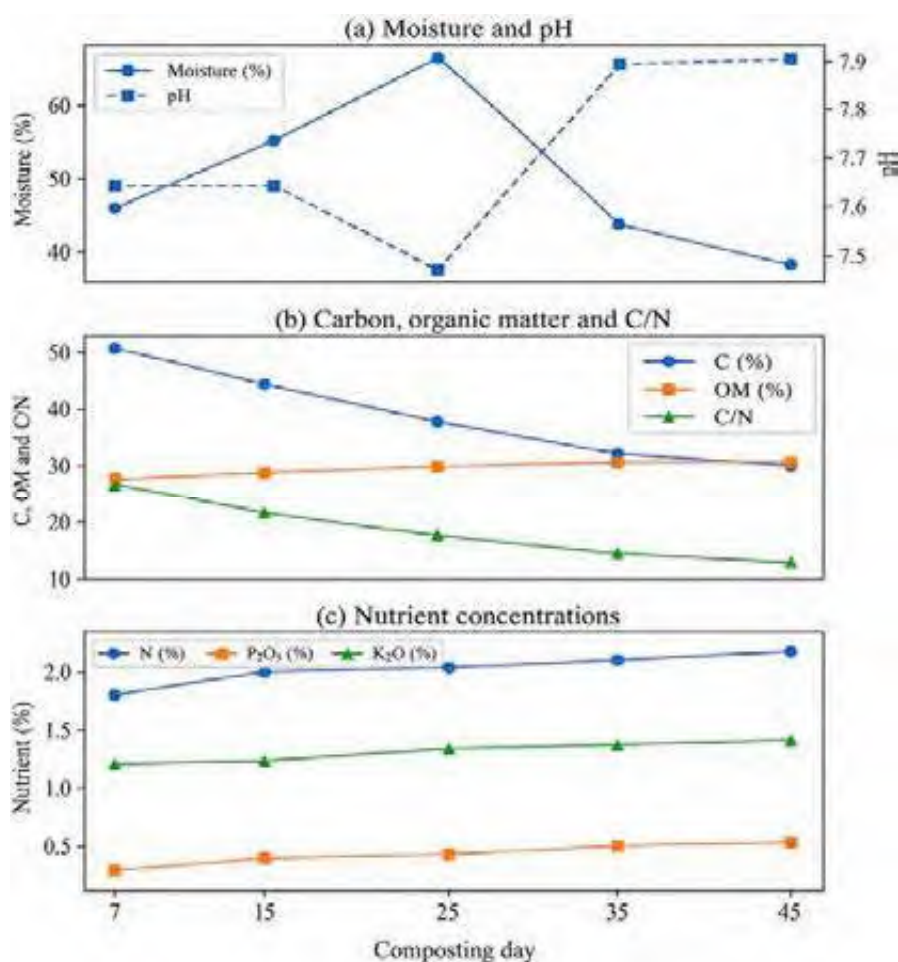


Figure 3. Changes in physicochemical properties during rice-straw composting: (a) moisture content and pH; (b) carbon, organic matter, and C/N ratio; and (c) N, P₂O₅, and K₂O concentrations.

The final composition indicates potential use as an organic soil amendment and nutrient source. However, commercialization requires repeated-batch testing and

compliance with applicable Vietnamese fertilizer requirements for nutrients, safety, contaminants, and consistency (Bộ Nông nghiệp và Môi trường, 2025).

3.2.2. Preliminary performance on DT39 rice

The rice-straw compost plot produced fewer panicles than the commercial organic fertilizer plot (220.00 vs. 239.25 panicles/m²) but more filled grains per panicle (120.93 vs. 98.63). The 1,000-grain weights were similar (23.50 vs. 23.75 g), while the unfilled-grain

ratio was slightly lower (9.18% vs. 10.53%). Actual yield was 5.702 t/ha versus 4.997 t/ha, a difference of 0.705 t/ha or 14.1% (Table 3). Because the comparison was neither randomized nor replicated, the values are descriptive and do not establish a statistically significant fertilizer effect.

Table 3. Yield and yield components of the DT39 rice in the preliminary demonstration

Yield indicator	Rice-straw compost treatment	Commercial organic fertilizer treatment	Observed difference
Panicles (no./m ²)	220.00	239.25	-19.25
Filled grains/panicle	120.93	98.63	+22.30
1,000-grain weight (g)	23.50	23.75	-0.25
Theoretical yield (t/ha)	6.252	5.605	+0.647
Actual yield (t/ha)	5.702	4.997	+0.705
Unfilled grain ratio (%)	9.18	10.53	-1.35

The observed yield difference was associated mainly with more filled grains per panicle and a lower unfilled-grain ratio in the rice-straw-compost plot, rather than panicle density or 1,000-grain weight. Nutrient release and added organic matter may have supported grain filling, but this mechanism was not directly tested because soil properties, nutrient-release dynamics, and plant nutrient uptake were not measured. This response is consistent with long-term Mekong Delta evidence for rice-straw compost (Watanabe et al., 2009). Because the comparison used two adjacent, unreplicated 500-m² plots, the results provide preliminary feasibility evidence only; randomized, replicated, multi-season trials are needed to compare equivalent nutrient rates, quantify

crop response, and determine optimal application rates under Hue conditions.

3.3. Economic feasibility and sensitivity

At 48 t/year, estimated production cost was VND 2.518 million/t. Materials/feedstock represented 41.2% of unit cost, followed by packaging (16.8%), depreciation and maintenance (15.6%), labor (13.5%), land use (8.8%), energy (2.6%), and interest (1.5%). At an assumed selling price of VND 3.5 million/t, the estimated annual net profit was VND 47.16 million. Based on the initial investment of VND 124.8 million, the recalculated simple payback period was approximately 2.65 years. These values should be interpreted as scenario-based estimates rather than audited commercial performance.

Table 4. Key economic indicators of the cooperative-scale composting model

Indicator	Value
Annual production	48 t/year
Initial investment	VND 124.8 million
- Compost turner (no tractor)	VND 120.0 million
- Packing machine	VND 2.0 million
- Printing equipment	VND 2.8 million
Production cost	VND 2.518 million/t
Selling price	VND 3.500 million/t
Net profit	VND 47.16 million/year
Payback period	≈ 2.65 years

Assuming the base-case unit margin of approximately VND 0.982 million/t remains constant, annual outputs of 36 and 60 t would generate estimated profits of VND 35.37 million and VND 58.95 million, with corresponding simple payback periods of 3.53 and 2.12 years. These linear scenario calculations do not demonstrate economies of scale or declining unit costs, which would require separate variable- and fixed-cost estimates at each production level.

3.4. Environmental implications, adoption conditions, and limitations

Adoption requires coordinated straw collection, reliable manure and ash, moisture control, and planned equipment use. Sharing the turner can spread fixed costs, while internal compost use can seed the market. Scaling thus depends on logistics, process and quality control, finance, and market organization (Demont et al., 2020; Gummert et al., 2020).

The cooperative model suits wet or low-quality straw requiring local processing. Mechanized collection and densification address dry-straw handling constraints (Balingbing et al., 2020). Rice-straw composting provides a pathway to recycle

nutrients and organic matter to soil (Nghị et al., 2020), while broader rice-straw incorporation studies report effects on nutrient cycling and soil organic matter (Chivenge et al., 2020).

Burning the batch's 1.892 t dry matter would emit 0.174 t CO₂-eq from CH₄ and N₂O; diversion to composting could therefore avoid about 0.17 t CO₂-eq at the burning stage (IPCC, 2006; Forster et al., 2021), broadly consistent with Romasanta et al. (2017). This is not a net carbon balance because composting, machinery, and transport also emit. Defensible mitigation claims require direct emissions and life-cycle comparisons with local burning and flooded incorporation (Allen et al., 2020; Hung et al., 2020b; Sander et al., 2014). Key limitations were the single batch, incomplete continuous temperature records, absence of microbial-density and germination-index data, unreplicated plots, and scenario-based economics. Future work should include replicated seasonal windrows, continuous logging, maturity indicators, randomized crop trials, direct labor/fuel measurements, and full life-cycle and market analyses.

IV. CONCLUSIONS

The study supports the feasibility of a tractor-compatible mechanized windrow system for converting locally available rice straw, cattle manure, and rice-husk ash into stabilized compost at cooperative scale. Mechanical turning, inoculation, and moisture adjustment were initiated immediately after windrow formation. From days 7 to 45, total carbon and C/N ratio decreased, while N, P₂O₅, and K₂O concentrations increased; final organic matter was 31.12% and C/N was 13.97. The day-35 observations suggest that a 35–40-day cycle may be feasible under favorable conditions, although the required duration depends on the type and prior condition of the rice straw; replicated trials with predefined

maturity criteria are therefore needed. In the 500-m² DT39 demonstration, observed rice yield was 14.1% higher than in the adjacent plot treated with commercial organic fertilizer, but the unreplicated field comparison remains preliminary.

At 48 t/year, the scenario-based analysis estimated a production cost of VND 2.518 million/t, annual net profit of VND 47.16 million, and a simple payback period of approximately 2.65 years; utilization rate and selling price were key determinants of feasibility. The avoided-burning screening estimate was about 0.17 t CO₂-eq per batch from CH₄ and N₂O, not a full life-cycle mitigation estimate. Further work should prioritize replicated multi-season composting and rice trials, microbial and maturity

measurements, direct labor/fuel and emissions monitoring, and validation of cooperative equipment-sharing and market models before large-scale commercialization or carbon-credit claims.

REFERENCES

1. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2010a). TCVN 8557:2010: *Phân bón – Phương pháp xác định nitơ tổng số*.
2. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2010b). TCVN 8562:2010: *Phân bón – Phương pháp xác định kali tổng số*.
3. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2010c). TCVN 8563:2010: *Phân bón – Phương pháp xác định photpho tổng số*.
4. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2023). TCVN 13381-1:2023: *Giống cây nông nghiệp - Khảo nghiệm giá trị canh tác và giá trị sử dụng - Phần 1: Giống lúa*.
5. Bộ Nông nghiệp và Môi trường. (2025). Thông tư số 86/2025/TT-BNNMT ban hành QCVN 106:2025/BNNMT: *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng phân bón*.
6. Ủy ban nhân dân tỉnh Thừa Thiên Huế. (2024). Quyết định số 3488/QĐ-UBND ngày 31/12/2024 phê duyệt Đề án “*Phát triển nông nghiệp hữu cơ, kinh tế tuần hoàn theo chuỗi giá trị trên địa bàn tỉnh Thừa Thiên Huế giai đoạn 2024–2030*”.
7. Abraham, A., Mathew, A. K., Sindhu, R., Pandey, A., & Binod, P. (2016). *Potential of rice straw for bio-refining: An overview*. Bioresource Technology, 215, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.011>
8. Allen, J., Pascual, K. S., Romasanta, R. R., Van Trinh, M., Van Thach, T., Van Hung, N., Sander, B. O., & Chivenge, P. (2020). *Rice straw management effects on greenhouse gas emissions and mitigation options*. In M. Gummert, N. V. Hung, P. Chivenge, & B. Douthwaite (Eds.), *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 145–159). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_9
9. Balingbing, C., Hung, N. V., Nghi, N. T., Hieu, N. V., Roxas, A. P., Tado, C. J., Bautista, E., & Gummert, M. (2020). *Mechanized collection and densification of rice straw*. In M. Gummert, N. V. Hung, P.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge IRRI for its technical and financial support throughout the study.

Chivenge, & B. Douthwaite (Eds.), *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 15–32). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_2

10. Bernal, M. P., Alburquerque, J. A., & Moral, R. (2009). *Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review*. Bioresource Technology, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>

11. CGIAR. (2023). *IRRI and Thai Rice Department collaborate to promote sustainable straw composting technology in Thailand*. CGIAR Initiative on Asian Mega-Deltas.

12. Chivenge, P., Rubianes, F., Van Chin, D., Van Thach, T., Tien Khang, V., Romasanta, R. R., Van Hung, N., & Van Trinh, M. (2020). *Rice straw incorporation influences nutrient cycling and soil organic matter*. In M. Gummert, N. V. Hung, P. Chivenge, & B. Douthwaite (Eds.), *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 131–144). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_8

13. Department of Crop Production (DCP). (2023). *Technical manual: Rice straw management towards circular economy and low emission in the Mekong Delta*. Hanoi, Vietnam: Ministry of Agriculture and Rural Development.

14. Demont, M., Ngo, T. T. T., Van Hung, N., Duong, G. P., Duong, T. M., Nguyen, H. T., Hoang, N. T., Custodio, M. C., Quilloy, R., & Gummert, M. (2020). *Rice straw value chains and case study on straw mushroom in Vietnam's Mekong River Delta*. In M. Gummert, N. V. Hung, P. Chivenge, & B. Douthwaite (Eds.), *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 175–192). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_11

15. FAO. (2024). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
16. Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2021). *The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity*. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* (pp. 923–1054). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.009>
17. Goodman, B. A. (2020). *Utilization of waste straw and husks from rice production: A review*. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 5(3), 143–162. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2020.07.001>
18. Goyal, S., & Sindhu, S. S. (2011). *Composting of rice straw using different inocula and analysis of compost quality*. *Microbiology Journal*, 1(4), 126–138. <https://doi.org/10.3923/mj.2011.126.138>
19. Gummert, M., Hung, N. V., Chivenge, P., & Douthwaite, B. (Eds.). (2020). *Sustainable Rice Straw Management*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8>
20. Guo, R., Li, G., Jiang, T., Schuchardt, F., Chen, T., Zhao, Y., & Shen, Y. (2012). *Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost*. *Bioresource Technology*, 112, 171–178. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.02.099>
21. Hashim, S., Bashir, R., Khan, A. A., Mirani, A. A., Shoaib, M., Razzaq, A., Ehsan, F., & Munir, F. (2024). *Performance evaluation of compost of windrow turner machine using agriculture waste materials*. *Sustainability*, 16(17), 7779. <https://doi.org/10.3390/su16177779>
22. Hung, N. V., Maguyon-Detras, M. C., Migo, M. V., Quilloy, R., Balingbing, C., Chivenge, P., & Gummert, M. (2020a). *Rice straw overview: Availability, properties, and management practices*. In M. Gummert, N. V. Hung, P. Chivenge, & B. Douthwaite (Eds.), *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 1–
- 13). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_1
23. Hung, N. V., Migo, M. V., Quilloy, R., Chivenge, P., & Gummert, M. (2020b). *Life cycle assessment applied in rice production and residue management*. In M. Gummert, N. V. Hung, P. Chivenge, & B. Douthwaite (Eds.), *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 161–174). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_10
24. IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. IGES, Japan.
25. Ji, Z., Zhang, L., Liu, Y., Li, X., & Li, Z. (2023). *Evaluation of composting parameters, technologies and maturity indexes for aerobic manure composting: A meta-analysis*. *Science of the Total Environment*, 886, 163929. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163929>
26. Jusoh, M. L. C., Manaf, L. A., & Latiff, P. A. (2013). *Composting of rice straw with effective microorganisms (EM) and its influence on compost quality*. *Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 10, 17. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-17>
27. Kausar, H., Ismail, M. R., Saud, H. M., Habib, S. H., Othman, R., & Bhuiyan, M. S. H. (2014). *Changes of physical and chemical characteristics during microbial composting of rice straw at various pH levels*. *Compost Science & Utilization*, 22(3), 153–163. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2014.918864>
28. Kong, Y., Zhang, J., Zhang, X., Gao, X., Yin, J., Wang, G., Li, J., Li, G., Cui, Z., & Yuan, J. (2024). *Applicability and limitation of compost maturity evaluation indicators: A review*. *Chemical Engineering Journal*, 489, 151386. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151386>
29. Li, X., Zhang, R., & Pang, Y. (2008). *Characteristics of dairy manure composting with rice straw*. *Bioresource Technology*, 99(2), 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.12.000>

30. Lim, L. Y., Bong, C. P. C., Lee, C. T., Klemeš, J. J., Sarmidi, M. R., & Lim, J. S. (2017). *Review on the current composting practices and the potential of improvement using two-stage composting*. Chemical Engineering Transactions, 61, 1051–1056. <https://doi.org/10.3303/CET1761173>
31. Michel, F., O'Neill, T., Rynk, R., Gilbert, J., Wisbaum, S., & Halbach, T. (2022). *Passively aerated composting methods, including turned windrows*. In R. Rynk (Ed.), *The Composting Handbook* (pp. 159–196). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85602-7.00002-9>
32. Nghi, N. T., Romasanta, R. R., Hieu, N. V., Vinh, L. Q., Du, N. X., Ngan, N. V. C., Chivenge, P., & Hung, N. V. (2020). *Rice straw-based composting*. In M. Gummert, N. V. Hung, P. Chivenge, & B. Douthwaite (Eds.), *Sustainable Rice Straw Management* (pp. 33–41). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_3
33. Oanh, N. T. K. (2021). *Rice straw open burning: Emissions, effects and multiple benefits of non-burning alternatives*. Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering, 63(4), 79–85. [https://doi.org/10.31276/VJSTE.63\(4\).79-85](https://doi.org/10.31276/VJSTE.63(4).79-85)
34. Nguyen, H. V., Nguyen, C. D., Tran, T. V., Hau, H. D., Nguyen, N. T., & Gummert, M. (2016). *Energy efficiency, greenhouse gas emissions, and cost of rice straw collection in the Mekong River Delta of Vietnam*. Field Crops Research, 198, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.024>
35. Phan, N.-T., & Dinh-Tri, C. (2024). *Assessment of air pollutant emissions from rice straw open burning in Hoa Vang district, Da Nang city, Vietnam*. Journal of Science and Technology - The University of Danang, 22(11C), 25–32. <https://doi.org/10.31130/ud-jst.2024.550E>
36. Rashad, F. M., Saleh, W. D., & Moselhy, M. A. (2010). *Bioconversion of rice straw and certain agro-industrial wastes to amendments for organic farming systems: 1. Composting, quality, stability and maturity indices*. Bioresource Technology, 101(15), 5952–5960. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.103>
37. Romasanta, R. R., Sander, B. O., Gaihre, Y. K., Alberto, M. C., Gummert, M., Quilty, J., Nguyen, V. H., Castalone, A. G., Balingbing, C., Sandro, J., Correa, T., Jr., & Wassmann, R. (2017). *How does burning of rice straw affect CH₄ and N₂O emissions? A comparative experiment of different on-field straw management practices*. Agriculture, Ecosystems & Environment, 239, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.042>
38. Sander, B. O., Samson, M., & Buresh, R. J. (2014). *Methane and nitrous oxide emissions from flooded rice fields as affected by water and straw management between rice crops*. Geoderma, 235–236, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.020>
39. Satlewal, A., Agrawal, R., Bhagia, S., Das, P., & Ragauskas, A. J. (2018). *Rice straw as a feedstock for biofuels: Availability, recalcitrance, and chemical properties*. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 12(1), 83–107. <https://doi.org/10.1002/bbb.1818>
40. USDA Foreign Agricultural Service. (2025). *Grain: World Markets and Trade*. United States Department of Agriculture.
41. Watanabe, T., Man, L. H., Vien, D. M., Khang, V. T., Ha, N. N., Linh, T. B., & Ito, O. (2009). *Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta*. Soil Science and Plant Nutrition, 55(6), 754–763. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00424.x>

- Ngày gửi bài: 12/08/2026
 - Ngày phản biện: 28/08/2026
 - Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

MỘT SỐ KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VỀ MÁY CÁN BỘT MÌ PHỤC VỤ SẢN XUẤT QUY MÔ NHỎ, NĂNG SUẤT 25 KG/H

Phan Tôn Thanh Tâm^{1*}, Vệ Quốc Linh¹, Trần Võ Văn May¹,
Hồ Văn Dũng^{1,2}, Châu Văn Tài Nguyên³

TÓM TẮT

Trong bối cảnh nhu cầu tiêu thụ các sản phẩm chế biến từ bột mì ngày càng tăng, việc cơ giới hóa công đoạn cán bột tại các cơ sở sản xuất quy mô nhỏ là cần thiết nhằm nâng cao năng suất, giảm lao động thủ công và cải thiện chất lượng sản phẩm. Nghiên cứu này trình bày kết quả thiết kế, chế tạo và khảo nghiệm một máy cán bột mì hoạt động theo nguyên lý cán liên tục hai trục, đồng thời khảo sát ảnh hưởng của tốc độ tính toán của trục cán (43,6–87,1 vòng/phút) và khe hở trục cán (2–4 mm) đến chất lượng tấm bột. Kết quả khảo nghiệm cho thấy tại tốc độ trục cán 65,3 vòng/phút kết hợp khe hở 3 mm, tấm bột đạt độ đồng đều cao nhất (88,5%), tỷ lệ đứt đoạn thấp (4,7%) và thời gian cán 69 giây; máy đạt năng suất tính toán khoảng 25 kg/h. So với một số máy cán bột mì thương mại cùng phân khúc, máy nghiên cứu có chi phí chế tạo thấp hơn đáng kể (khoảng 2,5 triệu đồng, thấp hơn 2,08–19 lần) trong khi vẫn đạt năng suất tương đương. Kết quả nghiên cứu góp phần bổ sung cơ sở thực nghiệm về ảnh hưởng của các thông số vận hành đến chất lượng tấm bột sau cán, đồng thời cung cấp một giải pháp cơ giới hóa khả thi, chi phí thấp, phù hợp với hộ gia đình và cơ sở chế biến quy mô nhỏ.

Từ khóa: Máy cán bột mì; Cơ giới hóa; tốc độ trục cán; Khe hở trục cán; Năng suất 25 kg/h.

SOME RESEARCH RESULTS ON A WHEAT FLOUR SHEETING MACHINE FOR SMALL-SCALE PRODUCTION, CAPACITY OF 25 KG/H

ABSTRACT

In the context of the increasing demand for wheat flour-based products, the mechanization of the dough sheeting stage in small-scale production facilities is essential to improve productivity, reduce manual labor, and enhance product quality. This study presents the design, fabrication, and testing results of a two-roller continuous sheeting machine, together with an investigation of the effects of roller speed (43.6–87.1 rpm) and roller gap (2–4 mm) on dough sheet quality. Experimental results showed that, at a roller speed of 65.3 rpm combined with a 3 mm gap, the dough sheet achieved the highest uniformity (88.5%), the lowest breakage rate (4.7%), and a sheeting time of 69 seconds; the machine reached a calculated productivity of approximately 25 kg/h. Compared with several commercial machines in the same segment, the developed machine has a substantially lower manufacturing cost (about 2.5 million VND, 2.08–19 times lower) while achieving comparable productivity. This study contributes experimental evidence on the influence of operating parameters on dough sheet quality and offers a feasible, low-cost mechanization solution suitable for households and small-scale processing facilities.

Keywords: wheat flour sheeting machine; mechanization; roller speed; roller gap; productivity of 25 kg/h.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, nhu cầu tiêu thụ các sản phẩm chế biến từ bột mì như mì tươi, mì sợi, bánh bao và các sản phẩm bột khác ngày càng tăng, kéo theo yêu cầu nâng cao năng suất và chất lượng trong quá trình chế biến. Trong chuỗi công đoạn sản xuất, cán bột đóng vai trò quyết định đến độ đồng đều của tấm bột, ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng thành phẩm. Tại Việt Nam, các nghiên

cứ cho thấy việc cơ giới hóa trong sản xuất mì có vai trò quan trọng trong việc nâng cao năng suất, giảm lao động thủ công và cải thiện độ đồng đều của sản phẩm. Trên thế giới, nhóm nghiên cứu Thịn và cs. [1] đã phát triển và thử nghiệm máy làm mì bán tự động, tập trung vào cải tiến cơ cấu cán và cắt nhằm tạo ra sợi mì có kích thước ổn định, giảm sự phụ thuộc vào thao tác thủ công. Ngoài ra, nhóm nghiên cứu Kadimcherla và cs.;

¹ Khoa Cơ Khí và Công Nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

² Khoa Kỹ thuật Nông Nghiệp, Trường Đại học Kasetsart, tỉnh Nakhon Pathom, Thái Lan

³ Nhà máy Chế biến Thủy sản Đông lạnh TP Huế

Email: phantonthanhtam@huan.edu.vn; hovan.d@ku.th (Nghiên cứu sinh TL)

Altamash và cs. [2], [3] cũng nhấn mạnh rằng các máy làm mì bán tự động có kết cấu đơn giản, chi phí chế tạo hợp lý và phù hợp với hộ gia đình hoặc cơ sở sản xuất nhỏ. Bên cạnh hướng nghiên cứu về thiết kế máy, một số công trình nghiên cứu khoa học cũng quan tâm đến nguyên liệu và đặc tính công nghệ của khối bột trong quá trình cán. Bên cạnh đó, nhóm Liu và cs. [4] chỉ ra rằng thành phần phụ gia như muối và chất kết dính có ảnh hưởng rõ rệt đến tính chất lưu biến, hóa học và cấu trúc của khối bột mì trong quá trình cán lặp lại, từ đó tác động đến chất lượng sản phẩm mì. Ngoài ra, Grochowicz và Nadulski [5] đã tổng quan các công nghệ chế biến thực phẩm quy mô nhỏ và nhấn mạnh rằng việc phát triển các thiết bị có kết cấu đơn giản, chi phí đầu tư hợp lý, dễ vận hành và phù hợp với điều kiện sản xuất của các cơ sở nhỏ là xu hướng cần thiết nhằm thúc đẩy cơ giới hóa trong lĩnh vực chế biến thực phẩm [6].

Mặc dù nhiều nghiên cứu đã tập trung vào thiết kế và chế tạo máy làm mì bán tự động,

phần lớn các thiết bị hướng đến quy mô công nghiệp hoặc tích hợp nhiều chức năng, dẫn đến chi phí đầu tư tương đối cao và khó áp dụng đối với các hộ gia đình hoặc cơ sở chế biến nhỏ. Đồng thời, các nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của các thông số vận hành như tốc độ trục cán và khe hở trục đến chất lượng tấm bột trong điều kiện sản xuất quy mô nhỏ còn hạn chế và việc đánh giá hiệu quả ứng dụng của thiết bị trên cả khía cạnh kỹ thuật và kinh tế thông qua so sánh với các máy thương mại hiện có trên thị trường vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Đây chính là khoảng trống nghiên cứu mà nghiên cứu này hướng đến giải quyết. Vì vậy, nghiên cứu “Một số kết quả nghiên cứu về máy cán bột mì phục vụ sản xuất quy mô nhỏ, năng suất 25 kg/h” được thực hiện nhằm thiết kế, chế tạo, khảo nghiệm và xác định chế độ vận hành phù hợp nhất trong phạm vi khảo sát, góp phần giảm sức lao động, nâng cao hiệu quả sản xuất và cải thiện chất lượng sản phẩm mì trong điều kiện sản xuất quy mô hộ gia đình.

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là bột mì, khối mì sau quá trình nhồi trộn, cấu tạo và nguyên lý làm việc của máy cán. Máy cán bột mì được chế tạo và lắp ráp tại xưởng cơ khí khoa Cơ khí và Công nghệ, Đại học Nông Lâm, Đại học Huế sau đó được đưa vào thử nghiệm cán bột mì. Theo đó các chỉ tiêu cần đánh giá bao gồm: năng suất cán, ảnh hưởng của tốc độ trục cán và khe hở trục cán đến thời gian cán, độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

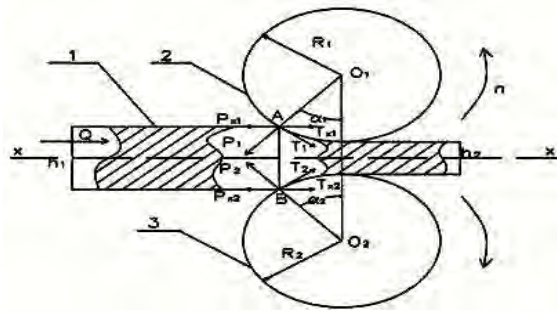
2.2.1. Phương pháp điều tra khảo sát, nghiên cứu tài liệu: Các dữ liệu về tình hình sản xuất bột mì, tình hình chế biến bánh canh từ bột mì quy mô hộ gia đình; nguyên lý cấu tạo và nguyên lý làm việc của các mẫu máy cán ép sản phẩm dẻo trong nước và trên bề mặt được nhóm đề tài tổng hợp và phân tích

làm cơ sở cho việc lựa chọn nguyên lý làm việc hợp lý của máy cán bột mì.

2.2.2. Phương pháp tính toán thiết kế máy

a) Xây dựng mô hình toán học để tính toán các thông số cơ bản của bộ phận cán bột mì

Hình 1 mô tả điều kiện vật cán ăn vào trục cán. Trong khi hai trục đang quay với tốc độ là V_1, V_2 (giả thiết $V_1 = V_2$); bán kính hai trục là R_1, R_2 ($R_1 = R_2$). Tại hai điểm A và B qua hai đường thẳng hướng tâm O_1 và O_2 ($AO_1 = BO_2$), hai đường thẳng này cùng với đường thẳng nối hai tâm trục O_1O_2 tạo thành những góc α_1 và α_2 ($\alpha_1 = \alpha_2$) gọi là góc ăn. Tại thời điểm mà vật cán tiếp xúc với hai trục cán, trục cán sẽ tác dụng lên vật cán các lực P_1 và P_2 ($P_1 = P_2$), đồng thời với chuyển động tiếp xúc trên bề mặt vật xuất hiện hai lực ma sát tiếp xúc T_1 và T_2 có chiều theo chiều chuyển động đi vào của vật cán ($T_1 = T_2$). [10]



Hình 1. Điều kiện vật cán ăn vào trục cán

Ta giả thuyết quá trình cán là cán đối xứng cho nên các ngoại lực tác dụng lên vật cán ví dụ như lực đẩy, lực kéo căng... là không có, đồng thời lực quán tính do trọng lượng vật cán tạo ra ta bỏ qua.

Với các lực P_1, P_2, T_1 và T_2 khi chiếu lên phương x-x là phương chuyển động của vật cán, chúng ta dễ nhận thấy rằng: nếu như $P_1 + P_2 \leq T_1 + T_2$ hoặc là $P_{x1} + P_{x2} \leq T_{x1} + T_{x2}$ thì vật cán đi tự nhiên vào khe hở giữa hai trục cán, vậy là ta có điều kiện vật cán ăn vào trục cán tự nhiên:

$T_{x1} + T_{x2} \geq P_{x1} + P_{x2} \Leftrightarrow 2T_{x1} \geq 2P_{x1}$
nghĩa là lực $T_{x1} \geq P_{x1}$ (2.1)

Ta lại có: $P_{x1} = P_1 \cdot \sin \alpha_1$
 $T_{x1} = T_1 \cdot \cos \alpha_1$ (2.2)

$T_{x1} = P_1 \cdot f$ (f: hệ số ma sát giữa vật cán và trục)

Như vậy: $P_1 \cdot f \cdot \cos \alpha_1 = P_1 \cdot \sin \alpha_1 \Rightarrow f \geq \tan \alpha_1$ hoặc $\tan \beta \geq \tan \alpha_1$

Tiếp theo xét trong khi cán có lực đẩy vật cán vào (Q) cùng phương cán và lực quán tính I ngược phương cán.

Trong thực tế lực quán tính I rất nhỏ nên ta bỏ qua, ta có công thức lực Q như sau:

$$Q = \frac{2P}{\cos \beta} \cdot \sin(\alpha - \beta) \quad (2.3)$$

Từ công thức trên ta có được 3 trường hợp để vật cán ăn vào trục cán như sau:

Trường hợp I: + Nếu $\alpha = \beta$. Suy ra $Q = 0$. Vậy có quá trình cán tự nhiên không cần có lực đẩy vào.

Trường hợp II: + Nếu $\alpha > \beta$. Suy ra $Q > 0$. Có nghĩa cần có lực tác động vào vật cán để làm cho đầu vật cán bóp nhỏ lại và lúc đó mới có được $\alpha = \beta$. Ở thời điểm đó sẽ có điều kiện ăn vào.

Trường hợp III: + Nếu $\alpha < \beta$. Suy ra $Q < 0$. Có nghĩa là tồn tại lực ma sát thừa, điều kiện ăn dễ dàng.

b) *Xác định năng suất lý thuyết của máy cán bột mì*

$$Q_{lt} = 3600 \cdot \rho \cdot B_1 \cdot h_1 \cdot v \cdot \phi \quad (\text{kg/giờ}) \quad (2.4)$$

Trong đó:

ρ : Khối lượng riêng của khối bột mì sau nhào (kg/m^3);

B_1 : Chiều rộng trung bình của tấm bột sau cán (m);

h_1 : Chiều dày thực tế của tấm bột (m);

v : Vận tốc bề mặt trục cán (m/s);

ϕ : Hệ số điền đầy và gián đoạn cấp liệu thực tế;

2.2.3. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

Máy cán bột mì sau khi chế tạo được thử nghiệm với bột mì đã được nhào trộn.

Các thông số điều khiển bao gồm:

- Tốc độ quay của trục cán
- Khe hở hai trục cán

Các chỉ tiêu đánh giá bao gồm:

- Năng suất máy
- Ảnh hưởng của tốc độ trục cán và khe hở trục cán đến thời gian cán, độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột.

Năng suất máy cán bột mì được xác định bởi công thức:

$$N = 3600 \times \frac{m}{t} \text{ (kg/giờ)}$$

Trong đó:

m: khối lượng nguyên liệu trong một lần khảo nghiệm (kg);

t: là tổng thời gian hoàn thành một chu trình cán (giây);

Bộ phận cán có đường kính trục $D = 70$ mm và bề rộng làm việc thực tế $B = 300$ mm. Khi cán khối bột mì (độ ẩm 30–31%) ở các mức khe hở $h_0 \in \{2; 3; 4\}$ mm, do hiện tượng dẫn nở đàn hồi, chiều dày thực tế của tấm bột (h_1) lớn hơn khe hở cài đặt khoảng 10–15% (tương ứng 2,3 mm; 3,45 mm; 4,6 mm), chiều rộng tấm bột đạt $B_1 \approx 300$ mm.

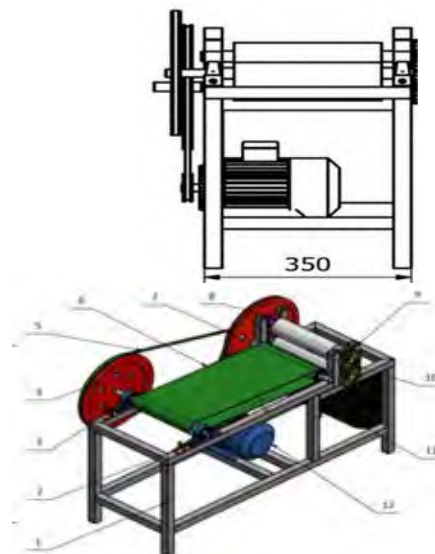
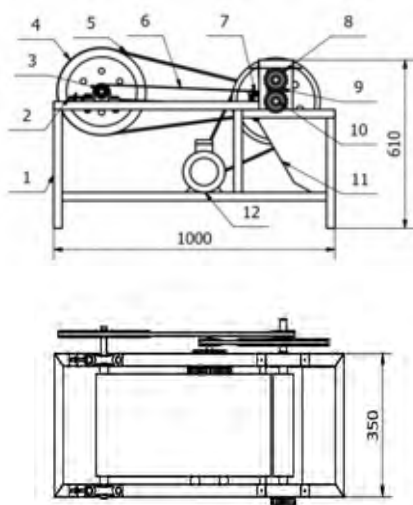
III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình máy cán bột mì đã được thiết kế

Dựa trên tổng hợp, phân tích các loại máy cán ép sản phẩm dẻo khác, đồng thời dựa vào

Ảnh hưởng cơ (2.5) độ trục cán và khe hở trục cán đến thời gian cán, độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột được thể hiện qua thí nghiệm khảo nghiệm được bố trí theo hai yếu tố: tốc độ trục cán (3 mức) và khe hở trục cán (3 mức), tổ hợp thành 9 chế độ vận hành (Bảng 1). Mỗi chế độ vận hành được lặp lại 3 lần với cùng khối lượng nguyên liệu đầu vào ($m = 1$ kg); các giá trị trình bày trong Bảng 1 là giá trị trung bình của các lần lặp. Thời gian cán được đo bằng đồng hồ bấm giây có độ phân giải 0,1 giây; độ đồng đều của tấm bột được xác định thông qua đo chiều dày tại nhiều vị trí trên tấm bột bằng thước kẹp cơ khí; tỷ lệ đứt đoạn được xác định bằng tỷ lệ chiều dài các đoạn bột bị rách/đứt trên tổng chiều dài tấm bột khảo sát.

lý thuyết cán ép, các thông số tính toán và các yêu cầu về kỹ thuật, mô hình máy cán bột mì được thiết kế như hình 2.



Hình 2. Mô hình thiết kế máy cán bột mì

- 1- Khung, 2- Chốt căng băng tải, 3- Gối đỡ tang quay, 4- Puly, 5- Dây đai, 6- Băng tải, 7- Tang quay băng tải, 8- Tấm điều chỉnh khoảng cách, 9- Bộ truyền bánh răng, 10- Trục cán, 11- Máng thoát liệu, 12- Động cơ

Nguyên lý hoạt động của máy cán bột mì: khi động cơ (12) làm việc, thông qua bộ truyền đai dẫn động (5), máy cán bột mì làm việc. Lúc này, khối bột được đưa vào trục cán

(10) thông qua băng tải cấp liệu (6). Vật liệu sau khi cán thoát ra máng thoát liệu (11).

3.2. Kết quả chế tạo và khảo nghiệm máy

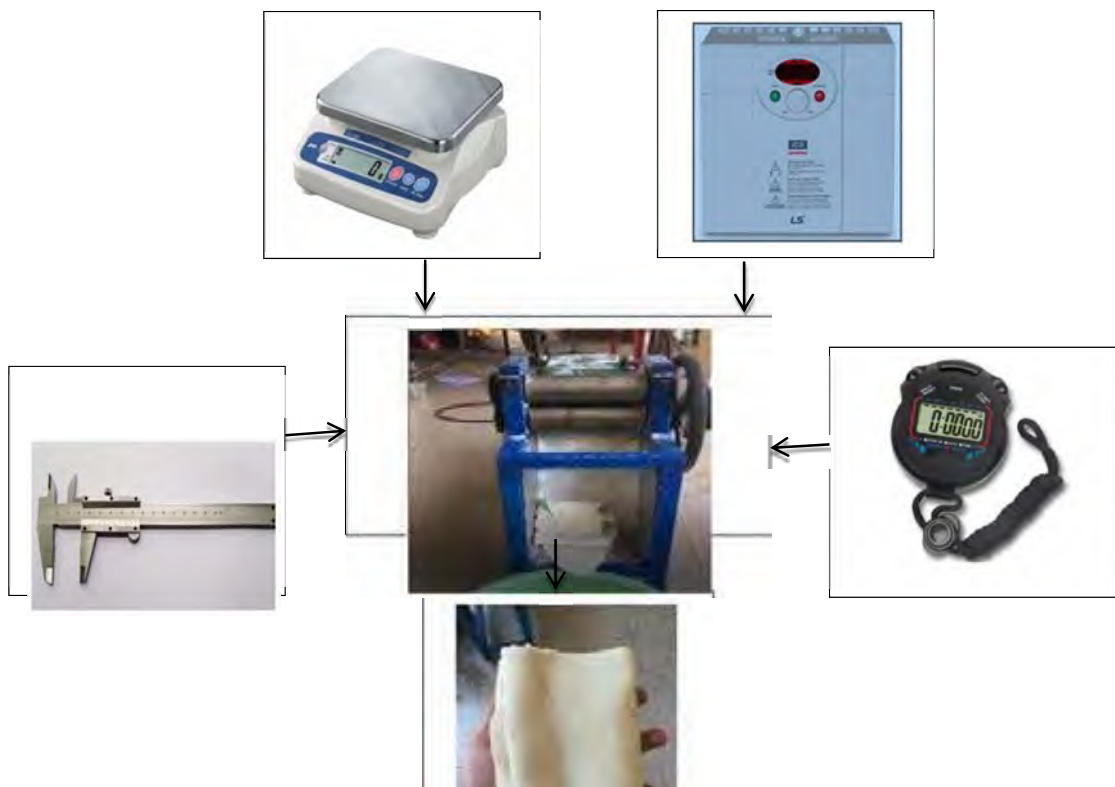
a) *Chế tạo máy*: Máy cán bột mì được chế tạo dựa trên thiết kế như hình 2 và được trình bày ở hình 3. Máy được thiết kế theo dạng mô-đun, bao gồm khung đỡ, hệ thống truyền động, cấp trục cán, băng tải cấp liệu và cơ cấu điều chỉnh khe hở trục cán. Trong quá trình vận hành, động cơ điện truyền mô-men xoắn

đến cấp trục cán thông qua hệ thống truyền động đai, tạo lực cán và lực ma sát cần thiết để cán mỏng khối bột. Chiều dày của tấm bột được điều chỉnh bằng cách thay đổi khe hở giữa hai trục cán. Khối mì được cấp liệu qua hệ thống băng tải để đảm bảo an toàn lao động khi vận hành máy.



Hình 3. Mẫu máy cán bột mì sau khi chế tạo

b) *Khảo nghiệm máy cán bột mì*
Sơ đồ bố trí thiết bị khảo nghiệm:



Hình 4. Sơ đồ bố trí thiết bị khảo nghiệm và sản phẩm sau cán

Nguyên liệu đầu vào cho mỗi lần khảo nghiệm là 1 kg bột mì. Khối bột được chuẩn bị theo quy trình nhào gồm hai giai đoạn: nhào khô trong 2–3 phút để phối trộn đồng đều nguyên liệu, sau đó bổ sung nước từ từ

và tiếp tục nhào ướt trong 10–15 phút. Lượng nước bổ sung dao động trong khoảng 100–200 mL/kg bột, được điều chỉnh tùy theo khả năng hút nước của từng loại bột nhằm đạt độ ẩm khối bột khoảng 30–31%. Bột sau khi

nhào đạt yêu cầu khi có độ đồng nhất cao, không xuất hiện các vón cục lớn, đồng thời hình thành mạng gluten tốt, thể hiện qua khả

năng kéo thành màng mỏng, đàn hồi và không bị rách hoặc dính tay trong quá trình kiểm tra.



Hình 5. Khối bột sau khi nhào trộn

Hình 6 trình bày kết quả kiểm tra khả năng hình thành mạng gluten của khối bột sau khi nhào. Tấm bột đạt yêu cầu khi có thể kéo

thành màng mỏng, đàn hồi tốt, không bị rách và không dính tay.



Hình 6. Kiểm tra khả năng hình thành mạng gluten của khối bột
(a) Không hình thành mạng gluten; (b) Có hình thành mạng gluten;
(c) Kiểm tra bột nhào

Tốc độ trục cán (3 mức) và khe hở trục cán (3 mức), tổ hợp thành 9 chế độ vận hành (m = 1 kg); các giá trị trình bày trong Bảng 1 (Bảng 1). Mỗi chế độ vận hành được lặp lại 3 lần với cùng khối lượng nguyên liệu đầu vào là giá trị trung bình của các lần lặp.[7]

Bảng 1. Ảnh hưởng của các thông số vận hành đến chất lượng sản phẩm
(giá trị trung bình của 3 lần lặp)

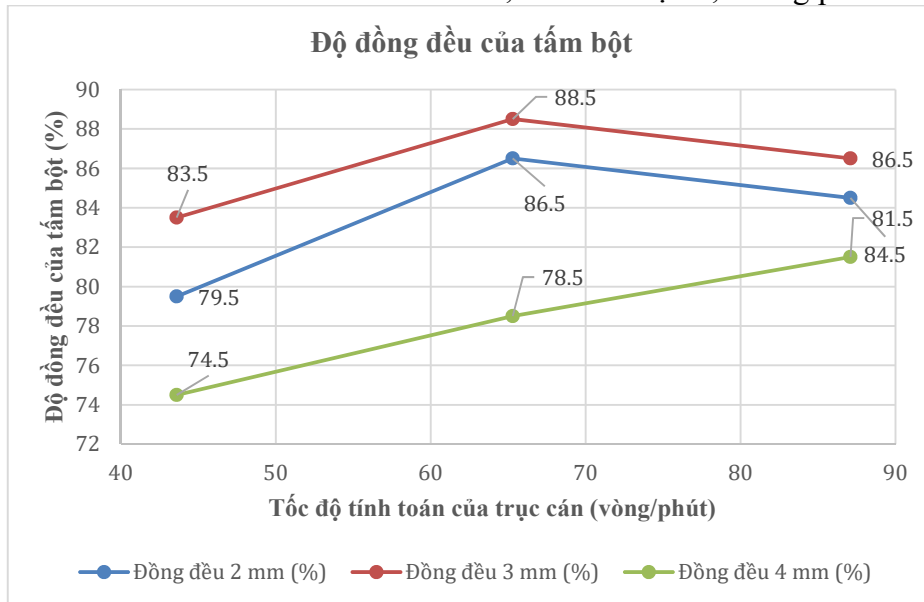
Tốc độ danh nghĩa cài đặt tại động cơ (vòng/phút)	Tốc độ tính toán của trục cán (vòng/phút)	Vận tốc bề mặt (m/s)	Khe hở (mm)	Thời gian (s)	Độ đồng đều (%)	Tỷ lệ đứt đoạn (%)
200	43,6	0,160	2	72	79,5	5,6
200	43,6	0,160	3	72	83,5	5,4
200	43,6	0,160	4	72	74,5	5,2
300	65,3	0,239	2	69	86,5	4,9
300	65,3	0,239	3	69	88,5	4,7
300	65,3	0,239	4	69	78,5	5,1
400	87,1	0,319	2	66	84,5	4,7
400	87,1	0,319	3	66	86,5	4,6
400	87,1	0,319	4	66	81,5	4,9

3.3. Ảnh hưởng của quá trình cán bột mì

Từ các kết quả ở Bảng 1, xây dựng được hai biểu đồ so sánh độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột tại 3 tốc độ trục cán ứng với 3 mức khe hở trục cán (2, 3 và 4 mm).

a) Ảnh hưởng của tốc độ trục cán và khe hở cán đến độ đồng đều của tấm bột

Kết quả khảo nghiệm cho thấy tốc độ trục cán và khe hở cán đều ảnh hưởng đến chất lượng tấm bột. Khi tốc độ trục cán tăng từ 43,6 lên 87,1 vòng/phút, thời gian cán giảm từ 72 xuống 66 giây. Tại khe hở 3 mm, độ đồng đều của tấm bột tăng từ 83,5% ở tốc độ 43,6 vòng/phút lên giá trị cao nhất 88,5% ở tốc độ 65,3 vòng/phút, sau đó giảm còn 86,5% ở tốc độ 87,1 vòng/phút.

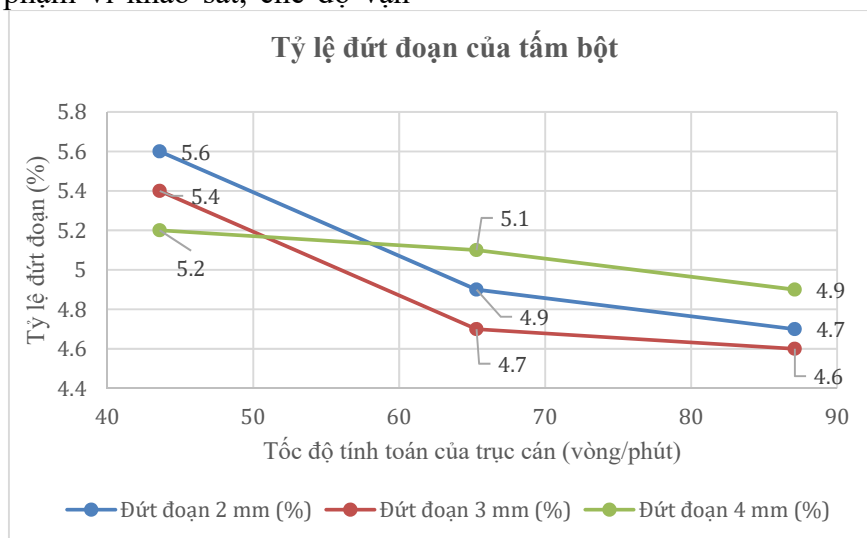


Hình 7. Ảnh hưởng của tốc độ trục cán và khe hở cán đến độ đồng đều của tấm bột

b) Ảnh hưởng của tốc độ trục cán và khe hở cán đến tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột

Kết quả khảo nghiệm cho thấy tốc độ trục cán và khe hở cán đều ảnh hưởng đến tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột. Khi tốc độ trục cán tăng từ 43,6 lên 87,1 vòng/phút, tỷ lệ đứt đoạn giảm từ 5,4% xuống 4,7% và 4,6%.

hành tại tốc độ trục cán 65,3 vòng/phút và khe hở 3 mm cho sự cân bằng phù hợp nhất giữa thời gian cán, độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột.



Hình 8. Ảnh hưởng của tốc độ trục cán và khe hở cán đến tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột

3.4. Đánh giá tổng hợp và lựa chọn chế độ vận hành phù hợp

Tổng hợp kết quả khảo nghiệm cho thấy tốc độ tính toán của trục cán và khe hở cán có ảnh hưởng đến các chỉ tiêu chất lượng tấm bột. Xét đồng thời thời gian cán, độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn, tốc độ trục cán 65,3 vòng/phút kết hợp với khe hở 3 mm được lựa chọn là chế độ vận hành phù hợp nhất trong phạm vi khảo sát. Tại điều kiện này, thời gian cán đạt 69 giây, độ đồng đều đạt 88,5% và tỷ lệ đứt đoạn là 4,7%. Kết quả nghiên cứu của đề tài có nhiều điểm tương đồng với nghiên cứu của Thịn và cs. [2], khi đều cho thấy việc lựa chọn chế độ vận hành phù hợp có ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng sản phẩm sau cán. Tuy nhiên, trong khi nghiên cứu của Thịn và cs. chủ yếu tập trung vào phát triển và đánh giá khả năng vận hành của máy làm mì bán tự động, nghiên cứu này đi sâu khảo sát ảnh hưởng của tốc độ quay trục cán và khe hở giữa hai trục cán đến độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột, từ đó xác định được chế độ vận hành phù hợp nhất trong phạm vi khảo sát cho điều kiện sản xuất quy mô nhỏ.

Kết quả của nghiên cứu cũng phù hợp với nhận định của Liu và cs. [8], khi cho rằng chất lượng tấm bột chịu ảnh hưởng bởi sự phát triển của mạng gluten trong quá trình cán. Trong nghiên cứu này, mặc dù không đánh giá trực tiếp các đặc tính lưu biến của khối bột, nhưng kết quả thực nghiệm cho thấy việc lựa chọn tốc độ quay trục cán và khe hở thích hợp góp phần tạo ra tấm bột có độ đồng đều cao và giảm tỷ lệ đứt đoạn, phù hợp với cơ chế hình thành và duy trì cấu trúc gluten đã được Liu và cộng sự đề cập.

Bên cạnh đó, nghiên cứu của Kadimcherla và cs. [3] tập trung vào thiết kế và chế tạo máy làm mì bán tự động có kết cấu đơn giản nhằm đáp ứng nhu cầu của các cơ sở sản xuất nhỏ. Kết quả của nghiên cứu này có cùng định hướng khi phát triển một thiết bị có kết cấu gọn, chi phí chế tạo thấp và dễ vận hành. Tuy nhiên, điểm khác biệt là nghiên cứu không chỉ dừng lại ở thiết kế và chế tạo máy mà còn tiến hành khảo nghiệm thực nghiệm để xác định chế độ vận hành tối ưu, đồng thời đánh giá khả năng ứng dụng của thiết bị trong điều kiện sản xuất thực tế của các cơ sở chế biến quy mô nhỏ.

3.5. So sánh sơ bộ về đặc tính kỹ thuật, giá thành và tiềm năng ứng dụng

Từ bảng 2 cho thấy tổng giá thành sơ bộ của máy cán bột mì do nhóm nghiên cứu chế tạo là 2,5 triệu đồng. Mức giá này vẫn thấp hơn đáng kể so với các máy cán bột mì thương mại trên thị trường, vốn có giá dao động từ khoảng 5,2 triệu đến 47,5 triệu đồng. Kết quả so sánh cho thấy, máy của nhóm nghiên cứu có giá thành thấp hơn khoảng 2,08 lần so với máy MT-200D1 và thấp hơn khoảng 18,8–19 lần so với các máy cán bột công nghiệp 2 chiều. Điều này cho thấy mẫu máy nghiên cứu có ưu thế về chi phí đầu tư thấp, kết cấu đơn giản, dễ chế tạo và dễ bảo trì, phù hợp với hộ gia đình hoặc cơ sở chế biến mì quy mô nhỏ. Tuy nhiên, so với các thiết bị thương mại, mẫu máy nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế về mức độ hoàn thiện, khả năng làm việc liên tục và tính tự động hóa. Do đó, hướng phát triển tiếp theo là tiếp tục cải tiến kết cấu, tăng độ ổn định khi vận hành và nâng cao năng suất làm việc của máy.

Bảng 2. Đánh giá và so sánh với một số máy cán bột mì trên thị trường

Tên máy	Máy cán bột mì do nhóm nghiên cứu chế tạo	Máy cán bột mì MT-200D1	Máy cán bột mì 1 chiều BZ-300	Máy cán bột cắt sợi 1 chiều AG-350S	Máy cán bột 2 chiều SS-H520 Soven	Máy cán bột mì chân inox HW-520AF
Quy mô sử dụng	Gia đình, quán ăn, cơ sở nhỏ	Gia đình, quán ăn, cơ sở nhỏ	Cơ sở sản xuất nhỏ, quán mì, cơ	Cơ sở mì tươi, bánh canh, cơ sở	Cơ sở sản xuất vừa và lớn,	Cơ sở sản xuất vừa và lớn, cơ

KHOA HỌC - CÔNG NGHỆ

			sở chế biến thực phẩm	chế biến nhỏ và vừa	xương bánh, xương mì	sở bánh/mì chuyên nghiệp
Điện áp	220V/50Hz	220V/50Hz	220V/50Hz	220V/50Hz	380 V	220V/50Hz
Công suất	1500 W	750 W	1.500 W	2,2 kW	1,1 kW	750 W
Năng suất	Khoảng 25 kg/h	Khoảng 20 kg/h	25–30 kg/h	-	60-70 kg/h	70-80 kg/h
Trục con lăn cán	Có trục cán,	Có trục cán và bộ dao cắt sợi	Có trục cán và bộ dao cắt sợi	Con lăn dài 290 mm	Hệ trục cán kết hợp băng tải 2 chiều	Hệ trục cán kết hợp băng tải 2 chiều
Độ dày cán	Có thể điều chỉnh độ dày cán	Có thể điều chỉnh độ dày cán	Có thể điều chỉnh độ dày cán	Có thể điều chỉnh độ dày cán	0–40 mm	0–40 mm
Dao cắt sợi	Không có dao cắt sợi; tập trung cán tâm bột	Dao sợi 2 mm và 6 mm	Dao sợi 2 mm	Dao sợi 2 mm	Không có dao cắt sợi; tập trung cán tâm bột	Không có dao cắt sợi; tập trung cán tâm bột
Vật liệu chính	Kim loại/thép không gỉ ở các bộ phận tiếp xúc chính, tùy nhà cung cấp	Kim loại/thép không gỉ ở các bộ phận tiếp xúc chính, tùy nhà cung cấp	Kim loại/thép không gỉ ở các bộ phận tiếp xúc chính, tùy nhà cung cấp	Kim loại/thép không gỉ	Kim loại/thép không gỉ ở các bộ phận tiếp xúc chính, tùy nhà cung cấp	Inox ở chân/vỏ và các bộ phận tiếp xúc
Kích thước máy	1000 x 350x610 mm	390×355×415 mm	520×370×880 mm	490×330×860 mm	2430×880×1230 mm	2400×950×1300 mm
Khối lượng	40 kg	23 kg	56,5 kg	79 kg	240 kg	195 kg
Giá bán/giá thành tham khảo	2,5 triệu đồng	5,2 triệu đồng	9,2–13,5 triệu đồng	17,5 triệu đồng	43,5 triệu đồng	47–47,5 triệu đồng
Nhận xét	Giá thành thấp, kết cấu đơn giản, dễ chế tạo và dễ bảo trì; phù hợp định hướng cơ giới hóa quy mô nhỏ.	Năng suất gần tương đương máy nghiền cứu, nhưng giá bán cao hơn do là sản phẩm thương mại có motor, vỏ máy và bảo hành.	Năng suất cao hơn mẫu nghiền cứu, phù hợp sản xuất thường xuyên nhưng chi phí đầu tư lớn hơn.	Có khả năng cán và cắt sợi, kết cấu hoàn thiện hơn, phù hợp sản xuất liên tục; giá cao hơn nhiều so với mẫu nghiền cứu.	Máy công nghiệp, độ ổn định và khả năng làm việc cao, nhưng kích thước lớn và giá đầu tư cao.	Kết cấu inox và băng tải lớn, phù hợp sản xuất chuyên nghiệp; chi phí đầu tư cao, không phù hợp hộ nhỏ.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế, chế tạo và khảo nghiệm máy cán bột mì hoạt động theo nguyên lý cán liên tục, phù hợp với định hướng cơ giới hóa tại các cơ sở chế biến quy mô nhỏ. Điểm mới của nghiên cứu là đã khảo nghiệm định lượng ảnh hưởng đồng thời của tốc độ trục cán và khe hở trục cán đến thời gian cán, độ đồng đều và tỷ lệ đứt đoạn của tấm bột, từ đó xác định được chế độ vận hành phù hợp nhất trong phạm vi khảo sát, đồng thời so sánh sơ bộ hiệu quả kinh tế với các máy thương mại. Kết quả khảo nghiệm cho thấy chế độ vận hành tại tốc độ trục cán 65,3

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Thin, P. P, Win, H. H, Soe, A. K, & Latt (2024). *Development and Testing of a Semi-automatic Machine for Making Noodles*, Advanced Engineering Letters, 3(2), 64–75.
 2. Kadimcherla, V, Vemuri, V. P. B, Arepalli, M. R, & Bourishetty (2023). *Design and Fabrication of Noodle Making Machine*, AIP Conference Proceedings, 2492, 050016.
 3. Altamash, M., Sagar, K., & Srivastava A (2024). *Design and Fabrication of Semi Automatic Noodles Making Machine*, IJSART, 10(5).
 4. Liu et al (2021). *Effects of salt and kansui on rheological, chemical and structural properties of noodle dough during repeated sheeting process*, Food Chemistry, 342, 128365.
 5. Grochowicz & Nadulski (2007). *Small-scale technologies and minimally processed food – an overview of accessible technical equipment and conditions of implementation*, Polish Journal of Food and Nutrition Sciences.
 6. Hồ Văn Dũng, Khương Anh Sơn, Phạm Việt Hùng, Võ Công Anh, Lê Thị Kim Anh, Nguyễn Thanh Cường & Trần Khang (2025). *Nghiên cứu, thiết kế, chế tạo máy ủ tối đen tự động với năng suất 10 kg/mẻ*, Tạp chí Công nghiệp Nông thôn, số 58.
- Ngày gửi bài: 12/08/2026
 - Ngày phản biện: 28/08/2026
 - Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

vòng/phút kết hợp với khe hở 3 mm là phù hợp nhất. Ở điều kiện này, thời gian cán đạt 69 giây, độ đồng đều của tấm bột đạt 88,5% và tỷ lệ đứt đoạn là 4,7%. Máy có kết cấu đơn giản, chi phí chế tạo thấp khoảng 2,5 triệu đồng, có tiềm năng ứng dụng tại hộ gia đình và cơ sở chế biến nhỏ. Hạn chế của nghiên cứu là số lần lặp khảo nghiệm và đánh giá thống kê sai số, độ tin cậy còn chưa được trình bày đầy đủ. Các nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung khảo nghiệm với phân tích thống kê chi tiết hơn, đánh giá đặc tính lưu biến của khối bột và thử nghiệm trong điều kiện sản xuất thực tế.

7. Trịnh Chất, Lê Văn Uyển (2006). *Tính toán thiết kế hệ dẫn động cơ khí, Tập 1*, Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.
8. Shuyi Liu, Quan Liu, Xue Li, Mohammed Obadi, Song Jiang, Shiyan Li, Bin Xu. *Effects of dough resting time on the development of gluten network in different sheeting directions and the textural properties of noodle dough*, LWT, volume 141, 2021, 110920, ISSN 0023-6438, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110920>.
9. Vệ Quốc Linh, Hồ Văn Dũng, Phan Tôn Thanh Tâm, Phạm Anh Tuấn. *Nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy thái lá sen tươi làm trà tại thành phố Huế*, Tạp chí Công nghiệp Nông thôn, số 58, trang 109-118.
10. Đỗ Hữu Nhơn, Đỗ Thành Dũng, Phan Văn Hạ (2011). *Tính toán thiết kế chế tạo máy cán kim loại và máy cán thép*, NXB Bách khoa Hà Nội.
11. Phan Ton Thanh Tam, Truong Xuan Loc, Pham Viet Toan, Ho Van Dung. *Application of Mechanical Design Methods in the Development of a Shiitake Mushroom Stem Grinder for Semi-Industrial-Scale Production of Mushroom Floss*, International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Educational Development, V2(4): Page(76-82) July - August 2026. ISSN: 3107-6513.

NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ, VÀ CHẾ TẠO MÔ HÌNH MÁY THU GOM RÁC TRÊN BÃI BIỂN THEO NGUYÊN LÝ TRỒNG RĂNG CÀO TẠI THÀNH PHỐ HUẾ

Nguyễn Văn Hải¹, Nguyễn Đức Tâm¹, Cao Văn Vinh¹,
Nguyễn La Tuấn Anh¹, Hồ Văn Quốc Huy¹, Vệ Quốc Linh^{1*}

TÓM TẮT

Ô nhiễm rác thải nhựa sinh hoạt và chất thải rắn ven bờ biển đang đe dọa nghiêm trọng đến mỹ quan, hệ sinh thái và nền kinh tế du lịch tại các tỉnh ven biển Việt Nam nói chung và khu vực đầm phá, bãi biển thành phố Huế nói riêng. Nghiên cứu này trình bày việc thiết kế, chế tạo và khảo nghiệm một hệ thống máy dọn rác bãi biển tự hành quy mô nhỏ (kích thước tổng thể 2349 mm × 960 mm × 1065 mm, khối lượng 105 kg) hoạt động theo nguyên lý trồng răng cào kết hợp để thay thế phương pháp gom thủ công. Hệ thống di chuyển gồm 3 bánh xe cứng và cơ cấu trồng cào xới được tính toán động lực học tương tác máy - đất dựa trên lý thuyết Bekker và phương trình cơ học đất tổng quát của McKyes nhằm tối ưu hóa công suất, tránh hiện tượng quá tải động cơ hoặc sa lầy trên nền cát rời. Máy được khảo nghiệm thực tế tại bãi biển Thuận An, thành phố Huế, và các loại rác bao gồm 70 chai nhựa và 33 lon nhôm được bố trí trên dải thử nghiệm kích thước 15 m × 1,2 m với 3 lần lặp lại. Kết quả khảo nghiệm cho thấy thiết bị vận hành ổn định, đạt hiệu quả làm sạch là 62,38% đối với chai nhựa (bỏ sót 37,62%) và 64,65% đối với lon nhôm (bỏ sót 35,35%). Năng suất trung bình của máy đạt mức 921,8 m²/h. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn trong phục vụ chế tạo các thiết bị dọn rác bãi biển tự hành giá thành thấp, thích ứng tốt với điều kiện địa hình bãi biển thoải miền Trung Việt Nam

Từ khóa: Máy dọn rác bãi biển, McKyes, Bekker, trồng răng cào, Rác thải nhựa.

RESEARCH, DESIGN, AND FABRICATION OF A BEACH CLEANING MACHINE MODEL BASED ON A ROTARY RAKE-TOOTH DRUM PRINCIPLE IN HUE CITY

ABSTRACT

Coastal household plastic waste and solid waste pollution severely threaten the aesthetics, ecosystems, and tourism economy of coastal provinces in Vietnam in general, and the lagoons and beach areas of Hue City in particular. This study presents the design, physical fabrication, and field testing of a small-scale, autonomous beach cleaner system (overall dimensions of 2349 mm × 960 mm × 1065 mm, weight of 105 kg) operating on a combined rake-drum principle to replace manual collection methods. The mobility system, consisting of three rigid wheels, and the rake-drum mechanism were analyzed using machine-soil interaction dynamics based on Bekker's theory and McKyes' generalized soil mechanics equation to optimize power and prevent motor overload or sinkage on loose sand. The machine was field-tested at Thuan An Beach in Hue City using a standard waste seeding method (70 plastic bottles and 33 aluminum cans) on a 15 m × 1.2 m test strip with three repetitions. The experimental results demonstrated stable operation, achieving cleaning efficiency of 62.38% for plastic bottles (with a 37.62% miss rate) and 64.65% for aluminum cans (with a 35.35% miss rate). The average productivity of the machine reached 921.8 m²/h. This research provides an important scientific and practical basis for fabricating low-cost, autonomous beach cleaning equipment that adapts well to the flat beach terrains of Central Vietnam.

Keywords: Beach cleaner, McKyes, Bekker, Rake-drum, Plastic waste.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vấn đề ô nhiễm rác thải nhựa ở đại dương và chất thải rắn sinh hoạt ven bờ biển đang đe dọa nghiêm trọng đến hệ sinh thái sinh vật biển, mỹ quan đô thị và nền kinh tế du lịch toàn cầu. Trong đó, Việt Nam với 28 tỉnh ven biển là một trong những quốc gia có khối lượng chất thải rắn sinh hoạt ven biển rất lớn, ước tính lên tới 14,03 triệu tấn mỗi năm [1].

Tình trạng ô nhiễm rác thải nhựa tại các khu vực ven biển và đầm phá của thành phố Huế ảnh hưởng nghiêm trọng đến sự phát triển bền vững của hệ sinh thái khu vực. Trong đó, rác thải nhựa sinh hoạt đang đe dọa trực tiếp đến cấu trúc, chức năng của các hệ sinh thái ven biển [2]. Các báo cáo cho thấy các hoạt động vệ sinh tại khu vực bãi biển và ven đầm phá đã thu gom tổng cộng 12,3 tấn chất thải rắn,

¹ Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

* Email liên hệ: vqlinh@hueuni.edu.vn; vequoclinh@huaf.edu.vn

trong đó chất thải nhựa chiếm 4,3 tấn [3]. Khi mở rộng phạm vi đánh giá trên toàn bộ các lưu vực nước, tổng khối lượng chất thải nhựa được thu hồi ước tính gần 823 tấn [4]. Thực tế cho thấy việc thu gom rác thải ven biển thủ công bằng sức người gặp nhiều hạn chế về năng suất, sức khỏe lao động và không thể xử lý triệt để các loại rác bị vùi dưới lớp cát.

Để giải quyết vấn đề này, vấn đề cơ giới hóa công tác làm sạch bãi biển là hướng đi thiết thực. Tuy nhiên, các máy dọn rác cỡ lớn nhập khẩu thường có giá thành rất cao, khó vận hành trong không gian hẹp. Các nghiên cứu gần đây tập trung đến việc chế tạo các robot tự hành chạy điện hoặc các thiết bị kéo nhỏ gọn. Tuy nhiên, việc thiếu các tính toán động lực học cơ học đất trong nghiên cứu thường dẫn đến hiện tượng động cơ bị quá tải, bánh xe bị sa lầy hoặc lưỡi cào bị kẹt cát. Nghiên cứu này tập trung vào việc tính toán động lực học tương tác giữa cát và máy, từ đó làm cơ sở khoa học để thiết kế và chế tạo một hệ thống máy dọn rác bãi biển quy mô nhỏ phù hợp với địa hình các bãi biển ở Thành phố Huế.

Các thiết bị cơ giới dọn rác bãi biển hiện nay hoạt động chủ yếu dựa trên ba nguyên lý chính. Nguyên lý đầu tiên là nguyên lý sàng lắc, trong đó máy sử dụng hệ thống lưới lọc rung liên tục để phân tách cát và rác. Phương pháp này có ưu điểm thu gom tốt rác có kích thước nhỏ (tàn thuốc, nắp chai) nhưng dễ bị tắc nghẽn trong trường hợp cát ẩm [5]. Nguyên lý thứ hai là nguyên lý răng cào, trong đó hệ thống máy sử dụng các răng kim loại kéo lê trên bề mặt cát để móc các rác thải

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của đề tài này bao gồm mô hình máy dọn rác bãi biển tự hành quy mô nhỏ hoạt động theo nguyên lý trống răng cào và động lực học tương tác giữa bãi cát ven biển và thiết bị. Hệ thống này được thiết kế và chế tạo thực tế nhằm thay thế phương pháp dọn rác thủ công bằng sức

cỡ lớn. Ưu điểm của nguyên lý này là hoạt động tốt trên cát ẩm nhưng lại bỏ sót các hạt nhựa nhỏ [6]. Nguyên lý thứ ba là nguyên lý trống quay, trong đó hệ thống máy sử dụng trống hình trụ xoay tròn để nâng hỗn hợp cát rác lên, khi đó cát lọt qua các khe trống rơi xuống. Ưu điểm của nguyên lý này là máy có công suất lớn nhưng kết cấu công kênh, nặng nề và tiêu thụ năng lượng cao [6]. Nhằm tối ưu hóa thiết kế cho quy mô nhỏ gọn và dễ dàng vận hành, nghiên cứu này đề xuất nguyên lý răng cào được bố trí trên trống quay để thực hiện kết hợp cào và đưa rác vào thùng chứa phía sau.

Mặt khác, việc tìm hiểu đặc tính cơ lý của cát biển là cần thiết để thiết kế hệ thống trống răng cào và tính toán chuyển động. Cát biển bãi tắm chủ yếu thuộc nhóm cát mịn và cát trung bình với dải đường kính hạt từ 0,063 mm đến 0,63 mm theo tiêu chuẩn ISO 14688. Đa số các mẫu cát biển tại Việt Nam có khối lượng riêng dao động từ 2630 đến 2660 kg/m³. Tuy nhiên, trong thực tế đất cát luôn có khoảng rỗng và có chứa không khí (hoặc một phần nước), do vậy thông số quan trọng nhất trong tính toán động lực học là khối lượng thể tích xốp. Thông số này phản ánh độ chặt và độ xốp thực tế của bãi cát. Khối lượng riêng thể tích đối với bãi cát khô phía trên mực nước triều dao động từ 1400 đến 1600 kg/m³ [7]. Ngoài ra, môi trường ven biển có hàm lượng chloride (Cl⁻) trong hơi muối chiếm khoảng 1,9%, gây ra tốc độ ăn mòn kim loại cực kỳ nhanh đối với các bộ phận tiếp xúc trực tiếp như răng cào, trục truyền động và các bộ phận khác.

người, với nhiệm vụ cào, loại bỏ rác trên bề mặt hoặc nằm ẩn dưới lớp cát từ 1 – 5 cm, rồi đưa rác vào thùng chứa và sàng cát phía sau. Mặt khác động lực học tương tác giữa bãi cát ven biển và thiết bị bao gồm lực bám kéo tối đa của bánh xe dựa trên lý thuyết Bekker và sự tương tác giữa cơ cấu trống răng cào và nền cát dựa trên phương trình cơ học đất tổng quát của McKyes cũng được nghiên cứu [8].

2.2 Phương pháp tính toán thiết kế máy

2.2.1. Tính toán công suất động cơ cung cấp cho hệ thống di chuyển

a) Tải trọng toàn bộ máy

Tải trọng toàn bộ máy là lực do khối lượng của toàn bộ thiết bị gây ra lên mặt đất (hoặc mặt tiếp xúc), được tính bằng công thức:

$$N = m \cdot g \quad (1)$$

Trong đó: N - lực tác dụng của trọng lượng xe lên nền đất (N); m - khối lượng toàn bộ máy (kg); g - gia tốc trọng trường (m/s^2).

b) Diện tích tiếp xúc giữa bánh xe và mặt đất.

$$A = \sum(bL) = (bL) \quad (2)$$

Trong đó: hệ số 3 - 3 bánh xe; L - chiều dài tiếp xúc của bánh xe với mặt đất ($L = d/2$) (m); d - là đường kính tối đa bánh xe (m); $d = 0,340$ m; b - chiều rộng lốp xe (m); $b = 0,090$ m; A - diện tích tiếp xúc giữa bánh xe và cát (m^2);

c) Tính lực kéo tối đa:

Ta có công thức tính lực kéo tối đa H_m [8]:

$$H_m = c \sum A + \sum N \tan \phi \quad (3)$$

Trong đó: c - lực dính kết của đất (kPa); Với trường hợp cát khô $c = 0$ kPa; $\sum A$ - Tổng diện tích tất cả các bánh xe tiếp xúc với mặt đất (m^2); $\sum N$ - tổng lực dọc từ phương tiện xuống bánh xe (N); ϕ - Góc ma sát trong, chọn $\phi = 28^\circ$

d) Công suất cho quá trình chuyển động:

Công suất này phản ánh năng lượng cần thiết để đảm bảo xe có thể di chuyển trên mặt đất với tốc độ mong muốn. Lực kéo này phụ thuộc vào tổng trọng lượng của xe, điều kiện mặt đường và hệ số cản lăn. Do đó, việc xác định chính xác công suất di chuyển là rất quan trọng để lựa chọn động cơ phù hợp, đảm bảo xe vận hành ổn định và tiết kiệm năng lượng. Công suất di chuyển được xác định bằng công thức (4) [8].

$$P_{dc} = H_m \times v \quad (4)$$

Trong đó: P_{dc} - là công suất cần cho chuyển động (W); v - là tốc độ di chuyển

$2\text{km/h} = 0,56\text{m/s}$; H_m - là lực kéo của bộ phận di chuyển (N)

2.2.2 Tính toán công suất động cơ cung cấp cho bánh trống răng cào

Lực kéo tổng cần thiết để bánh trống răng cào di chuyển trên bãi biển được tính theo công thức:

$$F_{rc} = F_l + F_c + F_d + F_j \quad (5)$$

Trong đó: F_{rc} - lực kéo tổng cần thiết, (N); F_l - lực cản lăn trên cát, (N); F_c - lực cản cào/xới của răng, (N); F_d - lực cản do dốc, (N); F_j - lực quán tính khi tăng tốc, (N). Trong trường hợp này công suất máy làm việc ở chế độ làm việc ổn định, nên có thể bỏ qua đại lượng này trong tính toán.

a) Lực cản lăn trên cát

Với máy chạy trên cát, có thể tính gần đúng [9]:

$$F_l = \psi \times N \quad (6)$$

Trong đó: ψ - hệ số cản lăn trên cát, thường lấy: cát chặt, ẩm nhẹ: $0,15 \div 0,25$; cát khô, tơi: $0,25 \div 0,45$ [10]; chọn $\psi = 0,25$; N - trọng lượng toàn bộ máy, (N)

b) Lực cản do răng cào cắm vào cát

Đây là thành phần rất quan trọng với bánh trống có răng cào. Có thể tính gần đúng theo áp lực cản cắt của cát:

$$F_c = k_s \times A_c \quad (7)$$

Trong đó: k_s - áp suất cản cắt riêng của cát, N/m^2 , $k_s = 15000$ N/m^2 [11]; A_c - tổng diện tích cắt hữu hiệu của các răng đang làm việc đồng thời, m^2

$$A_c = 5 \times b_r \times h_r \quad (8)$$

Trong đó: Hệ số 5 - số răng đồng thời cắm vào cát; b_r - bề rộng một răng, (m); $b_r = 0,005$ m; h_r - độ sâu cắm răng, (m); $h_r = 0,06$ m

c) Lực cản do dốc bãi biển

Nếu máy làm việc trên bãi có góc nghiêng α :

$$F_d = N \times \sin \alpha \quad (9)$$

Với bãi biển thoải, α thường nhỏ, có thể lấy $2^\circ \div 5^\circ$, chọn $\alpha = 2^\circ$.

d) Công suất cung cấp cho bánh trống răng cào

Nếu trống răng cào có bán kính ngoài $R_{rc} = 0,256$ m (tính từ tâm trục đến đỉnh răng cào), mômen cần thiết tại trục trống răng cào:

$$M_{rc} = F_{rc} \times R_{rc} \quad (10)$$

Công suất tại trục trống răng cào:

$$P_{rc} = \frac{M_{rc} \times n_{rc}}{9550} \quad (11)$$

Trong đó: P_{rc} - công suất tại trục trống răng cào (kW); M_{rc} - mômen tại trục trống răng cào (N.m); n_{rc} - số vòng quay tại trục trống răng cào (vòng/phút). Đại lượng này được tính theo số vòng quay của động cơ cung cấp cho trống răng cào thông qua bộ truyền xích:

$$n_{rc} = \frac{z_{đc}}{z_{rc}} \times n_{đc} \quad (12)$$

Trong đó: $z_{đc}$ - số răng của bánh xích trên trục động cơ; $z_{đc} = 29$; z_{rc} - số răng của bánh

xích trên trục trống răng cào; $z_{rc} = 14$; $n_{đc}$ - số vòng quay trên trục động cơ, $n_{đc} = 81$ vòng/phút

2.2.3. Phương pháp khảo nghiệm, đánh giá khả năng làm việc của máy dọn rác trên bãi biển.

Để đánh giá khả năng hiệu quả thu gom của máy dọn rác trên bãi biển tại Thuận An, thành phố Huế, quá trình thí nghiệm được tiến hành dựa trên phương pháp kết hợp bố trí dải thử thí nghiệm với các loại rác (chai nhựa và lon) được chuẩn bị trước. Kích thước dải thử tương ứng dài x rộng = 15 m x 1,2 m. Trong đó các loại rác được chuẩn bị trên các dải thử với số lượng 70 chai và 33 lon. Quá trình chuẩn bị dải thử và các loại rác được mô tả ở **Hình 1**.



a,



b,



c,

Hình 1. Quá trình chuẩn bị rác và bố trí dải thử.
a,b. Chuẩn bị rác (chai nhựa và lon) ; c. Bố trí dải thử

Để đánh giá hiệu quả thu gom của máy với lượng rác biết trước, quá trình thí nghiệm được tiến hành bằng cách chạy máy khứ hồi trên dải thử với ba lần lặp lại. Sau mỗi lần kết thúc chạy máy, thời gian chạy máy và số

lượng các loại rác được thu gom được kiểm tra và ghi chép.

Hiệu quả làm sạch được xác định như sau:

$$\eta_{m,i} = \frac{m_{thu,i}}{m_{gieo,i}} \times 100\% \quad (13)$$

Trong đó: i - loại rác (chai, và lon); $m_{gic0, i}$ - số lượng chai hoặc lon gieo chuẩn; $m_{thu, i}$ - số lượng chai hoặc lon thu được bởi máy dọn rác

Tỷ lệ bỏ sót:

$$MR=100-\eta_{m,i} \quad (14)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình máy dọn rác trên bãi biển đã được thiết kế:

Dựa trên tổng hợp, phân tích các loại máy dọn rác trên bãi biển, đồng thời dựa vào các thông số đã được tính toán và tổng hợp theo

Năng suất diện tích được tính theo công thức:

$$Q_A = \frac{2 \times A_{dai}}{t} \times 3600 \quad (m^2/h) \quad (15)$$

Trong đó: A_{dai} - diện tích dải ($L_{dai} \times B_{dai}$);
 t - là thời gian chạy máy khứ hồi (giây).

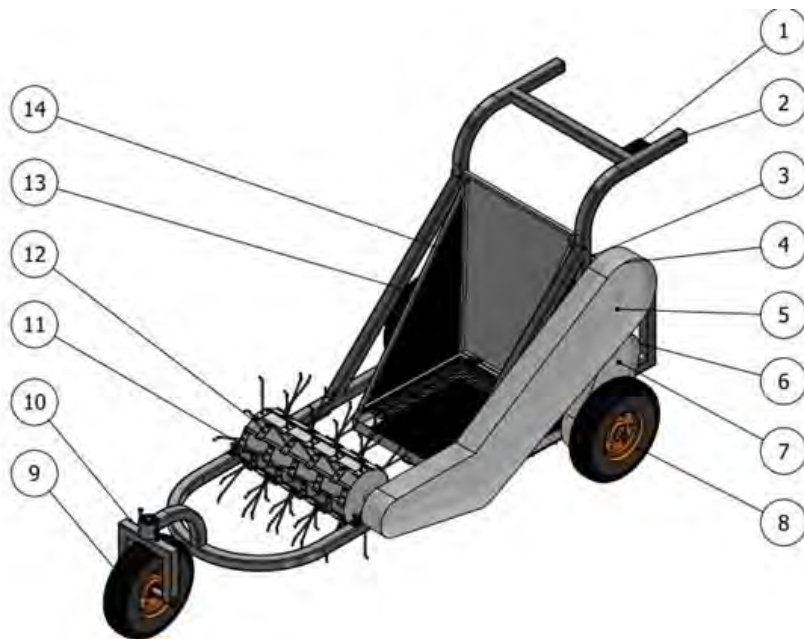
Bảng 1, mô hình máy dọn rác trên bãi biển đã được thiết như **Hình 2**.

Bảng 1. Thông số động lực học của hệ thống máy dọn rác trên bãi biển

Thông số kỹ thuật	Ký hiệu	Giá trị thiết kế	Đơn vị	Vai trò và ý nghĩa lý thuyết
Khối lượng toàn máy	m	105	kg	Khối lượng thiết kế làm cơ sở tính toán tải trọng tác dụng lên nền đất
Tải trọng trọng lực máy	N	1030,05	N	Lực do khối lượng của thiết bị tác dụng lên mặt đất rời
Vận tốc di chuyển thiết kế	v	0,56	m/s	Vận tốc làm việc của máy tự hành trên bãi biển
Lực kéo bám tối đa	H_m	547,69	N	Lực kéo ngang tối đa nhờ bám ma sát
Công suất kéo di chuyển	P_{dc}	306,70	W	Công suất tiêu thụ tối thiểu để di chuyển
Tổng lực cản trống cào	F_{rc}	315,96	N	Tổng lực kéo cản trống cào
Tốc độ quay trống răng cào	n_{rc}	167,79	Vòng/phút	
Công suất trục trống răng cào	P_{rc}	1421	W	
Bán kính ngoài trống răng cào	R_{rc}	0,256	m	Tính từ tâm trục đến đỉnh răng cào

Nguyên lý hoạt động của máy cào rác trên bãi biển: khi bật công tắc (1), động cơ điện (3) hoạt động, thông qua bộ truyền xích bánh sau (7) để dẫn động cho các bánh sau (8) quay, giúp toàn bộ máy di chuyển tiến về phía trước trên bãi cát. Đồng thời với quá trình di chuyển, động cơ điện (3) cũng truyền lực thông qua bộ truyền xích cào rác (5) (nằm

trong ốp bảo vệ) để làm quay trục cào rác (12) đặt ở phía trước đầu máy. Khi trục cào quay, các răng cào bằng thép được gắn trên trống cào rác (12) sẽ cắm sâu xuống mặt cát (độ sâu thường từ 1 – 6 cm) để xới, xúc và gom rác thải trên bề mặt hoặc bị vùi nhẹ dưới cát và rơi vào thùng thu gom rác (13) đặt ở phía cuối máy.



Hình 2. Mô hình thiết kế máy dọn rác trên bãi biển

1- Công tắc; 2 – Khung máy; 3 – Động cơ điện; 4 - Ốp bảo vệ bộ truyền xích cào rác; 5 – Bộ truyền xích cào rác; 6 - Ốp bộ truyền xích bánh sau; 7 – Bộ truyền xích bánh sau; 8 – Bánh sau; 9 – Bánh trước; 10 – Phuộc xe; 11 – Gối đỡ ổ lăn; 12 – Trống cào rác; 13 – Thùng thu gom rác; 14 - Ắc quy

3.2. Kết quả chế tạo và khảo nghiệm máy:

3.2.1. Chế tạo máy:

Máy dọn rác trên bãi biển được chế tạo dựa trên thiết kế như Hình 2 và được trình bày ở Hình 3. Máy có kích thước tổng thể 2349 x 960 x 1065 mm (dài x rộng x cao). Thân trống cào có dạng hình trụ rỗng nhưng không kín hoàn toàn và được tạo thành bởi ba đĩa xích tròn được phân bố đều dọc trục răng cào, và các thanh nan dọc dạng thép phẳng đặt song song chạy dọc trục. Bán kính của trống cào được thiết kế là 100 mm và chiều dài làm việc của trống cào đạt 480 mm. Việc thiết kế khung trống dạng các thanh nan dọc có khe hở lớn giúp giảm đáng kể khối lượng của trống, đồng thời giúp cát khô dễ dàng lọt qua

mà không bị nén chặt vào bên trong lòng trống khi quay. Các răng cào được chế tạo từ các thanh thép uốn cong định hình, có độ cứng vững cao để chịu được lực cản cắt đất và va đập với sỏi đá trên bãi cát. Các răng cào có đầu răng cào được bẻ gấp góc tạo thành các móc hướng theo chiều quay của trống để xúc, móc và kéo các loại rác mục tiêu (như chai và lon) lên máng dẫn rác. Các cụm răng cào được gắn cố định lên các tấm bản mã đệm phẳng. Sau đó, các bản mã này được bắt vít chắc chắn vào các thanh nan dọc của trống. Điều này tạo điều kiện cực kỳ thuận lợi cho việc tháo lắp, căn chỉnh độ sâu cắm răng hoặc thay thế riêng lẻ từng răng cào khi bị mài mòn, gãy hỏng trong quá trình vận hành thực tế tại bãi biển.



Hình 3. Máy dọn rác trên bãi biển sau chế tạo

3.2.2. Khảo nghiệm máy dọn rác trên bãi biển:

Quá trình khảo nghiệm máy dọn rác được thực hiện tại bãi biển Thuận An, thành phố

Huế (Hình 4) để đánh giá các chỉ tiêu bao gồm hiệu quả làm sạch và tỷ lệ bỏ sót, năng suất diện tích.



Hình 4. Quá trình chạy khảo nghiệm thiết bị tại bãi biển Thuận An, thành phố Huế

a) Đánh giá hiệu quả làm sạch và tỷ lệ bỏ sót:

Từ kết quả thực nghiệm thu được qua 3 lần chạy với lượng gieo chuẩn là 70 chai nhựa và 33 lon nhôm được trình bày ở Bảng 2, hiệu quả làm sạch trung bình đạt 62,38% đối với chai nhựa (bỏ sót 37,62%) và 64,65% đối với lon nhôm (bỏ sót 35,35%). Kết quả này phản ánh sự khác biệt về đặc tính hình học và cơ

học của hai loại rác được gieo chuẩn. Chai nhựa có cấu trúc hình trụ tròn trơn dài, bề mặt nhẵn bóng và có độ đàn hồi. Khi răng cào quay và tác động lực, chai nhựa dễ bị trượt xoay hoặc lăn tránh sang hai bên khe hở giữa các răng cào, dẫn đến việc răng không thể bám giữ để đưa lên thùng thu gom rác. Ngược lại, lon nhôm có vỏ mỏng, dễ bị biến dạng, móp méo khi chịu tác động lực ban đầu hoặc

lực gieo thực nghiệm. Các vết móp và góc cạnh biến dạng này tạo ra các điểm tỳ cơ học

lý tưởng, giúp răng cào dễ dàng móc, giữ chặt và cuốn lon nhôm lên thùng thu gom rác.

Bảng 2. Hiệu quả làm sạch và tỷ lệ bỏ sót

Lần thử	Loại rác	Số gieo (m_{gieo})	Số thu (m_{thu})	Hiệu quả (η_m) %	Tỷ lệ bỏ sót (MR) %
1	Chai	70	46	65,71	34,29
1	Lon	33	22	66,67	33,33
2	Chai	70	43	61,43	38,57
2	Lon	33	21	63,64	36,36
3	Chai	70	42	60	40
3	Lon	33	21	63,64	36,36
Trung bình	Chai	70	43,7	62,38	37,62
Trung bình	Lon	33	21,3	64,65	35,35

b) Đánh giá về năng suất điện tích:

Từ các số liệu tổng hợp ở Bảng 3, năng suất điện tích trung bình của thiết bị đạt 921,8 (m^2/h). Thời gian hoàn thành chạy khứ hồi trên dải thực nghiệm giảm dần rõ rệt qua các lần thử: từ 145s (lần 1) xuống 139s (lần 2) và cuối cùng là 138s (lần 3). Ở lần chạy đầu tiên, máy di chuyển trên nền cát khô tơi hoàn toàn, hệ số cản lăn của cát đạt mức cực đại, đồng

thời hiện tượng trượt bánh xe xảy ra mạnh khiến vận tốc thực tế bị kéo thấp. Tuy nhiên, sau các lượt chạy, vết bánh xe cứng hóa bớt nền cát trên dải thực nghiệm đã gieo. Nền cát chặt hơn ở các lượt sau làm giảm đáng kể hệ số cản lăn di chuyển, giúp tăng hiệu suất bám kéo của hệ thống bánh xe tự hành, dẫn đến tốc độ di chuyển ổn định hơn và thời gian chạy được rút ngắn.

Bảng 3. Năng suất điện tích của máy dọn rác trên bãi biển

Lần thử	t (s)	L_{dai} (m)	B_{dai} (m)	Q_A (m^2/h)
1	145	15	1,2	893,8
2	139	15	1,2	932,4
3	138	15	1,2	939,1
Trung bình	140,7	15	1,2	921,8

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế và chế tạo hoàn chỉnh mẫu máy dọn rác bãi biển quy mô nhỏ gọn, hoạt động bằng nguồn điện ắc quy cấp cho các động cơ DC. Thân trống cào được chế tạo dạng hình trụ rỗng bằng các thanh nan dọc có khe hở lớn giúp cát dễ dàng thoát qua, kết hợp hệ thống răng cào thép uốn cong định hình lắp bằng bản mã bắt vít linh hoạt, rất thuận tiện cho việc bảo dưỡng và thay thế. Đồng thời, nghiên cứu đã ứng dụng thành công lý thuyết áp suất - độ lún Bekker và phương trình McKyes để định lượng các

thông số động lực học của máy trên bãi cát khô bãi biển. Kết quả tính toán xác định lực bám kéo tối đa đạt 547,69 N (tương ứng công suất di chuyển 306,70 W) và công suất yêu cầu trên trục trống cào đạt 1421 W ở chế độ cắm răng cực hạn 6 cm. Kết quả khảo nghiệm thực tế tại bãi biển Thuận An chứng minh thiết bị có tính khả thi cao trong việc cơ giới hóa dọn dẹp bãi biển. Hiệu quả thu gom lon nhôm và chai nhựa tương ứng 64,65% và 62,38%. Năng suất điện tích trung bình đạt 921,8 m^2/h .

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện theo nguồn kinh phí nghiên cứu khoa học sinh

viên được tài trợ bởi Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế; Mã số đề tài: DHL2026-CKCN-SV-04.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Cục Biển và Hải đảo Việt Nam, *Môi trường biển đang ở mức báo động đỏ*, 2023. <https://bienvietnam.gov.vn/vi/news/moi-truong-bien-dang-o-muc-bao-dong-do>

2. WWF Việt Nam, *Thành phố Huế cam kết giảm 30% lượng chất thải rác thải nhựa vào năm 2024*, 2021. <https://vietnam.panda.org/?370875/Thanh-ph-Hu-cam-kt-gim-30-lng-tht-thoat-rac-thi-nha-vao-nm-2024>

3. Bộ Nông nghiệp và Môi trường, *Chống ô nhiễm nhựa: Thành phố Huế hướng đến đô thị giảm nhựa kiểu mẫu*, 2025. <https://mae.gov.vn/chong-o-nhiem-nhua-tp-hue-huong-den-do-thi-giam-nhua-kieu-mau-18397.htm>

4. Văn Hoá, *Huế lan tỏa lối sống xanh từ các mô hình giảm nhựa cộng đồng*, 2026. <https://baovanhoa.vn/chuyen-de/hue-lan-toa-loi-song-xanh-tu-cac-mo-hinh-giam-nhua-cong-dong-230871.html>

5. Kuson Prakobkarna, Banyat Saitthiti, and Sakda Intaravichit, *Design and Construction of Beach Cleaning Trailer by Finite Element Method*. International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies, 2012. **3**(2): p. 111-123.

6. Zielinski, S., C.M. Botero, and A. Yanes, *To clean or not to clean? A critical review of beach cleaning methods and impacts*. Marine Pollution Bulletin, 2019. **139**: p. 390-401.

7. Hùng, L.V. and P.V. Quỳnh, *Nghiên cứu đánh giá khả năng sử dụng cát biển làm cốt liệu cho bê tông*. Tạp chí Vật liệu & Xây dựng, 2021. **11**(01): p. 18-24.

8. McKyes, E., *Soil Cutting and Tillage*. 1986, Amsterdam, Elsevier, 217.

9. Đông, N.V., P.M. Đức, and N.V. Thuận, *Xây dựng mô hình xác định lực cản lăn tác dụng lên ô tô trong quá trình vận hành*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, 2016. **5**(102): p. 24-29.

10. Widodo, N.P., et al. *Rolling resistance study of gravelly sand material on laboratory scale*. in *2nd International Symposium of Novel Carbon Resource Science*, 2009, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.

11. Ball, R., *Shear strength properties of sand with fines for various moisture contents*, in *School of Civil Engineering and Surveying*, 2021, University of Southern Queensland, Queensland, Australia.

- Ngày gửi bài: 12/08/2026

- Ngày phản biện: 05/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

BỐ TRÍ UHPC THEO NHU CẦU CHỊU LỰC TRONG HỆ LỖI – VÁCH NHÀ CAO TẦNG: PHƯƠNG PHÁP VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

ThS. Nguyễn Thị Thanh ^{1*}, TS. Phạm Việt Hùng¹

TÓM TẮT

Bê tông siêu tính năng UHPC là vật liệu có cường độ cao, mô đun đàn hồi lớn, độ đặc chắc cao và khả năng kiểm soát nứt tốt, do đó có nhiều tiềm năng ứng dụng trong các hệ kết cấu chịu lực của nhà cao tầng. Tuy nhiên, việc sử dụng UHPC theo hướng thay thế toàn bộ bê tông thường trong hệ vách chịu lực ngang có thể làm tăng đáng kể chi phí vật liệu và chưa phân ánh đầy đủ đặc điểm phân bố nội lực trong công trình. Trong nhà cao tầng, nhu cầu chịu lực, độ cứng và biến dạng không phân bố đồng đều mà thường tập trung tại các vùng trọng yếu như vùng chân lõi, vùng biên lõi và một số vách phụ trợ có đóng góp lớn vào độ cứng ngang hoặc đáp ứng xoắn. Bài viết này trình bày một khung tiếp cận sơ bộ cho việc bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực trong hệ vách chịu lực ngang nhà cao tầng. Trên cơ sở phân rã cơ học hệ kết cấu thành các vùng chức năng, bao gồm lõi trung tâm, vùng chân lõi, vùng biên lõi, vùng bụng vách và các vách phụ trợ dạng L/T, nghiên cứu đề xuất triết lý bố trí UHPC tại các vùng có nhu cầu độ cứng, mô men uốn và ứng suất biến lớn. Cách tiếp cận này chuyển trọng tâm từ tư duy “thay thế vật liệu toàn bộ” sang “phân bố vật liệu theo nhu cầu chịu lực”. Một mô hình phần tử hữu hạn của công trình nhà cao tầng được sử dụng để minh họa khung tiếp cận đề xuất. Trong phạm vi nghiên cứu, hai cấu hình cơ bản được xem xét gồm cấu hình bê tông cốt thép thông thường làm mô hình đối chứng và cấu hình sử dụng UHPC cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang làm mô hình giới hạn trên về hiệu năng. Các chỉ tiêu như chu kỳ dao động cơ bản, chuyển vị đỉnh và độ lệch tầng lớn nhất được sử dụng để đánh giá xu hướng ảnh hưởng của UHPC đến đáp ứng tổng thể của công trình.

Kết quả minh họa ban đầu cho thấy việc sử dụng UHPC trong hệ vách chịu lực ngang có khả năng làm tăng độ cứng tổng thể và giảm đáp ứng biến dạng ngang của công trình. Tuy nhiên, bài viết không nhằm đưa ra kết luận tối ưu cuối cùng về vị trí bố trí UHPC, mà tập trung xây dựng cơ sở lý luận, thuật ngữ, quy trình mô hình hóa và khung đánh giá ban đầu. Các phân tích định lượng đầy đủ về các kích bản bố trí UHPC cục bộ, khả năng giảm bề dày tương đương hiệu năng, hiệu quả sử dụng vật liệu và phản ứng cục bộ tại vùng biên lõi sẽ được phát triển trong các nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa: UHPC; hệ lõi – vách nhà cao tầng; bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực; tải trọng ngang; mô hình phần tử hữu hạn; đáp ứng động lực học; kiểm soát biến dạng ngang.

DEMAND-ALIGNED UHPC DEPLOYMENT IN HIGH-RISE CORE-WALL SYSTEMS: METHODOLOGY AND RESEARCH DIRECTIONS

ABSTRACT

Ultra-High Performance Concrete (UHPC) is a cementitious material characterized by high compressive strength, a high elastic modulus, a dense microstructure, and excellent crack-control capability. These characteristics make UHPC a promising material for application in the lateral load-resisting systems of tall buildings. However, the direct replacement of conventional concrete with UHPC throughout an entire structural wall system may substantially increase material costs and does not adequately reflect the actual distribution of structural demands within high-rise buildings. In tall buildings, the demands for strength, stiffness, and deformation resistance are inherently non-uniform and are typically concentrated in critical regions, such as the base of the core wall, the boundary elements of the core, and selected auxiliary walls that contribute significantly to lateral stiffness and torsional resistance. This paper presents a preliminary framework for the demand-oriented placement of UHPC within the lateral load-resisting wall system of tall buildings.

The proposed framework is established based on a mechanical decomposition of the structural system into several functional regions, including the central core, the core base, the core boundary zones, the wall web, and auxiliary L-shaped and T-shaped walls. Based on the structural demand associated with each functional region, a material allocation strategy is proposed in which UHPC is assigned only to locations subjected to high stiffness requirements, large bending moments, and elevated boundary stresses. Accordingly, the proposed approach shifts the design philosophy from conventional full-scale material replacement to a demand-based material allocation strategy, in which UHPC is selectively applied according to the structural demand rather than uniformly throughout the entire wall system. To demonstrate the proposed framework, a finite element model of a representative tall building is developed. Within the scope of this preliminary study, two fundamental structural configurations are considered: (i) a conventional reinforced concrete (RC) wall

¹ Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

* Email: nguyenthithanh88@huan.edu.vn

system, serving as the reference model, and (ii) a wall system constructed entirely of UHPC, representing the upper-bound performance configuration. The influence of UHPC on the global structural response is evaluated using the fundamental vibration period, roof displacement, and maximum inter-story drift ratio as the primary performance indicators.

The preliminary results indicate that the incorporation of UHPC into the lateral load-resisting wall system has the potential to increase the overall structural stiffness and reduce the lateral deformation response of the building. However, the objective of this study is not to determine the optimal UHPC placement strategy. Rather, it aims to establish the theoretical basis, terminology, modeling methodology, and an initial evaluation framework for the demand-oriented application of UHPC in the lateral load-resisting wall systems of tall buildings. Comprehensive quantitative investigations on localized UHPC placement schemes, equivalent-performance wall thickness reduction, material utilization efficiency, and the local structural response of core boundary regions will be presented in subsequent studies.

Keywords: UHPC; high-rise core-wall systems; demand-aligned UHPC deployment; lateral loads; finite element modelling; dynamic response; lateral deformation control.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

1.1. Bối cảnh nghiên cứu

Trong những thập kỷ gần đây, số lượng các công trình cao tầng được xây dựng tăng lên một cách đáng kể. Những tòa nhà cao tầng được thiết kế và xây dựng bằng cách sử dụng các hệ kết cấu chịu lực tiên tiến và vật liệu nhẹ hơn. Tuy nhiên, những tòa nhà này nhạy cảm với tải trọng động gây ra so với các kết cấu khác. Phần lớn các công trình cao tầng dễ bị phá hoại dưới tải trọng do gió và rung động địa chấn. Do đó, việc thiết kế các công trình này một cách phù hợp là rất cần thiết. Khối lượng tầng, độ cứng tầng, chuyển vị đỉnh, chu kỳ dao động và hệ số giảm chấn là các thông số cần xem xét khi chịu tải trọng động của các hệ kết cấu này. Từ góc độ thiết kế kết cấu, loại công trình này yêu cầu vật liệu bê tông có đặc tính vượt trội để chịu được ứng suất cao do trọng lượng của công trình ngày càng tăng, ngoài ra còn chịu tác động của tải trọng ngang. Hiện nay ở Việt Nam, các tòa nhà cao tầng chủ yếu sử dụng vật liệu bê tông thường (có cường độ chịu nén 20 đến 50 MPa).

Trong những năm gần đây, bê tông siêu tính năng UHPC được quan tâm rộng rãi do có nhiều ưu điểm vượt trội so với bê tông thường, bao gồm cường độ nén cao, mô đun đàn hồi lớn, độ đặc chắc cao, độ bền tốt và khả năng kiểm soát nứt hiệu quả [1], [2], [3], [4]. Với các đặc tính này, UHPC có tiềm năng cải thiện hiệu năng chịu lực và độ bền lâu của kết cấu [5].

Tuy nhiên, việc sử dụng bê tông siêu hiệu năng (UHPC) còn khá hạn chế trong lĩnh vực xây dựng dân dụng và công nghiệp mặc dù sở hữu những đặc tính vượt trội. Đã có một số nghiên cứu về ứng dụng vật liệu siêu tính năng UHPC đối với nhà cao tầng và có những thảo luận về tầm quan trọng của việc sử dụng UHPC trong lĩnh vực kết cấu và cách nó được coi là tương lai của bê tông. Các nghiên cứu đã khẳng định rằng UHPC có các đặc tính tốt hơn bê tông thông thường và có thể giúp cải thiện tính bền vững của các tòa nhà cao tầng đặc biệt đối với các kết cấu chịu tải trọng ngang như lõi và vách cứng. Nghiên cứu của tác giả AlHamaydeh et al. [6] đã nhấn mạnh khối lượng, độ cứng, chu kỳ dao động tự nhiên và hệ số cản là các đặc tính động lực học chính của các công trình cao tầng và UHPC ảnh hưởng trực tiếp tới độ cứng, chu kỳ dao động riêng, phản ứng địa chấn, ứng dụng UHPC giúp giảm chiều dày vách, tăng khả năng kháng chấn, kiểm soát nứt tốt, tăng độ dẻo và khả năng biến dạng. Tác giả Tong et al. [7] đã nghiên cứu khả năng chịu cắt của vách UHPC dưới tải chu kỳ, khẳng định rằng vách UHPC có khả năng chịu cắt và biến dạng cao, vết nứt phân bố đều; đề xuất công thức tính sức kháng cắt phù hợp với kết quả thực nghiệm và có khả năng ứng dụng trong thiết kế. Li et al. (2023) [8] đã đánh giá ứng xử kháng chấn của vách UHPC dưới tải nén-cắt chu kỳ. UHPC cải thiện đáng kể khả năng kháng cắt, kiểm soát nứt tốt hơn HSC, tăng khoảng 85% sức kháng cắt, tăng khoảng 95%

khả năng biến dạng tới hạn và nâng cao khả năng tiêu tán năng lượng.

Li et al. (2023) [9] cũng đã Nghiên cứu vách UHPC chịu kéo-cắt kết hợp mô phỏng tải động đất cho nhà cao tầng, kết quả cho thấy rằng tăng khả năng duy trì cường độ, tăng độ dẻo, cải thiện cơ chế chống trượt và đề xuất công thức tính sức kháng cắt có xét đến khả năng chịu kéo của UHPC. Wu et al. (2025) [10] nghiên cứu vách lắp ghép sử dụng UHPC cục bộ tại vùng biên và vùng chịu lực lớn. Việc chỉ sử dụng UHPC ở các vùng trọng yếu vẫn cải thiện rõ rệt khả năng kháng chấn, tăng khả năng chịu lực, độ dẻo và tiêu tán năng lượng, đồng thời đảm bảo hiệu quả kinh tế. AlHamaydeh et al. [11] đã phân tích hiệu quả sử dụng UHPC cho nhà cao tầng tại UAE. UHPC giúp giảm chuyển vị lệch tầng, cải thiện ứng xử động đất của hệ vách liên kết, cho phép giảm kích thước cấu kiện và có thể giảm tổng chi phí ban đầu khi sử dụng UHPC cường độ 150–185 MPa.

Wang et al. [12] đã nghiên cứu vách UHPFRC cốt thép cường độ cao dưới tải trọng chu kỳ. Cường độ chịu cắt tăng khoảng 76% so với bê tông thường; vách vẫn duy trì ứng xử dẻo ngay cả khi nhu cầu chịu cắt vượt khoảng 20% giới hạn thiết kế theo ACI 318; sợi thép cải thiện kiểm soát nứt và khả năng tiêu tán năng lượng. Tuy nhiên, nó không được sử dụng phổ biến do chi phí cao và quy trình thiết kế đầy thách thức. Nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung vào sự phát triển và ứng xử của vật liệu UHPC của nó từ góc độ liên quan đến vật liệu.

Khi sử dụng vật liệu UHPC, yếu tố kỹ thuật và kinh tế cần được cân nhắc đồng thời. Bên cạnh cải thiện khả năng chịu tải trọng ngang. Tuy nhiên chi phí vật liệu cao, việc sử dụng UHPC một cách đại trà trong toàn bộ hệ kết cấu chưa chắc là phương án kinh tế và hợp lý nhất. Đối với hệ vách chịu lực nhà cao tầng, nội lực và biến dạng không phân bố đồng đều theo chiều cao và mặt bằng công trình. Vùng chân lõi thường chịu mô men uốn lớn và có ảnh hưởng mạnh đến chuyển vị

tổng thể; vùng biên lõi thường chịu tổ hợp nén – uốn lớn; trong khi vùng bụng vách hoặc một số vùng ít chịu lực hơn có thể không cần sử dụng vật liệu cường độ rất cao.

1.2. Vấn đề nghiên cứu

Câu hỏi đặt ra không chỉ là có nên sử dụng UHPC trong hệ vách chịu lực hay không, mà quan trọng hơn là nên bố trí UHPC ở đâu để đạt hiệu quả cơ học cao hơn trong khi vẫn kiểm soát được lượng vật liệu sử dụng. Điều này gợi mở một hướng tiếp cận mới đó là chuyển từ “thay thế vật liệu toàn bộ” sang “bố trí vật liệu theo nhu cầu chịu lực”.

Trong phạm vi bài hội thảo này, vấn đề được tiếp cận ở mức nền tảng: xây dựng triết lý bố trí UHPC theo vùng chịu lực, xác định các vùng cơ học trọng yếu trong hệ vách nhà cao tầng, và minh họa ảnh hưởng sơ bộ của UHPC thông qua so sánh giữa mô hình bê tông cốt thép đối chứng và mô hình UHPC toàn bộ hệ vách chịu lực ngang.

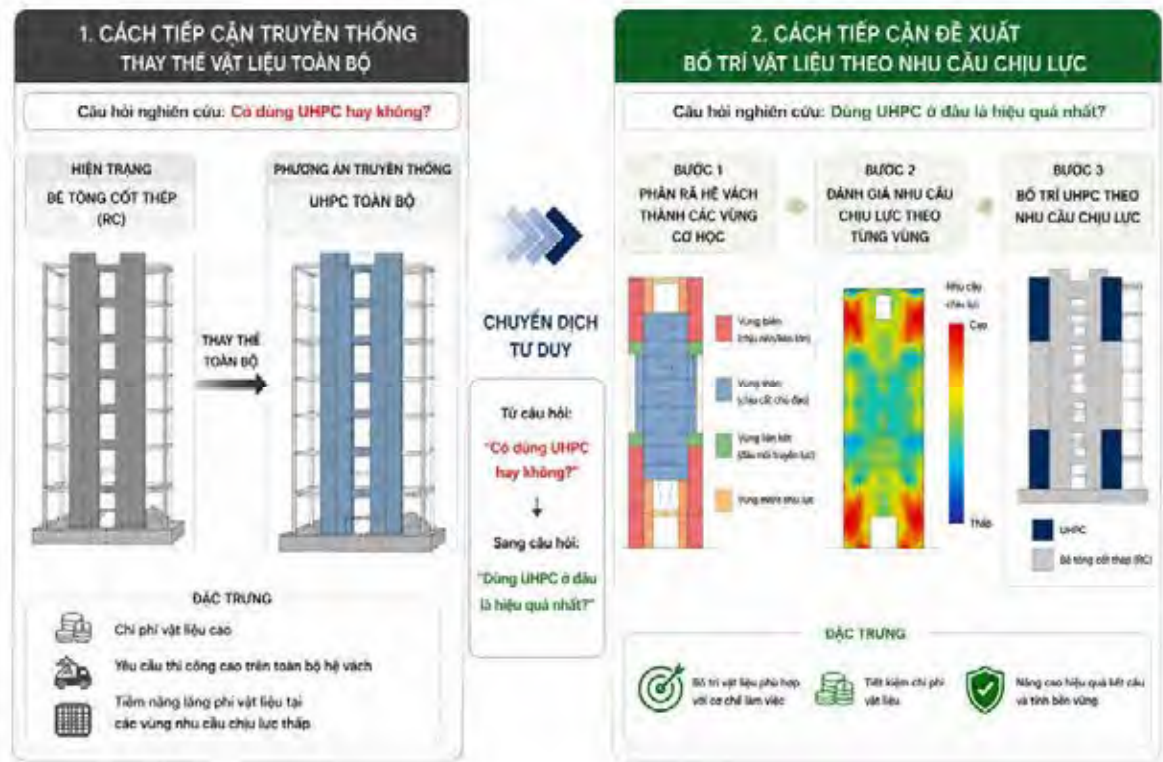
1.3. Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm hướng đến ba mục tiêu chính. Thứ nhất, tổng hợp và phân tích cơ sở lý luận về ứng dụng bê tông siêu tính năng (UHPC) trong hệ vách chịu lực ngang của nhà cao tầng, trên cơ sở các nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số đã được công bố. Thứ hai, đề xuất một khung tiếp cận sơ bộ cho việc bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực, dựa trên quan điểm phân rã hệ vách thành các vùng chức năng có cơ chế làm việc khác nhau, từ đó định hướng phân bố vật liệu phù hợp với đặc trưng ứng suất và biến dạng của từng vùng. Thứ ba, minh họa tính khả thi của cách tiếp cận này thông qua mô hình phần tử hữu hạn, bằng việc so sánh hai cấu hình cơ bản gồm: (1) mô hình đối chứng sử dụng bê tông cốt thép thông thường cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang và (2) mô hình sử dụng UHPC cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang.

Nghiên cứu này không nhằm xác định ngay phương án tối ưu về vị trí bố trí UHPC trong hệ kết cấu. Thay vào đó, nghiên cứu đóng vai trò xây dựng nền tảng phương pháp

luận, làm cơ sở cho các nghiên cứu định lượng chuyên sâu ở giai đoạn tiếp theo, trong đó hiệu quả của các kịch bản bố trí UHPC cục

bộ sẽ được đánh giá thông qua các chỉ tiêu cơ học, kinh tế và hiệu quả sử dụng vật liệu.



Hình 1. Sự chuyển dịch tư duy nghiên cứu từ thay thế vật liệu toàn bộ sang bố trí vật liệu theo nhu cầu chịu lực

II. CƠ SỞ CƠ HỌC CỦA BỐ TRÍ UHPC THEO NHU CẦU CHỊU LỰC

2.1. Vai trò của độ cứng ngang trong đáp ứng động lực học

Đáp ứng động lực học của nhà cao tầng chịu ảnh hưởng mạnh bởi khối lượng, độ cứng và phân bố độ cứng của hệ chịu lực ngang. Chu kỳ dao động cơ bản của công trình có thể được lý giải định tính thông qua tương quan giữa khối lượng hiệu dụng và độ cứng ngang tổng thể. Khi độ cứng ngang tăng, chu kỳ dao động cơ bản có xu hướng giảm. Vì UHPC có mô đun đàn hồi lớn hơn bê tông thường, việc bố trí UHPC tại các vùng đóng góp đáng kể vào độ cứng ngang có thể cải thiện đáp ứng động lực học của công trình.

Tuy nhiên, hiệu quả tăng độ cứng không chỉ phụ thuộc vào việc thay đổi vật liệu, mà còn phụ thuộc vào vị trí bố trí vật liệu trong

hệ kết cấu. Nếu UHPC được đặt tại các vùng có đóng góp nhỏ vào độ cứng ngang hoặc có nhu cầu chịu lực thấp, hiệu quả cải thiện tổng thể có thể không tương xứng với lượng vật liệu sử dụng. Ngược lại, nếu UHPC được bố trí tại các vùng có mô men, biến dạng hoặc ứng suất lớn, hiệu quả cơ học có thể cao hơn.

2.2. Vai trò của vùng chân lõi

Trong hệ vách chịu lực nhà cao tầng, vùng chân lõi thường là nơi tập trung mô men uốn lớn do tác động của tải trọng ngang. Biến dạng uốn tích lũy tại vùng này có ảnh hưởng quan trọng đến chuyển vị đỉnh và độ lệch tầng của toàn công trình. Do đó, việc tăng độ cứng vật liệu tại vùng chân lõi có thể tạo hiệu quả đáng kể trong việc giảm biến dạng ngang.

Về mặt cơ học, chuyển vị ngang của hệ chịu uốn phụ thuộc vào phân bố mô men uốn và độ cứng uốn theo chiều cao công trình. Khi vùng có mô men lớn được tăng cường bằng

vật liệu có mô đun đàn hồi cao hơn, biến dạng uốn tại vùng đó có thể giảm, kéo theo sự giảm chuyển vị đỉnh và độ lệch tầng. Điều này giải thích vì sao vùng chân lõi là một trong những vùng cần được ưu tiên xem xét khi xây dựng các chiến lược bố trí UHPC cục bộ.

2.3. Vai trò của vùng biên lõi

Vùng biên của vách lõi thường chịu ứng suất lớn do tổ hợp giữa lực dọc và mô men uốn. Trong tiết diện vách chịu uốn, ứng suất tại mép vách thường lớn hơn đáng kể so với vùng bụng vách. Vì vậy, bố trí UHPC tại vùng biên lõi có thể có ý nghĩa trong việc kiểm soát ứng suất cục bộ, nâng cao khả năng làm việc của tiết diện và cải thiện khả năng chịu nén – uốn của hệ vách.

Trong phạm vi nghiên cứu này, vai trò của vùng biên lõi được trình bày ở mức cơ sở lý luận nhằm chuẩn bị cho các phân tích sâu hơn ở giai đoạn nghiên cứu tiếp theo. Các phân tích chi tiết về ứng suất biên, nội lực cục bộ hoặc lực trong phân tử vỏ chưa được trình bày đầy đủ trong bài viết này để giữ phạm vi hội thảo ở mức khung phương pháp sơ bộ.

2.4. Vai trò của vùng bụng vách và các vách phụ trợ

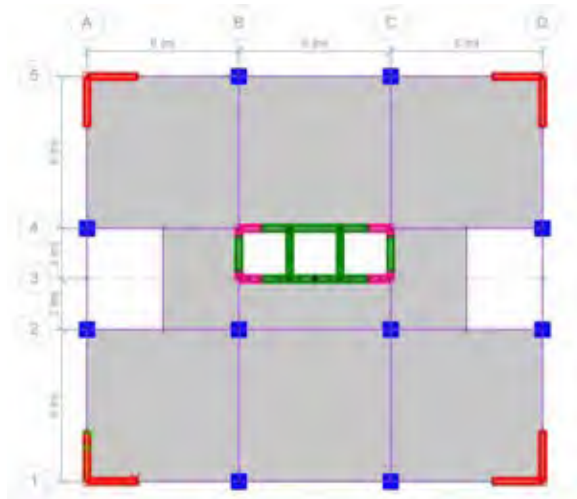
Vùng bụng vách, hay web region, có vai trò truyền lực cắt, liên kết các vùng biên và duy trì sự làm việc tổng thể của tiết diện vách. Tuy nhiên, vùng này không phải lúc nào cũng là vùng có nhu cầu chịu ứng suất nén – uốn lớn nhất. Vì vậy, trong các chiến lược tiết kiệm vật liệu, vùng bụng vách có thể là vùng được cân nhắc giữ bê tông cốt thép thông thường, trong khi UHPC được bố trí tại các vùng trọng yếu hơn.

Ngoài lõi trung tâm, một số công trình nhà cao tầng còn có các vách phụ trợ dạng L/T phân bố trên mặt bằng. Các vách này có thể góp phần tăng độ cứng ngang theo một số phương nhất định, kiểm soát chuyển vị và ảnh hưởng đến đáp ứng xoắn. Mức độ đóng góp của chúng phụ thuộc vào vị trí, hình dạng, kích thước, liên kết với hệ sàn và độ cứng tương đối so với lõi trung tâm. Do đó, vách L/T là một thành phần cần được nhận diện trong khung bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực, nhưng cần đánh giá cụ thể thông qua mô hình kết cấu.

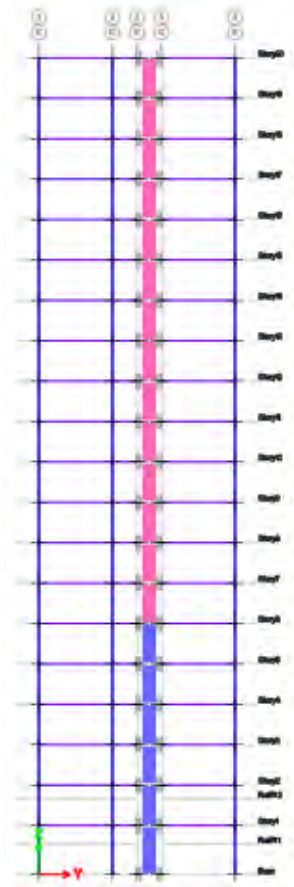
Bảng 1. Phân vùng cơ học của hệ vách chịu lực ngang và vai trò dự kiến của UHPC

Vùng kết cấu	Vai trò cơ học chính	Lý do có thể bố trí UHPC	Ghi chú
Lõi trung tâm	Chịu phần lớn tải trọng ngang và đóng góp chủ yếu vào độ cứng tổng thể của công trình.	Tăng độ cứng tổng thể của hệ kết cấu, cải thiện đặc trưng dao động và giảm chuyển vị dưới tác động của tải trọng ngang.	Là thành phần quyết định đến khả năng kháng gió và động đất của nhà cao tầng.
Vùng chân lõi	Chịu mô men uốn lớn nhất do tải trọng ngang, ảnh hưởng mạnh đến chuyển vị đỉnh và độ lệch tầng.	Tăng độ cứng uốn cục bộ, giảm biến dạng uốn tích lũy và nâng cao hiệu quả kiểm soát chuyển vị (drift).	Đây là khu vực thường xuất hiện nội lực lớn và có tiềm năng ứng dụng UHPC cao nhất.
Vùng biên lõi	Chịu ứng suất nén và uốn lớn tập trung tại mép vách.	Nâng cao khả năng chịu nén và chịu kéo của vùng biên, kiểm soát ứng suất cục bộ và cải thiện hiệu quả làm việc của tiết diện.	Đặc biệt có ý nghĩa đối với các vách chịu mô men lớn hoặc vách liên hợp.

Vùng bụng vách	Truyền lực cắt và liên kết làm việc giữa các vùng biên của vách.	Không nhất thiết phải sử dụng UHPC; có thể duy trì bê tông cốt thép thông thường nhằm tối ưu hiệu quả kinh tế.	Là vùng thích hợp để áp dụng chiến lược sử dụng vật liệu phân vùng (hybrid concrete).
Vách L/T phụ trợ	Bổ sung độ cứng theo mặt bằng, tăng khả năng kháng xoắn và hỗ trợ kiểm soát chuyển vị ngang.	Có thể sử dụng UHPC cục bộ để tăng độ cứng hoặc khả năng chịu lực trong các cấu hình đặc biệt.	Vai trò và mức độ hiệu quả cần được đánh giá theo từng phương án bố trí và hình dạng công trình.



- a) Phân rã cơ học vách trên mặt bằng
 + Màu hồng: Biên vách
 + Màu xanh lá: Bụng vách
 + Màu đỏ: Vách phụ trợ
- b) Phân rã cơ học vách trên mặt đứng
 + Màu xanh dương: Chân lõi



Hình 2. Phân rã cơ học hệ vách chịu lực ngang nhà cao tầng

III. CÁCH TIẾP CẬN VÀ QUY TRÌNH NGHIÊN CỨU

3.1. Quan điểm tiếp cận

Triết lý nghiên cứu của bài viết là bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực thay vì thay thế vật liệu toàn bộ. Theo cách tiếp cận này, hiệu quả của UHPC không chỉ phụ thuộc vào lượng vật liệu sử dụng, mà còn phụ thuộc mạnh vào vị trí bố trí trong hệ kết cấu. Đây là điểm khác biệt quan trọng so với cách tiếp

cận chỉ so sánh bê tông thường và UHPC ở cấp vật liệu hoặc cấu kiện đơn lẻ.

Khung tiếp cận đề xuất gồm ba lớp tư duy. Thứ nhất, hệ vách chịu lực ngang được phân rã thành các vùng cơ học có vai trò khác nhau. Thứ hai, nhu cầu chịu lực của từng vùng được nhận diện dựa trên độ cứng, mô men uốn, ứng suất biên, biến dạng ngang và đóng góp vào đáp ứng động lực học tổng thể. Thứ ba, UHPC được định hướng bố trí tại các vùng có nhu cầu cao, trong khi các vùng ít quan

trọng hơn có thể tiếp tục sử dụng bê tông cốt thép thông thường.

Cách tiếp cận này cho phép chuyển bài toán sử dụng UHPC từ câu hỏi “có nên dùng UHPC hay không” sang câu hỏi sâu hơn “nên bố trí UHPC ở đâu, với phạm vi nào, để đạt được hiệu quả cơ học và vật liệu tốt nhất”. Trong phạm vi bài hội thảo, khung này mới được trình bày ở mức sơ bộ, làm nền cho các nghiên cứu định lượng đầy đủ sau này.

3.2. Quy trình nghiên cứu

Quy trình nghiên cứu sơ bộ được đề xuất gồm sáu bước như sau:

Bước thứ nhất là xác định hệ vách chịu lực ngang của công trình, bao gồm lõi trung tâm và các vách phụ trợ nếu có. Đây là bước nhằm nhận diện phạm vi hệ kết cấu tham gia chính vào việc kháng tải trọng ngang.

Bước thứ hai là phân rã hệ vách thành các vùng cơ học có vai trò khác nhau, bao gồm vùng chân lõi, vùng biên lõi, vùng bụng vách và các vách phụ trợ dạng L/T. Việc phân vùng này cần dựa trên hình học công trình, dòng truyền lực và đặc điểm phân bố nội lực dự kiến.

Bước thứ ba là xây dựng mô hình phần tử hữu hạn đối chứng sử dụng bê tông cốt thép thông thường. Mô hình này đóng vai trò baseline để đánh giá sự thay đổi đáp ứng khi sử dụng UHPC.

Bước thứ tư là xây dựng mô hình sử dụng UHPC cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang. Cấu hình này không nhằm đại diện cho

phương án tối ưu, mà được dùng như giới hạn trên về hiệu năng để xác định mức cải thiện có thể đạt được khi hệ vách được tăng cường bằng UHPC.

Bước thứ năm là so sánh các chỉ tiêu đáp ứng tổng thể như chu kỳ dao động cơ bản, chuyển vị đỉnh và độ lệch tầng lớn nhất. Các chỉ tiêu này phản ánh trực tiếp độ cứng động học và biến dạng ngang của công trình.

Bước thứ sáu là sử dụng kết quả sơ bộ để định hướng các kịch bản bố trí UHPC cục bộ trong nghiên cứu tiếp theo. Các kịch bản này có thể xem xét vùng chân lõi, vùng biên lõi, vách phụ trợ hoặc các tổ hợp bố trí khác nhau.

3.3. Phạm vi phân tích trong bài viết

Trong phạm vi bài hội thảo, nghiên cứu chỉ trình bày khung phương pháp và kết quả minh họa giữa hai cấu hình cơ bản. Cấu hình thứ nhất là mô hình bê tông cốt thép đối chứng. Cấu hình thứ hai là mô hình sử dụng UHPC cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang. Các kịch bản bố trí UHPC cục bộ, giảm bề dày vách, phân loại tương đương hiệu năng, đánh giá hiệu quả sử dụng vật liệu và phân tích phản ứng cục bộ chưa được trình bày chi tiết trong bài viết này.

Việc giới hạn phạm vi như vậy giúp bài viết tập trung vào mục tiêu nền tảng: xây dựng cơ sở lý luận, thuật ngữ và quy trình tiếp cận ban đầu. Các nội dung phân tích sâu hơn sẽ được phát triển trong các nghiên cứu tiếp theo.

hướng đến đáp ứng xoắn của công trình. Các cấu kiện sàn, dầm, cột và hệ khung xung quanh được mô hình hóa phù hợp với vai trò chịu tải trọng trọng lực và tương tác với hệ vách. Trong phạm vi bài viết này, trọng tâm phân tích đặt vào ảnh hưởng của vật liệu sử dụng trong hệ vách chịu lực ngang đến các chỉ tiêu đáp ứng tổng thể của công trình. Các chi tiết phân tích sâu hơn về phản ứng cục bộ và hiệu quả vật liệu chưa được trình bày trong bài hội thảo.

IV. MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN MINH HỌA

4.1. Mô tả công trình và hệ kết cấu

Một mô hình nhà cao tầng được xây dựng bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm minh họa khung tiếp cận đề xuất. Hệ chịu lực ngang chính của công trình gồm lõi cứng trung tâm kết hợp với các vách phụ trợ dạng L. Lõi trung tâm đóng vai trò chủ yếu trong kiểm soát tải trọng ngang, trong khi các vách phụ trợ có thể góp phần tăng độ cứng mặt bằng, hỗ trợ kiểm soát chuyển vị và ảnh

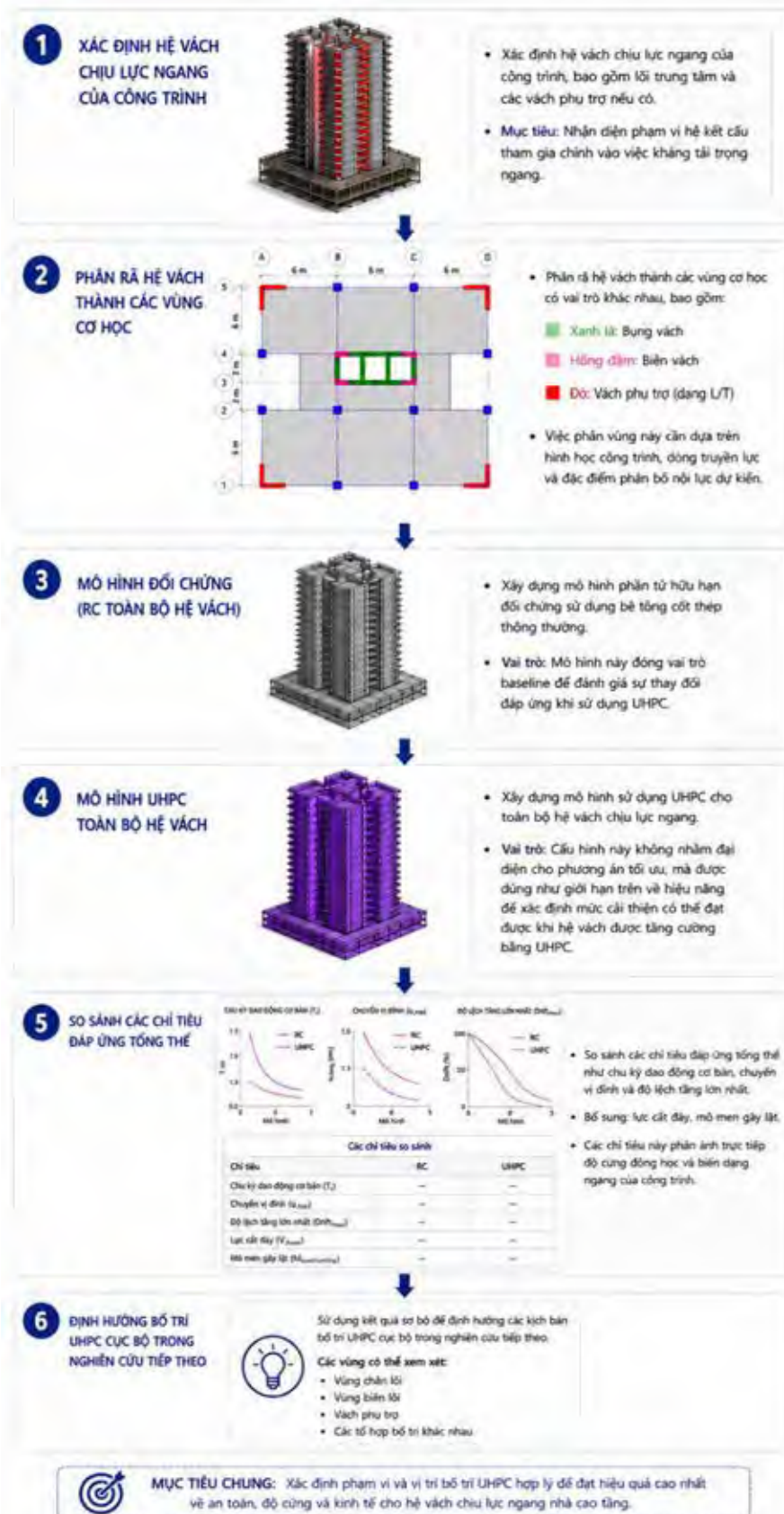
Bảng 2. Phạm vi phân tích trong bài hội thảo và hướng mở rộng nghiên cứu

Nội dung	Phạm vi trong bài hội thảo	Hướng mở rộng nghiên cứu
Tổng quan UHPC và hệ vách chịu lực ngang	Trình bày ở mức cơ sở, giới thiệu đặc tính của UHPC và vai trò của hệ vách chịu lực ngang trong nhà cao tầng.	Phát triển thành tổng quan chuyên sâu, cập nhật các nghiên cứu quốc tế về ứng dụng UHPC trong kết cấu nhà cao tầng và hệ vách chịu lực.
Cơ sở cơ học của bố trí UHPC	Xây dựng khung lý luận về sự khác biệt vai trò cơ học giữa các vùng của hệ vách và tiềm năng phân vùng vật liệu.	Liên kết với các phân tích định lượng về nội lực, ứng suất và độ cứng để xác định vị trí bố trí UHPC tối ưu.
Mô hình bê tông cốt thép đối chứng	Thiết lập và phân tích mô hình sử dụng bê tông cốt thép thông thường làm cơ sở so sánh.	Sử dụng làm mô hình chuẩn (baseline) cho ma trận phân tích đầy đủ với nhiều phương án bố trí UHPC khác nhau.
Mô hình UHPC cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang	Xây dựng và đánh giá mô hình sử dụng UHPC cho toàn bộ hệ vách nhằm xác định xu hướng cải thiện hiệu năng.	Sử dụng như giới hạn trên (upper bound) về hiệu quả cơ học để đối chiếu với các phương án sử dụng UHPC cục bộ.
Các kích bản bố trí UHPC cục bộ	Chỉ đề xuất định hướng và cơ sở lý luận cho việc phân vùng sử dụng UHPC.	Phát triển thành các kịch bản chi tiết (chân lõi, vùng biên, lõi trung tâm, ..), kết hợp phân tích so sánh về độ cứng, chuyển vị và nội lực.
Đánh giá hiệu quả sử dụng vật liệu	Chưa được trình bày trong phạm vi bài hội thảo.	Xây dựng các chỉ số đánh giá hiệu quả vật liệu (Material Efficiency Index), cân bằng giữa mức cải thiện hiệu năng kết cấu và lượng UHPC sử dụng.
Phản ứng cục bộ tại vùng biên lõi	Chưa được xem xét trong bài hội thảo.	Phân tích chi tiết trạng thái ứng suất, nội lực và phân bố lực trong các phần tử vỏ (shell elements) để đánh giá cơ chế làm việc cục bộ của vùng biên lõi khi sử dụng UHPC.

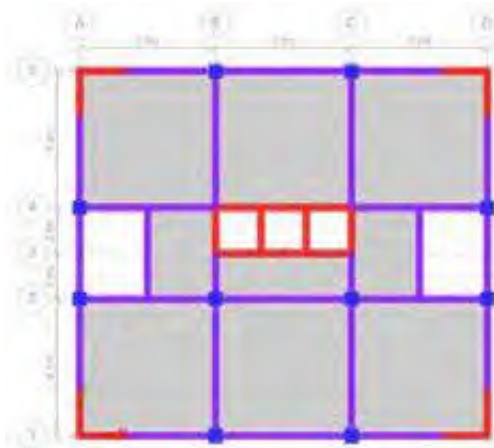
Cụ thể mô hình công trình 20 tầng gồm 1 tầng hầm và 19 tầng nổi, các tầng điển hình cao 3,3 m; tầng hầm cao 4,0 m. Hệ kết cấu khung vách - lõi BTCT, có tổng chiều cao là 66,7m. Hệ thống chịu lực của công trình bao gồm hệ thống chịu lực ngang là các vách đứng bố trí ở 4 góc biên của toàn nhà và vách lõi ở chính giữa. Hệ thống chịu tải trọng đứng bao gồm các tấm sàn phẳng và cột

vuông. Đây là kết cấu phổ biến được sử dụng cho các tòa nhà cao tầng.

Công trình chịu tác dụng của tĩnh tải bao gồm trọng lượng bản thân gbt, trọng lượng các lớp cấu tạo sàn $g_s=150 \text{ daN/m}^2$, hoạt tải sử dụng $q_s=200 \text{ daN/m}^2$. Kích thước tiết diện dầm $300 \times 600 \text{ mm}$, cột $600 \times 600 \text{ mm}$, vách dày 300 mm, sàn dày 120 mm. tường xây trên dầm dày 200 mm.



Hình 3. Khung nghiên cứu sơ bộ cho bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực



a) Mặt bằng tầng điển hình



b) Phôi cảnh 3D của công trình

Hình 4. Mô hình phân tử hữu hạn và mặt bằng tầng điển hình của công trình nhà cao tầng

Các tổ hợp tải trọng tương ứng với các Trạng thái giới hạn theo TCVN 2737-2013 [13] và TCVN 9386-2025 [14].

Bảng 3. Tổ hợp tải trọng kiểm tra các TTGH

Tổ hợp kiểm tra trạng thái giới hạn thứ nhất về cường độ (Ultimate limit state - ULS)			
STT	Tên tổ hợp	Nội dung tổ hợp	Tiêu chuẩn áp dụng
1	ULS1	TT+1,3 HT	TCVN 2737-2023
2	ULS2	TT+2,1GX+	TCVN 2737-2023
3	ULS3	TT+2,1GX-	TCVN 2737-2023
4	ULS4	TT+2,1GY+	TCVN 2737-2023
5	ULS5	TT+2,1GY-	TCVN 2737-2023
6	ULS6	TT+0,9*1,3 HT+2,1GX+	TCVN 2737-2023
7	ULS7	TT+0,9*1,3 TH+2,1GX-	TCVN 2737-2023
8	ULS8	TT+0,9*1,3 TH+2,1GY+	TCVN 2737-2023
9	ULS9	TT+0,9*1,3 TH+2,1GY-	TCVN 2737-2023
10	ULS10	TT+1,3 HT+0,0*2,1GX+	TCVN 2737-2023
11	ULS11	TT+1,3 HT+0,0*2,1GX-	TCVN 2737-2023
12	ULS12	TT+1,3 HT+0,0*2,1GY+	TCVN 2737-2023
13	ULS13	TT+1,3 HT+0,0*2,1GY-	TCVN 2737-2023
14	ULS14	TT+EX+0,3*EY	TCVN 9386-2025
15	ULS15	TT+EY+0,3*EX	TCVN 9386-2025
16	ENVEULS	ENVERLOPE ULS1+ULS2+...+ULS15)	TCVN 2737-2023
2. Tổ hợp kiểm tra trạng thái giới hạn thứ hai về trạng thái làm việc bình thường (Serviceability limit state-SLS)			
17	SLS1	TT+GX+	TCVN 2737-2023
18	SLS2	TT+GX-	TCVN 2737-2023
19	SLS3	TT+GY+	TCVN 2737-2023
20	SLS4	TT+GY-	TCVN 2737-2023
21	ENVESLS	ENVERLOPE (SLS1+...+SLS4)	TCVN 2737-2023

Phương pháp tính tải trọng động đất dựa vào phương pháp phổ phản ứng theo TCVN 9386-2025 [14]. Với vùng địa chấn lấy tại Thành phố Huế có gia tốc nền $a_g=0.06$ (m/s²). Nền đất loại D phụ thuộc vào địa chất khảo sát.

Độ lệch tâm ngẫu nhiên là 0,05, trong đó I là hệ số quan trọng là 1, g là gia tốc trọng trường lấy bằng 9,81 m/s². Hệ số ứng xử của kết cấu là 3,9.

Tải trọng gió được xác định theo TCVN 2737-2023 có kể đến hệ số hiệu ứng giật G_r , với vùng gió IIA, có áp lực gió tự nhiên là 95 daN/m².

4.2. Mô hình vật liệu

Hai nhóm vật liệu được xem xét trong mô hình minh họa. Nhóm thứ nhất là bê tông cốt thép thông thường, dùng cho mô hình đối chứng. Nhóm thứ hai là UHPC, dùng cho hệ vách chịu lực ngang trong mô hình giới hạn trên. Các thông số vật liệu chính bao gồm cường độ nén, mô đun đàn hồi, trọng lượng riêng, hệ số Poisson và các hệ số hiệu chỉnh độ cứng nếu được sử dụng trong mô hình.

Bảng 4. Thông số vật liệu sử dụng trong mô hình minh họa

Thông số	Ký hiệu	UHPC-150	Nguồn tham khảo chính
Cường độ chịu nén (MPa)	f_c'	150	CEDD [15], K-UHPC [16]
Mô đun đàn hồi (MPa)	E	50.000	K-UHPC, ACI 239R [17] và các nghiên cứu thực nghiệm
Hệ số Poisson	ν	0,20	K-UHPC, CEDD
Cường độ chịu kéo trực tiếp (MPa)	f_t	9,0	ACI 239R, KICT-UHPC[18], FHWA[19]
Hệ số giãn nở vì nhiệt ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α	11	CEDD, FHWA
Khối lượng thể tích (kN/m ³)	γ	25	FHWA, các nghiên cứu thực nghiệm

4.3. Cấu hình mô hình đối chứng và mô hình UHPC giới hạn trên

Cấu hình C0 là mô hình bê tông cốt thép đối chứng, trong đó toàn bộ hệ kết cấu sử dụng bê tông cốt thép thông thường. Cấu hình này được dùng làm cơ sở so sánh ban đầu.

Cấu hình C1 là mô hình sử dụng UHPC cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang, bao gồm lõi trung tâm và các vách phụ trợ dạng L. Các cấu kiện khác như sàn, dầm, cột và hệ khung xung quanh vẫn giữ bê tông cốt thép thông

thường. Trong mô hình minh họa, việc thay đổi vật liệu được thực hiện trong phạm vi hệ vách chịu lực ngang. Điều này cho phép đánh giá sơ bộ ảnh hưởng của việc tăng độ cứng vật liệu trong hệ vách đến đáp ứng tổng thể của công trình, đồng thời vẫn giữ các cấu kiện khác như sàn, dầm, cột và hệ khung xung quanh theo vật liệu bê tông cốt thép thông thường.

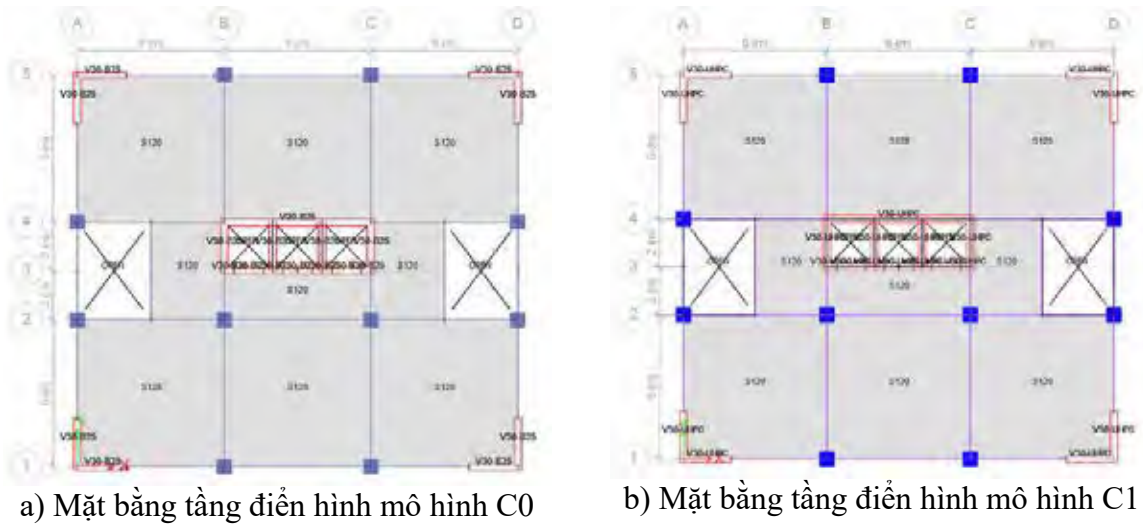
Mô hình tham chiếu (C0) được chọn với mức bê tông là B25 (M350).

Với mô hình sử dụng vật liệu bê tông siêu tính năng UHPC (C1), khả năng chịu nén 150 MPa để nghiên cứu trong công trình này.

Các thông số về vật liệu UHPC được tổng hợp từ các hướng dẫn thiết kế UHPC và các tài liệu tổng quan được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu trong nước và quốc tế. Do đặc tính UHPC phụ thuộc cấp phối và hàm lượng sợi thép, các tiêu chuẩn thường khuyến nghị khoảng giá trị hoặc yêu cầu xác định bằng thí nghiệm, thay vì cho một giá trị cố định như bê tông thường.

thường. Cấu hình này được xem là mô hình giới hạn trên về hiệu năng của hệ vách chịu lực ngang khi sử dụng UHPC.

Việc so sánh C0 và C1 không nhằm khẳng định rằng sử dụng UHPC toàn bộ hệ vách là phương án tối ưu, mà nhằm chứng minh vai trò của vật liệu UHPC trong việc cải thiện độ cứng và đáp ứng biến dạng ngang của công trình. Trên cơ sở đó, các kịch bản bố trí UHPC cục bộ sẽ được phát triển trong các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 5. Hai cấu hình minh họa C0 và C1

4.4. Chỉ tiêu đánh giá

Các chỉ tiêu được sử dụng để đánh giá gồm chu kỳ dao động cơ bản, chuyển vị đỉnh và độ lệch tầng lớn nhất. Chu kỳ dao động cơ bản phản ánh độ cứng động học tổng thể của công trình. Chuyển vị đỉnh phản ánh biến dạng ngang toàn cục. Độ lệch tầng lớn nhất phản ánh điều kiện sử dụng và mức độ kiểm soát biến dạng giữa các tầng.

Lực cắt đáy có thể được xem xét như một chỉ tiêu bổ sung nhằm đánh giá sự thay đổi lực tác dụng khi hệ kết cấu trở nên cứng hơn. Tuy nhiên, trong phạm vi bài hội thảo, trọng tâm vẫn đặt vào các chỉ tiêu biến dạng và động lực học tổng thể.

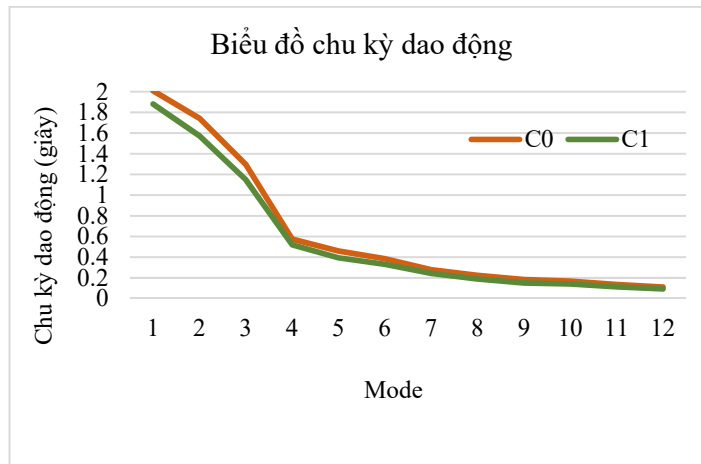
V. KẾT QUẢ MINH HỌA BAN ĐẦU

5.1. Ảnh hưởng của UHPC đến chu kỳ dao động cơ bản (Natural Period: giây)

Để xem xét ảnh hưởng của UHPC đến chu kỳ dao động cơ bản, số lượng các mode tham gia dao động trong các mô hình được xác định dựa vào yêu cầu của TCVN 9386-2025 [14] sao cho “Tổng các khối lượng hữu hiệu của các dạng dao động được xét chiếm ít nhất 90% tổng khối lượng của kết cấu”. Mục đích của yêu cầu này là đảm bảo công trình nhận đủ tải trọng động tác dụng lên các cấu kiện trong công trình (đảm bảo an toàn). Với yêu cầu này, số lượng mode dao động được chọn là 12 mode là đảm bảo.

Bảng 5. Kết quả chu kỳ dao động của các mô hình

Case	Mode	Period (sec)		Mức giảm (%)	Phương dao động
		C0	C1		
Modal	1	2,009	1,88	6,42	Dao động theo phương Y
Modal	2	1,742	1,573	9,70	Dao động theo phương X
Modal	3	1,296	1,148	11,42	Dao động xoắn
Modal	4	0,574	0,52	9,41	
Modal	5	0,459	0,394	14,16	
Modal	6	0,385	0,331	14,03	
Modal	7	0,279	0,243	12,90	
Modal	8	0,224	0,189	15,63	
Modal	9	0,185	0,151	18,38	
Modal	10	0,168	0,141	16,07	
Modal	11	0,137	0,113	17,52	
Modal	12	0,112	0,092	17,86	



Hình 6. Biểu đồ so sánh chu kỳ dao động của 2 mô hình

Kết quả nghiên cứu ban đầu cho thấy việc thay thế bê tông thường bằng bê tông siêu tính năng UHPC làm giảm đáng kể chu kỳ dao động riêng của công trình ở tất cả các mode dao động, với mức giảm dao động từ khoảng 5,6-18,1%.

So sánh chu kỳ dao động giữa C0 và C1 cho phép đánh giá sơ bộ ảnh hưởng của UHPC đến độ cứng động học tổng thể của công trình. Khi UHPC được sử dụng cho hệ vách chịu lực ngang, mô đun đàn hồi của các vùng chịu lực chính tăng lên, làm tăng độ cứng ngang tổng thể. Do đó, chu kỳ dao động cơ bản có xu hướng giảm so với mô hình bê tông cốt thép đối chứng.

Sự giảm chu kỳ dao động cơ bản có thể được xem là dấu hiệu cho thấy hệ kết cấu trở nên cứng hơn. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng sự gia tăng độ cứng cũng có thể làm thay đổi lực tác dụng trong hệ kết cấu, đặc biệt là lực cắt đáy do tải trọng ngang. Do đó, chu kỳ dao động cần được đánh giá đồng thời với các chỉ tiêu biến dạng và nội lực khác.

5.2. Ảnh hưởng của UHPC đến chuyển vị đỉnh: Maximum story dis-

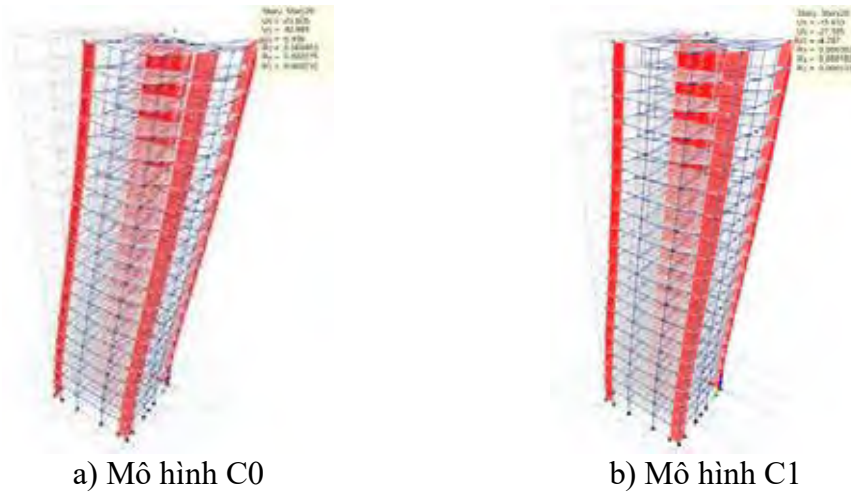
placement (mm)

Chuyển vị đỉnh là chỉ tiêu quan trọng phản ánh biến dạng ngang tổng thể của công trình. Nếu mô hình C1 cho chuyển vị đỉnh nhỏ hơn mô hình C0, điều này cho thấy việc sử dụng UHPC trong hệ vách chịu lực ngang có khả năng cải thiện độ cứng ngang và giảm biến dạng tổng thể.

Kết quả này có ý nghĩa quan trọng vì chuyển vị đỉnh liên quan trực tiếp đến điều kiện sử dụng, cảm giác dao động, biến dạng tổng thể và yêu cầu kiểm soát chuyển vị trong thiết kế nhà cao tầng. Tuy nhiên, trong phạm vi bài viết này, kết quả C0-C1 chỉ được xem là minh họa ban đầu, chưa đủ để đưa ra kết luận về chiến lược bố trí UHPC tối ưu.

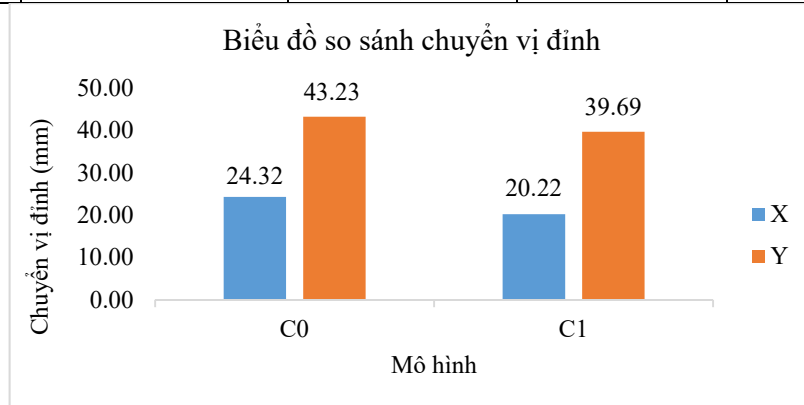
Chuyển vị tại đỉnh theo 2 phương X, Y là giá trị được xem xét trong trạng thái giới hạn 2 về điều kiện làm việc bình thường của hệ kết cấu. Được lấy với tổ hợp các tải trọng ở giá trị tiêu chuẩn, xét đến các tổ hợp tải trọng có tải trọng gió (ENVESLS).

Kết quả chuyển vị đỉnh lớn nhất tại vị trí điểm 1-A của tầng 20:



Hình 7. Biến dạng của 2 mô hình
Bảng 6. Kết quả chuyển vị đỉnh của hai mô hình

Mô hình	Chuyển vị đỉnh phương X (mm)	Chuyển vị đỉnh phương Y (mm)	Độ giảm theo phương X (%)	Độ giảm theo phương Y (%)
C0	24,32	43,23		
C1	20,22	39,69	-16,86	-8,20



Hình 7. Biểu đồ so sánh chuyển vị đỉnh của các mô hình

Kết quả phân tích cho thấy việc thay thế bê tông thường B25 bằng bê tông siêu tính năng UHPC đã làm giảm đáng kể chuyển vị đỉnh của công trình dưới tác dụng của tải trọng ngang, mức giảm 8,2% đến 16,9%. Điều này cho thấy việc sử dụng UHPC trong hệ vách chịu lực ngang có khả năng cải thiện độ cứng ngang và giảm biến dạng tổng thể. Kết quả đạt được cho thấy UHPC là vật liệu có nhiều tiềm năng ứng dụng trong kết cấu nhà cao tầng, nơi yêu cầu khắt khe về kiểm soát chuyển vị và đảm bảo khả năng làm việc trong trạng thái sử dụng.

5.3. Ảnh hưởng của UHPC đến độ lệch tầng lớn nhất (Maximum story drifts Ratio)

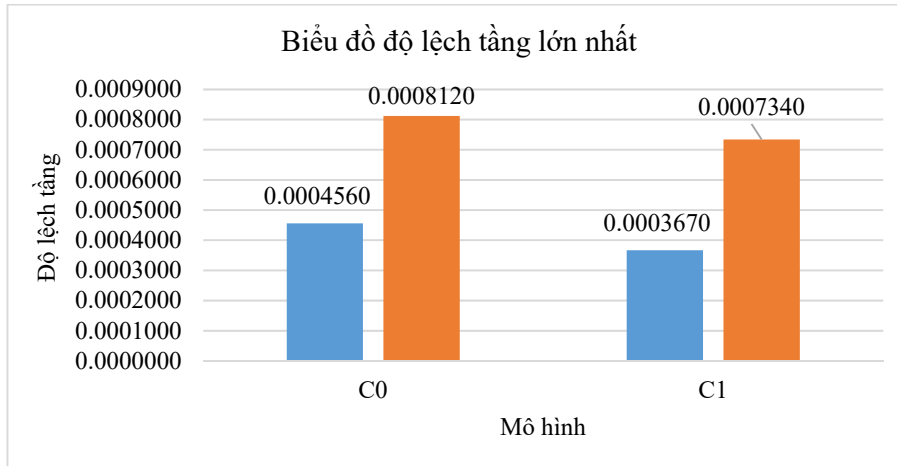
Độ lệch tầng lớn nhất là chỉ tiêu quan trọng trong đánh giá điều kiện sử dụng và an toàn biến dạng của nhà cao tầng. Việc giảm độ lệch tầng trong mô hình C1 so với C0 cho thấy UHPC có tiềm năng cải thiện hiệu năng làm việc của hệ vách chịu lực ngang.

Tuy nhiên, độ lệch tầng là chỉ tiêu phụ thuộc vào phân bố độ cứng theo chiều cao công trình. Do đó, trong các nghiên cứu tiếp theo, cần đánh giá thêm các chiến lược bố trí UHPC cục bộ theo chiều cao, đặc biệt là vùng chân lõi, nơi có mô men uốn và biến dạng tích lũy lớn.

Kết quả độ lệch tầng lớn nhất như sau:

Bảng 7. Kết quả độ lệch tầng lớn nhất của hai mô hình

Mô hình	Độ lệch tầng lớn nhất phương X	Độ lệch tầng lớn nhất phương Y	Độ giảm theo phương X (%)	Độ giảm theo phương Y (%)
C0	0,0004560	0,0008120		
C1	0,0003670	0,0007340	19,5	9,6

**Hình 8.** Biểu đồ so sánh độ lệch tầng lớn nhất

Giá trị tỷ số chuyển vị lệch tầng ở 2 mô hình được quan sát thấy đều tăng lên cho đến tầng 8, sau đó giảm nhẹ ở các tầng phía trên.

Kết quả phân tích cho thấy việc thay thế bê tông thường B25 bằng UHPC làm giảm đáng kể giá trị độ lệch tầng lớn nhất của công trình trong khoảng 9,6-19,5%. Kết quả này khẳng định rằng việc sử dụng UHPC có tác động tích cực đến khả năng kiểm soát biến dạng của nhà cao tầng. Do đó, UHPC là vật liệu có nhiều tiềm năng ứng dụng trong nhà cao tầng nhằm giảm biến dạng và cải thiện trạng thái giới hạn sử dụng của công trình.

5.4. Nhận xét chung về kết quả minh họa

Các kết quả trong bài viết này chỉ được xem là minh họa ban đầu cho khung tiếp cận đề xuất. Cấu hình C1 không được xem là phương án tối ưu về hiệu quả vật liệu, mà chỉ đóng vai trò mô hình giới hạn trên để chứng minh rằng việc thay đổi vật liệu trong hệ vách chịu lực ngang có ảnh hưởng rõ rệt đến đáp ứng động lực học và biến dạng ngang.

Trên cơ sở đó, các kịch bản bố trí UHPC cục bộ cần được phát triển trong các nghiên cứu tiếp theo nhằm trả lời các câu hỏi sâu hơn: vùng nào trong hệ vách nên được ưu tiên bố trí UHPC; mức độ giảm bề dày vách có

thể đạt được là bao nhiêu; hiệu quả cải thiện trên một đơn vị thể tích UHPC ra sao; và phản ứng cục bộ tại vùng biên lõi thay đổi như thế nào.

VI. THẢO LUẬN

6.1. Ý nghĩa của so sánh C0–C1

So sánh giữa mô hình bê tông cốt thép đối chứng và mô hình sử dụng UHPC cho toàn bộ hệ vách chịu lực ngang cho thấy UHPC có khả năng cải thiện độ cứng và giảm biến dạng ngang của công trình. Đây là cơ sở quan trọng để khẳng định rằng vật liệu UHPC có thể ảnh hưởng rõ rệt đến đáp ứng tổng thể của hệ kết cấu nhà cao tầng. Tuy nhiên, kết quả này chưa nhằm xác định phương án bố trí tối ưu, vì cấu hình C1 sử dụng UHPC với phạm vi lớn và có thể chưa phải là giải pháp hiệu quả nhất về vật liệu. Về mặt nghiên cứu, C1 nên được xem như mô hình giới hạn trên về hiệu năng, giúp xác định mức cải thiện tối đa khi toàn bộ hệ vách chịu lực ngang được tăng cường bằng UHPC.

6.2. Sự cần thiết của bố trí UHPC cục bộ

Do nội lực và biến dạng trong nhà cao tầng phân bố không đều, việc sử dụng UHPC toàn bộ có thể dẫn đến lãng phí vật liệu tại các vùng không có nhu cầu chịu lực cao. Vì vậy,

một hướng nghiên cứu hợp lý là bố trí UHPC cục bộ tại các vùng trọng yếu, chẳng hạn như vùng chân lõi, vùng biên lõi hoặc các vách phụ trợ có đóng góp lớn vào độ cứng ngang.

Cách tiếp cận này có thể giúp khai thác hiệu quả ưu điểm của UHPC trong khi vẫn kiểm soát được lượng vật liệu sử dụng. Đây cũng là cơ sở để phát triển các tiêu chí đánh giá hiệu quả vật liệu trong các nghiên cứu tiếp theo.

6.3. Ý nghĩa của cách tiếp cận đề xuất

Khung tiếp cận đề xuất giúp chuyển bài toán sử dụng UHPC từ cấp vật liệu hoặc cấu kiện riêng lẻ sang cấp hệ kết cấu. Thay vì chỉ đánh giá UHPC như một vật liệu có cường độ cao, nghiên cứu hướng đến việc xác định cách phân bố UHPC trong toàn hệ vách chịu lực sao cho phù hợp với nhu cầu cơ học của từng vùng. Điểm quan trọng của khung này là sự kết hợp giữa cơ sở cơ học và mô hình phân tử hữu hạn. Cơ sở cơ học giúp giải thích vì sao một số vùng trong hệ vách cần được ưu tiên bố trí UHPC. Mô hình phân tử hữu hạn giúp đánh giá định lượng ảnh hưởng của các phương án bố trí đến đáp ứng tổng thể của công trình.

6.4. Phạm vi và giới hạn của bài viết

Bài viết chỉ dừng ở mức khung tiếp cận sơ bộ và minh họa ban đầu bằng hai cấu hình C0 và

VII. KẾT LUẬN

Bài viết đã trình bày một khung tiếp cận sơ bộ cho việc bố trí UHPC theo nhu cầu chịu lực trong hệ vách chịu lực ngang nhà cao tầng. Trên cơ sở phân rã cơ học hệ vách thành các vùng chức năng, nghiên cứu cho thấy UHPC không nhất thiết phải được sử dụng theo hướng thay thế vật liệu toàn bộ, mà có thể được định hướng bố trí tại các vùng có nhu cầu chịu lực và độ cứng cao.

So sánh minh họa giữa mô hình bê tông cốt thép đối chứng và mô hình UHPC toàn bộ hệ vách chịu lực ngang cho thấy UHPC có xu hướng làm giảm chu kỳ dao động, chuyển vị đỉnh và độ lệch tầng của công trình. Kết quả này cho thấy UHPC có khả năng cải thiện độ cứng và giảm biến dạng ngang của công trình. Đây là cơ sở quan trọng để khẳng định rằng vật liệu UHPC có thể ảnh hưởng rõ rệt đến đáp

C1. Do đó, các kết quả chưa được sử dụng để đưa ra khuyến nghị thiết kế cuối cùng về vị trí bố trí UHPC hoặc mức độ giảm bề dày vách. Các phân tích về hiệu quả vật liệu, phản ứng cục bộ tại vùng biên lõi, các kịch bản bố trí UHPC cục bộ và tiêu chí tương đương hiệu năng chưa được trình bày trong phạm vi bài viết này. Việc giới hạn phạm vi là cần thiết để tập trung vào mục tiêu nền tảng của bài hội thảo, đồng thời tạo cơ sở cho các nghiên cứu định lượng đầy đủ hơn trong giai đoạn tiếp theo.

6.5. Định hướng nghiên cứu tiếp theo

Từ kết quả minh họa ban đầu, các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng theo các hướng sau: xây dựng ma trận bố trí UHPC cục bộ trong hệ vách chịu lực ngang; đánh giá khả năng giảm bề dày vách theo tiêu chí tương đương hiệu năng; tính toán hiệu quả sử dụng vật liệu; kiểm tra phản ứng cục bộ tại vùng biên lõi, vùng chân lõi và xung quanh lỗ mở; xây dựng bản đồ khuyến nghị bố trí UHPC theo mục tiêu thiết kế. Các hướng phát triển này sẽ giúp chuyển khung tiếp cận sơ bộ trong nghiên cứu thành một khung đánh giá đầy đủ hơn cho việc sử dụng UHPC trong hệ kết cấu nhà cao tầng.

ứng tổng thể của hệ kết cấu nhà cao tầng. Tuy nhiên, kết quả này chưa nhằm xác định phương án bố trí tối ưu mà nó tạo cơ sở ban đầu để phát triển các kịch bản bố trí UHPC cục bộ trong những nghiên cứu tiếp theo.

Bài viết không đưa ra kết luận tối ưu cuối cùng về vị trí bố trí UHPC, mà tập trung xây dựng cơ sở lý luận, khung phương pháp và kết quả minh họa ban đầu. Các bước nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào phân tích đầy đủ các chiến lược bố trí UHPC, đánh giá khả năng giảm bề dày vách tương đương hiệu năng, xây dựng chỉ số hiệu quả vật liệu và kiểm tra phản ứng cục bộ tại các vùng chịu lực trọng yếu.

Cách tiếp cận này có thể góp phần hình thành một khung đánh giá hiệu quả hơn cho việc sử dụng UHPC trong hệ kết cấu nhà cao tầng, trong đó hiệu quả của vật liệu không chỉ

được xem xét thông qua cường độ hoặc độ cứng, mà còn thông qua vị trí bố trí và vai trò cơ học của từng vùng trong hệ kết cấu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. An, L. H., Bảo, B. T. (2020). *Nghiên cứu đánh giá tổng quan các đặc tính cơ học của bê tông chất lượng siêu cao UHPC - Kinh nghiệm từ Cộng hoà Liên bang Đức*. Tạp chí Giao thông Vận tải, Bộ Giao thông Vận tải, 77–82.
2. Graybeal, B. A. (2007). *Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*. ACI Materials Journal, 104(2), 146–152.
3. Graybeal, B. A., & Tanesi, J. (2007). *Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 19(10), 848–854.
4. Bajaber, M. A., Hakeem, I. Y. (2021). *UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review*. Journal of Materials Research and Technology, 10:1058–1074
5. P. Buitelaar, "Ultra High Performance Concrete: Developments and Applications during 25 Years," in Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel, Germany, Sept. 13–15, 2004, Kassel University Press.
6. AlHamaydeh, M., Elkafrawy, M., & Banu, S. (2022). *Seismic Performance and Cost Analysis of UHPC Tall Buildings in UAE with Ductile Coupled Shear Walls*. Materials, 15(8), 2888. <https://doi.org/10.3390/ma15082888>.
7. Tong, X., Zhang, Y., et al. (2020). *Study on Shear Capacity of Ultra-High Performance Concrete Squat Shear Walls*. Case Studies in Construction Materials, 12, e00314. DOI: 10.1016/j.cscm.2019.e00314.
8. Li, Y.-Y., Nie, J.-G., Ding, R., & Fan, J.-S. (2023). *Seismic performance of squat UHPC shear walls subjected to high-compression shear combined cyclic load*. Engineering Structures, 276, 115369. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115369>
9. Li, Y.-Y., Nie, J.-G., Ding, R., Fan, J.-S., et al. (2023). *Experiment study on seismic behavior of squat UHPC shear walls subjected to tension-shear combined cyclic load*. Engineering Structures, 280, 115700. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115700>.
10. Wu, C., Ma, G., Hwang, H.-J., Wang, J., & Kang, S.-M. (2025). *Seismic behavior of novel precast concrete shear walls with UHPC in critical areas*. Journal of Building Engineering, 110, 113634. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113634>
11. AlHamaydeh, M., Elkafrawy, M., & Banu, S. (2022). *Seismic Performance and Cost Analysis of UHPC Tall Buildings in UAE with Ductile Coupled Shear Walls*. Materials, 15(8), 2888. <https://doi.org/10.3390/ma15082888>.
12. Wang, H.-C., Hung, K.-C., Hu, H.-T., et al. (2017). *High-strength steel reinforced squat UHPFRC shear walls: Cyclic behavior and design implications*. Engineering Structures, 141, 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.068>.
13. TCVN 2737 : 2023 Tải trọng và tác động - Tiêu chuẩn thiết kế
14. TCVN 9386-1:2025 – Thiết kế kết cấu chịu động đất
15. Civil Engineering and Development Department (CEDD). *Technical Guidelines for Structural Use of Ultra-High-Performance Concrete*. Hong Kong SAR Government, 2025
16. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). *K-UHPC Design Guideline*. Goyang, Korea.
17. ACI Committee 239. (2018). *Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report (ACI 239R-18)*. American Concrete Institute.
18. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). *Recommendations for Ultra High Performance Concrete (KICT-UHPC)*. Goyang, Republic of Korea.
19. Graybeal, B. A. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community (FHWA-HRT-13-060)*. Federal Highway Administration.

- Ngày gửi bài: 12/08/2026

- Ngày phản biện: 06/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

XE ĐẠP ĐIỆN BA BÁNH NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI: TỔNG QUAN CÔNG NGHỆ VÀ TRIỂN VỌNG TẠI VIỆT NAM

Nguyễn Xuân Trung¹, Phạm Văn Quang^{2*}

TÓM TẮT

Bài báo tổng quan phạm vi về cấu tạo, thông số kỹ thuật và triển vọng tại Việt Nam của xe đạp điện ba bánh năng lượng mặt trời (solar-assisted electric tricycle – SAET). Từ 36 tài liệu gồm 15 công bố khoa học và 9 mẫu xe thương mại, dữ liệu được chuẩn hóa về suất tiêu hao năng lượng riêng và sản lượng quang điện riêng, rồi đối chiếu bằng mô hình động lực học dọc và mô hình cân bằng năng lượng bức xạ. Suất tiêu hao quy đổi theo dung lượng danh định là 16–29 Wh/km, cao hơn mức 6–13 Wh/km mà mô hình dự báo khi chạy ổn định trên đường bằng. Mỗi 100 Wp bổ sung khoảng 9–18 km hành trình mỗi ngày khi bức xạ thuận lợi, phù hợp với thực nghiệm đã công bố. Mái che quang điện chỉ mang lại lợi ích năng lượng rõ rệt ở tốc độ thấp. Bộ điều khiển sạc bám điểm công suất cực đại có thể tăng 10–35% điện năng thu được so với loại điều chế độ rộng xung, còn phanh tái sinh chỉ thu hồi phần nhỏ năng lượng. Với bức xạ 2,46–5,77 kWh/m²/ngày, Việt Nam thuận lợi để triển khai SAET trong vận tải chuyên dụng phạm vi hẹp và hỗ trợ người khuyết tật.

Từ khóa: Xe đạp điện ba bánh; năng lượng mặt trời; suất tiêu hao năng lượng riêng; xe điện hạng nhẹ; giao thông xanh; Việt Nam.

SOLAR-ASSISTED ELECTRIC TRICYCLES: OVERVIEW OF TECHNOLOGY AND PROSPECTS IN VIETNAM

ABSTRACT

This scoping review examines the construction, specifications and prospects in Vietnam of solar-assisted electric tricycles (SAETs). From 36 sources, including 15 scientific publications and 9 commercial models, data are normalised into specific energy consumption and specific photovoltaic yield and cross-checked with a longitudinal dynamics model and an irradiance energy-balance model. Consumption derived from nominal battery capacity is 16–29 Wh/km, above the 6–13 Wh/km predicted for steady level riding. Every 100 Wp adds roughly 9–18 km of daily range under favourable irradiance, consistent with published experiments. The photovoltaic canopy yields a clear net energy gain only at low speeds; maximum power point tracking can raise harvested energy by 10–35% over pulse-width-modulation controllers, while regenerative braking recovers only a small share of trip energy. With irradiance of 2.46–5.77 kWh/m²/day, Vietnam offers favourable conditions for SAETs in confined-area specialised transport and assistive mobility.

Keywords: Electric tricycle; solar energy; specific energy consumption; light electric vehicle; green transport; Vietnam.

1. GIỚI THIỆU

Điện hóa giao thông kết hợp năng lượng tái tạo là giải pháp quan trọng để giảm phát thải khí nhà kính [1]. Với cam kết phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 [2], các lộ trình chuyển đổi của Việt Nam đều nhấn mạnh phát triển phương tiện điện, hạ tầng sạc và chính sách khuyến khích [3]–[5]. Phương tiện điện hạng nhẹ là thành phần quan trọng của giao thông đô thị bền vững nhờ tiêu thụ năng lượng thấp và phù hợp với chuyên đi ngắn [6]. So với xe hai bánh, xe ba bánh ổn định hơn khi dừng, đi chậm, chờ được nhiều hơn và cho phép tích hợp mái che hoặc thùng hàng.

Với giá thành tấm quang điện ngày càng giảm [7], tích hợp quang điện lên phương tiện

giúp giảm chi phí vận hành và phụ thuộc vào điện lưới. Ô tô điện tiêu thụ hàng trăm Wh/km, còn xe ba bánh hạng nhẹ chỉ cần một phần nhỏ, nên cùng công suất lắp đặt, tấm quang điện chiếm tỷ trọng lớn hơn nhiều trong nhu cầu năng lượng. Tuy nhiên, hiệu quả còn phụ thuộc vào bức xạ, che bóng, bộ điều khiển sạc, thời gian đỗ ngoài trời, cũng như khối lượng và lực cản tăng thêm do chính kết cấu mang tấm pin.

Bài báo tổng hợp các sản phẩm thương mại và nghiên cứu về SAET nhằm trả lời ba câu hỏi: (i) SAET có cấu tạo, cấu hình và dải thông số nào, (ii) quang năng đóng góp thực tế ở mức nào khi xét đồng thời cân bằng năng

¹ Khoa Ô tô, Trường Đại học Đông Á; email: trungnx@donga.edu.vn

* Tác giả liên hệ: Khoa Ô tô, Trường Đại học Đông Á; email: quangpv@donga.edu.vn

lượng và động lực học phương tiện và (iii) lĩnh vực ứng dụng nào khả thi tại Việt Nam.

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu dùng phương pháp tổng quan phạm vi, phù hợp để hệ thống hóa một lĩnh vực còn phân tán, với khung đối tượng – khái niệm – bối cảnh: đối tượng là phương tiện ba bánh có cơ cấu đạp, tay quay hoặc tay lắc, khái niệm là tích hợp quang điện lên phương tiện, bối cảnh là ứng dụng đô thị và điều kiện Việt Nam.

Tài liệu được tìm trên sti.vista.gov.vn, vjol.info.vn, thư viện số các trường đại học, Google Scholar, ScienceDirect, ResearchGate, SSRN, DOAJ, CORE và tài liệu nhà sản xuất, với các từ khóa “xe đạp năng lượng mặt trời”, “solar electric tricycle”, “solar powered tricycle”, “solar-

assisted tricycle”, kết hợp truy vết tài liệu (snowballing). Tiêu chí sàng lọc trình bày ở Bảng 1. Dữ liệu được trích xuất theo sáu nhóm biến: nhận dạng, cấu hình cơ khí, hệ thống năng lượng – truyền động, thông số vận hành, mục đích sử dụng và độ tin cậy nguồn. Thông số thương mại là do nhà sản xuất công bố.

Sau sàng lọc, có 36 tài liệu được đưa vào tổng hợp, gồm 15 công bố khoa học về thiết kế, thử nghiệm nguyên mẫu, 12 nguồn kỹ thuật và báo chí tương ứng 9 mẫu xe thương mại, và 9 tài liệu về chính sách, tài nguyên bức xạ. Dữ liệu được chuẩn hóa theo suất tiêu hao năng lượng riêng (Wh/km) và sản lượng quang điện riêng (Wh/Wp/ngày), rồi được kiểm chứng bằng mô hình cân bằng năng lượng bức xạ và mô hình động lực học dọc xe (mục 3.2).

Bảng 1. Tiêu chí chọn và sàng lọc tài liệu

Nhóm tiêu chí	Tiêu chí chọn	Tiêu chí sàng lọc
Đối tượng	Xe ba bánh có bàn đạp hoặc cơ cấu tay quay, tay lắc; có hệ truyền động điện, bộ lưu trữ và tấm quang điện.	Xe điện ba bánh không có cơ cấu đạp; xe tuk-tuk điện; xe golf; xe bốn bánh tốc độ thấp.
Mức độ phát triển	Sản phẩm thương mại hoặc nguyên mẫu hoàn chỉnh có công bố thông số kỹ thuật.	Ý tưởng sơ bộ, quảng cáo không kèm thông số, nguồn không xác định.
Dữ liệu	Có ít nhất một thông số định lượng: công suất tấm quang điện, dung lượng lưu trữ, công suất động cơ, quãng đường, tốc độ, tải trọng hoặc giá thành.	Nguồn mô tả chung chung; thông số mâu thuẫn; nguyên mẫu chưa thử nghiệm.
Nguồn	Bài báo khoa học, kỷ yếu hội nghị, tài liệu kỹ thuật của nhà sản xuất, báo chí chuyên ngành.	Nguồn thương mại không kèm hình ảnh hoặc không truy cập được.
Ngôn ngữ, thời gian	Tiếng Việt và tiếng Anh; không giới hạn mốc thời gian bắt đầu.	Tài liệu không tiếp cận được toàn văn.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Khái niệm, phân loại và cấu tạo tổng quan

SAET được hiểu là phương tiện ba bánh có cơ cấu đạp, tay quay hoặc tay lắc, có truyền động điện hỗ trợ hoặc thay thế một phần sức người, có bộ lưu trữ và tấm quang điện tích hợp trên thân xe, mái che hoặc thùng hàng; khái niệm này loại trừ xe điện ba bánh không có cơ cấu đạp, tuk-tuk điện, xe golf và xe bốn bánh tốc độ thấp.

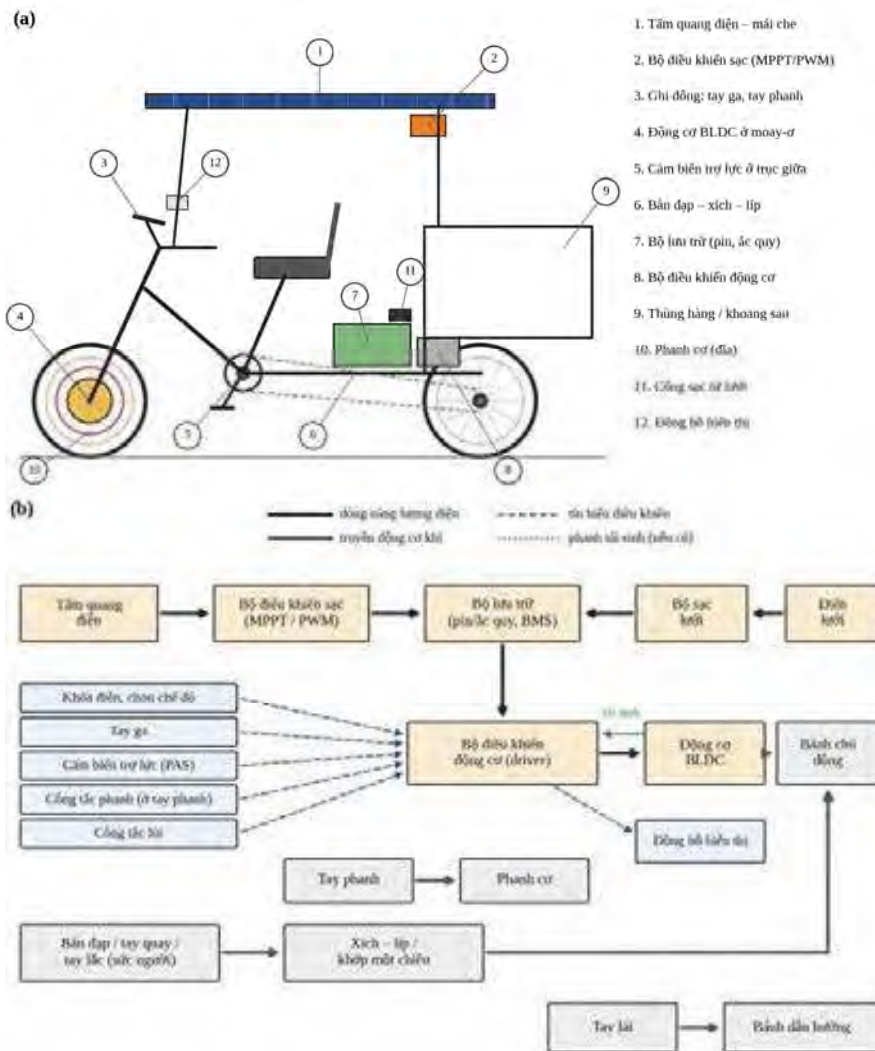
Hai cấu hình phổ biến là tadpole và delta. Tadpole có hai bánh trước, một bánh sau, thường ổn định hơn khi vào đường cong và khi phanh [8]. Delta có một bánh trước, hai bánh sau, kết cấu đơn giản và dễ cải tạo từ xe đạp hoặc xe lắc. Phân loại theo chế độ hoạt động và công năng được trình bày ở Bảng 2.

Mọi SAET đều có thể đạp khi không dùng điện hoặc hết điện, xe cho người khuyết tật dùng tay quay hoặc tay lắc thay bàn đạp. Một

nhân hiệu có thể có nhiều mẫu chờ khách, chờ hàng hoặc bán hàng lưu động [9], [10].

Về cấu tạo, SAET là hệ cơ điện tử gồm ba phân hệ (Hình 1). Phân hệ cơ khí gồm khung, hệ thống lái, bánh xe, phanh cơ, truyền động sức người (bàn đạp – xích – líp hoặc tay quay, tay lắc) và khung đỡ tấm quang điện, thường đồng thời là mui che hoặc vách thùng hàng. Phân hệ năng lượng gồm tấm quang điện, bộ điều khiển sạc, bộ lưu trữ, bộ sạc lưới, bộ điều

khiển động cơ và động cơ BLDC ở moay-ơ hoặc giữa khung. Phân hệ điều khiển gồm tay ga, cảm biến trợ lực, công tắc phanh, khóa điện, công tắc chọn chế độ hoặc đi lùi và đồng hồ hiển thị. Nguyên mẫu của Berjoza và cs. [11] có đủ các thành phần này, với tay phanh tích hợp công tắc và bộ điều khiển sạc MPPT gắn trên khung tấm pin. Ở xe lắc của Nguyễn và Dương [12], bóp phanh đóng mạch ngắt 5 V để bộ điều tốc dừng cấp điện.



Hình 1. Cấu tạo tổng quan (a) và sơ đồ liên kết cơ – điện (b) của SAET

Trên Hình 1b, bộ điều khiển động cơ nhận tín hiệu tay ga ở chế độ chạy điện. Tín hiệu cảm biến trợ lực ở chế độ đạp có trợ lực, khi đó động cơ chỉ được cấp điện lúc người lái đạp và trong dải tốc độ giới hạn. Tín hiệu

công tắc phanh để ngắt điện hoặc kích hoạt phanh tái sinh nếu có. Nhánh cơ khí qua khớp một chiều làm việc độc lập nên xe vẫn chạy được khi hết điện.

Bảng 2. Phân loại SAET theo chế độ hoạt động và công năng

Phân loại	Nhóm	Đặc điểm chính	Nguồn điển hình
Chế độ vận hành	Đạp có trợ lực	Động cơ tự động trợ lực khi khởi động, lên dốc hoặc đi chậm.	[10], [13], [14]
	Chạy điện	Chạy hoàn toàn bằng điện với tay ga, hoặc chỉ dùng sức người.	[15]-[17]
	Trợ lực điện và chạy điện	Hoạt động ở cả ba chế độ: đạp, đạp có trợ lực và chạy điện.	[18]-[20]
Công năng	Di chuyển cá nhân	1-2 chỗ ngồi, có thể kèm khoang hành lý.	[18], [21], [22]
	Chở khách	Chuyên chở hành khách, 2-4 chỗ ngồi.	[13], [23]
	Chở hàng, chuyên dụng	1 chỗ ngồi, kèm thùng hoặc giá chở hàng, hoặc thùng chuyên dụng.	[9], [10], [24]
	Cho người khuyết tật	Phục vụ người khuyết tật chi dưới, dùng cơ cấu tay quay hoặc tay lắc.	[12], [25], [26]

Tất cả SAET đều có cổng sạc lưới, quang năng chỉ là nguồn bổ sung nhằm kéo dài quãng đường [11], [12], [27], một số thiết kế có phanh tái sinh [19], [28], [29].

3.2. Cơ sở tính toán cân bằng năng lượng

3.2.1. Sản lượng quang điện và bộ điều khiển sạc

Sản lượng điện trung bình ngày của hệ quang điện trên xe được ước tính theo:

$$E_{pv} = P_{pv} \cdot H \cdot PR \quad (1)$$

E_{pv} – sản lượng điện quang điện trung bình ngày (Wh/ngày); P_{pv} – công suất đỉnh của tấm quang điện ở điều kiện thử nghiệm chuẩn (Wp); H – số giờ nắng đỉnh, có trị số bằng bức xạ tổng trên mặt phẳng tấm pin tính theo kWh/m²/ngày (giờ); PR – hệ số hiệu suất hệ thống (performance ratio), $0 < PR < 1$, phản ánh tổn thất do nhiệt độ, bụi bẩn, che bóng, hướng lắp đặt, bộ điều khiển sạc và hiệu suất nạp.

Tấm quang điện trên xe thường lắp nằm ngang và bị che bóng trong đô thị nên PR thấp hơn lắp cố định trên mái nhà. Với $H = 4,5$ – $5,0$ giờ và $PR = 0,6$ – $0,7$, mỗi 1 Wp cho khoảng 2,7–3,5 Wh/ngày; kết hợp suất tiêu hao quy đổi 20–30 Wh/km, mỗi 100 Wp tương ứng khoảng 9–18 km hành trình bổ sung mỗi ngày. Quan hệ này được dùng để kiểm chứng số liệu công bố ở mục 3.5.

Trong PR , bộ điều khiển sạc là thành phần có thể cải thiện bằng thiết kế điện tử mà không cần tăng diện tích tấm pin. Công suất nạp tức thời vào bộ lưu trữ là:

$$P_n = P_{pv} \cdot (G/G_{STC}) \cdot [1 + \gamma(T_c - 25)] \cdot \eta_{MPPT} \cdot \eta_{bđ} \quad (2)$$

G – bức xạ trên mặt tấm pin (W/m²), $G_{STC} = 1\,000$ W/m²; γ – hệ số nhiệt độ của công suất (với silic tinh thể khoảng $-0,004$ 1/°C); T_c – nhiệt độ tế bào quang điện (°C); η_{MPPT} , $\eta_{bđ}$ – hiệu suất bám điểm công suất cực đại và hiệu suất bộ biến đổi DC–DC.

Bộ điều khiển điều chế độ rộng xung (PWM) nối trực tiếp tấm pin với ắc quy nên tấm pin phải làm việc tại điện áp ắc quy thay vì điện áp điểm công suất cực đại V_{mp} . Bộ MPPT dùng bộ biến đổi DC–DC và thuật toán dò tìm để giữ tấm pin tại điểm này. Với tấm 55 W của xe lắc [12] ($V_{mp} = 19,44$ V, $I_{sc} = 3,08$ A) nạp khối ắc quy 12 V ở 12,8–14,4 V, bộ PWM chỉ khai thác khoảng 39–43 W, tức 70–78% công suất đỉnh, với $\eta_{bđ} \approx 0,95$, bộ MPPT thu thêm khoảng 22–35%. Khi tấm pin nóng đến 60 °C, V_{mp} giảm gần về điện áp nạp nên lợi ích chỉ còn khoảng 10%. Trong các tài liệu, chỉ Berjoza và cs. [11] nêu rõ dùng MPPT, các nguồn thương mại đều không công bố loại bộ điều khiển sạc.

Khi xe chạy, bóng cây và nhà quét qua tấm pin trong vài giây (ở 20 km/h, vùng bóng dài 10 m đi qua trong khoảng 1,8 s). Diode bypass tạo nhiều cực đại cục bộ trên đường đặc tính P–V, khiến thuật toán nhiễu loạn – quan sát đơn giản có thể dừng ở đỉnh phụ, nên tốc độ đáp ứng và khả năng quét toàn cục quan trọng hơn hiệu suất tĩnh. Với tấm pin phân bố trên nhiều mặt như thùng hàng SunRider [24], [30], dùng bộ bám công suất

riêng cho từng mặt sẽ giảm tổn thất do bức xạ không đồng đều.

3.2.2. Động lực học dọc và suất tiêu hao năng lượng

Để kiểm chứng độc lập suất tiêu hao quy đổi, lực kéo yêu cầu tại bánh chủ động được xác định theo cân bằng lực dọc, tương tự cách định cỡ công suất của Paudel và Kreutzmann [27] và Nguyễn và Dương [12]:

$$F_k = m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha + 0,5\rho \cdot C_d A \cdot (v + v_g)^2 + mg \cdot \sin\alpha + \delta m \cdot dv/dt \quad (3)$$

$$P_d = F_k v / \eta_d; SEC = P_d / (3,6v) = F_k / (3,6\eta_d) \quad (4)$$

m – khối lượng toàn bộ (kg); f – hệ số cản lăn; α – góc dốc; $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$; $C_d A$ – tích hệ số cản khí động và diện tích cản chính diện (m^2); v , v_g – vận tốc xe và gió ngược (m/s); δ – hệ số khối lượng quay; P_d – công suất điện lấy từ bộ lưu trữ (W); η_d – hiệu suất từ bộ lưu trữ đến bánh xe; SEC – suất tiêu hao năng lượng riêng (Wh/km).

Với nguyên mẫu của Berjoza và cs. [11] (155 kg, f đo được 0,008), giả thiết $C_d A = 0,4\text{--}0,7 \text{ m}^2$ và $\eta_d = 0,70\text{--}0,80$, phương trình (4) cho SEC khoảng 6–8 Wh/km ở vận tốc trung bình đo được 15,7 km/h và 8–13 Wh/km ở 25 km/h . Với xe lặc của Nguyễn và Dương [12] (khoảng 140 kg kể cả người thử, $C_d A = 0,6\text{--}0,9 \text{ m}^2$, $f = 0,008\text{--}0,012$), mô hình cho 6–10 Wh/km ở 15 km/h , cộng khoảng 4 Wh/km do đoạn dốc 5° trên tuyến thử. Các giá trị này thấp hơn nhiều so với 25–29 Wh/km quy đổi ở Bảng 4 vì hai lý do. Thứ nhất, ắc quy chì–axit xả dòng lớn chỉ cấp được một phần dung lượng danh định. Xe lặc này dừng khi điện áp còn 23,8 V, tức chưa xả cạn, và nếu chỉ 50–60% dung lượng được khai thác thì SEC thực tế là 13–17 Wh/km , khớp với mô hình. Thứ hai, tuyến thử khứ hồi có nhiều lần quay đầu, tăng tốc và lên dốc.

Kiểm tra ngược cho kết luận tương tự. Nếu $SEC \approx 25 \text{ Wh/km}$, phần tăng thêm 33,1 km của Berjoza và cs. [11] ứng với khoảng 830 Wh. Nếu chạy liên tục, hành trình 50,2 km ở vận tốc trung bình 19,25 km/h chỉ kéo dài khoảng 2,6 h, nghĩa là tấm 330 Wp phải phát trung bình khoảng 320 W, gần bằng công suất

đỉnh, điều không khả thi khi có che bóng. Với $SEC = 12\text{--}15 \text{ Wh/km}$, công suất nạp trung bình chỉ cần 150–190 W (0,46–0,58 công suất đỉnh), hợp lý ở vĩ độ $56,65^\circ$ vào tháng Năm. Do đó, dải 16–29 Wh/km ở Bảng 4 là cận trên của suất tiêu hao.

Khung đỡ và mái che quang điện làm tăng khối lượng Δm , kéo theo lực cản lăn và lực cản dốc, đồng thời làm tăng $\Delta(C_d A)$. Ở xe lặc [12], riêng bốn tấm pin nặng 18,8 kg, chưa kể giá đỡ thép ống $\Phi 27$, và kích thước bao tăng từ $178 \times 58 \times 100 \text{ cm}$ lên $205 \times 108 \times 150 \text{ cm}$. Diện tích $1,96 \text{ m}^2$ của tấm pin Trike-ES320 là diện tích hình chiếu bằng, diện tích cản chính diện tăng ít hơn nhiều, nhưng trụ đỡ và mép mái vẫn làm $C_d A$ tăng đáng kể. Công suất điện tăng thêm ở cùng vận tốc là:

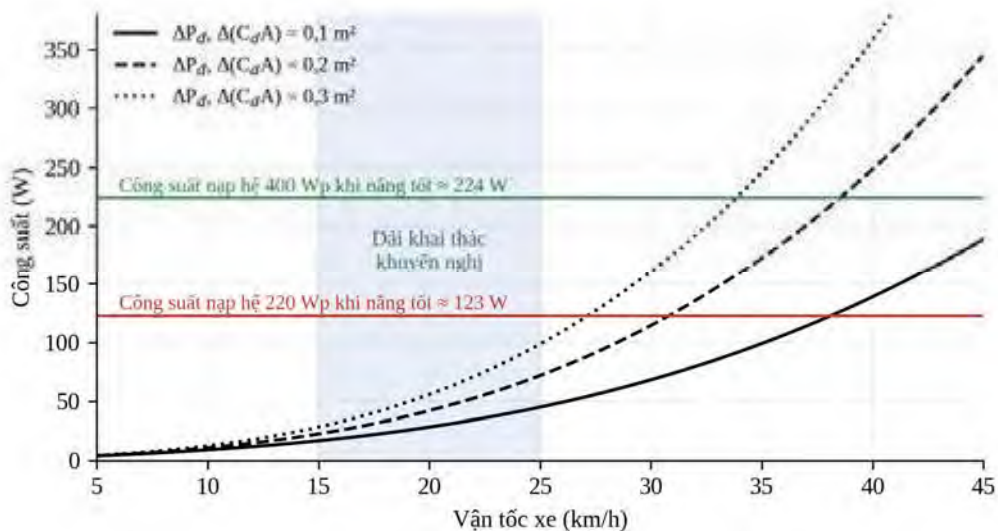
$$\Delta P_d = [\Delta m \cdot g \cdot (f \cdot \cos\alpha + \sin\alpha) + 0,5\rho \cdot \Delta(C_d A) \cdot v^2] \cdot v / \eta_d \quad (5)$$

Hình 2 so sánh ΔP_d trên đường bằng với công suất nạp của hệ 220 Wp và 400 Wp khi nắng tốt ($G = 800 \text{ W/m}^2$, hệ số tổn thất 0,7). Với $\Delta m = 20 \text{ kg}$ và $\Delta(C_d A) = 0,1\text{--}0,3 \text{ m}^2$ (giả thiết), ΔP_d chỉ 17–56 W ở 15–20 km/h , nhỏ hơn nhiều so với công suất nạp 123–224 W. Nhưng ΔP_d tăng gần theo lập phương vận tốc, đạt 139–358 W ở 40 km/h , vượt công suất nạp của hệ 220 Wp. Trên dốc 5° , riêng 20 kg tăng thêm cần khoảng 63 W điện ở 10 km/h . Điều này lý giải khuyến nghị tốc độ 25 km/h của Berjoza và cs. [11] và đề xuất dùng pin dẻo để giảm khoảng 18 kg của Nguyễn và Dương [12].

Mái che còn nâng chiều cao trọng tâm h . Xét mô-men quanh trục lật nổi điểm tiếp xúc của bánh đơn với một bánh của cặp bánh kép (vết bánh B , chiều dài cơ sở L , khoảng cách dọc từ trục bánh đơn đến trọng tâm I), ngưỡng gia tốc ngang gây lật tĩnh là:

$$a_{y,gh}/g = B \cdot l / (2h \cdot L) \quad (6)$$

Ngưỡng lật giảm tỷ lệ nghịch với h và giảm khi trọng tâm dịch về phía bánh đơn, phù hợp với phân tích ổn định xe ba bánh của Huston và cs. [8]. Vì vậy, cần đặt bộ lưu trữ thấp, gần cặp bánh kép, và hạn chế khối lượng kết cấu đặt trên cao.



Hình 2. Công suất điện tăng thêm do khung đỡ, mái che quang điện theo vận tốc so với công suất nạp quang điện (đường bằng, $\Delta m = 20 \text{ kg}$, $f = 0,01$, $\eta_d = 0,75$)

3.2.3. Phanh tái sinh

Phanh tái sinh được nêu ở ELF 3.0 [18], [29], mô [19] và Murthy và cs. [28], nhưng không nguồn nào công bố tỷ lệ thu hồi. Cận trên của năng lượng thu hồi được ước lượng theo:

$$E_{th} = \eta_{th} \cdot [0,5m \cdot (v_1^2 - v_2^2) + mg\Delta h - E_c] \quad (7)$$

trong đó v_1 , v_2 – vận tốc đầu và cuối quá trình hãm (m/s); Δh – độ cao giảm khi xuống dốc (m); E_c – năng lượng tiêu hao do lực cản trong quá trình hãm (J); η_{th} – hiệu suất chuỗi thu hồi (truyền động, máy phát, bộ điều khiển, nạp).

Với xe 155 kg của Berjoza và cs. [11], động năng ở 25 km/h chỉ khoảng 1,0 Wh. Với $\eta_{th} = 0,4$ – $0,6$ và hai lần dừng mỗi km, tỷ lệ thu hồi chỉ khoảng 3–10% khi $SEC = 12$ – 25 Wh/km . Đoạn dốc 5° dài 100 m trên tuyến thử của Nguyễn và Dương [12] có thể năng khoảng 3,3 Wh nhưng chỉ thu hồi được 1,1–

1,6 Wh, tương đương 4–10% năng lượng của vòng thử 1,1 km. Khi hãm gấp từ 25 km/h với gia tốc chậm dần đo được $3,5 \text{ m/s}^2$, công suất phanh khoảng 3,8 kW, gấp 8–15 lần công suất động cơ 250–500 W, nên phanh tái sinh chỉ đảm nhận được các lần giảm tốc nhẹ. Động cơ moay-ơ có ly hợp một chiều và động cơ đặt giữa truyền qua líp như trên Trike-ES320, Haley (Bảng 3) không thể phát điện ngược. Vì vậy, phanh tái sinh chủ yếu có giá trị kiểm soát tốc độ khi xuống dốc dài và giảm mòn phanh cơ.

3.3. Các mẫu xe thương mại

3.3.1. Nhóm phương tiện cá nhân

SAET cá nhân hướng đến đi lại quãng ngắn trong đô thị, thường có cấu hình tadpole, một đến hai chỗ, hoạt động ở cả chế độ trợ lực và chạy điện, gồm hai loại thân vỏ kín (velomobile) và ngồi ngả lưng (recumbent trike), thông số trình bày ở Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp thông số kỹ thuật của các mẫu SAET được khảo sát

Mẫu xe (nguồn)	Cấu hình	Quang điện (Wp)	Bộ lưu trữ	Động cơ	Tốc độ (km/h)	Quãng đường (km)	Tải trọng (kg)
Sản phẩm thương mại							
ELF 3.0, Mỹ [18]	Tadpole, thân vỏ kín, 2 chỗ	200-400	Li-ion 88,8 V	BLDC 750 W, đặt giữa	40	48 (chạy điện)	250
Trike-ES320 [22]	Tadpole, ngồi ngả lưng	400 (228 × 86 cm)	Li-ion 48 V-20 Ah	Bafang 500 W, đặt giữa	-	-	150
Wello Family, Pháp [20]	Tadpole, thân vỏ kín, thùng 0,8 m ³	-	Li-ion	Trợ lực điện	40	100	80
SunRider, Hà Lan [24]	Delta, thùng 1 m ³	545 (ba mặt thùng)	Li-ion 1,6 kWh, hoán đổi	250 W, bánh trước	-	>100	150
Haley, Mỹ [10]	Tadpole, thùng phía trước	-	Đặt trong thùng	Bafang 750 W, trục giữa	20-26	-	120 / 208
GoSun Gopher, [9]	Delta, thùng 1,4 m ³	650	LiFePO ₄ 2,2 kWh	750 W (Class III)	45	+24-40/ngày nhờ quang năng	272
Nguyên mẫu nghiên cứu							
Berjoza và cs. [11], Latvia	Tadpole, ngồi ngả lưng	330 (mái che)	Chì-axit 36 V-12 Ah	BLDC 500 W, giới hạn 250 W	32 tối đa; 20-25 khai thác	17,14 (không quang năng) / 50,20 (có quang năng)	-
Abdullah và cs. [23], Malaysia	Delta, khoang 4 chỗ	50	Li-ion 48 V-30 Ah	BLDC 1500 W	≈40	65 (+12-15% nhờ quang năng)	-
Kowalski [13], Ba Lan	Tadpole, chở khách, mô-đun	-(trên mũ)	-	BLDC 36 V-250 W	-	20-50	-
Nguyễn và Dương [12], Việt Nam	Delta, cải tạo xe lác tay	4 × 55 = 220	Chì-axit 24 V-30 Ah	250 W, bánh trước	-	24,7 (ắc quy) / 48 (có quang năng)	-

Bảng 4. Chuẩn hóa dữ liệu theo suất tiêu hao năng lượng riêng và sản lượng quang điện riêng

Mẫu xe / nghiên cứu (nguồn)	Dung lượng danh định (Wh)	Quãng đường không có quang năng (km)	Suất tiêu hao quy đổi theo dung lượng danh định (Wh/km)	Đóng góp của quang năng
Berjoza và cs. [11]	432	17,14	≈25	+33,1 km (≈193%) trong ≈2,6 h chạy thử; quy theo suất tiêu hao danh định ≈830 Wh từ tám 330 Wp, tương đương ≈2,5 Wh/Wp (xem mục 3.2.2)
Nguyễn và Dương [12]	720	24,7	≈29	+23,3 km/ngày (≈94%); ≈680 Wh từ tám 220 Wp, tương đương ≈3,1 Wh/Wp/ngày
Abdullah và cs. [23]	1 440	65	≈22	+12–15% (≈8–10 km/ngày); ≈170–215 Wh từ tám 50 Wp, tương đương ≈3,5–4,3 Wh/Wp/ngày
SunRider [24]; Bowden [30]	1 600	>100	≤16	≈65% nhu cầu nạp trung bình từ tám 545 Wp, tương đương ≈1,9 Wh/Wp/ngày
GoSun Gopher [9]	2 200	Không công bố	–	+24–40 km/ngày từ tám 650 Wp, tương đương ≈1,0–1,7 Wh/Wp/ngày

Bảng 5. Các lĩnh vực ứng dụng tiềm năng của SAET tại Việt Nam

Lĩnh vực, hoạt động	Điều kiện triển khai	Nguồn tiêu biểu
Di chuyển cá nhân trong đô thị	Giá thành phù hợp thị trường trong nước; ưu tiên cấu hình đơn giản thay cho thân vỏ kín; công suất động cơ tương thích quy định về xe đạp điện.	[14], [18], [20], [22], [31]
Giao hàng trong đô thị, khu công nghiệp, trang trại	Tuyến vận chuyển lặp lại, có điểm đỗ ngoài trời và bảo dưỡng tập trung; thùng hàng cho phép lắp tấm quang điện trên nhiều mặt; xác định rõ khung pháp lý khi tốc độ và tải trọng vượt mức xe đạp điện.	[9], [10], [24], [30]
Chở khách du lịch, nghỉ dưỡng	Không gian khai thác có kiểm soát tốc độ và bảo dưỡng tập trung; kết cấu mô-đun đổi cấu hình ghế theo mùa vụ; có mái che chống nắng, mưa.	[13], [23]
Hỗ trợ người cao tuổi và người khuyết tật	Thiết kế chuyên dụng theo dạng khuyết tật, bảo đảm an toàn và khả năng tiếp cận; ưu tiên delta cải tạo từ xe lắc tay; công bố quãng đường trong cả hai điều kiện có và không có quang năng.	[12], [15], [25], [26], [32]

ELF, sản xuất từ năm 2013 tại Mỹ, là mẫu điển hình của loại thân vỏ kín. Phiên bản ELF 3.0 có thân composite, khung nhôm, tấm quang điện 200–400 W và chạy điện khoảng 48 km mỗi lần sạc [18], mức tiêu hao 0,12 lít xăng/100 km công bố là giá trị quy đổi theo năng lượng, không phải số đo.

PEBL (Mỹ, 2013) [31], mô (Tây Ban Nha, 2017) [14] và Wello (Pháp, 2019) [20] cũng theo hướng thân vỏ kín nhưng đã ngừng hoặc tạm ngừng sản xuất, cho thấy rào cản của SAET cá nhân nằm ở chi phí và quy mô thị trường hơn là kỹ thuật.

Ở loại ngồi ngả lưng, tấm quang điện đặt trên khung đỡ đơn giản làm mui [21]. Trike-ES320 dùng tấm 48 V/400 W kích thước 228 × 86 cm [22], tức hiệu suất khoảng 20%, phù hợp công nghệ silic tinh thể hiện hành.

3.3.2. Nhóm chở hàng và chuyên dụng

Nhóm chở hàng có tiềm năng thương mại rõ hơn vì vận hành theo đội xe, lộ trình lặp lại, tải trọng tính toán được và bảo trì tập trung. SunRider có thùng cỡ pallet 1 m³, quãng đường hơn 100 km, tấm quang điện 545 Wp trên thùng hàng và pin hoán đổi 1,6 kWh, đáp ứng phần lớn nhu cầu nạp [24], [30]. Suất tiêu hao suy ra không quá 16 Wh/km, thấp nhất trong tập dữ liệu; diện tích thùng lớn và hoạt động ngoài trời giúp nhóm này đạt tỷ lệ tự nạp cao nhất.

Xe Haley có hai bánh trước với thùng phía trước, tải trọng 120 hoặc 208 kg [10], cho thấy có thể chuyển đổi xe ba bánh chở hàng sẵn có thành SAET với chi phí thấp. GoSun Gopher [9] có dáng tương tự xe lam nhưng có bàn đạp, với tấm 650 Wp, pin LiFePO₄ 2,2 kWh, tốc độ 45 km/h, tải 272 kg và quãng đường tăng thêm 24–40 km/ngày nhờ quang năng, tức khoảng 1,0–1,7 Wh/Wp/ngày, giá trị thấp này phù hợp với lực cản tăng nhanh ở tốc độ cao và tải lớn (mục 3.2.2). Kích thước, khối lượng và tốc độ của nhóm này có thể vượt khung thông số xe đạp điện tại Việt Nam.

3.4. Các mẫu xe nghiên cứu

3.4.1. Nhóm phương tiện cá nhân

Các nghiên cứu SAET cá nhân chủ yếu thiết kế, chế tạo nguyên mẫu từ linh kiện sẵn có và khung cải tạo [28], [33], nên thông số khác biệt lớn và đa số không đủ dữ liệu để tính suất tiêu hao.

Berjoza và cs. [11] cung cấp dữ liệu đầy đủ nhất: nguyên mẫu tadpole ngồi ngả lưng, tấm 330 W làm mái che, ắc quy chì–axit 36 V–12 Ah, động cơ BLDC 500 W giới hạn 250 W, xe nặng 79,4 kg, vệt bánh 765 mm, tốc độ tối đa 32 km/h. Thử nghiệm tại Latvia cho 50,20 km khi có quang năng so với 17,14 km khi không có (gấp 2,93 lần) và quãng đường phanh 7,26 m từ 25 km/h; cân bằng năng lượng được phân tích ở mục 3.2.

Paudel và Kreutzmann [27] định cỡ một nguyên mẫu delta theo lực cản khí động, cản lăn, tải trọng và bức xạ, cho thấy hiệu quả SAET phụ thuộc vào sự phối hợp giữa các thành phần hơn là từng thiết bị riêng lẻ.

3.4.2. Nhóm phương tiện chở khách

Chỉ hai nghiên cứu tập trung vào SAET chở khách, đều hướng đến du lịch. Kowalski [13] đề xuất SAET tadpole tương tự xích lô, động cơ 36 V–250 W trợ lực qua cảm biến bàn đạp, phạm vi 20–50 km và kết cấu mô-đun đổi được ghế, khoang hàng. Abdullah và cs. [23] thử nghiệm nguyên mẫu delta bốn khách trong đô thị nhiệt đới với tấm 50 W, động cơ 1500 W, pin 48 V–30 Ah và hệ thống làm mát, đạt khoảng 40 km/h và 65 km mỗi lần sạc, trong đó quang năng tăng 12–15% phạm vi hoạt động. Mức giảm 40% phát thải CO₂ mà nhóm tác giả công bố khó tương thích với đóng góp 12–15% của quang năng, cho thấy hai chỉ tiêu được tính trên các cơ sở khác nhau.

3.4.3. Nhóm phương tiện dành cho người khuyết tật

Nhóm xe cho người khuyết tật chiếm 9 trên 15 công bố, tập trung tại Ấn Độ và Việt Nam. Các nguyên mẫu đều cải tạo từ phương

tiện sẵn có, chạy điện và dùng cấu hình delta. Kandasamy và cs. [32] nhấn mạnh giảm sức vận hành và dễ sử dụng, các nghiên cứu khác [15]-[17], [25], [26], [34], [35] cùng hướng cải thiện khả năng di chuyển độc lập nhưng phần lớn dùng ở mô tả thiết kế, chưa báo cáo quãng đường đo được khi có và không có quang năng.

Tại Việt Nam, Nguyễn và Dương [12] cải tạo xe lắc tay với động cơ 24 V–250 W ở bánh trước, hai ắc quy 12 V–30 Ah và bốn tấm pin 12 V–55 W làm mui che; cơ cấu khuỷu cứng được thay bằng khuỷu trượt một chiều để tay lắc không chuyển động theo bánh xe khi chạy điện. Xe đi được 24,7 km bằng ắc quy và 48 km khi kết hợp tấm pin trong ngày nắng đẹp. Quy đổi từ dung lượng danh định 720 Wh, suất tiêu hao khoảng 29 Wh/km và phần tăng thêm 23,3 km tương đương khoảng 680 Wh, tức 3,1 Wh/Wp/ngày với hệ 220 Wp.

3.5. Thông số kỹ thuật và xu hướng phát triển công nghệ

3.5.1. Thông số kỹ thuật

Bảng 3 cho thấy dải thông số rất rộng: công suất quang điện 50–650 Wp, dung lượng lưu trữ 0,43–2,2 kWh, công suất động cơ 250–1500 W và tải trọng 150–272 kg. Nhiều sản phẩm thương mại không công bố công suất tấm pin, còn phần lớn nguyên mẫu không báo cáo quãng đường trong cả hai điều kiện có và không có quang năng.

Để so sánh, thông số được quy đổi về suất tiêu hao năng lượng riêng (dung lượng danh định chia cho quãng đường khi không có quang năng) và sản lượng quang điện riêng (năng lượng do tấm pin cung cấp chia cho công suất đỉnh) (Bảng 4).

Suất tiêu hao quy đổi tập trung trong khoảng 16–29 Wh/km, giá trị thấp thuộc xe chở hàng dùng pin lithium, giá trị cao thuộc nguyên mẫu cải tạo dùng ắc quy chì–axit. Mô hình ở mục 3.2.2 cho thấy đây là cận trên, vì khi chạy ổn định trên đường bằng SAET chỉ

cần khoảng 6–13 Wh/km. Dù theo cách tính nào, mức này vẫn thấp hơn ô tô điện khoảng một bậc, nên tấm quang điện vài trăm Wp có thể chiếm tỷ trọng đáng kể trong nhu cầu năng lượng.

Đại lượng quan sát trực tiếp và ít phụ thuộc giả thiết nhất là quãng đường tăng thêm trên 100 Wp: khoảng 10 km trong $\approx 2,6$ h chạy thử ở Latvia [11], 10,6 km/ngày tại Huế [12] và 16–20 km/ngày ở Malaysia [23], phù hợp với dự báo 9–18 km/100 Wp. Khi tách thành hai thành phần, dùng suất tiêu hao danh định cho 2,5–4,3 Wh/Wp, trong đó giá trị của Berjoza và cs. [11] chỉ tích lũy trong khoảng 2,6 h còn giá trị của Abdullah và cs. [23] hàm ý $PR \approx 0,8$, đều cao bất thường; dùng suất tiêu hao theo mô hình thì các giá trị này về mức hợp lý. Như vậy, tỷ số giữa PR và suất tiêu hao mới là đại lượng quyết định; công thức (1) với $PR = 0,6–0,7$ kết hợp suất tiêu hao quy đổi 20–30 Wh/km đủ tin cậy để ước lượng số km bổ sung khi thiết kế sơ bộ, nhưng không nên dùng riêng rẽ từng thành phần.

Các sản phẩm thương mại công bố 1,0–1,9 Wh/Wp/ngày, thấp hơn lý thuyết, có thể do đã tính đến che bóng đô thị và tải lớn, tức không quảng cáo thổi phồng. Mọi giá trị trong Bảng 4 được suy ra gián tiếp nên chỉ là ước lượng độ lớn.

3.5.2. Xu hướng phát triển công nghệ

Công suất tấm quang điện trước hết phụ thuộc diện tích khả dụng: nguyên mẫu nghiên cứu dùng 50–220 Wp, xe cá nhân 200–400 Wp, xe chở hàng thương mại 545–650 Wp nhờ khai thác nhiều mặt thùng hàng. Muốn tăng đáng kể tỷ lệ tự nạp cần thay đổi cấu trúc thân xe để mở rộng diện tích hứng nắng, nhưng phải cân nhắc khối lượng và lực cản tăng thêm (mục 3.2.2).

Sản phẩm thương mại gần đây chủ yếu dùng pin lithium-ion hoặc LiFePO_4 , trong khi một số nguyên mẫu vẫn dùng ắc quy chì–axit để giảm chi phí; khác biệt này giải thích phần lớn khoảng 16–29 Wh/km ở Bảng 4. Động cơ

BLDC chiếm ưu thế, đặt ở bánh trước (đơn giản, ít bảo trì) hoặc giữa khung (leo dốc tốt khi tải lớn). Tốc độ khai thác của nguyên mẫu phần lớn là 20–40 km/h.

Về ứng dụng, xu hướng chuyển rõ từ phương tiện cá nhân sang vận chuyển hàng hóa và hành khách: SunRider, Haley và GoSun Gopher hướng đến giao hàng chặng cuối, còn Kowalski [13] và Abdullah và cs. [23] phát triển khoang hành khách linh hoạt. Nhóm chở hàng vừa có diện tích lắp pin lớn nhất vừa có suất tiêu hao thấp nhất, và mô hình đội xe cho phép phân bổ chi phí đầu tư trên số km vận hành lớn hơn nhiều.

3.6. Triển vọng tại Việt Nam

3.6.1. Tiềm năng bức xạ và cơ sở chính sách

SAET tận dụng quang năng để kéo dài quãng đường và giảm tần suất nạp từ lưới, đặc biệt phù hợp với phương tiện chạy quãng ngắn, tải vừa phải và hoạt động ban ngày.

Theo số liệu từ 171 trạm khí tượng, bức xạ mặt trời tại Việt Nam đạt 897–2 108 kWh/m²/năm, tương đương 2,46–5,77 kWh/m²/ngày, cao nhất ở Tây Nguyên và Nam Bộ [36]. Áp dụng mục 3.2.1 với $H = 4,5$ – $5,0$ giờ, đặc trưng cho miền Trung và miền Nam, tấm 400 Wp trên mui xe cung cấp khoảng 1,1–1,4 kWh/ngày, tương ứng 40–70 km hành trình bổ sung với suất tiêu hao 20–25 Wh/km, ở phía Bắc giá trị này giảm đáng kể. Các chương trình điện hóa giao thông tạo nền tảng cho thử nghiệm [2], [4].

3.6.2. Các lĩnh vực ứng dụng tiềm năng

Bảng 5 tổng hợp các lĩnh vực ứng dụng tiềm năng. SAET tại Việt Nam nhiều khả năng phát triển theo hướng chuyên biệt hóa thay vì thay thế phương tiện hiện có. Giai đoạn đầu phù hợp với khu du lịch, trường đại học, khu công nghiệp và giao hàng chặng cuối, là những nơi có lộ trình lặp lại, tốc độ thấp và xe đỗ ngoài trời phần lớn thời gian.

3.6.3. Rào cản kỹ thuật, an toàn và pháp lý

Quang năng hiện chỉ bổ sung năng lượng, chưa thay thế điện lưới. Khí hậu Việt Nam đặt ra hai yếu tố mà nghiên cứu ở vùng ôn đới chưa phản ánh: nhiệt độ cao làm giảm công suất tấm pin theo phương trình (2) và đây nhanh suy giảm pin, khiến PR có thể ở cận dưới 0,6–0,7. Mùa mưa kéo dài làm gián đoạn tự nạp, nên dung lượng lưu trữ phải chọn theo kịch bản không có quang năng.

Về an toàn, mái che quang điện làm tăng khối lượng, lực cản và chiều cao trọng tâm (mục 3.2.2), đồng thời tăng tải trọng gió ngang lên cấu hình ba bánh vốn nhạy cảm về ổn định ngang. Girikshith và cs. [17] mới phân tích trọng tâm so với vận tốc tới hạn, còn Nguyễn và Dương [12] bố trí trọng tâm phần lắp thêm trùng trọng tâm xe, chưa có nghiên cứu thử nghiệm ổn định ngang khi mang tải và chịu gió ngang.

Về pháp lý, mẫu như GoSun Gopher (45 km/h, 272 kg) vượt xa khung thông số xe đạp điện tại Việt Nam nên nhiều khả năng phải quản lý như phương tiện cơ giới, còn cấu hình trợ lực giới hạn 250 W [11], [13] phù hợp hơn. Vì vậy, cần xác định nhóm phương tiện mục tiêu và khung quy định tương ứng ngay từ khi thiết kế.

3.7. Hạn chế của tổng quan và hướng nghiên cứu tiếp theo

Tổng quan có một số hạn chế. Thứ nhất, tài liệu không được đánh giá chất lượng phương pháp một cách hệ thống và nhiều thông số do nhà sản xuất công bố. Thứ hai, điều kiện thử nghiệm rất khác nhau nên so sánh trong Bảng 3, Bảng 4 mang tính định hướng, và chỉ 5 trong 24 mẫu xe, nguyên mẫu đủ dữ liệu để chuẩn hóa. Thứ ba, tính toán ở mục 3.2 dùng giá trị giả thiết cho C_dA và các hiệu suất nên chỉ kiểm chứng độ lớn. Thứ tư, tài liệu chủ yếu bằng tiếng Việt và tiếng Anh.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo gồm: (i) quy trình thử nghiệm chuẩn hóa, bắt buộc báo

cáo quang đường khi có và không có quang năng, điện năng thực tế lấy từ bộ lưu trữ, loại bộ điều khiển sạc, *PR* và tỷ lệ thu hồi của phanh tái sinh; (ii) đo đặc dài hạn trong khí hậu Việt Nam về ảnh hưởng của nhiệt độ cao và mùa mưa đến *PR* và tuổi thọ bộ lưu trữ; (iii) đánh giá vòng đời và hiệu quả kinh tế của phân quang điện; và (iv) xác định thực nghiệm C_dA và ổn định ngang khi có mái che quang điện chịu gió.

IV. KẾT LUẬN

Bài báo đã tổng hợp 36 tài liệu về SAET, làm rõ cấu tạo, đặc điểm thiết kế, xu hướng công nghệ và lĩnh vực ứng dụng. Dù công suất quang điện (50–650 Wp), dung lượng lưu trữ (0,43–2,2 kWh) và công suất động cơ (250–1500 W) rất khác nhau, xu hướng chung là dùng quang năng làm nguồn bổ sung và chuyển từ nguyên mẫu chứng minh tính khả thi sang sản phẩm chuyên biệt.

Đóng góp của bài báo là chuẩn hóa dữ liệu phân tán về hai chỉ tiêu so sánh được và kiểm

chứng bằng mô hình động lực học dọc cùng mô hình cân bằng năng lượng bức xạ. Suất tiêu hao quy đổi 16–29 Wh/km là cận trên của mức 6–13 Wh/km khi chạy ổn định trên đường bằng, còn quan hệ “mỗi 100 Wp cho khoảng 9–18 km hành trình bổ sung mỗi ngày” phù hợp với thực nghiệm và đủ tin cậy cho thiết kế sơ bộ. Mái che quang điện chỉ có lợi rõ rệt ở 15–25 km/h, bộ MPPT tăng 10–35% điện năng thu được so với PWM, còn phanh tái sinh thu hồi dưới khoảng 10% năng lượng.

Với bức xạ 2,46–5,77 kWh/m²/ngày và định hướng giao thông xanh, Việt Nam có nhiều cơ hội ứng dụng SAET, song cần xem xét đồng thời các phương diện kỹ thuật, kinh tế, an toàn và sự phù hợp với quy chuẩn hiện hành. Khung chuẩn hóa và các phương trình kiểm chứng trong bài có thể làm cơ sở báo cáo, so sánh kết quả của các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. IEA, *Global EV Outlook 2024*, Paris, 2024.
2. Thủ tướng Chính phủ, *Quyết định số 876/QĐ-TTg ngày 22/7/2022 phê duyệt Chương trình hành động về chuyển đổi năng lượng xanh, giảm phát thải khí các-bon và khí mê-tan của ngành giao thông vận tải*, 2022.
3. Agora Verkehrswende, *Towards decarbonising transport: Vietnam 2024 – A stocktake on sectoral ambition*, 2024.
4. GIZ, *Summary report: Net-zero roadmap for the transport sector in Vietnam*, 2024.
5. B. Wang & C. Rogate, *Viet Nam – Recommendations to the national roadmap and action plan for the electric mobility transition*, World Bank, 2024.
6. E. Mogire, “Light electric vehicles and sustainable transport in urban areas: A bibliometric review,” *World Electric Vehicle*

Journal, vol. 17, no. 1, pp. 23, 2026, doi: 10.3390/wevj17010023

7. M. Green, “How did solar cells get so cheap?,” *Joule*, vol. 3, no. 3, pp. 631–633, 2019.

8. J. C. Huston, J. B. Graves, & B. D. Johnson, “Three wheeled vehicle dynamics,” *SAE Technical Paper*, vol. 91, pp. 591–604, 1982, doi: 10.4271/820139

9. GoSun Gopher, *Solar cargo e-bike*, 2026. <https://gosun.co/products/solar-trike> (accessed 14 July 2026)

10. Haley Tricycles, *Electric assist solar trikes*, n.d. <https://www.haleytricycles.com/eassist> (accessed 14 July 2026)

11. D. Berjoza, I. Jurgena, & D. Bergspics, “Solar electric tricycle development and research,” *Agronomy Research*, vol. 19, no. S1, pp. 665–675, 2021.

12. X. T. Nguyễn, & V. L. Dương, “Thiết kế cải tạo xe lắc năng lượng mặt trời dùng

cho người khuyết tật,” *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Trà Vinh*, tập 1, số 36, tr. 31–38, 2020.

13. S. Kowalski, “Sample structural solution for a city tricycle with an additional solar drive,” *Scientific Journal of Silesian University of Technology, Series Transport*, vol. 109, pp. 85–92, 2020, doi: 10.20858/sjsutst.2020.109.8

14. B. Sherman, *Solar powered tricycle set to begin production*, AutoFutures, 2022. <https://www.autofutures.tv/topics/solar-powered-tricycle-set-to-begin-production/s/de9379d4-a716-4aed-8ab4-d273a8f956e6> (accessed 14 July 2026)

15. J. N. Bharothu, N. G. Krishna, O. S. Prasad, B. Madhav, M. Balayya, & Y. V. Sai, “Design, fabrication and performance analysis of solar electric tricycle,” *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 6, no. 3, pp. 314–319, 2019.

16. P. Desai, D. Kapadia, & T. Nikunj, “Design and fabrication of solar tricycle,” *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 5, no. 6, pp. 658–665, 2016, doi: 10.5281/zenodo.55800

17. K. B. Girikshith, K. A. Sudarshan, K. Yashas, M. Lalith, & C. D. Hampali, “Design and development of solar electric tricycle,” *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 8, no. 8, pp. 31–39, 2021.

18. B. Coxworth, *Solar-boosted pedal-electric velomobile is new and improved*, New Atlas, 2026. <https://newatlas.com/urban-transport/elf-3-pedal-electric-solar-velomobile/> (accessed 14 July 2026)

19. Evovelo, *mö: Technical specification*, n.d.

20. E. Fiolet, *Wello Family, smart e-cargo bike with solar-powered assistance*, Ubergizmo, 2020.

<https://www.ubergizmo.com/2020/01/wello-family-smart-e-cargo-bike-with-solar-powered-assistance/> (accessed 14 July 2026)

21. Runth, *Solar-powered 3-wheel electric tricycle with trailer capability RS-026*, 2026. <https://runthbikes.com/product/solar-electric-tricycle-3-wheel-electric-bike-cargo-trike-with-solar-panel/> (accessed 14 July 2026)

22. TriExplor, *Solar power electric recumbent Trike-ES320*, 2026. <https://www.trikexplor.com/products/trikexplor-solar-electric-recumbent-trike-320e?variant=34432317685926> (accessed 14 July 2026)

23. A. Abdullah, S. Kandaya, M. Bahar, H. Musa, & J. Lazi, “Innovative solar-powered electric trishaws with advanced cooling, safety and smart systems for tropical urban mobility,” *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 13, pp. 128–143, 2025.

24. SunRider, *Self charging cargo e-bike for your urban logistics*, 2026. <https://sunrider.bike/> (accessed 14 July 2026)

25. R. Sharma, S. Dwivedi, S. Agarwal, A. Kashyap, P. Singh, & R. R. Yadav, “Affordable solar electric tricycle for assistive mobility: Design, implementation and performance analysis,” *Journal of Innovation and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 95–106, 2026.

26. P. V. Thokal, R. Arulmurugan, M. Manik Shinde, & S. V. Chaudhari, “Hybrid peddle and solar electric vehicle for physically challenged people,” *Test Engineering and Management*, vol. 83, pp. 2037–2042, 2020.

27. A. M. Paudel, & P. Kreutzmann, “Design and performance analysis of a hybrid solar tricycle for a sustainable local commute,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 473–482, 2015, doi:10.1016/j.rser.2014.08.078

28. N. Murthy, Chethan, P. Palthi, & S. S. Chandan, "Design of a solar vehicle using multiple energy source," *International Journal of Research and Analytical Reviews*, vol. 6, no. 2, pp. 100–106, 2019.

29. Organic Transit, *The ELF 3.0 is coming*, n.d. <https://organictransit.com/elf-3/> (accessed 14 July 2026)

30. A. Bowden, *Dutch firm launches the SunRider – the world's first self-charging solar-powered e-cargo bike*, Ebiketips, 2021. <https://road.cc/ebiketips/content/news/dutch-firm-launches-the-sunrider-the-worlds-first-self-charging-solar-powered-e-cargo> (accessed 14 July 2026)

31. T. Popomaronis, *Meet PEBL: The ride that will revolutionize commuting*, Inc., 2016. <https://www.inc.com/tom-popomaronis/meet-pebl-the-ride-that-will-revolutionize-commuting.html> (accessed 14 July 2026)

32. R. Kandasamy, S. Raut, D. Varma, & G. There, "Design of solar tricycle for handicapped person," *IOSR Journal of*

Mechanical and Civil Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 11–24, 2013.

33. R. Beedu, "Design, development and performance evaluation of solar power assisted tricycle," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 4, no. 7, pp. 513–517, 2015.

34. Y. D. Borole, A. Shrivastava, A. Poonia, A. Katiyar, R. S. Kumar, & L. M. Rinawa, "Design, modeling, and development of solar based tricycle," *In 2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI) Proceedings*, IEEE, pp. 679–684, 2021.

35. P. Kadi, "Design and development of solar powered hybrid tricycle," *International Journal of Research and Analytical Reviews*, vol. 5, no. 3, pp. 532–537, 2018.

36. A. T. Nguyễn, *Tiềm năng điện mặt trời tại Việt Nam*, Báo Điện tử Chính phủ, 2020. <https://baochinhphu.vn/tiem-nang-dien-mat-troi-tai-viet-nam-102277349.htm> (accessed 14 July 2026).

- Ngày gửi bài: 12/08/2026

- Ngày phản biện: 06/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ BỘ ĐIỀU KHIỂN FUZZY-PID THÍCH NGHI CHO HỆ THỐNG LÁI STEER-BY-WIRE

Lê Đình Hiếu¹*, Đoàn Ngọc Hiệu¹, Lê Thị Kim Liên², Nguyễn Thị Phúc³

TÓM TẮT

Hệ thống Steer-by-Wire (SbW) yêu cầu độ chính xác bám góc lái và khả năng hạn chế dao động của cơ cấu chấp hành. Nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi với 25 luật suy luận để điều chỉnh trực tuyến các tham số PID theo sai lệch và tốc độ biến thiên sai lệch. Mô hình được mô phỏng trên MATLAB/Simulink và so sánh với PID và PSO-PID. Kết quả cho thấy Fuzzy-PID giảm biên độ góc động cơ từ 1.60 xuống 1.55 rad (3.13%), biên độ góc bánh xe từ 16.0 xuống 15.5 rad và biên độ dao động gia tốc góc xác lập từ khoảng ± 0.72 xuống ± 0.53 rad/s². Độ quá điều chỉnh giảm từ 69.36% xuống 68.87%, trong khi thời gian xác lập gần như không đổi. Kết quả cho thấy Fuzzy-PID có khả năng giảm dao động và cải thiện đặc tính bám trong điều kiện mô phỏng khảo sát.

Từ khóa: Steer-by-wire (SbW), Fuzzy-PID, PID, Steering wheel (SW), Road wheel (RW).

SIMULATION AND EVALUATION OF AN ADAPTIVE FUZZY-PID CONTROLLER FOR STEER-BY-WIRE STEERING

ABSTRACT

The Steer-by-Wire (SbW) system requires steering angle gripping accuracy and the ability to limit the vibration of the actuator. The study constructed the Fuzzy-PID controller adapted to 25 laws of inference for online adjustment of PID parameters according to deviation and deviation variation rate. The model was simulated on MATLAB/Simulink and compared with PID and PSO-PID. The results showed that the Fuzzy-PID reduced the motor angle amplitude from 1.60 to 1.55 rad (3.13%), the wheel angle amplitude from 16.0 to 15.5 rad, and the amplitude of the established angular acceleration oscillation from about ± 0.72 to ± 0.53 rad/s². The overcorrection decreased from 69.36% to 68.87%, while the setting time was almost constant. The results show that Fuzzy-PID has the ability to reduce vibration and improve adhesion properties under survey simulation conditions.

Keywords: Steer-by-wire (SbW), Fuzzy-PID, PID, Steering wheel (SW), Road wheel (RW).

1. MỞ ĐẦU

Quá trình số hóa và điện tử hóa trong ngành công nghiệp ô tô, cùng với sự phát triển của cảm biến thông minh, truyền thông thời gian thực và các thuật toán điều khiển tiên tiến, đang thúc đẩy sự chuyển đổi từ kiến trúc cơ khí truyền thống sang các hệ thống điều khiển điện tử tích hợp. Các công nghệ như hệ thống chống bó cứng phanh (ABS), cân bằng điện tử (ESC), kiểm soát lực kéo (TCS) và trợ lực lái điện (Electric Power Steering – EPS) đã góp phần nâng cao độ an toàn, ổn định và khả năng điều khiển của phương tiện, đồng thời tạo nền tảng cho các hệ thống hỗ trợ lái và phương tiện tự hành. Mặc dù EPS đã cải thiện đáng kể hiệu suất điều khiển so với các hệ thống trợ lực truyền thống, cấu trúc này vẫn duy trì liên kết cơ khí

giữa vô lăng và cơ cấu lái. Liên kết này hạn chế tính linh hoạt trong bố trí không gian, ảnh hưởng đến khả năng tích hợp các chức năng điều khiển tự động và có thể làm tăng nguy cơ chấn thương khi xảy ra va chạm trực diện. Do đó, hệ thống Steer-by-Wire (SbW), với khả năng thay thế liên kết cơ khí bằng giao tiếp và điều khiển điện tử, đang trở thành một hướng phát triển quan trọng nhằm nâng cao tính linh hoạt và khả năng tích hợp của hệ thống lái trên các phương tiện thế hệ mới.

Để khắc phục những hạn chế của liên kết cơ khí truyền thống, hệ thống Steer-by-Wire (SbW) đã được nghiên cứu như một hướng phát triển quan trọng trong công nghệ điều khiển ô tô. Khác với hệ thống lái truyền thống, SbW thay thế liên kết cơ khí giữa vô lăng và cơ cấu lái bằng các cảm biến góc, cảm

¹ Khoa Kỹ thuật và Công nghệ - Đại học Huế

² Trường Cao đẳng Nghề số 4, Bộ Quốc phòng

³ Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh Thành phố Quảng Ninh, Việt Nam

* Email: ledinhhiu@hueuni.edu.vn

biến mô-men, bộ điều khiển điện tử (ECU), mạng truyền thông và cơ cấu chấp hành điện. Kiến trúc này góp phần giảm khối lượng, tăng tính linh hoạt trong bố trí không gian và tạo điều kiện tích hợp các hệ thống hỗ trợ lái tiên tiến (ADAS) cũng như chức năng lái tự động. Do quá trình truyền lệnh và phản hồi lái được thực hiện chủ yếu thông qua các thuật toán điều khiển, chất lượng điều khiển có vai trò quan trọng đối với độ chính xác, ổn định và an toàn của hệ thống. Tuy nhiên, việc loại bỏ liên kết cơ khí cũng làm gia tăng yêu cầu đối với khả năng đồng bộ giữa góc vô lăng và góc bánh xe, tái tạo phản hồi mô-men và duy trì ổn định khi hệ thống chịu tác động của sai số mô hình, biến thiên tham số, phi tuyến lớp, ma sát, khe hở cơ khí và nhiễu từ mặt đường. Vì vậy, động lực học SbW cần được xem xét trong điều kiện phi tuyến và bất định nhằm bảo đảm khả năng bám góc lái và đáp ứng ổn định trong các điều kiện vận hành khác nhau.

Trong những năm gần đây, nhiều phương pháp điều khiển đã được nghiên cứu cho hệ thống SbW, bao gồm PID, LQR, điều khiển trượt (Sliding Mode Control), điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control), điều khiển thích nghi và các phương pháp điều khiển thông minh dựa trên mạng nơ-ron hoặc logic mờ. Trong đó, PID vẫn được sử dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và chi phí tính toán thấp. Tuy nhiên, hiệu năng của PID phụ thuộc đáng kể vào việc lựa chọn các tham số K_p , K_i và K_d . Khi hệ thống chịu ảnh hưởng của biến thiên tham số, đặc tính phi tuyến hoặc nhiễu từ mặt đường, bộ tham số cố định có thể làm suy giảm khả năng bám góc lái và gia tăng dao động hoặc thời gian đáp ứng. Mặc dù các phương pháp điều khiển tiên tiến đã được đề xuất nhằm cải thiện hiệu năng SbW, việc đồng thời bảo đảm khả năng thích nghi, độ chính xác bám và tính khả thi trong triển khai thời gian thực vẫn là một vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu. Một số

phương pháp có khả năng đạt hiệu năng cao nhưng yêu cầu mô hình chi tiết hoặc cấu trúc tính toán phức tạp, trong khi PID truyền thống lại hạn chế khả năng thích ứng trước các điều kiện vận hành thay đổi. Do đó, việc phát triển một cấu trúc điều khiển có chi phí tính toán hợp lý nhưng vẫn có khả năng tự điều chỉnh tham số theo trạng thái hệ thống là một hướng tiếp cận đáng quan tâm đối với hệ thống SbW.

Xuất phát từ những vấn đề trên, nghiên cứu này đề xuất bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi cho hệ thống lái Steer-by-Wire trên xe ô tô. Bộ điều khiển sử dụng logic mờ để điều chỉnh trực tuyến các tham số K_p , K_i và K_d theo sai lệch bám và tốc độ biến thiên của sai lệch, nhằm cải thiện khả năng thích nghi của hệ thống. Hiệu quả điều khiển được đánh giá thông qua các chỉ tiêu về độ chính xác bám góc lái, thời gian đáp ứng, độ quá điều chỉnh và đặc tính dao động, đồng thời được so sánh với PID truyền thống và PSO-PID trong môi trường MATLAB/Simulink. Kết quả mô phỏng được sử dụng để đánh giá khả năng cải thiện đáp ứng của Fuzzy-PID trong điều kiện khảo sát và làm cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo về khả năng kháng nhiễu và thích nghi với biến thiên tham số.

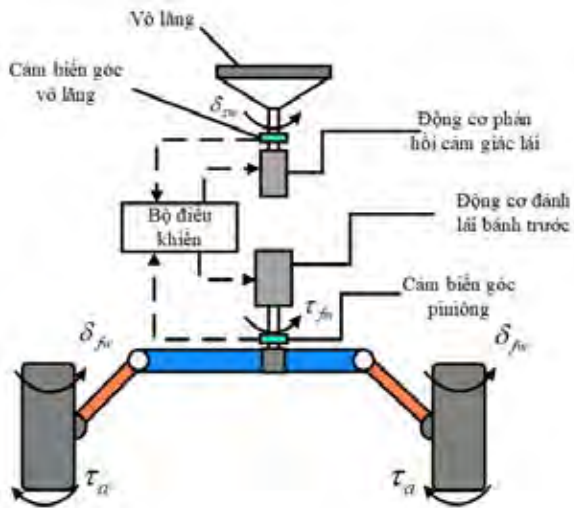
II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình toán học Steer by wire (SbW)

Steer-by-wire (SbW) là hệ thống lái có các thành phần và liên kết cơ học truyền thống nối giữa vô lăng và bánh xe được loại bỏ hoàn toàn Hình 1. Trong nghiên cứu này, hệ thống SbW được mô hình hóa tập trung vào cơ cấu chấp hành góc bánh xe dẫn hướng và bộ điều khiển điện tử. Việc thay thế hệ thống điều khiển cơ học hoặc thủy lực bằng hệ thống điện tử được gọi chung là công nghệ "by-wire". Sự điều khiển xe được thực hiện thông qua các tín hiệu điện, mạng lưới kết nối máy tính và các cơ cấu chấp hành cơ điện thay vì các khớp nối cơ học.



Hình 1. Kiến trúc hệ thống lái Steer-by-Wire [15]



Hình 2. Cấu trúc mô hình hệ thống Steer-by-Wire được sử dụng trong nghiên cứu.

Steer-by-wire sử dụng triệt để các thành phần của hệ thống lái thông thường ngoại trừ các chi tiết trục lái trung, phần này bị cắt làm đôi với đầu trên và được loại bỏ hoàn toàn Hình 2. Tạo ra một hệ thống lái chỉ còn lại một trong hai khớp các-đăng, nhằm giảm thiểu góc nghiêng của các khớp trong việc định hướng các trục kết nối.

Bất kỳ sự dao động nào về mô-men xoắn và tốc độ truyền động do khớp các-đăng gây ra có thể được mô hình hóa bằng giải tích:

$$\theta_{out} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_{in}}{\cos \beta} \right)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_{out} &= \left(\frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cos^2 \theta_{in}} \right) \dot{\theta}_{in} \\ \tau_{out} &= \left(\frac{\cos \beta}{1 - \sin^2 \beta \cos^2 \theta_{in}} \right) \tau_{in} \end{aligned} \quad (1)$$

Trong đó β là góc giữa trục đầu vào và trục đầu ra. Để cung cấp sự dẫn động lái thay cho vô lăng, một động cơ servo DC không chổi than được gắn vào phần còn lại của trục trung gian thông qua một khớp nối mềm, cứng về mặt xoắn nhưng linh hoạt trong uốn cong, giúp đáp ứng bất kỳ sự lệch trục dọc nào giữa các trục kết nối. Vô động cơ servo được cố định vào khung xe.

2.2. Mô hình toán học đối tượng điều khiển

Để xây dựng mô hình điều khiển cho hệ thống lái Steer-by-Wire, đối tượng điều khiển được mô tả thông qua các quan hệ động lực học và truyền động cơ khí. Mô hình bao gồm động cơ chấp hành, quan hệ truyền động từ động cơ đến thanh răng và quan hệ biến đổi chuyển vị thanh răng thành góc quay bánh xe. Các phương trình toán học tương ứng được trình bày như sau:

Phương trình động lực học:

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = T_m - T_L \quad (2)$$

Mô hình động cơ điện:

$$T_m = K_t i \quad (3)$$

Quan hệ truyền động:

$$x_r = f(\theta_m) \quad (4)$$

Quan hệ thanh răng bánh xe:

$$\delta = f(x_r) \quad (5)$$

Trong đó:

θ_m : góc động cơ

x_r : độ dịch chuyển thanh răng

δ : góc bánh xe dẫn hướng

J_m : mômen quán tính

B_m : hệ số ma sát nhớt

T_L : mômen tải

Bảng 1. Thông số mô hình

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Mômen quán tính động cơ	J_m		
Hệ số ma sát	B_m		
Hằng số mômen	K_t		

2.3. Thiết kế và tối ưu hóa hệ thống điều khiển

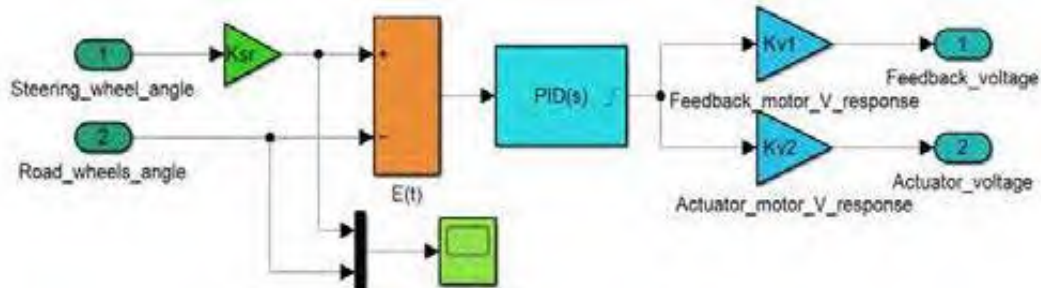
2.3.1. Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID sẽ giúp cho hệ thống SbW sao chép chính xác các lệnh lái có thể được tạo ra bởi người lái xe Hình 3.

Cấu trúc của toán học của bộ điều khiển PID được mô tả bằng cấu trúc trong MATLAB:

$$K(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (6)$$

Đây là phương trình hàm truyền của bộ điều khiển PID dạng song song có tích hợp bộ lọc vi phân trong miền Laplace.



Hình 3. Bộ điều khiển PID

Trong thực tế, khâu vi phân thuần túy ($D \cdot s$) sẽ khuếch đại các tín hiệu nhiễu tần số cao tạo nên hiện tượng nhiễu cảm ứng từ. Nên

lúc đó $\frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$ sẽ đóng vai trò là một bộ lọc thông thấp bậc 1. Giúp giới hạn độ lợi ở dải tần số cao để bảo vệ hệ thống và giảm thiểu tín hiệu nhiễu.

Trong bộ điều khiển PID các tham số điều khiển K_p , K_i và K_d sẽ được tìm và tinh chỉnh theo phương pháp Ziegler–Nichols. Theo phương pháp Ziegler–Nichols ta tìm được các giá trị của $K_p = 27$, $K_i = 6$ và $K_d = -0.5$. Các tín hiệu đầu vào cho thấy sự đánh lái thông thường có xu hướng êm và liên tục nhưng sẽ thay đổi rất nhiều về tốc độ, vì thế điều quan trọng đối với bộ điều khiển lái sẽ bám theo các tín hiệu đầu vào nhanh với độ trễ tối thiểu. Để đơn giản hóa thiết kế của bộ điều khiển,

Trong đó:

$K(s)$: Hàm truyền của bộ điều khiển.

P : Hệ số khuếch đại của khâu Tỷ lệ. Tác động trực tiếp vào sai số hiện tại.

I : Hệ số khuếch đại của khâu Tích phân.

Triệt tiêu sai số xác lập. Khâu $\frac{1}{s}$ chính là đại diện cho phép toán tích phân trong miền Laplace.

D : Hệ số khuếch đại của khâu đạo hàm. Phản ứng với tốc độ thay đổi của sai số.

s : Toán tử Laplace (biến số phức trong miền tần số).

N : Hệ số bộ lọc của khâu vi phân.

trường hợp không có tiếp xúc giữa lốp và mặt đất (các bánh trước được nâng lên khỏi mặt đất) được xem xét ban đầu để ảnh hưởng của J_s , b_s và F_s có thể được cô lập khỏi các lực nhiễu của lốp xe. Nỗ lực điều khiển cho trường hợp này bao gồm ba thành phần:

$$\tau = \tau_{\text{feedback}} + \tau_{\text{feedforward}} + \tau_{\text{friction}} \quad (7)$$

Thành phần phản hồi tỷ lệ -tích phân- đạo hàm (PID) được cho bởi:

$$\tau_{\text{feedback}} = K_p(\theta_d - \theta) + K_i \int (\theta_d - \theta) dt + K_d(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) \quad (8)$$

Trong đó θ_d là góc lái mong muốn, K_p là hằng số phản hồi tỷ lệ, K_i là hằng số phản hồi của tích phân và K_d là hằng số phản hồi đạo hàm. Các hệ số khuếch đại phản hồi, K_p , K_i và K_d được chọn để mang lại đáp ứng hệ thống vòng kín nhanh mà không có hành vi

dao động. Tuy nhiên, bộ điều khiển PID vẫn có thể gặp các vấn đề gây ảnh hưởng đến độ an toàn và tối ưu của hệ thống. Bộ điều khiển PID sẽ dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu tần số cao có xu hướng trở nên tồi tệ hơn khi đạo hàm,

và việc lọc nhiễu có thể gây ra độ trễ trong tín hiệu. Ngoài ra, còn không có khả năng thích nghi tốt trong mọi môi trường của đường chạy trên thời gian thực.

Bảng 2. Thông số PID

Controller	K_p	K_i	K_d
PID	27	6	-0.5
Fuzzy-PID	27	6	-0.5

Đối với Fuzzy-PID, các giá trị trên được sử dụng làm thông số cơ sở, sau đó được hiệu chỉnh trực tuyến thông qua ΔK_p , ΔK_i và ΔK_d .

2.3.2. Bộ điều khiển Fuzzy-PID

Để khắc phục những hạn chế của bộ điều khiển PID với tham số cố định trong điều kiện hệ thống có tính phi tuyến và biến thiên, bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi được thiết kế. Ta có phương trình cơ bản của Fuzzy-PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

Phương trình sai số:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (10)$$

Đạo hàm sai số:

$$\dot{e}(t) = \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Các thông số điều chỉnh:

$$\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d \quad (12)$$

Nhóm thông số bộ điều khiển PID:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \quad (13)$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i \quad (14)$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d \quad (15)$$

Trong đó:

$e(t)$: sai lệch giữa giá trị đặt và giá trị thực.

$K_p(e)$, $K_i(e)$, $K_d(e)$: hệ số PID không cố định, mà được điều chỉnh theo luật mờ dựa trên $e(t)$ và $\Delta e(t)$ (đạo hàm của sai lệch).

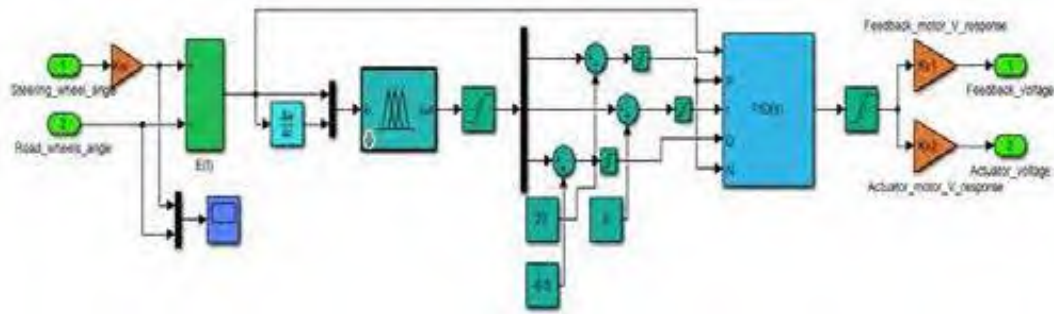
Bảng 3. Nội suy qua 25 luật Fuzzy

	NB	NS	ZE	PS	PB
NB					
NS					
ZE					
PS					
PB					

Bộ điều khiển Fuzzy-PID được thiết kế nhằm điều chỉnh trực tuyến các tham số K_p , K_i và K_d theo trạng thái sai lệch của hệ thống, qua đó cải thiện khả năng bám góc lái trong điều kiện động lực học biến thiên (Hình 4). Dựa trên việc sử dụng được nội suy qua 25 luật Fuzzy từ đó trích xuất ra các lượng gia phi tuyến để cập nhật trực tuyến cấu trúc thông số của bộ điều khiển lỗi tại mỗi chu kỳ.

Trong cấu trúc này, bộ suy diễn Fuzzy đóng vai trò giám sát cấp cao, liên tục đánh giá các trạng thái động lực học của xe sẽ đi vào 2 biến: sai số bám và đạo hàm của sai số với 5 hàm. Bằng việc áp dụng luật Fuzzy được đúc kết từ các kinh nghiệm của các chuyên gia, sẽ thực hiện quá trình Fuzzy hóa và giải Fuzzy để nội suy ra các giá trị cập nhật

$$(\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d).$$



Hình 4. Cấu trúc bộ điều khiển Fuzzy-PID thích nghi.

Bộ suy luận mờ nhận sai số bám e và đạo hàm sai số $\dot{e}$ làm hai biến đầu vào. Các tín hiệu đầu ra $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ được sử dụng để cập nhật trực tuyến các tham số của bộ điều khiển PID

Nhờ vào khả năng tự động tinh chỉnh các hệ số điều khiển một cách liên tục và phi tuyến, bộ Fuzzy-PID có khả năng bù trừ chủ động các tín hiệu nhiễu từ góc lái vô lăng (Steering wheel angle - Sw) đến với góc chuyển hướng của bánh xe chủ động (Road wheel angle - Rw), thông qua đó làm nổi bật lên sự triệt tiêu đi hiện tượng rung chấn ở vùng xác lập, qua đó tối ưu hóa đồng thời cả thời gian đáp ứng quá độ và độ chính xác bám quỹ đạo dưới các điều kiện môi trường khắc nghiệt của bộ điều khiển Fuzzy-PID một cách rõ ràng.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

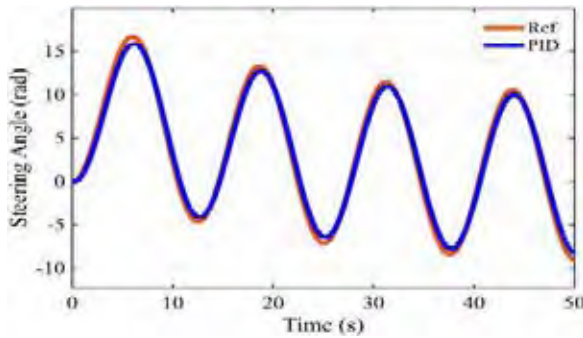
3.1 Đáp ứng bám góc lái

Để có được cái nhìn khách quan, sự thay đổi của mô hình toán học và hiệu năng của bộ điều khiển Fuzzy-PID so với bộ điều khiển truyền thống PID trên hệ thống lái Steer-by-Wire (SbW), quá trình được thực hiện trong môi trường mô phỏng MATLAB-Simulink. Trong đó, tín hiệu được giả lập là góc quay vô lăng (Steering wheel angle - Sw) cùng với tín hiệu đầu ra được mô phỏng theo tín hiệu của góc

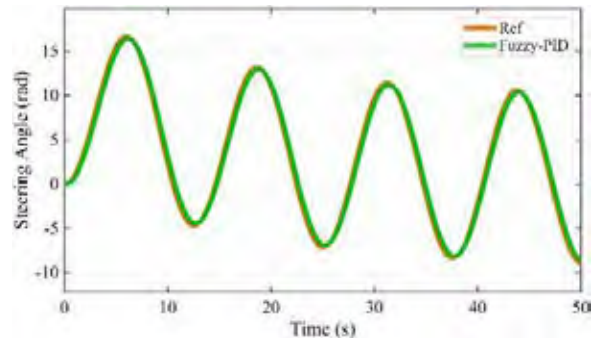
chuyển hướng bánh xe (Road wheel angle - Rw) trên khoảng biến thiên liên tục của thời gian, đại diện cho các tín hiệu phản hồi từ vô lăng đến bánh xe chuyển hướng khi người lái điều khiển phương tiện thay đổi trên đường phẳng.

3.2 Đánh giá khả năng bám của bộ điều khiển

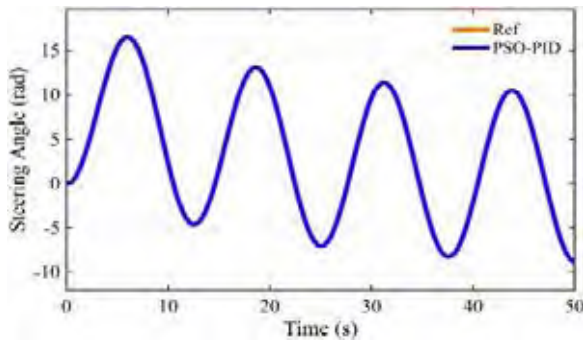
Hình 5 trình bày đáp ứng góc lái của hệ thống SbW dưới tín hiệu tham chiếu hình sin trong khoảng thời gian 0–50 s. Các bộ điều khiển đều duy trì được khả năng bám quỹ đạo và tái tạo xu hướng biến thiên của tín hiệu tham chiếu qua các chu kỳ. Tuy nhiên, sai lệch biên độ và sai lệch pha vẫn xuất hiện, đặc biệt tại các đỉnh và đáy của tín hiệu. Đối với PID, sai lệch giữa tín hiệu tham chiếu và đáp ứng điều khiển tăng dần theo thời gian, thể hiện rõ hơn ở các chu kỳ cuối. Fuzzy-PID cho đáp ứng gần tín hiệu tham chiếu hơn và duy trì dạng sóng ổn định hơn, trong khi PSO-PID cũng cho khả năng bám tương đối tốt. Theo Bảng 4, độ quá điều chỉnh lần lượt là 69.36%, 68.87% và 67.91% đối với PID, Fuzzy-PID và PSO-PID. Tuy nhiên, chênh lệch giữa các bộ điều khiển tương đối nhỏ; do đó, kết quả này nên được xem là bằng chứng về xu hướng cải thiện thay vì cơ sở để khẳng định Fuzzy-PID vượt trội hoàn toàn.



(a) PID Controller



(b) Fuzzy-PID



(c) PSO-PID

Hình 5. So sánh đáp ứng góc lái dưới tín hiệu tham chiếu hình sin của các bộ điều khiển: (a) PID, (b) Fuzzy-PID và (c) PSO-PID.

Bảng 4. So sánh một số chỉ tiêu đáp ứng của các bộ điều khiển

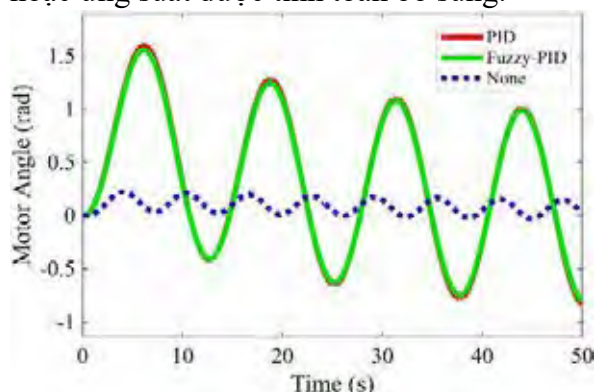
Controller	Settling time (s)	Peak time (s)	Rise time (s)	Overshoot (%)
PID	49.72	5.9820	26.3728	69.36
Fuzzy-PID	49.723	5.9774	26.3854	68.87
PSO-PID	49.733	5.9693	26.3852	67.91

Bảng 4 cho thấy Fuzzy-PID tạo ra mức cải thiện nhất định về độ quá điều chỉnh và thời gian đạt đỉnh so với PID, trong khi thời gian xác lập và thời gian tăng thay đổi không đáng kể. Độ quá điều chỉnh giảm từ 69.36% xuống 68.87%, tương ứng mức giảm 0.49 điểm phần trăm. Đồng thời, thời gian đạt đỉnh giảm từ 5.9820 s xuống 5.9774 s. Tuy nhiên, mức chênh lệch tương đối nhỏ cho thấy ưu thế của Fuzzy-PID không thể hiện rõ nếu chỉ đánh giá bằng các chỉ tiêu thời gian trong Bảng 4. Vì vậy, các đặc tính động học của góc động cơ, chuyển vị thanh răng và gia tốc góc cần được xem xét đồng thời để đánh giá đầy đủ ảnh hưởng của cơ chế điều chỉnh thích nghi.

3.3 Đánh giá động học và đáp ứng vị trí của cơ cấu chấp hành

Hình 6 thể hiện đáp ứng góc quay của động cơ truyền động dưới tín hiệu tham chiếu hình sin. Trong chu kỳ đầu, cả hai bộ điều khiển đều xuất hiện quá độ do hệ thống phải đáp ứng nhanh với sự thay đổi của tín hiệu đặt. Đối với PID, biên độ góc động cơ đạt khoảng 1.60 rad, trong khi Fuzzy-PID giới hạn biên độ cực đại ở khoảng 1.55 rad. Như vậy, biên độ đáp ứng giảm khoảng 0.05 rad, tương đương 3.13%. Mặc dù mức cải thiện về biên độ không lớn, xu hướng đáp ứng của Fuzzy-PID cho thấy khả năng hạn chế dao động dư thừa tại cơ cấu chấp hành. Kết quả này có ý nghĩa đối với việc giảm mức biến thiên của chuyển động quay, nhưng chưa đủ cơ sở để kết luận trực tiếp về mức giảm tiêu thụ năng lượng hoặc ứng suất cơ khí nếu chưa có các

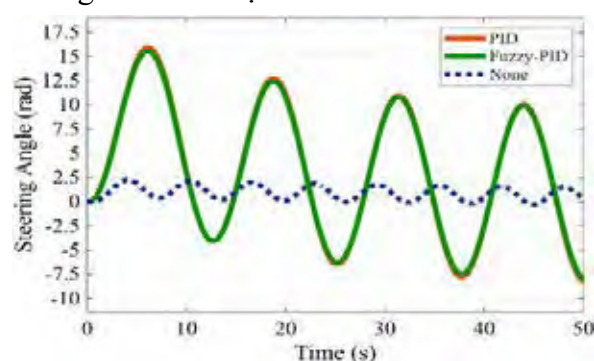
đại lượng như mô-men động cơ, công suất hoặc ứng suất được tính toán bổ sung.



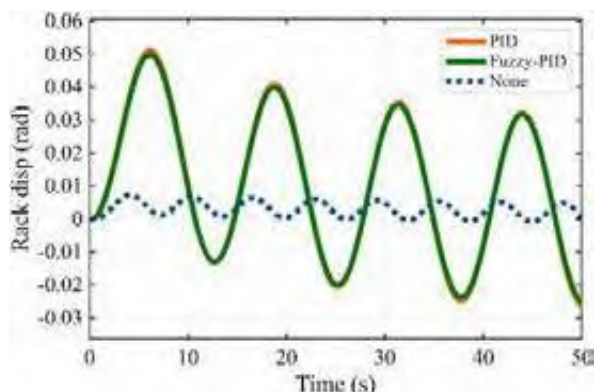
Hình 6. Kết quả bám quỹ đạo góc quay động cơ của các chiến lược điều khiển khác nhau

Hình 7 mô tả chuyển vị của cơ cấu thanh răng tương ứng với đáp ứng của góc động cơ. Biên độ cực đại của thanh răng dưới PID đạt khoảng 0.051 rad, trong khi Fuzzy-PID giới hạn ở khoảng 0.050 rad. Chênh lệch khoảng 0.001 rad, tương ứng mức giảm xấp xỉ 1.96%. Mặc dù mức thay đổi tương đối nhỏ, sự giảm biên độ chuyển vị cho thấy bộ điều khiển thích nghi có khả năng hạn chế một phần chuyển động dư thừa truyền từ cơ cấu quay sang cơ cấu tịnh tiến. Tuy nhiên, để xác định ảnh hưởng của thay đổi này đến tải trọng, độ mòn hoặc khe hở của cơ cấu bánh răng–thanh răng cần bổ sung các đại lượng cơ học tương ứng thay vì chỉ suy luận từ chuyển vị.

Hình 8 thể hiện đáp ứng góc bánh xe dẫn hướng dưới tín hiệu kích thích hình sin. Kết



Hình 8. Đáp ứng góc quay bánh xe với tín hiệu đầu vào hình sin dưới các phương pháp điều khiển khác nhau



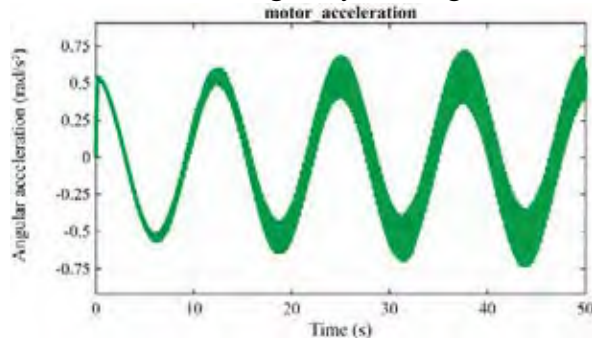
Hình 7. Độ dịch chuyển thanh răng dưới các bộ điều khiển

quả cho thấy cả PID và Fuzzy-PID đều duy trì được dạng đáp ứng tương đồng với tín hiệu tham chiếu, tuy nhiên PID xuất hiện biên độ đáp ứng lớn hơn tại các đỉnh của chu kỳ. Biên độ góc bánh xe đạt khoảng 16.0 rad đối với PID và giảm xuống khoảng 15.5 rad khi sử dụng Fuzzy-PID, tương ứng mức giảm xấp xỉ 3.13%. Đồng thời, đáp ứng của Fuzzy-PID có xu hướng bám gần tín hiệu mong muốn hơn và hạn chế biên độ dao động tại các chu kỳ khảo sát. Kết quả này cho thấy cơ chế điều chỉnh thích nghi có tác động tích cực đến khả năng kiểm soát biên độ góc bánh xe. Tuy nhiên, để đánh giá chính xác chất lượng bám góc lái, cần bổ sung các chỉ tiêu định lượng như RMSE, MAE, IAE hoặc độ lệch pha giữa tín hiệu đặt và tín hiệu đáp ứng.

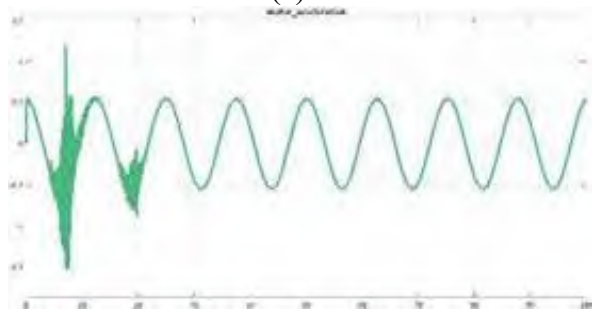
3.4 Đánh giá đáp ứng gia tốc và chất lượng tín hiệu điều khiển của mô-tơ

Hình 9 đánh giá gia tốc góc của động cơ nhằm khảo sát mức độ dao động của cơ cấu chấp hành trong quá trình bám tín hiệu hình sin. Đối với PID, tín hiệu gia tốc duy trì dao động với biên độ tăng dần theo thời gian và đạt khoảng $\pm 0.72 \text{ rad/s}^2$ ở các chu kỳ sau. Đối với Fuzzy-PID, mặc dù xuất hiện các xung quá độ đáng kể trong giai đoạn đầu, dao động sau quá độ được duy trì ở mức xấp xỉ $\pm 0.53 \text{ rad/s}^2$. Nếu chỉ xét vùng đáp ứng sau quá độ,

biên độ dao động giảm khoảng 0.19 rad/s^2 , tương đương khoảng 26%, so với PID. Kết quả cho thấy Fuzzy-PID có khả năng làm giảm dao động gia tốc trong trạng thái xác lập. Tuy nhiên, các xung gia tốc lớn xuất hiện trong giai đoạn quá độ cho thấy bộ điều khiển vẫn cần được hiệu chỉnh để hạn chế đáp ứng đột biến khi hệ thống chuyển trạng thái.



(a) PID



(b) Fuzzy-PID

Hình 9. Đáp ứng gia tốc động cơ khi bám quỹ đạo hình sin: (a) điều khiển PID và (b) điều khiển Fuzzy-PID.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và đánh giá bộ điều khiển Fuzzy-PID cho hệ thống lái Steer-by-Wire (SbW) bằng mô phỏng MATLAB/Simulink. Kết quả cho thấy

Fuzzy-PID có khả năng cải thiện đặc tính động học so với PID truyền thống, với biên độ góc quay động cơ giảm từ 1.60 xuống 1.55 rad (3.13%), độ dịch chuyển thanh răng giảm khoảng 1.96% và biên độ góc bánh xe giảm khoảng 3.13%. Đồng thời, biên độ dao động gia tốc góc trong vùng xác lập giảm từ khoảng ± 0.72 xuống $\pm 0.53 \text{ rad/s}^2$, tương ứng khoảng 26%. Theo Bảng 4, độ quá điều chỉnh giảm từ 69.36% xuống 68.87%, trong khi thời gian xác lập gần như không thay đổi.

Nhìn chung, Fuzzy-PID cho thấy khả năng hạn chế dao động và cải thiện đặc tính bám góc lái trong điều kiện mô phỏng khảo sát. Tuy nhiên, khả năng kháng nhiễu mặt đường, biến thiên tham số và ảnh hưởng của nhiễu cảm biến chưa được đánh giá đầy đủ. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần bổ sung các kích bản nhiễu và biến thiên tham số, đồng thời sử dụng các chỉ tiêu RMSE, MAE, IAE, ITAE và RMS gia tốc để đánh giá định lượng toàn diện hơn. Việc kiểm chứng trên nền tảng Hardware-in-the-Loop hoặc hệ thống điều khiển thời gian thực cũng cần được thực hiện nhằm đánh giá khả năng triển khai Fuzzy-PID cho hệ thống SbW thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đối với sự hỗ trợ tài chính từ Phòng thí nghiệm AU-AI, Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Đại học Huế. Cơ sở vật chất nghiên cứu và nguồn lực kỹ thuật do phòng thí nghiệm cung cấp đã góp phần đáng kể vào việc hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. P. Yih, "Steer-by-wire: Implications for vehicle handling and safety," no. Stanford University, 2005.
2. T. E. Joachim Langenwaller, "Embedded Steer-by-Wire System Development," *Embedded World*, 2004.
3. o. v. d. Sande, "Control of semi-active suspension and steer-by-wire for comfort and handling," *Ph.D. Thesis*, no. Eindhoven University of Technology, 2015.
4. S. S. v. R. Olawoyin, "Intelligent Performance Analysis of Automated

- Steering Systems for Autonomous Vehicles," *Oakland University*, 2020.
5. M. Z. M. T. e. al., "The Vehicle Steer by Wire Control System by Implementing PID Controller," *Universiti Teknikal Malaysia Melaka*, 2017.
 6. H. C. v. K. N. H. Hwang, "Practical Synchronous Steering Angle Control of a Dual-Motor Driving Steer-by-Wire System," *IEEE Access*, 2019.
 7. K. Scicluna, "Sensorless Control in Steer-by-Wire Application," *University of Malta (Ph.D. Thesis)*, 2020.
 8. P. P. H. A. N. Q. a. L.-D. Q. Hoang Tran Ngoc, "Steering Angle Prediction for Autonomous Vehicles Using Deep Transfer Learning," *Journal of Advances in Information Technology*, 2024.
 9. J. M. S. M. ., J. B. Nikolai Beving, "A Kalman Filter-Based Disturbance Observer for Steer-by-Wire Systems," *arXiv (cs.RO)*, 2025.
 10. N. T. T. Q. v. P. V. T. V. B. Tuan, "Active Tracking Control Design for Vehicle Steer-by-Wire System," *TNU Journal of Science and Technology*, 2026.
 11. T. Chugh, "Steering control for haptic feedback and active safety functions," *Ph.D. dissertation, Chalmers Univ. Technol.*, 2021.
 12. J. C. v. K. N. I. Chung, "Modeling and Control of a Road Wheel Actuation Module in Steer-by-Wire System," *Actuators (MDPI)*, 2024.
 13. M. Baars, "Development of dependable Steer-by-Wire steering systems," *Ph.D. dissertation, Clausthal Univ. Technol.*, 2025.
 14. S. Anand, "Personalizing steering experience using steer-by-wire systems," *Ph.D. dissertation, Eindhoven Univ. Technol.*, 2014.
 15. Patentati, "Nissan presenta lo sterzo a controllo indipendente delle ruote," 18 October 2012.[Online].Available:<https://www.patentati.it/blog/articoli-auto/nissan-presenta-lo-sterzo-a-controllo-indipendente-delle-ruote.html>

- Ngày gửi bài: 12/08/2026

- Ngày phản biện: 06/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

THIẾT KẾ BỘ LỌC KALMAN TỐI ƯU NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI SẠC (SOC) CỦA PIN TRÊN XE ĐIỆN

Lê Đình Hiếu^{1*}, Phan Đình Chử¹, Trần Văn Tấn Đạt¹,
Trần Quang Hùng¹, Lê Đình Nguyên¹, Đoàn Thanh Sơn¹, Lê Thị Kim Liên²

TÓM TẮT

Ước lượng chính xác trạng thái sạc (SOC) đóng vai trò quan trọng trong bảo đảm nâng cao độ an toàn, hiệu suất khai thác và tuổi thọ của pin lithium-ion trên xe điện. Tuy nhiên, độ chính xác của bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) phụ thuộc đáng kể vào việc lựa chọn các tham số hiệp phương sai của nhiễu quá trình, nhiễu đo lường và sai số ước lượng trạng thái ban đầu. Việc lựa chọn tham số theo kinh nghiệm gián tiếp làm suy giảm chất lượng ước lượng, đặc biệt khi SOC ở mức thấp hoặc mức cao và khi dòng điện tải biến thiên đột ngột. Trong bài báo này, phương pháp HGOA-EKF được đề xuất nhằm tự động tối ưu các tham số của bộ lọc Kalman mở rộng, qua đó nâng cao độ chính xác ước lượng trạng thái sạc của pin Lithium-ion. Mô hình pin và thuật toán ước lượng được xây dựng trên MATLAB/Simulink với hiệu quả được đánh giá thông qua RMSE, MAE và sai số ước lượng cực đại. Kết quả mô phỏng cho thấy HGOA-EKF cải thiện đáng kể độ chính xác và khả năng đáp ứng của quá trình ước lượng SOC so với EKF sử dụng tham số hiệu chỉnh thủ công, đồng thời khẳng định tiềm năng ứng dụng của phương pháp trong hệ thống quản lý pin (BMS) cho xe điện.

Từ khóa: Ước lượng trạng thái sạc; Pin Lithium-ion; Bộ lọc Kalman mở rộng; Thuật toán tối ưu hóa châu chấu lai; Hệ thống quản lý pin; Tối ưu hóa đa tham số.

DESIGN OF AN OPTIMIZED ADAPTIVE EXTENDED KALMAN FILTER FOR ACCURATE STATE-OF-CHARGE ESTIMATION OF ELECTRIC VEHICLE BATTERIES

ABSTRACT

Accurate state-of-charge (SOC) estimation is essential for enhancing the safety, operational efficiency, and service life of Lithium-ion batteries in electric vehicles. However, the accuracy of the extended Kalman filter (EKF) strongly depends on the proper selection of the process-noise covariance, measurement-noise covariance, and initial state-estimation error. Empirical parameter tuning may compromise estimation performance, particularly at low or high SOC levels and under abrupt load-current variations. This study proposes a hybrid grasshopper optimization algorithm-based extended Kalman filter (HGOA-EKF) to optimize EKF parameters for Lithium-ion battery SOC estimation automatically. The battery model and SOC estimation algorithm are developed in MATLAB/Simulink. The estimation performance is evaluated using the root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and maximum estimation error. Simulation results demonstrate that the proposed HGOA-EKF improves SOC estimation accuracy and dynamic response compared with the conventional EKF with manually tuned parameters. The proposed approach offers a promising solution for improving the reliability of battery management systems (BMSs) in electric vehicles.

Keywords: State of charge (SOC); Lithium-ion battery (LiB); Extended Kalman filter (EKF); Hybrid Grasshopper Optimization Algorithm (HGOA); Battery management system (BMS); Multi parameter optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong xe điện, trạng thái sạc (SOC) của pin Lithium-ion là biến trạng thái quan trọng, chi phối trực tiếp các quyết định vận hành như ước lượng quãng đường còn lại, giới hạn công suất sạc/xả và chiến lược bảo vệ pin. Tuy nhiên, SOC không thể đo trực tiếp mà phải được ước lượng từ các đại lượng đo

được như điện áp, dòng điện và nhiệt độ, vốn chịu tác động của nhiễu đo và điều kiện vận hành. Do đó, ước lượng SOC chính xác và tin cậy là một bài toán ước lượng trạng thái phi tuyến có ý nghĩa quyết định đối với an toàn, hiệu suất và tuổi thọ của hệ thống pin [1, 2]. Các phương pháp truyền thống vẫn tồn tại những hạn chế đáng kể: phương pháp đếm

¹ Khoa Kỹ thuật và Công nghệ - Đại học Huế

² Trường Cao Đẳng Nghề số 4 - Quận Khu 4 - Bộ Quốc Phòng

*Email: ledinhhieuh@hueuni.edu.vn

ampe-giờ chịu ảnh hưởng của sai số tích lũy và SOC ban đầu, trong khi phương pháp dựa trên điện áp hở mạch (OCV) yêu cầu pin ở trạng thái nghỉ đủ lâu để đạt cân bằng điện hóa. Để khắc phục những hạn chế này, bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) được sử dụng rộng rãi nhờ khả năng tuyến tính hóa mô hình phi tuyến và cập nhật liên tục trạng thái SOC từ phản hồi điện áp, đồng thời duy trì chi phí tính toán tương đối thấp, phù hợp với các ứng dụng thời gian thực trong hệ thống quản lý pin (BMS) [3-8].

Tuy nhiên, hiệu năng và độ tin cậy của EKF phụ thuộc chặt chẽ vào việc lựa chọn ba ma trận hiệp phương sai, bởi các tham số này quyết định mức độ tin cậy tương đối giữa mô hình dự báo và tín hiệu đo trong quá trình cập nhật trạng thái. Trong thực tế, các ma trận hiệp phương sai thường được xác định bằng kinh nghiệm hoặc phương pháp thử-sai, nên khi lựa chọn không phù hợp, bộ lọc có thể hội tụ chậm, nhảy quá mức với nhiễu đo hoặc tạo ra sai lệch đáng kể trong quá trình ước lượng SOC [2, 9, 10]. Vì vậy, việc tự động xác định và tối ưu các tham số hiệp phương sai là yêu cầu then chốt nhằm nâng cao độ chính xác và tính ổn định của EKF.

Trong bối cảnh đó, các thuật toán tối ưu hóa lấy cảm hứng từ tự nhiên được xem là một hướng tiếp cận phù hợp nhờ khả năng tìm kiếm nghiệm tối ưu trong không gian tham số mà không phụ thuộc vào thông tin về gradient [9, 12]. Trong số đó, thuật toán tối ưu hóa châu chấu (GOA) có cấu trúc tương đối đơn giản và khả năng tìm kiếm toàn cục tốt; tuy nhiên, khả năng khai thác cục bộ còn hạn chế và nguy cơ hội tụ sớm có thể làm giảm chất lượng nghiệm tối ưu [11, 13]. Để khắc phục những hạn chế này, bài báo đề xuất chiến lược HGOA-EKF, trong đó thuật toán châu chấu lai (HGOA) [13] được tích hợp với EKF để tự động tối ưu các ma trận hiệp phương sai phục vụ cho ước lượng SOC. Cụ thể, nghiên cứu xây dựng mô hình mạch tương đương phi tuyến và khung ước lượng SOC dựa trên

EKF, sử dụng HGOA để xác định bộ tham số hiệp phương sai tối ưu thông qua hàm mục tiêu được xây dựng từ sai số ước lượng, đồng thời thực hiện so sánh với EKF sử dụng tham số thông thường và các phương pháp tối ưu PSO [14] và DOA [15]. Qua đó, hiệu quả của phương pháp đề xuất được đánh giá một cách toàn diện về độ chính xác ước lượng, tốc độ hội tụ và tính ổn định, qua đó làm rõ khả năng nâng cao hiệu năng của EKF trong bài toán ước lượng SOC cho pin Lithium-ion.

Bài báo được trình bày với cấu trúc như sau: Phần 2 mô hình toán học và thuật toán tối ưu hóa, phần này nêu ra các lý thuyết toán học của mô hình pin, EKF và lý thuyết về các thuật toán tối ưu hóa được sử dụng trong nghiên cứu này, Phần 3 kết quả mô phỏng, phần này đánh giá kết quả sau khi tối ưu hóa của bộ lọc Kalman mở rộng của các thuật toán tối ưu hóa, qua hai kịch bản được đề xuất là sai số ước lượng ban đầu cao hơn thực tế và thấp hơn thực tế để đánh giá khả năng hội tụ. Cuối cùng là Phần 4 kết luận.

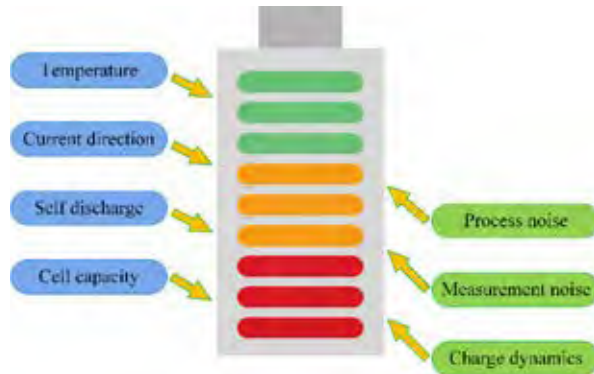
II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp mô hình hóa pin Lithium-ion và bộ lọc Kalman mở rộng

Trong nghiên cứu này, pin Lithium-ion được mô tả đặc tính bằng mô hình mạch tương đương nhằm hỗ trợ việc ước lượng trạng thái thông qua EKF. Trên thực tế, các đặc tính điện của pin không chỉ phụ thuộc vào SOC mà còn chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố như nhiệt độ, chiều dòng điện, hiện tượng tự xả và sự suy giảm dung lượng theo thời gian. Hơn nữa, các bất thường và nhiễu là những yếu tố vốn có trong quá trình nạp/xả cũng như trong quá trình đo điện áp và dòng điện; do đó, cần phải tính đến các yếu tố này khi xây dựng mô hình ước lượng SOC. Hình 1 minh họa các nhóm thông tin chính và các nguồn nhiễu liên quan đến việc ước lượng SOC và trạng thái sức khỏe (SOH), qua đó tạo cơ sở để tích hợp các yếu tố này vào mô hình toán học và EKF được đề cập trong các phần tiếp theo. Mô hình mạch tương đương

được lựa chọn có cấu trúc đơn giản, dễ dàng triển khai trên MATLAB/Simulink nhưng vẫn nắm bắt được các đặc tính động cơ bản của pin, chẳng hạn như điện áp hở mạch, điện trở trong và hiệu ứng phân cực trong quá trình

nạp và xả. Cấu trúc tổng thể của mô hình bao gồm một nguồn điện áp phụ thuộc vào SOC, một điện trở trong và một hoặc nhiều nhánh RC đại diện cho các đặc tính động của pin [3].



Hình 1. Các thông số pin liên quan đến SOC và SOH.

Điện áp cực của pin có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$V_t = OCV(SOC) - I \cdot R_0 - V_p \quad (1)$$

Trong đó: V_t là điện áp cực của pin, $OCV(SOC)$ là điện áp hở mạch phụ thuộc vào trạng thái sạc, I là dòng điện của pin, R_0 là điện trở tức thời và V_p là điện áp phân cực trên nhánh RC. Trong bài báo này, dòng xả quy ước có giá trị dương và dòng sạc quy ước có giá trị âm. Khi đó, SOC của pin được cập nhật dựa trên cân bằng điện tích như sau:

$$SOC(k+1) = SOC(k) - \eta \cdot I(k) \cdot \Delta t / Q_n \quad (2)$$

Trong đó: SOC_k là trạng thái sạc tại thời điểm lấy mẫu thứ k , η là hiệu suất Coulomb, Δt là chu kỳ lấy mẫu và Q_n là dung lượng định mức của pin. Phương trình (2) thể hiện SOC phụ thuộc trực tiếp vào dòng điện $I(k)$ và dung lượng pin Q_n . Vì vậy, nếu dung lượng thực tế của pin thay đổi do quá trình lão hóa, sai số SOC có thể tăng đáng kể nếu bộ ước lượng không cập nhật kịp thời hoặc bù trừ sự thay đổi này thiếu chính xác.

Đối với nhánh phân cực RC, điện áp phân cực được mô tả bởi phương trình vi phân bậc nhất:

$$dV_p/dt = -V_p/(R_1C_1) + I/C_1 \quad (3)$$

Trong đó: R_1 và C_1 lần lượt là điện trở phân cực và điện dung phân cực. Khi rời rạc hóa với chu kỳ lấy mẫu Δt , phương trình trên có thể viết dưới dạng:

$$V_p(k+1) = \exp[-\Delta t/(R_1C_1)] \cdot V_p(k) + R_1[1 - \exp[-\Delta t/(R_1C_1)]] \cdot I(k) \quad (4)$$

Từ các phương trình trên, mô hình trạng thái phi tuyến của pin có thể được biểu diễn tổng quát như sau:

$$x(k+1) = f[x(k), u(k)] + w(k) \quad (5)$$

$$y(k) = h[x(k), u(k)] + v(k) \quad (6)$$

Trong đó: x_k là vector trạng thái, u_k là tín hiệu vào, y_k là tín hiệu đo, w_k là nhiễu quá trình và v_k là nhiễu đo lường.

Trong khi đó, EKF được sử dụng để ước lượng trạng thái của hệ phi tuyến bằng cách tuyến tính hóa mô hình xung quanh điểm làm việc hiện tại. Đối với bài toán pin Lithium-ion, tính phi tuyến chủ yếu xuất hiện trong quan hệ giữa điện áp hở mạch và SOC. Do đó, EKF là phương pháp phù hợp để xử lý mô hình pin khi đặc tuyến OCV-SOC không tuyến tính.

Quá trình dự báo trạng thái của EKF được thực hiện theo:

$$\hat{x}(k|k-1) = f[\hat{x}(k-1|k-1), u(k-1)] \quad (7)$$

$$P(k|k-1) = A_k P(k-1|k-1) A_k^T + Q \quad (8)$$

Trong đó: $\hat{x}_{k|k-1}$ là trạng thái dự báo, $P_{k|k-1}$ là ma trận hiệp phương sai sai số dự báo, A_k là ma trận Jacobi của hàm trạng thái, và Q là ma trận hiệp phương sai nhiễu quá trình. Ma trận Q phản ánh mức độ không chắc chắn của mô hình pin. Nếu Q quá nhỏ, bộ lọc có xu hướng lệ thuộc vào mô hình và phản ứng chậm với sự thay đổi thực tế. Ngược lại, nếu Q được lựa chọn quá lớn, bộ lọc có thể trở nên quá nhạy với nhiễu, làm gia tăng dao động của kết quả ước lượng dẫn đến thiếu chính xác.

Sau bước dự báo, điện áp cực của pin được tính từ mô hình đo:

$$\hat{y}(k) = h[\hat{x}(k|k-1), u(k)] \quad (9)$$

Sai lệch giữa điện áp đo và điện áp dự báo được xác định bởi:

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (10)$$

Hệ số Kalman được tính như sau:

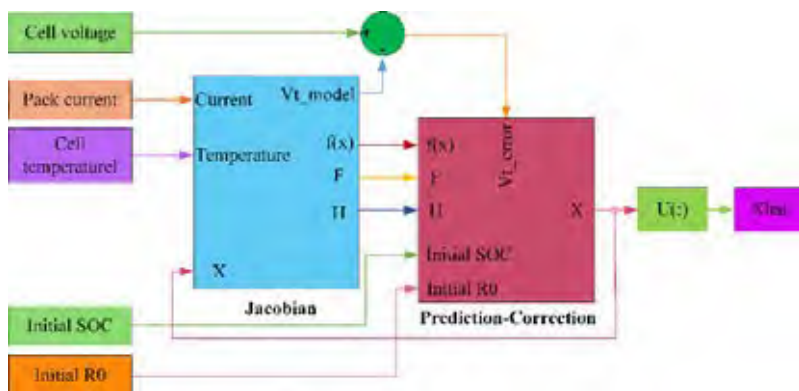
$$K_k = P(k|k-1)H_k^T [H_k P(k|k-1)H_k^T + R]^{-1} \quad (11)$$

Trong đó: H_k là ma trận Jacobi của hàm đo và R là hiệp phương sai nhiễu đo lường. Sau đó, trạng thái và ma trận hiệp phương sai sai số được cập nhật:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K_k e(k) \quad (12)$$

$$P(k|k) = [I - K_k H_k] P(k|k-1) \quad (13)$$

Trong bài toán ước lượng SOC, kết quả của EKF phụ thuộc nhiều vào việc lựa chọn các tham số của ma trận Q , R và P_0 . Các tham số này thường được chọn theo kinh nghiệm hoặc phương pháp thử sai. Tuy nhiên, phương pháp thử công có thể làm tăng thời gian hiệu chỉnh và không đảm bảo bộ lọc đạt sai số nhỏ nhất. Vì vậy, nghiên cứu này sử dụng thuật toán HGOA để tự động tối ưu hóa các tham số quan trọng của ma trận Q , R và P_0 trong bộ lọc EKF.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý của bộ lọc Kalman mở rộng

2.2 Thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu tham số bộ lọc Kalman mở rộng

Chất lượng ước lượng của EKF phụ thuộc nhiều vào ba nhóm tham số: Hiệp phương sai nhiễu quá trình Q ; hiệp phương sai nhiễu đo R và hiệp phương sai sai số ban đầu P_0 . Trong thực tế, các tham số này thường được xác định theo kinh nghiệm, khiến hiệu năng EKF dễ suy giảm khi điều kiện vận hành của pin Lithium-ion thay đổi theo thời gian và chu trình hoạt động của xe. Để giảm sự phụ thuộc vào hiệu chỉnh thủ công, bài báo xây dựng một khung tối ưu hóa thống nhất, sử dụng ba

thuật toán metaheuristic PSO, HGOA và DOA để tự động xác định các tham số EKF trên cùng mô hình và hàm mục tiêu, đảm bảo tính nhất quán và khách quan khi so sánh về độ chính xác, tốc độ hội tụ và tính ổn định của quá trình ước lượng SOC.

Do các phân tử hiệp phương sai có độ lớn biến thiên trên nhiều bậc, các biến quyết định được mã hóa theo thang logarit để cải thiện hiệu quả tối ưu hóa:

$$x = [q_1 \ q_2 \ r \ p_1 \ p_2] \quad (14)$$

Trong đó: q_1, q_2 là hai phân tử trên đường chéo của Q , r là hiệp phương sai nhiễu đo,

p_1, p_2 là hai phần tử đường chéo của ma trận P_0 :

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix}; R = r; P_0 = \begin{bmatrix} p_1 & 0 \\ 0 & p_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Bảng 1. Giới hạn tìm kiếm của các biến tối ưu

Tham số	Miền tìm kiếm
q_1, q_2	$[10^{-30}, 6]$
r	$[10^{-30}, 6]$
p_1, p_2	$[10^{-30}, 6]$

Miền tìm kiếm của từng biến được cho trong Bảng 1, với mỗi lời giải ứng viên x , ba ma trận Q, R, P_0 sau giải mã được nạp vào EKF, mô hình pin Lithium-ion trên Simulink được chạy trọn chu trình khảo sát và sai số ước lượng SOC thu được dùng để tính giá trị thích nghi. Hàm mục tiêu là căn trung bình bình phương sai lệch giữa SOC ước lượng $\hat{z}_k$ và SOC chuẩn z_k :

$$\min_x J(x) = \text{RMSE} + \text{MAE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\hat{z}_k - z_k)^2} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{z}_k - z_k| \quad (16)$$

2.3 Phương pháp tối ưu hóa tham số EKF bằng PSO

Trong thuật toán tối ưu bầy đàn PSO, mỗi ứng viên x_i được xem như một phần tử chuyển động trong không gian tìm kiếm, quỹ đạo của phần tử chịu ảnh hưởng đồng thời từ vị trí tốt nhất mà chính nó từng đạt được p_i và vị trí tốt nhất của cả bầy đàn g . Vận tốc và vị trí của các phần tử trong bầy đàn được cập nhật [14] theo công thức sau:

$$v_i^{t+1} = w v_i^t + c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (g - x_i^t) \quad (17)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (18)$$

Trong đó: w là trọng số quán tính điều tiết cân bằng giữa thăm dò và khai thác, c_1, c_2 lần lượt là hệ số nhận thức và hệ số xã hội, $r_1, r_2 \in [0,1]$ là các số ngẫu nhiên. Nghiên cứu này dùng w giảm tuyến tính theo vòng lặp: giai đoạn đầu thiên về thăm dò rộng, giai đoạn cuối tập trung khai thác quanh các nghiệm tối ưu đã tìm kiếm được.

2.4 Phương pháp tối ưu hóa tham số EKF bằng DOA

Thuật toán tối ưu sói lửa DOH (Dhole Optimization Algorithm) được xây dựng dựa trên cơ chế săn mồi hợp tác và hành vi giao

tiếp bằng tiếng gọi của loài sói lửa [15], gồm ba pha hành vi được chuyển đổi bởi giá trị $v \in [0,1]$ (vocalization cường độ tiếng gọi v) và quy mô bầy ngẫu nhiên $\text{PMN} = \text{round}(\text{rand} \cdot 15 + 5)$.

1) Pha tìm kiếm. Một con mồi ảo được xác định từ nghiệm tốt cục bộ và toàn cục, $\text{prey} = (\text{prey}_{\text{local}} + \text{prey}_{\text{global}})/2$. Khi $\text{PMN} < 10$ và cường độ tiếng gọi $v < 0.5$, của mỗi phần tử (cá thể) tiến dần về phía con mồi: $d_{i,j}^{t+1} = d_{i,j}^t + C_2 \cdot \text{rand} \cdot (\text{prey}_j - d_{i,j}^t)$ (19)

$$C_2 = 1 - \frac{t}{T} \quad (20)$$

Trong đó: C_2 là hệ số dốc giảm tuyến tính, T là số vòng lặp tối đa.

2) Pha bao vây. Khi $\text{PMN} > 10$ và cường độ tiếng gọi $v < 0.5$, cả bầy siết vòng vây quanh con mồi thông qua một thành viên ngẫu nhiên $d_{z,j}^t$:

$$d_{i,j}^{t+1} = d_{i,j}^t - d_{z,j}^t + \text{prey}_j \quad (21)$$

3) Pha tấn công. Cường độ tấn công thích nghi theo kích cỡ con mồi thông qua hệ số $C_3 = 3$:

$$S = C_3 \cdot \text{rand} \cdot (\text{fitness}_i / \text{fitness}_{\text{prey}}) \quad (22)$$

Cơ chế chuyển pha theo tiếng kêu này giúp DOA duy trì cân bằng giữa thăm dò (tìm kiếm) và khai thác (bao vây/tấn công).

2.5 Phương pháp tối ưu hóa tham số HGOA

Thuật toán châu chấu lai HGOA ghép nối phiên bản châu chấu cải tiến (EGOA) với phiên bản bướm cải tiến (MBOA) qua cơ chế lựa chọn xác suất, đồng thời bổ sung học đối nghịch trọng tâm và tìm kiếm mẫu tự thích nghi làm bộ máy tinh chỉnh cục bộ [13].

1) Cơ chế lựa chọn xác suất. Ở mỗi vòng lặp, một số ngẫu nhiên quyết định toán tử

được kích hoạt: nếu $\text{rand} < 0.5$ thì dùng EGOA, ngược lại dùng MBOA - nhờ đó khả năng khai thác của EGOA và khả năng thăm dò của MBOA bổ trợ lẫn nhau.

2) EGOA. Đàn châu chấu di chuyển theo mô hình lực xã hội, nhưng tham số điều khiển được thay bằng quy luật suy giảm phi tuyến theo tỷ lệ số lần đánh giá $t_r = \text{FES}/\text{FES}_{\max}$:

$$c = -p c_{\min} + (c_{\max} + p c_{\min}) e^{\frac{t_r^{3/2} \ln\left(\frac{(p+1)c_{\min}}{c_{\max}+p c_{\min}}\right)}{c_{\max}+p c_{\min}}} \quad (23)$$

Trong đó: $p = 10^4$. Tốc độ suy giảm nhanh của c ở giai đoạn cuối giúp quần thể thoát khỏi các cực trị địa phương.

3) MBOA. Một trọng số quán tính động w dạng hàm lượng giác từng khúc được đưa vào phương trình cập nhật của bướm nhằm tăng cường thăm dò:

$$y_i^{t+1} = w y_i^t + (r^2 g^* - y_i^t) f_i \quad (24)$$

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1 Kết quả mô hình hóa và mô phỏng với kịch bản 1: SOC khởi tạo lớn

Kịch bản thứ nhất được thiết kế để kiểm chứng khả năng hội tụ và độ bền vững của từng bộ ước lượng khi sai số trạng thái ban đầu khi áp đặt ở mức lớn. Trong khi SOC thực của pin là 0.5 (50%), cả bốn bộ lọc đều bị khởi tạo tại 0.8 (80%) tương ứng độ lệch ban đầu +30%. Cách bố trí này tách riêng tính chất có ý nghĩa thực tiễn: khi xe được khởi động mà không có thông tin SOC tin cậy từ trước, bộ lọc được tối ưu hóa tốt phải kéo ước

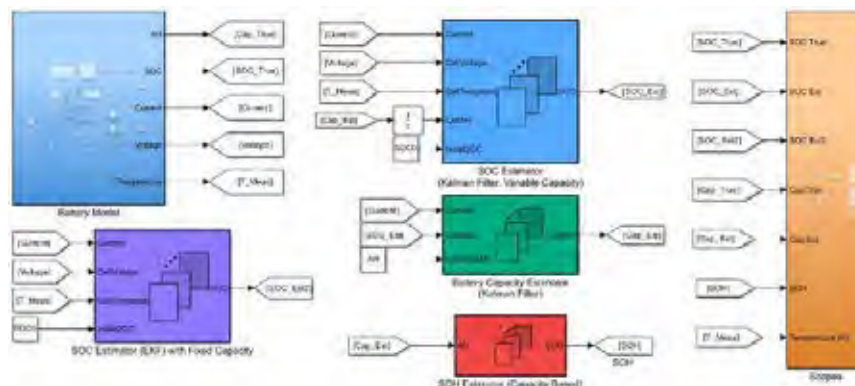
lượng về giá trị thực một cách nhanh chóng và ổn định, còn bộ lọc chính kém hiệu quả sẽ hội tụ chậm, dao động quá mức hoặc mang theo độ lệch kéo dài. Cả bốn bộ ước lượng gồm: bộ ước lượng EKF thông thường và ba biến thể EKF được điều chỉnh bằng metaheuristic: PSO-EKF, DOA-EKF và HGOA-EKF (đề xuất) cùng thực hiện trên cùng bộ thông số tải và mô hình pin duy nhất như Hình 3. Do đó, sự khác biệt về hiệu năng được quy về duy nhất việc tối ưu hóa bộ ba (Q, R, P_0) .

4) Học đối nghịch trọng tâm. Từ trọng tâm quần thể M_i , một nghiệm đối nghịch được sinh ra để làm giàu tính đa dạng, và nghiệm tốt hơn trong cặp được giữ lại:

$$y_i^* = 2M_i - y_i \quad (25)$$

5) Tìm kiếm mẫu tự thích nghi. Cứ sau T vòng lặp, một pha tìm kiếm cục bộ khởi động từ nghiệm tốt nhất hiện có, bước tìm δ_j tự co lại khi quần thể hội tụ, giúp mài sắc độ chính xác cuối cùng.

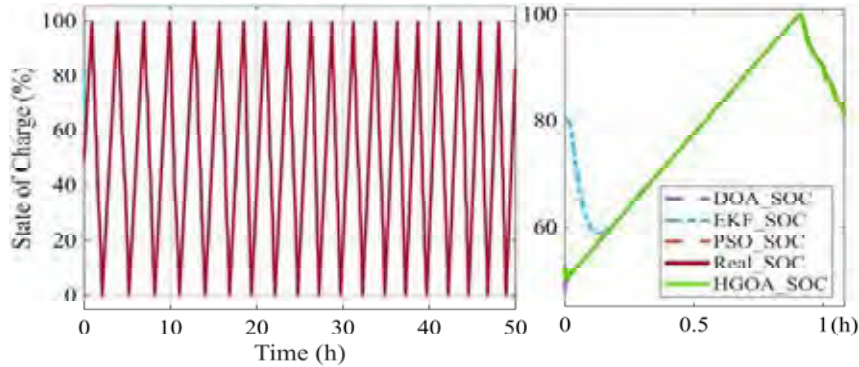
Các hằng số dùng như sau: $f = 0.5$, $l = 1.5$, $c_{\max} = 1$, $c_{\min} = 4 \times 10^{-4}$ (GOA), $p = 0.8$, $a \in [0.1; 0.3]$, $c = 0.01$ (BOA), $\delta = 1$, $\alpha = 1$, $\beta = 0.5$ (PS), chu kỳ kích hoạt $T = 2 \cdot \text{Dim}$.



Hình 3. Mô phỏng quá trình sạc và xả của hệ thống xe điện

Hình 4 so sánh quỹ đạo SOC ước lượng với giá trị chuẩn, trong đó SOC ban đầu được đặt ở 0.8, lệch đáng kể so với giá trị chuẩn 0.5. Cả bốn bộ lọc đều hội tụ về giá trị chuẩn, nhưng khác biệt rõ rệt về tốc độ và chất lượng hội tụ. EKF thông thường có thời gian thu hẹp sai lệch 30% dài hơn và xuất hiện quá điều chỉnh trước khi ổn định, trong khi HGOA-EKF hội tụ nhanh nhất và bám sát giá trị

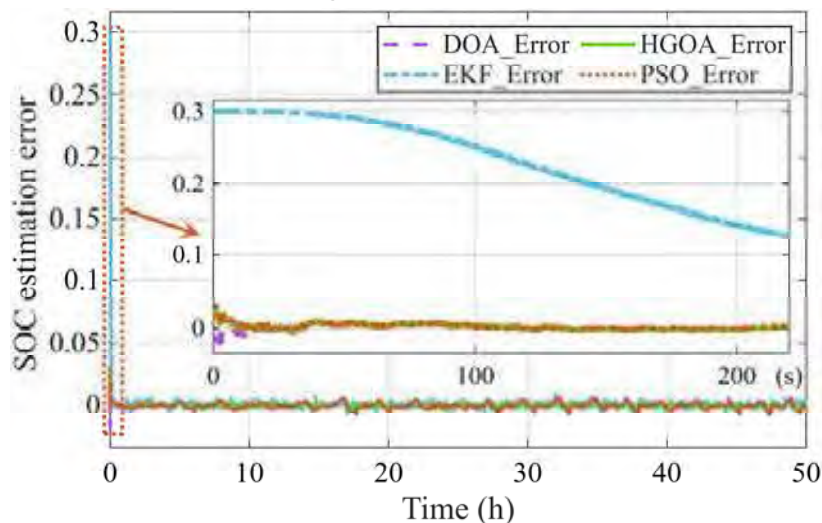
chuẩn sớm nhất, tiếp đến là DOA-EKF và PSO-EKF. Tương ứng, HGOA-EKF đưa sai số SOC về gần 0 nhanh nhất và duy trì biên độ dao động nhỏ nhất ở trạng thái xác lập. Kết quả khẳng định việc tối ưu các ma trận hiệp phương sai giúp EKF tăng tốc độ hội tụ và cải thiện khả năng chống ảnh hưởng của nhiễu đo.



Hình 4. Ước lượng trạng thái sạc trong kịch bản thứ nhất

So sánh định lượng được trình bày trong Bảng 1 và Hình 5 dựa trên hai chỉ tiêu RMSE và MAE của sai số SOC. RMSE nhạy với các sai lệch lớn, do đó phản ánh rõ chất lượng đáp ứng quá độ, trong khi MAE đặc trưng cho mức sai số trung bình trong toàn bộ chu trình đánh giá. Việc sử dụng đồng thời hai chỉ tiêu cho phép đánh giá toàn diện cả khả năng hội tụ và độ chính xác ước lượng. Kết quả cho thấy thứ hạng nhất quán: HGOA-EKF đạt hiệu năng tốt

nhất, tiếp theo là DOA-EKF, PSO-EKF và EKF thông thường. So với DOA-EKF, HGOA-EKF tiếp tục giảm RMSE 81.3% và MAE 37.7%, cho thấy khả năng xác định cấu hình ma trận hiệp phương sai hiệu quả hơn. Ưu thế này được thể hiện trực tiếp qua khả năng rút ngắn quá trình hội tụ và nâng cao độ chính xác ước lượng SOC, đặc biệt trong điều kiện sai lệch SOC ban đầu lớn.



Hình 5. Sai số ước lượng trạng thái sạc trong kịch bản thứ nhất

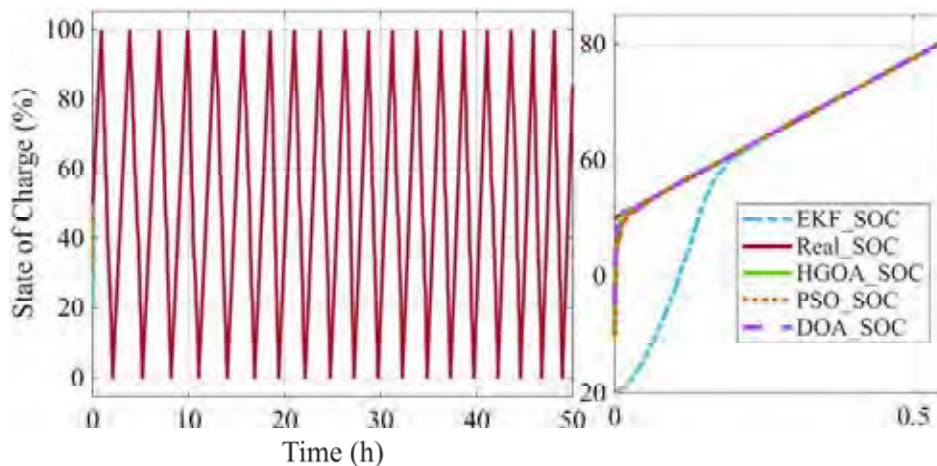
Bảng 1. So sánh các mô hình EKF thích nghi trong kịch bản 1

Phương pháp	RMSE	MAE
EKF thông thường	0.0089477	0.0020896
PSO-EKF	0.0024791	0.0019119
DOA-EKF	0.0018282	0.0014132
HGOA-EKF (đề xuất)	0.0016688	0.0013011

3.2 Kết quả mô hình hóa và mô phỏng kịch bản 2: SOC khởi tạo lớn theo chiều âm

Trong kịch bản thứ hai, SOC thực được đặt ở 0.5 (50%), trong khi SOC khởi tạo của các bộ lọc là 0.2 (20%), tương ứng sai lệch ban đầu -30%, nhằm đánh giá khả năng hội tụ khi SOC khởi tạo thấp hơn giá trị thực. Do quan hệ OCV-SOC phi tuyến, độ nhạy điện áp

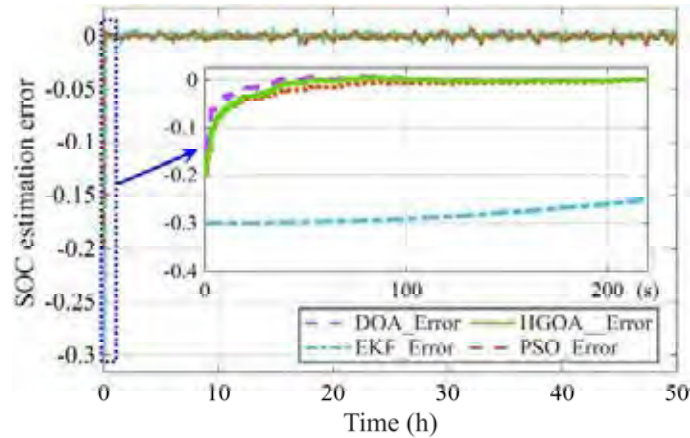
thay đổi theo vùng SOC, có thể ảnh hưởng đến động học hội tụ của bộ lọc. Các điều kiện mô phỏng và tham số của EKF, PSO, HGOA và DOA được giữ nguyên như kịch bản thứ nhất, bảo đảm sự khác biệt về kết quả phản ánh trực tiếp khả năng thích nghi và tính bền vững của từng phương pháp.



Hình 6. Ước lượng trạng thái sạc trong kịch bản thứ hai

Hình 6 cho thấy các bộ lọc đều hội tụ từ dưới lên về quỹ đạo SOC chuẩn, với thứ hạng tương tự kịch bản thứ nhất. HGOA-EKF đạt hội tụ nhanh và bám sát giá trị chuẩn sớm nhất, tiếp theo là DOA-EKF và PSO-EKF, trong khi EKF thông thường có thời gian hội tụ dài nhất và xuất hiện vọt lố trước khi ổn định. Sai số SOC tương ứng cho thấy HGOA-

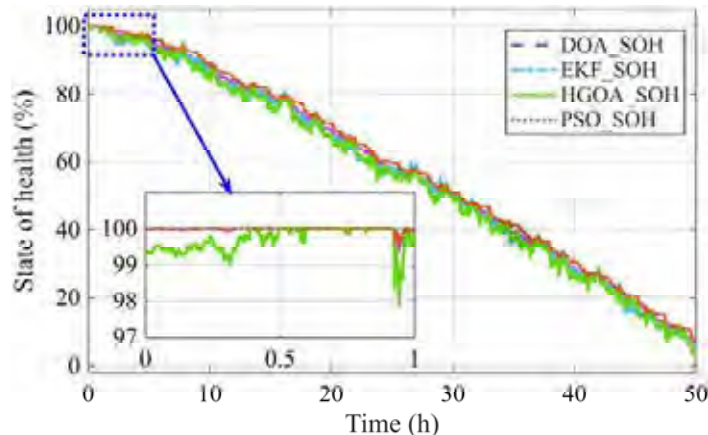
EKF duy trì dải sai số xác lập hẹp nhất và phân bố gần đối xứng quanh không, cho thấy cấu hình hiệp phương sai tối ưu có khả năng duy trì hiệu năng ổn định trước sự thay đổi hướng của sai lệch khởi tạo. Kết quả này cho thấy nghiệm tối ưu của HGOA có tính khái quát tốt, không phụ thuộc đáng kể vào một điều kiện khởi tạo cụ thể.



Hình 7. Sai số ước lượng trạng thái sạc trong kịch bản thứ hai

Hình 7 và Bảng 2 tổng hợp RMSE và MAE của sai số SOC đối với bốn phương pháp. HGOA-EKF tiếp tục đạt hiệu năng tốt nhất, tiếp theo là DOA-EKF, PSO-EKF và EKF thông thường; đồng thời, so với EKF, HGOA-EKF giảm RMSE 84.5% và MAE 45.0%. Việc duy trì nhất quán thứ tự và mức cải thiện trong hai kịch bản có sai lệch khởi

tạo trái dấu cho thấy hiệu quả của HGOA-EKF không phụ thuộc vào hướng sai lệch ban đầu mà gần với cấu hình hiệp phương sai được tối ưu. Kết quả khẳng định tính ổn định của phương pháp khi điều kiện khởi tạo SOC thay đổi, phù hợp với yêu cầu ước lượng SOC trong BMS.



Hình 8. Ước lượng trạng thái sức khỏe của pin

Ngoài ra, Hình 8 và Hình 9 trình bày hai chỉ tiêu quan trọng để đánh giá trạng thái pin Lithium-ion. Đối với quá trình ước lượng SOH, tính ổn định của các bộ lọc được thể hiện rõ trong giờ đầu tiên. Tại thời điểm $t =$

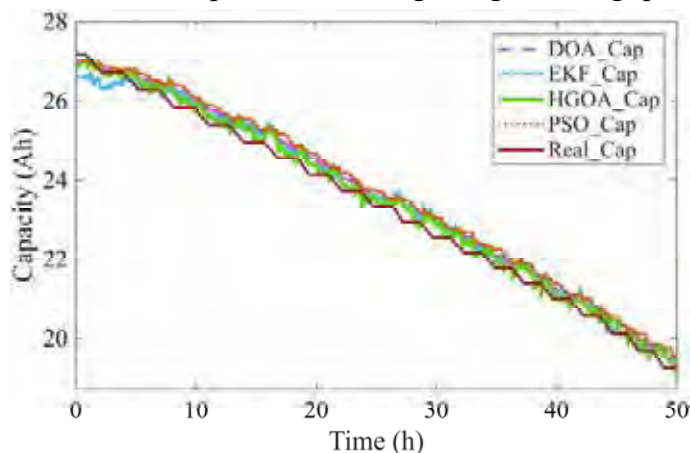
0.9h, HGOA xuất hiện đáp ứng quá mức khi tín hiệu cập nhật bị gián đoạn, khiến SOH được ước lượng giảm đột ngột xuống 97.8% trước khi cơ chế phản hồi đưa hệ thống trở lại trạng thái ổn định.

Bảng 2. So sánh các mô hình EKF thích nghi trong kịch bản 2

Phương pháp	RMSE	MAE
EKF thông thường	0.012534	0.0023849
PSO-EKF	0.0027002	0.0019282
DOA-EKF	0.0019386	0.0014185
HGOA-EKF (đề xuất)	0.0019373	0.0013122

Trong suốt chu kỳ hoạt động kéo dài 50 h, DOA duy trì quỹ đạo biến thiên mượt mà nhất khi SOH giảm dần theo đường thẳng về ngưỡng 10%, qua đó khẳng định độ tin cậy và khả năng thích ứng vượt trội của thuật toán trong quá trình vận hành liên tục khi pin chịu

tác động của sự suy giảm các đặc tính điện hóa. Hình 9 biểu diễn sự thay đổi của dung lượng khả dụng theo quá trình lão hóa của pin. Hai thông số này là cơ sở quan trọng để xây dựng và đánh giá các thuật toán ước lượng trong hệ thống quản lý pin.



Hình 9. Ước lượng dung lượng khả dụng của hệ thống pin

IV. KẾT LUẬN

Kết quả mô phỏng trên mô hình mạch tương đương trong MATLAB/Simulink với hai kịch bản sai lệch SOC khởi tạo trái dấu $\pm 30\%$ cho thấy các phương pháp EKF được tối ưu bằng metaheuristic đều cải thiện hiệu năng so với EKF sử dụng tham số được chỉnh định thủ công. Trong đó, HGOA-EKF đạt kết quả tốt nhất ở cả hai kịch bản, với mức giảm RMSE/MAE lần lượt là 81.3%/37.7% và 84.5%/45.0% so với EKF thông thường.

Đáng chú ý, HGOA-EKF duy trì thứ hạng cao nhất trong cả hai hướng sai lệch khởi tạo, đồng thời cải thiện nhất quán các chỉ tiêu sai số. Kết quả này cho thấy cấu hình hiệp phương sai được tối ưu có khả năng duy trì hiệu năng khi điều kiện khởi tạo SOC thay

đổi, thay vì chỉ phù hợp với một trường hợp cụ thể.

Nhìn chung, HGOA-EKF cung cấp một phương pháp chỉnh định tự động, có khả năng nâng cao độ chính xác và tính ổn định của EKF trong việc ước lượng SOC. Kết quả đạt được cho thấy tiềm năng tích hợp phương pháp này vào BMS cho xe điện; tuy nhiên, cần tiếp tục kiểm chứng trên dữ liệu thực nghiệm và trong các điều kiện nhiệt độ, dòng tải và trạng thái lão hóa khác nhau trước khi triển khai trên thực tế.

LỜI CẢM ƠN

Bài báo này được hỗ trợ kinh phí nghiên cứu theo mã đề tài sinh viên năm 2026 có mã số: K.KTCN2026-SV-01 thuộc Đại học Huế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. L. K. Xing, L. Y. Ling, and X. Y. Wu, "Lithium-ion battery state-of-charge estimation based on a dual extended Kalman filter and BPNN correction", *Connection Science*, vol. 34, no. 1, pp. 2332–2363, 2022. DOI: 10.1080/09540091.2022.2118675.
2. W. Y. Low, M. J. A. Aziz, N. R. N. Idris, and N. A. Rai, "Robust battery state-of-

charge estimation with improved convergence rate based on applying Busse's adaptive rule to extended Kalman filters", *J. Power Electron.*, vol. 23, no. 10, pp. 1529–1541, 2023. DOI: 10.1007/s43236-023-00652-w.

3. J. J. Yun, Y. Choi, J. H. Y. Lee, S. Choi, and C. Shin, "State-of-charge estimation method for lithium-ion batteries

using extended Kalman filter with adaptive battery parameters", *IEEE Access*, vol. 11, pp. 90901–90915, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3305950.

4. C. Y. Zhu, S. L. Wang, C. M. Yu, H. Zhou, and C. Fernandez, "An improved proportional control forgetting factor recursive least square-Monte Carlo adaptive extended Kalman filtering algorithm for high-precision state-of-charge estimation of lithium-ion batteries", *J. Solid State Electrochem.*, vol. 27, no. 9, pp. 2277–2287, 2023. DOI: 10.1007/s10008-023-05514-w.

5. T. Zhu, S. L. Wang, Y. C. Fan, H. Zhou, Y. F. Zhou, and C. Fernandez, "Improved forgetting factor recursive least square and adaptive square root unscented Kalman filtering methods for online model parameter identification and joint estimation of state of charge and state of energy of lithium-ion batteries", *Ionics*, vol. 29, no. 12, pp. 5295–5314, 2023. DOI: 10.1007/s11581-023-05205-6.

6. Y. Y. Liu, S. L. Wang, Y. X. Xie, C. Fernandez, J. S. Qiu, and Y. X. Zhang, "A novel adaptive H-infinity filtering method for the accurate SOC estimation of lithium-ion batteries based on optimal forgetting factor selection", *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 50, no. 10, pp. 3372–3386, 2022. DOI: 10.1002/cta.3339.

7. R. H. Guo, Y. M. Xu, C. G. Hu, and W. X. Shen, "A curve relocation approach for robust battery open circuit voltage reconstruction and capacity estimation based on partial charging data", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 39, no. 3, pp. 3760–3773, 2024. DOI: 10.1109/TPEL.2023.3347236.

8. P. L. Qin and L. H. Zhao, "A novel transfer learning-based cell SOC online estimation method for a battery pack in complex application conditions", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 2, pp. 1606–1615, 2024.

9. W. Wu, S. Wang, D. Liu, Y. Fan, D. Mo, and C. Fernandez, "An optimized

quantum particle swarm optimization–extended Kalman filter algorithm for the online state of charge estimation of high-capacity lithium-ion batteries under varying temperature conditions", *Ionics*, vol. 30, no. 10, pp. 6163–6177, 2024.

10. Y. F. Zhou, S. L. Wang, Y. X. Xie, T. Zhu, and C. Fernandez, "An improved particle swarm optimization-least squares support vector machine-unscented Kalman filtering algorithm on SOC estimation of lithium-ion battery", *Int. J. Green Energy*, vol. 21, no. 2, pp. 376–386, 2024. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.104753.

11. M. Ramachandran, S. Mirjalili, M. Nazari-Heris, D. S. Parvathysankar, A. Sundaram, and C. Gnanakkan, "A hybrid grasshopper optimization algorithm and Harris hawks optimizer for combined heat and power economic dispatch problem", *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 111, p. 104753, 2022.

12. F. Wu, S. L. Wang, W. Cao, T. Long, Y. W. Liang, and C. Fernandez, "An improved long short-term memory based on global optimization square root extended Kalman smoothing algorithm for collaborative state of charge and state of energy estimation of Lithium-ion batteries", *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 51, no. 8, pp. 3880–3896, 2023. DOI: 10.1002/cta.3624.

13. L. Deng and S. Liu, "A novel hybrid grasshopper optimization algorithm for numerical and engineering optimization problems", *Neural Process. Lett.*, vol. 55, pp. 9851–9886, 2023. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.

14. J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization", in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks (ICNN'95)*, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942–1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.

15. B. O. Mohammed, H. S. Aghdasi, and P. Salehpour, "Dhole optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems", *Cluster Comput.*, vol. 28, no. 7, Art. no. 430, 2025. DOI: 10.1007/s10586-024-05005-1

- Ngày gửi bài: 12/08/2026

- Ngày phản biện: 26/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 26/09/2026

THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG HỆ THỐNG SẠC KHÔNG DÂY CỘNG HƯỞNG TỪ TỐI ƯU CHO XE ĐIỆN HIỆU SUẤT CAO

Lê Đình Hiếu^{1*}, Trần Quang Hùng¹, Phan Đình Chữ¹, Lê Thị Kim Liên²

TÓM TẮT

Công nghệ sạc không dây là giải pháp tiềm năng cho xe điện nhờ tính an toàn, linh hoạt và thuận tiện. Bài báo nghiên cứu tiêu chuẩn, đặc tính truyền năng lượng, khả năng tương tác cuộn dây và cấu trúc hệ thống truyền năng lượng không dây bằng cảm ứng từ (WPT), đồng thời thiết kế và mô phỏng hệ thống trên MATLAB/Simulink. Kết quả cho thấy điện áp DC-Link có độ gợn dưới 2%, dòng điện dao động dưới 5%, công suất truyền khoảng 7 kW và hiệu suất đạt khoảng 95% tại điều kiện cộng hưởng, khẳng định tính khả thi của WPT cho hệ thống sạc không dây xe điện hiệu suất cao và an toàn.

Từ khóa: Xe điện (EV), Truyền điện không dây (WPT), Truyền điện cảm ứng từ (IPT).

DESIGN AND SIMULATION OF THE OPTIMAL MAGNETIC RESONANCE WIRELESS CHARGING SYSTEM FOR HIGH-PERFORMANCE ELECTRIC VEHICLES

ABSTRACT

Wireless charging technology is becoming a potential solution for electric vehicles due to its safety, flexibility and convenience. This paper presents studies on wireless charging standards, energy transfer characteristics, interoperability between coils, and wireless power transfer (WPT) system structures. On this basis, a wireless charging system for electric cars is designed and simulated in the MATLAB/Simulink environment to evaluate power transfer characteristics and operating efficiency. The simulation results show that the DC-Link voltage is maintained stable with a ripple of less than 2%, a stable current with an oscillation of less than 5%, and a power transmission system of about 7 kW with an energy transfer efficiency of approximately 95% under resonant conditions. The results achieved confirm the feasibility of the magnetic induction energy transfer method, and at the same time create a basis for the development of high-performance, safe wireless charging systems that meet the application requirements of electric cars in the future.

Keywords: Electric Vehicles (EVs), Wireless Power Transmission (WPT), Inductive Power Transmission (IPT).

I. MỞ ĐẦU

Nhằm giảm phát thải khí nhà kính từ nhiên liệu hóa thạch thúc đẩy làm tăng động lực phát triển xe điện và giao thông xanh bền vững [1]. Trong đó, truyền năng lượng không dây (WPT) là giải pháp sạc tiềm năng nhờ tính an toàn, linh hoạt và thuận tiện hơn sạc tiếp xúc [2], [3]. Hệ thống sạc không dây gồm bộ chỉnh lưu, nghịch lưu, mạch bù cộng hưởng, bộ ghép từ và bộ chỉnh lưu phía thu. Sự khác biệt về cấu trúc, điều khiển và thông số thiết kế giữa các nhà sản xuất ảnh hưởng

đến hiệu suất và khả năng tương thích của hệ thống [4]. Vì vậy, khả năng tương tác giữa bộ phát và bộ thu là yêu cầu quan trọng để đảm bảo hiệu quả vận hành và thúc đẩy thương mại hóa [5].

Hiện nay, thách thức chủ yếu nằm ở cấu trúc bộ ghép từ và mạch bù cộng hưởng, trong khi truyền thông đã từng bước được chuẩn hóa [6]. Các phương pháp đánh giá tương tác góp phần kiểm tra tính tương thích, tối ưu thiết kế và hoàn thiện tiêu chuẩn sạc không dây [7].

¹ Khoa Kỹ thuật và Công nghệ - Đại học Huế

² Trường Cao Đẳng Nghề số 4 - Quận Khu 4 - Bộ Quốc Phòng

*Email: ledinhhieus@hueuni.edu.vn

khai thác và trải nghiệm người dùng. Vì vậy, các tổ chức quốc tế như SAE, IEC, UL và IEEE đã xây dựng các tiêu chuẩn nhằm thúc

đẩy khả năng tương tác và thương mại hóa công nghệ này.

Bảng 1. Yêu cầu thiết kế hệ thống

Tham số	Ký hiệu	Giá trị
Công suất mục tiêu	P_{rated}	$\approx 7 \text{ kW}$
Điện áp DC-Link	V_{DC}	$\approx 395 \text{ V}$
Tần số cộng hưởng	P_0	85 kHz
Công suất phía thứ cấp	P_2	$\approx 6.65 \text{ kW}$
Hiệu suất IPT mục tiêu	η_{IPT}	$\approx 95\%$
Độ gợn điện áp DC-Link	r_V	$< 2\%$
Dao động dòng DC-Link	r_I	$< 5\%$

Trong số đó, SAE J2954 được xem là tiêu chuẩn quan trọng nhất đối với hệ thống truyền tải năng lượng không dây cho xe điện hạng nhẹ. Tiêu chuẩn này quy định bốn cấp công suất truyền năng lượng gồm WPT1 (3,7 kW), WPT2 (7,7 kW), WPT3 (11 kW) và WPT4 (22 kW), đồng thời yêu cầu hiệu suất

truyền năng lượng tối thiểu đạt 85% trong điều kiện căn chỉnh tiêu chuẩn. Bên cạnh đó, SAE J2954 còn quy định các yêu cầu về vị trí lắp đặt, khoảng hở giữa xe và mặt đất cũng như phương pháp căn chỉnh vị trí dựa trên kỹ thuật định vị từ tính nhằm hỗ trợ cả xe tự lái và xe điều khiển bởi con người [8].

Bảng 2. Một số tiêu chuẩn và yêu cầu liên quan đến hệ thống WPT cho xe điện

Nhà phát triển tiêu chuẩn	Tên tiêu chuẩn	Năm xuất bản	Sự miêu tả
SAE	J2836/6_201305	2013	Ứng dụng cho giao tiếp sạc không dây PEV
SAE	J2953/1_201310	2013	Thiết bị tương thích PEV với xe điện (EVSE)
SAE	J2953/2_201401	2014	Quy trình kiểm tra khả năng tương thích của PEV với EVSE
SAE	J2953/3	2016	Các kịch bản kiểm tra khả năng tương tác của EVSE và PEV
SAE	J2953/4	2020	Báo cáo mức phí PEV
SAE	J2847/6	2020	Trạm sạc EV không dây và PEV hạng nhẹ có thể giao tiếp cho WPT
SAE	J2954	2020	WPT cho xe hạng nhẹ plug-in, cũng như kỹ thuật căn chỉnh

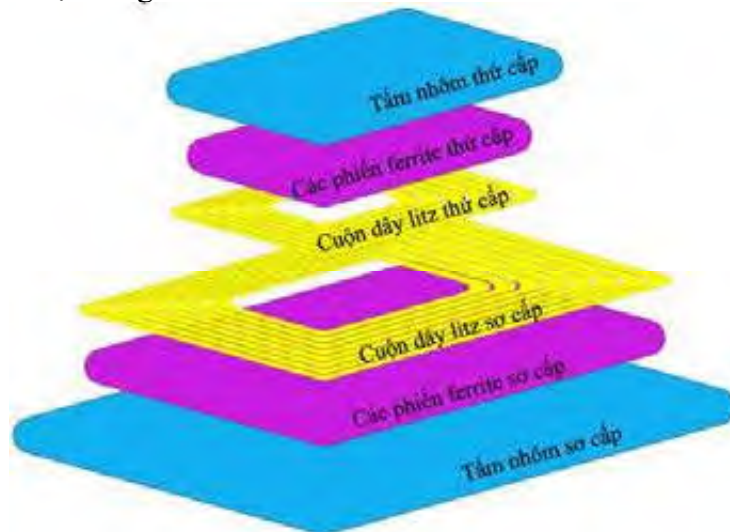
Các yêu cầu kỹ thuật nêu trên được sử dụng làm cơ sở xác lập chế độ mô phỏng của nghiên cứu. Trong đó, công suất danh định khoảng 7 kW được lựa chọn tương ứng với vùng công suất WPT2 được đề cập trong phạm vi nghiên cứu, trong khi tần số vận hành 85 kHz được sử dụng làm tần số cộng hưởng danh định. Do nghiên cứu hiện tại tập

trung vào mô phỏng kiến trúc và đặc tính truyền năng lượng, các yêu cầu về tương thích điện từ, trường điện từ rò và bảo vệ vật thể lạ được xem là các điều kiện thiết kế cần được kiểm chứng ở giai đoạn thực nghiệm tiếp theo.

2.2. Phân tích bộ ghép từ và khả năng tương thích

Bộ ghép từ là thành phần cốt lõi quyết định hiệu suất và khả năng tương tác của hệ thống sạc không dây. Cấu trúc của bộ ghép từ thường bao gồm cuộn dây, lõi từ và tấm chắn từ, như minh họa trong Hình 3. Trong đó, hình dạng cuộn dây đóng vai trò quan trọng đối với đặc tính truyền năng lượng và mức độ tương thích giữa các hệ thống. Các cấu trúc

cuộn dây cơ bản hiện nay gồm cuộn dây tròn, hình chữ nhật và Double-D (DD). Khả năng tương tác giữa các loại cuộn dây thường được đánh giá dựa trên hai tiêu chí chính: phân bố từ thông trong không gian và các thông số điện từ đặc trưng như hệ số ghép từ hoặc hồ cảm.



Hình 3. Cấu trúc bộ ghép từ [9]

Các nghiên cứu cho thấy cuộn dây hình chữ nhật có hệ số ghép từ và hiệu suất truyền năng lượng cao hơn cuộn dây tròn khi có cùng kích thước ngoài. Đặc biệt, cấu hình cuộn phát hình vuông–cuộn thu hình tròn có thể đạt hồ cảm và hiệu suất truyền công suất cao hơn cấu hình tròn–tròn truyền thống, cho thấy khả năng tương tác tốt giữa các hình dạng cuộn dây khác nhau trong hệ thống sạc không dây cho xe điện.

Từ các tham số trong Bảng 3, hệ số ghép từ của bộ ghép được xác định khoảng $k =$

0.3269. Giá trị này phản ánh mức độ liên kết từ hữu hạn giữa hai cuộn dây và là cơ sở để đánh giá công suất truyền sang phía thứ cấp. Đồng thời, với tần số làm việc 85 kHz và điện trở cuộn dây tương đương 1 mΩ, các hệ số phẩm chất tính toán đạt khoảng $Q_1 = 142.2$ và $Q_2 = 137.2$. Các giá trị này cho thấy bộ ghép có mức tổn hao điện trở tương đối thấp trong mô hình lý tưởng hóa hiện tại, trong khi hiệu suất truyền thực tế còn phụ thuộc vào hồ cảm, điều kiện cộng hưởng và các tổn hao của các tầng biến đổi công suất.

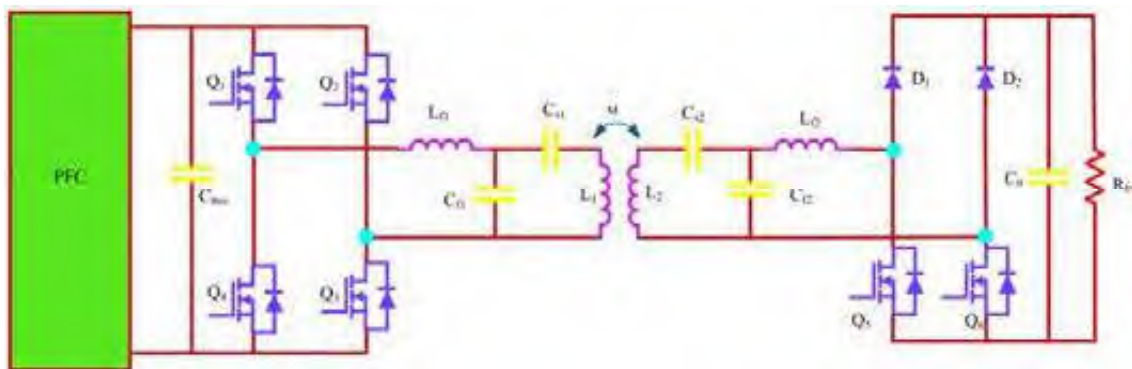
Bảng 3. Thông số bộ ghép từ trong mô hình

Tham số	Ký hiệu	Giá trị
Điện trở cuộn sơ cấp	R_1	1 mΩ
Điện cảm cuộn sơ cấp	L_1	266.16 μH
Điện trở cuộn thứ cấp	R_2	1 mΩ
Điện cảm cuộn thứ cấp	L_2	256.79 μH
Hồ cảm	M	85.46 μH
Hệ số ghép	k	0.3269

Trong phạm vi nghiên cứu này, khả năng tương thích của bộ ghép từ được xem xét thông qua khả năng duy trì liên kết từ và truyền công suất giữa hai cuộn dây. Do mô hình hiện tại chưa bao gồm mô phỏng trường điện từ theo hình học chi tiết, các đặc tính của bộ ghép được quy đổi về các tham số mạch tương đương L_1 , L_2 , M và k . Cách tiếp cận này cho phép đánh giá định lượng ảnh hưởng của mức độ ghép từ đến quá trình truyền năng lượng trong mô hình hệ thống.

2.3. Phân tích và lựa chọn cấu hình bù cộng hưởng

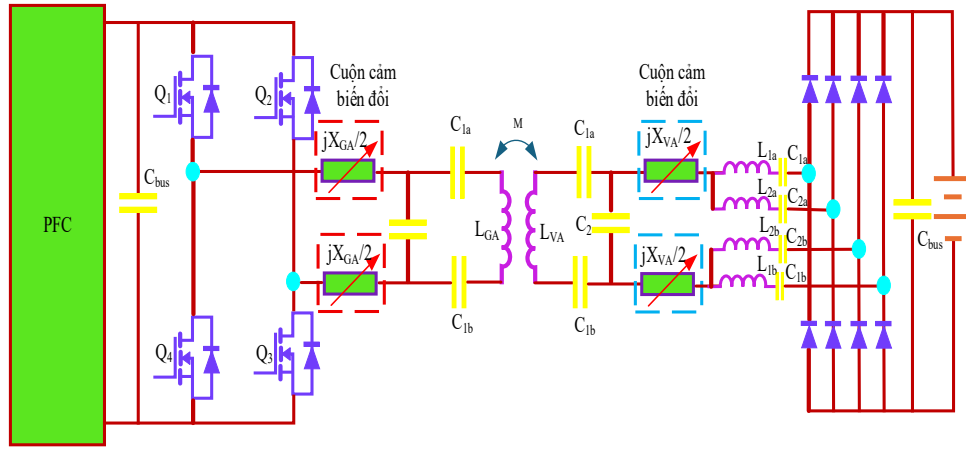
Mạng bù là thành phần quan trọng trong hệ thống truyền năng lượng không dây cảm ứng (WPT), có nhiệm vụ phối hợp trở kháng và bù công suất phản kháng. Ngay cả khi cuộn dây phát và cuộn dây thu có hệ số ghép từ tốt, một mạng bù được thiết kế không hợp lý vẫn có thể gây mất phối hợp trở kháng, làm giảm công suất tác dụng truyền đến tải [10]. Vì vậy, cấu trúc mạng bù là yếu tố quyết định đến khả năng tương thích và hiệu suất truyền năng lượng của hệ thống.



Hình 4. Cấu trúc liên kết DSLCC của hệ thống sạc không dây EV

Hiện nay, các cấu trúc bù phổ biến trong hệ thống sạc không dây cho xe điện bao gồm Series (S), Parallel (P) và LCC. Các nghiên cứu cho thấy cấu trúc S-S có tính ổn định tần số cao hơn, trong khi các tổ hợp S/P còn lại dễ bị lệch cộng hưởng khi tải thay đổi, dẫn đến khả năng tương thích thấp hơn [11]. Để khắc phục hạn chế này, cấu trúc LCC hai phía (DSLCC) đã được đề xuất với khả năng chống sai lệch tham số tốt hơn, ổn định hiệu suất cao hơn và giảm ứng suất trên linh kiện so với cấu trúc S-S truyền thống [12,13]. Ngoài ra,

các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng các cấu hình sử dụng LCC có thể đạt công suất đầu ra tương đương với các cấu trúc S và P trong những điều kiện vận hành nhất định [14], đồng thời phân tích trở kháng phản xạ chứng minh sự tương đương về chức năng giữa bù S và LCC khi tải làm việc gần điều kiện tối ưu [15]. Do đó, DSLCC được xem là một trong những cấu trúc bù triển vọng nhất và đã được đưa vào tiêu chuẩn quốc gia của Trung Quốc đối với hệ thống sạc không dây cho xe điện.



Hình 5. Cấu trúc liên kết TMN cho WPT3 / Z2

Tiêu chuẩn SAE J2954 khuyến nghị sử dụng mạng phối hợp trở kháng điều chỉnh được (TMN) nhằm duy trì cộng hưởng và điều chỉnh công suất trong các điều kiện vận hành khác nhau [16]. So với bù LCC truyền thống, TMN có tính linh hoạt và khả năng thích nghi cao hơn. Tuy nhiên, nghiên cứu này lựa chọn cấu hình S-S ở cả phía sơ cấp và thứ cấp do cấu trúc đơn giản, dễ xác lập cộng hưởng và phù hợp với mục tiêu đánh giá đặc tính truyền năng lượng của bộ ghép từ; DSLCC và TMN chỉ được sử dụng để tham khảo và so sánh về nguyên lý.

Hiệu suất truyền năng lượng của hệ thống phụ thuộc đáng kể vào đặc tính điện từ của bộ ghép từ, trong đó hai thông số quan trọng nhất là hệ số ghép từ k và hệ số phẩm chất Q . Hệ số ghép từ mô hình phản ánh mức độ liên kết từ thông giữa cuộn dây phát và cuộn dây thu, trong khi hệ số phẩm chất đặc trưng cho khả năng tích trữ năng lượng và mức độ tổn hao

của cuộn dây. Giá trị k và Q càng lớn thì hiệu suất truyền công suất càng cao, đồng thời giúp nâng cao khả năng làm việc của hệ thống trong điều kiện khe hở không khí lớn hoặc có độ lệch vị trí giữa các cuộn dây. Đối với hệ thống gồm cuộn dây sơ cấp và thứ cấp có điện cảm lần lượt là L_1 và L_2 , các tham số hệ số ghép từ k và hệ số phẩm chất Q_1, Q_2 được xác định theo các biểu thức sau:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_0^2 L_1}; \quad C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2} \quad (2)$$

Trong đó, L_1 và L_2 lần lượt là điện cảm tự cảm của cuộn dây sơ cấp và thứ cấp, M là điện cảm hỗ cảm giữa hai cuộn dây, R_1 và R_2 là điện trở tương đương của cuộn dây phát và cuộn dây thu, còn $\omega_0 = 2\pi f_0$ là tần số góc tương ứng với tần số làm việc f_0 của hệ thống, C_1 và C_2 là tụ cộng hưởng.

Bảng 4. Các biến thiết kế và ràng buộc

Biến	Ký hiệu	Giá trị
Tần số cộng hưởng	f	85 kHz
Tụ bù sơ cấp	C_1	$\approx 13.17 \text{ nF}$
Tụ bù thứ cấp	C_2	$\approx 13.65 \text{ nF}$
Khoảng cách truyền	d	d_0
Độ lệch ngang	Δx	0
Hệ số ghép	k	0.3269

Đối với bộ ghép từ, hệ số ghép từ kk và hệ số phẩm chất QQ tăng khi tối ưu kích thước cuộn dây, tiết diện dây dẫn và vật liệu từ và việc tăng kích thước, vật liệu từ làm tăng khối lượng kèm chi phí. Trong nghiên cứu này, cấu hình bù Series-Series (S-S) được sử dụng với tụ bù mắc nối tiếp ở cả phía sơ cấp và thứ cấp để đạt cộng hưởng tại tần số $f_0 = 85\text{kHz}$, qua đó tối ưu công suất truyền và hiệu suất của bộ ghép từ.

2.4. Nguyên lý truyền năng lượng cảm ứng từ

Trong hệ thống truyền tải năng lượng không dây, năng lượng điện có thể được truyền từ nguồn đến tải thông qua hai cơ chế chính là truyền trường xa và truyền trường gần, như minh họa trong Hình 6. Đối với truyền trường xa, năng lượng được truyền bằng sóng vi ba hoặc chùm tia laser, cho phép truyền công suất trên khoảng cách lớn.



Hình 6. Truyền năng lượng không dây bằng cảm ứng từ giữa hai cuộn dây

Tuy nhiên, các phương pháp này yêu cầu đường truyền trực tiếp giữa bộ phát và bộ thu, đồng thời tiềm ẩn các vấn đề về an toàn sinh học nên hiện vẫn chưa được ứng dụng thương mại rộng rãi trong lĩnh vực sạc xe điện.

Ngược lại, truyền trường gần dựa trên nguyên lý ghép điện dung (Capacitive Power Transfer – CPT) hoặc ghép cảm ứng từ (Inductive Power Transfer – IPT), trong đó

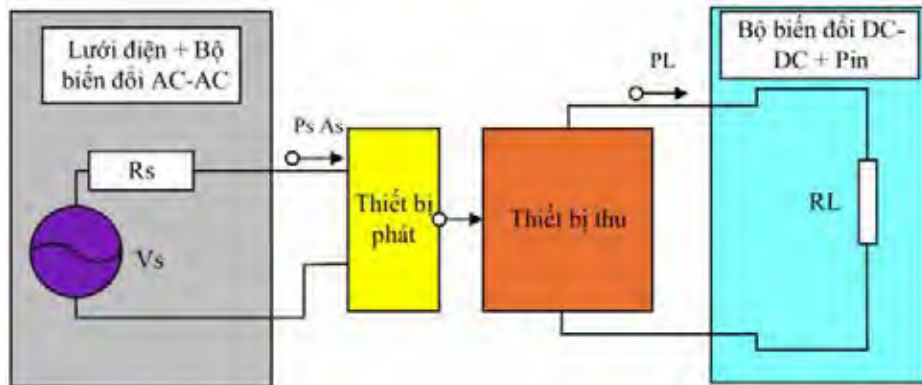
IPT được xem là công nghệ phù hợp nhất cho các ứng dụng sạc không dây công suất lớn. Bảng 5 trình bày sự so sánh giữa hai công nghệ CPT và IPT. Mặc dù CPT có ưu điểm về cấu trúc đơn giản, công suất truyền và khoảng cách làm việc thường thấp hơn so với IPT. Vì vậy, phần lớn các hệ thống sạc không dây thương mại hiện nay đều dựa trên công nghệ IPT.

Bảng 5. So sánh giữa CPT và IPT trong ứng dụng sạc không dây cho xe điện

Tiêu chí	CPT	IPT
Nguyên lý truyền năng lượng	Điện trường	Từ trường
Phần tử ghép nối	Bản cực tụ điện	Cuộn dây cảm ứng từ
Công suất truyền	Thấp đến trung bình	Trung bình đến cao
Khoảng cách truyền	Nhỏ	Lớn hơn
Hiệu suất truyền	Trung bình	Cao
Ứng dụng cho xe điện	Hạn chế	Phổ biến

Nguyên lý IPT dựa trên cảm ứng điện từ giữa cuộn phát và cuộn thu. Dòng điện xoay chiều qua cuộn phát tạo từ trường biến thiên, cảm ứng điện áp trên cuộn thu thông qua hồ cảm; các mạch cộng hưởng giúp nâng cao hiệu suất truyền năng lượng. Hiệu suất phụ

thuộc chủ yếu vào tần số, điện trở, số vòng dây, kích thước cuộn dây và hệ số ghép từ. Khi khoảng cách giữa hai cuộn tăng, hệ số ghép từ và hồ cảm giảm, làm giảm hiệu suất; do đó cần tối ưu cấu trúc bộ ghép từ, khoảng cách truyền và thông số cộng hưởng.



Hình 7. Sơ đồ tổng quát hệ thống sạc không dây cho xe điện

Trong nghiên cứu này, cơ chế IPT được lựa chọn do phù hợp với truyền năng lượng công suất kW ở khoảng cách ngắn giữa hai cuộn dây. Phân phân tích tiếp theo tập trung vào bộ ghép từ cộng hưởng và các tham số điện tương đương, thay vì mở rộng sang các phương thức WPT khác.

2.5. Mô hình toán học và tham số bộ ghép từ

Hệ thống cuộn dây là thành phần cốt lõi của sạc không dây, đảm nhiệm truyền năng lượng qua trường từ biến thiên giữa cuộn sơ cấp và thứ cấp. Trong sạc tĩnh, cuộn sơ cấp đặt tại trạm sạc hoặc dưới mặt đường, cuộn thứ cấp tích hợp dưới gầm xe, với khe hở không khí thường 100–300 mm [17]. Đối với sạc động, các cuộn sơ cấp được bố trí dọc theo làn đường, cho phép xe nhận năng lượng liên tục khi di chuyển.

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{R_1}; \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_2} \quad (3)$$

Phương trình cuộn dây ghép từ được xác định:

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad (4)$$

$$v_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \quad (5)$$

Trong miền tần số được biểu diễn:

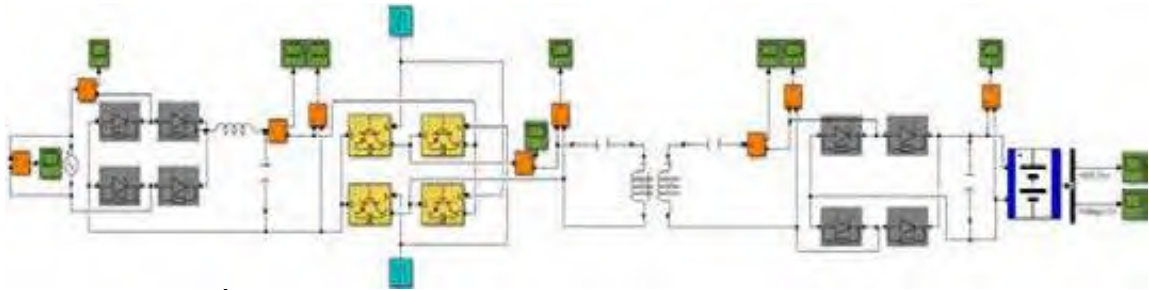
$$V_1 = (R_1 + j\omega L_1)I_1 + j\omega M I_2 \quad (6)$$

$$V_2 = j\omega M I_1 + (R_2 + j\omega L_2)I_2 \quad (7)$$

Hệ số phẩm chất tăng theo tần số hoạt động, do đó tần số cao giúp nâng cao hiệu suất truyền năng lượng [18]. Theo SAE J2954, hệ thống sạc không dây xe điện hạng nhẹ sử dụng tần số danh định 85 kHz, trong dải 81,38–90 kHz [19]. Bên cạnh đó, hệ số ghép từ quyết định đáng kể đến khả năng truyền công suất [20], vì vậy tối ưu cấu trúc bộ ghép từ là hướng nghiên cứu quan trọng để nâng cao hiệu suất sạc không dây.

2.6. Thiết lập mô hình MATLAB/Simulink và điều kiện mô phỏng

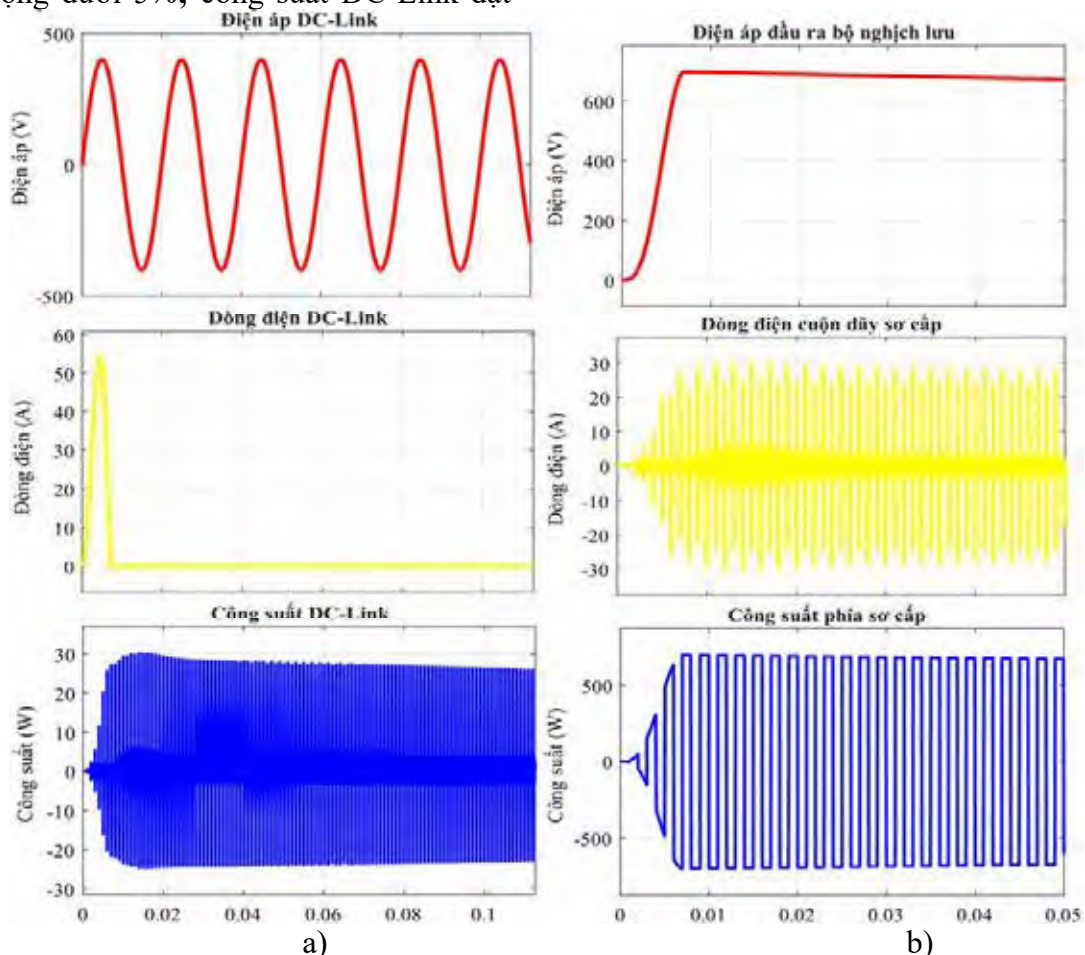
Nghiên cứu được thực hiện ở mức mô phỏng số trên MATLAB/Simulink. Do đó, các kết quả trình bày trong phần này được gọi là kết quả mô phỏng và không được xem là kết quả thực nghiệm. Mô hình bao gồm chuỗi biến đổi từ nguồn AC, chỉnh lưu, DC-Link, nghịch lưu cao tần, bộ ghép từ cộng hưởng, chỉnh lưu phía thứ cấp đến mô hình pin Lithium-Ion. Các tín hiệu điện áp, dòng điện, công suất và SOC được ghi nhận tại các vị trí tương ứng để đánh giá đặc tính của từng khâu và hiệu quả truyền năng lượng của bộ ghép từ.



Hình 8. Cấu trúc mạch sạc không dây được mô phỏng trên Matlab Simulink

Nghiên cứu được thực hiện bằng mô phỏng số trên MATLAB/Simulink, với hệ thống gồm chỉnh lưu AC-DC, DC-Link, nghịch lưu cao tần, bộ ghép từ cộng hưởng, chỉnh lưu phía thứ cấp và pin Lithium-Ion. Kết quả mô phỏng cho thấy điện áp DC-Link đạt khoảng 395 V, ổn định với sai lệch $\pm 1-2\%$; dòng điện DC-Link duy trì khoảng 15 A, dao động dưới 5%; công suất DC-Link đạt

khoảng 7 kW, dao động dưới 2%. Điện áp 395 V được xác định từ mô hình Simulink và không phải điện áp đỉnh lý thuyết của nguồn 220 V AC (311,1 V), mà phản ánh điều kiện vận hành của tầng biến đổi phía trước DC-Link. Các kết quả cho thấy DC-Link duy trì nguồn DC ổn định, bảo đảm quá trình biến đổi và truyền năng lượng liên tục.



Hình 9. Kết quả mô phỏng hệ thống sạc không dây cộng hưởng cảm ứng từ: (a) DC-Link; (b) các đại lượng phía sơ cấp.

Công suất tại các nút được xác định từ tín hiệu công suất tác dụng trong mô hình mô phỏng. Các giá trị điện áp và dòng điện được hiển thị trên Scope có thể tương ứng với các đại lượng tức thời, trung bình hoặc giá trị đặc trưng của dạng sóng. Vì vậy, không sử dụng phép nhân trực tiếp giữa hai giá trị hiển thị này để suy ra công suất tác dụng nếu chưa xác định cùng một miền thời gian và định nghĩa giá trị trung bình.

Hình 9.b) cho thấy ở phía nghịch lưu, điện áp đầu ra dao động xấp xỉ $\pm 400\text{V}$ theo tín hiệu điều chế PWM. Dòng điện phía sơ cấp đạt khoảng 20 A và có dạng gần hình sin khi hệ thống làm việc ở điều kiện cộng hưởng. Công suất phía sơ cấp đạt khoảng 7 kW với dao động nhỏ hơn 3%. Đáp ứng này cho thấy nghịch lưu tạo được nguồn xoay chiều cao tần phù hợp để kích thích mạng cộng hưởng và truyền năng lượng sang bộ ghép từ. Trong phạm vi mô hình hiện tại, kết quả này được dùng để đánh giá sự ổn định của quá trình cung cấp công suất cho bộ ghép từ, không được diễn giải như kết quả của một vòng điều khiển công suất kín.

Hình 10 thể hiện đáp ứng điện áp, dòng điện và công suất ở phía thứ cấp. Điện áp thứ cấp đạt khoảng 320 V, trong khi dòng điện duy trì quanh 18 A. Công suất phía thứ cấp đạt khoảng 6,65 kW. So với công suất phía sơ cấp khoảng 7 kW, kết quả cho thấy phần lớn năng lượng được truyền qua bộ ghép từ đến phía nhận trong điều kiện cộng hưởng danh định.

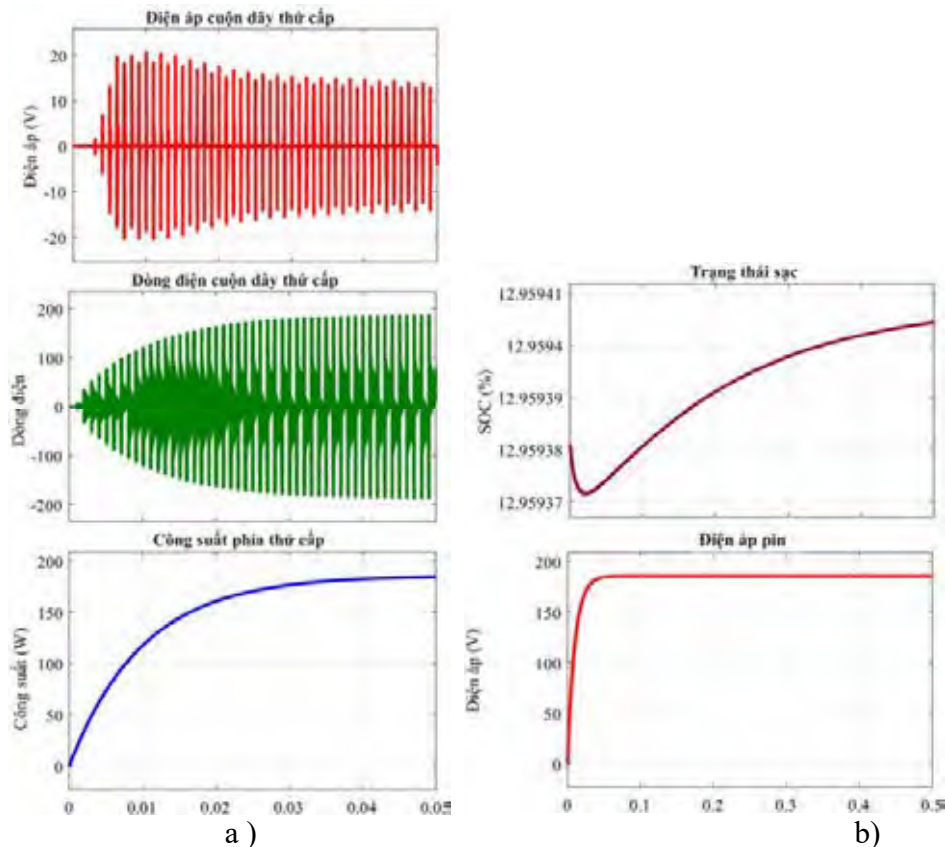
$$\eta_{\text{IPT}} = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% \quad (8)$$

$$P_{\text{loss,IPT}} = P_1 - P_2 \quad (9)$$

Như vậy, trong điều kiện mô phỏng danh định, hiệu suất truyền qua khâu IPT đạt xấp xỉ 95%, tương ứng với tổn hao công suất khoảng 0,35 kW giữa hai vị trí đo công suất sơ cấp và thứ cấp. Cần nhấn mạnh rằng giá trị 95% trong nghiên cứu được định nghĩa là hiệu suất của khâu truyền năng lượng cảm ứng từ, không phải hiệu suất tổng thể từ nguồn điện lưới AC đến đầu vào pin. Các tổn hao của bộ chỉnh lưu sơ cấp, nghịch lưu, chỉnh lưu thứ cấp và các phần tử phụ trợ chưa được tách riêng để xác định hiệu suất toàn hệ thống.

Ở phía tải, mô hình pin Lithium-Ion được sử dụng để đại diện cho đối tượng nhận năng lượng của hệ thống sạc. Theo cấu hình mô hình, pin có điện áp danh định 180 V, dung lượng định mức 100 Ah và SOC ban đầu 10%. Các tham số này được sử dụng để đánh giá đáp ứng điện áp và trạng thái của tải pin khi nhận công suất từ bộ chỉnh lưu phía thứ cấp.

Kết quả mô phỏng cho thấy điện áp phía pin đạt trạng thái ổn định sau khoảng 0,03–0,04 s và độ gợn điện áp nhỏ hơn 1%. SOC chỉ tăng khoảng 0,00003% trong khoảng thời gian khảo sát 0,5 s. Giá trị thay đổi rất nhỏ này không được sử dụng để kết luận về thời gian sạc thực tế của pin, bởi khoảng thời gian mô phỏng ngắn hơn rất nhiều so với thời gian cần thiết để quan sát sự thay đổi đáng kể của SOC. Trong nghiên cứu hiện tại, đáp ứng điện áp, dòng điện và công suất được ưu tiên sử dụng để đánh giá khả năng cung cấp năng lượng của kiến trúc WPT, trong khi phân tích quá trình sạc theo SOC dài hạn được xem là hướng phát triển tiếp theo.



Hình 10. Kết quả mô phỏng của hệ thống sạc không dây bằng phương pháp cộng hưởng cảm ứng từ: (a) Điện áp, dòng điện và công suất phía thứ cấp; (b) Điện áp pin và trạng thái sạc (SOC)

Từ các kết quả mô phỏng, hệ thống đạt điện áp DC-Link khoảng 395 V, công suất phía sơ cấp khoảng 7,00 kW và công suất phía thứ cấp khoảng 6,65 kW. Hiệu suất truyền qua khâu IPT đạt khoảng 95%, trong khi độ gợn điện áp DC-Link nhỏ hơn 2%, dao động dòng điện nhỏ hơn 5% và thời gian xác lập của đáp ứng phía pin khoảng 0,03–0,04 s. Các kết quả này cho thấy kiến trúc được đề xuất có khả năng duy trì quá trình truyền năng lượng tương đối ổn định tại điều kiện cộng hưởng danh định.

Hiệu suất đạt được có liên quan trực tiếp đến đặc tính của bộ ghép từ và điều kiện cộng hưởng. Với $L_1 = 266,16 \mu H$, $L_2 = 256,79 \mu H$ và $M = 85,46 \mu H$, hệ số ghép từ tính toán đạt khoảng 0,3269. Khi hệ số ghép

giảm, hồ cảm M giảm theo quan hệ $M = k\sqrt{L_1 L_2}$, làm suy giảm khả năng truyền năng lượng giữa hai cuộn dây. Vì vậy, hiệu suất 95% thu được trong nghiên cứu nên được hiểu là kết quả tại điều kiện ghép danh định của mô hình, thay vì một giá trị cố định không phụ thuộc vào vị trí tương đối giữa hai cuộn dây.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Nhìn chung, mô hình MATLAB/Simulink cho thấy kiến trúc sạc không dây cộng hưởng cảm ứng từ có khả năng truyền công suất khoảng 7 kW trong điều kiện vận hành danh định. Điện áp DC-Link được duy trì ở khoảng 395 V với độ gợn nhỏ, công suất phía sơ cấp đạt khoảng 7,00 kW và công suất phía thứ cấp đạt khoảng 6,65 kW. Từ hai vị trí đo công suất tương ứng, hiệu suất truyền qua khâu

IPT đạt xấp xỉ 95%, với tổn hao tương đương khoảng 0,35 kW. Các kết quả này chứng minh tính khả thi về mặt điện của kiến trúc được mô phỏng.

Tuy nhiên, hiệu suất nêu trên là hiệu suất của khâu IPT và chưa đại diện cho hiệu suất toàn bộ chuỗi từ lưới AC đến pin. Đồng thời, ảnh hưởng định lượng của khoảng cách, độ lệch cuộn dây, trường điện từ rò và FOD chưa được khảo sát trong mô hình hiện tại. Những giới hạn này xác định rõ phạm vi của kết quả và là cơ sở cho bước nghiên cứu tiếp theo về tối ưu bộ ghép từ, khảo sát độ nhạy hình học và kiểm chứng thực nghiệm.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và đánh giá bằng mô phỏng MATLAB/Simulink kiến trúc hệ thống sạc không dây cho xe điện dựa trên phương pháp truyền năng lượng cảm ứng từ cộng hưởng, bao gồm các khâu chỉnh lưu AC-DC, DC-Link, nghịch lưu cao tần, mạng bù cộng hưởng S-S, bộ ghép từ và chỉnh lưu phía thứ cấp. Với tần số cộng hưởng 85 kHz, điện cảm cuộn sơ cấp 266,16 μH , điện cảm cuộn thứ cấp 256,79 μH , hồ cảm 85,46 μH và hệ số ghép từ $k = 0,3269$, mô hình đạt điện áp DC-Link khoảng 395 V, công suất phía sơ cấp khoảng 7,00 kW và công suất phía thứ cấp khoảng 6,65 kW. Hiệu suất truyền năng lượng qua khâu IPT đạt xấp xỉ 95%, tương ứng tổn hao công suất khoảng 0,35 kW; độ

gợn điện áp DC-Link nhỏ hơn 2%, dao động dòng điện nhỏ hơn 5% và thời gian xác lập điện áp phía pin khoảng 0,03-0,04 s.

Các kết quả trên cho thấy kiến trúc được đề xuất có khả năng duy trì quá trình truyền năng lượng tương đối ổn định tại điều kiện cộng hưởng danh định và đáp ứng yêu cầu công suất mục tiêu của mô hình. Tuy nhiên, kết quả 95% chỉ là hiệu suất của khâu IPT, không phải hiệu suất tổng thể từ nguồn điện lưới AC đến pin; các tổn hao của bộ chỉnh lưu, nghịch lưu và các phần tử phụ trợ chưa được tách riêng. Đồng thời, nghiên cứu mới thực hiện ở mức mô phỏng số, chưa khảo sát định lượng ảnh hưởng của khoảng cách, độ lệch cuộn dây, trường điện từ rò và chức năng phát hiện vật thể lạ (FOD). Do đó, các nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào tối ưu hình học bộ ghép từ, phân tích độ nhạy đối với sai lệch vị trí và khoảng cách truyền, đồng thời thực hiện kiểm chứng thực nghiệm để đánh giá đầy đủ khả năng ứng dụng của hệ thống.

LỜI CẢM ƠN

Các tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đối với sự hỗ trợ tài chính từ Phòng thí nghiệm AU-AI, Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Đại học Huế. Cơ sở vật chất nghiên cứu và nguồn lực kỹ thuật do phòng thí nghiệm cung cấp đã góp phần đáng kể vào việc hoàn thành nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. F. Jelti, A. Allouhi, and K. A. Tabet Aoul, "Transition paths towards a sustainable transportation system: a literature review," *Sustainability*, vol. 15, no. 21, p. 15457, 2023.
2. A. Alabsi *et al.*, "Wireless power transfer technologies, applications, and future trends: A review," *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, vol. 10, no. 1, pp. 1-17, 2024.
3. Z. Liu, T. Li, S. Li, and C. C. Mi, "Advancements and challenges in wireless

power transfer: A comprehensive review," *Nexus*, vol. 1, no. 2, 2024.

4. K. Dimitriadou, N. Rigogiannis, S. Fountoukidis, F. Kotarela, A. Kyritsis, and N. Papanikolaou, "Current trends in electric vehicle charging infrastructure; opportunities and challenges in wireless charging integration," *Energies*, vol. 16, no. 4, p. 2057, 2023.

5. G. A. Covic and J. T. Boys, "Inductive power transfer," *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276-1289, 2013.

6. D. Kim *et al.*, "Analysis and introduction of effective permeability with additional air-gaps on wireless power transfer coils for electric vehicle based on SAE J2954 recommended practice," *Energies*, vol. 12, no. 24, p. 4797, 2019.
7. J. Schneider *et al.*, "Validation of wireless power transfer up to 11kW based on SAE J2954 with bench and vehicle testing," in *WCX SAE World Congress Experience*, 2019: SAE Technical Paper.
8. X. Mou, D. T. Gladwin, R. Zhao, and H. Sun, "Survey on magnetic resonant coupling wireless power transfer technology for electric vehicle charging" *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 12, pp. 3005-3020, 2019.
9. D. Kishan, M. Vinod, and N. Harischandrappa, "Magnetic coupling characteristics of spiral square-circular coupled coils for wireless EV battery charging system," in *2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)*, 2020: IEEE, pp. 1-5.
10. Z. Xue, W. Liu, C. Liu, and K. Chau, "Critical review of wireless charging technologies for electric vehicles" *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 2, p. 65, 2025.
11. X. Zhang, J. Li, and X. Tong, "A novel hybrid control strategy to implement constant current output with ZVS for the double-side LCC compensation topology," *Electrical Engineering*, vol. 107, no. 10, pp. 13359-13368, 2025.
12. M. Rastegar, M. H. Ghaderi, M. Bahrami-Fard, J. M. Miller, P. T. Balsara, and B. Fahimi, "A Self-Tuning Algorithm for Misalignment Detection and Efficiency Optimization in Double-Sided LCC-Based DWPT Systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2025.
13. F. Grazian, T. B. Soeiro, and P. Bauer, "Interoperability of the Voltage/Current Doubler Converter Employing Bipolar Pads with the SAE J2954 VA WPT2/Z2 for EV Wireless Charging," in *2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, 2022: IEEE, pp. 346-352.
14. Y. Zhu, X. Xu, J. Luo, and H. Shen, "Integrated MCR-WPT system with LCC/LC-S hybrid compensation for constant-current/constant-voltage operation" *Journal of Power Electronics*, pp. 1-11, 2025.
15. J. Schneider *et al.*, "Bench testing validation of wireless power transfer up to 7.7 kW based on SAE J2954," *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, vol. 11, no. 07-11-02-0009, pp. 89-108, 2017.
16. D. Kim, S. Ahn, Q. He, A. Huang, J. Fan, and H. Kim, "Electric parameter tuning of wireless power transfer coil for charging interoperability of electric vehicles," in *2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, 2020: IEEE, pp. 619-622.
17. M. Bertoluzzo, P. Di Barba, M. Forzan, M. E. Mognaschi, and E. Sieni, "Field models for the electromagnetic compatibility of wireless power transfer systems for electric vehicles" *Engineering computations*, vol. 39, no. 7, pp. 2802-2819, 2022.
18. Y. Özüpak, "Analysis and experimental verification of efficiency parameters affecting inductively coupled wireless power transfer systems," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, 2024.
19. J. M. Gonzalez-Gonzalez, A. Trivino-Cabrera, and J. A. Aguado, "Assessment of the power losses in a SAE J2954-compliant wireless charger," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 54474-54483, 2022.
20. X. Sun, S.-E. Chen, and T. Zhao, "Enhancing coupling coefficient and efficiency in wireless power transfer: A comparison of ferrite block and magnetic composite particle material," *High-speed Railway*, 2025.

- Ngày gửi bài: 12/08/2026
 - Ngày phản biện: 06/09/2026
 - Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ HỆ THỐNG QUẢN LÝ VÀ ĐIỀU KHIỂN PIN TRÊN XE ĐIỆN VÀ XE HYBRID: CÁC TIẾN BỘ GẦN ĐÂY VÀ XU HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Võ Công Anh¹, Trần Đức Hạnh¹, Hồ Sỹ Vương¹, Phạm Xuân Phương¹

TÓM TẮT

Sự phát triển nhanh chóng của giao thông điện hóa đặt ra yêu cầu ngày càng cao đối với hệ thống quản lý pin (BMS) và chiến lược quản lý năng lượng (EMS) trên xe điện (EV) và xe hybrid (HEV), đặc biệt về độ chính xác, an toàn và hiệu suất. Mặc dù công nghệ BMS đã có nhiều tiến bộ, các kiến trúc truyền thống vẫn tồn tại những hạn chế trong ước lượng trạng thái pin dưới điều kiện vận hành động, kiểm soát nhiệt khi sạc nhanh và khả năng tính toán trên nền tảng phân cứng giới hạn. Bài báo này tổng quan và phân tích các tiến bộ nổi bật trong công nghệ quản lý và điều khiển pin giai đoạn 2020 – 2026. Nội dung tập trung vào sự phát triển của các phương pháp ước lượng trạng thái pin từ mô hình mạch tương đương đến các phương pháp học sâu và mạng nơ-ron tích hợp thông tin vật lý (PINNs), cùng với các hệ thống quản lý nhiệt pin tiên tiến (BTMS) và chiến lược quản lý năng lượng hiệu quả. Bên cạnh đó, bài báo phân tích các xu hướng mới như kiến trúc BMS dựa trên song sinh số, an ninh mạng – vật lý, hệ thống điện áp cao 800 V và khả năng thích ứng với các công nghệ pin thế hệ mới, bao gồm pin sodium-ion và pin thể rắn. Các thách thức kỹ thuật, phương pháp kiểm thử phân cứng trong vòng lặp (HIL) và những hướng nghiên cứu tiềm năng được thảo luận nhằm định hướng phát triển BMS thông minh, an toàn và hiệu quả cho thế hệ xe điện tiếp theo.

Từ khóa: Hệ thống quản lý pin (BMS), trạng thái sạc (SOC), trạng thái sức khỏe (SOH), hệ thống quản lý nhiệt pin (BTMS), chiến lược quản lý năng lượng (EMS)

A REVIEW OF BATTERY MANAGEMENT AND CONTROL SYSTEMS FOR ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES: RECENT ADVANCES AND DEVELOPMENT TRENDS ABSTRACT

The rapid development of electrified transportation has placed increasingly stringent demands on battery management systems (BMS) and energy management strategies (EMS) in electric vehicles (EVs) and hybrid electric vehicles (HEVs), particularly in terms of accuracy, safety, and efficiency. Despite significant advances in BMS technologies, conventional architectures still face limitations in battery state estimation under dynamic operating conditions, thermal management during fast charging, and computational capability on resource-constrained hardware platforms. This paper reviews and analyzes major advances in battery management and control technologies during the period from 2020 to 2026. The review focuses on the evolution of battery state estimation methods, ranging from equivalent circuit models to deep learning approaches and physics-informed neural networks (PINNs), together with advanced battery thermal management systems (BTMS) and efficient energy management strategies. In addition, emerging trends are examined, including digital-twin-based BMS architectures, cyber-physical security, 800 V high-voltage systems, and adaptability to next-generation battery technologies, including sodium-ion and solid-state batteries. Key technical challenges, hardware-in-the-loop (HIL) testing methodologies, and promising research directions are also discussed to guide the development of intelligent, safe, and efficient BMS technologies for next-generation electric vehicles.

Keywords: Battery Management System (BMS), State of Charge (SOC), State of Health (SOH), Battery Thermal Management System (BTMS), Energy Management Strategy (EMS)

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự bùng nổ của biến đổi khí hậu toàn cầu và sự cạn kiệt của nguồn nhiên liệu hóa thạch đã thúc đẩy ngành công nghiệp ô tô trải qua cuộc cách mạng chuyển dịch lịch sử sang các dòng xe điện hóa, bao gồm xe điện chạy pin (BEVs) và xe hybrid (HEVs) [1]. Trong kiến trúc tổng thể của xe điện, bộ pin lưu trữ năng lượng - đặc biệt là công nghệ pin Lithium-ion

(LIBs) - được coi là bộ phận quyết định trực tiếp đến phạm vi di chuyển, hiệu suất vận hành và giá thành sản phẩm [2]. Tuy nhiên, các đặc tính điện hóa phi tuyến phức tạp, nguy cơ mất an toàn nhiệt và hiện tượng thoái hóa năng lượng theo thời gian của LIBs đòi hỏi phải có một hệ thống giám sát và điều khiển thông minh. Hệ thống quản lý Pin (Battery Management System - BMS) đóng

¹ Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế
Email: voconganh@hueuni.edu.vn

vai trò là bộ não trung tâm, thực hiện nhiệm vụ duy trì bộ pin vận hành trong vùng làm việc an toàn (Safe Operating Area - SOA), đồng thời tối ưu hóa tuổi thọ và hiệu suất của toàn hệ thống [3].

Thách thức cốt lõi đối với các dòng BMS thế hệ hiện tại nằm ở việc nâng cao độ chính xác của các thuật toán ước lượng trạng thái bên trong pin. Do các đại lượng như trạng thái sạc (State of Charge - SOC) và trạng thái sức khỏe (State of Health - SOH) không thể đo trực tiếp bằng các cảm biến vật lý, chúng phải được suy ra thông qua các mô hình toán học và thuật toán ước lượng [4]. Sự kết hợp giữa các phương pháp dựa trên mô hình như Extended Kalman Filter - EKF, Sliding Mode Observer - SMO và các thuật toán học máy như Long Short Term Memory - LSTM, Convolutional Neural Networks - CNN đã mở ra định hướng mới trong việc dự báo trạng thái pin với độ chính xác cao và khả năng thích ứng linh hoạt với điều kiện vận hành động [5]. Song song đó, các thuật toán chẩn đoán lỗi sớm giúp phát hiện kịp thời các bất thường về điện áp, dòng điện hoặc hiện tượng đoản mạch nội, ngăn ngừa các sự cố cháy nổ nguy hiểm [6].

Bên cạnh khía cạnh thuật toán giám sát, chiến lược quản lý năng lượng và hệ thống điều khiển nhiệt Pin đóng vai trò quyết định đến sự cân bằng giữa hiệu suất và độ bền của pin. Nhiệt độ làm việc không đồng đều hoặc vượt quá giới hạn lý tưởng (thường từ 20°C đến 40°C) sẽ làm tăng tốc độ thoái hóa hóa học và nguy cơ mất an toàn [7]. Do đó, việc tích hợp các giải pháp làm mát tiên tiến (làm mát bằng chất lỏng, vật liệu chuyển pha PCM, hoặc chất lỏng ngâm) cùng với các giải pháp cân bằng tế bào pin chủ động/bị động là bắt buộc để duy trì tính đồng nhất trong bộ pin quy mô lớn [8].

Năm 2026 ghi nhận bước tiến mang tính đột phá của ngành công nghiệp ô tô với sự hội tụ của công nghệ BMS đám mây (Cloud-based BMS) và bản sao số (Digital Twin) [9]. Bằng cách chuyển giao bớt khối lượng tính

toán nặng nề từ các bộ vi điều khiển trên xe lên hạ tầng đám mây, Cloud-BMS cho phép xử lý dữ liệu lớn thời gian thực, triển khai các mô hình học sâu phức tạp và liên tục cập nhật trạng thái pin theo thời thực. Hơn nữa, sự xuất hiện của các công nghệ pin thế hệ mới - như pin thể rắn (Solid-State Batteries - SSBs) và pin Sodium-ion (SiB) - đang đặt ra các yêu cầu hoàn toàn mới đối với kiến trúc phần cứng lẫn thuật toán phần mềm của BMS [10].

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu được công bố, việc hệ thống hóa một cách toàn diện từ các thuật toán truyền thống đến các xu hướng hạ tầng tính toán mới vẫn còn những khoảng trống đáng kể. Các thách thức về chi phí tính toán, bảo mật dữ liệu đám mây, độ tin cậy của mô hình trong điều kiện khắc nghiệt và khả năng tích hợp cho pin thế hệ mới vẫn là các rào cản kỹ thuật lớn cần giải quyết [11].

Bài báo tổng quan này được thực hiện nhằm cung cấp một góc nhìn toàn diện, hệ thống và cập nhật nhất về công nghệ BMS trên xe EV/HEV. Những đóng góp chính của nghiên cứu này bao gồm: Tổng hợp và so sánh chi tiết các thuật toán ước lượng trạng thái (SOC, SOH) và chẩn đoán lỗi, đánh giá ưu/nhược điểm từ các mô hình dựa trên lý thuyết kiểm soát đến các phương pháp học sâu tiên tiến; phân tích chuyên sâu các chiến lược quản lý năng lượng và giải pháp quản lý nhiệt, làm rõ mối liên hệ giữa kiểm soát nhiệt độ và tốc độ suy thoái pin; cập nhật các xu hướng đột phá mới nhất, đặc biệt là kiến trúc Cloud-BMS, việc ứng dụng Digital Twin và các thay đổi bắt buộc trong thiết kế BMS để tương thích với pin thể rắn và pin Sodium-ion; đánh giá các thách thức kỹ thuật còn tồn đọng và đề xuất các định hướng nghiên cứu tiềm năng cho hệ thống BMS thế hệ tiếp theo.

II. ƯỚC LƯỢNG TRẠNG THÁI PIN (SOC, SOH, SOP) VÀ CHẨN ĐOÁN LỖI

2.1. Phân tích so sánh các phương pháp ước lượng trạng thái Pin

Việc ước lượng chính xác SOC, SOH và khả năng công suất (SOP) là bài toán cốt lõi

trong việc đảm bảo hiệu năng và độ an toàn cho hệ thống quản lý pin [12-14].

Bảng 1. So sánh các phương pháp ước lượng trạng thái pin

Phương pháp	Ưu điểm	Nhược điểm	Độ phức tạp tính toán
Mô hình mạch tương đương (ECM) + bộ lọc Kalman (EKF/UKF) [12]	- Mô hình toán học đóng, có ý nghĩa vật lý rõ ràng. - Khả năng tự sửa lỗi trạng thái ban đầu nhờ phản hồi vòng kín. - Phù hợp triển khai thời gian thực trên vi điều khiển nhúng.	- Phụ thuộc vào độ chính xác của quá trình định danh tham số. - Kém hiệu quả khi mô hình hóa các hiện tượng phi tuyến mạnh ở nhiệt độ thấp hoặc vùng SOC biên.	Thấp đến trung bình
Mạng thần kinh học sâu thuần túy (LSTM/PINN) [13, 15, 16]	- Học trực tiếp quan hệ phi tuyến phức tạp từ dữ liệu chuỗi thời gian. - Không đòi hỏi tri thức tiên phong về thông số điện hóa chi tiết.	- Đòi hỏi tập dữ liệu huấn luyện lớn và đa dạng. - Thiếu tính giải thích (hiện tượng "hộp đen"). - Dễ bị suy giảm độ chính xác khi vận hành ngoài phân phối dữ liệu huấn luyện.	Cao Đặc biệt tốn kém tài nguyên trong pha huấn luyện và cập nhật trọng số trực tuyến.
Phương pháp học máy lai (Hybrid Methods) [12, 17]	- Dung hòa giữa tính ổn định vật lý của ECM và khả năng xấp xỉ phi tuyến của AI. - Giảm sự phụ thuộc vào khối lượng dữ liệu thuần túy.	- Cấu trúc thuật toán phức tạp, khó tối ưu hóa đồng thời. - Thách thức trong việc cân bằng trọng số giữa nhiều đo lường và sai số mô hình.	Trung bình đến cao Phụ thuộc vào quy mô mạng tích hợp và tần số cập nhật tham số.

2.2. Xu hướng ứng dụng Physics-Informed Neural Networks (PINN) trong ước lượng SOH

Các mô hình học máy truyền thống thường gặp hiện tượng suy giảm độ chính xác khi áp dụng vào điều kiện vận hành thực tế do sự biến thiên phức tạp của tải xả và nhiệt độ môi trường. Nhằm giải quyết hạn chế này, mạng thần kinh nhúng quy luật vật lý (PINN) đã trở thành một hướng tiếp cận đột phá trong nghiên cứu ước lượng SOH [13, 15, 16]. Sơ đồ minh họa mạng thần kinh nhúng quy luật vật lý (PINN) cho ước lượng SOH được trình bày ở hình 1.

a) Cơ chế nhúng ràng buộc vật lý

Khác với các mạng neural thuần túy chỉ tối ưu hóa sai số giữa giá trị dự đoán và dữ liệu thực nghiệm, PINN tích hợp trực tiếp các phương trình vi phân mô tả động học suy hao (như động học phát triển màng SEI hoặc phương trình khuếch tán Fick) vào hàm tổn thất tổng thể [14, 18]:

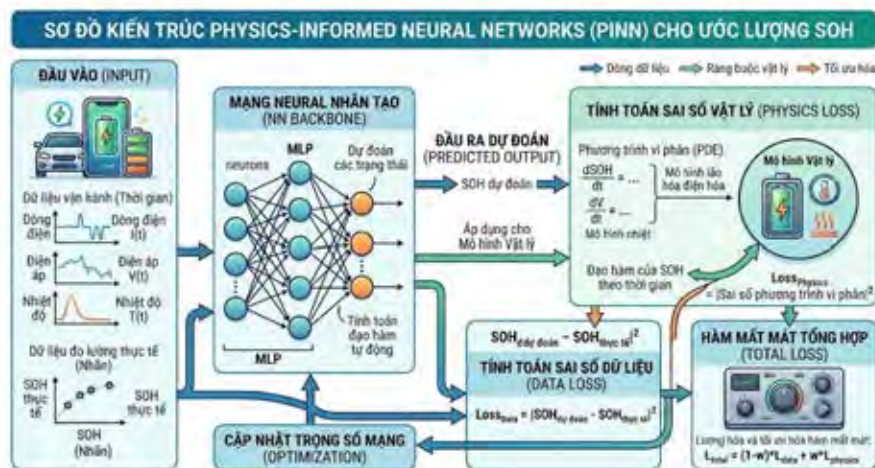
$$\mathbf{L}_{total} = \mathbf{L}_{data} + \lambda \mathbf{L}_{physics}$$

Trong đó:

$\mathbf{L}_{data}$ - đại diện cho sai số bình phương trung bình (MSE) giữa SOH dự đoán và giá trị đo đạc.

$\mathbf{L}_{physics}$ - biểu thị độ lệch khỏi quy luật động học suy hao vật lý.

λ - là hệ số cân bằng trọng số thích ứng.



Hình 1. Sơ đồ mạng thần kinh nhúng quy luật vật lý (PINN) cho ước lượng SOH

b) Ưu thế trong điều kiện vận hành thực tế

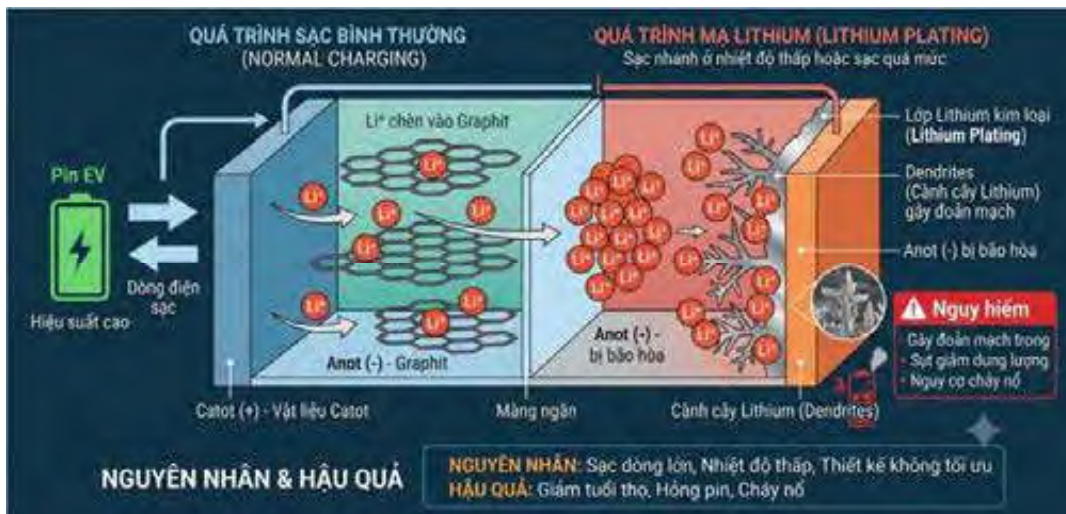
Giảm sự phụ thuộc vào dữ liệu: Nhờ sự hướng dẫn của miền định luật vật lý, PINN duy trì độ chính xác cao ngay cả khi tập dữ liệu huấn luyện bị khuyết thiếu hoặc chứa nhiều đo lường từ thiết bị vận hành [14, 15, 18].

Khả năng tổng quát hóa: Mô hình đảm bảo tính ổn định và nhất quán khi suy luận ở các kịch bản vận hành chưa từng xuất hiện trong tập huấn luyện (chẳng hạn như vận hành theo bước nhảy ngẫu nhiên - Random Walk), hạn chế tối đa hiện tượng vi phạm quy tắc bảo toàn năng lượng [13].

2.3. Chẩn đoán lỗi: Mạ Lithium (Lithium Plating) và phát hiện sớm thoát nhiệt (Thermal Runaway)

a) Phát hiện hiện tượng mạ Lithium

Mạ Lithium là quá trình kết tủa kim loại Li trên bề mặt cực âm Graphite, thường xảy ra khi sạc ở nhiệt độ thấp hoặc dòng điện cao. Hiện tượng này làm suy giảm dung lượng khả dụng và gia tăng nguy cơ hình thành nhánh cây gây ngắn mạch nội [19, 20]. Hình 2 trình bày cơ chế của hiện tượng mạ Lithium xảy ra bên trong pin xe điện và xe hybrid.



Hình 2. Sơ đồ giải thích cơ chế của hiện tượng mạ Lithium

Phân tích điện áp thả lỏng (Relaxation Voltage Analysis): Sau khi kết thúc quá trình sạc nhanh, sự hòa tan của kim loại Lithium bị mạ tạo ra một cao nguyên điện áp và điểm uốn

đặc trưng trên đường cong vì phân điện áp thả lỏng dV/dt . Việc trích xuất đặc tính này cho phép định lượng không phá hủy lượng Lithium bị kết tủa [19, 20].

Định danh trở kháng trực tuyến: Sự xuất hiện của mạ Lithium làm thay đổi động học sạc và điện trở trong R_{in} . Các phương pháp phát hiện dựa trên biến thiên điện trở trong theo chuỗi xung kết hợp với mô hình hóa trực tuyến giúp phát hiện sớm thời điểm khởi phát mạ Lithium mà không cần thêm phần cứng đo chuyên dụng [19, 20].

b) Cảnh báo sớm hiện tượng thoát nhiệt

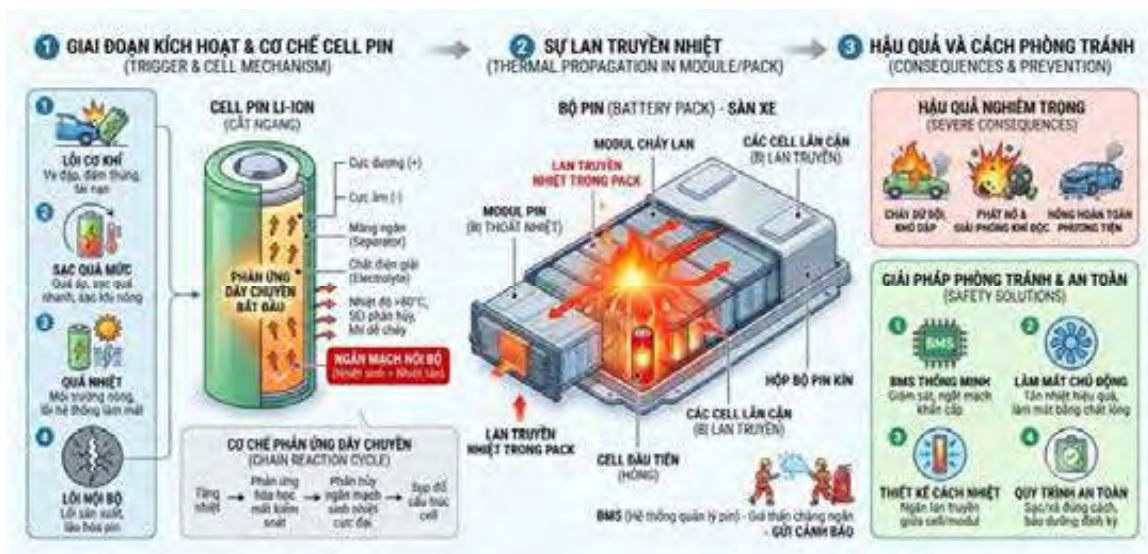
Thoát nhiệt là chuỗi phản ứng tỏa nhiệt không kiểm soát, dẫn đến sự bùng phát nhiệt độ và nguy cơ cháy nổ nghiêm trọng [21]. Hiện tượng thoát nhiệt trong pin xe điện và xe hybrid được minh họa ở hình 3.

Phổ trở kháng điện hóa thời gian thực: Theo dõi thành phần trở kháng ở dải tần số trung và cao để phát hiện sự phân hủy sớm

của màng SEI và gia tăng nhiệt độ nội tại trước khi xuất hiện biến động nhiệt độ rõ rệt trên vỏ ngoài [22].

Đồng giám sát đa cảm biến: Kết hợp tốc độ biến thiên nhiệt độ dT/dt với tốc độ gia tăng áp suất nội bộ dP/dt và cảm biến khí xả. Sự gia tăng áp suất đột ngột do hiện tượng bốc hơi dung môi xuất hiện sớm hơn từ 2 đến 5 phút so với ngưỡng bùng phát nhiệt độ bùng nổ [21, 22].

Mô hình nhiệt 3D ghép nối mô hình điện hóa: Ước lượng phân bố nhiệt độ không đồng đều bên trong cấu trúc cell, cho phép phát hiện các "điểm nóng" do ngắn mạch nội cực bộ trước khi phản ứng dây chuyền kích hoạt [22].



Hình 3. Hiện tượng thoát nhiệt trong pin xe điện và xe hybrid

III. CHIẾN LƯỢC QUẢN LÝ NĂNG LƯỢNG (EMS) VÀ QUẢN LÝ NHIỆT PIN (BTMS) TRÊN XE ĐIỆN THẾ HỆ MỚI

3.1. Các chiến lược quản lý năng lượng (EMS) cho xe Hybrid (HEV/PHEV)

EMS đóng vai trò then chốt trong việc phân bổ công suất tối ưu giữa động cơ đốt trong và động cơ điện, nhằm tối ưu hóa hiệu suất tiêu thụ nhiên liệu, giảm lượng phát thải khí nhà kính và kéo dài tuổi thọ của bộ pin [23]. Các hướng tiếp cận EMS hiện nay được chia thành ba nhóm chính:

a. Phương pháp dựa trên quy tắc (Rule-based EMS)

Chiến lược dựa trên quy tắc phân thành hai nhánh chính: Deterministic Rule-based (dựa trên các tập lệnh If-Then-Else) và Fuzzy Logic. Các quy tắc này được thiết lập dựa trên bản đồ hiệu suất của động cơ và trạng thái sạc pin [24]. Ưu điểm: Khối lượng tính toán thấp, không đòi hỏi phần cứng ECU cấu hình cao và đáp ứng tính thực thời.

Hạn chế: Phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm của chuyên gia, không có tính linh hoạt và

bộ vượt bậc, việc triển khai thực tế trên hệ thống quản lý pin thương mại vẫn đang đối mặt với nhiều rào cản kỹ thuật lớn. Phần này trình bày một số khoảng trống nghiên cứu cốt lõi và đề xuất các định hướng phát triển trong tương lai.

4.1. Chuẩn hóa và đồng bộ hóa dữ liệu Pin thực tế

Thách thức: Phần lớn các thuật toán hiện nay được phát triển, huấn luyện và đánh giá trên các bộ dữ liệu thu thập trong điều kiện phòng thí nghiệm, với chu kỳ sạc/xả được thiết lập tương đối cố định và nhiệt độ môi trường được kiểm soát chặt chẽ. Tuy nhiên, dữ liệu vận hành thực tế của pin trên xe điện thường có mức độ biến thiên và nhiễu cao do ảnh hưởng đồng thời của hành vi lái xe, điều kiện môi trường, đặc tính tải không ổn định và chế độ sạc nhanh không đồng nhất [33]. Sự khác biệt đáng kể giữa dữ liệu thực nghiệm trong phòng thí nghiệm và dữ liệu vận hành thực địa làm hạn chế khả năng khái quát hóa của các mô hình, đặc biệt đối với các bài toán ước lượng trạng thái và dự đoán suy giảm hiệu suất pin. Bên cạnh đó, sự thiếu hụt các bộ dữ liệu mở có cấu trúc, định dạng và tiêu chuẩn thu thập thống nhất từ điều kiện vận hành thực tế gây khó khăn cho việc tái lập nghiên cứu và so sánh khách quan hiệu năng giữa các thuật toán.

Định hướng nghiên cứu: Trong thời gian tới, cần phát triển các khung chuẩn hóa dữ liệu quy mô toàn cầu nhằm thống nhất quy trình thu thập, đồng bộ hóa, tiền xử lý, lưu trữ và chia sẻ dữ liệu pin EV. Các khung này cần tích hợp các phương pháp phát hiện và loại bỏ nhiễu thích ứng, đồng thời áp dụng các kỹ thuật khôi phục dữ liệu thiếu (data imputation) dựa trên Generative AI và Autoencoders để nâng cao tính đầy đủ và độ tin cậy của dữ liệu. Song song với đó, việc xây dựng các bộ dữ liệu chuẩn (benchmark datasets) có quy mô lớn, được thu thập từ nhiều loại cell/module/battery pack, nhiều cấu hình xe và đa dạng điều kiện vận hành thực tế là cần thiết. Những bộ dữ liệu này sẽ

tạo nền tảng cho việc đánh giá, tái lập và so sánh công bằng các thuật toán AI/BMS, đồng thời thúc đẩy quá trình chuyển dịch từ các mô hình được kiểm chứng trong phòng thí nghiệm sang các hệ thống quản lý pin có khả năng hoạt động tin cậy trong điều kiện thực địa.

4.2. Tối ưu hóa hiệu quả tính toán trên phần cứng nhúng

Thách thức: Các mô hình học sâu hiện đại, chẳng hạn như transformer, PINN và DRL có khả năng đạt độ chính xác cao trong các bài toán quản lý và dự đoán trạng thái pin. Tuy nhiên, các mô hình này thường có số lượng tham số lớn và yêu cầu đáng kể về năng lực tính toán, bộ nhớ cũng như băng thông dữ liệu. Trong khi đó, bộ điều khiển được sử dụng trong hệ thống quản lý pin trên xe điện thường bị giới hạn về tài nguyên tính toán, dung lượng RAM/Flash, mức tiêu thụ năng lượng và thời gian đáp ứng theo yêu cầu thời gian thực [34]. Do đó, việc triển khai trực tiếp các mô hình AI phức tạp trên phần cứng BMS hiện tại vẫn là một thách thức đáng kể.

Một hướng nghiên cứu quan trọng là phát triển các phương pháp tối ưu và nén mô hình AI nhằm giảm chi phí tính toán mà vẫn duy trì độ chính xác cần thiết. Các kỹ thuật như cắt tỉa mạng (Pruning), lượng tử hóa (Quantization) và chưng cất tri thức (Knowledge Distillation) có thể được nghiên cứu và điều chỉnh phù hợp với các kiến trúc mạng yêu cầu xử lý thời gian thực. Đặc biệt, cần tối ưu đồng thời kích thước mô hình, thời gian suy luận, mức tiêu thụ năng lượng và độ chính xác, thay vì chỉ tập trung vào một chỉ tiêu riêng lẻ.

Bên cạnh đó, kiến trúc điện toán lai Cloud-Edge được xem là một giải pháp có tiềm năng nhằm cân bằng giữa khả năng tính toán và yêu cầu thời gian thực của BMS. Trong kiến trúc này, Edge BMS thực hiện các tác vụ có yêu cầu phản hồi nhanh, chẳng hạn như ước lượng SOC và SOH ở mức cơ bản, phát hiện bất thường và giám sát trạng thái pin. Trong khi đó, các mô hình học sâu có độ phức tạp cao hơn được triển khai trên Cloud

Server để thực hiện huấn luyện, phân tích dữ liệu quy mô lớn và tối ưu tham số. Các mô hình hoặc tham số được cập nhật định kỳ cho BMS thông qua cơ chế cập nhật phần mềm từ xa [35, 36]. Cách tiếp cận này có thể giảm đáng kể tải tính toán trên phần cứng nhúng, đồng thời tạo điều kiện để hệ thống BMS liên tục được cải thiện mà không cần thay thế phần cứng.

Định hướng nghiên cứu trong tương lai nên tập trung vào việc thiết kế các mô hình AI nhẹ có khả năng triển khai trực tiếp trên MCU/SoC của BMS, kết hợp với các kỹ thuật TinyML, Edge AI, Quantization-aware Training và Knowledge Distillation. Đồng thời, cần xây dựng các tiêu chí đánh giá thống nhất, bao gồm độ chính xác, thời gian suy luận, mức sử dụng RAM/Flash, mức tiêu thụ năng lượng và độ tin cậy trong điều kiện vận hành thực tế, nhằm đánh giá toàn diện khả năng triển khai AI trên BMS xe điện.

4.3. Định lượng độ không đảm bảo và khả năng diễn giải của AI

Mặc dù các mô hình học máy và học sâu ghi nhận hiệu suất vượt trội về độ chính xác trong dự báo các tham số vận hành của pin, đa số các thuật toán hiện nay vẫn hoạt động theo cơ chế “hộp đen”, gây cản trở nghiêm trọng đến việc minh bạch hóa quá trình suy luận cũng như xác định các yếu tố vật lý tác động đến kết quả đầu ra. Trong hệ thống BMS, nơi các quyết định vận hành đòi hỏi khắt khe về độ tin cậy và tính xác minh vật lý, hạn chế này tạo ra rào cản lớn đối với việc triển khai thực tế. Đặc biệt, khi xuất hiện hiện tượng lệch phân phối dữ liệu giữa môi trường vận hành thực tế và tập dữ liệu huấn luyện, mô hình có xu hướng tạo ra các dự báo sai lệch đáng kể nhưng lại thiếu cơ chế thông báo mức độ không chắc chắn đi kèm. Hạn chế trên làm suy giảm khả năng phát hiện sớm các tình trạng bất thường, trực tiếp ảnh hưởng đến độ an toàn chức năng và tính ổn định của toàn hệ thống BMS [37].

Để khắc phục thách thức này, hướng nghiên cứu trọng tâm hiện nay là tích hợp các

phương pháp định lượng độ không đảm bảo (Uncertainty Quantification - UQ) vào kiến trúc AI. Việc ứng dụng các kỹ thuật thống kê như mạng Nơ-ron Bayesian (BNN) hoặc Monte Carlo Dropout (MC Dropout) cho phép ước lượng phân bố xác suất của đầu ra thay vì chỉ cung cấp một giá trị dự báo đơn lẻ. Nhờ đó, BMS có thể xác định các khoảng tin cậy (confidence intervals) gắn liền với kết quả ước lượng SOC, SOH, nhiệt độ và các tham số liên quan. Khi chỉ số độ không đảm bảo vượt quá ngưỡng an toàn tiền định, hệ thống sẽ chủ động kích hoạt cảnh báo hoặc chuyển sang chế độ điều khiển dự phòng an toàn. Song song với UQ, việc phát triển AI có khả năng diễn giải đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao tính minh bạch của các mô hình. Các phương pháp phân tích hậu vị như SHAP (SHapley Additive exPlanations) và LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) cho phép định lượng mức độ đóng góp của từng biến đầu vào - bao gồm điện áp, dòng điện, nhiệt độ và lịch sử sạc/xả - đối với quyết định của mô hình. Dữ liệu này cung cấp cơ sở khoa học giúp các kỹ sư kiểm chứng tính hợp lý về mặt vật lý, xác minh mô hình và phát hiện sớm các dự báo bất thường.

Do đó, định hướng nghiên cứu tiềm năng trong tương lai cần hướng tới việc xây dựng một kiến trúc BMS hợp nhất, kết hợp đồng thời khả năng dự báo chính xác, tính diễn giải cao và nhận thức được độ không đảm bảo. Mục tiêu cuối cùng không chỉ dừng lại ở việc tối ưu hóa độ chính xác dự báo, mà còn cho phép hệ thống tự đánh giá độ tin cậy và tường minh hóa nguyên nhân của quyết định được đưa ra yếu tố quyết định để chuyển dịch các mô hình AI từ môi trường nghiên cứu sang các ứng dụng BMS thực tế đáp ứng nghiêm ngặt các tiêu chuẩn an toàn công nghiệp.

4.4. Đánh giá và khai thác pin cho vòng đời thứ hai

Sự suy giảm hiệu suất trong quá trình sử dụng không đồng nghĩa với việc pin xe điện đã mất hoàn toàn giá trị khai thác. Khi dung

lượng còn khoảng 70–80% so với trạng thái ban đầu, pin có thể không còn phù hợp với yêu cầu vận hành khắt khe của phương tiện giao thông, nhưng vẫn có khả năng đáp ứng các ứng dụng lưu trữ năng lượng cố định (Energy Storage Systems – ESS). Việc chuyển đổi pin EV sang các ứng dụng vòng đời thứ hai vì vậy được xem là một giải pháp có tiềm năng nhằm kéo dài thời gian sử dụng, giảm lượng chất thải và nâng cao hiệu quả khai thác vật liệu.

Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi này không đơn giản do mỗi cell pin sau thời gian vận hành có thể trải qua lịch sử sạc/xả và điều kiện nhiệt khác nhau. Sự khác biệt về mức độ suy giảm, điện trở trong, trạng thái sức khỏe và đặc tính điện hóa giữa các cell có thể dẫn đến sự mất cân bằng trong quá trình vận hành. Nếu các cell có mức độ lão hóa khác nhau được ghép trực tiếp thành cùng một module, những cell suy giảm mạnh có thể trở thành yếu tố giới hạn công suất và làm gia tăng nguy cơ quá nhiệt hoặc mất ổn định của toàn hệ thống [38].

Một yêu cầu quan trọng do đó là đánh giá nhanh và phân loại chính xác tình trạng của từng cell trước khi tái sử dụng. Thay vì thực hiện các phép thử sạc/xả kéo dài, các đặc trưng điện hóa có thể được khai thác để rút ngắn thời gian đánh giá. Trong đó, điện trở trong từ phép thử xung (pulse resistance) và phổ trở kháng điện hóa (Electrochemical Impedance Spectroscopy – EIS) là những thông tin có khả năng phản ánh mức độ suy giảm của cell. Khi kết hợp với các thuật toán học máy, những đặc trưng này có thể được sử dụng để tự động phân nhóm cell theo SOH, khả năng cung cấp công suất và mức độ lão hóa.

Ở cấp độ hệ thống, BMS truyền thống cũng cần được chuyển từ cơ chế quản lý cố định sang kiến trúc quản lý thích ứng (Adaptive BMS). Hệ thống có thể liên tục cập nhật trạng thái của từng cell, từ đó điều chỉnh giới hạn sạc/xả, chiến lược cân bằng và phân phối công suất theo mức độ suy giảm thực tế. Đối với các bộ pin có độ không đồng nhất

cao, khả năng tự cấu hình và điều chỉnh chiến lược vận hành sẽ giúp giảm ảnh hưởng của cell yếu, hạn chế sự mất cân bằng và nâng cao hiệu suất khai thác.

Về lâu dài, hướng phát triển có triển vọng là hình thành một quy trình đánh giá và quản lý vòng đời thứ hai dựa trên dữ liệu, trong đó AI/ML được sử dụng xuyên suốt từ khâu kiểm tra, phân loại và tái cấu hình đến giám sát vận hành và dự báo tuổi thọ còn lại (Remaining Useful Life – RUL). Cách tiếp cận này không chỉ nâng cao độ tin cậy của các hệ thống second-life mà còn tạo cơ sở cho việc tái sử dụng pin theo tình trạng thực tế (condition-based reuse), thay vì áp dụng một tiêu chuẩn loại bỏ chung cho toàn bộ bộ pin. Đây là hướng tiếp cận quan trọng để thúc đẩy mô hình kinh tế tuần hoàn và nâng cao giá trị khai thác của pin EV sau giai đoạn sử dụng trên phương tiện.

4.5. Đồng thiết kế mô hình vật lý và học máy cho dự báo suy giảm pin

Mô hình hóa quá trình lão hóa pin là bài toán phức tạp do đồng thời chịu tác động của nhiều cơ chế điện hóa và điều kiện vận hành. Các mô hình vật lý chi tiết, điển hình như Doyle–Fuller–Newman (DFN), có khả năng mô tả sâu các quá trình bên trong cell nhưng thường yêu cầu chi phí tính toán lớn, khó đáp ứng các bài toán giám sát và điều khiển thời gian thực. Ngược lại, mô hình học máy có ưu thế về tốc độ suy luận và khả năng khai thác dữ liệu lớn, nhưng có thể đưa ra kết quả không phù hợp với các quy luật vật lý khi gặp điều kiện vận hành khác biệt so với dữ liệu huấn luyện.

Hướng tiếp cận đầy triển vọng là Physics-Informed Machine Learning (PIML), trong đó kiến thức vật lý được tích hợp trực tiếp vào quá trình huấn luyện mô hình. Các phương trình mô tả những cơ chế suy giảm quan trọng, như hình thành và phát triển lớp SEI (Solid Electrolyte Interphase), hiện tượng mạ lithium (Lithium Plating) và suy giảm vật liệu điện cực, có thể được đưa vào hàm mất mát cùng với sai số dữ liệu. Nhờ đó, mô hình học

máy không chỉ tối ưu khả năng khớp dữ liệu mà còn bị ràng buộc bởi các quy luật chi phối quá trình lão hóa.

Sự kết hợp giữa mô hình vật lý và học máy có thể tạo ra các mô hình vừa duy trì khả năng diễn giải về mặt vật lý, vừa giảm đáng kể chi phí tính toán so với mô phỏng điện hóa đầy đủ. Đây là hướng nghiên cứu có tiềm năng cho các ứng dụng ước lượng SOH, dự báo RUL và quản lý suy giảm pin theo thời gian thực, đặc biệt trong các hệ thống BMS có tài nguyên tính toán hạn chế.

V. KẾT LUẬN

Bài báo đã tổng quan các phương pháp tiên tiến trong giám sát, chẩn đoán và quản lý trạng thái pin xe điện, từ mô hình dựa trên vật lý, phương pháp dựa trên dữ liệu đến các kiến trúc lai. Kết quả cho thấy AI/Machine Learning đang trở thành hướng phát triển quan trọng nhằm nâng cao khả năng xử lý tính phi tuyến và các cơ chế lão hóa phức tạp mà các phương pháp truyền thống khó đáp ứng.

Trong đó, PINNs nổi bật nhờ khả năng kết hợp độ chính xác của học máy với các ràng buộc vật lý, qua đó cải thiện tính tin cậy và giảm phụ thuộc vào dữ liệu. Đồng thời, Cloud-Edge BMS mở ra khả năng phân bổ linh hoạt tác vụ tính toán giữa phần cứng nhúng và điện toán đám mây, hỗ trợ giám sát thời gian thực và cập nhật mô hình trong suốt vòng đời phương tiện. Việc đánh giá chính xác SOH và độ an toàn của pin ngay từ giai đoạn sử dụng trên xe cũng có ý nghĩa quyết định đối với khả năng tái sử dụng pin cho các hệ thống lưu trữ năng lượng vòng đời thứ hai.

Để thúc đẩy chuyển giao từ nghiên cứu sang ứng dụng thực tế, các nghiên cứu tiếp theo cần ưu tiên ba vấn đề: (i) chuẩn hóa và xây dựng bộ dữ liệu mở từ điều kiện vận hành thực tế; (ii) tối ưu và nén mô hình AI để triển khai hiệu quả trên phần cứng BMS hạn chế tài nguyên; và (iii) tăng cường tính minh bạch và độ tin cậy của AI thông qua Explainable AI (XAI) và Uncertainty Quantification (UQ). Đây là những nền tảng quan trọng để phát triển BMS thế hệ mới có khả năng thông

minh, an toàn, thích ứng và hoạt động tin cậy trong điều kiện thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. S. Cui and N. Zhao, "A study on the current status and future prospects of EV automotive market," *Journal of Social Science and Cultural Development*, vol. 1, no. 2, 2024.
2. S. Yang, X. Liu, L. Shen, and C. Zhang, *Advanced battery management system for electric vehicles*. Springer, 2023.
3. A. Kurkin, A. Chivenkov, D. Aleshin, I. Trofimov, A. Shalukho, and D. Vilkov, "Battery Management System for Electric Vehicles: Comprehensive Review of Circuitry Configuration and Algorithms," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 8, p. 451, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2032-6653/16/8/451>.
4. Z. Wang, G. Feng, D. Zhen, F. Gu, and A. Ball, "A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5141-5161, 2021/11/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.113>.
5. P. Chandana and A. Chavan, "Machine Learning Applications in Battery Management System," in *How Machine Learning is Innovating Today's World*, 2024, pp. 173-200.
6. M. Naguib, J. Chen, P. Kollmeyer, and A. Emadi, "Thermal fault detection of lithium-ion battery packs through an integrated physics and deep neural network based model," *Communications Engineering*, vol. 4, no. 1, p. 79, 2025/04/28 2025, doi: 10.1038/s44172-025-00409-2.
7. H. Togun *et al.*, "A comprehensive review of battery thermal management systems for electric vehicles: Enhancing performance, sustainability, and future trends," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 97, pp. 1077-1107, 2025/01/06/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.093>.
8. H. Li, C. A. Ooi, Z. Jia, K. Ammar, and M. K. Ishak, "A review of active cell balancing methods in electric vehicles," *Energy Conversion and Management: X*, p. 101244, 2025.
9. Y. Wang, R. Xu, C. Zhou, X. Kang, and Z. Chen, "Digital twin and cloud-side-end collaboration for intelligent battery

management system," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 62, pp. 124-134, 2022.

10. T. S. Tedla, N. W. Hlongwa, T. T. I. Nkambule, and M. A. Kebede, "Advancements in sodium-ion batteries technology: A comprehensive review of recent development on materials, mechanisms, applications, and prospects for energy storage," *Energy Reports*, vol. 14, pp. 3175-3203, 2025/12/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.10.014>.

11. N. Kertész and L. Szabó, "Advances and future trends in battery management systems," *Engineering Proceedings*, vol. 79, no. 1, p. 66, 2024.

12. X. Hu, K. Zhang, K. Liu, X. Lin, S. Dey, and S. Onori, "Advanced Fault Diagnosis for Lithium-Ion Battery Systems: A Review of Fault Mechanisms, Fault Features, and Diagnosis Procedures," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 65-91, 2020, doi: 10.1109/MIE.2020.2964814.

13. A. Selim, H. Mo, H. Pota, and D. Dong, "Physics-Informed Neural Networks for Battery Degradation Prediction Under Random Walk Operations," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 42, no. 5, pp. 1923-1940, 2026, doi: <https://doi.org/10.1002/qre.70186>.

14. T. Hofmann, J. Hamar, M. Rogge, C. Zoerr, S. Erhard, and J. Schmidt, "Physics-Informed Neural Networks for State of Health Estimation in Lithium-Ion Batteries," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 170, p. 090524, 09/21 2023, doi: 10.1149/1945-7111/acf0ef.

15. F. Wang, Z. Zhai, Z. Zhao, Y. Di, and X. Chen, "Physics-informed neural network for lithium-ion battery degradation stable modeling and prognosis," *Nature Communications*, vol. 15, no. 1, p. 4332, 2024/05/21 2024, doi: 10.1038/s41467-024-48779-z.

16. J. Ye, Q. Xie, M. Lin, and J. Wu, "A method for estimating the state of health of lithium-ion batteries based on physics-informed neural network," *Energy*, vol. 294, p. 130828, 2024/05/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130828>.

17. S. Wang, B. Hu, Q. Zhang, C. Fernandez, and J. M. Guerrero, "Hybrid models for predicting the state of health of

lithium-ion batteries: A comprehensive review," *Journal of Energy Storage*, vol. 157, p. 121600, 2026/05/01/ 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2026.121600>.

18. Y. Deng, C. Du, and Z. Ren, "A Novel Method for Estimating the State of Health of Lithium-Ion Batteries Based on Physics-Informed Neural Network," *Batteries*, vol. 11, no. 2, p. 49, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-0105/11/2/49>.

19. S. M. Abbas, C. Drießen, M. Sprenger, C. Ellersdorfer, I. Hanzu, and G. Gstrein, "Nondestructive Electrochemical Identification of Lithium Plating in High-Energy Automotive Batteries," *ACS Omega*, vol. 10, no. 13, pp. 13209-13217, 2025, doi: 10.1021/acsomega.4c10805.

20. L. Li *et al.*, "Pulse-Driven Internal Resistance Dynamics Enable Dual-Function Lithium-Plating Diagnosis and Longevity Enhancement in V2G-Optimized Lithium-Ion Batteries," *Batteries*, vol. 11, no. 5, p. 200, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2313-0105/11/5/200>.

21. X. Zhang, S. Chen, J. Zhu, and Y. Gao, "A Critical Review of Thermal Runaway Prediction and Early-Warning Methods for Lithium-Ion Batteries," *Energy Material Advances*, vol. 4, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.34133/energymatadv.0008>.

22. Y. Li *et al.*, "Early warning method for thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition based on online electrochemical impedance monitoring," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 92, pp. 74-86, 2024/05/01/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.12.049>.

23. J. Zhuang, P. Li, L. Liu, H. Ma, and X. Cheng, "Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Experience-Pool-Optimized Deep Reinforcement Learning," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 17, p. 9302, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/17/9302>.

24. D. Zhu, E. Pritchard, S. R. Dadam, V. Kumar, and Y. Xu, "Optimization of rule-based energy management strategies for hybrid vehicles using dynamic programming," *Combustion Engines*, journal article vol. 184, no. 1, pp. 3-10, 2021, doi: 10.19206/ce-131967.

25. J. Han, H. Shu, X. Tang, X. Lin, C. Liu, and X. Hu, "Predictive energy management for plug-in hybrid electric vehicles considering electric motor thermal dynamics," *Energy Conversion and Management*, vol. 251, p. 115022, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115022>.
 26. C. Liu, Y. Yang, A. Liao, and Y. Zou, "Adaptive-Efficient DP Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Powertrain: Balancing Computational Efficiency and Accuracy," *Mathematics*, vol. 13, no. 21, p. 3503, 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/13/21/3503>.
 27. K. Song, X. Wang, F. Li, M. Sorrentino, and B. Zheng, "Pontryagin's minimum principle-based real-time energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle considering both fuel economy and power source durability," *Energy*, vol. 205, p. 118064, 2020/08/15/ 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118064>.
 28. F. Li, M. Li, Y. Wu, H. Li, Y. Song, and Z. Huang, "Safe reinforcement learning energy management for hybrid electric vehicles: A supervisory action assessment and correction approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 544, p. 147720, 2026/02/15/ 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147720>.
 29. P. Yu, H. Zhang, Y. Song, Z. Wang, H. Dong, and L. Ji, "Safe reinforcement learning for power system control: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 223, p. 116022, 2025/11/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116022>.
 30. A. Wahab, A.-U.-H. Najmi, H. Senobar, N. Amjady, H. Kemper, and H. Khayyam, "Immersion cooling innovations and critical hurdles in Li-ion battery cooling for future electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 211, p. 115268, 2025/04/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115268>.
 31. Z. Kang *et al.*, "Optimizing of coupled phase change materials and liquid cooling thermal management for Li-ion battery pack," *Applied Thermal Engineering*, vol. 273, p. 126508, 2025/08/15/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126508>.
 32. J. Xiao *et al.*, "Integrated thermal management system in electric vehicles: A multi-horizon hierarchical model predictive control framework," *Energy*, vol. 338, p. 138893, 2025/11/30/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138893>.
 - [33] H. Chen *et al.*, "Towards practical data-driven battery state of health estimation: Advancements and insights targeting real-world data," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 110, pp. 657-680, 2025/11/01/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2025.07.022>.
 - [34] Z. Jin *et al.*, "Edge-cloud collaborative method for state of charge estimation of lithium-ion batteries by combining Kalman filter and deep learning," *Energy*, vol. 332, p. 137234, 2025/09/30/ 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137234>.
 - [35] S. Li, H. He, Z. Wei, and P. Zhao, "Edge computing for vehicle battery management: Cloud-based online state estimation," *Journal of Energy Storage*, vol. 55, p. 105502, 2022/11/15/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105502>.
 - [36] V. S. Naresh, M. Tejasri, P. G. Pochamma, A. V. S. Harshita, C. V. S. Manikanta, and P. Tejasri, "An intelligent cloud-based battery management framework integrating GRU state-of-health estimation and double DQN charging optimisation," *Scientific Reports*, vol. 16, no. 1, p. 20620, 2026/05/05 2026, doi: 10.1038/s41598-026-50657-1.
 - [37] S. Pohlmann *et al.*, "State-of-Health prediction of lithium-ion batteries based on a low dimensional Gaussian Process Regression," *Journal of Energy Storage*, vol. 88, p. 111649, 2024/05/30/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111649>.
 - [38] K. Neigum and Z. Wang, "Technology, economic, and environmental analysis of second-life batteries as stationary energy storage: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 103, p. 114393, 2024/12/10/ 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114393>.
- Ngày gửi bài: 12/08/2026
- Ngày phản biện: 06/09/2026
- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÁY CẮT SỢI CHO THÂN CÂY MÔN BẠC HÀ VỚI NĂNG SUẤT 100 kg/h, PHỤC VỤ MÓN ĂN TRUYỀN THỐNG COM HẾN HUẾ

Nguyễn Thanh Cường¹*, Trần Nguyễn Minh Quốc¹, Hoàng Tấn Phúc¹

TÓM TẮT

Trong bối cảnh phát triển nông nghiệp hiện nay, việc cơ giới hóa các khâu sản xuất, chế biến nông sản đóng vai trò quan trọng nhằm nâng cao năng suất lao động, tiết kiệm thời gian và giảm chi phí sản xuất. Công đoạn sơ chế thân cây môn bạc hà phục vụ món ăn cơm hến truyền thống Huế cho đến nay vẫn được thực hiện bằng phương pháp thủ công. Người chế biến phải dùng tay cắt tia, thái nhỏ từng đoạn, vừa tốn nhiều thời gian, vừa khó đảm bảo sự đồng đều về kích thước lát cắt và quá trình thao tác thủ công dễ gây mất an toàn vệ sinh thực phẩm, việc nghiên cứu và chế tạo một chiếc máy cắt sợi cho thân cây môn bạc hà phục vụ cho món ăn truyền thống cơm hến Huế là cần thiết. Nhóm nghiên cứu bước đầu đã tạo ra mẫu máy thử nhất với thiết kế bộ phận lưỡi cắt, khảo nghiệm, chọn tốc độ cắt phù hợp và cho ra sản phẩm cắt đúng yêu cầu kỹ thuật góp phần cơ giới hóa, tăng cường đảm bảo an toàn vệ sinh thực phẩm và thay đổi tập quán sản xuất thủ công đã tồn tại lâu nay.

Từ khóa: Cây môn bạc hà; Máy chế biến rau củ quả; Máy cắt sợi rau; Thiết kế chế tạo.

DESIGNING AND MANUFACTURING OF A 100 kg/h STALK-SHREDDING MACHINE FOR LEUCOCASIA GIGANTEA SERVING HUE'S TRADITIONAL CLAM RICE PRODUCTION

ABSTRACT

In the current context of agricultural development, mechanizing production and processing stages plays a crucial role in improving labor productivity, saving time, and reducing production costs. To date, the preliminary processing of taro stems (*Leucocasia gigantea*) for Hue's traditional clam rice (Com hến) is still performed manually. Processors must trim and shred each section by hand, which is not only time-consuming but also makes it difficult to ensure uniform slice sizes; furthermore, this manual process poses risks to food safety and hygiene. Therefore, researching and manufacturing a shredding machine for taro stems dedicated to the traditional clam rice dish of Hue is highly essential. The research team has initially developed the first prototype featuring a custom-designed cutting blade mechanism. Through testing and selecting the appropriate cutting speed, the machine has successfully delivered products that meet technical requirements, thereby contributing to mechanization, enhancing food safety and hygiene, and transforming long-standing manual production habits.

Keywords: *Leucocasia gigantea*; Vegetable and fruit processing machine; Vegetable shredding machine; Design and manufacturing.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cơ giới hóa các khâu sản xuất, chế biến nông sản đóng vai trò quan trọng nhằm nâng cao năng suất lao động, tiết kiệm thời gian và giảm chi phí sản xuất. Bên cạnh các loại cây trồng phổ biến như lúa, ngô, khoai, sắn thì cây môn bạc hà (*Leucocasia gigantea*) cũng được trồng rộng rãi ở nhiều vùng quê của nước ta. Đây là loại cây có giá trị sử dụng cao, không chỉ làm thực phẩm cho con người (chế biến thành các món ăn truyền thống, đặc sản) mà còn được tận dụng làm thức ăn chăn nuôi cho gia súc, gia cầm nhờ hàm lượng chất xơ và khoáng chất phong phú. Tuy nhiên, công

đoạn sơ chế thân cây môn bạc hà hiện nay chủ yếu được thực hiện thủ công bằng dao. Người chế biến phải dùng tay cắt tia, thái nhỏ từng đoạn, vừa tốn nhiều thời gian, vừa khó đảm bảo sự đồng đều về kích thước lát cắt. Ngoài ra, quá trình thao tác thủ công dễ gây mất an toàn vệ sinh thực phẩm, không phù hợp với các cơ sở chế biến thực phẩm có quy mô lớn hoặc phục vụ nhu cầu thương mại, nhu cầu về chế biến thực phẩm sạch, nhanh chóng và an toàn ngày càng tăng, việc nghiên cứu và chế tạo một chiếc máy cắt sợi cho thân cây môn bạc hà là thật sự cần thiết. Chiếc máy không chỉ giúp tăng năng suất (đạt khoảng 100 kg/h)

¹ Khoa Cơ khí và Công nghệ - Trường Đại học Nông lâm - Đại học Huế

*E-mail liên hệ: nguyenthancuong@huaf.edu.vn

mà còn đảm bảo độ mịn, đều của lát cắt, đáp ứng yêu cầu thẩm mỹ và chất lượng trong chế biến món ăn. Đồng thời, máy có thể góp phần giảm sức lao động thủ công, nâng cao hiệu quả sản xuất cho các hộ gia đình kinh doanh quán ăn, nhà hàng và cơ sở chế biến thực phẩm.

Để khắc phục những khuyết điểm của cách chế biến truyền thống nhằm mục đích giảm thời gian, nâng cao năng suất cho việc thái thân cây môn bạc hà và đảm bảo vệ sinh an toàn thực phẩm, chúng tôi đã thực hiện đề tài “Thiết kế và chế tạo máy cắt sợi cho thân cây môn bạc hà với năng suất 100 kg/h, phục vụ món ăn truyền thống cơm hến Huế”.

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

a) Cây môn bạc hà tên khoa học là *Leucocasia gigantea* còn có thể gọi theo tiếng Việt là cây dọc mùng, ráy bạc hà, môn bạc hà... thân cây chứa nhiều thành phần hóa học có tác dụng tốt cho sức khỏe con người và cũng có loại gây ngứa được nghiên cứu với nhiều kết quả ở các trường Đại học Y Dược trong nước và Quốc tế [1], [2], [3].



Hình 1. Cây môn bạc hà

b) Máy cắt sợi thân cây môn bạc hà được chế tạo và lắp ráp tại xưởng cơ khí, Khoa Cơ khí và Công nghệ, Đại học Nông Lâm, Đại học Huế, sau đó được đưa vào thử nghiệm tại hộ gia đình anh Mười cơ sở sản xuất rau sống

Môn bạc hà là một loài cây thuộc họ Ráy (*Araceae*), thường được trồng nhiều ở các vùng nông thôn Việt Nam. Đây là cây thân thảo lâu năm, có thân ngầm dưới đất dạng củ, từ củ mọc lên các thân giả thực chất là phần bẹ lá ôm sát nhau tạo thành. Thân môn bạc hà cao khoảng 1 đến 1,2 mét, đặc điểm dễ nhận biết là thân mọng nước, mềm, màu xanh nhạt và có lớp phấn mỏng phủ bên ngoài. Lá của cây to, rộng, có dạng hình mũi tên hoặc hình tim, xanh đậm và mọc vươn cao. Trong thân cây chứa nhiều nước, giàu khoáng chất và chất xơ, tuy nhiên cũng có calci oxalat và một số hợp chất gây ngứa nếu ăn sống. Khi chế biến đúng cách, môn bạc hà trở thành một loại rau quen thuộc, được dùng nhiều trong các món canh chua, lẩu cá, mang lại vị thanh mát, dễ ăn và có giá trị dinh dưỡng.

- Cây môn ngọt (môn bạc hà/bạc hà) thường giữa tán lá sẽ có chấm tím. Còn cây môn ngứa sẽ có chấm trắng [4].

- Công dụng của thân cây môn bạc hà:

+ Làm rau sống ăn kèm với món Cơm hến truyền thống của Huế.

+ được dùng nhiều trong các món canh chua, lẩu cá, mang lại vị thanh mát, dễ ăn và có giá trị dinh dưỡng [5].

ở Cồn Hến, Phường Võ Dạ – Thành phố Huế, với kết quả khảo nghiệm bước đầu xác định thông số, số vòng quay của lưỡi cắt phù hợp để cho sản phẩm sợi cắt đồng đều.



Hình 2. Một phần thân cây môn bạc hà

2.2. Phương pháp nghiên cứu

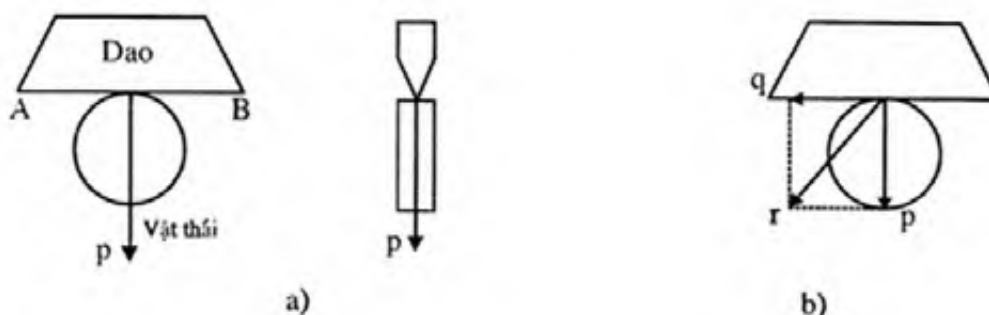
2.2.1. Phương pháp điều tra khảo sát, nghiên cứu tài liệu

Liên quan đến các dữ liệu về tình hình chế biến rau sống com hến Huế trong công đoạn cắt sợi thân cây môn bạc hà trên địa bàn thành phố Huế, đồng thời tham khảo nguyên lý làm việc những mẫu máy thái rau củ quả đã có trong nước và trên thế giới, được nhóm tổng hợp, phân tích và lựa chọn nguyên lý cắt phù hợp cho việc cắt sợi cho thân cây môn bạc hà.

2.2.2. Phương pháp tính toán thiết kế máy [8]

a) Cơ sở vật lý của quá trình cắt thái

Các bộ phận làm việc của máy cắt thái rau củ, củ quả thường dựa theo nguyên lý cắt thái bằng cạnh sắc của lưỡi dao. Quá trình cắt thái thường được thực hiện bằng cách di chuyển cạnh góc nhị diện AB (cạnh sắc) hợp bởi hai mặt phẳng của lưỡi dao theo hướng p pháp tuyến với cạnh đó (hình 3. a) hoặc theo hai hướng vuông góc với cạnh đó: vừa theo hướng p (hướng cắt pháp tuyến), vừa theo hướng q vuông góc với hướng p (hướng cắt tiếp tuyến), nghĩa là theo hướng chéo tổng hợp r, hướng cắt nghiêng (hình 3. b).



Hình 3. Tác dụng cắt thái của lưỡi dao

Viện sĩ Goriatkin V.P. đã chứng minh rằng quá trình cắt thí nghiệm có trượt làm giảm đáng kể lực cắt và tăng chất lượng thái và được mô tả bằng phương trình có dạng:

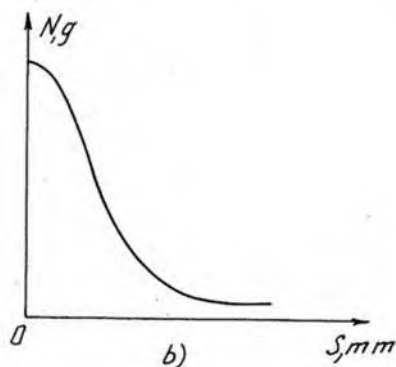
$$S = A \cdot e^{-N} \text{ hoặc } N^3 \cdot S = C^{te} \quad (2-1)$$

Trong đó: A- hằng số;

S – độ dịch chuyển (mm);

N – lực cắt thái (N);

Goriatkin V.P. gọi trường hợp cắt pháp tuyến (theo thí nghiệm $S = 0$) là quá trình chặt bở, cắt thái không có trượt; (máy thái trồng dao thẳng) trường hợp cắt nghiêng (theo thí nghiệm $S \neq 0$) là quá trình cắt thái có trượt (máy thái kiểu đĩa dao hoặc trồng dao cong). Rõ ràng là khi cắt thái có trượt, lực cần thiết để cắt thái giảm so với khi cắt thái không trượt (hình 4).

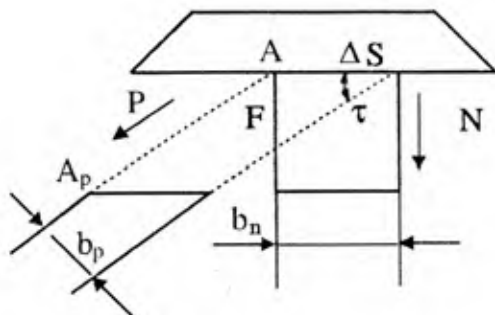


Hình 4. Đồ thị phụ thuộc lực cắt thái N vào độ dịch chuyển S

Khi cắt thái có trượt bề rộng lát thái giảm, do đó quá trình cắt thái dễ dàng hơn. Lát thái do đoạn ΔS của lưỡi thái trượt theo phương P với diện tích F (cm^2) sẽ có bề rộng b_p nhỏ hơn bề rộng b_n khi đoạn thái ΔS thái không trượt (theo phương N) cùng với diện tích F đó (hình 5).

Trên hình 5 ta có:

$$b_p = \frac{F}{AA_p} = b_n \frac{AA_n}{AA_p} = b_n \cos \tau \quad (2-2)$$



Hình 5. Tác dụng cắt trượt giảm chiều rộng lát thái

Do tính chất đàn hồi của vật thái cũng làm giảm lực cắt thái. Các vật thái trong nông nghiệp thường có tính đàn hồi và nhiều thớ, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình lưỡi dao vừa

nén vừa trượt tương đối với chỗ tiếp xúc với vật thái. Nếu vật cứng rắn không đàn hồi, ít thớ thì cắt trượt bằng lưỡi dao không có tác dụng.

b) Những yếu tố chính ảnh hưởng đến quá trình cắt thái bằng lưỡi dao

Để cắt thái vật liệu thành đoạn thái bảo đảm chất lượng, giảm được năng lượng cắt thái, cần xét đến số yếu tố thuộc phạm vi dao thái và vật thái ảnh hưởng đến quá trình cắt thái, có thể xét đến những yếu tố sau:

- Áp suất riêng q (N/cm) của cạnh sắc lưỡi dao trên vật thái

Áp suất cắt thái riêng q là yếu tố chủ yếu trực tiếp đảm bảo quá trình cắt đứt vật liệu và liên quan đến các yếu tố khác thuộc phạm vi dao thái và vật liệu thái. Nếu gọi lực cắt thái cần thiết là Q (N) và độ dài đoạn lưỡi dao là ΔS (cm) thì:

$$q = Q \Delta S \quad \text{N/cm} \quad (2-3)$$

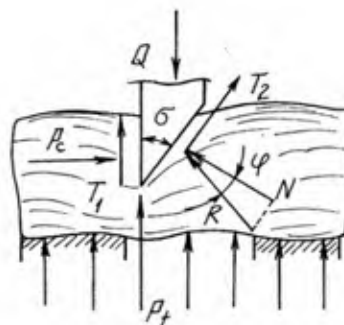
Theo viện sĩ Goriatkin V.P. thì khi cắt thái không có trượt (chặt bở $\tau = 0$), đối với rau cỏ là $q = 40 - 80$ (N/cm), còn đối với củ quả thì $q = 20 - 40$ (N/cm). Còn khi cắt có trượt thì q thay đổi phụ thuộc vào góc trượt τ . Đối với măng củ, là loại vật liệu thái chứa xenlulo, có thể xem như là loại rau cỏ nên chọn $q = 40 - 60$ (N/cm).

Trong quá trình thái lưỡi dao đi vào vật thái còn phải khắc phục lực ma sát T_1 do áp lực cản của vật thái tác dụng vào mặt bên của dao và T_2 do vật thái dịch chuyển bị nén ép tác động vào mặt vát của cạnh sắc lưỡi dao.

Nếu gọi P_t là lực cản cắt thái thì:

$$Q = P_t + T_1 + T_2 \cos \sigma \quad (2-4)$$

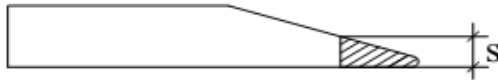
σ - góc mài dao của lưỡi dao



Hình 6. Sơ đồ quá trình cắt thái bằng lưỡi dao với lưỡi dao có góc mài σ

- *Độ sắc của lưỡi dao*

Độ sắc của lưỡi dao chính là bề dày s (mm) của cạnh sắc lưỡi dao. Đối với các máy cắt thái s không vượt quá $100\ \mu\text{m}$, nếu s quá $100\ \mu\text{m}$ lưỡi dao coi như bắt đầu cùn và thái kém. Rõ ràng là độ sắc s càng lớn thì áp suất riêng q càng tăng. Nếu gọi ứng suất cắt của vật liệu là σ_c thì $q = s \cdot \sigma_c$ (hình 7).

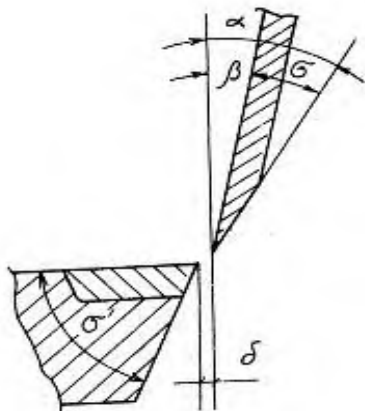


Hình 7. Cạnh sắc lưỡi dao

- *Góc cắt thái*

Góc cắt thái α là góc hợp bởi góc đặt dao β và góc mài dao σ (hình 8). Trị số góc cắt thái được xác định như sau:

$$\alpha = \beta + \sigma \quad (2-5)$$



Hình 8. Góc cắt thái

Góc đặt dao β phải tính toán thiết kế sao cho lớp rau củ khi được dao thái xong và tiếp tục được cuốn vào sẽ không chạm vào mặt dao, tránh ma sát vô ích, hoặc đối với dao thái kiểu đĩa dao dùng cắt thái củ quả: góc β phải tính toán để khi lớp của quả trượt tỳ êm nhẹ lên mặt dao mà không gây hiện tượng nảy ra khỏi mặt dao, đảm bảo quá trình cắt ổn định. Vấn đề tính toán góc đặt dao β sẽ phụ thuộc vào vận tốc quay của dao thái, vận tốc đưa vật thái vào bộ phận thái và dạng cạnh sắc của lưỡi dao...

Còn đối với dao thẳng tùy theo cách lắp dao mà có thể thực hiện cắt thái có trượt hoặc

cắt thái chặt bỏ (lắp dao theo phương hướng kính).

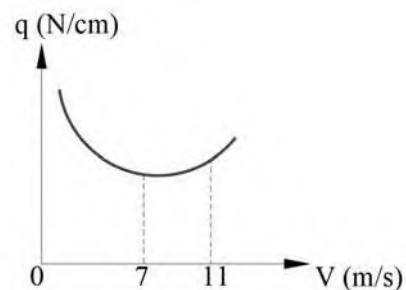
Số dao lắp trên đĩa hay trống thường là 2, 4 hoặc 6 dao. Khi lắp vào máy vị trí dao đặt nghiêng so với mặt phẳng thẳng đứng của tâm kê một góc β (gọi là góc đặt dao).

Nếu gọi α là góc cắt thái thì $\alpha = \beta + \sigma$.

Thông thường $\alpha = 12418^\circ$ và góc $\beta = 346^\circ$.

- *Vận tốc của dao*

- Vận tốc dao thái ảnh hưởng đến quá trình cắt thái, thể hiện cụ thể bằng đồ thị thực nghiệm biểu diễn sự biến thiên của áp suất cắt thái riêng q hoặc lực cắt thái (lực cản cắt thái P_t và công cắt thái A_{ct}) với vận tốc của dao thái (hình 9).



Hình 9. Đồ thị phụ thuộc của áp suất cắt thái riêng và vận tốc dao thái

- Vận tốc tối ưu khi cắt thái có tâm kê $v = 20\div 30\ \text{m/s}$.

2.2.3. Phương pháp khảo nghiệm, đánh giá khả năng làm việc của máy cắt thân cây môn bạc hà thành sợi:

Quá trình khảo nghiệm nhằm đánh giá khả năng làm việc và tính ổn định của máy cắt thân cây môn bạc hà thành sợi bao gồm: năng suất, độ đồng đều của sợi cắt, số vòng quay của lưỡi cắt phù hợp để đảm bảo tính đồng đều của sợi cắt từ thân cây môn bạc hà.

a) Năng suất máy: [8]

Năng suất máy cắt sợi thân cây môn bạc hà được xác định bởi công thức:

$$Q = \frac{3600 \cdot \varphi \cdot f}{F_r(1 + \mu)} \quad (\text{kg/h}) \quad (2.6)$$

Trong đó:

f – khả năng cắt của dao, được xác định bằng diện tích của dao cắt được trong một đơn vị thời gian m^2/s ;

φ – hệ số sử dụng khả năng cắt của dao;

F_r – bề mặt mới được tạo thành khi cắt 1 kg sản phẩm m^3/kg ;

μ – tỉ lệ thời gian của các nguyên công phụ với thời gian cắt, với máy cắt liên tục thì $\alpha = 0$.

+ Đối với máy cắt dao nhiều lưỡi: $f = 60.S.z.n$

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình máy cắt sợi thân cây môn bạc hà

Trên cơ sở tính toán [6], [7], tổng hợp và phân tích các loại máy thái rau củ quả khác

Trong đó:

S – Diện tích cắt của một lớp vật liệu trong chậu hay trong máng của máy cắt (m^2);

z – số dao cắt;

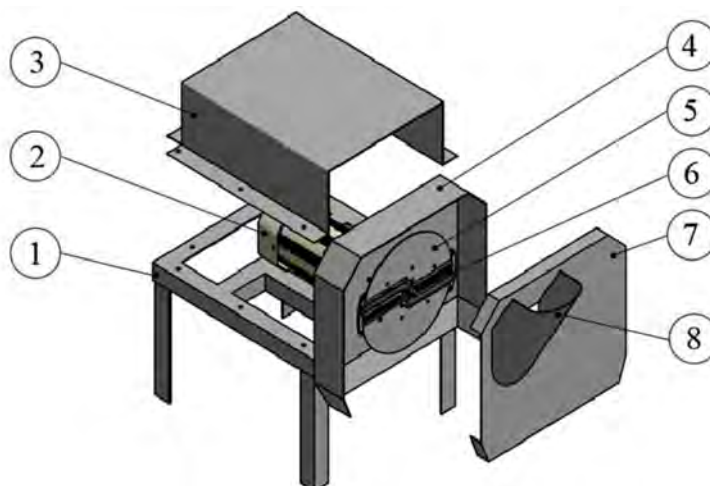
n – tốc độ quay của dao (vòng/phút).

b) Độ đồng đều của sợi cắt [8]:

Độ đồng đều của sợi cắt được xác định bởi công thức sau:

$$\mathcal{D} = \frac{\text{Số lượng sợi cắt cùng kích thước (tiết diện)}}{\text{Tổng số sợi cắt lựa chọn}} 100(\%) \quad (2.7)$$

nhau, đồng thời dựa vào lý thuyết cắt, thái và các yêu cầu về kỹ thuật của máy, mô hình máy cắt sợi cho thân cây môn bạc hà được thiết kế như Hình 10:



Hình 10. Mô hình thiết kế máy cắt sợi thân cây môn bạc hà

1-Khung máy; 2-Động cơ; 3-Nắp bảo vệ động cơ; 4-Nắp sau hộp bảo vệ dao; 5-Đĩa dao; 6-Dao; 7- Nắp trước hộp bảo vệ dao; 8-Phễu nạp liệu.

Nguyên lý hoạt động của máy cắt sợi môn bạc hà: khi động cơ (2) làm việc, dẫn động quay trực tiếp đến đĩa mang dao (5-6), máy thái làm việc. Lúc này, thân cây môn bạc hà được đẩy xuống theo phương nghiêng của phễu cấp liệu (8) và tại vị trí cuối của phễu cấp liệu chúng ta có thể xem đó là điểm kê để dao tiến hành cắt vật liệu và tạo ra sản phẩm sợi môn bạc hà và thoát ra ngoài theo trọng lực xuống phía dưới của nắp hộp bảo vệ dao (phía dưới hộp bảo vệ dao chúng ta có thể bố trí thêm máng hứng chứa sản phẩm sau khi cắt).

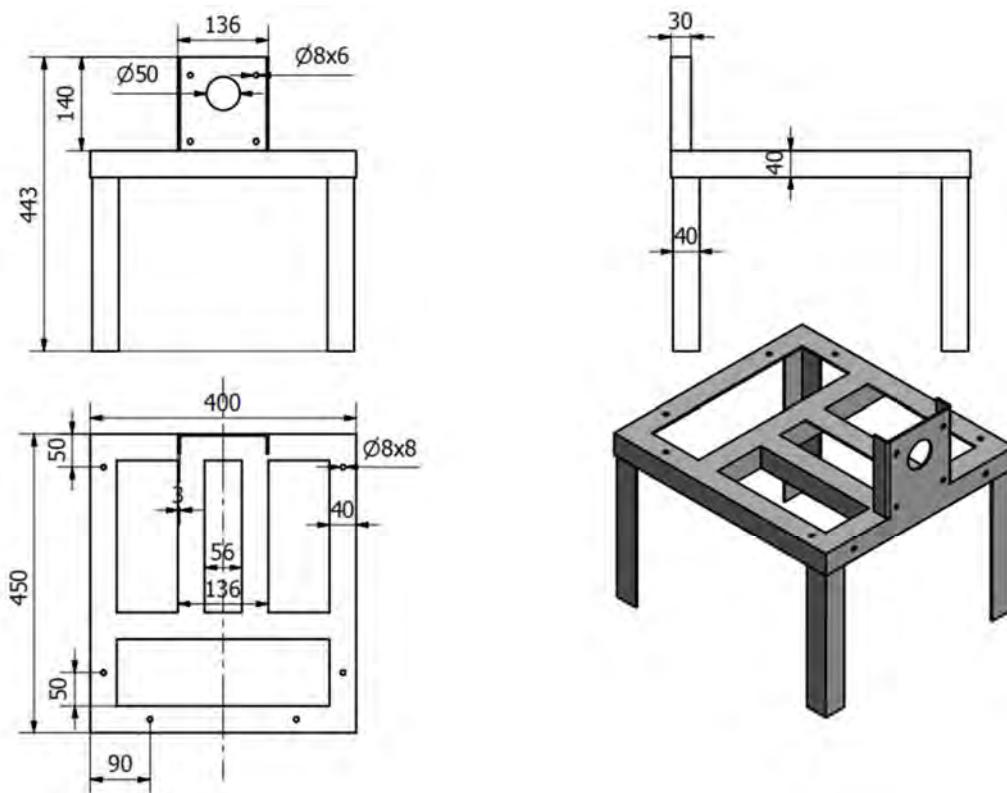
3.2. Kết quả chế tạo và khảo nghiệm máy

Do có giới hạn về phần trình bày nên trong phần thiết kế chế tạo dưới đây chúng tôi chỉ tập trung vào phần thiết kế chính cho khung máy, đĩa dao và dao còn những phần thiết kế khác chúng tôi không trình bày ở bài báo này và với phần khảo nghiệm máy, bước đầu chúng tôi chỉ dừng lại ở việc xác định số vòng quay của đĩa dao tương ứng phù hợp để cho ra sản phẩm sợi cắt thân cây môn bạc hà theo đúng yêu cầu kỹ thuật.

3.2.1. Thiết kế khung máy

- Khung máy được chế tạo từ thép V kích thước 40×40 mm, chiều dày 3 mm, nhằm đảm bảo độ cứng vững và khả năng chịu tải cho toàn bộ hệ thống. Các thanh thép V được cắt theo chiều dài yêu cầu và liên kết bằng phương pháp hàn hồ quang, tạo thành một kết cấu khung hộp vững chắc. Kích thước tổng thể khung theo bản vẽ là 400×450 mm, với chiều cao tổng cộng 440 mm. Tại các vị trí

liên kết ngang và dọc, thép V được bố trí tạo thành khung chữ nhật, đồng thời bổ sung các thanh giằng nhằm tăng khả năng chịu lực và giảm biến dạng khi vận hành. Trên mặt khung có các lỗ khoan Ø8, Ø50 theo đúng vị trí quy định để lắp đặt motor, hộp bảo vệ motor và dao. Các chân khung được làm từ thép V đồng bộ, hàn vuông góc để tạo độ ổn định, hạn chế rung lắc khi làm việc như hình 11.



Hình 11. Khung máy thiết kế

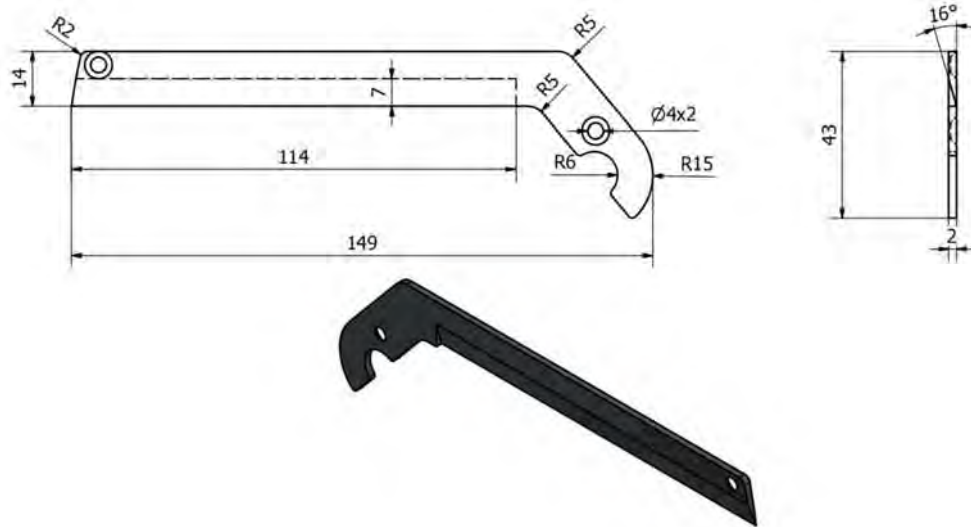
3.2.2. Thiết kế đĩa cắt và dao

3.2.2.1. Thiết kế lưỡi dao cắt

a. Dao cắt đứt

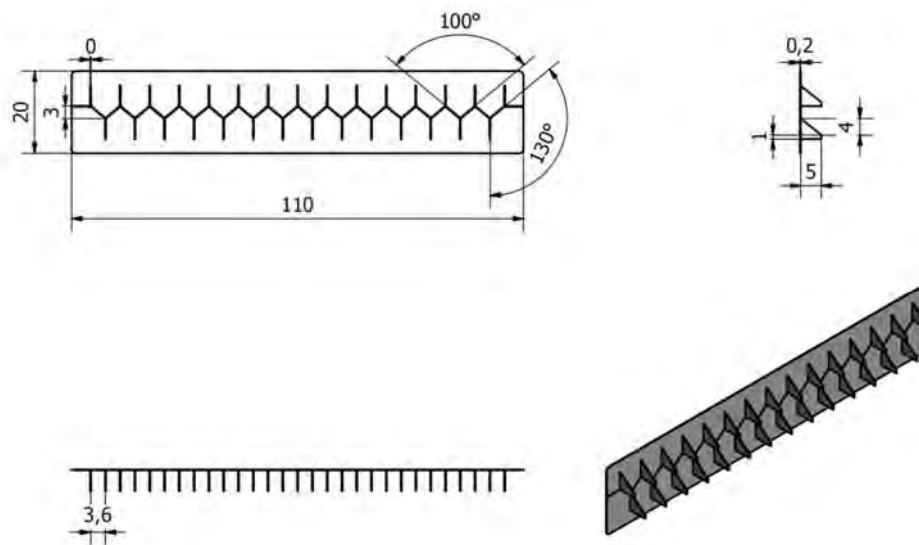
- Dao được chế tạo bằng thép không gỉ, lưỡi cắt có độ sắc bén cao, để dễ dàng cắt đứt

được sợi môn, chiều dày dao 2 mm, 2 lỗ Ø4 để cố định dao lên đĩa cắt, chiều dài cắt đứt là 114 mm như hình 12.



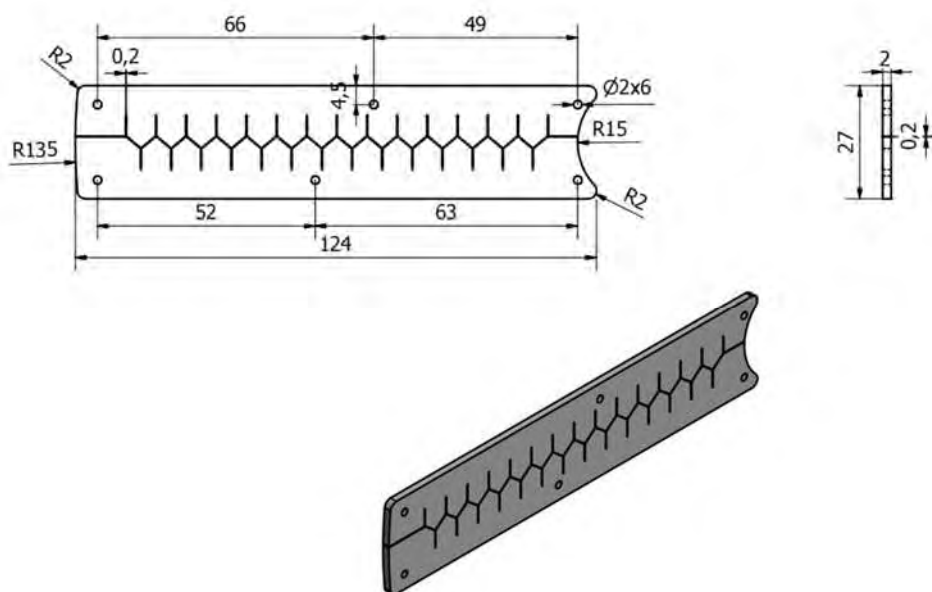
Hình 12. Dao cắt thiết kế

- b. Dao cắt sợi
- Dao cắt sợi cũng được làm bằng vật liệu không gỉ và xếp thành hai hàng xen kẽ có kích thước 3,5 mm để tạo các đường rãnh rồi dao cắt đứt sẽ cắt tiếp theo. Dao có bề rộng 20 mm và chiều dài cắt 110 mm như hình 13.



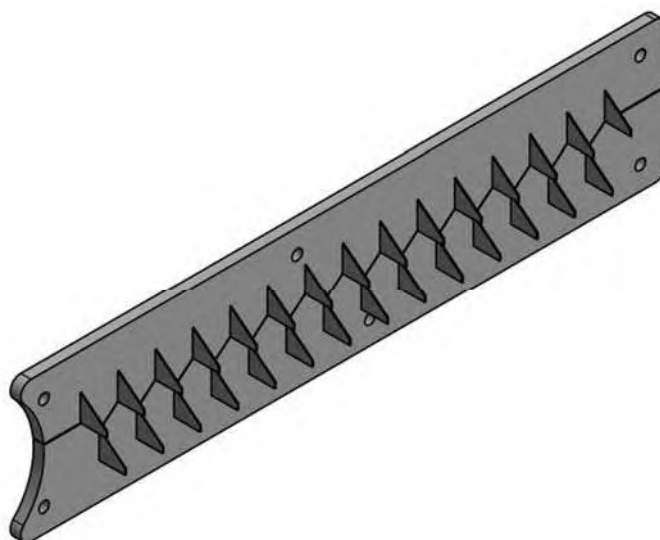
Hình 13. Dao cắt sợi thiết kế

- Nếp dao cắt sợi được chế tạo để lắp dao vào theo rãnh có sẵn và được lắp vào đĩa cắt như hình 14 .



Hình 14. Nẹp cắt sợi thiết kế

- Sau khi lắp dao vào nẹp thì sẽ được dao hoàn chỉnh, trên thân dao có 6 lỗ vít Ø2 để lắp vào đĩa cắt như hình 15.

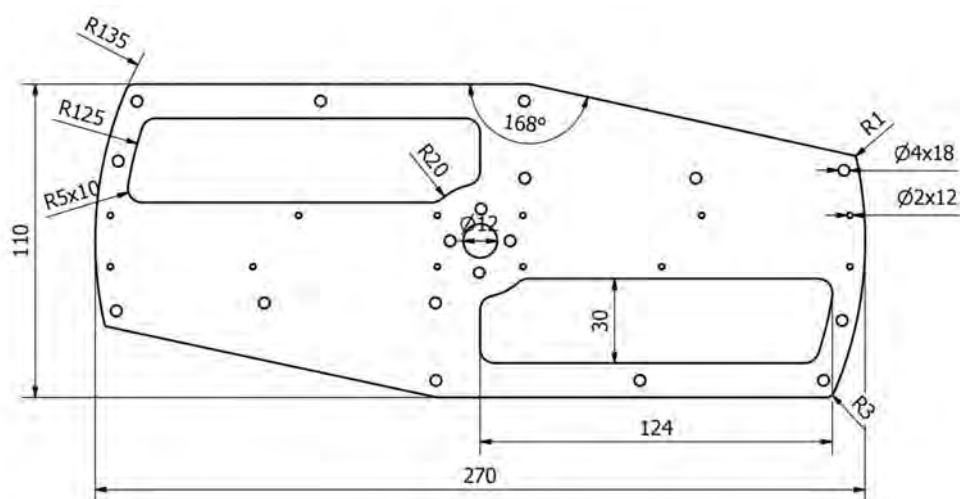


Hình 15. Dao cắt sợi hoàn chỉnh

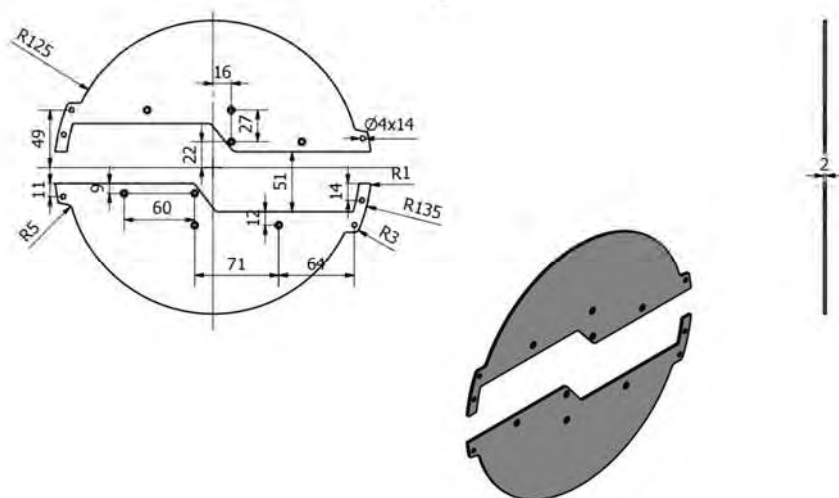
3.2.2.2. Thiết kế đĩa lắp dao

Đĩa lắp dao được thiết kế từ những bộ phận lắp ráp bằng vít tách rời nhau, có tính chất đối

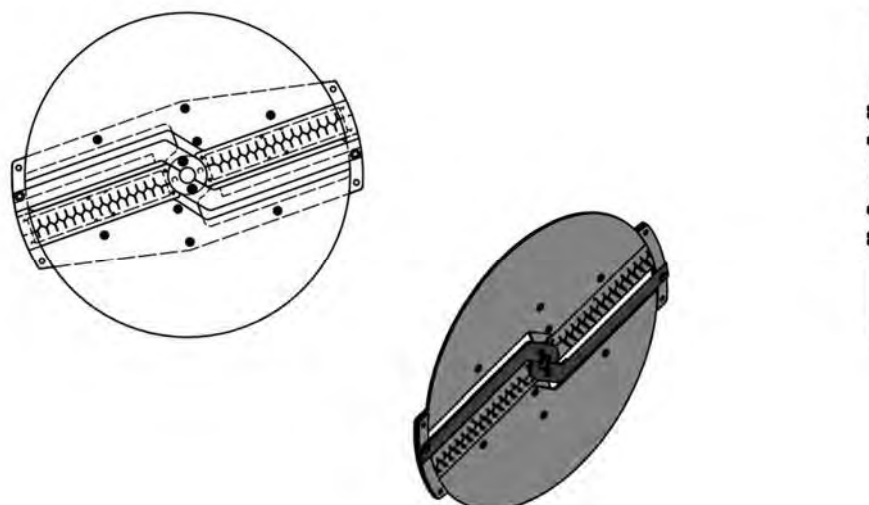
xứng đối trọng và hướng đến tâm quay khi lắp ráp vào nhau như các hình 16, hình 17 và hình 18.



Hình 16. Nẹp đĩa cắt



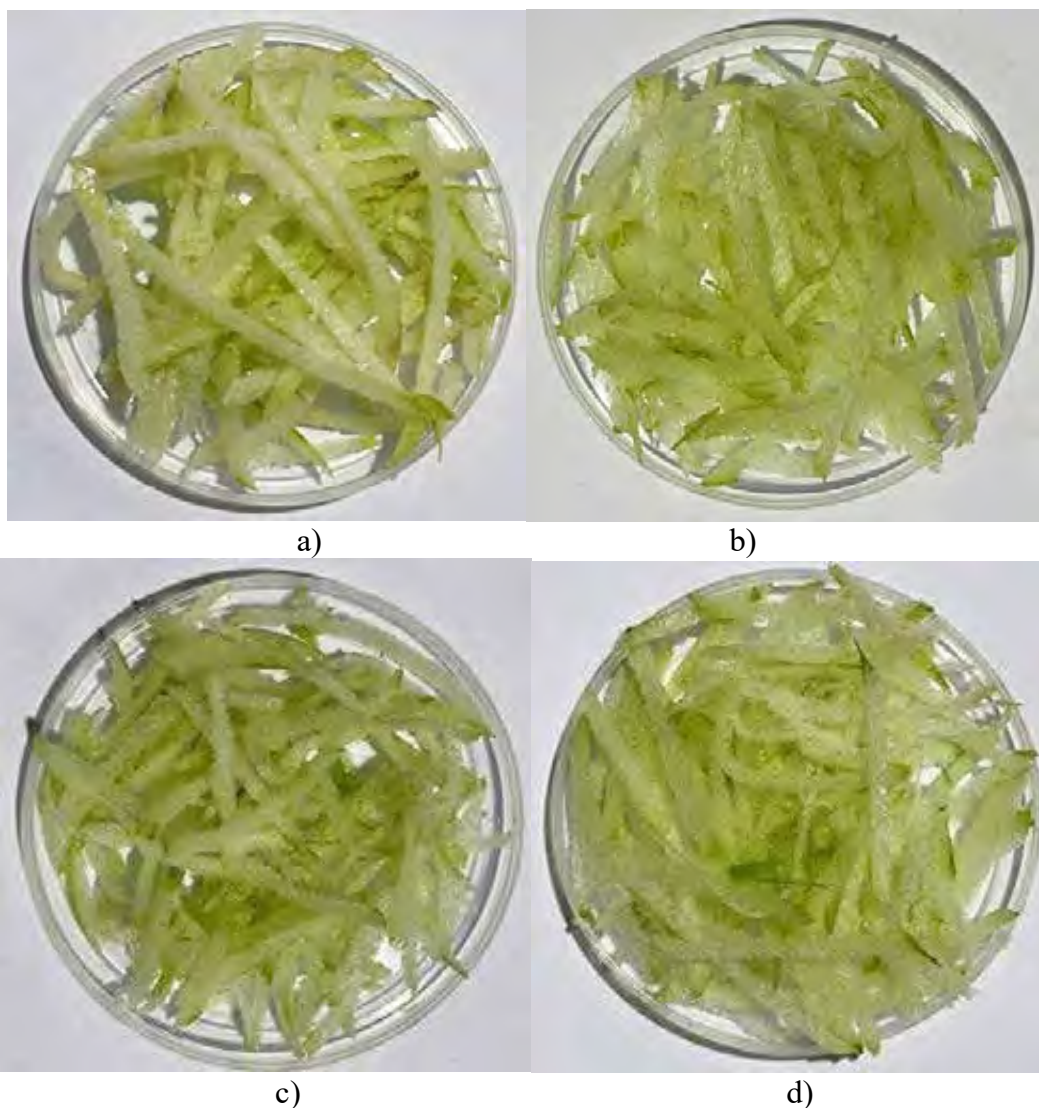
Hình 17. Đĩa cắt chính



Hình 18. Đĩa cắt hoàn chỉnh

Bảng 1. Kết quả khảo nghiệm độ đồng đều của sợi cắt từ thân cây môn bạc hà theo số vòng quay của lưỡi cắt

STT (yếu tố thay đổi)	Tỷ lệ trung bình đạt được trên 03 lần thử thứ nhất (%)	Tỷ lệ trung bình đạt được trên 03 lần thử thứ hai (%)	Tỷ lệ trung bình đạt được trên 03 lần thử thứ ba (%)	Ghi chú
230 vòng/phút	67	69	70	(Còn xơ, chưa đều và năng suất thấp)
317 vòng/phút	72	74	75	(Còn xơ, chưa đều và năng suất thấp)
382 vòng/phút	76	78	80	(hết xơ, đều và đạt năng suất)
452 vòng/phút	84	88	90	(đồng đều và đạt năng suất)



Hình 19. Sản phẩm sợi môn được cắt với lần lượt số vòng quay đĩa cắt thay đổi a) 230, b) 317, c) 382 và d) 452 vòng/phút (trích mẫu cho 03 lần cắt thử thứ ba).

IV. KẾT LUẬN

Trên cơ sở kết quả thiết kế, chế tạo và khảo nghiệm máy cắt sợi cho thân cây môn bạc hà phục vụ món ăn cơm hến truyền thống Huế, bước đầu chúng tôi đã hoàn thành mẫu máy thứ nhất và khảo sát được số vòng quay của đĩa dao cắt phù hợp để cho chất lượng sợi môn bạc hà đồng đều đúng yêu cầu kỹ thuật.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Trần Hữu Dũng (2010), "*Xây dựng quy trình chiết xuất và phương pháp định lượng stigmasterol trong cây ráy (Leucocasia gigantea (Roxb.) C. Koch)*", Tạp chí Khoa học, Đại học Huế, Số 63.
2. Haque J., Zulaikha M. A., Wan Nik W. B., Daoudi W., Berdimurodov E., Zulkifli F. (2023), "*Leucocasia gigantea Extract as Environmentally Benign Corrosion Inhibitor for Aluminum in HCl*", Moroccan Journal of Chemistry, 11(4), pp. 1013-1026.
3. Jeong Mi Moon, Byeong Kook Lee, Byeong Jo Chun (2010), "*Toxicities of raw Leucocasia gigantea*", Human & Experimental Toxicology, 30(10), pp. 1720–

Tuy nhiên, sợi cắt còn bị hạn chế về chiều dài nên chưa đáp ứng được yêu cầu thực tế và làm sao để cho ra sợi cắt dài hơn, máy có thể cắt được sợi theo dọc đường sinh của thân cây môn bạc hà và đây cũng là yêu cầu từ phía hộ dân sản xuất để chúng tôi tiếp tục nghiên cứu và phát triển tiếp tục cho mẫu máy thứ hai trong thời gian tới.

1723.

4. <https://mientay.giadinhonline.vn/cay-mon-nuoc-trong-ky-uc-lang-que-nam-bo-d2439.html>
5. <https://fptshop.com.vn/tin-tuc/dien-may/cay-bac-ha-nau-can-h-chua-175616>
6. Trịnh Chất, Lê Văn Uyển (2006), *Tính toán thiết kế hệ dẫn động cơ khí (Tập I)*, Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.
7. Trịnh Chất, Lê Văn Uyển (2006), *Tính toán thiết kế hệ dẫn động cơ khí (Tập II)*, Nhà xuất bản Giáo dục, Hà Nội.
8. Khuyên T.N. (2006), *Các quá trình và thiết bị cơ bản trong công nghệ thực phẩm*, Nhà xuất bản Đại học Nông nghiệp 1, Hà Nội.

- Ngày gửi bài: 12/08/2026
- Ngày phản biện: 16/09/2026
- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG QUY TRÌNH VÀ HỆ THỐNG THIẾT BỊ CƠ GIỚI HÓA ĐỒNG BỘ CANH TÁC CÀ RỐT

Nguyễn Xuân Thiết¹, Nguyễn Chung Thông^{1*}

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu ứng dụng quy trình canh tác và hệ thống các máy canh tác và thu hoạch cà rốt theo hướng cơ giới hóa đồng bộ quy mô 5 ha. Mô hình được triển khai ở vụ chính trên đất cát pha tại vùng sản xuất chuyên canh cà rốt – xã Tuệ Tĩnh, thành phố Hải Phòng. Quy trình canh tác gồm các khâu chính: Làm đất và lên luống đồng thời với kích thước mặt luống 0,75-0,8 m, chiều cao luống 0,3-0,35 m và bề rộng rãnh trung bình 0,3 m; Gieo hạt 4 hàng và bón phân 2 hàng đồng thời với giống cà rốt Ti103 (100 g/sào) và phân bón tổng hợp NPK (44 kg/sào); Tưới phun mưa đảm bảo độ ẩm thích hợp của đất 60-70%; Thu hoạch gồm 3 giai đoạn: cắt bằm nhỏ lá cà rốt với kích thước trung bình dưới 10 cm, đào phơi bày củ lên mặt luống và thu gom vào túi. Kết quả mô hình cho thấy hệ thống 05 máy làm việc tốt phù hợp với quy trình canh tác đã đề ra. So với canh tác thủ công: chi phí giảm 26,8%, thời gian bằng 1/3 lần, giảm tổn thất và tăng chất lượng củ cà rốt.

Từ khóa: Canh tác cà rốt, Cơ giới hóa đồng bộ, Mô hình sản xuất, Quy trình.

RESEARCH ON THE APPLICATION OF A SYNCHRONIZED MECHANIZATION PROCESS AND EQUIPMENT SYSTEM FOR CARROT CULTIVATION

ABSTRACT

This paper presents the results of research on the application of a cultivation process and a system of machinery for carrot cultivation and harvesting toward synchronized mechanization at a scale of 5 ha. The model was implemented during the main cropping season on sandy loam soil in the specialized carrot production area of Tue Tinh Commune, Hai Phong City, Vietnam. The cultivation process comprised the following main operations: soil preparation and simultaneous bed formation, with a bed surface width of 0.75–0.80 m, bed height of 0.30–0.35 m, and an average furrow width of 0.30 m; sowing four rows of seeds and applying fertilizer in two rows simultaneously, using Ti103 carrot seeds at a rate of 100 g per sao and compound NPK fertilizer at a rate of 44 kg per sao; sprinkler irrigation to maintain an appropriate soil moisture content of 60–70%. The harvesting process consisted of three stages: cutting and chopping carrot leaves to an average length of less than 10 cm; digging and exposing the carrot roots on the bed surface; and collecting the roots into bags. The results of the production model showed that the five-machine system operated effectively and was well suited to the proposed cultivation process. Compared with manual cultivation, the mechanized system reduced production costs by 26.8%, reduced working time to one-third, reduced losses, and improved carrot root quality.

Keywords: Carrot cultivation; synchronized mechanization; production model; cultivation process.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cà rốt (*Daucus carota* L.) là cây rau ăn củ có giá trị kinh tế cao, được trồng tập trung tại nhiều địa phương như Hải Phòng (Hải Dương cũ), Bắc Ninh, Lâm Đồng và một số tỉnh khác. Với nhu cầu tiêu thụ trong nước và xuất khẩu ngày càng tăng, sản xuất cà rốt đang từng bước được mở rộng theo hướng tập trung, quy mô lớn và nâng cao chất lượng sản phẩm. Tuy nhiên, tại nhiều vùng sản xuất, các khâu gieo hạt, chăm sóc, thu hoạch và xử lý sau thu hoạch vẫn chủ yếu thực hiện bằng lao động thủ công hoặc cơ giới hóa đơn lẻ, dẫn đến chi phí sản xuất cao, thiếu lao động thời

vụ, năng suất lao động thấp và khó mở rộng quy mô sản xuất. [1, 2].

Trong những năm gần đây, nhiều thiết bị cơ giới phục vụ sản xuất cà rốt đã được nghiên cứu, chế tạo và ứng dụng cho từng công đoạn riêng biệt. Tuy nhiên, việc áp dụng đồng bộ hệ thống máy từ làm đất, lên luống, gieo hạt kết hợp bón phân, chăm sóc đến thu hoạch trên quy mô sản xuất tập trung còn rất hạn chế. Đặc biệt, chưa có nhiều mô hình thực tiễn đánh giá khả năng phối hợp của toàn bộ hệ thống thiết bị trong một quy trình sản xuất hoàn chỉnh, cũng như hiệu quả kỹ thuật và hiệu quả kinh tế khi ứng dụng cơ giới hóa đồng bộ vào sản xuất cà rốt. [2, 6, 7].

¹ Khoa Cơ – Điện, Học viện Nông nghiệp Việt Nam

Email*: ncthong@vnua.edu.vn

Trong khuôn khổ đề tài độc lập cấp Nhà nước “Nghiên cứu quy trình canh tác và hệ thống thiết bị cơ giới hóa đồng bộ sản xuất cà rốt phù hợp với điều kiện Việt Nam” (mã số ĐTĐL.CN-88/21), nhóm nghiên cứu đã xây dựng quy trình canh tác và hoàn thiện hệ thống thiết bị cơ giới hóa đồng bộ gồm máy làm đất kết hợp lên luống, máy gieo hạt kết hợp bón phân, máy cắt băm thân lá, máy đào củ và máy thu gom cà rốt. Để đánh giá khả năng ứng dụng của các kết quả nghiên cứu trong điều kiện sản xuất thực tế, mô hình sản xuất cà rốt quy mô 5 ha đã được triển khai tại vùng chuyên canh cà rốt xã Tuệ Tĩnh, thành phố Hải Phòng.

Bài báo trình bày kết quả triển khai mô hình sản xuất cà rốt quy mô 5 ha ứng dụng quy trình canh tác và hệ thống cơ giới hóa đồng bộ; đánh giá hiệu quả kỹ thuật của hệ thống thiết bị, khả năng áp dụng trong điều kiện sản xuất thực tế và hiệu quả kinh tế của mô hình, làm cơ sở cho việc hoàn thiện quy trình kỹ thuật, chuyển giao công nghệ và nhân rộng cơ giới hóa đồng bộ trong sản xuất cà rốt tại Việt Nam.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là mô hình sản xuất cà rốt ứng dụng quy trình canh tác và hệ thống thiết bị cơ giới hóa đồng bộ. Hệ thống thiết bị gồm: máy làm đất kết hợp lên luống; máy gieo hạt kết hợp bón phân; máy cắt băm thân lá; máy đào củ và máy thu gom cà rốt.

Mô hình được triển khai trên diện tích 5 ha tại vùng chuyên canh cà rốt xã Tuệ Tĩnh, thành phố Hải Phòng trong vụ sản xuất năm 2025 với giống cà rốt Ti103. Sản xuất đối chứng được thực hiện theo phương thức canh tác truyền thống của địa phương trên cùng điều kiện đất đai, giống, thời vụ và chế độ chăm sóc.

2.2. Nội dung nghiên cứu

+ Triển khai mô hình sản xuất cà rốt quy mô 5 ha ứng dụng quy trình canh tác

và hệ thống cơ giới hóa đồng bộ.

+ Đánh giá khả năng làm việc của hệ thống thiết bị cơ giới hóa trong điều kiện sản xuất thực tế.

+ Đánh giá các chỉ tiêu sinh trưởng, năng suất và chất lượng sản phẩm của mô hình.

+ Đánh giá hiệu quả kinh tế của mô hình so với phương thức sản xuất truyền thống.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Mô hình sản xuất được triển khai theo quy trình canh tác và hệ thống cơ giới hóa đồng bộ do nhóm nghiên cứu xây dựng. Các chỉ tiêu theo dõi bao gồm thời gian thực hiện các công đoạn sản xuất, nhu cầu lao động, lượng giống sử dụng, các chỉ tiêu sinh trưởng, năng suất, chất lượng sản phẩm và hiệu quả kinh tế của mô hình.

Các chỉ tiêu sinh trưởng và năng suất được xác định theo phương pháp điều tra đồng ruộng thông dụng. Hiệu quả kinh tế được đánh giá thông qua các chỉ tiêu chi phí sản xuất, doanh thu, lợi nhuận và tỷ suất lợi nhuận, đồng thời so sánh với phương thức sản xuất truyền thống.

Các số liệu thu thập được tổng hợp, xử lý bằng phương pháp thống kê mô tả và trình bày dưới dạng bảng, biểu để phân tích, đánh giá hiệu quả của mô hình.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Quy trình canh tác và hệ thống cơ giới hóa đồng bộ áp dụng trong mô hình

Trên cơ sở quy trình canh tác và hệ thống thiết bị đã được nghiên cứu trong khuôn khổ đề tài ĐTĐL.CN-88/21, mô hình sản xuất quy mô 5 ha được triển khai theo hướng cơ giới hóa đồng bộ tất cả các khâu sản xuất, từ chuẩn bị đất đến thu hoạch. Các công đoạn được bố trí liên hoàn nhằm bảo đảm sự phù hợp giữa yêu cầu nông học với khả năng làm việc của từng loại máy, đồng thời hạn chế tối đa các thao tác thủ công trong quá trình sản xuất.



Hình 1. Hệ thống thiết bị cơ giới hóa đồng bộ sử dụng trong mô hình
a) Máy làm đất lên luống, b) Máy gieo hạt cà rốt kết hợp bón phân, c) Máy cắt băm lá cà rốt, d) Máy đào củ cà rốt, e) Máy thu gom củ

Quy trình sản xuất gồm các công đoạn chính được thể hiện trong hình 1: chuẩn bị đất và lên luống; gieo hạt kết hợp bón phân; chăm sóc và tưới nước; cắt bấm thân lá; đào củ; thu gom và vận chuyển sản phẩm. Mỗi công đoạn đều được thực hiện bằng thiết bị chuyên dùng, bảo đảm tính liên tục của dây chuyền cơ giới hóa.

Khâu làm đất và lên luống được thực hiện bằng máy lên luống chuyên dùng. Sau khi hoàn thành, mặt luống đạt chiều rộng 0,75–0,80 m, chiều cao 0,30–0,35 m, chiều rộng rãnh khoảng 0,30 m, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật đối với phương pháp gieo bốn hàng và tạo điều kiện thuận lợi cho các máy làm việc trong các công đoạn tiếp theo.

Sau khi chuẩn bị luống, máy gieo hạt kết hợp bón phân được sử dụng để thực hiện đồng thời hai công đoạn gieo hạt và bón phân. Việc kết hợp hai nguyên công trong một lần làm việc giúp giảm số lượt máy đi trên đồng ruộng, hạn chế hiện tượng nén đất, đồng thời nâng cao năng suất lao động và bảo đảm độ đồng đều về khoảng cách gieo cũng như lượng phân

bón. Máy sử dụng công nghệ gieo khí động học gieo hạt nhỏ và thô. [6, 8].

Trong giai đoạn sinh trưởng, mô hình sử dụng hệ thống tưới phun mưa nhằm duy trì độ ẩm đất thích hợp cho cây cà rốt phát triển. Việc chủ động nguồn nước góp phần nâng cao tỷ lệ mọc, tạo điều kiện sinh trưởng đồng đều và hạn chế ảnh hưởng của điều kiện thời tiết trong giai đoạn đầu sau gieo. [3-5].

Khi cây đạt thời điểm thu hoạch, quá trình thu hoạch được thực hiện theo ba bước liên tiếp gồm: cắt bấm thân lá, đào củ và thu gom sản phẩm. Máy cắt bấm thân lá cắt nhỏ phần thân lá trên mặt luống, tạo điều kiện thuận lợi cho máy đào củ làm việc ổn định, đồng thời phần thân lá sau khi cắt được giữ lại trên đồng ruộng để phục vụ xử lý làm phân hữu cơ hoặc các mục đích sử dụng khác. [9, 10].

Tiếp theo, máy đào củ thực hiện nâng và tách củ ra khỏi đất, đưa củ lên bề mặt luống với tỷ lệ sót và tỷ lệ tổn thương thấp. Sau khi đào, máy thu gom tiến hành thu gom củ vào bao chứa, giảm đáng kể khối lượng lao động thủ công trong khâu thu hoạch. [9, 10].

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật chính của hệ thống thiết bị

Tên máy/thiết bị	Thông số kỹ thuật chính
Máy làm đất lên luống	- Công nghệ thực hiện: phay kết hợp tạo hình luống thông qua khuôn tạo hình. - Kích thước (D×R×C) mm: 1500 x 1300 x 1100 - Bề rộng đường phay mm: 1300 - Nguồn động lực: 40-60HP
Máy gieo hạt cà rốt kết hợp bón phân	- Công nghệ thực hiện: gieo khí động học (bằng độc quyền sáng chế năm 2023 theo QĐ số 9818w/QĐ-SHTT năm 2023); bón phân kiểu trực cuốn. - Gieo hạt: số hàng 3-4; số hạt/hốc 1-3; chiều sâu gieo hạt 10-20 mm; - Bón phân: số hàng 2; lượng phân bón 600-900 kg/ha - Nguồn động lực: 40-60HP
Máy cắt bấm lá cà rốt	- Công nghệ thực hiện: Hai trống quay ngược chiều lắp hệ thống dao cắt và bấm đồng thời. Chiều cao cắt có thể điều chỉnh qua cụm trống lăn tựa mềm trên mặt luống. - Kích thước (D×R×C) mm: 1400 x 1200 x 1200 - Bộ phận bấm: 2 trống bấm, cấu tạo nhiều đĩa dao xếp lớp, dao cắt dạng tam giác-răng cưa - Khả năng điều chỉnh chiều cao cắt: 1-20cm; chiều dài đoạn bấm 5-8cm; - Nguồn động lực: 40-60HP
Máy đào củ cà rốt	- Công nghệ thực hiện: đào tích cực và sử dụng hệ thống xích tải giữ và phân ly đất. - Kích thước (D×R×C) mm: 2300x1500x1400 - Bộ phận làm việc chính: Bộ phận đào theo nguyên lý đào tích cực; Bộ phận giữ gồm hai xích tải phân ly + bộ phận gom - Nguồn động lực: 40-60HP

Máy thu gom củ cà rốt	- Công nghệ thực hiện: Gom → Nâng → Phân ly sơ bộ → Làm sạch tạp chất (cỏ thân lá cây) và đất mềm và đất kích thước nhỏ → Nhặt cục đất lớn → Gom sản phẩm vào bao kiện. - Kích thước (D×R×C) mm: 3520 x 1200 x 1760 - Bộ phận làm việc: Cụm gom; xích tải phân ly; cụm rulo làm sạch; cụm rulo nhặt đất; bộ phận gom vào bao kiện - Nguồn động lực: 50-60HP
-----------------------	--

3.2. Kết quả theo dõi và phân tích quá trình sinh trưởng của cây

Theo dõi thời gian sinh trưởng của giống cà rốt Ti103 trồng theo 2 quy trình trồng trọt

khác nhau cho thấy không có sự khác nhau về thời gian sinh trưởng qua các giai đoạn của giống.

Bảng 2: Thời gian hoàn thành các giai đoạn sinh trưởng phát triển của giống Ti103

TT	Công thức	Thời gian qua các giai đoạn sinh trưởng (NSG)		
		Gieo hạt đến nảy mầm	Gieo hạt đến ra lá thật	Gieo hạt đến thu hoạch
1	Mô hình	4	8	120
2	Đối chứng	4	8	120

Ghi chú: NSG: Ngày sau gieo

Bảng 3. Đặc điểm hình thái lá của cà rốt tại mô hình

TT	Công thức	Dài lá	Màu sắc lá	Dạng lá
1	Mô hình	58,6	Xanh sáng	Xòe mỏng
2	Đối chứng	55,75	Xanh sáng	Xòe mỏng

Bảng 4. Mức độ nhiễm một số loại sâu bệnh hại chính trên các công thức thí nghiệm

TT	Công thức	Bệnh lở cổ rễ (%)	Bệnh Phấn trắng (cấp bệnh)	Bệnh thối nhũn (%)	Bệnh cháy lá (cấp bệnh)	Ghẽ củ (%)
1	Mô hình	0	1	0,42	1	0
2	Đối chứng	1,67	2	2,02	2	0

Bảng 5. Năng suất củ của giống cà rốt tại các công thức thí nghiệm

TT	Công thức	KLTB củ (g)	Tổng số (tấn/ha)	Size S		Size M		Size L		Tổng năng suất củ Size M+L (tấn/ha)
				Khối lượng (tấn/ha)	Tỷ lệ (%)	Khối lượng (tấn/ha)	Tỷ lệ (%)	Khối lượng (tấn/ha)	Tỷ lệ (%)	
1	Mô hình	206,43	73,54	3,75	5,10	14,17	19,26	55,63	75,64	69,79
2	Đối chứng	186,08	66,85	3,89	5,82	14,44	21,61	48,52	72,58	62,96

Về đặc điểm hình thái củ, chiều dài củ ở mô hình áp dụng kết quả của đề tài đạt 20,2 cm, cao hơn so với đối chứng (19,9 cm), cho thấy trong điều kiện áp dụng mô hình áp dụng kết quả của đề tài do luống được làm với độ sâu cao hơn, cây cà rốt có khả năng sinh trưởng tốt hơn, giúp củ phát triển dài hơn. Tuy nhiên, đường kính củ ở mô hình (5,08 cm) lại thấp hơn nhẹ so với đối chứng (5,11 cm). Sự chênh lệch này không đáng kể và cho thấy kích thước củ giữa hai công thức tương đối tương đồng. Đường kính lõi củ của mô

hình áp dụng kết quả của đề tài và đối chứng gần như không có sự khác biệt, đều đạt 2,36 cm. Tương tự, chỉ số đường kính lõi củ/đường kính củ dao động từ 0,46–0,47, phản ánh tỷ lệ lõi trong củ ổn định giữa hai công thức. Chỉ số này tương đối phù hợp đối với cà rốt thương phẩm, vì lõi củ không quá lớn sẽ góp phần nâng cao chất lượng ăn tươi.

Hàm lượng chất hòa tan tổng số (°Brix) của cà rốt trong mô hình áp dụng kết quả của đề tài đạt 8,65, cao hơn so với đối chứng (8,50). Điều này cho thấy trong điều kiện mô

hình áp dụng kết quả của đề tài, củ cà rốt có xu hướng tích lũy đường tốt hơn, góp phần làm tăng độ ngọt và giá trị cảm quan của sản phẩm. Sự gia tăng nhẹ về °Brix có thể liên quan đến điều kiện canh tác hoặc chế độ dinh dưỡng trong mô hình áp dụng kết quả của đề tài, giúp cây quang hợp và tích lũy chất khô hiệu quả hơn.

Về màu sắc, củ vỏ củ và lõi củ ở hai công thức đều có màu vàng cam, tuy nhiên ở mô hình củ có màu sắc đậm hơn so với đối chứng. Màu sắc của củ cà rốt thường liên quan đến hàm lượng sắc tố carotenoid, đặc biệt là β -carotene là những chất rất có ý nghĩa về mặt dược lý được người tiêu dùng rất quan tâm.

Đánh giá cảm quan cho thấy củ cà rốt trong mô hình áp dụng kết quả của đề tài có vị ngọt, giòn, trong khi ở đối chứng củ có vị ngọt và giòn nhưng hơi cứng. Điều này cho thấy củ cà rốt trong mô hình do được sử dụng nhiều phân hữu cơ nên chất lượng củ ngon hơn độ Brix cao hơn, khẩu vị ăn giòn ngọt hơn và màu sắc củ đậm hơn. Sự khác biệt này cho thấy điều kiện sinh trưởng và dinh dưỡng được cung cấp bởi quy trình nghiên cứu phù hợp hơn so với kỹ thuật canh tác truyền thống do người dân áp dụng giúp cải thiện năng suất cũng như chất lượng củ.

3.3. Đánh giá hiệu quả kỹ thuật của hệ thống cơ giới hóa đồng bộ

Kết quả triển khai mô hình cho thấy hệ thống cơ giới hóa đồng bộ hoạt động ổn định

và phù hợp với quy trình canh tác đã xây dựng. Các thiết bị trong hệ thống được bố trí theo trình tự hợp lý, bảo đảm tính liên tục giữa các công đoạn, giảm thời gian chờ đợi và hạn chế sự phụ thuộc vào lao động thủ công.

Qua đo đạc thực tế tại mô hình, các chỉ tiêu kỹ thuật đạt được như sau:

Chất lượng đất và luống: Độ nhỏ của đất sau phay đạt tỷ lệ hạt $< 5\text{mm}$ ở mức rất tốt ($> 80\%$), tạo điều kiện tối ưu cho hạt nảy mầm. Luống có độ chắc chắn cao, độ lún sau 24 giờ chỉ $\leq 10\%$.

Độ chính xác gieo trồng: Tỷ lệ gieo chính xác đạt $\geq 92\%$. Nhờ gieo bằng máy, tỷ lệ nảy mầm tăng 5–15% so với phương pháp bắt úp thủ công.

Chất lượng thu hoạch: Tỷ lệ phơi bày củ sau đào đạt mức cao $> 80\%$, củ không bị sót dưới đất.

Tỷ lệ củ hư hỏng cơ học (trầy xước, gãy) rất thấp, chỉ từ 0,8 – 1,5%.

Độ sạch của củ trong bao kiện đạt 95 – 98%, đáp ứng ngay yêu cầu sơ chế.

Hệ thống vận hành liên hoàn, đồng bộ, ít xảy ra sự cố lớn làm gián đoạn sản xuất.

Bảng 7 và bảng 8 cho thấy bức tranh tổng thể việc ứng dụng cơ giới hóa giữa phương pháp canh tác truyền thống và phương pháp ứng dụng hệ thống máy của đề tài cũng như mức độ cải thiện của việc ứng dụng cơ giới hóa đồng bộ.

Bảng 6. Bài toán so sánh chi phí hai mô hình canh tác cơ giới khâu làm đất và gieo

Tiêu chí so sánh	Phương pháp truyền thống	Phương pháp ứng dụng hệ thống máy của đề tài	Mức cải thiện
Làm đất	Phay đất bằng máy kéo 35 Hp, 2 lượt	Phay đất bằng máy kéo 42 Hp, 2 lượt	Năng suất cao hơn, ổn định hơn
Lên luống	Máy kéo 35 Hp, bề rộng làm việc 1,72 m	Máy kéo 42 Hp + thiết bị lên luống đồng bộ	Luống đồng đều, phù hợp cơ giới hóa
Gieo hạt	Gieo bằng dụng cụ bắt úp, thủ công	Máy gieo hạt kết hợp bón phân	Gieo chính xác, đồng đều
Thời gian thực hiện 1 ha	96 giờ (12 công lao động)	8,32 giờ (1 công lao động)	Giảm 91% thời gian
Chi phí sản xuất	~4.096.400 đ/ha	~1.913.008 đ/ha	Giảm 53% chi phí
Lao động sử dụng	~12 công/ha	~1 công/ha	Giảm 91% công
Lượng giống sử dụng	~3,6 kg/ha	~1,75 kg/ha	Tiết kiệm 40–50% giống nhờ gieo chính xác

Tiến độ sản xuất	3–5 ngày/ha	4–6 giờ/ha	Rút ngắn 80–90% thời gian
Độ đồng đều ruộng	Phụ thuộc tay nghề lao động	Luồng và mật độ gieo đồng đều	Thuận lợi chăm sóc và thu hoạch
Năng suất cây trồng	Mức trung bình	Tăng khoảng 5–10%	Cải thiện năng suất
Điều kiện lao động	Lao động nặng, cường độ cao	Chủ yếu vận hành máy	Giảm rủi ro và sức lao động

Bảng 7. Đối sánh phương pháp thu hoạch cà rốt

Tiêu chí	Phương pháp truyền thống	Phương pháp ứng dụng hệ thống máy
Đặc điểm sản xuất	Chủ yếu sử dụng lao động thủ công	Áp dụng hệ thống máy gồm: máy cắt băm lá, máy đào củ và máy thu gom
Quy trình thu hoạch	Nhổ củ → cắt lá → làm sạch → vận chuyển	Cắt băm lá → đào củ → thu gom và đóng gói
Thời gian thu hoạch 1 ha	2 – 3 ngày	7,5 – 8 giờ
Số lao động cần	15 – 20 người	4 người (3 lái máy + 1 đóng gói)
Năng suất lao động	Thấp, phụ thuộc sức người	Cao, hoạt động liên tục và ổn định
Tổn thất sau thu hoạch	5 – 8%	< 3%
Chất lượng củ sau thu hoạch	Sạch, đảm bảo yêu cầu sơ chế	Sạch, đảm bảo yêu cầu sơ chế
Khả năng mở rộng sản xuất	Khó mở rộng do phụ thuộc lao động thời vụ	Có thể áp dụng cho sản xuất quy mô lớn
Tính chủ động sản xuất	Bị ảnh hưởng bởi thiếu lao động	Chủ động tiến độ thu hoạch

So với phương thức sản xuất truyền thống, mô hình cơ giới hóa đã giảm đáng kể nhu cầu lao động trực tiếp trong các công đoạn nặng nhọc như gieo hạt và thu hoạch. Đồng thời, việc thực hiện các công đoạn đúng thời vụ góp phần nâng cao tính đồng đều của cây trồng, giảm tổn thất sau thu hoạch và tạo tiền đề nâng cao hiệu quả kinh tế của mô hình.

Nhìn chung, kết quả nghiên cứu khẳng định rằng hệ thống thiết bị cơ giới hóa đồng bộ được xây dựng trong khuôn khổ đề tài có tính khả thi cao, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và có khả năng ứng dụng trong sản xuất cà rốt quy mô tập trung tại các vùng chuyên canh ở Việt Nam.

3.4. Đánh giá hiệu quả kinh tế của mô hình

Hiệu quả kinh tế của mô hình được đánh giá thông qua việc so sánh với phương thức sản xuất truyền thống đang áp dụng tại địa phương trên các chỉ tiêu về chi phí sản xuất, doanh thu, lợi nhuận và thời gian thực hiện

toàn bộ quy trình sản xuất. Kết quả cho thấy việc áp dụng đồng bộ quy trình canh tác và hệ thống cơ giới hóa đã tạo ra những cải thiện rõ rệt cả về hiệu quả sử dụng nguồn lực và hiệu quả kinh tế trên đơn vị diện tích.

Chi phí sản xuất của mô hình giảm đáng kể so với phương thức truyền thống nhờ giảm mạnh nhu cầu lao động ở các công đoạn gieo hạt và thu hoạch. Mặc dù chi phí đầu tư cho hệ thống thiết bị và sử dụng phân hữu cơ có tăng ở một số hạng mục, nhưng phần chi phí tăng thêm này được bù đắp bởi việc giảm đáng kể chi phí nhân công, lượng giống sử dụng và số lần thực hiện các nguyên công ngoài đồng ruộng. Đặc biệt, việc sử dụng máy gieo hạt kết hợp bón phân đã thay thế gần như hoàn toàn lao động thủ công trong khâu gieo, đồng thời nâng cao độ chính xác của mật độ gieo, góp phần tiết kiệm giống và giảm công tía sau này. Kết quả tổng hợp cho thấy tổng chi phí sản xuất của mô hình đạt khoảng **118,7 triệu đồng/ha**, thấp hơn khoảng **49,1 triệu**

đồng/ha so với phương thức truyền thống, nâng cao năng suất lao động mà còn làm tương ứng mức giảm khoảng **26,8%**. Điều giảm đáng kể chi phí đầu vào của quá trình này cho thấy cơ giới hóa đồng bộ không chỉ sản xuất.

Bảng 8. Bảng so sánh chi phí vật tư nông nghiệp và sản xuất

Khoản mục	Canh tác truyền thống (VNĐ/ha)	Canh tác theo quy trình đề tài (VNĐ/ha)
Thuốc BVTV	5.800.000	5.800.000
Phân bón	36.675.000	39.800.000
Rơm phủ	8.000.000	8.000.000
Công phun thuốc BVTV	8.000.000	8.000.000
Công tỉa cây	22.000.000	14.000.000
Tổng chi phí	80.475.000	75.600.000

Bảng 9. Chi phí khâu làm đất, gieo hạt

Khâu sản xuất	Phương pháp truyền thống	Chi phí (VNĐ/ha)	Phương pháp dùng hệ thống máy	Chi phí (VNĐ/ha)	Chênh lệch (VNĐ/ha)
Phay đất (2 lượt)	Máy kéo 35 Hp	763.100	Máy kéo 42 Hp	850.226	87.126
Lên luống	Máy kéo 35 Hp	333.300	Máy lên luống đồng bộ	531.391	198.091
Gieo hạt	Gieo thủ công (12 công)	3.000.000	Máy gieo hạt kết hợp bón phân	531.391	-2.468.609
Chi phí hạt giống	~3,6 kg/ha	16.200.000	~1,75 kg/ha	7.875.000	-8.325.000
Công tưới + khấu hao thiết bị tưới	Hệ thống thiết bị dùng 5 năm	30.000.000	Hệ thống thiết bị dùng 5 năm	30.000.000	-
Tổng chi phí sản xuất		50.296.400		39.788.008	

Bảng 10. Chi phí thu hoạch cà rốt

Khoản mục chi phí	Phương pháp thủ công	Phương pháp cơ giới hóa
Nhổ củ	12,5 – 20,6 triệu đ/ha	Thực hiện bằng máy đào củ
Cắt lá và làm sạch	7,5 – 8,3 triệu đ/ha	Thực hiện bằng máy cắt băm lá
Vận chuyển, bốc xếp	2,5 – 3,9 triệu đ/ha	Thực hiện bằng máy thu gom
Lái máy	Không có	1,65 triệu đ/ha
Nhân công đóng gói	Không tách riêng	0,50 triệu đ/ha
Khấu hao máy móc	Không có	0,60 triệu đ/ha
Nhiên liệu	Không có	0,54 triệu đ/ha
Tổng chi phí/ha	27 – 28 triệu đồng	3,29 triệu đồng

Hiệu quả kinh tế của mô hình không chỉ đến từ việc giảm chi phí mà còn được nâng cao nhờ cải thiện năng suất và chất lượng sản phẩm. Kết quả theo dõi cho thấy năng suất củ đạt **73,54 tấn/ha**, cao hơn khoảng **10%** so với phương thức canh tác truyền thống. Đồng thời, tỷ lệ củ kích cỡ M và L cao hơn đã làm tăng giá trị thương phẩm của sản phẩm. Đây là kết quả của việc bảo đảm mật độ gieo đồng đều, sinh trưởng ổn định và giảm tổn thất trong thu hoạch nhờ hệ thống

máy hoạt động liên hoàn. Vì vậy, doanh thu của mô hình đạt **585,69 triệu đồng/ha**, cao hơn **62,37 triệu đồng/ha** so với đối chứng, trong khi lợi nhuận thuần đạt **466,99 triệu đồng/ha**, cao hơn **99,37 triệu đồng/ha**, tương ứng tăng khoảng **21,3%**. Những kết quả này chứng minh rằng cơ giới hóa đồng bộ không chỉ giúp giảm chi phí mà còn nâng cao giá trị kinh tế của sản phẩm thông qua việc cải thiện đồng thời năng suất và chất lượng thương phẩm.

Bảng 11. Hiệu quả kinh tế của mô hình sản xuất cà rốt

Chỉ tiêu	Đơn vị	Mô hình ứng dụng kết quả đề tài	Đối chứng (truyền thống)
Năng suất tổng	tấn/ha	73,54	66,85
Doanh thu size M	triệu đồng/ha	85,02	86,64
Doanh thu size L	triệu đồng/ha	500,67	436,68
Tổng thu	triệu đồng/ha	585,69	523,32
Tổng chi phí sản xuất	triệu đồng/ha	118,7	155,7
Lợi nhuận thuần	triệu đồng/ha	466,99	367,62
Chênh lệch lợi nhuận	triệu đồng/ha	99,37	—

Một lợi ích nổi bật khác của mô hình là khả năng rút ngắn đáng kể thời gian sản xuất. Tổng thời gian thực hiện toàn bộ quy trình giảm từ khoảng 129,5 – 137,5 giờ/ha xuống còn **21–22 giờ/ha**, tương đương giảm khoảng **84%**. Trong đó, khâu gieo hạt có mức cải thiện lớn nhất khi thời gian thực hiện giảm trên **91%**, còn khâu thu hoạch giảm khoảng **50–65%** nhờ sử dụng đồng

bộ máy cắt băm thân lá, máy đào củ và máy thu gom. Việc rút ngắn thời gian sản xuất không chỉ nâng cao năng suất lao động mà còn giúp người sản xuất chủ động hơn trong bố trí thời vụ, hạn chế rủi ro do điều kiện thời tiết bất lợi và giảm sự phụ thuộc vào nguồn lao động thời vụ. Đây là lợi thế đặc biệt quan trọng đối với các vùng sản xuất cà rốt tập trung quy mô lớn.

Bảng 12. Bảng so sánh thời gian triển khai mô hình (1ha)

Công đoạn	Phương pháp truyền thống	Phương pháp ứng dụng hệ thống máy	Mức rút ngắn
Làm đất	~3,5 giờ	~3,0 giờ	Tương đương
Lên luống	~4,0 giờ	~2,0 giờ	↓ 50%
Gieo hạt + bón phân	~96 giờ	~3,32 giờ	↓ ~91%
Chăm sóc (tỉa cây, bón phân,...)	~10 giờ	~6 giờ	↓ ~40%
Thu hoạch	16 – 24 giờ (2-3 ngày)	7,5 – 8 giờ	↓ ~50–65%
Tổng thời gian thực hiện 1 ha	~129,5 – 137,5 giờ	~21 – 22 giờ	Giảm ~84%

Bảng 13. Quy đổi tiến độ sản xuất

Chỉ tiêu	Truyền thống	Ứng dụng hệ thống máy
Thời gian hoàn thành 1 ha	~5–6 ngày	~2 ngày
Lao động cần huy động	~15–18 nhân công	~4–5 người vận hành
Mức rút ngắn tiến độ		Nhanh hơn khoảng 2,5–3 lần

Tổng hợp các kết quả phân tích cho thấy mô hình sản xuất ứng dụng quy trình canh tác và hệ thống cơ giới hóa đồng bộ đã mang lại hiệu quả rõ rệt cả về kỹ thuật, tổ chức sản xuất và kinh tế. Hệ thống máy không chỉ góp phần giảm chi phí sản xuất, giảm nhu cầu lao động và rút ngắn thời gian thực hiện mà còn nâng cao năng suất, cải

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và triển khai thành công mô hình sản xuất cà rốt quy mô 5 ha ứng dụng quy trình canh tác và hệ thống cơ giới hóa đồng bộ tại vùng chuyên canh xã Tuệ Tĩnh, thành phố Hải Phòng. Mô hình đã kiểm chứng tính phù hợp của quy trình kỹ

thuật và khả năng làm việc của hệ thống thiết bị trong điều kiện sản xuất thực tế. Những kết quả này khẳng định tính khả thi của việc ứng dụng cơ giới hóa đồng bộ trong sản xuất cà rốt quy mô lớn và là cơ sở khoa học quan trọng để chuyển giao, nhân rộng mô hình tại các vùng chuyên canh có điều kiện tương tự.

thuật và khả năng làm việc của hệ thống thiết bị trong điều kiện sản xuất thực tế.

Hệ thống cơ giới hóa đồng bộ gồm các thiết bị làm đất kết hợp lên luống, máy gieo hạt kết hợp bón phân, máy cắt băm thân lá, máy đào củ và máy thu gom cà rốt hoạt động ổn định, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của từng công đoạn và bảo đảm tính liên hoàn trong toàn bộ chuỗi

sản xuất. Việc áp dụng đồng bộ các thiết bị đã nâng cao mức độ cơ giới hóa, giảm đáng kể lao động thủ công, bảo đảm tiến độ sản xuất và nâng cao năng suất lao động. Kết quả theo dõi cho thấy cây cà rốt sinh trưởng tốt, năng suất đạt **73,54 tấn/ha**, cao hơn khoảng **10%** so với phương pháp canh tác truyền thống; tỷ lệ củ thương phẩm **size M + L đạt 69,79 tấn/ha**, đồng thời chất lượng củ được cải thiện với độ ngọt và màu sắc tốt hơn.

Về hiệu quả kỹ thuật và kinh tế, mô hình đã chứng minh ưu thế rõ rệt so với phương thức sản xuất truyền thống. Chi phí sản xuất giảm khoảng **26,8%** (từ khoảng **157,8 triệu đồng/ha** xuống còn **118,7 triệu đồng/ha**), lợi nhuận thuần đạt **466,99 triệu đồng/ha**, cao hơn **99,37 triệu đồng/ha** (tương đương khoảng **21,3%**). Tổng thời gian thực hiện toàn bộ quy trình sản xuất giảm khoảng **84%**, từ khoảng 129,5 – 137,5 **giờ/ha** xuống còn **21–22 giờ/ha**, trong đó riêng khâu gieo hạt

giảm trên **91%** thời gian và khâu thu hoạch giảm khoảng **50–65%**. Đồng thời, nhu cầu lao động trực tiếp, lượng giống sử dụng và tổn thất sau thu hoạch đều giảm đáng kể, góp phần nâng cao hiệu quả sản xuất và tính chủ động trong tổ chức sản xuất quy mô lớn.

Kết quả nghiên cứu khẳng định tính khả thi và hiệu quả của mô hình cơ giới hóa đồng bộ trong sản xuất cà rốt tại Việt Nam. Quy trình canh tác kết hợp hệ thống máy chuyên dùng không chỉ nâng cao năng suất, chất lượng và hiệu quả kinh tế mà còn tạo tiền đề quan trọng cho việc chuyển đổi từ sản xuất thủ công sang sản xuất cơ giới hóa quy mô lớn. Mô hình có khả năng chuyển giao và nhân rộng tại các vùng chuyên canh cà rốt có điều kiện tương tự, góp phần thúc đẩy cơ giới hóa sản xuất rau màu, giảm phụ thuộc vào lao động thời vụ, nâng cao giá trị gia tăng và hướng tới nền nông nghiệp hiện đại, bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Dương Kim Thoa, Trần Thị Hồng, Nguyễn Xuân Điệp (2025). *Nghiên cứu tuyển chọn các giống cà rốt phù hợp cho xuất khẩu tại đồng bằng sông Hồng*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam, số 07 (165), 2025.
2. Nguyễn Xuân Thiết (2021–2026). *Nghiên cứu quy trình canh tác và hệ thống thiết bị cơ giới hóa đồng bộ sản xuất cà rốt phù hợp với điều kiện Việt Nam*. Đề tài khoa học và công nghệ độc lập cấp quốc gia, mã số ĐTĐL.CN-88/21.
3. Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2001). *Tuyển tập tiêu chuẩn nông nghiệp Việt Nam (các quy trình sản xuất rau an toàn)*. Hà Nội.
4. Bộ Khoa học và Công nghệ (2017). *TCVN 11892-1:2017 – Thực hành nông nghiệp tốt (VietGAP) – Phần 1: Trồng trọt*. Hà Nội.
5. Viện Nghiên cứu Rau quả (2026). *Quy trình canh tác cà rốt đạt chuẩn VietGAP*. Quyết định số 56/QĐ-VRQ-KH.
6. Yang L., Wang F.Y., Wang H.T. (2021). *Analysis of Carrot Seeding Technology and Equipment*. Journal of Agricultural Mechanization Research, 43(12), 1–8, 16. DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2021.12.001.

7. Liu Z.B., Wang J.S., Dai Q.X., Zhang J.X., Zhao G.Q. (2021). *Experimental Study on Geometric Parameters and Mechanical Properties of Carrot Based on Digging-pulling Harvesting*. Journal of Agricultural Mechanization Research, 43(9), 176–179, 185. DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2021.09.032.
8. Dokumacı K.Y., Haciseferoğulları H. (2023). *Determination of Effects the Different Holes Position in the Vacuum Discs of Pneumatic Precision Vegetable Planters on Emergence and Uniform Plant Distribution in Black Carrot Production*. Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences, 37(3).
9. Gaadhe S.K., Tiwari V.K. (2022). *Carrot Harvesting Methods: A Review*. International Journal of Plant & Soil Science, 34(10), 7–16. DOI: 10.9734/ijpss/2022/v34i1030918.
10. Gaadhe S.K., Chavda S.K., Bandhiya R.D., Gojiya D.K., Chavda D.B. (2023). *Optimizing Carrot Harvesting Machine Design: Incorporating Soil and Crop Parameters*. International Journal of Environment and Climate Change, 13(10), 3680–3689. DOI: 10.9734/ijec/2023/v13i103039.

- Ngày gửi bài: 12/08/2026
- Ngày phản biện: 16/09/2026
- Ngày duyệt đăng: 26/09/2026

CHẾ TẠO BỘT PHÁT QUANG $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$: Sm^{3+} GIẢI PHÁP ĐIỀU KHIỂN PHỔ ÁNH SÁNG CHO NÔNG NGHIỆP THÔNG MINH

TS. Đỗ Thanh Tiến^{1*}, ThS. Đào Lê Minh Tuấn¹

TÓM TẮT

Vật liệu phát quang nhóm calcium aluminosilicate có công thức mạng nền $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ đơn pha tạp ion đất hiếm Sm^{3+} đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp phản ứng pha rắn nhiệt độ cao. Phân tích cấu trúc thông qua giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) xác nhận vật liệu đạt trạng thái đơn pha với cấu trúc tinh thể tứ giác (tetragonal) ổn định. Khảo sát tính chất quang học cho thấy phổ phát quang (PL) của hệ mẫu $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$: Sm^{3+} đặc trưng bởi các vạch phát xạ hẹp, tập trung mạnh trong vùng ánh sáng đỏ. Tọa độ màu CIE được xác định nằm trong vùng đỏ-cam và có sự dịch chuyển nhẹ phụ thuộc vào nồng độ chất hoạt hóa. Phổ phát xạ này có sự chồng lấn mạnh mẽ với phổ hấp thụ của hệ sắc tố diệp lục (chlorophyll a và b) ở thực vật. Kết quả nghiên cứu khẳng định hệ vật liệu huỳnh quang chế tạo được có tiềm năng ứng dụng cao làm giải pháp điều khiển phổ ánh sáng nhân tạo trong các mô hình nông nghiệp thông minh.

Từ khóa: Vật liệu phát quang, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, chuyển dời vạch hẹp, bức xạ đỏ, nông nghiệp thông minh.

FABRICATION OF $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$: Sm^{3+} PHOSPHOR POWDER: A SPECTRUM-MODULATION SOLUTION FOR SMART AGRICULTURE

ABSTRACT

A calcium aluminosilicate phosphor with a host matrix of $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ single-doped with rare-earth Sm^{3+} ions was successfully synthesized via a high-temperature solid-state reaction method. Structural analysis using X-ray diffraction (XRD) patterns confirmed that the material achieved a single-phase state with a stable tetragonal crystal structure. Optical property characterization revealed that the photoluminescence (PL) spectra of the $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$: Sm^{3+} phosphor system are characterized by sharp, narrow emission lines predominantly concentrated in the red spectral region. The calculated CIE color coordinates are located in the orange-red region, exhibiting slight shifts depending on the activator doping concentration. Importantly, this emission spectrum shows a strong spectral overlap with the absorption bands of photosynthetic chlorophyll pigments (chlorophyll a and b) in plants. The research results confirm that the synthesized fluorescent materials hold high potential as a spectrum-tuning solution for artificial lighting in smart agriculture models.

Keywords: Phosphor, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$, narrow-band transition, red emission, smart agriculture.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kỷ nguyên nông nghiệp công nghệ cao và nông nghiệp thông minh, ứng dụng nguồn ánh sáng nhân tạo nhằm tối ưu hóa và kích thích sự sinh trưởng, phát triển của cây trồng đang trở thành một xu hướng tất yếu trên toàn cầu. Về mặt sinh học, hệ sắc tố của thực vật, đặc biệt là diệp lục chlorophyll a và b, không hấp thụ đồng đều toàn bộ dải phổ ánh sáng mặt trời mà chỉ hấp thụ chọn lọc và mạnh mẽ nhất tại hai vùng: Vùng xanh dương (bước sóng ngắn) và vùng ánh sáng đỏ (bước sóng dài). Do đó, việc nghiên cứu phát triển các dòng bột huỳnh quang chuyển đổi phổ có khả năng phát xạ vạch hẹp trong vùng ánh sáng đỏ nhằm tích hợp vào hệ thống LED chuyên dụng cho nông nghiệp đang thu hút

sự quan tâm lớn từ giới khoa học và công nghệ [1]. Trong số các vật liệu chiếu sáng và hiển thị thế hệ mới, vật liệu phát quang pha tạp ion đất hiếm sở hữu nhiều đặc tính ưu việt như: Không độc hại, thân thiện với môi trường sinh thái, độ chói cao và tuổi thọ linh kiện kéo dài. Việc kết hợp các chip LED phát bức xạ tử ngoại gần (near-UV) hoặc LED xanh dương với các hạt bột huỳnh quang phát xạ đa sắc (đỏ, xanh lá, xanh dương) là giải pháp cốt lõi để tạo ra các nguồn sáng nhân tạo hiệu suất cao, tiết kiệm năng lượng [2].

Vật liệu phát quang nền silicate alumino kiềm thổ ($\text{M}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ với $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$) pha tạp các ion đất hiếm đã và đang được nhiều tác giả trong và ngoài nước nghiên cứu do có hiệu suất phát quang cao, đặc trưng quang

¹ Khoa Cơ Khí và Công Nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

* Email: dothanhtien@hueuni.edu.vn

phổ phù hợp với nhiều ứng dụng, đặc biệt là trong hiển thị và chiếu sáng. Các nghiên cứu tính chất phát quang của vật liệu phát quang trên nền $(\text{Ca}, \text{Sr})_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ pha tạp các ion đất hiếm có nhiều ưu điểm như chi phí thấp, tính ổn định nhiệt và ổn định hóa học cao, đặc biệt là hấp thụ mạnh bức xạ ở vùng tử ngoại gần,...[3-7]. Gần đây, các vật liệu huỳnh quang phát xạ đỏ kích thích bởi tia tử ngoại gần và ánh sáng xanh nhằm tối ưu hóa sự phát triển của cây trồng trong nhà kính tiếp tục thu hút sự quan tâm nghiên cứu mạnh mẽ [8]. Vì vậy, việc nghiên cứu chế tạo vật liệu phát quang $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ pha tạp ion Sm^{3+} phát bức xạ màu đỏ và định hướng ứng dụng trong nông nghiệp có ý nghĩa khoa học trong nghiên cứu cơ bản và ứng dụng.

II. THỰC NGHIỆM

Hệ mẫu bột phát quang Calcium Aluminosilicate đơn pha tạp ion Samarium ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$: x %mol Sm^{3+} , ký hiệu là CAS: x Sm^{3+}) được chế tạo bằng quy trình phản ứng pha rắn ở nhiệt độ cao. Các nguyên liệu tiền chất có độ tinh khiết cao bao gồm: CaCO_3 (99,9%, Trung Quốc), Al_2O_3 (99%, Trung quốc), SiO_2 (99,9%, Hàn quốc) và Sm_2O_3 (99,9%, Merck).

Quy trình tổng hợp được thực hiện tuần tự theo các bước:

Bước 1: *Cân định lượng*: Tiền chất được cân chính xác theo tỷ lệ hợp thức tương ứng với các nồng độ pha tạp thay đổi x = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 và 3,5 %mol.

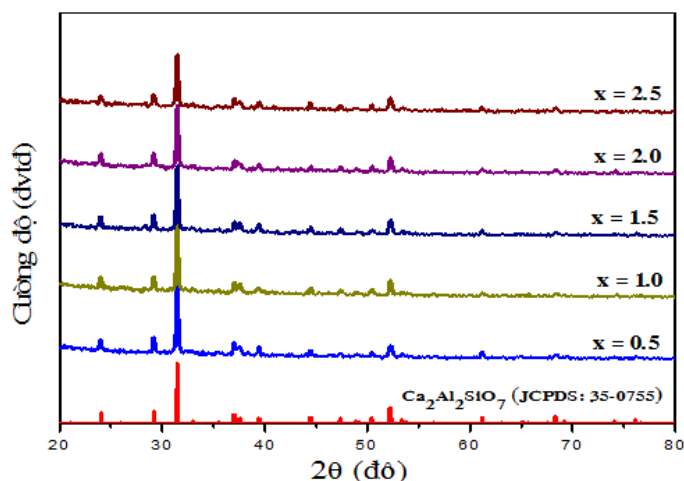
Bước 2: *Trộn phối liệu*: Bổ sung thêm chất chảy B_2O_3 với tỷ lệ cố định 4% theo khối lượng tổng sản phẩm để hạ nhiệt độ thiêu kết và đồng đều hóa pha. Hỗn hợp được đem nghiền trộn cơ học liên tục trong thời gian 1 giờ bằng cối và chày mã nã để đạt độ đồng nhất cao ở quy mô vi hạt.

Bước 3: *Nung thiêu kết*: Hỗn hợp bột sau khi sấy khô được chuyển vào cốc nung và tiến hành thiêu kết trong lò nung ở nhiệt độ duy trì ổn định 1280°C trong 1 giờ [4, 6, 7], sau đó làm nguội tự nhiên về nhiệt độ phòng.

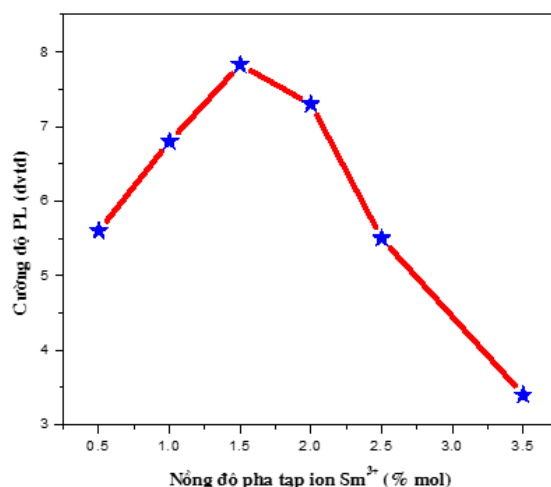
Cấu trúc tinh thể của sản phẩm dạng bột sau nung được kiểm tra bằng giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) trên thiết bị nhiễu xạ kế Bruker D8-Advance. Tính chất quang học bao gồm phổ phát quang (PL) và phổ kích thích phát quang (PLE) được khảo sát ở nhiệt độ phòng thông qua hệ thống phổ kế huỳnh quang cao cấp FS5 Spectrofluorometer (Edinburgh Instruments Ltd).

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cấu trúc tinh thể của vật liệu CAS pha tạp ion Sm^{3+}



Hình 1. Giản đồ nhiễu xạ tia X của hệ mẫu CAS: Sm^{3+} thay đổi theo nồng độ pha tạp ion Sm^{3+}



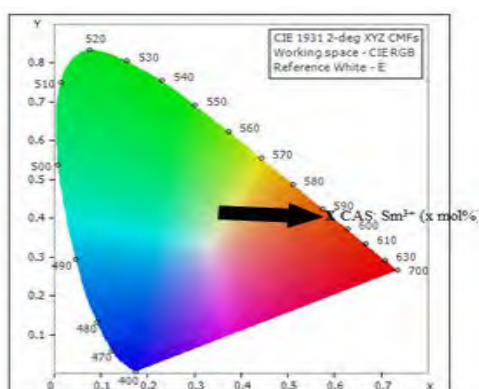
Hình 4. Sự phụ thuộc của cường độ phát quang cực đại vào nồng độ pha tạp ion Sm^{3+}

Sự dập tắt cường độ phát quang vì nồng độ đối với vật liệu CAS: Sm^{3+} xuất hiện khi nồng độ ion Sm^{3+} đạt 1,5 %mol như ở hình 4. Theo lý thuyết về hiện tượng dập tắt nồng độ của Dexter và Blasse, tương tác lưỡng cực-lưỡng cực (d-d) đóng vai trò chính trong cơ chế dập tắt cường độ phát quang vì nồng độ của ion Sm^{3+} trong vật liệu CAS [4, 7].

3.3. Tọa độ màu CIE của ánh sáng phát quang đối với hệ mẫu CAS: Sm^{3+} và định hướng ứng dụng trong nông nghiệp

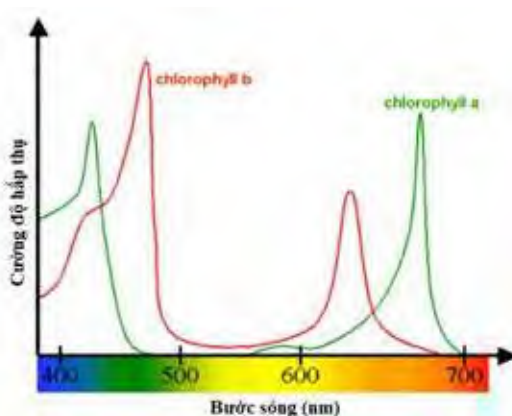
Bằng cách sử dụng phần mềm xác định tọa độ màu CIExyz 1931 của ánh sáng phát quang, các giá trị tọa độ màu (x, y) của hệ vật

liệu CAS: Sm^{3+} đã được tính toán từ phổ PL khi kích thích ở bước sóng 402 nm (hình 5). Kết quả cho thấy các giá trị tọa độ màu nằm trong vùng bức xạ màu đỏ cam và có sự khác biệt nhỏ khi thay đổi nồng độ pha tạp ion Sm^{3+} . Đồng thời, việc nghiên cứu phổ hấp thụ của chlorophyll a và b như trên hình 6 [10] cho thấy khả năng hấp thụ của chlorophyll a và b khá phù hợp với bức xạ phát quang của vật liệu CAS: Sm^{3+} . Như vậy, vật liệu này có triển vọng trong chế tạo LED hoặc đèn huỳnh quang bức xạ màu đỏ cam thông qua việc kích thích bằng ánh sáng tím định hướng ứng dụng trong trồng trọt.



Hình 5. Tọa độ màu CIE của hệ mẫu CAS: Sm^{3+} (x %mol), $\lambda_{ex} = 402 \text{ nm}$

Để xác định chính xác đặc tính màu sắc kỹ thuật, các số liệu phổ PL của hệ mẫu



Hình 6. Phổ hấp thụ chlorophyll a và chlorophyll b của thực vật

CAS: Sm^{3+} dưới kích thích bước sóng 402 nm đã được số hóa và tính toán thông qua

phần mềm tiêu chuẩn của Ủy ban Chiếu sáng Quốc tế (CIE 1931). Kết quả tính toán thiết lập tọa độ màu thực nghiệm (x, y) định vị vật liệu nằm chuẩn xác trong vùng bức xạ ánh sáng đỏ-cam có độ tinh khiết màu cao. Sự thay đổi nồng độ pha tạp từ 0,5 đến 3,5 %mol chỉ gây ra các dịch chuyển tọa độ với biên độ rất nhỏ, minh chứng cho tính ổn định màu sắc lý tưởng của hệ vật liệu.

Nhằm hiện thực hóa định hướng ứng dụng, một phân tích đối chiếu sinh học đã được thực hiện bằng cách so sánh phổ phát xạ đỏ của vật liệu CAS: Sm^{3+} với phổ hấp thụ thực tế của hệ sắc tố quang hợp chlorophyll a và chlorophyll b chiết xuất từ thực vật. Đồ thị đối chiếu cho thấy dải vạch phát xạ màu đỏ mạnh mẽ của bột phát quang CAS: Sm^{3+} (đặc biệt là vùng dải từ 600 nm đến 660 nm) có sự chồng lấn với vùng đỉnh hấp thụ năng lượng quang hợp then chốt của chlorophyll a và b. Đặc tính phát xạ vạch hẹp trong dải đỏ-cam của hệ vật liệu pha tạp ion Sm^{3+} cho thấy sự tương thích với vùng phổ kích thích diệp lục, tương tự các phát hiện gần đây trên các hệ nền

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã tổng hợp thành công bột phát quang cấu trúc gehlenite $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ đơn pha tạp ion đất hiếm Sm^{3+} bằng kỹ thuật phản ứng pha rắn ở nhiệt độ cao 1280°C. Vật liệu tạo thành có độ tinh khiết pha cao, cấu trúc mạng tinh thể tứ giác ổn định và không bị biến đổi khi thay đổi nồng độ chất kích hoạt. Khảo sát quang phổ xác định nồng độ pha tạp ion Sm^{3+} tối ưu đạt 1,5%mol; vượt qua ngưỡng này, cơ chế tương tác lưỡng cực - lưỡng cực giữa các ion sẽ gây ra hiệu ứng dập tắt phát quang do nồng độ. Với đặc tính phát xạ vạch hẹp màu đỏ mạnh mẽ chồng lấn tốt với vùng hấp thụ sinh học của

oxide/germanate phục vụ nông nghiệp thông minh [1, 8].

Từ cơ sở khoa học này, vật liệu bột phát quang CAS: Sm^{3+} đóng vai trò là một giải pháp công nghệ điều khiển và chuyển đổi phổ ánh sáng vô cùng hiệu quả. Trong thực tế xây dựng các mô hình nông nghiệp thông minh (nhà màng, nhà kính, nhà máy thực vật), vật liệu này có thể được ứng dụng theo hai phương án kỹ thuật:

+ Chế tạo đèn LED chuyên dụng: Sử dụng bột huỳnh quang này phủ lên bề mặt các chip LED phát ánh sáng tím hoặc tử ngoại gần (Near-UV) có sẵn trên thị trường, biến đổi nguồn ánh sáng năng lượng cao này thành ánh sáng đỏ sinh học tinh khiết kích thích cây trồng tăng trưởng thân lá và ra hoa.

+ Màng phủ chuyển đổi quang phổ: Tích hợp bột phát quang vào các màng polymer phủ mái nhà kính, giúp hấp thụ các thành phần tia tử ngoại có hại từ ánh sáng mặt trời và chuyển hóa chúng thành bức xạ màu đỏ cam có ích, giúp tăng cường quang hợp tự nhiên.

chlorophyll, hệ vật liệu phát quang $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 : \text{Sm}^{3+}$ hứa hẹn là một giải pháp vật liệu tiên tiến, mở ra tiềm năng ứng dụng lớn trong việc thiết kế các hệ thống điều khiển phổ ánh sáng nhân tạo phục vụ phát triển nông nghiệp thông minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Gopinath A., Gopi S., Ashok A. J., Joseph C., Unnikrishnan N. V., Biju P. R. (2026), Structural and luminescence studies of $\text{SrBi}_2\text{TeO}_7 : \text{Sm}^{3+}$ phosphors with high CRI value for horticulture lighting and forensic applications, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 1050, pp. 185425.

2. Blasse G., Grabmainer B.G. (1994), Luminescent Materials. *Springer-Verlag*.
3. Do Thanh Tien, Nguyen Manh Son, Le Van Tuat, Liem L. N. (2018), Energy Transfer between Ce^{3+} - Dy^{3+} in $Ca_2Al_2SiO_7$: Ce^{3+} , Dy^{3+} Phosphor, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 540, pp. 012001-012006.
4. Do Thanh Tien, Nguyen Manh Son (2019), Preparation and spectroscopic properties of $Ca_2Al_2SiO_7$: Tb^{3+} phosphor, *Hue University Journal of Science: Natural Science*, Vol. 128, No.1B, pp. 5-10.
5. Do Thanh Tien, Nguyen Manh Son, Nguyen Dang Nhat, Ho Van Tuyen, Le Xuan Diem Ngoc, Tran Quoc Toan (2023), Energy-transfer phenomenon and color-tunable properties of $Ca_2Al_2SiO_7$: Dy^{3+}/Eu^{3+} phosphors, *Hue University Journal of Science: Natural Science*, Vol. 132, No. 1B, pp. 93-100.
6. Le Ngoc Liem, Do Thanh Tien (2021), Synthesis and characterisation of material for high-tech agricultural applications, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 23, No. 5-6, pp. 293-298.
7. Đỗ Thanh Tiến, Nguyễn Mạnh Sơn, Lê Trung Cang (2019), Công nghệ chế tạo và tính chất quang của vật liệu $Sr_2Al_2SiO_7$ pha tạp Europium, *Tạp chí Khoa học Đại học Huế: Khoa học Tự nhiên*, Vol. 128, No. 1A, pp. 73-80.
8. Xiao X., Xiao L., Liu J., Wu X. (2026), A new Sm^{3+} -activated $Sr_3Al_2Ge_4O_{14}$ germanate phosphor with high color purity and stable chromaticity for plant growth illumination, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 1080, pp. 190248.
9. Rao Ch.S, Jayasankar C.K (2013), Spectroscopic and radiative properties of Sm^{3+} -doped K–Mg–Al phosphate glasses, *Optics Communications*, Vol. 286, pp. 204-210.
10. Liu, X., Lei, B., Liu, Y. (2016). The Application of Phosphor in Agricultural Field. In: Liu, RS. (eds) *Phosphors, Up Conversion Nano Particles, Quantum Dots and Their Applications*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1590-8_4

- Ngày gửi bài: 12/08/2026

- Ngày phản biện: 06/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

BÊ TÔNG CARBON THẤP (LOW-CARBON CONCRETE): XU HƯỚNG QUỐC TẾ VÀ TIỀM NĂNG ỨNG DỤNG HƯỚNG TỚI MỤC TIÊU NET ZERO TẠI VIỆT NAM

Ngô Quý Tuấn ^{1*}, Lê Minh Đức

TÓM TẮT

Ngành sản xuất xi măng và bê tông đóng góp khoảng 7–8% tổng lượng phát thải khí nhà kính (GHG) toàn cầu. Trước sức ép của biến đổi khí hậu và cam kết đạt phát thải ròng bằng 0 (Net Zero) vào năm 2050, bê tông carbon thấp (Low-Carbon Concrete - LCC) đã trở thành định hướng nghiên cứu và ứng dụng mũi nhọn trên toàn thế giới. Bài báo này tổng quan các xu hướng nghiên cứu quốc tế mới nhất về LCC, bao gồm việc áp dụng chất phụ gia khoáng thay thế xi măng (SCMs), bê tông khoáng hóa CO₂, xi măng đất sét nung đã vôi (LC3), bê tông Geopolymer và bê tông tái chế. Bài báo tập hợp, phân tích các thành phần cấp phối LCC tiêu biểu cùng hiệu quả giảm phát thải CO₂ tương ứng (30% - 80%). Đồng thời, nghiên cứu khảo sát thực trạng tiềm năng trữ lượng các phụ gia khoáng thay thế xi măng tại Việt Nam (xi lò cao GGBFS, tro bay, xi thép, tro đáy, tro xơ dừa/tro nông nghiệp, đất sét nung), phân tích, dự báo nhu cầu sử dụng xi măng trong chế tạo bê tông và cấu kiện bê tông đúc sẵn. Cuối cùng, các nhóm giải pháp toàn diện về chính sách, tiêu chuẩn kỹ thuật, công nghệ và định hướng thị trường được đề xuất nhằm thúc đẩy việc triển khai LCC tại Việt Nam.

Từ khóa: Bê tông carbon thấp; Phụ gia khoáng SCM; Cấp phối bê tông; Net Zero; Xi măng LC3; Carbonat hóa CO₂; Tái chế vật liệu xây dựng.

LOW-CARBON CONCRETE: GLOBAL TRENDS AND APPLICATION POTENTIAL TOWARDS NET-ZERO TARGET IN VIETNAM

ABSTRACT:

The cement and concrete manufacturing industries contribute approximately 7–8% of global greenhouse gas (GHG) emissions. Under the pressure of climate change and the commitment to achieve Net Zero emissions by 2050, Low-Carbon Concrete (LCC) has emerged as a spearhead research and application direction worldwide. This paper provides an overview of the latest international research trends in LCC, including the application of supplementary cementitious materials (SCMs), CO₂-mineralized concrete, limestone calcined clay cement (LC3), geopolymer concrete, and recycled aggregate concrete. Typical LCC mix designs and their corresponding CO₂ emission reduction efficiencies (ranging from 30% to 80%) are compiled and analyzed. Furthermore, the study investigates the potential and reserves of SCMs in Vietnam (ground granulated blast-furnace slag - GGBFS, fly ash, steel slag, bottom ash, coconut coir ash/agricultural ash, and calcined clay), while forecasting the demand for cement in the production of ready-mix concrete and precast concrete elements. Finally, a comprehensive set of solutions spanning policy frameworks, technical standards, manufacturing technologies, and market orientations is proposed to facilitate the widespread adoption of LCC in Vietnam.

Keywords: Low-Carbon Concrete; Supplementary Cementitious Materials (SCMs); Concrete mix design; Net Zero; LC3 cement; CO₂ mineralization; Construction material recycling.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông là vật liệu nhân tạo được tiêu thụ nhiều nhất trên hành tinh, chỉ đứng sau nước về tổng khối lượng sử dụng hàng năm (với khoảng 30 tỷ tấn bê tông được sản xuất mỗi năm trên toàn thế giới) [1, 2]. Mặc dù bê tông có mức phát thải CO₂ trên mỗi đơn vị khối lượng tương đối thấp so với thép hay nhựa, nhưng do quy mô sản xuất khổng lồ, ngành công nghiệp bê tông và xi măng đóng góp tới 7–8% tổng lượng phát thải CO₂ do con người gây ra [3, 4]. Nguyên nhân chính xuất phát từ

quá trình sản xuất clinker xi măng Portland (OPC), trong đó phản ứng nung vôi ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) chiếm khoảng 60% phát thải và quá trình đốt cháy nhiên liệu hóa thạch ở nhiệt độ cao (1450⁰ C) chiếm khoảng 30–35% [5].

Tại Hội nghị Thượng đỉnh về Biến đổi Khí hậu của Liên Hợp Quốc COP26, Việt Nam đã cam kết đạt mức phát thải ròng bằng 0 (Net Zero) vào năm 2050. Để đạt được mục tiêu này, Chiến lược phát triển vật liệu xây dựng Việt Nam giai đoạn 2021–2030, tầm nhìn đến

¹ Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

* Tác giả liên hệ: ngoquytuan@huan.edu.vn

năm 2050 đã đặt ra yêu cầu cấp thiết về giảm lượng tiêu thụ clinker, tăng cường sử dụng chất thải công nghiệp làm phụ gia và chuyển đổi sang các công nghệ bê tông carbon thấp (Low-Carbon Concrete - LCC).

Bài báo này tập trung nghiên cứu, tổng hợp các xu hướng khoa học - công nghệ LCC quốc tế, đánh giá khả năng cắt giảm CO₂ từ các thiết kế cấp phối tiên tiến, phân tích nguồn nguyên liệu phụ gia thay thế tại Việt Nam, đánh giá nhu cầu xi măng trong tương lai và đề xuất hệ thống giải pháp ứng dụng thực tiễn tại Việt Nam.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và vật liệu nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là các loại cấp phối bê tông LCC, trọng tâm là các giải pháp cắt giảm lượng phát thải carbon trong quá trình sản xuất bê tông. Vật liệu khảo sát bao gồm các chất phụ gia khoáng thay thế xi măng (SCMs) phổ biến và có tiềm năng thương mại cao như: tro bay (Fly ash) từ các nhà máy nhiệt điện than; xỉ lò cao hạt hóa nghiền mịn (GGBS) từ công nghiệp luyện kim; đất sét nung (Calcined clay) phối hợp với đá vôi (công nghệ xi măng LC3).

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo áp dụng phương pháp nghiên cứu tổng quan tài liệu kết hợp với phân tích dữ liệu thứ cấp.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xu hướng nghiên cứu và ứng dụng bê tông LCC trên thế giới

Trong những năm gần đây, xu hướng nghiên cứu phát triển LCC trên thế giới đã chuyển dịch từ việc thay thế đơn lẻ xi măng bằng một loại phụ gia thông thường sang các công nghệ phức hợp và tuần hoàn [6-10]:

3.1.1. Hệ chất kết dính đa thành phần (Ternary & Quaternary Blended Binders) và Xi măng đất sét nung đá vôi (LC3)

Việc kết hợp nhiều loại phụ gia pozzolanic và hydraulic phụ trợ (SCMs) như tro bay (Fly Ash - FA), xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS),

silica fume (SF) và đất sét nung (Calcined Clay) cho phép thay thế từ 50% đến hơn 80% OPC mà vẫn duy trì hoặc gia tăng cường độ cơ học và độ bền lâu dài [6, 7]. Đặc biệt, công nghệ xi măng LC3 (Limestone Calcined Clay Cement) kết hợp giữa đất sét nung (chứa khoáng metakaolin) và bột đá vôi (CaCO₃) tạo ra phản ứng hóa học tương hỗ hình thành pha carboaluminate, giúp lấp đầy lỗ xốp, tăng cường độ sớm và giảm phát thải CO₂ tới 30–40% so với OPC [8, 11].

3.1.2. Bê tông khoáng hóa và thu giữ CO₂ (Carbon Capture, Utilization and Storage - CCUS in Concrete)

Nghiên cứu ứng dụng công nghệ hấp thụ/khoáng hóa CO₂ trực tiếp vào bê tông trong quá trình trộn hoặc bảo dưỡng (Carbonation Curing) đang thu hút sự chú ý đặc biệt [12, 13]. Quá trình này chuyển hóa CO₂ thành các tinh thể CaCO₃ kích thước nano gia cường cấu trúc lỗ xốp, giúp nâng cao cường độ sớm và cô lập ổn định CO₂ vĩnh viễn trong bê tông. Ngoài ra, việc carbonat hóa các phế thải như bột bê tông tái chế (RCP) hay xỉ thép (Steel Slag) trước khi đưa vào làm SCM hoặc cốt liệu cũng giúp tăng cường độ hoạt tính pozzolanic [12, 14].

3.1.3. Bê tông không sử dụng clinker (Geopolymer và Alkali-Activated Materials - AAMs)

Được chế tạo từ 100% nguyên liệu giàu xỉ, tro bay hoặc tro đáy kết hợp với dung dịch kích hoạt kiềm (như NaOH, Na₂SiO₃), bê tông Geopolymer có khả năng giảm phát thải CO₂ tới 60–80% so với bê tông OPC truyền thống [15, 16]. Các nghiên cứu gần đây tập trung vào việc cải thiện tính làm việc (workability), kiểm soát thời gian đông kết và tối ưu hóa chi phí cũng như giảm phát thải carbon của các hóa chất kích hoạt kiềm [16].

3.1.4. Bê tông tuần hoàn kết hợp cốt liệu tái chế (Recycled Aggregate Concrete - RAC)

Nhằm giảm thiểu việc khai thác tài nguyên thiên nhiên và phát thải từ vận chuyển, xu hướng quốc tế hướng tới việc thay thế 100%

cốt liệu tự nhiên (cát, đá) bằng phế thải xây dựng nghiền (Recycled Concrete Aggregates - RCA) kết hợp với chất kết dính sinh thái (Eco-binders) [14, 17]. Công nghệ xử lý bề mặt RCA bằng dung dịch CO₂ hoặc phủ vi sinh vật giúp cải thiện vùng chuyển tiếp pha (ITZ), nâng cao đặc tính cơ lý của bê tông tái chế [14, 17].

3.2. Tổng hợp các cấp phối LCC và tiềm

Bảng 1: Tổng hợp các nhóm cấp phối LCC và hiệu quả giảm phát thải CO₂

TT	Nhóm bê tông LCC	Thành phần chất kết dính chính (% khối lượng)	Cường độ nén (MPa)	Phát thải CO ₂ (kgCO ₂ /m ³)	Mức giảm CO ₂ (%)
1	Bê tông OPC đối chứng [7, 18]	100% OPC	40 – 50 (28d)	350 – 420	0%
2	Bê tông SCMs hỗn hợp (High-volume Ternary LCC) [6, 7]	15–20% OPC + 50–60% GGBFS + 20–25% Tro bay + 5% Silica Fume	42 – 45 (28d) 58 – 65 (90d)	85 – 110	70% – 80%
3	Bê tông Xi măng Đất sét nung - Đá vôi (LC3) [8, 11]	50% Clinker + 30% Đất sét nung + 15% Bột đá vôi + 5% Thạch cao	40 – 48 (28d) 50 – 55 (90d)	220 – 250	35% – 45%
4	Bê tông Geopolymer [9, 15, 16]	0% OPC (100% GGBFS/Tro bay/Tro xơ dừa/Xi thép) + Chất kích hoạt kiềm	35 – 55 (28d)	100 – 140	60% – 75%
5	Bê tông Carbonat hóa & Cốt liệu tái chế (CO ₂ -cured RAC) [14, 17]	70% OPC + 30% Bột bê tông tái chế carbonat hóa (C-RCP) + 100% RCA	35 – 42 (28d)	180 – 210	45% – 55%
6	Bê tông Đá vôi hàm lượng cao (HVFA/HVLP Concrete) [18]	30–40% OPC + 50–60% Bột đá vôi mịn (Limestone Powder) + SCMs	30 – 40 (28d) 45 – 50 (90d)	130 – 160	55% – 65%

Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng: các hệ cấp phối bê tông SCMs (High-volume SCMs) đạt hiệu quả giảm phát thải CO₂ rất lớn (tới 80%). Mặc dù cường độ tuổi sớm (3–7 ngày) phát triển chậm hơn OPC do phản

năng giảm phát thải CO₂

Dựa trên việc tổng hợp các công trình nghiên cứu thực nghiệm đã công bố trong thời gian gần đây, Bảng 1 trình bày các cấp phối LCC điển hình, đặc tính kỹ thuật và khả năng giảm phát thải carbon tương đương (CO₂) so với bê tông OPC đối chứng (C30–C50).

ứng pozzolanic diễn ra từ từ, nhưng cường độ dài hạn (28–90 ngày) và độ bền trong môi trường xâm thực (chống thấm clo, chống ăn mòn sunfat) vượt trội so với bê tông OPC [6, 7]; Công nghệ bê tông LC3 mang lại sự cân

bằng tối ưu giữa khả năng cắt giảm CO₂ (35–45%), tốc độ phát triển cường độ sớm tương đương OPC và tính sẵn có của nguyên liệu [8, 11]; Ứng dụng khoáng hóa CO₂ giúp bù đắp sự suy giảm cường độ sớm khi giảm hàm lượng OPC, đồng thời đóng vai trò như một bể chứa CO₂ cố định bền vững [12, 13].

3.3. Tiềm năng trữ lượng nguyên liệu thay thế xi măng để phát triển LCC tại Việt Nam

Việt Nam có nguồn tài nguyên khoáng sản và phụ phẩm công nghiệp/nông nghiệp vô cùng phong phú, là tiền đề thuận lợi cho việc sản xuất LCC quy mô lớn.

3.3.1. Tro bay và tro đáy từ các nhà máy nhiệt điện [19]

Mặc dù Việt Nam đang chuyển dịch năng lượng, hệ thống các nhà máy nhiệt điện than (như Phả Lại, Vĩnh Tân, Duyên Hải, Nghi Sơn, Mông Dương...) hiện phát thải khoảng **15 – 20 triệu tấn tro xỉ (tro bay và tro đáy)** mỗi năm. Tro bay đạt chuẩn TCVN 6882:2016 là nguồn pozzolan nhân tạo chất lượng cao, giúp tăng độ sụt, giảm nhiệt thủy hóa và nâng cao độ bền cho bê tông.

3.3.2. Xi lò cao nghiền mịn (GGBFS) từ ngành luyện thép [20]

Sự phát triển của các liên hợp luyện kim lớn (như Hòa Phát Dung Quất, Formosa Hà Tĩnh) tạo ra khoảng **5 – 7 triệu tấn xi lò cao** mỗi năm. GGBFS có tính tự thủy hóa tiềm tàng (latent hydraulic properties), khi được nghiền mịn đạt diện tích bề mặt $S_s \geq 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ có thể thay thế tới 60–70% OPC trong bê tông khối lớn, bê tông công trình biển và bê tông cường độ cao.

3.3.3. Nguồn tài nguyên đất sét (Clay) cho công nghệ LC3 [21]

Việt Nam có trữ lượng đất sét phân bố rộng khắp cả nước (nhất là vùng Đồng bằng sông Hồng, Tây Nguyên và Đông Nam Bộ). Nhiều mỏ đất sét có hàm lượng khoáng kaolinite trung bình và thấp (30–50%) không đủ tiêu chuẩn làm gốm sứ cao cấp nhưng lại là nguyên liệu hoàn hảo để sản xuất đất sét nung (600–800°C) cho xi măng LC3 [8, 11].

3.3.4. Xi thép, tro nông nghiệp và phế thải xây dựng

- **Xi thép (Steel Slag):** Phát thải khoảng 2–3 triệu tấn/năm, sau khi xử lý ổn định thể tích (ngừa nở CaO/MgO tự do) hoặc carbonat hóa có thể dùng làm SCMs hoặc cốt liệu bê tông [12, 15].

- **Tro nông nghiệp (RHA, Coconut shell ash):** Hàng triệu tấn phế phụ phẩm như vỏ trấu, xơ dừa, bã mía khi được đốt kiểm soát tạo ra tro giàu SiO₂ vô định hình (>85%), đóng vai trò là siêu phụ gia pozzolanic nâng cao cường độ bê tông [10].

- **Phế thải phá dỡ xây dựng:** Khối lượng phế thải xây dựng tại các đô thị lớn (Hà Nội, TP.HCM) đạt hàng ngàn tấn/ngày, là nguồn cốt liệu tái chế (RCA) tiềm năng cho bê tông xanh [14].

3.4. Nhu cầu sử dụng xi măng và chế tạo cấu kiện bê tông tại Việt Nam trong tương lai

3.4.1. Quy mô sản xuất và tiêu thụ xi măng

Việt Nam hiện đứng thứ 3 thế giới về năng lực sản xuất xi măng (chỉ sau Trung Quốc và Ấn Độ) với tổng công suất thiết kế vượt **110 triệu tấn/năm**. Tiêu thụ nội địa đạt khoảng 60–65 triệu tấn/năm, phần còn lại dành cho xuất khẩu. Ngành sản xuất xi măng đóng góp tới hơn 70% tổng lượng phát thải CO₂ trong lĩnh vực sản xuất vật liệu xây dựng tại Việt Nam.

Trước bối cảnh đô thị hóa và phát triển hạ tầng giao thông tăng tốc, thị trường sẽ dịch chuyển mạnh mẽ sang phân khúc cấu kiện bê tông đúc sẵn (Precast) và các cấu kiện dự ứng lực lắp ghép (đúc cọc, dầm cầu, tấm tường, dầm sàn lắp ghép). Môi trường chế tạo tập trung tại nhà máy của bê tông đúc sẵn chính là điều kiện lý tưởng nhất để ứng dụng đồng bộ các công nghệ bê tông carbon thấp (LCC) thế hệ mới (như bảo dưỡng bằng CO₂, kích hoạt kiềm (AAMs) hay phụ gia khoáng hoạt tính cao thay thế xi măng) nhằm kiểm soát nghiêm ngặt chất lượng và tối ưu hóa mức độ cắt giảm phát thải, không bị phụ thuộc vào điều kiện thời tiết công trường [12, 22].

Ngoài ra, công nghệ in 3D bê tông (3D

Concrete Printing) đang bắt đầu được nghiên cứu ứng dụng tại Việt Nam, yêu cầu cấp phối bê tông có độ ổn định hình dạng (buildability) và đông kết nhanh, rất phù hợp khi kết hợp các hệ SCMs gia cường hạt mịn [23].

3.4.2. Áp lực giảm phát thải và cơ chế thuế carbon (CBAM)

Khi Liên minh châu Âu (EU) áp dụng Cơ chế điều chỉnh biên giới carbon (CBAM) và các thị trường quốc tế thắt chặt tiêu chuẩn ESG, các doanh nghiệp xuất khẩu vật liệu và bất động sản tại Việt Nam bắt buộc phải giảm "dấu chân carbon" (carbon footprint) trong sản phẩm. Nếu không chuyển đổi sang LCC, ngành bê tông Việt Nam sẽ mất lợi thế cạnh tranh trên thị trường quốc tế.

3.5. Đề xuất giải pháp phát triển và ứng dụng bê tông LCC tại Việt Nam

Để hiện thực hóa việc ứng dụng bê tông

LCC hướng tới Net Zero 2050, Việt Nam cần triển khai đồng bộ các nhóm giải pháp về mặt kỹ thuật cũng như các giải pháp về cơ chế, chính sách.

3.5.1. Giải pháp kỹ thuật

Dựa trên các phân tích về điều kiện thực tiễn tại Việt Nam (bao gồm trữ lượng tài nguyên, hạ tầng công nghệ hiện tại, chi phí sản xuất và hành lang pháp lý), hệ SCMs đa thành phần (sử dụng tro bay, xỉ lò cao) và xi măng LC3 là hai giải pháp phù hợp và khả thi nhất. Cụ thể, SCMs đa thành phần là giải pháp tối ưu để ứng dụng ngay lập tức (ngắn và trung hạn), trong khi xi măng LC3 là giải pháp mang tính chiến lược, bền vững nhất cho dài hạn. Kết quả phân tích đánh giá từng nhóm giải pháp kỹ thuật được trình bày ở Bảng 2 dưới đây:

Bảng 2: Đánh giá sự phù hợp các nhóm cấp phối LCC trong điều kiện Việt Nam

Tiêu chí	Hệ SCMs đa thành phần	Xi măng LC3	Bê tông Geopolymer	Khoáng hóa CO ₂
Tính sẵn có của tài nguyên	Rất cao (hiện tại)	Cao và vĩnh cửu	Thấp (phụ thuộc hóa chất)	Thấp (Thiếu CCUS)
Chi phí triển khai	Rất Thấp	Thấp / Trung bình	Cao	Rất Cao
Mức độ khả thi hiện tại	Rất khả thi	Khả thi cao	Ít khả thi	Rất ít

Các kết quả nghiên cứu cho thấy hệ cấp phối SCMs đa thành phần sử dụng xi măng Portland (OPC) phối trộn tối ưu với xỉ lò cao nghiền mịn (GGBFS), tro bay (FA) và muối silic (SF) ở tỷ lệ thay thế xi măng cực cao

(80% – 90%) [7]. Hiệu quả môi trường khi ứng dụng giải pháp này tương ứng với các tỷ lệ thay thế khác nhau được trình bày chi tiết ở Bảng 3 dưới đây:

Bảng 3: Đánh giá hiệu quả môi trường hệ cấp phối SCMs đa thành phần

Cấp phối / Chỉ tiêu đánh giá	Bê tông đối chứng (C-40)	Cấp phối LCC-40 (80% SCMs)	Cấp phối LCC-32 (85% SCMs)	Cấp phối LCC-25 (90% SCMs)
Thành phần cấp phối (kg/m³):				
- Xi măng thường (OPC)	335	85.00 (20%)	63.75 (15%)	42.50 (10%)
- Xi lò cao (GGBFS)	-	198.33 (46.7%)	212.50 (50.0%)	226.66 (53.3%)
- Tro bay nhiệt điện (FA)	-	99.16 (23.3%)	106.25 (25.0%)	113.33 (26.7%)
- Muối silic (SF)	-	42.50 (10.0%)	42.50 (10.0%)	42.50 (10.0%)

- Tỷ lệ Nước/Chất kết dính (w/b)	0.54	0.40	0.40	0.40
- Phụ gia siêu dẻo (SP, % chất kết dính)	0.90%	0.80%	0.70%	0.60%
Chỉ tiêu môi trường và chi phí (LCA):				
- Lượng phát thải carbon (kg CO ₂ /m ³)	336.2	131.1 (Giảm 61.0%)	112.9 (Giảm 66.4%)	95.1 (Giảm 71.7%)
- Tiêu thụ năng lượng tích lũy (MJ/m ³)	1977.4	816.5 (Giảm 58.7%)	713.9 (Giảm 63.9%)	611.3 (Giảm 69.1%)

Trên cơ sở các phân tích trên, có thể thấy để hiện thực hóa cam kết Net Zero, Việt Nam nên áp dụng lộ trình song song:

- Giai đoạn từ nay đến 2035: Thúc đẩy tối đa việc thay thế một phần xi măng bằng hệ SCMs (tro bay, GGBFS, tro trấu) thông qua việc chuẩn hóa lại bộ TCVN và đưa vào các gói thầu đầu tư công xanh.

- Giai đoạn 2030 - 2050: Chuyển giao công nghệ và xây dựng các trạm nung đất sét để thương mại hóa xi măng LC3 nhằm thay thế triệt để clinker khi nguồn tro bay nhiệt điện dần khan hiếm.

3.5.2. Giải pháp về cơ chế chính sách

Để hiện thực hóa việc ứng dụng bê tông carbon thấp hướng tới Net Zero 2050, Việt Nam cần triển khai đồng bộ các nhóm giải pháp sau:

- **Nhóm giải pháp Thể chế & Kích cầu thị trường**

+ **Tiên phong trong đầu tư công (Green Procurement):** cần có quy định yêu cầu bắt buộc sử dụng tỷ lệ nhất định LCC (bê tông trộn tro bay, xỉ lò cao) trong các dự án hạ tầng trọng điểm sử dụng vốn ngân sách (như đường cao tốc, cầu cảng, đê kè biển).

+ **Cơ chế tài chính carbon:** sớm ban hành định mức phát thải CO₂ trên mỗi m³ bê tông cho từng cấp cường độ, hướng đến xây dựng lộ trình áp dụng thuế carbon đối với các sản phẩm bê tông phát thải CO₂ cao, từ đó tạo lợi

thế cạnh tranh trực tiếp về giá cho bê tông xanh, bù đắp chi phí chuyển đổi công nghệ của doanh nghiệp.

- **Nhóm giải pháp Tiêu chuẩn kỹ thuật (Gỡ bỏ rào cản)**

+ **Cập nhật TCVN theo "Tính năng":** Chuyển đổi hệ thống TCVN từ việc khống chế "thành phần" (quy định cứng hàm lượng xi măng tối thiểu) sang quản lý "tính năng đầu ra" (đáp ứng đủ cường độ, độ bền, chống thấm). Điều này tạo không gian pháp lý để các trạm trộn tăng tỷ lệ thay thế phụ gia khoáng lên mức cao (50-70%).

+ **Xây dựng bộ tiêu chuẩn riêng cho LC3:** Nhanh chóng nghiên cứu và ban hành bộ quy chuẩn kỹ thuật quốc gia cho xi măng đất sét nung và cốt liệu tái chế, làm cơ sở để đưa sản phẩm vào thiết kế thi công đại trà.

- **Nhóm giải pháp Công nghệ & Chuỗi cung ứng**

+ **Ứng dụng đột phá tại mảng bê tông đúc sẵn (Precast):** Khuyến khích các nhà máy sản xuất cấu kiện đúc sẵn (cọc ly tâm, dầm cầu, cống) đi đầu ứng dụng bê tông tro xỉ và Geopolymer. Môi trường nhà máy giúp dễ dàng kiểm soát điều kiện bảo dưỡng nhiệt, khắc phục nhược điểm chậm phát triển cường độ sớm của LCC.

+ **Quy hoạch vùng nguyên liệu tập trung:** Thay vì phát triển tự phát, cần quy hoạch các trung tâm thu gom, tuyển lựa và

chuẩn hóa chất lượng đầu vào của tro xỉ nhiệt điện, xỉ thép và đất sét nghèo. Đảm bảo nguồn cung phụ gia có chất lượng ổn định (kiểm soát độ trương nở, lượng than chưa cháy) trước khi đưa tới các trạm trộn.

IV. KẾT LUẬN

Bê tông carbon thấp (LCC) không còn là một lựa chọn thử nghiệm mà đã trở thành xu hướng bắt buộc của ngành xây dựng toàn cầu trong kỷ nguyên Net Zero. Việc thay thế OPC bằng các hệ SCMs đa thành phần, xỉ măng LC3, bê tông Geopolymer và công nghệ khoáng hóa CO₂ đã chứng minh khả năng cắt giảm từ 30% đến 80% lượng phát thải CO₂ mà vẫn đảm bảo đặc tính cơ lý và độ bền lâu của công trình.

Việt Nam sở hữu tiềm năng vô cùng to lớn về nguồn phụ gia khoáng (tro bay nhiệt điện, xỉ thép, xỉ lò cao, đất sét nung và phụ phẩm nông nghiệp) cùng một thị trường tiêu thụ bê tông đúc sẵn đầy triển vọng. Để hiện thực hóa tiềm năng này, cần có sự phối hợp đồng bộ giữa Nhà nước (về chính sách, tiêu chuẩn), các Viện/Trường (về nghiên cứu thành phần cấp phối) và các Doanh nghiệp sản xuất bê tông/xỉ măng (về thương mại hóa sản phẩm). Việc ứng dụng rộng rãi LCC sẽ là trụ cột quan trọng giúp Việt Nam thực hiện thành công cam kết Net Zero vào năm 2050, hướng tới một nền kinh tế xanh và bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Radović, A., S. Marinković, and N. Tošić, *High-volume limestone powder concrete as a low-carbon material for reinforced concrete beams: Experimental evidences and code predictions of long-term behaviour*. Construction and Building Materials, 2026. **514**.

2. Kane, S., J. Olsson, and S. Miller,

Greenhouse gas emissions of global construction material production. Environmental Research: Infrastructure and Sustainability, 2025. **5**.

3. Machner, A., et al., *Durability of concrete prepared with low-carbon binders: Perspectives and insights*. Cement and Concrete Research, 2026. **206**.

4. Patrisia, Y., et al., *Potential SCMs for low-carbon concrete in Australia: Cradle-to-gate LCA and cost perspectives*. Resources, Conservation and Recycling, 2026. **228**.

5. Antzaras, A.N., et al., *Techno-economic and environmental assessment of CO₂ capture technologies in the cement industry*. Journal of Cleaner Production, 2023. **428**: p. 139330.

6. Khan, S., S. Al-Deen, and C.K. Lee, *Fresh state, short and long-term mechanical properties of ternary supplementary cementitious material-based low-carbon concretes*. Construction and Building Materials, 2026. **506**.

7. Khan, S., S. Al-Deen, and C.K. Lee, *Long-term durability and microstructure of low-carbon concrete with high-volume ternary blend SCMs (GGBFS, fly ash, silica fume)*. Journal of Building Engineering, 2026. **121**.

8. Wang, Y., et al., *Exploration of low-carbon and sustainable concrete products: Using activated clay as supplementary cementitious materials*. Applied Clay Science, 2026. **291**.

9. Onaizi, A.M., et al., *Upcycling of furnace bottom ash as sustainable materials for low carbon concrete*. Cleaner Materials, 2026. **20**.

10. Aziminezhad, M., et al., *AI-based meta model for predicting the performance of*

low-carbon concrete, considering the effects of multiple waste materials. Cleaner Materials, 2026. **19**.

11. Scrivener, K., et al., *Calcined clay limestone cements (LC3).* Cement and Concrete Research, 2018. **114**: p. 49-56.

12. Kashani, A., et al., *Carbon utilization for low-carbon concrete: Prospects for carbonated steel slag and recycled concrete.* Resources, Conservation and Recycling, 2026. **226**.

13. Aceituno, D., X. Zhang, and H. Hao, *A comprehensive review on carbon utilization pathways in concrete from conventional to improved strategies.* Carbon Capture Science & Technology, 2025. **16**: p. 100467.

14. Younes, A., E. Elbeltagi, and A. Diab, *Framework for a circular economy on precast concrete curbs containing recycled aggregates: mechanical, environmental, and cost viability.* Journal of Material Cycles and Waste Management, 2025. **27**: p. 2749-2766.

15. Watari, T., et al., *Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions.* Nature Communications, 2022. **13**(1): p. 4158.

16. Yousuf, S., et al., *Crossover Effect in Cement-Based Materials: A Review.* Applied Sciences, 2019. **9**: p. 2776.

17. Zhang, J., et al., *Development of sustainable low carbon preplaced aggregate concrete with Portland limestone cement,*

Metakaolin, silica fume and fly ash: Evaluating binary and ternary binder systems for strength and microstructural properties. Results in Engineering, 2026. **29**.

18. Proske, T., et al., *Eco-friendly concretes with reduced water and cement content – Mix design principles and application in practice.* Construction and Building Materials, 2014. **67**: p. 413-421.

19. Nguyen Trong, L., T. Kien, and B. Dai, *Nghiên cứu chế tạo bê tông cường độ cao sử dụng hàm lượng lớn tro bay của nhà máy nhiệt điện Quảng Ninh.* Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN, 2021. **15**: p. 1-11.

20. Thanh, M., *Xi hạt lò cao nghiên mìn – vật liệu xây dựng thiết yếu cho vùng kinh tế trọng điểm phía Nam và ven biển, hải đảo.* Tạp chí Vật liệu và Xây dựng - Bộ Xây dựng, 2022. **12**.

21. Minh, V. and L. Nghia, *Đánh giá thực trạng và tiềm năng khai thác một số sản phẩm từ nguồn tài nguyên sét ở ĐBSCL.* 2012. 481-491.

22. Ding, S., J. Li, and M. Wang, *Mechanical performance and life-cycle carbon reduction benefits of 3D-printed permanent-formwork columns filled with low-magnesia concrete.* Case Studies in Construction Materials, 2026. **24**.

23. Cui, W., et al., *Optimizing aggregate content and size distribution in low-carbon 3D-printed concrete via DEM simulation.* Results in Engineering, 2026. **31**.

- Ngày gửi bài: 24/08/2026

- Ngày phản biện: 16/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ KINH TẾ - KỸ THUẬT VÀ GIẢM PHÁT THẢI CỦA HỆ THỐNG SWB-HRES CHO CỤM AO NUÔI THỦY SẢN VÙNG ĐÀM PHÁ TAM GIANG – CẦU HAI

Phạm Văn Quang^{1, 2*}, Bùi Thị Minh Tú¹, Lê Minh Tiến¹, Nguyễn Xuân Trung²

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá hiệu quả kinh tế-kỹ thuật và môi trường của hệ thống năng lượng tái tạo lai mặt trời-gió-sinh khối (SWB-HRES) cho cụm 05 hộ nuôi tôm thâm canh tại đầm phá Tam Giang-Cầu Hai bằng phần mềm HOMER Pro. Hai chế độ vận hành tổ máy phát sinh khối được so sánh: lịch trình cố định từ 17:00–05:00 và tự động bám tải theo nhu cầu phụ tải. Cấu hình tối ưu gồm công suất điện mặt trời 28–30 kW, ba tua-bin gió 1,5 kW, tổ máy phát biogas/syngas 20 kW và bộ chuyển đổi 20 kW. So với phương án chỉ sử dụng điện lưới, chế độ lịch trình cố định giảm 24,5% chi phí hiện tại ròng (NPC), đạt tỷ suất hoàn vốn đầu tư (ROI) 12,6%, tỷ lệ năng lượng tái tạo 61,3% và giảm 60,5% phát thải CO₂, với thời gian hoàn vốn chiết khấu 5,98 năm. Chế độ bám tải có hiệu quả kinh tế cao hơn, với NPC giảm 28,3%, ROI 14,9% và thời gian hoàn vốn 4,70 năm, nhưng tỷ lệ năng lượng tái tạo và mức giảm phát thải CO₂ thấp hơn, lần lượt đạt 41,8% và 41,2%. Xét tổng thể hiệu quả kinh tế, môi trường và đặc tính vận hành, chế độ lịch trình cố định được lựa chọn làm phương án chuẩn. Phân tích độ nhạy cho thấy xuất khẩu một phần điện dư lên lưới có thể tiếp tục giảm NPC 12,5–13,8% và rút ngắn thời gian hoàn vốn xuống 3,79–3,87 năm.

Từ khóa: SWB-HRES, trang trại thủy sản, Tam Giang-Cầu Hai, Net Zero, HOMER Pro

TECHNO-ECONOMIC AND EMISSION REDUCTION ASSESSMENT OF AN SWB-HRES FOR AN AQUACULTURE POND CLUSTER IN THE TAM GIANG-CAU HAI LAGOON

ABSTRACT

This study evaluates the techno-economic and environmental performance of a solar-wind-biomass hybrid renewable energy system (SWB-HRES) for a cluster of five intensive shrimp-farming households in the Tam Giang-Cau Hai lagoon, Vietnam, using HOMER Pro. Two dispatch strategies for the biomass generator were compared: a scheduled strategy operating from 17:00 to 05:00 and a load-following strategy operating only when renewable generation is insufficient to meet the load. The optimal configuration comprises 28–30 kW of PV capacity, three 1.5 kW wind turbines, a 20 kW biogas/syngas generator, and a 20 kW converter. Compared with the grid-only baseline, the scheduled strategy reduces the net present cost (NPC) by 24.5%, achieves a return on investment (ROI) of 12.6%, a renewable fraction of 61.3%, and a 60.5% reduction in CO₂ emissions, with a discounted payback period of 5.98 years. The load-following strategy provides superior economic performance, with NPC reduced by 28.3%, ROI of 14.9%, and a discounted payback period of 4.70 years, but achieves a lower renewable fraction and CO₂ emission reduction of 41.8% and 41.2%, respectively. Considering economic, environmental, and operational performance simultaneously, the scheduled strategy is selected as the preferred operating strategy. A sensitivity analysis further indicates that exporting a portion of surplus PV electricity to the grid could reduce NPC by an additional 12.5–13.8% and shorten the discounted payback period to 3.79–3.87 years.

Keywords: hybrid renewable energy system; solar-wind-biomass; HOMER Pro; aquaculture; generator dispatch strategy.

1. GIỚI THIỆU

Tình trạng biến đổi khí hậu toàn cầu đang thúc đẩy các quốc gia ráo riết tìm kiếm các giải pháp năng lượng thay thế nhằm kiềm chế sự gia tăng nhiệt độ trái đất. Hướng tới mục tiêu trung hòa carbon (Net Zero) vào giữa thế kỷ 21 theo tinh thần của Hội nghị COP26, việc loại bỏ dần nhiên liệu hóa thạch và chuyển dịch sang năng lượng tái tạo đóng vai

trò sống còn (IEA, 2021; Rogelj et al., 2021). Chuyển hóa cam kết này thành hành động thực tiễn, Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021-2030 (Quy hoạch điện VIII) của Việt Nam đã xác định rõ lộ trình ưu tiên phát triển mạnh mẽ các nguồn điện sạch (Thủ tướng Chính phủ, 2023). Định hướng vĩ mô này cũng đã được chính quyền tỉnh Thừa Thiên Huế cụ thể hóa thông qua các chiến

¹ Trường Đại học Bách Khoa, Đại học Đà Nẵng

² Trường Đại học Đông Á

* Email: quangpv@donga.edu.vn

lược phát triển hạ tầng kinh tế - kỹ thuật theo hướng bền vững (Ủy ban nhân dân thành phố Huế, 2026).

Dù sở hữu tiềm năng to lớn, việc khai thác các nguồn năng lượng tái tạo truyền thống như điện mặt trời hay điện gió luôn vấp phải rào cản về tính bất định và phụ thuộc mạnh vào điều kiện thời tiết, gây áp lực lớn lên tính ổn định của lưới điện (Bajpai & Dash, 2012; Deguenon et al., 2023). Để khắc phục điểm yếu này, hệ thống năng lượng lai (HRES) – tích hợp đồng thời nhiều nguồn phát – được đánh giá là một giải pháp chiến lược nhằm tối ưu hóa độ tin cậy và giảm bớt gánh nặng đầu tư cho các thiết bị lưu trữ năng lượng đắt đỏ (Dufo-López & Bernal-Agustín, 2008; Maleki & Askarzadeh, 2014). Đã có nhiều nghiên cứu ứng dụng các công cụ tối ưu hóa như HOMER Pro để thiết kế mô hình lai, tuy nhiên, phần lớn các công trình mới chỉ dừng lại ở cấu hình cơ bản (Duman & Güler, 2018; Hasan & Genç, 2022). Trong khi các cấu phần chính như pin mặt trời, tua-bin gió và bộ chuyển đổi đều là công nghệ đã được kiểm chứng rộng rãi, riêng hệ thống phát điện sinh khối lại chưa được triển khai phổ biến do đặc điểm công kênh của nguyên liệu và yêu cầu điều khiển phức tạp (Tu et al., 2025; Bùi và cs., 2022). Đây chính là một trong những rào cản kỹ thuật khiến các mô hình SWB-HRES vẫn còn hạn chế trong thực tiễn triển khai; các đánh giá toàn diện về tính khả thi kinh tế - kỹ thuật của mô hình tích hợp sinh khối tại các khu vực nông thôn, bãi ngang ven biển vẫn còn là một khoảng trống lớn.

Xuất phát từ khoảng trống nghiên cứu trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục tiêu "Đánh giá hiệu quả kinh tế - kỹ thuật và giảm phát thải của hệ thống SWB-HRES cho cụm ao nuôi thủy sản vùng đầm phá Tam Giang - Cầu Hai". Thông qua nền tảng phần mềm HOMER Pro, nghiên cứu tiến hành mô phỏng và so sánh hai chế độ vận hành (lịch trình cố định và tự động bám theo tải) của vi lưới điện đa nguồn (mặt trời, gió, sinh khối) có tương tác lưới điện hiện hữu. Kết quả

nghiên cứu định lượng các chỉ số tài chính (Giá trị hiện tại ròng NPC, tỷ suất hoàn vốn ROI, thời gian hoàn vốn) và khả năng giảm thiểu khí thải (CO₂-eq), qua đó cung cấp luận cứ khoa học cho quá trình chuyển đổi năng lượng bền vững tại các vùng nuôi trồng thủy sản ven biển.

II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

1. Cấu trúc hệ thống SWB-HRES



Hình 1. Sơ đồ tổng thể hệ thống SWB

Nghiên cứu dùng phần mềm HOMER Pro để tính toán lựa chọn tối ưu các cấu phần của hệ vi lưới lai SWB-HRES phục vụ cụm ao nuôi tôm tại vùng đầm phá Tam Giang – Cầu Hai.

Error! Reference source not found. giới thiệu sơ đồ tính toán hệ thống SWB-HRES trong HOMER. Trong sơ đồ này, giàn pin mặt trời, tua-bin gió và máy phát điện chạy khí biogas/syngas đều là nguồn một chiều, được đấu nối chung vào một thanh cái (DC bus). Cấu trúc này giúp giảm số tầng chuyển đổi điện năng so với việc mỗi nguồn tự có bộ nghịch lưu riêng (Dosa et al., 2025). Toàn bộ công suất trên nhánh DC được chuyển đổi sang xoay chiều (AC) qua một bộ chuyển đổi trung tâm duy nhất để cấp cho phụ tải của cụm ao nuôi và đấu nối với lưới điện quốc gia, đóng vai trò nguồn dự phòng khi các nguồn tại chỗ không đáp ứng đủ nhu cầu. Bộ chuyển đổi là loại hòa lưới. Khi phụ tải vượt công suất định mức của bộ chuyển đổi, phần thiếu hụt

được lưới điện cấp tự động, bao gồm cả dòng khởi động của động cơ sức khí.

2. Khu vực nghiên cứu

Hệ đầm phá Tam Giang – Cầu Hai (Hình 2) là đầm phá nước lợ lớn nhất Đông Nam Á, giữ vai trò quan trọng với sinh kế cộng đồng ven biển miền Trung (Duong et al., 2026). Nuôi tôm thâm canh là mô hình sản xuất đang phát triển mạnh tại khu vực, với xu hướng

thâm canh hóa kéo theo nhu cầu phụ tải sức khí tăng nhanh (Duong et al., 2026; Nguyen & Matsuhashi, 2019; Võ và cs., 2019). Việc phát triển năng lượng tái tạo tại đây cũng phù hợp định hướng "Công viên đầm phá quốc gia" Tam Giang – Cầu Hai theo Quy hoạch chung đô thị Huế đã được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt (Thủ tướng Chính phủ, 2024).



Hình 2. Vị trí địa lý và hình ảnh vùng Cầu Hai – Tam Giang

Mô hình được khảo sát tại một cụm 05 hộ nuôi tôm thâm canh ven đầm phá (tọa độ $16^{\circ}30,2' N$, $107^{\circ}43,3' E$), với tổng công suất lắp đặt định mức 57,0 kW. Dữ liệu bức xạ mặt trời, tốc độ gió và nhiệt độ môi trường tại khu vực nghiên cứu được trích xuất từ cơ sở dữ liệu vệ tinh NASA tích hợp trong HOMER

Pro (NASA, n.d.; HOMER Energy, 2026). Tốc độ gió trung bình năm đạt 4,29 m/s, mức cao nhất vào tháng 11 (5,59 m/s) và thấp nhất vào tháng 5–6 (3,42 m/s); cường độ bức xạ mặt trời trung bình đạt 4,10 kWh/m²/ngày (Hình 3).



(a)

(b)

Hình 3. Tốc độ gió trung bình (a) và bức xạ mặt trời (b) trong năm tại Cầu Hai – Tam Giang

Khu vực Cầu Hai – Tam Giang có quy mô chất thải rắn sinh hoạt (CTRSH) tham chiếu khoảng 46 tấn/ngày (Thiều Quang và cs., 2023). Cùng với CTRSH, các hoạt động nông nghiệp và nuôi trồng thủy sản đặc trưng của vùng đầm phá còn tạo ra nguồn phụ phẩm sinh khối đáng kể, tạo cơ sở cho việc thu hồi năng lượng. Trong đó, sinh khối dễ phân hủy có thể được sử dụng để sản xuất biogas, trong khi sinh khối khó phân hủy có thể được chế biến thành viên nén nhiên liệu RDF (Refuse Derived Fuel), sau đó chuyển hóa thành

syngas thông qua quá trình khí hóa (Nguyen-Thi et al., 2023; Phung et al., 2023).

Phụ tải điện của cụm ao mang lượng điện tiêu thụ trung bình 475,5 kWh/ngày (tương đương 19,81 kW) và công suất đỉnh đạt 50,63 kW. Phụ tải điện mang đặc trưng nghịch đảo chu kỳ ngày – đêm rõ rệt: tải nền ban ngày chỉ khoảng 5,2–8,0 kW, trong khi tải đỉnh ban đêm có thể lên đến 35–40 kW, được minh họa qua sơ đồ tải điện hình trong Hình 4. Khu vực nghiên cứu hiện đã kết nối lưới điện quốc gia.



Hình 4. Biến thiên phụ tải điện trung bình theo giờ trong ngày

3. Thông số kinh tế – kỹ thuật đầu vào và chế độ vận hành

Tuổi thọ dự án được giả định là 25 năm. Lãi suất chiết khấu được lấy theo lãi suất tái cấp vốn của Ngân hàng Nhà nước Việt Nam năm 2026 là 4,5%/năm (Ngân hàng Nhà nước Việt Nam, 2026). Tỷ lệ lạm phát sử dụng là lạm phát cơ bản bình quân năm 2025, đạt 3,21%/năm so với năm 2024 (Cục Thống kê, 2026).

Chi phí thiết bị chính (đầu tư, thay thế, O&M) được trình bày cùng thông số kỹ thuật

trong **Error! Reference source not found.** Đơn giá máy phát chỉ bao gồm tổ máy phát. Chi phí hệ thống khí hóa, hầm biogas và dây chuyền sản xuất RDF được tính vào chi phí xử lý rác, do đó chi phí nhiên liệu sinh khối được giả định bằng 0. Giá điện lưới áp dụng biểu giá TOU hiện hành của EVN (giờ thấp điểm 1.300 đ/kWh; giờ bình thường 1.987 đ/kWh; giờ cao điểm 3.640 đ/kWh) (Bộ Công Thương, 2025).

Bảng 1. Thông số kỹ thuật và chi phí các cấu phần của hệ thống SWB-HRES

Thành phần	Loại/Model	Chi phí đầu tư (VNĐ)	Chi phí thay thế (VNĐ)	Chi phí O&M (VNĐ)	Tuổi thọ (năm)
Pin mặt trời	Generic Flat Plate, 80%, 1 kW	10,000,000	8,000,000	100,000	25
Tua-bin gió	AWS HC 1.5 kW	30,000,000	24,000,000	300,000	20
Máy phát syngas	Generic, 1 kW	13,000,000	10,400,000	780 (VNĐ/h)	20000 (giờ)

Bộ chuyển đổi	Generic 95%, 1 kW	5,000,000	5,000,000	50,000	15
---------------	-------------------	-----------	-----------	--------	----

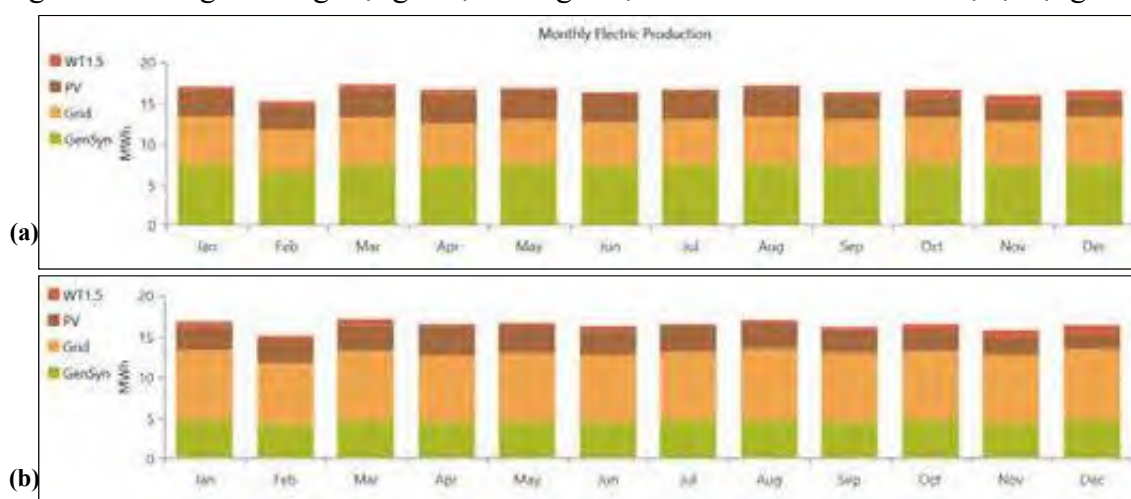
Hai chế độ vận hành đối với tổ máy phát điện sinh khối được thiết lập và so sánh: (1) vận hành theo chế độ lịch trình cố định (Scheduled), theo đó tổ máy hoạt động trong khung thời gian định trước từ 17:00 đến 05:00 ngày hôm sau, nhằm tăng cường nguồn điện tại chỗ để đáp ứng phụ tải sức khí cao vào ban đêm, đồng thời giảm lượng điện mua từ lưới trong khung giờ giá cao; (2) vận hành theo chế độ tự động bám tải (Load Following), trong đó tổ máy chỉ hoạt động khi công suất từ các nguồn năng lượng tái tạo không

đủ đáp ứng phụ tải tại từng thời điểm, với công suất phát được điều chỉnh theo mức thiếu hụt.

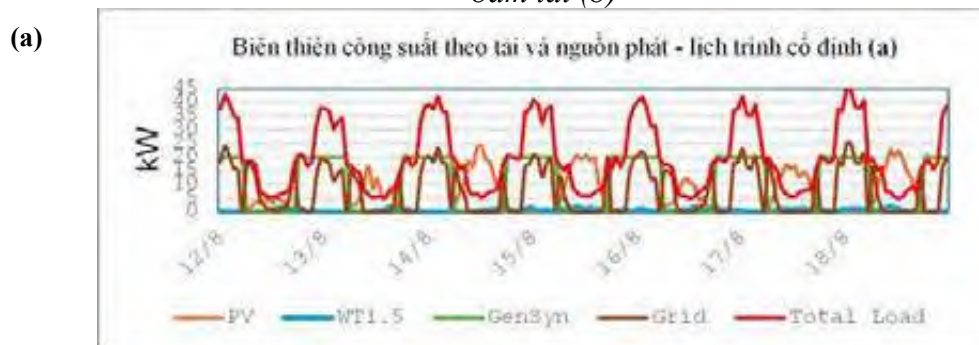
III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

1. Cấu hình tối ưu của hệ thống SWB-HRES

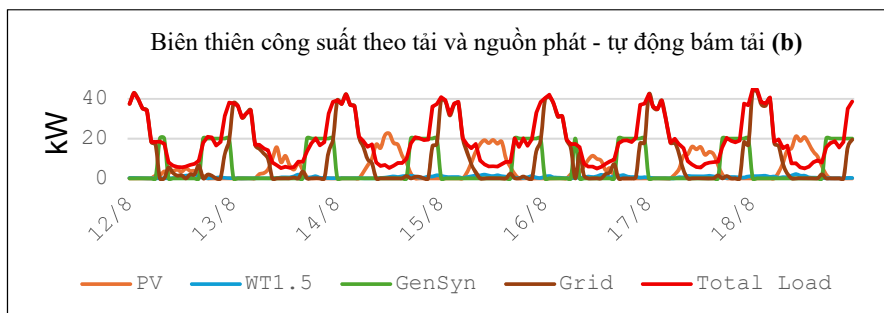
Kết quả tối ưu hóa xác định cấu hình chung cho cả hai chế độ vận hành gồm 03 cụm tua-bin gió 1,5 kW, máy phát biogas/syngas 20 kW và bộ chuyển đổi 20 kW. Công suất PV tối ưu lần lượt là 30 kW đối với chế độ lịch trình cố định và 28 kW đối với chế độ tự động bám tải.



Hình 5. Cơ cấu sản lượng điện theo tháng, chế độ lịch trình cố định (a) và chế độ tự động bám tải (b)



(b)



Hình 6. Biến thiên công suất tải và nguồn phát theo các ngày trong năm đối với chế độ lịch trình cố định (a) và chế độ tự động bám tải (b)

Tổng lượng điện sản xuất được đạt 198.130 kWh/năm đối với chế độ lịch trình cố định và 196.514 kWh/năm đối với chế độ bám tải. Ở chế độ lịch trình cố định, máy phát sinh khối đóng góp 87.600 kWh/năm, tương ứng 44,2% tổng điện năng, trong khi tỷ trọng này giảm xuống 27,7% đối với chế độ bám tải, tương ứng 54.460 kWh/năm. Sự giảm đóng góp của máy phát sinh khối ở chế độ bám tải đi kèm với mức điện năng mua từ lưới tăng từ 67.014 kWh/năm (33,8%) lên 100.961 kWh/năm (51,4%). Trong khi đó, đóng góp của PV giảm từ 36.351 xuống 33.928 kWh/năm, còn sản lượng điện từ tua-bin gió duy trì ở mức 7.165 kWh/năm trong cả hai chế độ. Do hệ thống không có cơ chế bán điện lên lưới và không tích hợp hệ thống lưu trữ, điện năng dư đạt 19.152 kWh/năm đối với chế độ lịch trình cố định và 19.285 kWh/năm đối với chế độ bám tải. Các giá trị này tương ứng 9,67% và 9,81% tổng sản lượng điện phát, đều thấp hơn ngưỡng 10% được đề xuất đối với các hệ thống HRES (Vaziri Rad et al., 2023).

Cơ cấu sản lượng điện theo nguồn của hai chế độ được thể hiện ở Hình 5a và b. Số liệu cho thấy tỷ trọng đóng góp của từng nguồn phát duy trì ổn định giữa các tháng, phù hợp với đặc tính bức xạ mặt trời và tốc độ gió ít biến động theo mùa tại khu vực nghiên cứu.

Hình 6a và b minh họa biến thiên công suất tải và nguồn phát các ngày trong năm. Tải điện dao động trong khoảng 5–45 kW, phù hợp với đặc trưng phụ tải sục khí. Vào ban ngày, điện mặt trời đáp ứng phần lớn nhu cầu phụ tải. Trong khi đó, vào ban đêm, máy phát điện vận hành kết hợp với điện lưới để đáp ứng nhu cầu phụ tải đỉnh từ 35 đến 45 kW, do mức phụ tải này vượt quá công suất định mức của máy phát và bộ chuyển đổi.

2. So sánh hai chế độ vận hành

Bảng 2 trình bày các chỉ tiêu kinh tế, kỹ thuật và môi trường của hai chế độ vận hành. Kết quả cho thấy sự khác biệt giữa chế độ lịch trình cố định và chế độ tự động bám tải về hiệu quả kinh tế, mức độ khai thác nguồn tái tạo, phát thải CO₂ và đặc tính vận hành máy phát.

Bảng 2. So sánh các chỉ tiêu kinh tế, kỹ thuật và môi trường giữa hai chế độ vận hành

Chỉ tiêu	Lịch trình cố định	Tự động bám tải	Chênh lệch
Chi phí hiện tại ròng, NPC (đ)	5.892.334.000	5.595.120.000	-5,0%
Chi phí điện quy dẫn, LCOE (đ/kWh)	1.591	1.511	-5,0%
Tỷ lệ năng lượng tái tạo (%)	61,3	41,8	-19,5 điểm %
Giờ vận hành máy phát (h/năm)	4.380	2.723	-37,8%
Sinh khối tiêu thụ (tấn/năm)	520	323	-37,9%
Phát thải CO ₂ (kg/năm)	42.627	63.473	+48,9%

Chế độ bám tải cho kết quả kinh tế thuận lợi hơn, với NPC giảm 5,0%, tương ứng 297,2

triệu đồng, từ 5.892,3 triệu đồng xuống 5.595,1 triệu đồng; đồng thời, LCOE giảm từ 1.591

xuống 1.511 đ/kWh. Chế độ bám tải cũng làm giảm giờ vận hành máy phát từ 4.380 xuống 2.723 giờ/năm, tương ứng 37,8%, và lượng sinh khối tiêu thụ từ 520 xuống 323 tấn/năm, tương ứng 37,9%.

Ngược lại, chế độ lịch trình cố định có tỷ lệ năng lượng tái tạo cao hơn và phát thải CO₂ thấp hơn. Tỷ lệ năng lượng tái tạo đạt 61,3%, so với 41,8% ở chế độ bám tải. Phát thải CO₂ tương ứng đạt 42.627 và 63.473 kg/năm, trong đó chế độ lịch trình cố định thấp hơn 32,8%. Điện mua từ lưới đóng góp 41.783 kg/năm và 62.949 kg/năm, tương ứng 98,0% và 99,2% tổng phát thải CO₂ của hai chế độ; phần còn lại,

tương ứng 844 và 524 kg/năm, đến từ máy phát tại chỗ. Chế độ bám tải có mức điện mua từ lưới cao hơn, đạt 100.961 kWh/năm (51,4%), so với 67.014 kWh/năm (33,8%) ở chế độ lịch trình cố định.

Xét về đặc tính vận hành của máy phát, các chỉ số trong Bảng 3 cho thấy chế độ bám tải có 486 chu kỳ khởi động mỗi năm, cao hơn 32,8% so với 366 chu kỳ/năm của chế độ lịch trình cố định. Hệ số tải trung bình của máy phát cũng thấp hơn, lần lượt đạt 31,1% và 50,0%. Trong khi đó, suất tiêu hao nhiên liệu riêng duy trì ở mức 0,890 kg/kWh ở cả hai chế độ.

Bảng 3. Các chỉ số về đặc tính vận hành

Chỉ số	Lịch trình cố định	Tự động bám tải
Số lần khởi động (lần/năm)	366	486
Hệ số tải trung bình (%)	50,0	31,1
Suất tiêu hao nhiên liệu riêng (kg/kWh)	0,890	0,890

Các kết quả cho thấy sự đánh đổi giữa hai chế độ vận hành. Chế độ bám tải có ưu thế về hiệu quả kinh tế và mức tiêu thụ sinh khối, thể hiện qua NPC và LCOE thấp hơn, đồng thời giảm đáng kể thời gian vận hành và lượng sinh khối tiêu thụ. Ngược lại, chế độ lịch trình cố định có ưu thế về tỷ lệ năng lượng tái tạo và phát thải CO₂, đồng thời duy trì đặc tính khai thác máy phát ổn định hơn với số lần khởi động thấp hơn và hệ số tải trung bình cao hơn.

3. Phân tích hiệu quả kinh tế và môi trường

So với phương án chỉ sử dụng điện lưới, hệ thống SWB-HRES cho thấy sự cải thiện rõ rệt về cả chi phí vòng đời và phát thải CO₂ ở cả hai chế độ vận hành. Phương án chỉ sử dụng điện lưới đáp ứng toàn bộ nhu cầu phụ tải từ điện lưới quốc gia và không tích hợp nguồn phát tại chỗ. Kết quả so sánh được trình bày trong Bảng 4.

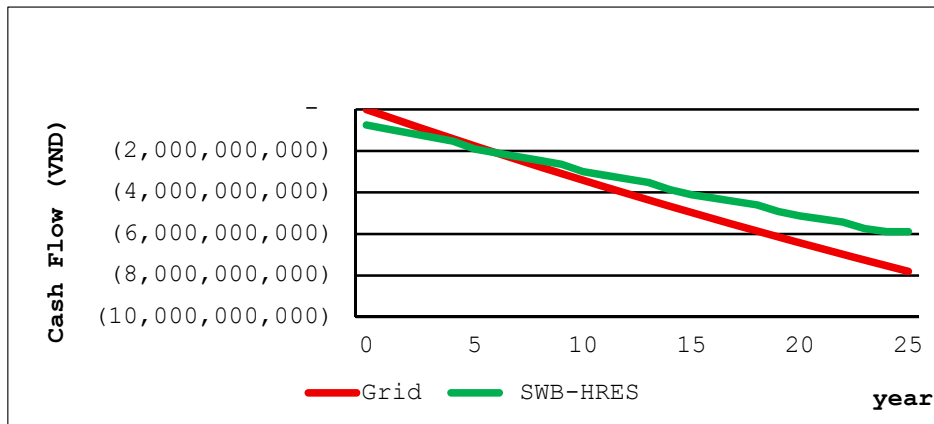
Bảng 4. Hiệu quả kinh tế và môi trường của hệ thống SWB-HRES so với phương án chỉ sử dụng điện lưới

Chỉ số	Chỉ sử dụng điện lưới	SWB-HRES – Lịch trình cố định	SWB-HRES – Tự động bám tải
Chi phí hiện tại ròng, NPC (đ)	7.800.000.000	5.892.334.000	5.595.120.000
Tiết kiệm NPC (đ)	-	1.907.666.000 (24,5%)	2.204.880.000 (28,3%)
Tỷ suất hoàn vốn đầu tư, ROI (%)	-	12,6	14,9
Chi phí đầu tư ban đầu (đ)	0	750.000.000	730.000.000
Chi phí vận hành (đ/năm)	365.000.000	241.000.000	228.000.000
Chi phí điện quy dẫn, LCOE (đ/kWh)	2.109	1.591	1.511
Phát thải CO ₂ (kg/năm)	107.965	42.627	63.473

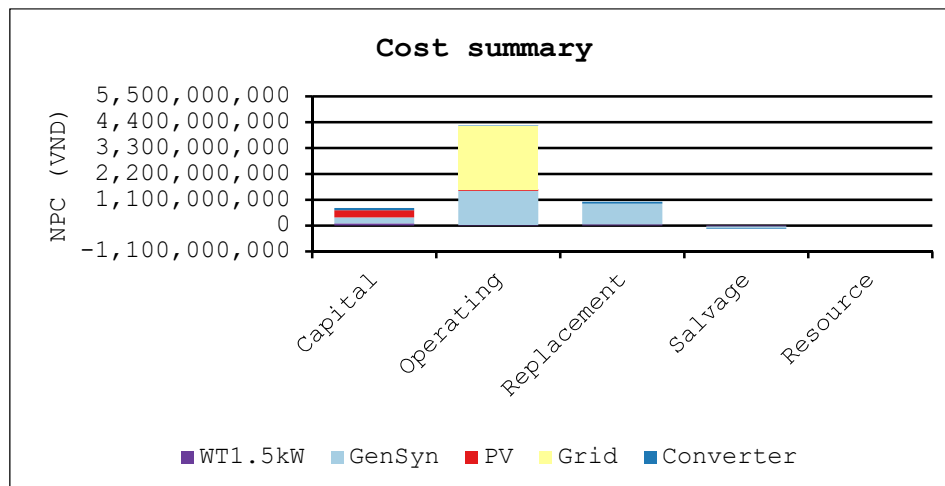
Giảm phát thải CO ₂ (kg)	-	65.338 (60,5%)	44.492 (41,2%)
Thời gian hoàn vốn chiết khấu (năm)	-	5,98	4,70

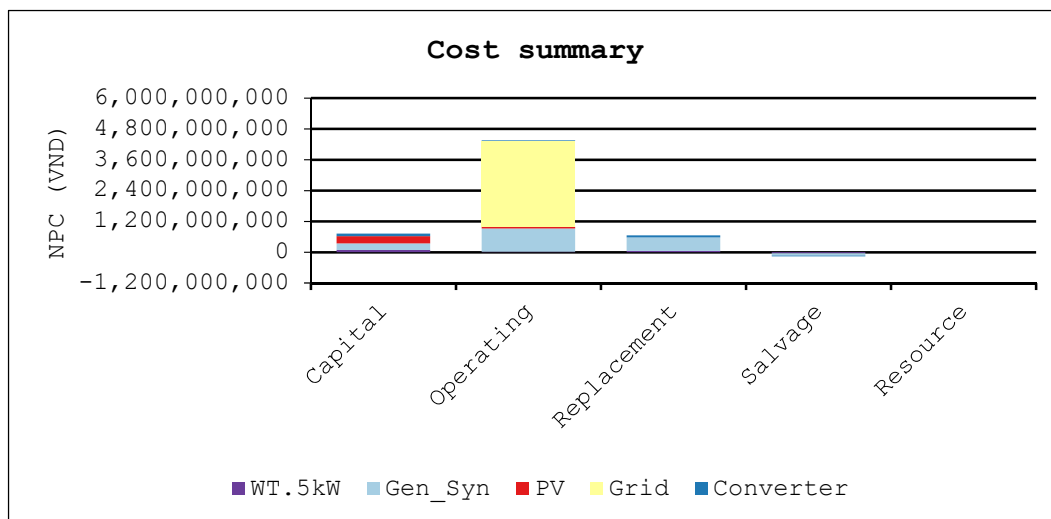
Về kinh tế, cả hai chế độ vận hành đều cho thấy chi phí vòng đời thấp hơn phương án chỉ sử dụng điện lưới. Chi phí hiện tại ròng giảm 24,5% đối với chế độ lịch trình cố định và 28,3% đối với chế độ tự động bám tải, tương ứng mức tiết kiệm 1.907,7 và 2.204,9 triệu

đồng trong vòng đời 25 năm. Chi phí điện quy dẫn giảm từ 2.109 đ/kWh của phương án chỉ sử dụng điện lưới xuống lần lượt 1.591 và 1.511 đ/kWh. Đồng thời, chi phí vận hành giảm từ 365 triệu đồng/năm xuống 241 và 228 triệu đồng/năm.



Hình 7. Chi phí chiết khấu tích lũy của hệ thống SWB-HRES theo chế độ lịch trình cố định và phương án chỉ sử dụng điện lưới trong vòng đời 25 năm





Hình 8. Cơ cấu chi phí vòng đời của hệ thống SWB-HRES theo chế độ lịch trình cố định (a) và chế độ tự động bám tải (b)



Về vốn đầu tư, hai chế độ yêu cầu chi phí đầu tư ban đầu lần lượt là 750 và 730 triệu đồng. Tỷ suất hoàn vốn đầu tư (ROI) đạt 12,6% đối với chế độ lịch trình cố định và 14,9% đối với chế độ tự động bám tải. Thời gian hoàn vốn chiết khấu lần lượt là 5,98 và 4,70 năm. Các giá trị ROI dương và thời gian hoàn vốn dưới 6 năm cho thấy cả hai chế độ đều đạt hiệu quả tài chính tích cực trong vòng đời 25 năm của dự án.

Về môi trường, phát thải CO₂ của hai chế độ lần lượt đạt 42.627 và 63.473 kg/năm, tương ứng giảm 65.338 kg/năm (60,5%) và 44.492 kg/năm (41,2%) so với phương án chỉ sử dụng điện lưới. Mức giảm phát thải của

chế độ lịch trình cố định lớn hơn so với chế độ tự động bám tải. Hình 7 thể hiện chi phí chiết khấu tích lũy của hệ thống SWB-HRES theo chế độ lịch trình cố định và phương án chỉ sử dụng điện lưới trong vòng đời 25 năm. Chi phí tích lũy của hệ thống SWB-HRES cao hơn trong giai đoạn đầu do phát sinh chi phí đầu tư ban đầu, sau đó thấp hơn phương án chỉ sử dụng điện lưới sau thời điểm hoàn vốn, và khoảng cách tiếp tục gia tăng trong các năm tiếp theo. Do chênh lệch NPC giữa hai chế độ vận hành chỉ ở mức 5,0%, đường lũy kế chi phí của chế độ bám tải có dạng tương tự.

Cơ cấu chi phí vòng đời của hai chế độ được thể hiện ở Hình 8a và b. Đối với phương án chỉ sử dụng điện lưới, chi phí vận hành chiếm tỷ trọng chủ đạo do toàn bộ điện năng phục vụ phụ tải được mua từ lưới. Trong khi đó, cả hai chế độ SWB-HRES đều chuyển một phần chi phí từ vận hành sang đầu tư ban đầu thông qua việc tích hợp các nguồn phát tại chỗ, đồng thời làm giảm chi phí vận hành trong suốt vòng đời dự án.

4. Phân tích độ nhạy theo cơ chế xuất khẩu một phần điện mặt trời

Bảng 5. So sánh hiệu quả của hệ thống khi có cơ chế bán điện dư lên lưới

Chỉ số	Lịch cố định (không bán)	Lịch cố định + bán 15 kW	Tự động bán tải (không bán)	Tự động bán tải + bán 14 kW
Chi phí hiện tại ròng, NPC (đ)	5.892.334.000	5.158.289.000	5.595.120.000	4.823.071.000
Tiết kiệm NPC so với kịch bản không xuất khẩu	-	734.045.000 (12,5%)	-	772.049.000 (13,8%)
Chi phí điện quy dẫn, LCOE (đ/kWh)	1.591	1.273 (20,0%)	1.511	1.186 (21,5%)
Chi phí đầu tư ban đầu (đ)	750.000.000	750.000.000	730.000.000	730.000.000
Chi phí vận hành (đ/năm)	241.000.000	206.404.000	228.000.000	191.645.000
Tỷ lệ năng lượng tái tạo (%)	61,3	64,7	41,8	47,8
Điện năng dư (%)	9,67	0,96	9,81	1,21
Tỷ suất hoàn vốn đầu tư, ROI (%)	12,6	17,2	14,9	19,8
Thời gian hoàn vốn chiết khấu (năm)	5,98	3,87	4,70	3,79

Khả năng bán điện dư lên lưới cải thiện rõ rệt hiệu quả kinh tế ở cả hai chế độ. NPC giảm 12,5% đối với lịch trình cố định và 13,8% đối với bán tải, trong khi LCOE giảm lần lượt 20,0% và 21,5%. Chi phí đầu tư ban đầu (CAPEX) không thay đổi, trong khi chi phí vận hành (OPEX) giảm tương ứng 34,596 và 36,355 triệu đồng/năm.

Đồng thời, tỷ lệ điện dư giảm mạnh từ 9,67% xuống 0,96% đối với lịch trình cố định và từ 9,81% xuống 1,21% đối với bán tải; tỷ lệ năng lượng tái tạo tăng tương ứng từ 61,3% lên 64,7% và từ 41,8% lên 47,8%. ROI tăng

Đề đánh giá tác động của khả năng bán điện dư lên lưới, nghiên cứu thực hiện mô phỏng trên cùng cấu hình phần cứng tối ưu của hai chế độ vận hành. Công suất xuất khẩu được giả định bằng 50% công suất PV lắp đặt, tương ứng 15 kW đối với chế độ lịch trình cố định và 14 kW đối với chế độ tự động bán tải; các thành phần còn lại của hệ thống được giữ nguyên. Kết quả được trình bày trong Bảng 5.

lên 17,2% và 19,8%, trong khi thời gian hoàn vốn chiết khấu giảm còn 3,87 và 3,79 năm.

Như vậy, trong điều kiện giả định có thể bán điện dư lên lưới, cả hai chế độ đều cải thiện hiệu quả kinh tế và mức khai thác nguồn tái tạo, đồng thời giảm đáng kể lượng điện dư của hệ thống. Kết quả này mang tính thăm dò kỹ thuật – kinh tế; khả năng áp dụng thực tế còn phụ thuộc vào hình thức lắp đặt PV, điều kiện đầu nối và quy định hiện hành.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã sử dụng HOMER Pro để tối ưu hóa hệ thống năng lượng tái tạo lai kết hợp

sinh khối (SWB-HRES) cho cụm 05 hộ nuôi tôm thâm canh tại vùng đầm phá Tam Giang – Cầu Hai, đồng thời đánh giá hai chế độ vận hành máy phát sinh khối gồm lịch trình cố định và tự động bám tải. Cấu hình tối ưu gồm PV 28–30 kW, ba cụm tua-bin gió 1,5 kW, máy phát biogas/syngas 20 kW và bộ chuyển đổi 20 kW. Kết quả cho thấy cả hai chế độ đều có khả năng đáp ứng phụ tải của hệ thống, với tỷ lệ điện năng dư khoảng 9,7–9,8% trong điều kiện không có cơ chế xuất khẩu điện.

Về hiệu quả kinh tế, cả hai chế độ vận hành đều cho chi phí vòng đời thấp hơn so với phương án chỉ sử dụng điện lưới. Chế độ lịch trình cố định đạt chi phí hiện tại ròng (NPC) 5.892,3 triệu đồng, giảm 24,5%, với thời gian hoàn vốn chiết khấu 5,98 năm và ROI 12,6%. Chế độ tự động bám tải đạt NPC 5.595,1 triệu đồng, giảm 28,3%, với thời gian hoàn vốn chiết khấu 4,70 năm và ROI 14,9%. Về môi trường, phát thải CO₂ lần lượt là 42.627 và 63.473 kg/năm, tương ứng mức giảm 60,5% và 41,2% so với phương án chỉ sử dụng điện lưới; tỷ lệ năng lượng tái tạo đạt 61,3% và 41,8%. Các kết quả này cho thấy sự đánh đổi rõ rệt giữa hiệu quả kinh tế và hiệu quả môi trường của hai chế độ vận hành.

Xét về đặc tính vận hành, chế độ tự động bám tải có số chu kỳ khởi động máy phát cao hơn 32,8% so với chế độ lịch trình cố định, tương ứng 486 và 366 chu kỳ/năm, đồng thời có hệ số tải trung bình thấp hơn, lần lượt 31,1% và 50,0%. Những đặc điểm này có thể làm gia tăng yêu cầu bảo trì và ảnh hưởng đến độ bền vận hành của tổ máy, nhưng chưa được lượng hóa trong mô hình kinh tế của nghiên cứu. Trên cơ sở xem xét đồng thời hiệu quả kinh tế, môi trường và đặc tính vận hành, chế độ lịch trình cố định được lựa chọn làm phương án vận hành chuẩn cho hệ thống SWB-HRES. Lựa chọn này dựa trên lợi thế về phát thải, tỷ lệ năng lượng tái tạo và đặc tính vận hành, trong khi chênh lệch CAPEX và NPC so với chế độ tự động bám tải chỉ khoảng 2,7% và 5,0%, tương ứng.

Phân tích độ nhạy với giả định cho phép xuất khẩu một phần điện dư lên lưới cho thấy hiệu quả của cả hai chế độ tiếp tục được cải thiện mà không phát sinh thêm CAPEX. NPC giảm thêm 12,5% đối với chế độ lịch trình cố định và 13,8% đối với chế độ tự động bám tải so với các kịch bản tương ứng không xuất khẩu; thời gian hoàn vốn chiết khấu giảm còn lần lượt 3,87 và 3,79 năm. Đồng thời, tỷ lệ điện năng dư giảm từ 9,67% xuống 0,96% và từ 9,81% xuống 1,21%. Kết quả này cho thấy khả năng xuất khẩu điện dư có thể nâng cao hiệu quả khai thác nguồn tái tạo và hiệu quả kinh tế của hệ thống. Tuy nhiên, đây là kết quả thăm dò kỹ thuật–kinh tế; khả năng áp dụng thực tế còn phụ thuộc vào quy định pháp lý hiện hành.

Nghiên cứu cung cấp cơ sở định lượng cho việc tích hợp các nguồn năng lượng tái tạo với phụ tải nuôi trồng thủy sản tại vùng đầm phá Tam Giang – Cầu Hai, đồng thời làm rõ sự đánh đổi giữa hiệu quả kinh tế, môi trường và đặc tính vận hành khi lựa chọn chế độ vận hành máy phát sinh khối. Kết quả có thể được tham khảo cho các cụm nuôi trồng thủy sản có đặc điểm phụ tải và tiềm năng tài nguyên tương tự. Nghiên cứu mô phỏng theo bước 1 giờ nên chưa đánh giá được quá trình quá độ khi khởi động động cơ sức khí. Ngoài ra, nghiên cứu chỉ xét chế độ vận hành nối lưới. Các nghiên cứu tiếp theo nên tập trung đánh giá sâu hơn ảnh hưởng của chế độ khởi động–dừng đến tuổi thọ và chi phí bảo trì máy phát, đồng thời khảo sát các mức và điều kiện bán điện khác nhau nhằm xác định phạm vi vận hành phù hợp về cả kỹ thuật, kinh tế và pháp lý.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bajpai, P., & Dash, V. (2012). Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16(5), 2926–2939.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.009>

2. Bộ Công Thương (2025). *Quy định về giá bán điện*. Quyết định số 1279/QĐ-BCT ngày 09/5/2025.

<https://thuvienphapluat.vn/van-ban/Thuong->

mai/Quyết-dinh-1279-QĐ-BCT-2025-gia-ban-dien-656047.aspx

3. Bùi Văn Ga, Nguyễn Văn Đông, Cao Xuân Tuấn, & Võ Anh Vũ. (2022). Mô phỏng quá trình cung cấp nhiên liệu linh hoạt syngas-biogas-hydrogen cho động cơ tĩnh tại đánh lửa cưỡng bức. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 20(9), 17–23.

4. Cục Thống kê (2026). *Niên giám Thống kê Việt Nam năm 2025*. NXB Kinh tế - Tài chính, Hà Nội. https://www.nso.gov.vn/wp-content/uploads/2026/07/NG-TOAN-QUOC-2025_WM-1.pdf

5. Deguenon, L., Yamegueu, D., Moussa kadri, S., & Gomna, A. (2023). Overcoming the challenges of integrating variable renewable energy to the grid: A comprehensive review of electrochemical battery storage systems. *Journal of Power Sources*, 580, 233343. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233343>

6. Dosa, A., Olanrewaju, O. A., & Mora-Camino, F. (2025). A Comprehensive Review of Hybrid Renewable Microgrids: Key Design Parameters, Optimization Techniques, and the Role of Demand Response in Enhancing System Flexibility. *Energies*, 18(19), 5154. <https://doi.org/10.3390/en18195154>

7. Duong, N. P., Le, T. T. T., Nguyen, N. T., & Ho, L. P. K. (2026). Livelihood diversification and transition among lagoon fishing households and White leg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) farming expansion in Phu Dien Commune, Hue City, Vietnam. *Hue Univ. J. Sci. Agric. Rural Dev.*, 135(3D), 05–19. <https://doi.org/10.26459/hueunijard.v135i3D.8378>

8. Dufo-López, R., & Bernal-Aguistin, J. L. (2008). Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems. *Renew. Energy*, 33(12), 2559–2572. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.027>

9. Duman, A. C., & Güler, Ö. (2018). Techno-economic analysis of off-grid PV/wind/fuel cell hybrid system combinations with a comparison of regularly and seasonally occupied households. *Sustain.*

Cities Soc., 42, 107–126. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.029>

10. Hasan, M. M., & Genç, G. (2022). Techno-economic analysis of solar/wind power based hydrogen production. *Fuel*, 324, 124564. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124564>

11. HOMER Energy (2026). *HOMER Model*. <https://homerenergy.com/docs/knowledgebase/homer-model/>

12. IEA (International Energy Agency) (2021). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. <https://www.iea.org/events/net-zero-by-2050-a-roadmap-for-the-global-energy-system>

13. Maleki, A., & Askarzadeh, A. (2014). Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran. *Sustain. Energy Technol. Assess.*, 7, 147–153. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.04.005>

14. NASA (National Aeronautics and Space Administration). (n.d.). *NASA POWER*. <https://power.larc.nasa.gov/>

15. Ngân hàng Nhà nước Việt Nam (2026). *Lãi suất*. <https://www.sbv.gov.vn/vi/lãi-suất1>

16. Nguyen, N. T., & Matsushashi, R. (2019). An Optimal Design on Sustainable Energy Systems for Shrimp Farms. *IEEE Access*, 7, 165543–165558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2952923>

17. Nguyen-Thi, T. X., Bui, T. M. T., & Bui, V. G. (2023). Simulation and experimental study of refuse-derived fuel gasification in an updraft gasifier. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(3), 601–614. <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.53994>

18. Phung, M. T., Bui, V. G., Tran T. S., Nguyen, M. T., & Tong, D. Q. (2023). Simulation and Experimental Study on Refuse Derived Fuel Gasification in a Downdraft Gasifier. *Presented at the 14th*

Asia-Pacific Conference on Combustion, May 14, 2023.

19. Thiều Quang và nhóm PV, BTV. (2023). *Thừa Thiên Huế: Tăng cường thu gom, vận chuyển và xử lý chất thải rắn*. Báo VietNamNet. <https://vietnamnet.vn/thua-thien-hue-tang-cuong-thu-gom-van-chuyen-va-xu-ly-chat-thai-ran-2262693.html>

20. Thủ tướng Chính phủ (2023). *Phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021–2030, tầm nhìn đến năm 2050*. Quyết định số 500/QĐ-TTg ngày 15/05/2023.

<https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=207889>

21. Thủ tướng Chính phủ (2024). *Phê duyệt Quy hoạch chung đô thị Thừa Thiên Huế đến năm 2045, tầm nhìn đến năm 2065*. Quyết định số 108/QĐ-TTg ngày 26/01/2024. <https://luatminhkhue.vn/vanban/quyet-dinh-108-qd-ttg-nam-2024.aspx>

22. Tu, B.T.M., Van Quang, P., Vu, V.A. (2025). Technique of Supplying Syngas-Biogas-Hydrogen to SI Engine. In: Long, B.T., *et al.* Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development (MMMS2024). MMMS 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-93816-0_22

- Ngày gửi bài: 24/08/2026

- Ngày phản biện: 16/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

23. Rogelj, J., Geden, O., Cowie, A., & Reisinger, A. (2021). Net-zero emissions targets are vague: three ways to fix. *Nature*, 591(7850), 365–368.

<https://doi.org/10.1038/d41586-021-00662-3>

24. Ủy ban nhân dân thành phố Huế (2026). *Phê duyệt điều chỉnh Quy hoạch thành phố Huế thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050*. Quyết định số 756/QĐ-UBND ngày 28/02/2026.

<https://stc.hue.gov.vn/tin-tuc-su-kien/quy-hoach-thanh-pho-hue-thoi-ky-2021-2030-tam-nhin-den-nam-2050.html>

25. Vaziri Rad, M. A., Kasaeian, A., Niu, X., Zhang, K., & Mahian, O. (2023). Excess electricity problem in off-grid hybrid renewable energy systems: A comprehensive review from challenges to prevalent solutions. *Renew. Energy*, 212, 538–560. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.073>

26. Võ Nam Sơn, Đào Minh Hải, Nguyễn Thế Diễn, Vũ Văn Thùy, Đinh Xuân Lập, Nguyễn Đỗ Quỳnh & và Nguyễn Thanh Phương (2019). Phân tích hiệu quả sản xuất và sử dụng năng lượng điện trong nuôi tôm sú (*Penaeus monodon*) và thẻ chân trắng (*Litopenaeus vannamei*) thâm canh và quảng canh cải tiến ở Đồng bằng sông Cửu Long. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 55(1B), 69-79.

<https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2019.024>

TỰ TỰ ĐỘNG HÓA ĐẾN TỰ TỐI ƯU CÓ KIỂM SOÁT TRONG CÔNG NGHIỆP THỰC PHẨM: TỔNG QUAN VÀ KHUNG CHIẾN LƯỢC AI-IOT DỰA TRÊN TÍNH TOÀN VỆN CỦA QUYẾT ĐỊNH

TS. Phạm Việt Hùng¹, PGS.TS. Nguyễn Văn Toàn^{1*}

TÓM TẮT

Số hóa tạo ra lượng dữ liệu lớn trong nhà máy thực phẩm nhưng chưa bảo đảm các hệ thống vận hành, chất lượng và bảo trì hình thành chuỗi quyết định thống nhất. Thách thức này gia tăng do biến động sinh học của nguyên liệu ảnh hưởng đồng thời đến truyền nhiệt, truyền khối, phản ứng sinh hóa, chất lượng và hiệu quả tài nguyên. Thông qua tổng quan định hướng có cấu trúc kết hợp tổng hợp khái niệm, bài viết đề xuất Tính toàn vẹn của quyết định (Decision Integrity) làm nguyên tắc chuyển dữ liệu có ngữ cảnh thành quyết định có thể truy xuất, kiểm chứng và kiểm soát trong giới hạn an toàn thực phẩm. Khung đề xuất liên kết dữ liệu, ngữ cảnh quá trình, phiên bản mô hình, mục tiêu, ràng buộc, thẩm quyền và kết quả xác minh, đồng thời duy trì quyền giám sát, can thiệp và phục hồi của con người. Bốn đóng góp gồm mô hình trưởng thành năng lực quyết định năm cấp, kiến trúc tham chiếu AI-IoT sáu tầng, lộ trình triển khai theo giá trị và chương trình nghiên cứu chiến lược cho Việt Nam. Ba không gian tạo giá trị và vòng quyết định khép kín được sử dụng để vận hành hóa khung. Tự tối ưu có kiểm soát được xem là lựa chọn theo từng trường hợp sử dụng, không phải đích mặc định. Khung hiện là đề xuất khái niệm, chưa được kiểm định thực nghiệm; các bằng chứng mô phỏng, nghiên cứu trường hợp và khảo sát chỉ được diễn giải trong phạm vi nguồn.

Từ khóa: AI-IoT; chế biến thực phẩm thông minh; tính toàn vẹn của quyết định; tự tối ưu có kiểm soát; bản sao số; Quality 4.0

FROM AUTOMATION TO CONTROLLED SELF-OPTIMIZATION IN FOOD MANUFACTURING: A REVIEW AND DECISION-INTEGRITY-BASED STRATEGIC FRAMEWORK FOR AI-IOT

ABSTRACT

Digitalization generates extensive data in food manufacturing, yet operational, quality, and maintenance systems do not necessarily support integrated decision-making. Biological variability in raw materials further complicates heat and mass transfer, biochemical reactions, product quality, and resource efficiency. Through a structured, perspective-oriented review and conceptual synthesis, this article proposes Decision Integrity as a principle for converting contextualized data into traceable, verifiable, and controlled decisions within approved food-safety boundaries. The framework links data, process context, model versions, objectives, constraints, authorization, and verified outcomes while preserving human oversight, intervention, and recovery. Four contributions are presented: a five-level decision-capability maturity model, a six-layer AI-IoT reference architecture, a value-driven implementation roadmap, and a strategic research agenda for Vietnam. Three value spaces and a closed decision loop operationalize the framework. Controlled self-optimization is considered a use-case-specific option rather than a universal objective. The proposed framework remains conceptual and has not been experimentally validated; simulation results, case studies, and surveys are interpreted within their respective evidential limits.

Keywords: AI-IoT; smart food processing; decision integrity; controlled self-optimization; digital twin; Quality 4.0

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Số hóa tạo ra lượng dữ liệu lớn trong nhà máy thực phẩm, nhưng các hệ thống PLC/SCADA, MES, ERP, quản lý chất lượng và bảo trì thường thiếu liên kết về mã mề, thời gian và ngữ cảnh, khiến dữ liệu chưa hình thành chuỗi quyết định thống nhất. Các tổng quan Industry 4.0 và Quality 4.0 cho thấy sự phát triển đa dạng của công nghệ nhưng chưa trực tiếp định lượng mức độ phân

mảnh dữ liệu tại một mẫu nhà máy thực phẩm đại diện (Damián Moran et al., 2025; Peres et al., 2025).

Thách thức này đặc biệt rõ trong chế biến thực phẩm do biến động sinh học của nguyên liệu ảnh hưởng đến truyền nhiệt, truyền khối, phản ứng sinh hóa và chất lượng. Nghiên cứu bóng số trong sấy cà rốt minh họa khả năng mô hình hóa biến động này (Schemminger et al., 2024); cảm biến mềm trong thanh trùng

¹ Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

*Tác giả liên hệ: nguyenvantoan@huaf.edu.vn

bia cho thấy tiềm năng giám sát đại lượng khó đo tại một thiết bị công nghiệp (Afolaranmi et al., 2023). Tuy nhiên, các kết quả chưa đủ để suy rộng cho toàn ngành. Tối ưu hóa còn đòi hỏi cân bằng năng suất, chất lượng và tài nguyên trong giới hạn an toàn thực phẩm. Nghiên cứu quản lý nước tại một nhà máy đồ uống cho thấy hiệu quả của chương trình nhiều biện pháp, không thể quy riêng cho IoT (Jagtap et al., 2021).

Khoảng cách từ thí điểm đến triển khai bền vững phụ thuộc vào đường cơ sở, khả năng xác định tác động và chi phí vòng đời. Khảo

sát tại Việt Nam ghi nhận sự khác biệt về tiếp nhận công nghệ nhưng chưa cung cấp bằng chứng riêng đủ chi tiết về AI-IoT trong chế biến thực phẩm (Cirera et al., 2021).

Trên cơ sở đó, bài viết đề xuất Tính toàn vẹn của quyết định (Decision Integrity): khả năng truy xuất một quyết định công nghệ từ dữ liệu, ngữ cảnh quá trình, phiên bản mô hình, mục tiêu, ràng buộc và thẩm quyền đến kết quả thực tế; đồng thời bảo đảm giới hạn an toàn, quyền giám sát, bác bỏ và phục hồi của con người.



Hình 1. Vòng tính toàn vẹn của quyết định
(Nguồn: Đề xuất của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

Hình 1 thể hiện sự liên kết giữa dữ liệu có ngữ cảnh, mô hình, quyết định được cấp quyền và phản hồi xác minh. Theo đó, tự tối ưu có kiểm soát không đồng nghĩa với quyền tự chủ tuyệt đối. Bài viết đặt câu hỏi: Làm thế nào chuyển từ tự động hóa sang năng lực dự báo, đề xuất và tự điều chỉnh trong giới hạn an toàn thực phẩm? Để trả lời, nghiên cứu phát triển bốn cấu phần liên kết: mô hình trưởng thành năm cấp, kiến trúc tham chiếu

sáu tầng, lộ trình triển khai theo giá trị và chương trình nghiên cứu chiến lược cho Việt Nam. Ba không gian tạo giá trị và vòng quyết định khép kín được sử dụng để vận hành hóa khung đề xuất.

II. PHƯƠNG PHÁP TỔNG QUAN VÀ XÂY DỰNG KHUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phạm vi và định hướng tổng quan

Bài viết thực hiện tổng quan định hướng có cấu trúc, kết hợp tổng hợp khái niệm về

Industry 4.0, sản xuất thực phẩm thông minh và Quality 4.0 (Konur et al., 2021; Damián Moran et al., 2025; Peres et al., 2025), cùng các nghiên cứu ứng dụng, mô phỏng, khảo sát, báo cáo và tiêu chuẩn liên quan. Các tiêu chuẩn chỉ dùng để đối chiếu, không phải bằng chứng về hiệu quả AI-IoT.

2.2. Tiêu chí lựa chọn và phân tích tài liệu

Tài liệu được lựa chọn theo tính liên quan, khả năng truy xuất và giá trị bằng chứng; phân tích theo đối tượng, công nghệ, thiết kế nghiên cứu, điều kiện vận hành, đường cơ sở, đơn vị chức năng, KPI, loại quyết định, ràng buộc an toàn và giới hạn suy rộng.

2.3. Phân loại và tổng hợp bằng chứng

Bằng chứng được phân loại theo thiết kế và phạm vi áp dụng, gồm mô hình hóa sầy cả ruột (Schemminger et al., 2024), cảm biến mềm trong thanh trùng bia (Afolaranmi et al., 2023), quản lý nước tại nhà máy đồ uống (Jagtap et al., 2021) và khảo sát tiếp nhận công nghệ tại Việt Nam (Cirera et al., 2021). Kết quả chỉ được diễn giải trong phạm vi từng nguồn, không cộng gộp hoặc suy rộng thành hiệu quả chung của AI-IoT.

2.4. Xây dựng khung nghiên cứu

Từ các trục dữ liệu, ngữ cảnh quá trình, mô hình, quyết định, an toàn và trách nhiệm con người, nhóm tác giả tổng hợp nghiên cứu về sản xuất thông minh, kết nối dữ liệu và mô hình số (Konur et al., 2021; Rocha et al., 2019; Defraeye et al., 2019; Schemminger et al., 2024) để đề xuất mô hình trưởng thành năm cấp, kiến trúc sáu tầng, lộ trình theo giá trị và chương trình nghiên cứu cho Việt Nam. Ba không gian giá trị và vòng quyết định khép kín được sử dụng để vận hành hóa khung.

2.5. Định vị và đóng góp khái niệm

Industry 4.0 nhấn mạnh kết nối, tích hợp

và tự động hóa (Konur et al., 2021; Damián Moran et al., 2025); Quality 4.0 tập trung vào quản trị chất lượng số (Peres et al., 2025), còn ISO/IEC 42001:2023 quy định các yêu cầu quản lý AI.

Bài viết đề xuất Tính toàn vẹn của quyết định (Decision Integrity) nhằm tích hợp dữ liệu, ngữ cảnh, phiên bản mô hình, mục tiêu, ràng buộc, thẩm quyền và kết quả xác minh trong công nghiệp thực phẩm. An toàn thực phẩm là ranh giới cứng; con người duy trì quyền giám sát, can thiệp và phục hồi. Khung đề xuất chưa được kiểm định thực nghiệm và không thay thế các tiêu chuẩn hiện hành.

III. MÔ HÌNH TRƯỞNG THÀNH CỦA NĂNG LỰC QUYẾT ĐỊNH

Hình 2 tổ chức mức trưởng thành theo năng lực quyết định của từng trường hợp sử dụng, không theo số cảm biến, phần mềm hoặc mô hình.

Bài viết đề xuất mô hình trưởng thành năm cấp Connected → Visible → Predictive → Prescriptive → Controlled Self-Optimizing, đánh giá năng lực quyết định theo từng trường hợp sử dụng thay vì số lượng công nghệ triển khai. Mô hình phản ánh sự chuyển dịch từ kết nối, quan sát sang dự báo, đề xuất và tự điều chỉnh trong miền được phê duyệt, với các yêu cầu tương ứng về bằng chứng, thẩm quyền, an toàn, truy xuất và phục hồi.

Một nhà máy có thể đồng thời vận hành ở nhiều cấp; chẳng hạn, bảo trì đạt cấp Predictive trong khi quản trị chất lượng mới ở cấp Visible. Cấp cao hơn không mặc nhiên phù hợp với mọi trường hợp, đặc biệt khi rủi ro vượt quá năng lực kiểm soát. Vai trò con người chuyển từ thao tác lặp sang xác lập mục tiêu, phê duyệt giới hạn và xử lý ngoại lệ, đòi hỏi năng lực phối hợp liên chức năng trong công nghiệp thực phẩm (Akyazi et al., 2020).



Hình 2. Mô hình trưởng thành năm cấp của năng lực quyết định

(Nguồn: Đề xuất của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

Đóng góp của mô hình nằm ở việc cấu trúc hóa năng lực quyết định theo đặc thù chế biến thực phẩm, thay vì xếp hạng theo mức độ trang bị công nghệ. Đây là đề xuất khái niệm, chưa phải thang đo được kiểm định toàn

ngành và cần được đối chiếu, xác nhận trong các nghiên cứu tiếp theo.

Bảng 1 chuyển Hình 2 thành các tiêu chí quan sát được để xác định bằng chứng cần có trước khi một trường hợp sử dụng chuyển cấp.

Bảng 1. Mô hình trưởng thành năm cấp

Cấp	Dữ liệu	Quyết định	Con người	KPI	Điều kiện chuyển cấp
Connected	Có ID, timestamp và trao đổi dữ liệu	Thu nhận trạng thái	Diễn giải, hành động	Data availability, loss, latency	Liên kết dữ liệu với mẹ
Visible	Dữ liệu gắn mẽ, công thức, thiết bị, chất lượng	Mô tả, truy nguyên	Chẩn đoán	Traceability, detection time	Có đường cơ sở
Predictive	Lịch sử, nhãn và miền áp dụng	Dự báo, cảnh báo	Xác nhận, chọn hành động	Sai số đúng đơn vị, false alarm, lead time	Xác nhận ngoài mẫu và giám sát drift
Prescriptive	Mục tiêu, ràng buộc, chi phí hành động	So sánh, đề xuất phương án	Phê duyệt đánh đổi	Cải thiện so với baseline, vi phạm ràng buộc	Quyền phê duyệt và fallback
Self-optimizing	Mô hình, phản hồi và logic thực thi tích hợp	Điều chỉnh trong miền cho phép	Đặt mục tiêu, giám sát, override	KPI đa mục tiêu, override, recovery	Safety case và quản trị vòng đời

(Nguồn: Tổng hợp của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

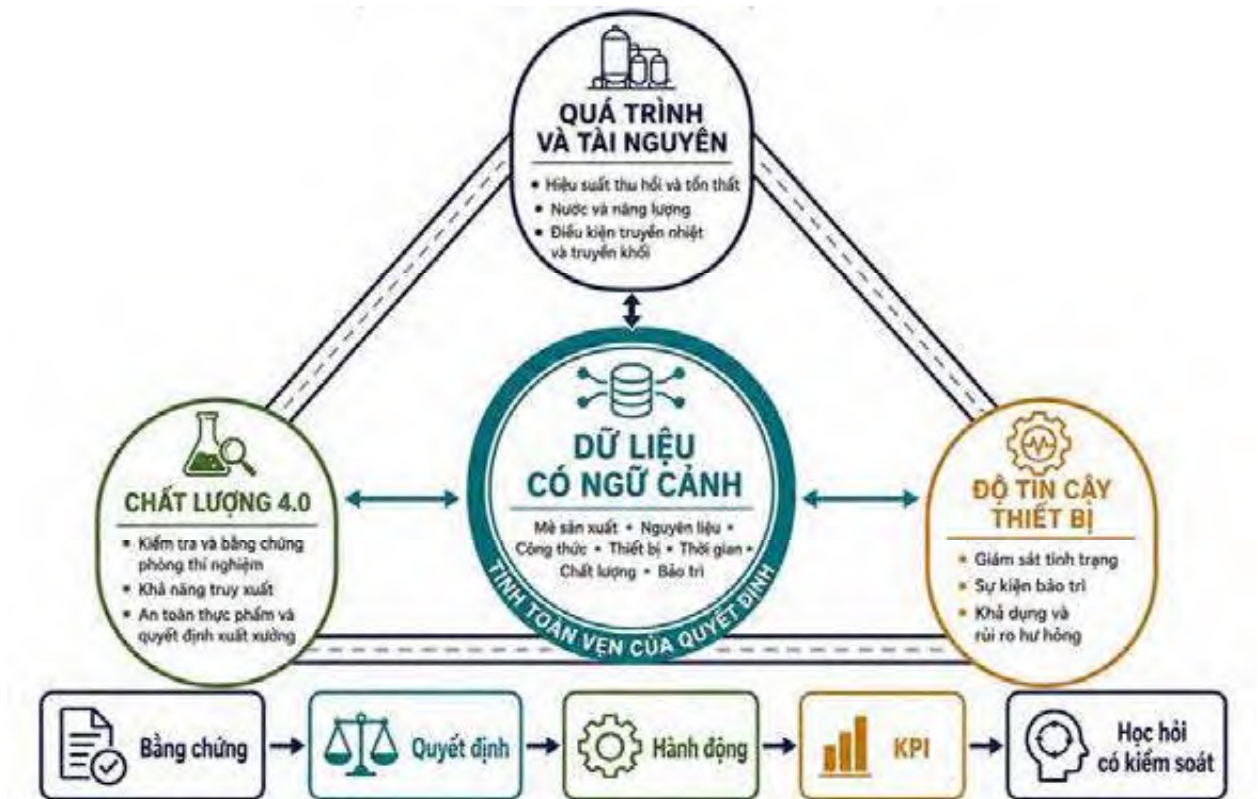
Khi mức trưởng thành tăng, dữ liệu giàu ngữ cảnh hơn; quyết định chuyển từ mô tả

sang dự báo, chỉ dẫn và hành động giới hạn; con người chuyển từ thao tác sang đặt mục

tiêu, phê duyệt và xử lý ngoại lệ. KPI cũng chuyển từ khả dụng dữ liệu sang hiệu quả quyết định, vi phạm ràng buộc, can thiệp và phục hồi. Mức trưởng thành phải được chứng minh bằng năng lực quyết định, xác nhận và quản trị, không bằng nhãn công nghệ.

IV. BA KHÔNG GIAN VẬN HÀNH HÓA GIÁ TRỊ

Ba không gian giá trị gồm quá trình và tài nguyên, Quality 4.0 và độ tin cậy thiết bị, hội tụ thông qua dữ liệu có ngữ cảnh (Hình 3). Liên kết dữ liệu nguyên liệu, mẻ sản xuất, trạng thái quá trình, chất lượng và bảo trì cho phép xác định nguyên nhân sai lệch, hỗ trợ quyết định và kiểm chứng kết quả.



Hình 3. Ba không gian tạo giá trị hội tụ qua dữ liệu có ngữ cảnh
(Nguồn: Tổng hợp và đề xuất của tác giả trên cơ sở tài liệu.)

4.1. Quá trình và tài nguyên

AI hỗ trợ đối chiếu quỹ đạo vận hành với các mẻ tham chiếu trong miền được chuyên gia phê duyệt; KPI cần chuẩn hóa theo sản phẩm và đơn vị chức năng. Cảm biến mềm hỗ trợ ước lượng đại lượng khó đo nhưng cần hiệu chuẩn, kiểm chứng bằng phép đo tham chiếu và kiểm soát độ bất định, như nghiên cứu thanh trùng bia tại một thiết bị công nghiệp (Afolaranmi et al., 2023).

IoT hỗ trợ giám sát tiêu thụ tài nguyên; MPC và các phương pháp tối ưu hóa hỗ trợ

lựa chọn chế độ vận hành nhưng MPC không mặc nhiên là AI. Nghiên cứu sâu cả rớt minh họa bóng số (digital shadow), chưa chứng minh khả năng điều khiển vòng kín bằng bản sao số (digital twin) (Schemminger et al., 2024). Edge AI chỉ nên áp dụng khi có yêu cầu về độ trễ, tính liên tục hoặc quyền dữ liệu.

Bảng 2 minh họa yêu cầu gắn quyết định AI-IoT với biến động sinh học, trạng thái quá trình và miền vận hành được phê duyệt; an toàn thực phẩm là ràng buộc không thể đánh đổi.

Bảng 2. Bản chất công nghệ thực phẩm và điểm quyết định AI-IoT

Quá trình	Biến động sinh học	Biến trạng thái	Mục tiêu chất lượng	Giới hạn an toàn	Quyết định AI-IoT
Sấy	Độ ẩm, cấu trúc, kích thước lát	Nhiệt độ sản phẩm, độ ẩm	Độ ẩm cuối, cấu trúc, giữ lại dinh dưỡng	Miền nhiệt-ẩm được phê duyệt	Khuyến nghị nhiệt độ, lưu lượng khí và thời gian trong miền giới hạn
Thanh trùng	Thành phần và tải vi sinh ban đầu	Lịch sử nhiệt độ-thời gian	Mức xử lý và chất lượng cảm quan	Chế độ thanh trùng đã được xác nhận	Ước lượng trạng thái khó đo và hỗ trợ lựa chọn điểm đặt
Lên men	Thành phần nguyên liệu và hoạt tính sinh học	Nhiệt độ, pH, diễn biến quá trình	Độ ổn định và thuộc tính sản phẩm	Miền vận hành và tiêu chí chấp nhận	Phát hiện sai lệch, dự báo quỹ đạo và khuyến nghị can thiệp
Chuối lạnh	Độ chín và lịch sử trước bảo quản	Nhiệt độ sản phẩm, thời gian	Duy trì chất lượng và thời hạn sử dụng	Giới hạn nhiệt độ-thời gian đã phê duyệt	Cảnh báo sai lệch và hỗ trợ quyết định lưu kho/vận chuyển

(Nguồn: Tổng hợp của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

4.2. Quản trị chất lượng thông minh

Quality 4.0 tích hợp dữ liệu quá trình, kiểm tra, kiểm nghiệm và truy xuất. RGB, NIR/hyperspectral và X-ray cung cấp thông tin bổ trợ với phạm vi ứng dụng khác nhau. Các nghiên cứu X-ray và DEXA cho thấy tiềm năng phát hiện bất thường, dị vật nhưng còn giới hạn theo sản phẩm và điều kiện thử nghiệm (Kim et al., 2021; Andriashen et al., 2021). Đánh giá cần chú trọng tỷ lệ bỏ sót lỗi nguy hiểm, cảnh báo sai và khả năng khái quát. AI không thay thế HACCP, kiểm nghiệm hoặc thẩm quyền phê duyệt sản phẩm.

4.3. Độ tin cậy thiết bị

Bảo trì dự báo đòi hỏi liên kết dữ liệu tình trạng, tải vận hành, sản phẩm và lịch sử sửa chữa để dự báo dạng hỏng hoặc tuổi thọ hữu ích còn lại (RUL), qua đó hỗ trợ can thiệp kịp thời. Nghiên cứu bảo trì tại nhà máy đồ uống chưa chứng minh hiệu quả riêng của AI bảo trì dự báo (Ben et al., 2021); tổng quan RAM cho thấy sự khác biệt giữa các dây chuyền, không đủ căn cứ suy rộng hiệu quả xuyên ngành (Tsarouhas, 2012). OEE cần được phân tích theo tính sẵn sàng, hiệu suất và chất lượng; hiệu quả AI bảo trì dự báo vẫn cần được đối chứng đa nhà máy.

4.4. Hội tụ và tính toàn vẹn của quyết định

Ba không gian giá trị hội tụ khi dữ liệu quá trình, chất lượng và thiết bị được liên kết theo mẻ và lịch sử vận hành. Chẳng hạn, sai lệch khối lượng có thể liên quan đến độ nhớt, áp suất, bơm hoặc cảm biến; dữ liệu đơn miền khó xác định nguyên nhân. Vì vậy, dữ liệu có ngữ cảnh là nền tảng của quyết định có thể truy xuất và kiểm chứng trong kiến trúc sáu tầng.

V. KIẾN TRÚC THAM CHIẾU SÁU TẦNG

Bài viết đề xuất kiến trúc AI-IoT sáu tầng trên cơ sở tổng hợp nghiên cứu về sản xuất thực phẩm thông minh, kết nối dữ liệu và mô hình số (Konur et al., 2021; Rocha et al., 2019; Defraeye et al., 2019; Schemminger et al., 2024). Kiến trúc tổ chức dữ liệu từ quá trình vật lý đến quyết định được cấp quyền và phản hồi xác minh, gồm:

Tầng 1 – Quá trình vật lý: Gồm nguyên liệu, sản phẩm, thiết bị, môi trường và dòng vật chất-năng lượng; là nơi tạo giá trị và kiểm chứng kết quả.

Tầng 2 – Cảm biến, điều khiển và cơ cấu chấp hành: Thu nhận trạng thái và thực thi lệnh, với yêu cầu về hiệu chuẩn, đồng bộ, độ tin cậy và điều kiện vệ sinh.

Tầng 3 – Kết nối và khả năng tương tác: Trao đổi dữ liệu giữa thiết bị, hệ thống biên và

máy chủ; bảo đảm vận hành an toàn khi mất kết nối nhưng không tự tạo dữ liệu giả.

Tầng 4 – Dữ liệu và ngữ cảnh công nghệ: Liên kết tín hiệu với mã mẽ, nguyên liệu,

công thức, thiết bị, vệ sinh, bảo trì và kiểm nghiệm để tạo dữ liệu có ý nghĩa đối với quyết định.



Hình 4. Kiến trúc tham chiếu AI-IoT sáu tầng

(Nguồn: Đề xuất của tác giả trên cơ sở tổng hợp và tái cấu trúc tài liệu.)

Tầng 5 – Mô hình và tối ưu hóa: Hỗ trợ dự báo, phát hiện bất thường, cảm biến mềm và mô hình số; yêu cầu quản lý phiên bản, miền áp dụng, xác nhận và giám sát trôi dạt.

Tầng 6 – Quyết định, quản trị, an toàn và con người: Xác lập thẩm quyền, giới hạn an toàn, quyền can thiệp và phục hồi; đầu ra AI không được vượt qua liên động bảo vệ.

Tính toàn vẹn của quyết định được duy trì qua ba luồng xuyên tầng: dữ liệu có ngữ cảnh đi lên, quyết định được cấp quyền đi xuống và phản hồi kết quả quay lại để xác minh. Mọi hành động phải tuân thủ mục tiêu, ràng buộc, độ tin cậy và thẩm quyền; thay đổi mô hình phải được xác nhận, kiểm soát phiên bản và có phương án quay lui. Xử lý tại biên chỉ

được ưu tiên khi có yêu cầu về độ trễ, tính liên tục hoặc quyền dữ liệu. Trong môi trường chế biến thực phẩm, chất lượng cảm biến còn phụ thuộc điều kiện vệ sinh, nhiệt và ẩm. Theo đó, Tầng 4 bảo đảm ý nghĩa của dữ liệu, còn Tầng 6 bảo đảm tính hợp lệ của quyết định.

Bảng 3 đối chiếu phạm vi các tiêu chuẩn và khung liên quan; kiến trúc đề xuất không thay thế hoặc chứng minh tuân thủ các tiêu chuẩn này. Các khung và tiêu chuẩn này có phạm vi khác nhau; Decision Integrity tích hợp các yêu cầu liên quan tại cấp độ quyết định nhưng không thay thế bất kỳ tiêu chuẩn nào.

Bảng 3. Chuẩn/khung đối chiếu và phạm vi sử dụng

Chuẩn/khung	Phạm vi gốc	Cách sử dụng và giới hạn
ANSI/ISA-95 / IEC 62264	Tích hợp hệ thống doanh nghiệp–điều khiển	Đối chiếu ranh giới chức năng; không tuyên bố tương đương kiến trúc
Codex CXC 1-1969	Vệ sinh thực phẩm và HACCP	Đối chiếu mối nguy, giám sát, khắc phục và xác minh; không quy định AI–IoT
ISO 22000:2018/ Amd 1:2024	Hệ thống quản lý an toàn thực phẩm	Đối chiếu trách nhiệm và kiểm soát; không tuyên bố chứng nhận
ISA/IEC 62443 series	An ninh mạng hệ thống điều khiển công nghiệp	Đối chiếu phân vùng, truy cập và vòng đời an ninh
ISO/IEC 42001:2023	Hệ thống quản lý trí tuệ nhân tạo	Đối chiếu quản trị vòng đời AI; không thay thế an toàn quá trình
EHEDG Guideline Doc. 8 (2025)	Nguyên tắc thiết kế vệ sinh	Đối chiếu lắp đặt thiết bị/cảm biến; không quy định AI–IoT

(Nguồn: Tổng hợp của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

VI. CƠ CHẾ VẬN HÀNH: VÒNG QUYẾT ĐỊNH KHÉP KÍN

Bảng 4 tổng hợp bằng chứng định lượng theo đối tượng, nguồn và giới hạn nhằm phân

biệt kết quả mô phỏng, nghiên cứu tại cơ sở sản xuất và khảo sát tiếp nhận công nghệ.

Bảng 4. Bằng chứng định lượng và giới hạn suy rộng

Kết quả và đối tượng	Nguồn/vị trí	Giới hạn suy rộng
11% giảm nước; một nhà máy đồ uống tại Ấn Độ	Jagtap et al. (2021), tr.1, 8, Bảng 3 tr.9	Chương trình nhiều biện pháp; không tách riêng tác động IoT
45% thời gian sấy; lát cà rốt	Schemminger et al. (2024), tr.1, 15, 20	Kết quả mô phỏng; không phải hiệu quả quan sát tại nhà máy
27% năng lượng gia nhiệt; cùng kích bản	Schemminger et al. (2024), tr.9, 15, 20	Không phải tổng năng lượng; chưa bao quát đầy đủ tổn thất thiết bị
8% giữ lại β -carotene; cùng kích bản	Schemminger et al. (2024), tr.1, 20	Phụ thuộc giả định và động học của mô hình
6,9% cloud; 1,5% big data/AI; 5,9% robot	Cirera et al. (2021), tr.5, Hình 2 tr.9	Khảo sát đa ngành trước đại dịch; không đại diện riêng ngành thực phẩm
46% cơ sở dùng cảm quan kiểm tra đầu vào	Cirera et al. (2021), tr.22	Nhóm chế biến thực phẩm; không phải tỷ lệ từng lượt kiểm tra

(Nguồn: Tổng hợp của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

Các kết quả trên khác nhau về thiết kế, đối tượng và điều kiện nghiên cứu, không thể cộng gộp thành mức hiệu quả chung của AI–IoT hoặc sử dụng trực tiếp để dự báo hiệu quả đầu tư.

Vòng Sense $\rightarrow$ Contextualize $\rightarrow$ Predict $\rightarrow$ Decide $\rightarrow$ Act $\rightarrow$ Verify $\rightarrow$ Learn vận hành hóa kiến trúc sáu tầng: dữ liệu được gắn nhãn cảnh mễ và quá trình để dự báo kèm độ bất định; quyết định tuân thủ mục tiêu, ràng buộc và thẩm quyền; kết quả được xác minh so với đường cơ sở. Thiếu nhãn cảnh, độ tin cậy thấp hoặc trôi dạt phải kích hoạt cơ chế

từ chối hoặc chuyển về trạng thái an toàn. Mọi cập nhật mô hình cần được xác nhận, phê duyệt và có phương án quay lui.

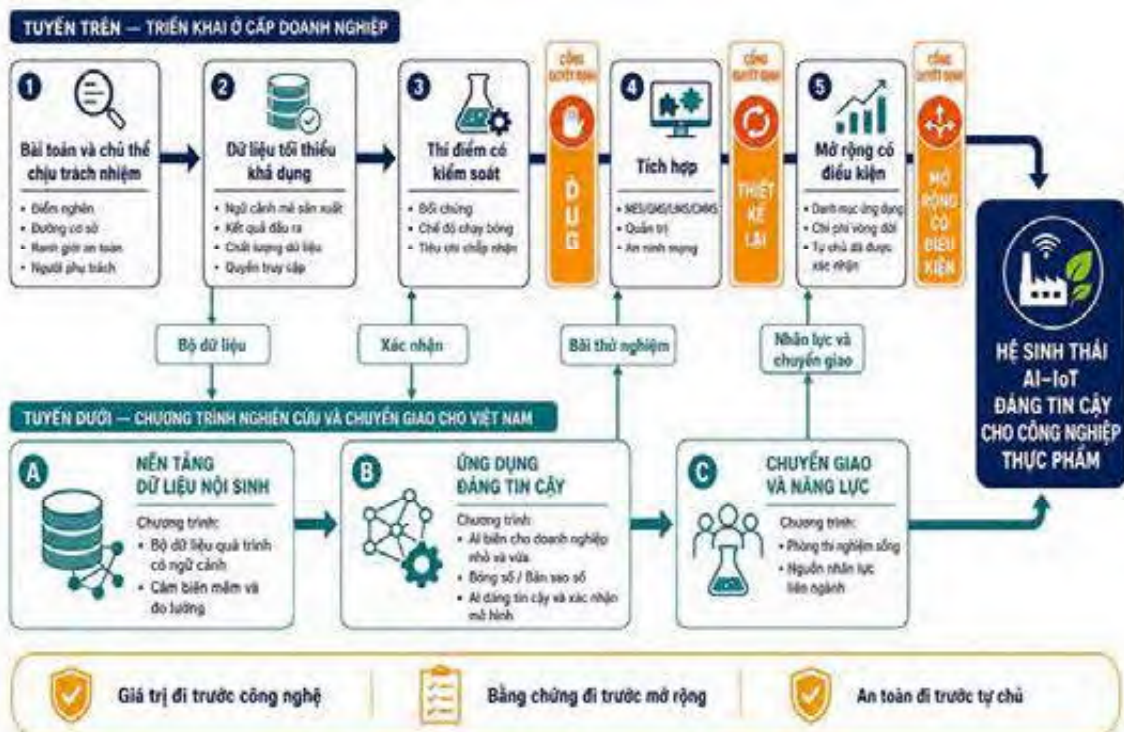
Bốn chế độ vận hành gồm phân tích vòng hở, hỗ trợ quyết định, vòng kín có giám sát và tự chủ trong miền giới hạn. Bằng chứng hiện có mới minh họa các chức năng riêng lẻ, chưa xác nhận toàn bộ vòng quyết định khép kín ở quy mô nhà máy thực phẩm (Afolaranmi et al., 2023; Kim et al., 2021; Schemminger et al., 2024). Việc tăng quyền tự chủ phải dựa trên bằng chứng về an toàn, hiệu quả so với đường cơ sở và khả năng phục

hồi; kết quả thực thi và mọi thay đổi mô hình đều phải được kiểm soát.

VII. ĐÓNG GÓP THỨ BA: LỘ TRÌNH TRIỂN KHAI THEO GIÁ TRỊ

Hình 5 sắp xếp các công triển khai theo giá trị, bắt đầu từ vấn đề quyết định có đường cơ sở thay vì mua công nghệ.

Bài viết đề xuất lộ trình Bài toán → Đường cơ sở → Dữ liệu tối thiểu khả dụng (MVD) → Thí điểm → Cổng KPI/ROI và an toàn → Tích hợp → Quản trị vòng đời. Lộ trình không quy định thời gian cố định; mở rộng sang sản phẩm, dây chuyền hoặc cơ sở khác phải được tái xác nhận do thay đổi dữ liệu và rủi ro.



Hình 5. Lộ trình từ dữ liệu tối thiểu khả dụng đến hệ sinh thái

(Nguồn: Đề xuất của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

7.1. Bài toán và đường cơ sở

Mỗi trường hợp sử dụng cần xác định vấn đề, giá trị kỳ vọng, mức sẵn sàng công nghệ, chủ sở hữu, KPI và giới hạn an toàn. Đường cơ sở phải thống nhất đơn vị chức năng, ranh giới hệ thống, thời gian và cơ cấu sản phẩm; chuẩn hóa tiêu thụ tài nguyên theo đầu ra, phân tách ba thành phần OEE và thời gian dừng máy có hoặc ngoài kế hoạch.

7.2. Dữ liệu tối thiểu khả dụng (MVD) và thí điểm

MVD phải đủ để kiểm chứng giá trị và truy xuất quyết định, gồm dữ liệu đo, chất lượng, thời gian, mã mề, kết quả và quyền quản lý; bổ sung dữ liệu kiểm nghiệm hoặc dạng hồng tùy ứng dụng. Thí điểm cần có giả thuyết, KPI, đối chứng, quyền can thiệp và tiêu chí

dừng. Khi chưa đủ bằng chứng an toàn, ưu tiên chế độ quan sát (shadow mode); chỉ mở rộng sau khi vượt qua cổng đánh giá.

7.3. Tích hợp và quản trị vòng đời

Các hệ thống PLC/SCADA, MES, QMS, LIMS, ERP và CMMS cần liên thông về định danh, thời gian và ngữ nghĩa dữ liệu. Mở rộng ứng dụng đòi hỏi tái xác nhận mô hình và an toàn. Đánh giá tổng chi phí sở hữu phải bao gồm tích hợp, an ninh, xác nhận, đào tạo và bảo trì; hợp đồng quy định quyền dữ liệu, mức dịch vụ và khả năng chuyển đổi nhà cung cấp. Mốc triển khai chỉ mang tính tham chiếu, không bảo đảm hiệu quả.

VIII. RÀO CẢN VÀ CÁC ĐIỀU KIỆN KHÔNG THỂ THỎA HIỆP

Bảng 5 mở rộng đánh giá từ sai số mô hình sang trách nhiệm và kiểm soát khi AI có thể ảnh hưởng quá trình thực phẩm.

Bảng 5. Nhân tố con người và quản trị rủi ro

Miền trách nhiệm	Vai trò	Rủi ro chính	Kiểm soát đề xuất
Người vận hành	Phê duyệt mục tiêu, nhận cảnh báo, báo bỏ/khôi phục	Automation bias; mất kỹ năng; tải cảnh báo	Phân quyền; giải thích theo vai trò; diễn tập ngoại lệ; ghi lý do can thiệp
Công nghệ thực phẩm	Xác lập miền vận hành, giới hạn chất lượng và an toàn	Mô hình đúng dữ liệu nhưng sai cơ chế; bỏ qua truyền nhiệt/khối và phản ứng sinh hóa	Ràng buộc vật lý; kiểm chứng theo sản phẩm, mẻ và chế độ vận hành
Dữ liệu và mô hình	Bảo đảm truy xuất phiên bản, ngữ cảnh và độ tin cậy	Drift; rò rỉ dữ liệu; mất đồng bộ thời gian	Data contract; versioning; giám sát drift; tiêu chí dừng
An toàn và chất lượng	Duy trì HACCP, kiểm soát thay đổi và khả năng quay lui	Khuyến nghị vượt giới hạn; lỗi cảm biến; hành động không thể phục hồi	Interlock độc lập; miền phê duyệt; fail-safe; xác minh trước tăng quyền tự chủ
An ninh mạng	Bảo vệ kết nối OT/IT, danh tính và nhật ký	Mở rộng bề mặt tấn công; thay đổi điểm đặt trái phép	Phân vùng; least privilege; xác thực; quản lý bản vá và sự cố

(Nguồn: Tổng hợp và đề xuất của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

Thiên lệch tự động hóa, tấn công mạng, mất ngữ cảnh và hành động vượt quyền đòi hỏi giám sát con người xuyên suốt vòng quyết định. Sáu điều kiện quản trị cần được duy trì trong toàn bộ vòng đời triển khai gồm:

Giá trị và bằng chứng: Xác định chủ sở hữu, đường cơ sở, điểm quyết định và KPI trước khi lựa chọn công nghệ.

An toàn thực phẩm: Duy trì ranh giới an toàn cứng; AI không thay thế HACCP, kiểm nghiệm, xác minh hoặc thẩm quyền phê duyệt sản phẩm.

Ngữ cảnh và truy xuất: Liên kết dữ liệu, mô hình, quyết định và kết quả theo mẻ sản xuất và phiên bản.

Trách nhiệm con người: Giới hạn quyền tự chủ theo mức rủi ro, độ tin cậy và khả năng can thiệp, phục hồi.

Khả năng tương tác và an ninh mạng: Quy định rõ giao diện, ngữ nghĩa dữ liệu, quyền truy cập và phương án chuyển đổi nhà cung cấp.

Xác nhận vòng đời: Giám sát trôi dạt, dịch chuyển miền và thay đổi mô hình; kích hoạt rà soát khi phát sinh sai lệch hoặc sự cố.

Các rào cản chính gồm chất lượng dữ liệu, thiết bị hiện hữu, dạng hồng hiểm, sai lệch mô hình, an ninh mạng, thiếu năng lực và phụ thuộc nhà cung cấp. Bằng chứng về kiểm tra bằng hình ảnh và cảm biến mềm còn giới hạn theo cơ sở hoặc bộ dữ liệu, chưa đủ xác nhận khả năng khái quát dài hạn (Afolaranmi et al., 2023; Kim et al., 2021; Andriiashen et al., 2021). Các tiêu chuẩn về an toàn thực phẩm, an toàn chức năng và an ninh mạng được sử dụng đúng phạm vi để đối chiếu triển khai, không thay thế lẫn nhau.

IX. CHƯƠNG TRÌNH NGHIÊN CỨU CHIẾN LƯỢC CHO VIỆT NAM

Chương trình nghiên cứu đề xuất cho Việt Nam xem xét đặc thù nguyên liệu, khí hậu, thiết bị hiện hữu và năng lực doanh nghiệp nhỏ và vừa. Khảo sát cho thấy mức độ tiếp nhận công nghệ không đồng nhất, nhưng

chưa xác định riêng mức sẵn sàng AI-IoT của ngành chế biến thực phẩm (Cirera et al., 2021). Trên cơ sở đó, bài viết đề xuất ba cụm ưu tiên có quan hệ phụ thuộc.

9.1. Nền dữ liệu và đo lường

Phát triển dữ liệu quá trình bản địa có ngữ cảnh theo mùa, vùng nguyên liệu, sản phẩm và thiết bị; đồng thời nghiên cứu cảm biến mềm cho các đại lượng khó đo. Ưu tiên phương pháp đo, hiệu chuẩn, đánh giá độ bất định và cơ chế chia sẻ dữ liệu có kiểm soát.

9.2. Ứng dụng đáng tin cậy và phù hợp nguồn lực

Phát triển Edge AI phù hợp doanh nghiệp nhỏ và vừa, bóng số/bản sao số cho các quá trình thực phẩm và phương pháp xác nhận AI đáng tin cậy. Các nghiên cứu mô hình số được viện dẫn chủ yếu thực hiện ngoài Việt Nam, trong những điều kiện nghiên cứu cụ thể (Defraeye et al., 2019; Schemminger et

al., 2024). Vì vậy, cần đánh giá khả năng chuyển giao, chi phí vòng đời, độ tin cậy và an toàn trong điều kiện vận hành thực tế.

9.3. Chuyển giao và phát triển năng lực

Thiết lập phòng thí nghiệm sống (living lab) liên kết trường đại học, doanh nghiệp và nhà cung cấp; phát triển nhân lực liên ngành công nghệ thực phẩm, tự động hóa, dữ liệu, chất lượng, an ninh mạng và kinh tế-kỹ thuật. Các nghiên cứu hiện có cung cấp cơ sở về yêu cầu kỹ năng ngành thực phẩm và xu hướng lao động liên quan đến AI, nhưng chưa đại diện riêng cho Việt Nam (Akyazi et al., 2020; Green, 2024).

Ba cụm ưu tiên được triển khai theo logic nền dữ liệu và đo lường → ứng dụng được xác nhận → chuyển giao và phát triển năng lực, với bảy chương trình và đầu ra cần kiểm chứng tại Bảng 6.

Bảng 6. Chương trình chiến lược cho Việt Nam

Chương trình	Mục tiêu	Đầu ra cần kiểm chứng
1. Dữ liệu quá trình bản địa	Dataset có metadata theo mùa, vùng, nguyên liệu, quá trình và thiết bị	Data dictionary; protocol; controlled sharing
2. Cảm biến mềm	Ước lượng đại lượng khó đo trực tuyến	Calibration; uncertainty; reference testing
3. Edge AI cho SME	Giải pháp nhẹ, phù hợp brownfield và duy trì cục bộ	Cost/maintainability benchmark; gateway mẫu
4. Digital shadow/twin	Mô hình đủ dùng cho sấy, lên men, lạnh, thanh trùng, bao gói	Model validation; domain; update logic
5. AI đáng tin cậy	External validation, uncertainty, explainability, drift, rollback	Model card; stress test; approval workflow
6. Living lab	Thử nghiệm trường–doanh nghiệp–nhà cung cấp	Pilot, SOP, testbed, transfer package
7. Nhân lực liên ngành	Food technology–automation–data–quality–cyber–techno-economics	Curriculum; role-based training; SME access

(Nguồn: Tổng hợp của tác giả trên cơ sở tổng hợp tài liệu.)

9.4. Cơ chế phối hợp và chuyển giao

Triển khai chương trình nghiên cứu tại Việt Nam cần sự phối hợp giữa doanh nghiệp, trường đại học, viện nghiên cứu, nhà cung cấp công nghệ và các tổ chức hỗ trợ. Doanh

nh nghiệp chịu trách nhiệm về công nghệ và an toàn thực phẩm; trường, viện phát triển và chuyển giao phương pháp xác nhận; nhà cung cấp bảo đảm hỗ trợ kỹ thuật, khả năng tích hợp và chuyển đổi hệ thống. Hiệp hội và tổ

chức tài chính có thể hỗ trợ doanh nghiệp nhỏ và vừa tiếp cận công nghệ theo các mốc kiểm chứng; cơ quan quản lý tham gia trong phạm vi thẩm quyền. Người lao động cần được tham gia thiết kế quy trình, phân tích ngoại lệ và giám sát vận hành. Mỗi thí điểm nên hướng tới ba kết quả: bằng chứng được kiểm chứng, tài sản dữ liệu—quy trình có thể tái sử dụng và năng lực nội bộ.

X. KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG HÀNH ĐỘNG

Tự động hóa không mặc nhiên tạo ra quyết định tích hợp. Trong công nghiệp thực phẩm, giá trị AI-IoT phụ thuộc vào khả năng chuyển dữ liệu có ngữ cảnh thành quyết định có thể truy xuất, kiểm chứng và kiểm soát trong giới hạn an toàn. Trên cơ sở đó, bài viết đề xuất bốn cấu phần liên kết: mô hình trưởng thành năm cấp, kiến trúc tham chiếu sáu tầng, lộ trình triển khai theo giá trị và chương trình nghiên cứu chiến lược cho Việt Nam.

Tự tối ưu có kiểm soát không phải đích mặc định; mức tự chủ phải tương xứng với rủi ro, bằng chứng xác nhận và khả năng phục hồi. Doanh nghiệp cần bắt đầu từ bài toán có giá trị, xác lập đường cơ sở, KPI và ranh giới an toàn; triển khai dữ liệu có ngữ cảnh và thí điểm có kiểm soát; chỉ mở rộng khi lợi ích, rủi ro và chi phí vòng đời đã được xác minh. Quyền giám sát, can thiệp và quay lui của con người phải được duy trì.

Đối với Việt Nam, trọng tâm là phát triển dữ liệu bản địa, phương pháp đo và xác nhận, phòng thí nghiệm sống (living lab) và nhân lực liên ngành. Mỗi thí điểm cần tạo đồng thời bằng chứng, tài sản dữ liệu/quy trình có thể tái sử dụng và năng lực nội bộ. Khung đề xuất là kết quả tổng hợp khái niệm và định hướng chiến lược, cần được kiểm định thực nghiệm trước khi suy rộng hiệu quả hoặc tăng quyền tự chủ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Afolaranmi, S. O., Drakoulelis, M., Filios, G., Melchiorre, C., Nikolettseas, S., Panagiotou,

S. H., & Timpilis, K. (2023). *zPasteurAIzer: An AI-enabled solution for product quality monitoring in tunnel pasteurization machines*. *Machines*, 11(2), 191. <https://doi.org/10.3390/machines11020191>

2. Akyazi, T., Goti, A., Oyarbide, A., Alberdi, E., & Bayon, F. (2020). *A guide for the food industry to meet the future skills requirements emerging with Industry 4.0*. *Foods*, 9(4), 492. <https://doi.org/10.3390/foods9040492>

3. Andriashen, V., van Liere, R., van Leeuwen, T., & Batenburg, K. J. (2021). *Unsupervised foreign object detection based on dual-energy absorptiometry in the food industry*. *Journal of Imaging*, 7(7), 104. <https://doi.org/10.3390/jimaging7070104>

4. Ben, J., Mohamed, A. O., & Muduli, K. (2021). *Effect of preventive maintenance on machine reliability in a beverage packaging plant*. *International Journal of System Dynamics Applications*, 10(3). <https://doi.org/10.4018/IJSDA.2021070104>

5. Cirera, X., Comin, D., Cruz, M., Lee, K. M., & Martins-Neto, A. S. (2021). *Firm-level technology adoption in Vietnam (Policy Research Working Paper No. 9567)*. World Bank.

<https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/442781615203558823/firm-level-technology-adoption-in-vietnam>

6. Damián Moran, G. J., Mayhua Ayuque, J., Inga Quinto, J. E., Larrea Cerna, C. O., & Callirgos Romero, D. (2025). *Industria 4.0 y su relación con la automatización en la industria alimentaria: Una revisión sistemática y bibliométrica*. *Manglar*, 22(2), 229–243. <https://doi.org/10.57188/manglar.2025.025>

7. Defraeye, T., Tagliavini, G., Wu, W., Prawiranto, K., Schudel, S., Kerisima, M. A., Verboven, P., & Bühlmann, A. (2019). *Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains*. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 778–794. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.002>

8. Green, A. (2024). *Artificial intelligence and the changing demand for skills in the labour*

- market (OECD Artificial Intelligence Papers No. 14). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/88684e36-en>
9. Jagtap, S., Skouteris, G., Choudhari, V., Rahimifard, S., & Duong, L. N. K. (2021). *An Internet of Things approach for water efficiency: A case study of the beverage factory*. Sustainability, 13(6), 3343. <https://doi.org/10.3390/su13063343>
10. Kim, K., Kim, H., Chun, J., Kang, M., Hong, M., & Min, B. (2021). *Real-time anomaly detection in packaged food X-ray images using supervised learning*. Computers, Materials & Continua, 67(2), 2545–2568. <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.014642>
11. Konur, S., Lan, Y., Thakker, D., Morkyani, G., Polovina, N., & Sharp, J. (2021). *Towards design and implementation of Industry 4.0 for food manufacturing*. Neural Computing and Applications, 35, 23753–23765. <https://doi.org/10.1007/s00521-021-05726-z>
12. Peres, F. A. P., Bondarczuk, B. A., Gomes, L. C., Jardim, L. C., Corrêa, R. G. F., & Baierle, I. C. (2025). *Advances in food quality management driven by Industry 4.0: A systematic review-based framework*. Foods, 14(14), 2429. <https://doi.org/10.3390/foods14142429>
13. Rocha, M. S., Sestito, G. S., Dias, A. L., Turcato, A. C., Brandão, D., & Ferrari, P. (2019). *On the performance of OPC UA and MQTT for data exchange between industrial plants and cloud servers*. ACTA IMEKO, 8(2), 80–87. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v8i2.648
14. Schemminger, J., Raut, S., Sturm, B., & Defraeye, T. (2024). *A hybrid digital shadow to assess biological variability in carrot slices during drying*. Thermal Science and Engineering Progress, 50, 102507. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102507>
15. Tsarouhas, P. (2012). *Reliability, availability and maintainability analysis in food production lines: A review*. International Journal of Food Science & Technology, 47(11), 2243–2251. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03073.x>
16. Codex Alimentarius Commission. (2023). *General Principles of Food Hygiene (CXC 1-1969)*. FAO and WHO. <https://doi.org/10.4060/cc6125en>
17. European Hygienic Engineering & Design Group. (2025). *EHEDG Guideline Doc. 8: Hygienic Design Principles (4th ed.)*. <https://www.ehedg.org/guidelines-working-groups/guidelines/guidelines>
18. ISA. (n.d.-a). *ISA-95 Standard: Enterprise-Control System Integration*. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>
19. ISA. (n.d.-b). *ISA/IEC 62443 Series of Standards*. <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-iec-62443-series-of-standards>
20. International Organization for Standardization. (2018). *ISO 22000:2018, Food safety management systems—Requirements for any organization in the food chain*. <https://www.iso.org/standard/65464.html>
21. International Organization for Standardization and International Electrotechnical Commission. (2023). *ISO/IEC 42001:2023, Information technology—Artificial intelligence—Management system*. <https://www.iso.org/standard/42001>

- Ngày gửi bài: 24/08/2026
 - Ngày phản biện: 16/09/2026
 - Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG ĐỘNG CƠ FI – IPM TRONG HỆ TRUYỀN ĐỘNG MÁY KÉO ĐIỆN NÔNG NGHIỆP SỬ DỤNG ĐIỀU KHIỂN FOC

Hoàng Thân^{1*}, Ngô Đức Kiên², Võ Thanh Bình¹,
Trương Xuân Lộc¹, Lê Quang Phú¹

TÓM TẮT

Điện hóa máy kéo nông nghiệp là một xu hướng quan trọng nhằm nâng cao hiệu suất năng lượng và giảm phát thải trong sản xuất nông nghiệp. Trong các hệ truyền động điện, động cơ Flux-Intensifying Interior Permanent Magnet (FI-IPM) với đặc tính điện cảm trục d lớn hơn điện cảm trục q ($L_d > L_q$) được xem là giải pháp tiềm năng nhờ khả năng tạo mô-men lớn ở vùng tốc độ thấp. Bài báo trình bày việc xây dựng mô hình động cơ FI-IPM công suất 50 kW trên nền tảng MATLAB/Simulink kết hợp điều khiển định hướng từ thông (FOC) và điều chế vector không gian (SVPWM) cho ứng dụng máy kéo điện nông nghiệp. Các kịch bản mô phỏng được thực hiện với tải thay đổi nhằm mô phỏng điều kiện làm việc thực tế của máy kéo. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ truyền động sử dụng động cơ FI-IPM đáp ứng tốt yêu cầu về khả năng tăng tốc, duy trì tốc độ ổn định và cung cấp mô-men cao khi tải biến thiên. Đặc biệt, đặc tính tăng cường từ thông của động cơ FI-IPM giúp cải thiện tỷ số mô-men trên dòng điện và nâng cao hiệu quả khai thác trong vùng tốc độ thấp, phù hợp với các ứng dụng kéo tải nặng trong nông nghiệp. Nghiên cứu là cơ sở cho việc phát triển các hệ truyền động điện hiệu suất cao cho máy kéo và thiết bị nông nghiệp thế hệ mới.

Từ khóa: FI-IPM, máy kéo điện, FOC, MATLAB/Simulink, hệ truyền động điện, nông nghiệp thông minh.

PERFORMANCE ANALYSIS OF A FLUX-INTENSIFYING INTERIOR PERMANENT MAGNET MOTOR DRIVE FOR ELECTRIC AGRICULTURAL TRACTORS UNDER FIELD-ORIENTED CONTROL

ABSTRACT

The electrification of agricultural tractors is an important trend for improving energy efficiency and reducing emissions in modern agriculture. Among electric drive technologies, the Flux-Intensifying Interior Permanent Magnet (FI-IPM) motor, characterized by a higher d-axis inductance than q-axis inductance ($L_d > L_q$), has attracted significant attention due to its capability to generate high torque at low speeds. This paper presents the development of a 50-kW FI-IPM motor model in MATLAB/Simulink using Field-Oriented Control (FOC) and Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) for electric agricultural tractor applications. Several simulation scenarios with varying load conditions were conducted to emulate real operating conditions of agricultural tractors. The simulation results demonstrate that the proposed FI-IPM drive system provides satisfactory acceleration performance, maintains stable speed regulation, and delivers high torque under load variations. In particular, the flux-intensifying characteristic of the FI-IPM motor improves the torque-per-ampere ratio and enhances operational efficiency in the low-speed region, making it well suited for heavy-duty agricultural traction applications. The findings provide a useful foundation for the development of high-performance electric drive systems for next-generation agricultural tractors and machinery.

Keywords: FI-IPM motor, electric tractor, field-oriented control, MATLAB/Simulink, electric drive system, smart agriculture.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đẩy mạnh phát triển nông nghiệp thông minh và bền vững, việc hiện đại hóa trang thiết bị máy móc, đặc biệt là xu hướng điện hóa máy kéo nông nghiệp [1], đóng vai trò then chốt nhằm tối ưu hóa hiệu suất năng lượng và giảm thiểu phát thải khí nhà kính. Khác với các dòng xe điện thông thường, máy kéo điện đòi hỏi hệ truyền động phải có khả năng cung cấp mô-men xoắn lớn tại vùng tốc

độ thấp để đáp ứng các nhiệm vụ kéo tải nặng trong điều kiện địa hình canh tác phức tạp [2].

Trong số các giải pháp công nghệ hiện nay, động cơ Interior Permanent Magnet (IPM) được ưu tiên nhờ mật độ công suất cao, tuy nhiên dòng động cơ truyền thống thường gặp hạn chế về khả năng tạo mô-men ở tốc độ thấp. Để giải quyết vấn đề này, dòng động cơ Flux-Intensifying (FI-IPM) với đặc tính điện cảm đặc biệt ($L_d > L_q$) đã nổi lên như một giải pháp đột phá, giúp cải thiện đáng kể tỷ số mô-men

¹ Trường Cao Đẳng Công Nghiệp Huế

² Trường Đại học sư phạm kỹ thuật Đà Nẵng, Đại học Đà Nẵng

*Email liên hệ: htan@hueic.edu.vn

trên dòng điện và nâng cao hiệu suất khai thác trong các ứng dụng đặc thù của ngành nông nghiệp [3].

Mặc dù có nhiều ưu điểm, việc kiểm soát và vận hành ổn định hệ truyền động điện công suất lớn (như mức 50 kW) trong các kịch bản tải biến thiên thực tế vẫn là một thách thức kỹ thuật đối với các nhà thiết kế [4]. Điều này đòi hỏi sự kết hợp chặt chẽ giữa các thuật toán điều khiển hiện đại như điều khiển định hướng từ thông (FOC) và kỹ thuật điều chế vector không gian (SVPWM) để đảm bảo khả năng tăng tốc mượt mà và duy trì tốc độ ổn định cho máy kéo [5]. Xuất phát từ thực tiễn đó, nghiên cứu này tập trung xây dựng và đánh giá mô hình động cơ FI-IPM trên nền tảng MATLAB/Simulink, tạo cơ sở khoa học quan trọng cho việc phát triển các hệ truyền động điện hiệu suất cao cho máy kéo và thiết bị nông nghiệp thế hệ mới.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu.

Hệ thống truyền động điện cho máy kéo nông nghiệp, tập trung vào mô hình động cơ FI-IPM công suất định mức 50 kW. Hệ thống được tích hợp thuật toán điều khiển định hướng từ trường (FOC) kết hợp kỹ thuật điều biến vector không gian (SVPWM) nhằm tối ưu hóa khả năng đáp ứng mô-men trong các chế độ vận hành đặc thù của nông nghiệp (như cày, kéo tải

nặng). Các chỉ tiêu đánh giá bao gồm: hiệu suất hệ thống, đặc tính dòng điện và độ ổn định của mô-men khi thay đổi tải trọng đột ngột.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Phương pháp mô phỏng, nghiên cứu tài liệu: mô phỏng và đánh giá mô hình điều khiển động cơ FI-IPM dựa trên trên thuật toán điều khiển FOC và SVPWM nhằm kiểm tra và đánh giá khả năng vận hành của động cơ FI-IPM trong môi trường tải thay đổi để áp dụng cho xe kéo điện trong nông nghiệp.

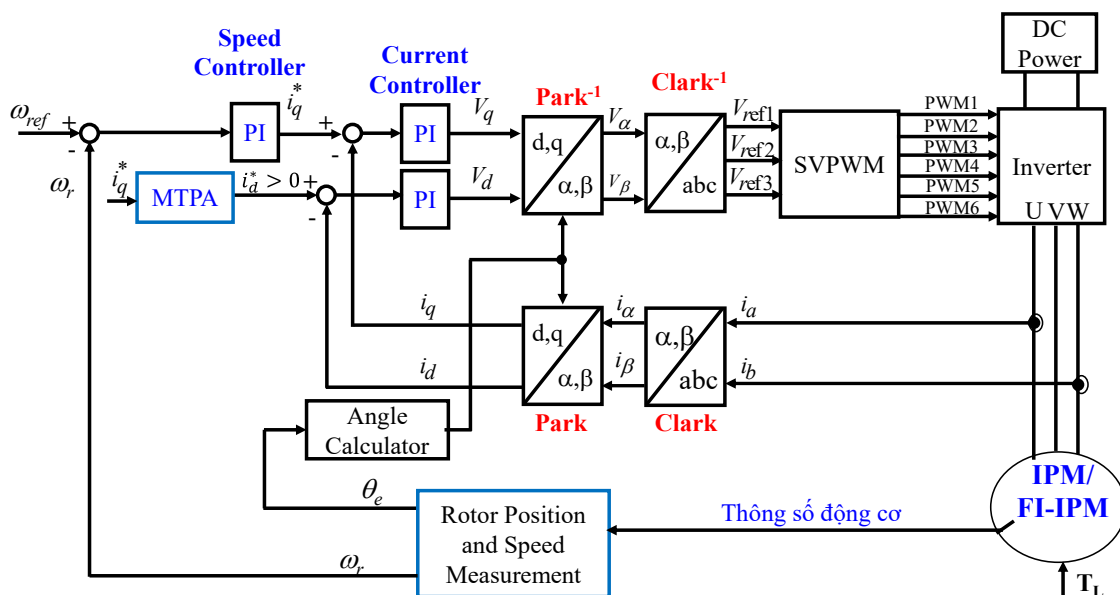
2.2.2. Phương pháp mô hình hóa thuật toán điều khiển:

a) Sơ đồ cấu trúc điều khiển FOC-VSPWM

Cấu trúc điều khiển định hướng theo từ thông hướng trục (FOC) kết hợp kỹ thuật điều chế vector không gian (SVPWM) cho hệ truyền động động cơ IPM và FI-IPM được đề xuất như trong Hình 1.

Hệ thống sử dụng cấu trúc điều khiển mạch vòng kín hai cấp cascaded phản hồi dòng điện và tốc độ:

Mạch vòng tốc độ (Vòng ngoài): Sai lệch giữa tốc độ đặt ω_{ref} và tốc độ phản hồi ω_r được xử lý qua bộ điều khiển tốc độ PI để xác định thành phần dòng điện trục q tham chiếu i_q^* , tương ứng với mô-men xoắn yêu cầu của hệ thống.



Hình 1. Cấu trúc điều khiển FOC-SVPWM của hệ truyền động IPM/FI-IPM

Khối tối ưu hóa dòng điện (MTPA): Từ giá trị i_q^* , thuật toán tối ưu mô-men trên một đơn vị dòng điện (MTPA) sẽ tính toán ra thành phần dòng điện trục d tham chiếu i_d^* nhằm tối ưu hóa hiệu suất và khai thác tối đa mô-men kháng từ của động cơ.

Mạch vòng dòng điện (Vòng trong): Các thành phần dòng điện ba pha thực tế (i_a, i_b, i_c) đo từ stator được chuyển đổi sang hệ tọa độ quay d-q thông qua các phép biến đổi Clarke và Park. Hai bộ điều khiển PI dòng điện độc lập (Current Controller) sẽ triệt tiêu sai lệch dòng điện và xuất ra điện áp điều khiển V_d, V_q .

Khối điều chế: Điện áp điều khiển sau khi biến đổi Park ngược Park^{-1} sang hệ tọa độ cố định α - β sẽ được đưa vào khối SVPWM để phát xung kích đóng cắt cho 6 van bán dẫn của bộ nghịch lưu (Inverter), cấp nguồn cho động cơ.

b) Mô hình toán học động cơ IPM/FI-IPM [3,6]

Phương trình điện áp của động cơ FI-IPM trên hệ trục tọa độ d-q được mô tả như phương trình (2.1)

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (2.1)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d$$

Trong đó: u_d, u_q : Điện áp stator trên trục d và trục q; i_d, i_q : Dòng điện stator trên trục d và trục q; R_s : Điện trở dây quấn stator; ω_e : Tốc độ góc điện của rotor ($\omega_e = p\omega_m$, với p là số cặp cực và ω_m là tốc độ cơ học); ψ_d, ψ_q : Từ thông liên kết trục d và trục q.

Mối liên hệ giữa từ thông liên kết với dòng điện được mô tả như phương trình (2.2)

$$\begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + \psi_{pm} \\ \psi_q &= L_q i_q \end{aligned} \quad (2.2)$$

Trong đó: ψ_{pm} là từ thông của nam châm vĩnh cửu; L_d, L_q là điện cảm của trục d và trục q

Do cấu trúc của FI-PMSM (thường sử dụng các rào chắn từ thông - *flux barriers* dọc theo trục q hoặc bố trí nam châm đặc biệt) [6], ta có đặc tính đặc trưng như phương trình (2.3)

$$L_d > L_q, i_d > 0 \quad (2.3)$$

Mô men tổng quát của máy điện đồng bộ được biểu diễn như phương trình (2.4)

$$T_e = \frac{2}{3} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (2.4)$$

Thay (2.2) và (2.4) ta có phương trình mô men điện từ của máy điện FI-IPM như (2.5)

$$T_e = \frac{2}{3} p [(\psi_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)] \quad (2.5)$$

Trong đó: T_e là mô men điện từ.

Từ phương trình (2.5) ta thấy mô men điện từ bao gồm hai thành phần [3]

Mô men nam châm: $\frac{2}{3} p \psi_{pm} i_q$ và mô men từ trễ: $\frac{2}{3} (L_d - L_q) i_d i_q$

Từ đó ta có thể tìm phương trình chuyển động cơ học dựa vào mối quan hệ giữa mô men và tốc độ cơ học được mô tả qua phương trình vi phân (2.6)

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (2.6)$$

Trong đó: T_L là mô men tải; J: Mô-men quán tính của rotor và tải; B: hệ số ma sát cơ học

Để tối ưu hóa hiệu suất năng lượng và khai thác tối đa thành phần mô-men kháng từ của động cơ FI-IPM, chiến lược điều khiển tối ưu mô-men trên một đơn vị dòng điện (MTPA) được áp dụng. Bằng phương pháp giải tích tối ưu hóa đạo hàm phương trình (2.5) theo góc dòng điện, quỹ đạo dòng điện trục d tham chiếu i_d^* được xác định phụ thuộc vào dòng điện trục q tham chiếu i_q^* theo phương trình (2.7):

$$i_d^* = \frac{-\psi_{pm} + \sqrt{\psi_{pm}^2 + 8(L_d - L_q)^2 (i_q^*)^2}}{4(L_d - L_q)} \quad (2.7)$$

c) Mô hình động lực học phụ tải của máy kéo điện nông nghiệp:

Nhằm đánh giá khả năng kéo của động cơ FI-IPM trong các điều kiện canh tác thực tế, mô-men tải cản T_{Load} quy đổi về trục động cơ được xây dựng dựa trên phương trình cân bằng lực tổng hợp tác động lên phương tiện [2]:

$$F_{tc} = F_r + F_w + F_g + F_k \quad (2.8)$$

$$F_r = C_r M g \quad (2.9)$$

Trong đó: F_r là lực cản lăn phụ thuộc vào hệ số mặt đường C_r , khối lượng máy kéo M và gia tốc trọng trường g ; F_w là lực cản gió; F_g là lực cản khi máy leo dốc với góc α được mô tả như công thức 2.10

$$F_g = M g \sin \alpha \quad (2.10)$$

Từ lực cản tổng hợp F_{tc} , mô-men tải đáp ứng tại trục động cơ được xác định qua phương trình (2.11):

$$T_{Load} = \frac{F_{tc} \cdot R_w}{G \cdot \eta_m} \quad (2.11)$$

Trong đó: Trong đó: R_w là bán kính bánh xe công tác, G là tỷ số truyền toàn bộ của hệ thống hộp số cơ khí, và η_m là hiệu suất truyền động cơ học.

$$F_k = (A + B \cdot v + C \cdot v^2) \cdot b \cdot d \quad (2.12)$$

Trong đó: A, B, C các thông số đặc trưng của đất, v là vận tốc máy kéo, b là độ rộng làm việc và d là độ sâu canh tác. [2]

d) Giải thuật MTPA cho động cơ FI-IPM:

Để đảm bảo hệ truyền động máy kéo nông nghiệp vận hành ổn định trong toàn bộ dải tốc độ, quỹ đạo dòng điện tham chiếu i_q^*, i_d^* dạng đơn vị tương đối (p.u) được xác định thông qua cấu trúc luật điều khiển phân vùng logic:

- Trong vùng vận hành cơ bản (tốc độ dưới tốc độ định mức): chiến lược điều khiển khai thác đặc tính mạch từ $L_d > L_q$ để giảm dòng trục d mang giá trị dương $i_d^* > 0$ nhằm tối ưu hóa thành phần mô-men kháng từ theo công thức:

$$i_d^* = 1 - \frac{T_{en}^*}{i_q^*} \quad (2.13)$$

Trong đó: T_{en}^* là mô – men điện từ tham chiếu (p.u), biến thiên liên tục theo yêu cầu phụ tải của hệ thống tại mỗi thời điểm.

- Trong vùng vận hành tốc độ cao (tốc độ lớn hơn tốc độ định mức): chiến lược giảm từ thông, Khi vận tốc máy kéo vọt lên cao và dòng trục q tiệm cận sát ngưỡng triệt tiêu do bão hòa điện áp ($i_q^* < \varepsilon$), hệ thống tự động kích hoạt cơ chế giảm giữ giới hạn điện áp nguồn (V_s). Dòng điện i_d^* lúc này được hiệu chỉnh tuyến tính theo phương trình động lực học giới hạn áp:

$$i_d^* = - \frac{\psi_{pm} \cdot p \cdot \omega - V_s}{p \cdot L_d \cdot \omega \cdot I_b} \quad (2.14)$$

Trong đó: ε là hằng số cực tiểu bảo vệ mẫu số tránh lỗi triệt tiêu toán học; p là số đôi cực; I_b là dòng điện mốc cơ bản của hệ thống.

e) Mô hình mô phỏng trên

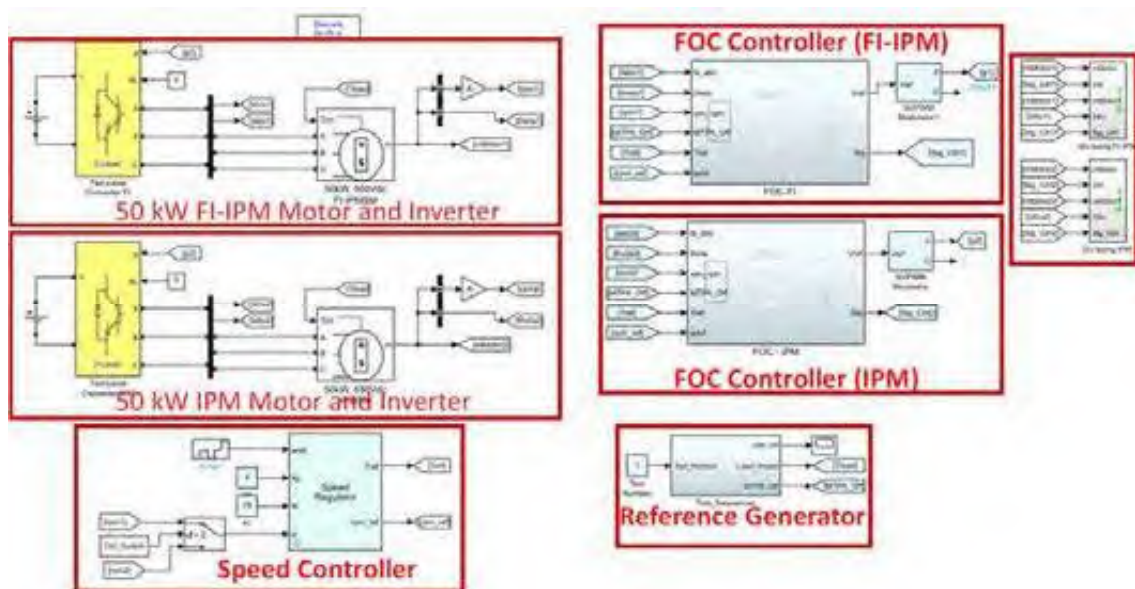
Matlab/Simulink:

Để kiểm chứng thuật toán điều khiển đề xuất, mô hình mô phỏng tổng thể của hệ thống được xây dựng trên môi trường Matlab/Simulink như trong Hình 2. Mô hình bao gồm các khối chức năng chính sau:

Khối mô hình động cơ và công suất: Gồm hai nhánh mô phỏng độc lập cho động cơ 50 kW IPM và 50 kW FI-IPM kết hợp với bộ nghịch lưu công suất sử dụng cấu trúc van bán dẫn lý tưởng. Các tham số vật lý của động cơ được cấu hình chính xác theo bộ thông số thiết kế ở Bảng 2.

Khối điều khiển trung tâm (FOC Controller): Hiện thực hóa toàn bộ thuật toán biến đổi tọa độ, mạch vòng dòng điện PI và bộ tạo xung SVPWM tương ứng cho từng loại động cơ.

Khối quản lý quỹ đạo (Reference Generator & Speed Controller): Khối Reference Generator đóng vai trò tạo kích bản thử nghiệm (thay đổi tốc độ đặt ω_{ref} và mô-men tải T_L theo thời gian). Khối Speed Controller thực hiện thuật toán vòng ngoài để điều phối chung cho cả hai hệ thống.



Hình 2. Mô hình mô phỏng trên Matlab/Simulink

Bảng 1. Thông số vận hành và nguồn cấp của động cơ

Công suất	50kW
DC Power	550V
Ts	20us
Tốc độ danh định	500rpm
Tốc độ tối đa	3000rpm
Tải T_L	Thay đổi

Bảng 2. Thông số định mức của hai dòng động cơ IPM và FI-IPM

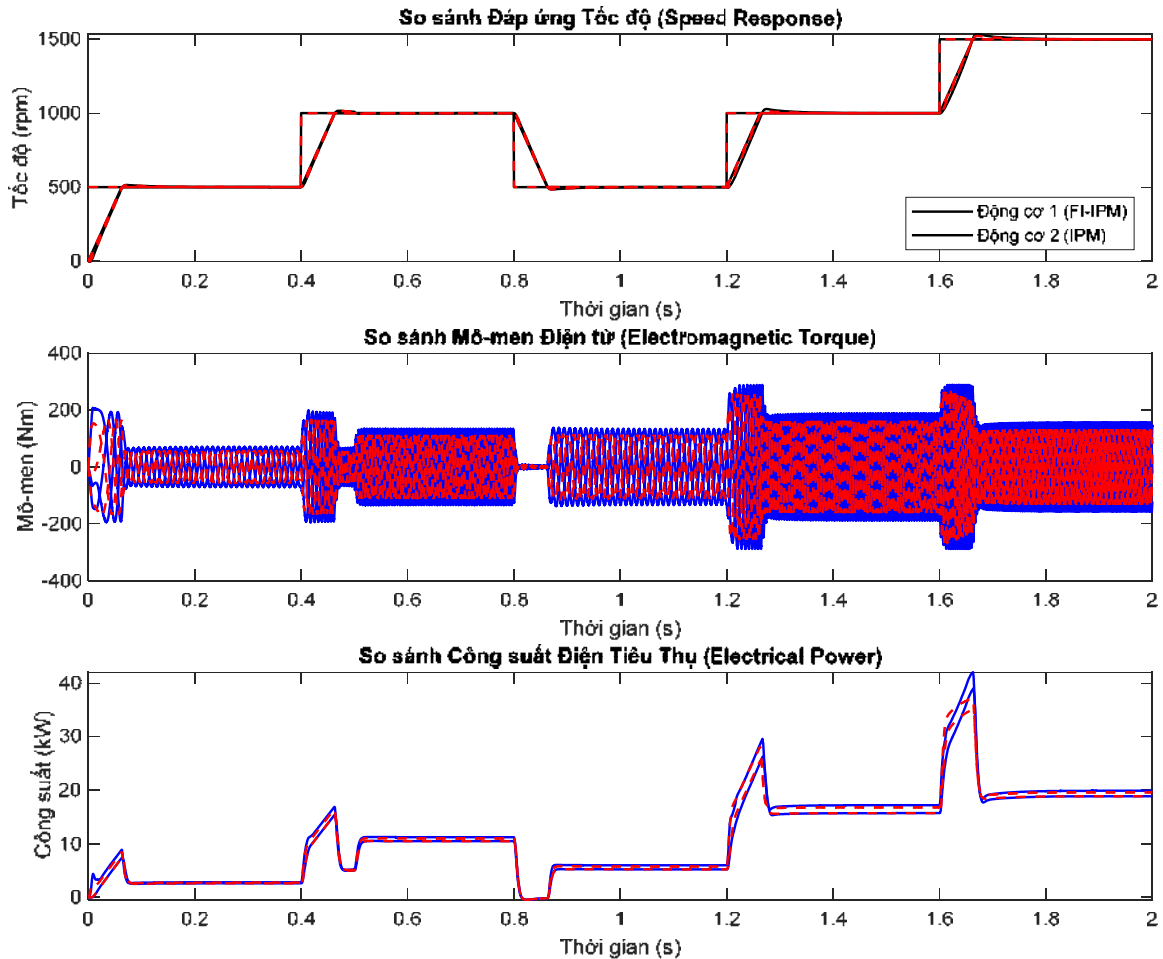
Thông số	IPM	FI-IPM
R_s	0.028 (Ω)	0.028 (Ω)
L_d	0.45e-3(H)	1.1e-3(H)
L_q	0.82e-3(H)	0.7e-3(H)
λ_m	0.145(V.s)	0.115(V.s)
p	4	4

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

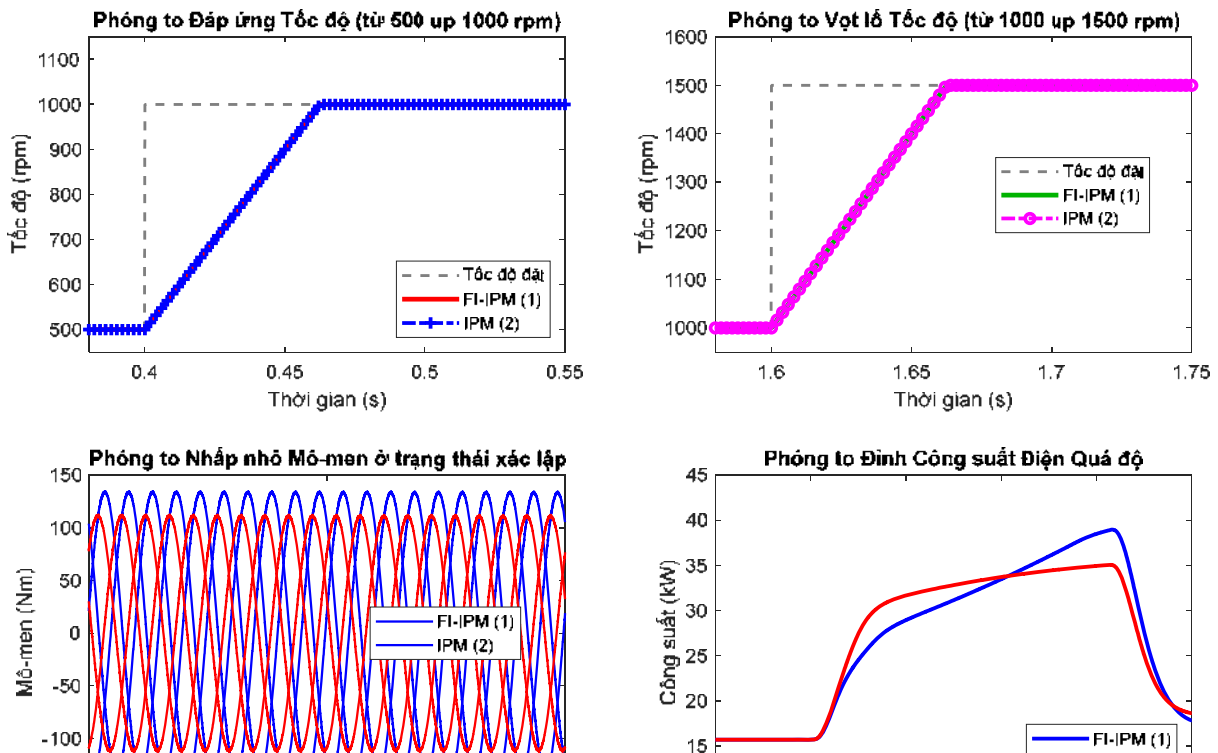
3.1. Đánh giá đặc tính động học tổng thể toàn chu kỳ

Đặc tính động học tổng thể toàn chu kỳ 2s bao gồm đáp ứng tốc độ, mô-men điện từ và công suất điện tiêu thụ của hai cấu trúc động cơ được thể hiện chi tiết tại Hình

3. Kết quả cho thấy cả hai hệ thống truyền động đều bám sát các kịch bản thay đổi vận tốc bậc thang và các cấp phụ tải động lực học cơ khí của xe. Nhằm bóc tách định lượng các sai lệch quá độ và hành vi bám xung xác lập, các phân đoạn đồ thị được phóng to chuyên sâu tại Hình 4.



Hình 3. Đặc tính động học tổng thể toàn chu kỳ của hai động cơ IPM và FI-IPM



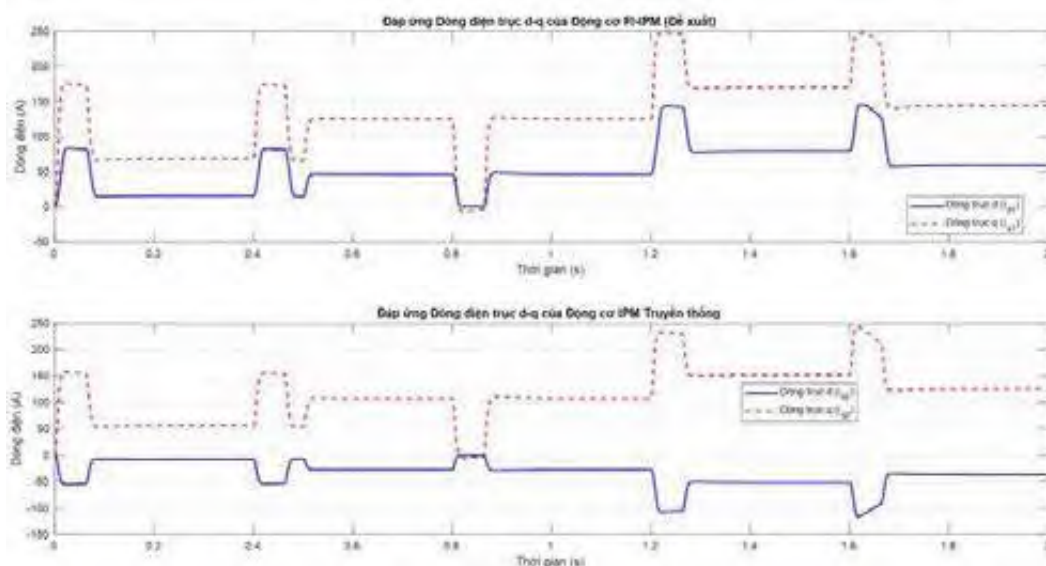
- **Về đáp ứng vận tốc (Hình 4 - trên):** Tại dải vận hành cơ bản dưới tốc độ định mức 500rpm $\rightarrow$ 1000rpm và dải giảm từ thông sâu tốc độ cao 1000rpm $\rightarrow$ 1500rpm, mạch vòng kín vận tốc của cả hai hệ thống đều đạt chất lượng lý tưởng với độ vọt lố thực tế **POT = 0.00%** tại trạng thái xác lập. Hệ thống tăng trưởng mượt mà theo hàm dốc và tiếp đất phẳng mượt tại băng đỉnh, chứng minh khâu giới hạn dòng điện (Current Limiter) đã ép đáp ứng về trạng thái tắt dần tới hạn, bảo vệ toàn diện hệ thống trục truyền lực cơ khí của máy kéo.

- **Về đặc tính nhấp nhô mô-men (Hình 4 - dưới, trái):** Khảo sát tại vùng xác lập phẳng 0.55 s $\rightarrow$ 0.65s có tải ở mốc 1000rpm biên độ dao động đỉnh - đỉnh của động cơ IPM truyền thống duy trì hẹp hơn, chênh lệch đỉnh - đáy đạt xấp xỉ **210 N.m**. Trong khi đó, động cơ cấu trúc mới FI-IPM có biên độ rộng hơn, đạt mức 270N.m. Hiện tượng này xuất hiện do tác động phi tuyến từ thành phần mô-men kháng từ hữu công sinh ra bởi đặc tính mạch từ đặc biệt $L_d > L_q$, tuy nhiên giá trị mô-men trung bình của cả hai hệ thống vẫn đảm bảo chắc chắn để thắng lực cản nền đất ruộng.

- **Về tính kinh tế năng lượng và đỉnh công suất (Hình 4 - dưới, phải):** Tại trạng thái tĩnh ổn định ở mốc 1000rpm ($t < 1.6s$), đường công suất điện tiêu thụ P_e của động cơ FI-IPM giảm ở mức thấp hơn rõ rệt 13.2kW

so với IPM truyền thống 15.8kW chứng minh hiệu quả tiết kiệm điện vượt trội nhờ giải thuật MTPA cải tiến. Tại thời điểm quá độ cực hạn $t = 1.6s$, khi máy kéo điện vừa tăng tốc lên 1500rpm vừa bị giật cấp tải nặng nhất 5414N, đỉnh vọt công suất của FI-IPM chỉ chạm mức 39kW, nằm an toàn dưới ngưỡng giới hạn định mức 50kW. Giải thuật phối hợp đã giữ gìn dòng năng lượng cực tốt, loại bỏ hoàn toàn hiện tượng vọt đỉnh công suất phá hủy (Power Spike), giúp bảo vệ tối đa tuổi thọ khối pin nguồn của xe.

- **Kiểm chứng dòng điện phản hồi (Hình 5):** Bản chất cơ điện tử giải thích cho các hành vi trên lộ diện hoàn toàn thông qua quỹ đạo dòng điện trục d-q tại Hình 5. Trong vùng tốc độ thấp $t < 1.2s$, dòng điện trục d của động cơ FI-IPM (Hình 5 - trên) được duy trì liên tục ở miền giá trị dương $i_{d1} \cong +50A$ đúng theo luật điều khiển MTPA đề xuất [Phương trình (2.9)] để trợ từ tăng kéo. Khi máy kéo bước vào vùng dải tốc độ cao vượt định mức $t > 1.2s$, dòng i_{d1} lập tức đảo chiều linh hoạt găm sâu xuống miền âm để thực hiện chiến lược khử từ giảm từ thông. Cơ chế giảm từ thông tự động này đã giải phóng khoảng dự trữ điện áp (Voltage Margin) cho bộ nghịch lưu, giúp cứu mạch vòng PI không bị bão hòa điện áp, từ đó giữ cho hệ thống FI-IPM hoạt động mượt mà tuyệt đối ở dải vận tốc cao.



Hình 5. Quỹ đạo dòng điện phản hồi trên hệ tọa độ quay d-q toàn chu kỳ.

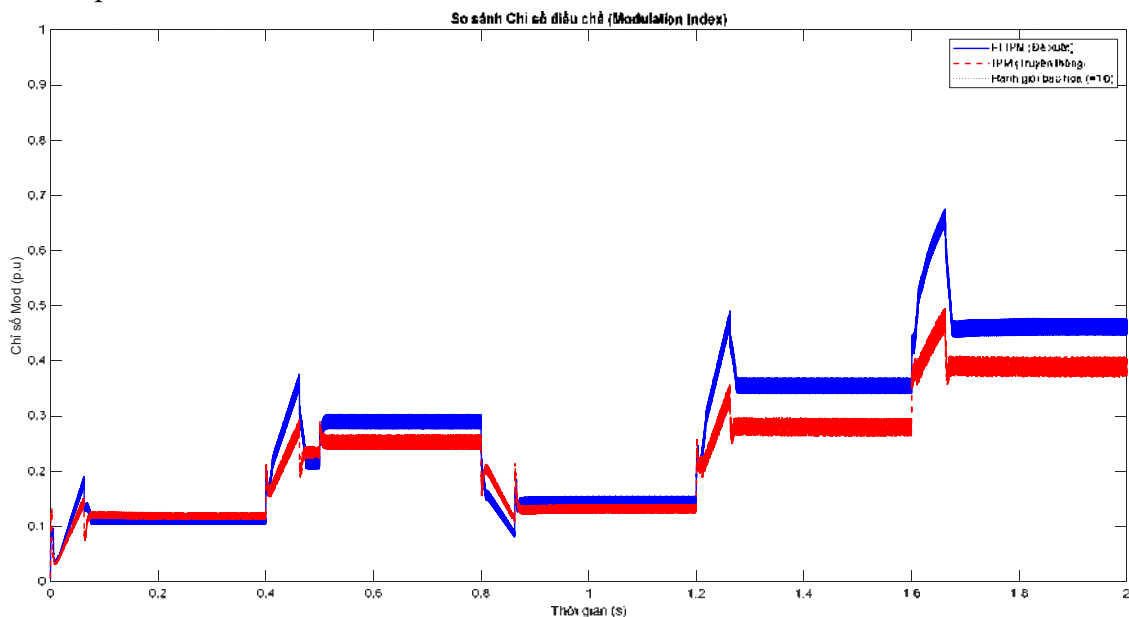
3.2. Phân tích chỉ số điều chế và hiệu suất định lượng hệ thống

Đặc tính sử dụng nguồn áp và giới hạn bão hòa của bộ nghịch lưu (Inverter) được đối chứng trực quan thông qua chỉ số điều chế (Modulation Index) tại **Hình 6**. Kết quả định lượng tổng hợp cuối cùng về chất lượng mô-men và tính kinh tế năng lượng được thống kê chi tiết tại **Bảng 3**.

- **Về năng lực dự trữ điện áp (Hình 6):** Khi máy kéo vận hành ở dải tốc độ cơ bản (dưới 1.2s, chỉ số điều chế của cả hai hệ thống duy trì ở mức thấp dưới 0.3 p.u. Khi phương tiện tăng tốc lên vùng điều khiển giảm từ thông sâu ở vận tốc cực đại 1500 rpm (thời điểm $t > 1.6$ s), đỉnh vọt quá độ của chỉ số điều chế đối với động cơ FI-IPM cấu trúc mới (đường màu xanh dương) chạm mức cực đại xấp xỉ **0.68 p.u.**, sau đó xác lập ổn định phẳng tại mức **0.47 p.u.** Đường đồ thị này nằm dưới rất sâu so với ranh giới bão hòa điện áp (mức 1.0 p.u), chứng minh giải thuật phối hợp dải vận hành số đã giải phóng một khoảng dự trữ điện áp (Voltage Margin) lý tưởng cho bộ nghịch lưu, loại bỏ hoàn toàn hiện tượng quá điều chế (Over-modulation) hay bão hòa điện áp.

- **Về độ nhấp nhô mô-men xoắn (Bảng 3):** Phân tích định lượng găm mốc xác lập cho thấy chỉ số nhấp nhô mô-men (Torque Ripple%) tính theo mô-men định mức của động cơ FI-IPM đạt **28.81%**, nhỉnh hơn so với mức **24.00%** của dòng IPM truyền thống. Biên độ dao động này xuất hiện do tác động phi tuyến của thành phần mô-men kháng từ hữu công sinh ra bởi đặc tính hình học mạch từ đảo ngược $L_d > L_q$. Tuy nhiên, mức nhấp nhô này hoàn toàn nằm trong giới hạn cho phép của hệ truyền động nông nghiệp, không gây ra các cú sốc phá hủy cơ học.

- **Về hiệu suất năng lượng vùng tải cực đại (Bảng 3):** Khảo sát tại dải thời gian tĩnh từ 1.75s đến 1.95s khi máy kéo cày lội ruộng nặng, hiệu suất năng lượng tổng thể của hệ thống sử dụng động cơ cấu trúc mới FI-IPM đạt tới **94.65%**, vượt trội hơn rõ rệt so với mức **91.38%** của động cơ IPM truyền thống. Kết quả này khẳng định giải thuật MTPA cải tiến đã tối ưu hóa góc mở dòng điện một cách hoàn hảo, giảm thiểu tổn hao đồng vô công trên cuộn dây stator, giúp máy kéo điện hoạt động tiết kiệm pin tối đa trên đồng ruộng.



Hình 6. Đặc tính biến thiên chỉ số điều chế của hai hệ thống truyền động.

Bảng 3. Kết quả so sánh độ nhấp nhô mô-men xoắn và hiệu suất năng lượng

	FI - IPM	IPM
Độ nhấp nhô mô-men xoắn	28,81%	24%
Hiệu suất năng lượng vùng tải cực đại [1.75s - 1.95s]	94,65%	91,38%

Tổng hợp các kết quả động học khẳng định **động cơ FI-IPM gánh tải hiệu quả hơn và đạt hiệu suất năng lượng tốt hơn**. Đây là cấu trúc động cơ tối ưu, đáp ứng trọn vẹn yêu cầu về cả sức kéo mạnh mẽ lẫn tính kinh tế năng lượng cho hệ truyền động máy kéo điện nông nghiệp.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng và đánh giá thành công hệ truyền động điện sử dụng động cơ FI-IPM công suất 50 kW ứng dụng cho máy kéo nông nghiệp trên nền tảng MATLAB/Simulink. Thông qua các kịch bản mô phỏng tải biến thiên phức tạp, kết quả nghiên cứu cho phép rút ra các kết luận chính sau:

1. Về hiệu suất và kinh tế năng lượng: Động cơ FI-IPM với chiến lược điều khiển MTPA cải tiến cho thấy khả năng tối ưu hóa dòng năng lượng vượt trội. Hiệu suất hệ thống ở vùng tải nặng đạt **94,65%**, giúp tiết kiệm đáng kể điện năng so với các dòng động cơ IPM thông thường (91,38%). Điều này khẳng định tính khả thi của giải pháp trong việc kéo dài thời gian làm việc và giảm chi phí vận hành cho máy kéo điện.

2. Về đặc tính vận hành: Hệ thống điều khiển FOC-SVPWM đảm bảo khả năng bám tốc độ lý tưởng với độ vọt lố bằng **0%** (ở trạng thái ổn định), giúp bảo vệ hệ

thống truyền động cơ khí khỏi các tác động quá độ đột ngột. Mặc dù cấu trúc FI-IPM có độ nhấp nhô mô-men cao hơn (28,81%), nhưng giá trị mô-men trung bình vẫn duy trì ổn định, đáp ứng tốt yêu cầu kéo tải nặng trong điều kiện địa hình canh tác phức tạp.

3. Về khả năng điều khiển: Việc thực hiện thành công cơ chế giảm từ thông tự động giúp hệ thống duy trì khoảng dự trữ điện áp (Voltage Margin) an toàn ngay cả ở dải tốc độ cao (1500 rpm), loại bỏ hoàn toàn nguy cơ bão hòa điện áp bộ nghịch lưu.

Tóm lại, động cơ FI-IPM là cấu trúc tối ưu, đáp ứng trọn vẹn sự cân bằng giữa sức kéo mạnh mẽ và tính kinh tế năng lượng cho thể hệ máy kéo điện thông minh. Nghiên cứu này tạo tiền đề quan trọng cho việc chế tạo thử nghiệm và triển khai các hệ truyền động điện hiệu suất cao trong thực tế sản xuất nông nghiệp hiện đại.

Hướng nghiên cứu phát triển trong tương lai: Triển khai hệ thống truyền động động cơ FI-IPM trên mô hình máy cày điện tự lái vận hành thực địa. Nghiên cứu sẽ tập trung mô hình hóa sự biến thiên liên tục của đặc tính cơ lý tính đất và hệ số bám đường, đồng thời ứng dụng các thuật toán điều khiển hiện đại (như Fuzzy-PI hoặc mạng thần kinh) nhằm nâng cao chất lượng động học và độ ổn định bám quỹ đạo của xe.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Chao Zhang, Xiongwei Xia, HongZheng and HongpingJia., *Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System*

for Agricultural Equipment. Agriculture **2025**, 15(19), 2007, MDPI.

2. Chandrasekhar Reddy Gade and Razia Sultana Wahab., *Conceptual Framework*

for Modelling of an Electric Tractor and Its Performance Analysis Using a Permanent Magnet Synchronous Motor. Sustainability 2023, 15, 14391.

3. Min-Fu Hsieh, Duc-Kien Ngo, and Nguyen Gia Minh Thao, *Flux Intensifying Feature of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor with High Torque Density*. Electronics 2022, 11, 397.

4. Thanh-Anh Huynh, Yen-Truc Nguyen Le, Zhen Lee, Mi-Ching Tsai 2, Po-Wei Huang, and Min-Fu Hsieh, *Influence of Flux Barriers and Permanent Magnet Arrangements on Performance of High-Speed Flux-Intensifying IPM Motor*, 2023 IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS.

5. M. Megrini, A. Gaga, and Y. Mehdaoui, *Review of Electric Vehicle Traction Motors, Control Systems, and Various Implementation Cards*. 2022, Journal of Operation and Automation in Power Engineering.

6. Shen Yang, Xiaoyong Zhu, Zixuan Xiang, Deyang Fan, Wenye Wu, and Jianing Yin, *Design and analysis of a new flux-intensifying permanent magnet brushless motor with multilayer flux barriers*, AIP ADVANCES 7,056628 (2017).

7. Samer Alwaqfi, MohamadAlzayed, and Hicham Chaoui, *Flux-Weakening Control Methods for Permanent Magnet Synchronous Machines in Electric Vehicles at High Speed*, Electronics 2025, 14, 3779, MDPI.

8. Yihong Qin, Peng Zhou, Zhibao Yuan and Haiping Xu, *Research on Multi-Dimensional MTPA Control for Five-Phase Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*, Energies 2025, 18, 3189, MDPI.

9. E.G.Shehata, *Acomparison between conventional and flux-intensifying interior permanent magnet synchronou smachines*, Int Trans Electr EnergSyst. 2021;e12826, JohnWiley&SonsLtd.

- Ngày gửi bài: 24/08/2026

- Ngày phản biện: 16/09/2026

- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ VI SÓNG TRONG CHUNG CẤT TINH DẦU SẢ BẰNG PHƯƠNG PHÁP LÔI CUỐN HƠI NƯỚC

Nguyễn Tiến Long¹, Nguyễn Quốc Hiệp², Trần Võ văn May¹,
Nguyễn Thị Ngọc¹, Nguyễn Trường Giang¹, Đinh Vương Hùng¹

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm thiết kế, chế tạo và đánh giá bước đầu mô hình chưng cất tinh dầu sả bằng phương pháp lôi cuốn hơi nước ứng dụng công nghệ vi sóng. Thí nghiệm khảo sát đồng thời hai yếu tố, gồm cách bố trí nguyên liệu – nước và chế độ công suất vi sóng. Ba cách bố trí nguyên liệu được thực hiện gồm: không bổ sung nước, nước đặt dưới lớp nguyên liệu và nguyên liệu ngập một phần trong nước; mỗi cách bố trí được kết hợp với ba chế độ công suất vi sóng: thấp, trung bình và cao. Kết quả cho thấy ảnh hưởng của công suất vi sóng đến lượng tinh dầu thu được thay đổi tùy theo cách bố trí nguyên liệu – nước. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng nguyên liệu ngập một phần trong nước và chế độ công suất cao cho kết quả tốt nhất, thu được trung bình 9,43 mL tinh dầu từ 1,5 kg sả tươi sau 180 phút, tương ứng 6,29 mL/kg. Lượng tinh dầu thu được ở điều kiện này cao hơn 4,78% so với phương pháp chưng cất truyền thống, đạt 9,00 mL với cùng khối lượng nguyên liệu. Kết quả bước đầu cho thấy công nghệ vi sóng có khả năng ứng dụng trong chưng cất tinh dầu sả, đồng thời cung cấp cơ sở thực nghiệm cho việc tiếp tục hoàn thiện thiết bị và tối ưu hóa các thông số vận hành.

Từ khóa: tinh dầu sả; công nghệ vi sóng; chưng cất lôi cuốn hơi nước; công suất vi sóng; thu hồi tinh dầu.

A PRELIMINARY INVESTIGATION OF MICROWAVE-ASSISTED STEAM DISTILLATION FOR LEMONGRASS ESSENTIAL OIL EXTRACTION

ABSTRACT

This study aimed to design and fabricate a laboratory-scale microwave-assisted system for the steam distillation of lemongrass essential oil. The experiments included three material–water arrangements: no added water, water placed beneath the plant material, and plant material partially immersed in water. Each arrangement was combined with three microwave power settings: low, medium, and high. The results showed that the effect of microwave power on essential oil recovery was strongly dependent on the material–water arrangement. The combination of partial immersion and the high-power setting produced the highest essential oil volume within the investigated conditions, yielding an average of 9.43 mL after 180 min, equivalent to 6.29 mL/kg of fresh lemongrass. This value was 4.78% higher than that obtained by conventional distillation, which yielded 9.00 mL of essential oil from the same mass of material. These findings indicate the potential application of microwave technology in the steam distillation of lemongrass essential oil and provide a basis for further improvement of the experimental system and optimization of operating conditions.

Keywords: lemongrass essential oil; microwave technology; steam distillation; microwave power; essential oil recovery.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tinh dầu là hỗn hợp các hợp chất tự nhiên dễ bay hơi, được thu nhận từ nhiều bộ phận khác nhau của thực vật như hoa, lá, thân, vỏ và rễ. Tùy thuộc vào đặc tính của nguyên liệu và yêu cầu đối với sản phẩm, tinh dầu có thể được chiết xuất bằng nhiều phương pháp. Trong đó, chưng cất lôi cuốn hơi nước được sử dụng phổ biến nhờ nguyên lý tương đối đơn giản, thiết bị dễ chế tạo, vận hành thuận tiện và có khả năng xử lý lượng nguyên liệu lớn. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn tồn tại một số hạn chế như thời gian chưng cất kéo

dài, tiêu thụ nhiều năng lượng và khả năng thu hồi tinh dầu chưa cao trong một số điều kiện vận hành.

Gia nhiệt bằng vi sóng sử dụng năng lượng điện từ tương tác với các phân tử phân cực, đặc biệt là nước có trong mô thực vật, thông qua cơ chế quay lưỡng cực và dẫn ion. Sự tương tác này tạo nhiệt nhanh và theo thể tích ngay trong môi trường hấp thụ, làm tăng nhiệt độ và áp suất bên trong mô, qua đó hỗ trợ giải phóng và vận chuyển các hợp chất dễ bay hơi. Trong chưng cất thủy có hỗ trợ vi sóng, khả năng gia nhiệt nhanh và trực tiếp giúp rút

¹ Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

* Tác giả liên hệ: nguyentienlong@huan.edu.vn

² Học viên cao học K21, Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

ngắn thời gian gia nhiệt, đồng thời tăng cường quá trình giải phóng và thu hồi tinh dầu [2]. Nghiên cứu trên vỏ chanh cho thấy, sự hỗ trợ của vi sóng cải thiện quá trình truyền nhiệt và truyền khối, nhờ đó rút ngắn thời gian thu nhận tinh dầu so với phương pháp chưng cất thủy thông thường [1]. Tuy nhiên, hiệu quả của phương pháp còn phụ thuộc vào đặc điểm nguyên liệu, lượng nước, công suất vi sóng và cấu hình thiết bị.

Sả là cây chứa tinh dầu có giá trị kinh tế, được sử dụng rộng rãi trong công nghiệp thực phẩm, mỹ phẩm, dược phẩm, nước hoa và sản xuất các chế phẩm có hoạt tính kháng khuẩn. Do đó, nâng cao khả năng thu hồi tinh dầu, rút ngắn thời gian chưng cất và giảm chi phí năng lượng là những yêu cầu quan trọng

II. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là quá trình chưng cất và thu hồi tinh dầu từ sả bằng hệ thống chưng cất có ứng dụng công nghệ vi sóng ở quy mô phòng thí nghiệm, trong đó tập trung khảo sát ảnh hưởng của cách bố trí nguyên liệu – nước và chế độ công suất vi sóng đến lượng tinh dầu thu được. Nguyên liệu nghiên cứu là sả tươi, với khối lượng 1,5 kg cho mỗi lần thí nghiệm. Thiết bị gia nhiệt là lò vi sóng SANYO EM-G3650V, điện áp 220 - 230 V, tần số nguồn 50 Hz, công suất điện vào định mức 1.250 W, công suất vi sóng đầu ra cực đại 800 W và tần số vi sóng 2.450 MHz.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng kết hợp phương pháp tính toán, thiết kế, chế tạo mô hình, khảo nghiệm thiết bị và thực nghiệm. Khả năng tạo hơi của nguồn vi sóng được xác định bằng cách gia nhiệt 800 mL nước trong 25 phút và đo thể tích nước còn lại. Khối lượng hơi nước bay ra hơi được tính theo công thức: $Q_h = \frac{V_{n1} - V_{n2}}{t} \times 60$, trong đó Q_h là khối lượng hơi nước bay ra trong một giờ (kg/h), V_{n1} và V_{n2} lần lượt là thể tích nước trước và sau khi gia nhiệt (mL); t là thời gian gia nhiệt (phút).

trong quá trình hoàn thiện công nghệ và thiết bị chế biến tinh dầu sả. Mặc dù công nghệ vi sóng đã được nghiên cứu trong chiết xuất tinh dầu thực vật, việc tích hợp nguồn gia nhiệt vi sóng vào hệ thống chưng cất lôi cuốn hơi nước với cấu hình thiết bị và điều kiện nguyên liệu cụ thể vẫn cần tiếp tục được khảo sát, đánh giá.

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm xây dựng mô hình chưng cất tinh dầu sả bằng phương pháp lôi cuốn hơi nước sử dụng công nghệ vi sóng. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và thực nghiệm cho việc tối ưu hóa các thông số vận hành, hoàn thiện thiết bị và xem xét khả năng ứng dụng công nghệ vi sóng trong chưng cất tinh dầu sả ở quy mô lớn hơn.

Phương trình cân bằng nhiệt và truyền nhiệt được sử dụng để xác định lượng hơi tạo thành, nhiệt lượng cần trao đổi, diện tích truyền nhiệt và các thông số cơ bản của thiết bị ngưng tụ. Thí nghiệm khảo sát hai yếu tố. Yếu tố thứ nhất là cách bố trí nguyên liệu – nước, gồm: (i) không bổ sung nước; (ii) nước đặt dưới lớp nguyên liệu; và (iii) nguyên liệu ngập một phần trong nước. Yếu tố thứ hai là chế độ công suất vi sóng, gồm ba mức cài đặt: thấp, trung bình và cao. Nguyên liệu sử dụng trong mỗi thí nghiệm là 1,5 kg sả tươi. Sả sau khi thu hoạch, loại bỏ các lá khô và tạp chất, rửa sạch, để ráo, cắt thành đoạn dài 160 mm, bó thành bó nhỏ và không làm dập trước khi chưng cất. Kích thước bó nguyên liệu và điều kiện làm mát được duy trì thống nhất giữa các công thức thí nghiệm. Đối với các thí nghiệm có bổ sung nước, lượng nước sử dụng là 800 mL/mẻ, tương ứng tỷ lệ nước/nguyên liệu là 0,53 L/kg. Nguyên liệu được bố trí theo hai phương thức: nằm hoàn toàn phía trên mặt nước và ngập một phần trong nước. Các thí nghiệm được lặp lại ba lần. Phương pháp chưng cất lôi cuốn hơi nước sử dụng nguồn gia nhiệt thông thường được bố trí để đối chứng. Hỗn hợp hơi nước – tinh dầu sau khi ngưng tụ được thu định kỳ 10 phút. Thể tích dịch ngưng được xác định bằng dụng cụ đo

thể tích chia độ. Sau khi hỗn hợp phân lớp, tinh dầu được tách bằng dụng cụ phân tách và thể tích tinh dầu được xác định bằng ống đong chia độ. Thời gian kết thúc từng thí nghiệm được xác định khi nguyên liệu có dấu hiệu khô hoặc lượng tinh dầu thu thêm rất thấp. Lượng tinh dầu thu được trên 1 kg sả tươi được xác định theo công thức: $Y = V_{td} / m_{nl}$, trong đó Y là lượng tinh dầu thu được

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

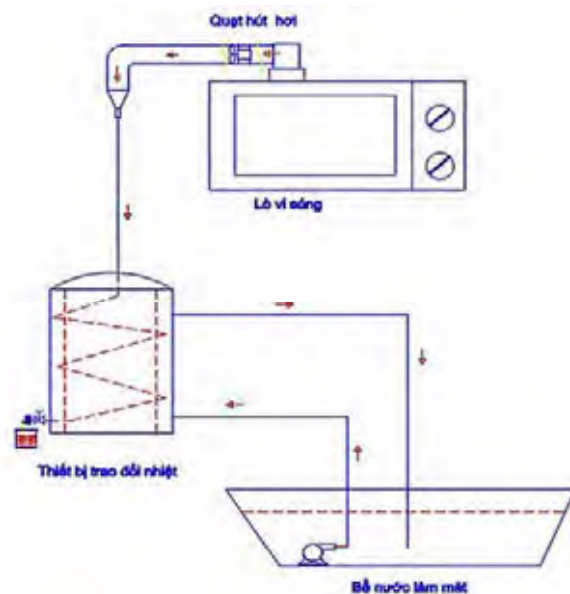
3.1. Kết quả xây dựng hệ thống chưng cất tinh dầu sử dụng vi sóng

3.1.1. Lựa chọn sơ đồ nguyên lý hệ thống chưng cất tinh dầu ứng dụng công nghệ vi sóng

Gia nhiệt bằng vi sóng có khả năng tác động trực tiếp lên nước và các thành phần phân cực có trong nguyên liệu sả. Năng lượng vi sóng được chuyển hóa thành nhiệt bên trong môi trường hấp thụ, làm tăng nhiệt độ của nước và nguyên liệu, qua đó hỗ trợ giải phóng các hợp chất dễ bay hơi khỏi mô thực vật. Hơi nước đi qua lớp nguyên liệu và lõi

(mL/kg sả tươi), V_{td} là thể tích tinh dầu thu được (mL) và m_{nl} là khối lượng sả tươi sử dụng (kg). Tốc độ thu tinh dầu trung bình được tính theo công thức: $v = 60 V_{td} / t$, trong đó v là tốc độ thu tinh dầu trung bình (mL/h) và t là thời gian chưng cất (phút). Số liệu được xử lý bằng phần mềm Microsoft Excel 2013.

cuốn tinh dầu ra khỏi buồng chưng cất. Hỗn hợp hơi nước – tinh dầu sau đó được dẫn đến thiết bị ngưng tụ, chuyển thành pha lỏng và đưa vào bộ phận thu, phân tách tinh dầu. Để duy trì khả năng ngưng tụ, thiết bị ngưng tụ được cấp nước làm mát theo chế độ tuần hoàn. Trình tự của quá trình gồm gia nhiệt – tạo hơi – giải phóng và lôi cuốn tinh dầu – dẫn hơi – ngưng tụ – thu và phân tách sản phẩm. Trên cơ sở nguyên lý công nghệ và trình tự quá trình đã xác định, sơ đồ nguyên lý của hệ thống chưng cất tinh dầu sả bằng phương pháp lôi cuốn hơi nước ứng dụng công nghệ vi sóng được lựa chọn như Hình 1.



Hình 1. Sơ đồ công nghệ của hệ thống chưng cất

3.1.2. Tính toán thông số thiết bị ngưng tụ

Thiết bị ngưng tụ gồm có phần vỏ chứa nước làm mát và ống dẫn hỗn hợp hơi nước – tinh dầu được chế tạo bằng đồng, uốn theo dạng xoắn lò. Để xác định khả năng tạo hơi,

800 mL nước được gia nhiệt bằng lò vi sóng trong 25 phút. Sau khi gia nhiệt, thể tích nước còn lại là 540 mL.

Khối lượng hơi bay ra trong một giờ sẽ là:

$$Q_h = \frac{800-540}{25} \times 60 = 624 \text{ mL/h} = 0.624 \text{ (kg/h)}$$

ε : hệ số bay hơi với 1 kg ($\varepsilon \approx 1,2$)

$\Rightarrow Q_{\text{hơi}} = 1200 \times 0.624 = 748,8 \text{ l/h}$

Nhiệt lượng hơi là :

$$Q_n = m.C.\Delta T = 748,8 \times 4186 \times 70 = 21.941.337,6 \text{ (J)}$$

Hệ số dẫn nhiệt và tính sẵn có của vật liệu ta chọn vật liệu truyền nhiệt của bình ngưng là ống đồng: $\lambda_{\text{đồng}} = 384 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

Độ dẫn nhiệt của nước là: $\lambda_{\text{nước}} = 0.6 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

Nhiệt độ bay hơi ban đầu: $t_1 = 100^{\circ}\text{C}$

Nhiệt độ sau khi ngưng tụ bằng nhiệt độ của môi trường: $t_2 = 30^{\circ}\text{C}$

Chọn ống dẫn hơi có vật liệu bằng đồng, đường kính 12 mm, chiều dày của thành ống 0,35 mm:

$d_2 = 12,0 \text{ mm} \Rightarrow r_2 = 6 \text{ mm} (d_2 = 0,012 \text{ m})$

$d_1 = 11,30 \text{ mm}, r_1 = 5.65 \text{ mm} (d_1 = 0,0113 \text{ m})$

$$\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = \ln\left(\frac{0.012}{0.0113}\right) = 0,06$$

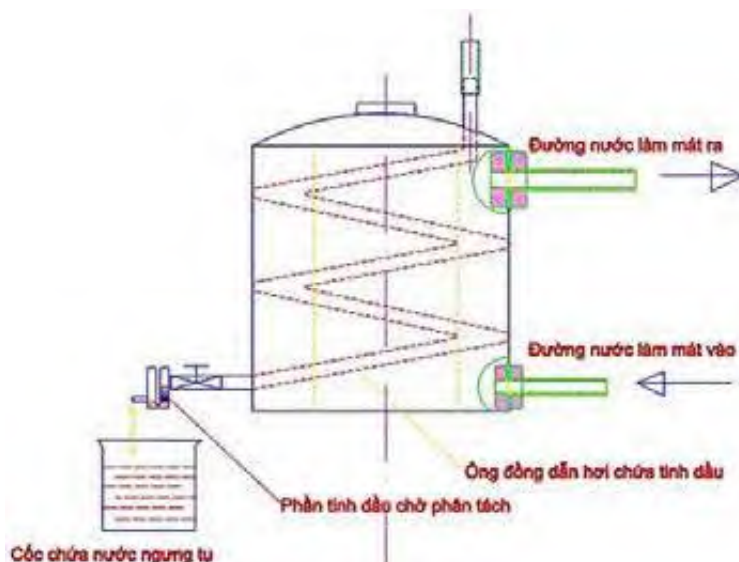
$$\text{Khi đó: } Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{2\pi\lambda L} \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (W)$$

$$Q_n \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) = 2\pi \cdot \lambda \cdot L \cdot (t_1 - t_2)$$

$$\rightarrow L = \frac{Q_n \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}{2\pi \cdot \lambda \cdot (t_1 - t_2)}$$

Thay số vào ta có:

$$L = \frac{21941337,6 \times 0.06}{2 \times 3.14 \times 384 \times 70} = 7,7 \text{ m}$$



Hình 2. Sơ đồ cấu tạo thiết bị ngưng tụ

3.1.3. Lựa chọn và bố trí các bộ phận chính

Quạt hút được bố trí trên đường dẫn hỗn hợp hơi nhằm hỗ trợ vận chuyển hơi nước – tinh dầu từ buồng chưng cất đến thiết bị ngưng tụ. Quạt sử dụng động cơ điện một chiều, làm việc ổn định ở điện áp 7,2 V với tốc độ khoảng 13.500 vòng/phút. Đường ống dẫn hơi được thiết kế phù hợp với kích thước quạt, các mối nối được làm kín và bọc cách nhiệt nhằm hạn chế thất thoát hơi và hiện tượng ngưng tụ sớm trên đường ống. Hệ thống làm mát sử dụng bơm tuần hoàn có công suất 15 W, lưu lượng 1.200 L/h và cột áp 1 m. Nước được bơm từ bể chứa qua thiết

bị ngưng tụ và hồi về bể, tạo thành vòng tuần hoàn kín. Cách bố trí này giúp duy trì dòng nước làm mát liên tục trong quá trình vận hành. Các vị trí nối giữa buồng chưng cất, đường ống dẫn hơi và thiết bị ngưng tụ được làm kín để hạn chế thất thoát hỗn hợp hơi. Phần vỏ ngoài của buồng chưng cất và đường ống dẫn hỗn hợp hơi được bọc vật liệu bảo ôn nhằm hạn chế thất thoát nhiệt và hiện tượng ngưng tụ sớm.

3.1.4. Chế tạo, lắp đặt và vận hành thử hệ thống

Trên cơ sở kết quả tính toán và các thông số kỹ thuật đã lựa chọn, các bộ phận của hệ thống được chế tạo và lắp đặt thành mô hình

quy mô phòng thí nghiệm (Hình 3). Hệ thống gồm buồng chung cất sử dụng lò vi sóng, khay chứa nước và nguyên liệu, quạt hút, đường ống dẫn hỗn hợp hơi, thiết bị ngưng tụ, bộ phận thu sản phẩm và hệ thống nước làm mát tuần hoàn. Các vị trí kết nối được làm kín và các bộ phận được bố trí phù hợp để thuận

tiện cho việc vận hành, theo dõi và thu thập số liệu. Kết quả vận hành thử cho thấy hệ thống có khả năng tạo hơi, dẫn hỗn hợp hơi đến thiết bị ngưng tụ và thu được dịch ngưng ở cả ba chế độ cài đặt công suất. Hệ thống nước làm mát tuần hoàn và quạt hút hoạt động ổn định trong quá trình thí nghiệm.



Hình 3. Hệ thống chưng cất bằng lò vi sóng

3.2. Kết quả thí nghiệm chưng cất và thu hồi tinh dầu sả

3.2.1. Ảnh hưởng của cách bố trí nguyên liệu - nước và chế độ công suất đến lượng tinh dầu thu được

Nhằm đánh giá đồng thời ảnh hưởng của cách bố trí nguyên liệu - nước và chế độ công

suất vi sóng đến khả năng thu hồi tinh dầu sả, lượng tinh dầu và lượng tinh dầu thu được trên 1 kg sả tươi tại từng thí nghiệm được tổng hợp trong Bảng 1. Sản phẩm thu được và trạng thái nguyên liệu sau chưng cất ở ba cách bố trí nguyên liệu - nước được minh họa trong Hình 4.

Bảng 1. Lượng tinh dầu thu được ở các thí nghiệm

Cách bố trí nguyên liệu - nước	Chế độ thấp		Chế độ trung bình		Chế độ cao	
	(mL)	(mL/kg)	(mL)	(mL/kg)	(mL)	(mL/kg)
Không bổ sung nước	1,70	1,13	1,20	0,80	1,00	0,67
Nước đặt dưới lớp nguyên liệu	3,67	2,45	2,57	1,71	2,67	1,78
Nguyên liệu ngập một phần trong nước	0,80	0,53	6,03	4,02	9,43	6,29

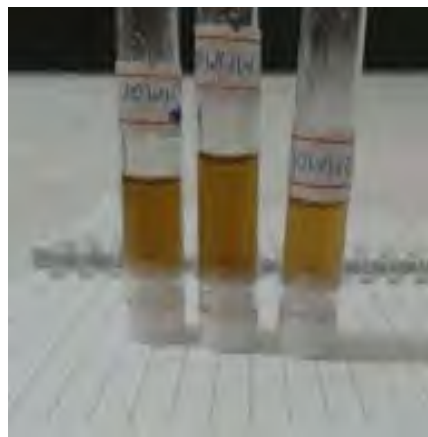
Ghi chú: Mỗi nghiệm thức sử dụng 1,5 kg sả tươi. Các giá trị là trung bình của ba lần lặp lại, ngoại trừ thí nghiệm nguyên liệu ngập một phần trong nước ở chế độ thấp chỉ thực hiện một lần.

Bảng 1 cho thấy khi không bổ sung nước, tăng công suất vi sóng làm lượng tinh dầu giảm từ 1,70 xuống 1,00 mL. Trong điều kiện này, nguồn nước tạo hơi chỉ là độ ẩm tự nhiên

của sả; công suất cao làm nước thoát nhanh, nguyên liệu sớm bị khô và không duy trì được dòng hơi đủ lâu để lôi cuốn tinh dầu. Gia nhiệt không đồng đều giữa phần thân và lá

cũng có thể gây quá nhiệt cục bộ. Khi nước được đặt dưới lớp nguyên liệu, lượng tinh dầu đạt 2,57-3,67 mL, cao hơn nhóm không bổ sung nước ở cả ba chế độ. Hơi nước đã hỗ trợ truyền nhiệt và lôi cuốn các phân tử dễ bay hơi, nhưng tăng công suất không làm lượng

tinh dầu tăng tương ứng. Quan sát phần lá phía trên bị khô trong khi nước vẫn còn trong khay cho thấy hơi nước tiếp xúc chưa đồng đều với toàn bộ lớp nguyên liệu; do đó khả năng giải phóng tinh dầu bị giới hạn bởi bố trí tiếp xúc, không chỉ bởi tốc độ tạo hơi.



Hình 4. Sản phẩm và trạng thái nguyên liệu sau chưng cất ở các cách bố trí nguyên liệu - nước (a) sản phẩm khi không bổ sung nước; (b) sản phẩm khi nước đặt dưới lớp nguyên liệu; (c) sản phẩm khi nguyên liệu ngập một phần trong nước; (d) trạng thái lá sả bị khô sau chưng cất.

Đối với nguyên liệu ngập một phần trong nước, ảnh hưởng của công suất thể hiện theo chiều ngược lại. Ở chế độ thấp, lượng nước lớn làm tăng tải nhiệt nên sau 180 phút chỉ thu được 0,80 mL tinh dầu. Khi tăng lên chế độ trung bình và cao, lượng tinh dầu tăng lần lượt lên 6,03 và 9,43 mL. Công suất cao giúp hệ nước - nguyên liệu đạt nhanh điều kiện tạo hơi, đồng thời gia nhiệt làm nước trong mô nóng lên, tăng áp suất nội bào và hỗ trợ giải phóng tinh dầu. Xu hướng này tương đồng với kết quả của một nghiên cứu trước đây, trong đó hiệu suất chưng cất thủy có hỗ trợ vi

sóng tăng theo công suất và đạt giá trị cao nhất tại 800 W trong phạm vi khảo sát [5]; nghiên cứu đó cũng cho thấy tỷ lệ nguyên liệu/dung môi chỉ làm tăng hiệu suất đến một giới hạn nhất định. Kết quả này phù hợp với nhận định rằng công suất vi sóng, thời gian chưng cất, kích thước nguyên liệu và tỷ lệ nguyên liệu/nước đều ảnh hưởng đến quá trình thu hồi tinh dầu [4]. Như vậy, lượng nước lớn chỉ phát huy tác dụng khi năng lượng vi sóng cung cấp đủ cho cả gia nhiệt và tạo hơi.

3.2.2. Ảnh hưởng của thời gian và tốc độ thu hồi tinh dầu

Bên cạnh lượng tinh dầu thu được, thời gian chưng cất và tốc độ thu hồi cũng là những chỉ tiêu cần thiết để đánh giá khả năng làm việc của hệ thống. Do thời gian kết thúc

thí nghiệm khác nhau giữa một số thí nghiệm, tốc độ thu tinh dầu trung bình được tính nhằm hỗ trợ so sánh khả năng thu hồi sản phẩm giữa các cách bố trí nguyên liệu – nước và các chế độ công suất. Kết quả được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thời gian chưng cất và tốc độ thu tinh dầu trung bình

Cách bố trí nguyên liệu - nước	Chế độ thấp		Chế độ trung bình		Chế độ cao	
	Thời gian (phút)	Tốc độ (mL/h)	Thời gian (phút)	Tốc độ (mL/h)	Thời gian (phút)	Tốc độ (mL/h)
Không bổ sung nước	110	0,93	80	0,90	80	0,75
Nước đặt dưới lớp nguyên liệu	130	1,69	90	1,71	90	1,78
Nguyên liệu ngập một phần trong nước	180	0,27	180	2,01	180	3,14

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy, ở nhóm không bổ sung nước, tăng công suất rút ngắn thời gian từ 110 xuống 80 phút nhưng tốc độ thu tinh dầu giảm từ 0,93 xuống 0,75 mL/h, xác nhận rằng thiếu nước là yếu tố giới hạn. Ở nhóm đặt nước dưới lớp nguyên liệu, tốc độ thu tương đối ổn định, 1,69-1,78 mL/h; chênh lệch lượng tinh dầu cuối cùng chủ yếu liên quan đến thời gian chưng cất 90 hoặc 130 phút. Ở nhóm nguyên liệu ngập một phần trong nước, cả ba chế độ đều vận hành 180 phút nên có thể so sánh trực tiếp. Tinh dầu xuất hiện chậm và tăng không đều ở chế độ thấp; ở chế độ trung bình bắt đầu thu sau khoảng 20-30 phút và tăng mạnh trong khoảng 100-160 phút. Ở chế độ cao, dịch ngưng xuất hiện sớm hơn, khoảng 10-20 phút; lượng tinh dầu cũng tập trung nhiều trong khoảng 100-160 phút rồi giảm dần. Tốc độ thu trung bình tăng từ 0,27 lên 2,01 và 3,14 mL/h khi tăng công suất từ thấp lên trung bình và cao. Chế độ cao cho lượng tinh dầu lớn hơn 56,4% và tốc độ thu cao gấp 1,56 lần chế độ trung bình trong cùng thời gian. Xu hướng tăng nhanh ở giai đoạn đầu và

chậm dần về sau tương đồng với diễn biến thu hồi tinh dầu bằng vi sóng ở quy mô pilot được mô tả bằng mô hình động học bậc nhất trong một nghiên cứu trước đây [5]. Thời gian chưng cất, công suất vi sóng và tỷ lệ nước/nguyên liệu đều ảnh hưởng đến quá trình thu hồi tinh dầu; điều kiện tối ưu phụ thuộc vào phạm vi khảo sát và không nhất thiết tương ứng với mức công suất lớn nhất [3].

3.2.3. So sánh với phương pháp truyền thống và đặc điểm cảm quan

Thí nghiệm nguyên liệu ngập một phần trong nước và chế độ công suất cao cho kết quả tốt nhất, đạt 578 mL dịch ngưng, 9,43 mL tinh dầu (6,29 mL/kg và tốc độ thu trung bình 3,14 mL/h) sau 180 phút. Kết quả này phản ánh sự phối hợp phù hợp nhất giữa lượng nước, mức độ tiếp xúc với nguyên liệu và năng lượng vi sóng trong các điều kiện đã khảo sát. So với phương pháp chưng cất lôi cuốn hơi nước truyền thống trên cùng 1,5 kg nguyên liệu, thu được 9,0 mL tinh dầu, lượng tinh dầu của thí nghiệm sử dụng vi sóng cao hơn khoảng 4,78%. Chưng cất có hỗ trợ vi

sóng đạt hiệu suất thu hồi tinh dầu 0,35% sau 90 phút, trong khi chưng cất thủy truyền thống chỉ đạt 0,20% sau 360 phút, cho thấy vi sóng có khả năng nâng cao hiệu suất và rút ngắn thời gian thu hồi tinh dầu [4]. Tuy nhiên, không nên so sánh trực tiếp lượng tinh dầu thu được là 6,27 mL/kg của nghiên cứu này với các kết quả công bố dưới dạng phần trăm khối lượng, vì cơ sở tính toán không giống nhau. Nghiên cứu này sử dụng thể tích tinh dầu trên khối lượng sả tươi, trong khi công trình nghiên cứu khác sử dụng khối lượng tinh dầu trên nguyên liệu khô hoặc nguyên liệu đã làm héo. Nếu xác định được khối lượng riêng của tinh dầu, hiệu suất theo khối lượng có thể được quy đổi. Việc so sánh định lượng chỉ có ý nghĩa khi thống nhất loại sả, bộ phận nguyên liệu, trạng thái tươi hoặc khô, thời gian chưng cất và phương pháp tính hiệu suất. Tóm lại, kết quả chứng minh mô hình vi sóng có khả năng chưng cất và thu hồi tinh dầu sả. Hiệu quả của quá trình phụ thuộc vào

sự kết hợp giữa công suất vi sóng và cách bố trí nguyên liệu - nước. Điều kiện nguyên liệu ngập một phần trong nước ở chế độ công suất cao cho kết quả cao nhất, đạt 9,43 mL tinh dầu và 6,29 mL/kg sả tươi. Tuy vậy, cần tiếp tục xác định mức tiêu thụ năng lượng, thực hiện kiểm định thống kê và phân tích thành phần hóa học của tinh dầu trước khi kết luận đầy đủ về hiệu quả và chất lượng sản phẩm so với phương pháp truyền thống.

3.2.4. Đặc điểm cảm quan của tinh dầu thu được

Bên cạnh lượng tinh dầu thu được, sự khác biệt về đặc điểm cảm quan giữa hai phương pháp cũng được ghi nhận. Quan sát trực tiếp cho thấy tinh dầu thu được bằng phương pháp chưng cất thủy có sử dụng công nghệ vi sóng có màu đậm hơn và mùi sả rõ hơn so với tinh dầu thu được bằng phương pháp chưng cất truyền thống (Hình 5). Hai mẫu đều giữ được mùi đặc trưng của sả và không ghi nhận tạp chất rõ rệt bằng quan sát thông thường.



Hình 5. Tinh dầu sả thu được bằng phương pháp vi sóng (trái) và phương pháp truyền thống (phải)

Sự khác biệt về màu sắc và cường độ mùi có thể liên quan đến sự khác nhau về cơ chế gia nhiệt và thành phần các hợp chất được giải phóng trong quá trình chưng cất. Tuy nhiên, nghiên cứu mới chỉ đánh giá cảm quan bằng quan sát và nhận biết mùi trực tiếp, chưa thực hiện phép đo màu, đánh giá cảm quan

bằng hội đồng hoặc phân tích thành phần hóa học. Vì vậy, kết quả này chỉ phản ánh sự khác biệt cảm quan ban đầu, chưa đủ cơ sở để kết luận phương pháp sử dụng công nghệ vi sóng tạo ra tinh dầu có chất lượng cao hơn phương pháp truyền thống.

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế, chế tạo và vận hành được hệ thống chưng cất tinh dầu sả có sử dụng công nghệ vi sóng ở quy mô phòng thí nghiệm. Hệ thống thực hiện được các quá trình gia nhiệt, tạo và dẫn hỗn hợp hơi nước – tinh dầu, ngưng tụ và thu nhận sản phẩm.

Kết quả cho thấy lượng tinh dầu thu được phụ thuộc vào sự kết hợp giữa cách bố trí nguyên liệu – nước và chế độ công suất vi sóng. Điều kiện nguyên liệu ngập một phần trong nước và chế độ công suất cao cho kết quả cao nhất trong phạm vi khảo sát, thu được trung bình 9,43 mL tinh dầu từ 1,5 kg sả tươi sau 180 phút, tương ứng 6,29 mL/kg sả tươi. Lượng tinh dầu này cao hơn khoảng 4,78% so với phương pháp chưng cất truyền thống,

thu được 9,00 mL từ cùng khối lượng nguyên liệu.

Quan sát cảm quan cho thấy tinh dầu thu được bằng phương pháp sử dụng công nghệ vi sóng có màu đậm hơn và mùi sả rõ hơn so với tinh dầu chưng cất bằng phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, kết quả này mới phản ánh sự khác biệt cảm quan ban đầu, chưa đủ cơ sở để khẳng định chất lượng tinh dầu cao hơn. Các nghiên cứu tiếp theo cần thực hiện phép đo màu, đánh giá cảm quan có kiểm soát, phân tích thành phần hóa học và xác định các chỉ tiêu chất lượng của tinh dầu; đồng thời đánh giá mức tiêu thụ năng lượng và tối ưu hóa các thông số vận hành của hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Golmakani, M.T. & Moayyedi, M. (2015). *Comparison of heat and mass transfer of different microwave-assisted extraction methods of essential oil from Citrus limon (Lisbon variety) peel*. Food Science & Nutrition, 3(6), 506–518.
2. Jeyaratnam, N., Nour, A.H., Kantasamy, R. & Akindoyo, J.O. (2017). *Microwave assisted hydrodistillation – An overview of mechanism and heating properties*. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 11(3), 22–29.
3. Ranitha, M., Nour, A.H., Sulaiman, Z.A., & Raj, S.T. (2014). *A comparative study of lemongrass (Cymbopogon citratus) essential oil extracted by microwave-assisted hydrodistillation (MAHD) and conventional hydrodistillation (HD) method*. International

Journal of Chemical Engineering and Applications, 5(2), 104–108. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2014.V5.360>.

4. Tran, T.H., Nguyen, D.C., Nguyen Phu, T.N., Ho, V.T.T., Nguyen Vo, D.V., Bach, L.G. & Nguyen, T.D. (2019). *Research on lemongrass oil extraction technology (hydrodistillation, microwave-assisted hydrodistillation)*. Indonesian Journal of Chemistry, 19(4). <https://doi.org/10.22146/ijc.40883>.

5. Variyana, Y., Ma'sum, Z., Bhuana, D. S., & Mahfud, M. (2023). *Extraction of Java lemongrass (Cymbopogon citratus) using microwave-assisted hydro distillation in pilot scale: Parametric study and modelling*. ASEAN Journal of Chemical Engineering, 23(2), 210–223. <https://doi.org/10.22146/ajche.79220>.

- Ngày gửi bài: 24/08/2026
- Ngày phản biện: 16/09/2026
- Ngày duyệt đăng: 23/09/2026

THIẾT KẾ VÀ CHẾ TẠO MÁY PHAY CNC MINI 3 TRỤC

Khuong Anh Son^{1*}, Võ Công Anh¹, Hồ Văn Dũng¹, Nguyễn Thị Kim Anh¹,
Nguyễn Quốc Toàn¹, Đặng Văn Vinh², Phạm Lương Hoàn³

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả thiết kế, chế tạo và thử nghiệm máy phay CNC mini 3 trục phục vụ đào tạo và nghiên cứu trong lĩnh vực Kỹ thuật Cơ điện tử. Máy được thiết kế với kết cấu nhỏ gọn, chi phí chế tạo hợp lý. Hệ thống sử dụng cơ cấu truyền động vít me – thanh dẫn hướng tuyến tính, điều khiển bằng Arduino Uno kết hợp phần mềm GRBL. Máy được thử nghiệm gia công trên các vật liệu như gỗ, nhựa và bo đồng PCB. Các sản phẩm thử nghiệm gồm tranh khắc CNC, lôgô và bo mạch in (PCB), cho thấy máy hoạt động ổn định, đáp ứng yêu cầu gia công các chi tiết có kích thước nhỏ và phục vụ hiệu quả công tác giảng dạy thực hành ngành Kỹ thuật Cơ điện tử.

Từ khóa: máy phay CNC mini; CNC 3 trục; Arduino Uno; GRBL.

DESIGN AND FABRICATION OF A THREE-AXIS MINI CNC MILLING MACHINE ABSTRACT

This paper presents the design, fabrication, and experimental evaluation of a three-axis mini CNC milling machine developed for education and research in the field of Mechatronics Engineering. The machine features a compact structure and a cost-effective design. The system employs a lead screw–linear guide transmission mechanism and is controlled by an Arduino Uno integrated with GRBL software. Machining experiments were conducted on wood, plastic, and PCB copper-clad boards. The fabricated products, including CNC-engraved artworks, logos, and printed circuit boards (PCBs), demonstrate that the machine operates stably, meets the requirements for machining small-sized components, and effectively supports practical teaching in Mechatronics Engineering.

Keywords: mini CNC milling machine; three-axis CNC; Arduino Uno; GRBL.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong xu thế phát triển của cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0, công nghệ điều khiển số bằng máy tính (Computer Numerical Control – CNC) đã trở thành một trong những nền tảng quan trọng của ngành cơ khí chế tạo. Máy CNC cho phép gia công các chi tiết với độ chính xác cao, tính lặp lại tốt và mức độ tự động hóa lớn, góp phần nâng cao năng suất, chất lượng sản phẩm và giảm sự phụ thuộc vào tay nghề của người vận hành. Vì vậy, công nghệ CNC hiện nay được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực cơ khí chính xác, điện tử, chế tạo khuôn mẫu và sản xuất công nghiệp [1, 7].

Tuy nhiên, phần lớn các máy CNC công nghiệp có kích thước lớn, kết cấu phức tạp và chi phí đầu tư cao, nên chưa phù hợp với điều kiện trang bị của các cơ sở đào tạo, phòng thí nghiệm và các xưởng sản xuất quy mô nhỏ. Trong khi đó, nhu cầu gia công các chi tiết kích thước nhỏ, chế tạo mô hình, khắc biển tên, gia

công bo mạch PCB và phục vụ thực hành trong đào tạo kỹ thuật ngày càng gia tăng. Điều này đặt ra yêu cầu nghiên cứu và phát triển các mô hình máy CNC mini có giá thành hợp lý, dễ chế tạo, dễ vận hành nhưng vẫn đảm bảo độ cứng vững, độ chính xác và tính ổn định trong quá trình làm việc [2, 3, 4, 5, 6].

Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn đó, nghiên cứu này tập trung thiết kế và chế tạo máy phay CNC mini 3 trục. Máy được thiết kế với kết cấu nhỏ gọn, sử dụng các linh kiện cơ khí và điện tử phổ biến, dễ tìm kiếm và thay thế, đồng thời ứng dụng hệ thống điều khiển số nhằm đảm bảo khả năng vận hành ổn định và linh hoạt. Nội dung nghiên cứu bao gồm thiết kế kết cấu cơ khí, lựa chọn hệ thống truyền động, thiết kế và tích hợp mạch điều khiển, chế tạo, lắp ráp và thực nghiệm đánh giá các đặc tính làm việc của máy.

Kết quả nghiên cứu góp phần xây dựng máy CNC mini 3 trục có tính ứng dụng cao, đáp ứng nhu cầu học tập, nghiên cứu và gia

¹ Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

² Phòng đào tạo & BDCGD, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế

³ Công ty cổ phần CT Modulex, Thành phố Hồ Chí Minh

* Email liên hệ: khuonganhsong@hvae.edu.vn

công các chi tiết nhỏ trong lĩnh vực cơ điện tử. Đồng thời, đây cũng là cơ sở cho các nghiên cứu tiếp theo nhằm nâng cao độ chính xác, mở rộng chức năng và hoàn thiện các hệ thống CNC mini 3 trục phục vụ đào tạo.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Để thiết kế và chế tạo mô hình máy CNC mini đa năng, nghiên cứu sử dụng các vật liệu, linh kiện cơ khí và thiết bị điện - điện tử phổ biến, dễ tìm kiếm trên thị trường. Khung máy được chế tạo từ nhôm định hình nhằm giảm khối lượng nhưng vẫn đảm bảo độ cứng vững. Hệ thống truyền động sử dụng gói đồ trục vít me T8 kết hợp thanh trượt dẫn hướng tuyến tính để nâng cao độ chính xác định vị và giảm sai số chuyển động trên các trục X, Y và Z. Bộ điều khiển sử dụng mạch Annoy Tools điều khiển máy CNC mini. Động cơ DC điều khiển trục chính của máy, động cơ bước điều khiển các trục X, Y và Z. Các vật liệu gỗ, nhựa, mica và bo mạch PCB để gia công các sản phẩm.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện theo ba phương pháp chính:

Phương pháp thu thập thông tin: Tổng hợp, phân tích và kế thừa các tài liệu, sách, bài báo khoa học và nguồn tư liệu liên quan để lựa chọn giải pháp thiết kế phù hợp.

Phương pháp thiết kế: Sử dụng phần mềm Autodesk Inventor để thiết kế 3D và xuất bản vẽ chế tạo; đồng thời sử dụng phần mềm Aspire, Inkscape và GRBL để tạo G-code và điều khiển máy.

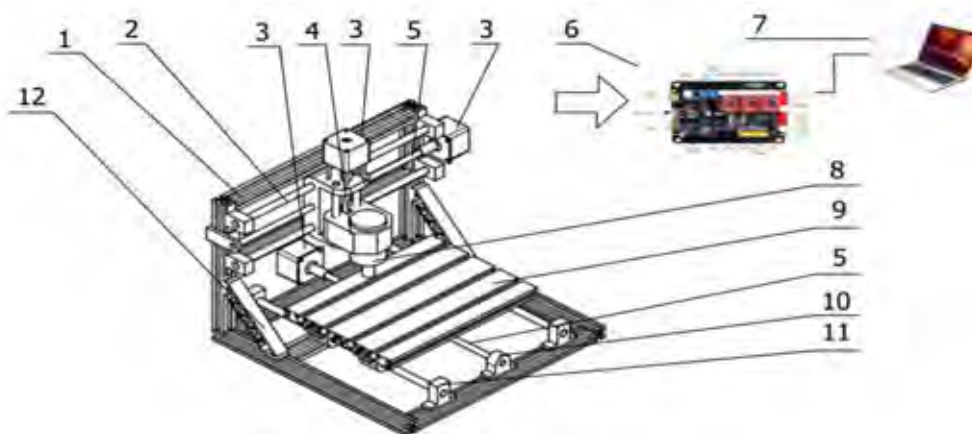
Phương pháp thực nghiệm: Chế tạo mô hình và tiến hành chạy thử chế độ hoạt động phay CNC 3 trục trên một số vật liệu gia công như nhựa mica, gỗ, mạch in PCB, nhằm đánh giá độ chính xác, độ ổn định và hoàn thiện thiết kế của máy CNC mini 3 trục.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1 Thiết kế tổng thể máy CNC mini 3 trục

Máy CNC mini 3 trục được thiết kế 3D trên phần mềm Autodesk Inventor nhằm tạo ra một thiết bị gia công có kết cấu nhỏ gọn, và phù hợp với điều kiện chế tạo trong phòng thí nghiệm (Hình 1). Xây dựng các cụm bản máy, trục chính và hệ thống truyền động được bố trí đồng trục nhằm tăng độ ổn định và giảm sai số khi gia công.

Kết quả thiết kế cho thấy máy có kích thước tổng thể $330 \times 360 \times 220$ mm (dài $\times$ rộng $\times$ cao) và vùng làm việc $150 \times 200 \times 40$ mm theo các trục X, Y và Z. Với kích thước này, máy đáp ứng yêu cầu gia công các chi tiết có quy mô nhỏ trên các vật liệu như gỗ, nhựa, mica và mạch in PCB.



Hình 1. Thiết kế tổng thể của máy phay CNC mini 3 trục

1. Khung máy; 2. Trục dẫn hướng; 3. Động cơ bước; 4. Gá kẹp động cơ trục chính; 5. Vít me; 6. Mạch điều khiển; 7. Máy tính điều khiển; 8. Động cơ chính; 9. Bàn phay; 10. Gói đồ trục vít me; 11. Gói đồ trục dẫn hướng; 12. Thanh trợ lực khung.

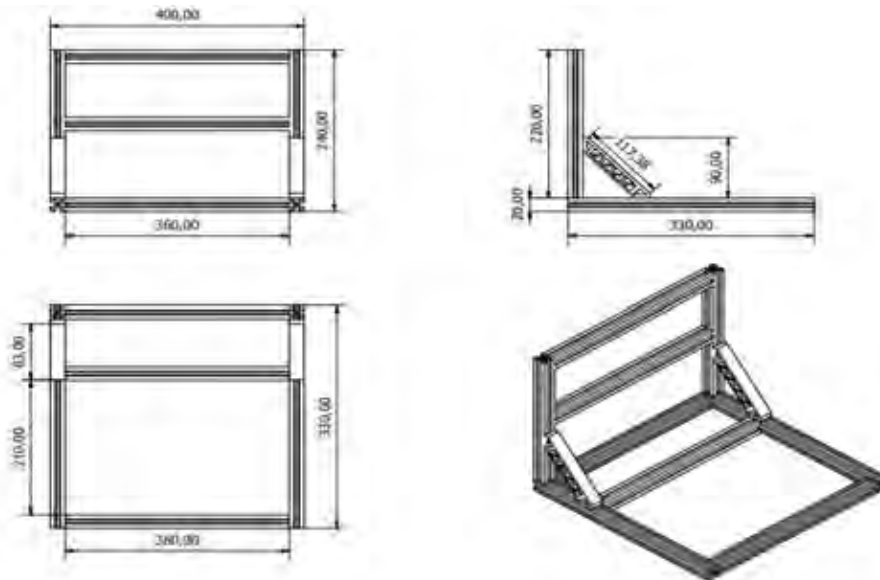
3.2. Thiết kế một số chi tiết chính của máy CNC mini 3 trục

Bộ phận chấp hành bao gồm toàn bộ khung máy, bàn máy, các động cơ và các cơ cấu chạy dao truyền động trên máy CNC mini 3 trục, nó nhận tín hiệu từ bộ driver điều khiển

tạo ra các chuyển động chạy dao đúng như bản vẽ [2, 3, 6, 7, 9].

3.2.1. Khung máy

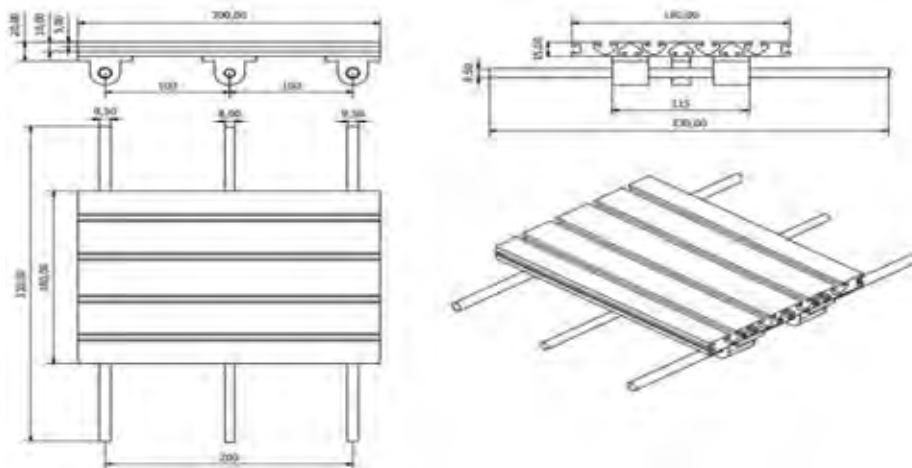
Khung máy hình thành kết cấu máy, bộ phận cơ sở để ghép nối các cơ cấu quan trọng khác (Hình 2).



Hình 2. Khung máy phay CNC mini 3 trục

3.2.2. Bàn phay

Bàn phay là nơi gá đặt, định vị phôi chuẩn bị cho quá trình gia công (Hình 3)

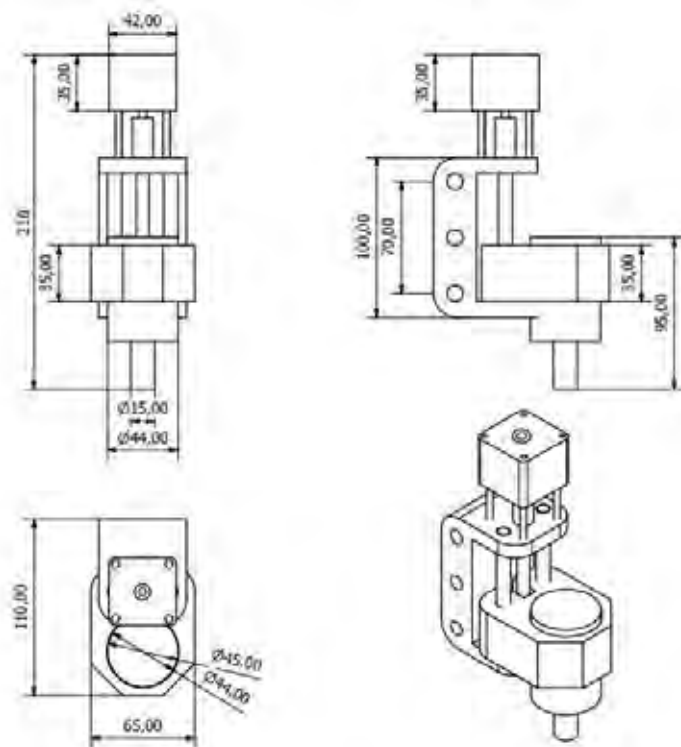


Hình 3. Bàn phay máy CNC mini 3 trục

3.2.3. Động cơ chấp hành

Trong hệ thống máy CNC mini 3 trục, động cơ chấp hành đóng một vai trò quan

trọng, đây là nguồn năng lượng thiết yếu cho sự hoạt động của máy. Gá kẹp động cơ trực tiếp của máy CNC mini 3 trục (Hình 4).



Hình 4. Gá kẹp động cơ trục chính của máy CNC mini 3 trục

3.2.4. Tính chọn động cơ trục chính

Động cơ trục chính có nhiệm vụ tạo chuyển động quay cho dao phay, là bộ phận quyết định khả năng cắt gọt và chất lượng bề mặt sản phẩm gia công. Đối với máy phay CNC mini, đối tượng gia công chủ yếu là gỗ, nhựa, mica và bo mạch in PCB nên yêu cầu động cơ có tốc độ quay cao, công suất vừa phải và kích thước nhỏ gọn.

Trong quá trình vận hành, động cơ phải làm việc ổn định dưới chế độ khởi động, dừng và thay đổi tốc độ liên tục. Vì vậy, động cơ được lựa chọn cần đáp ứng các tiêu chí: tốc độ lớn để phù hợp với dao phay đường kính nhỏ, mô-men đủ cho gia công vật liệu mềm, đồng thời có kết cấu gọn nhẹ, dễ lắp đặt và sử dụng nguồn điện 24 VDC của hệ thống CNC mini [2, 3, 6, 7, 8]. Cơ sở lựa chọn động cơ được tính toán như sau.

Công suất cắt được xác định theo công thức:

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60000}$$

Trong đó:

P_c : công suất cắt (kW)

F_c : lực cắt (N)

V_c : tốc độ cắt (m/phút)

Với vật liệu gỗ, nhựa và mica, lực cắt thường nằm trong khoảng 15–40 N. Chọn trường hợp tính toán: $F_c=30$ (N), Đường kính dao phay: $D=2$ mm; Tốc độ quay: $n=10000$ (vòng/phút).

Tốc độ cắt:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \times 2 \times 10000}{1000} = 62,8 \text{ (m/phút)}$$

Công suất cắt:

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{60000} = \frac{30 \times 62,8}{60000} = 0,0314 = 31,4 \text{ (W)}$$

Xét hiệu suất truyền động và hệ số dự trữ khoảng 2,5-3 lần:

$$P_{yc} = 3 \times 31,4 = 94,2 \text{ (W)}$$

Như vậy, động cơ có công suất 150 W đáp ứng yêu cầu gia công của máy CNC mini. Chọn động cơ DC 775 với các thông số chính (Bảng 1).

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của động cơ DC 775 150W

Loại động cơ	DC 775
Điện áp sử dụng	24VDC
Dòng tiêu thụ tối đa	6A
Công suất trung bình	150W
Tốc độ quay tối đa	10000 (vòng/phút)
Đường kính trục	5mm
Trọng lượng	400g

3.2.5. Tính chọn động cơ bước trên các trục X, Y, Z

Động cơ bước được sử dụng để dẫn động các trục X, Y và Z của máy CNC mini 3 trục thông qua cơ cấu vít me - đai ốc. Yêu cầu đối với động cơ là có mômen đủ lớn để dịch chuyển các cụm bàn máy và cụm trục chính, đồng thời đảm bảo độ chính xác định vị và khả năng điều khiển từng bước trong quá trình gia công [7, 8, 10].

Máy CNC mini 3 trục được thiết kế để gia công các vật liệu mềm như gỗ, nhựa, mica và PCB, do đó tải trọng trên các trục không lớn. Việc tính toán chọn động cơ bước dựa trên cơ sở khối lượng cụm chuyển động, bước vít me và yêu cầu về độ chính xác (Độ phân giải cần thiết của động cơ bước, Số vòng quay của động cơ bước cần thiết, mômen quán tính trục vít, mômen quán tính bàn máy và chi tiết tác dụng lên trục vít, mômen quán tính do khối lượng của tải tác dụng lên trục động cơ, mômen quán tính tổng cộng tác dụng lên trục động cơ, mômen xoắn do khối lượng của tải tác dụng lên trục động cơ, mômen xoắn do ma sát của thanh dẫn hướng tác động lên trục động cơ, mômen tổng cộng tác dụng lên trục động cơ). Động cơ bước được lựa chọn 42BYGH34H có mômen giữ 0,3 (N.m). Động cơ có góc bước $1,8^\circ$, tương ứng 200 (bước/vòng), Dòng điện định mức 1,3 (A), Kích thước $42 \times 42 \times 35$ (mm) đáp ứng tốt yêu cầu điều khiển vị trí và chuyển động ổn định của 3 trục.

3.3. Thiết kế mạch điều khiển của máy phay CNC mini 3 trục

Hệ thống điều khiển của máy phay CNC mini được thiết kế theo cấu trúc điều khiển

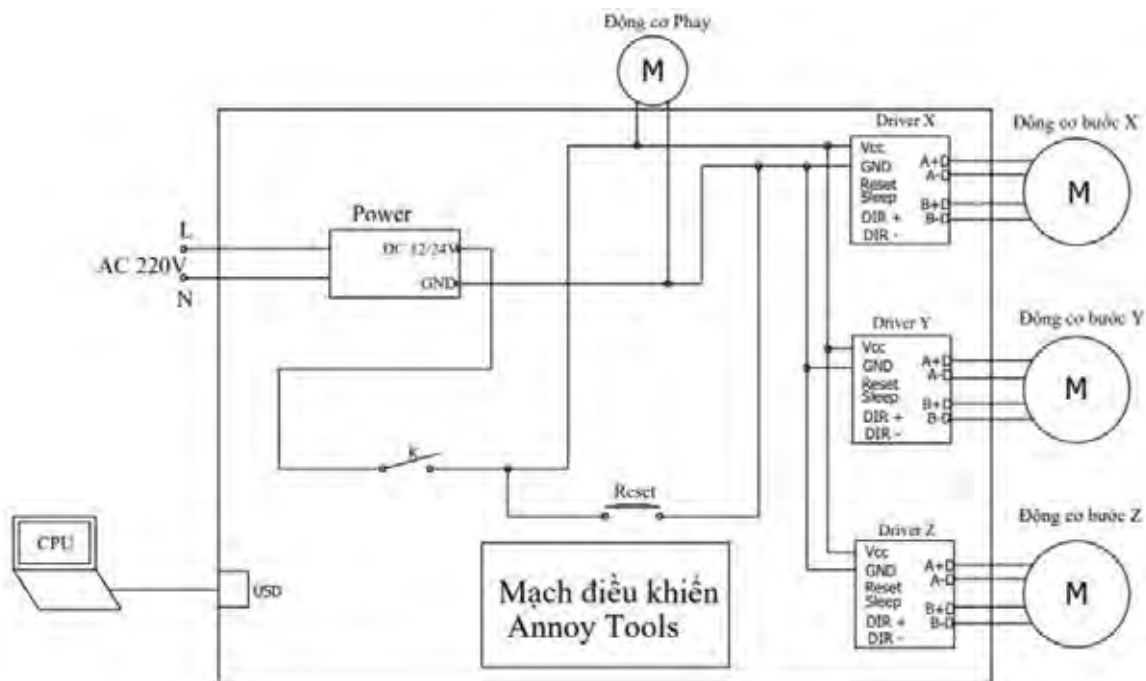
số, gồm bộ điều khiển trung tâm, mạch điều khiển động cơ bước, nguồn cấp và các thiết bị ngoại vi. Sơ đồ mạch điều khiển được trình bày ở hình 5.

Bộ điều khiển trung tâm sử dụng mạch Annoy Tools, có chức năng tiếp nhận chương trình gia công (G-code) từ máy tính thông qua cổng USB, xử lý tín hiệu và phát lệnh điều khiển đến các cơ cấu chấp hành. Mạch được lựa chọn nhờ ưu điểm kết cấu nhỏ gọn, dễ lắp đặt, dễ lập trình và tương thích với các phần mềm điều khiển CNC thông dụng.

Ba trục X, Y và Z được điều khiển bằng 03 driver A4988, mỗi driver điều khiển một động cơ bước độc lập. Driver A4988 hỗ trợ động cơ bước lưỡng cực có dòng làm việc nhỏ hơn 2 A và cho phép thiết lập chế độ vi bước (microstepping), góp phần nâng cao độ phân giải chuyển động và độ chính xác định vị của máy.

Nguồn cấp cho hệ thống là adapter 24 VDC, cung cấp điện năng cho mạch điều khiển, các driver và động cơ. Động cơ DC 775 được sử dụng làm trục chính để tạo chuyển động quay của dao phay, trong khi quạt tản nhiệt được bố trí nhằm làm mát các driver và bộ điều khiển, đảm bảo hệ thống hoạt động ổn định trong điều kiện làm việc liên tục.

Nguyên lý hoạt động của mạch như sau: chương trình gia công được truyền từ máy tính đến mạch Annoy Tools; bộ điều khiển giải mã các lệnh nội suy và tạo tín hiệu STEP và DIR gửi đến 03 driver A4988 để điều khiển đồng bộ các động cơ bước theo quỹ đạo đã lập trình. Đồng thời, động cơ DC 775 thực hiện chuyển động quay của dao phay, cho phép máy gia công chính xác trên các vật liệu như gỗ, nhựa và mica.



Hình 5. Sơ đồ mạch điện điều khiển máy phay CNC mini 3 trục

3.4. Chế tạo, lắp ráp hoàn thiện và thử nghiệm máy CNC mini 3 trục

3.4.1. Chế tạo và lắp ráp hoàn thiện máy CNC mini 3 trục

Sau khi hoàn thành thiết kế cơ khí và mạch điều khiển, các chi tiết của máy được gia công, lắp ráp và hiệu chỉnh để tạo thành máy CNC mini 3 trục hoàn chỉnh. Quá trình chế tạo được thực hiện theo trình tự: gia công các chi tiết cơ khí, lắp ráp khung máy và các cụm truyền động; lắp đặt hệ thống điện, mạch điều khiển.

Khung máy, bàn làm việc và các giá đỡ được gia công theo bản vẽ thiết kế bằng vật

liệu nhôm định hình và tấm nhôm, bảo đảm độ cứng vững và khối lượng nhẹ (Hình 6). Hệ thống truyền động của ba trục X, Y và Z được lắp ráp gồm động cơ bước (Hình 7), khớp nối, vít me và ray dẫn hướng tuyến tính. Động cơ trục chính DC 775 gắn theo trục Z được lắp đồng tâm với trục chính thông qua giá đỡ chuyên dụng nhằm giảm rung động trong quá trình gia công (Hình 8). Mạch Annoy Tools điều khiển máy CNC mini (Hình 9). Máy CNC mini 3 trục đã được lắp ráp hoàn thiện (Hình 11).



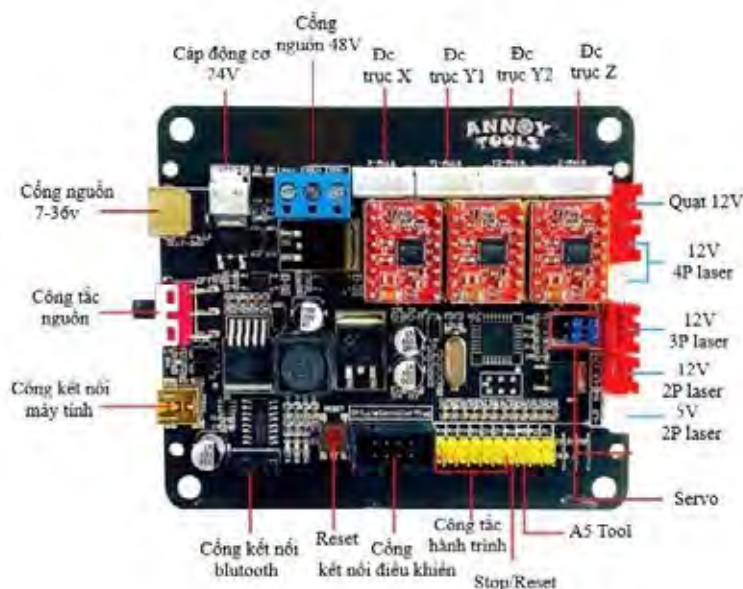
Hình 6. Khung máy



Hình 7. Động cơ bước gắn trên các trục X (trái), Y (giữa), Z (phải)



Hình 8. Động cơ trục chính (Động cơ DC 775 gắn theo trục Z)



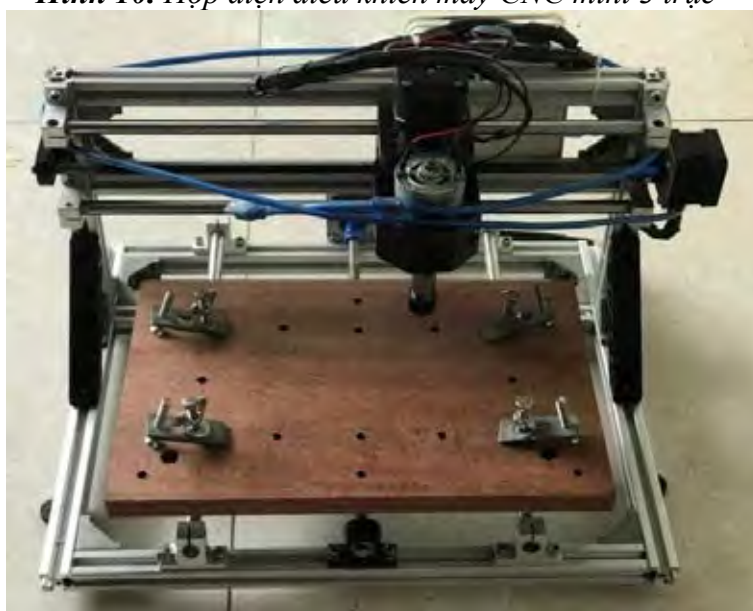
Hình 9. Mạch Annoy Tools điều khiển máy CNC mini 3 trục

Hộp điện điều khiển là bộ phận trung tâm của máy CNC mini 3 trục, có nhiệm vụ cấp nguồn, xử lý tín hiệu điều khiển và truyền xung đến các động cơ bước của các trục X, Y và Z. Việc lắp ráp được thực hiện gọn gàng

trong hộp điện, gồm: bộ nguồn chuyển mạch 24 VDC, bộ nguồn 12 VDC, bo điều khiển Annoy Tools, 03 driver A4988, công tắc nguồn, quạt tản nhiệt và các đầu nối tín hiệu (Hình 10).



Hình 10. Hộp điện điều khiển máy CNC mini 3 trục



Hình 11. Lắp ráp hoàn thiện máy CNC mini 3 trục

3.4.2. Thử nghiệm khả năng làm việc của mô hình máy phay CNC mini 3 trục

Sau khi hoàn thiện quá trình chế tạo và lắp ráp, mô hình máy phay CNC mini 3 trục được thử nghiệm nhằm đánh giá khả năng vận hành, độ ổn định và chất lượng gia công. Các thí nghiệm được thực hiện trên nhiều loại vật liệu gồm gỗ, nhựa, mica và bo mạch PCB, sử dụng phần mềm Aspire để tạo đường chạy dao và GRBL Control để điều khiển máy.

Quy trình thử nghiệm được tiến hành theo các bước sau:

1. Thiết kế chi tiết gia công và xuất bản vẽ trên phần mềm Aspire.
2. Thiết lập thông số cắt, tạo đường chạy dao và xuất tệp G-code.

3. Gá đặt phôi lên bàn máy, lắp mũi phay vào trục chính và xác định gốc tọa độ.

4. Nạp tệp G-code vào phần mềm GRBL Control.

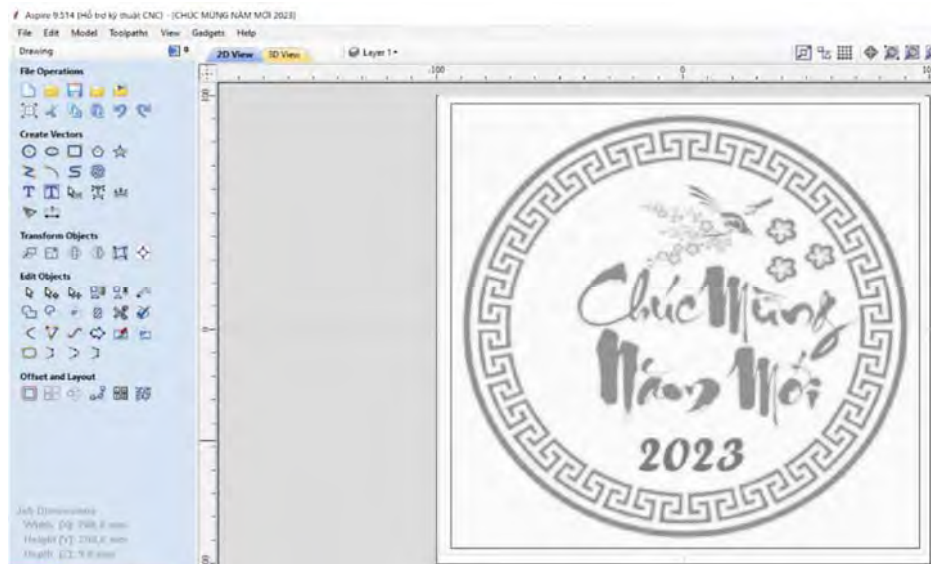
5. Thực hiện quá trình gia công tự động.
6. Kết thúc chương trình, tháo phôi và đánh giá sản phẩm.

Kết quả gia công trên các vật liệu gỗ, mica và bo mạch PCB được trình bày ở hình 13, 14, 16. Các sản phẩm thu được có biên dạng rõ nét, đường cắt liên tục, bề mặt tương đối đồng đều và sai lệch kích thước nhỏ. Trong suốt quá trình vận hành, hệ thống truyền động theo ba trục X-Y-Z hoạt động ổn định, không xuất hiện hiện tượng mất bước hoặc rung động đáng kể.

* Kết quả khảo nghiệm trên vật liệu gỗ:

Để đánh giá khả năng gia công hình ảnh của máy CNC mini, hệ thống được vận hành theo chương trình thiết kế sản phẩm trên phần mềm Aspire 9.5 (Hình 12) trên vật liệu gỗ. Quá trình khảo nghiệm nhằm kiểm tra độ chính xác nội suy quỹ đạo, sự đồng bộ chuyển động của ba trục và độ ổn định của máy trong quá trình gia công các biên dạng có nhiều chi tiết.

Kết quả cho thấy máy tái tạo hình ảnh trên gỗ với các đường nét và chi tiết khắc rõ ràng, hình dạng thực tế gần giống với mẫu thiết kế ban đầu. Tuy nhiên, thời gian gia công còn khá dài (20 phút) do số lượng đường chạy dao lớn, vì vậy cần tối ưu tốc độ và chế độ cắt để nâng cao năng suất mà vẫn đảm bảo chất lượng bề mặt.



Hình 12. Thiết kế sản phẩm trên phần mềm Aspire 9.5



Hình 13. Sản phẩm được khắc từ vật liệu gỗ

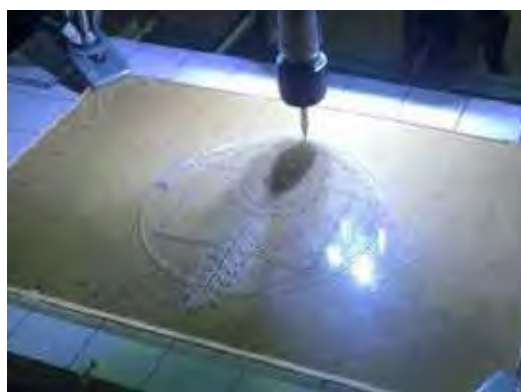
*** Kết quả khảo nghiệm trên vật liệu mica:**

Kết quả khảo nghiệm cho thấy máy CNC mini gia công trên vật liệu mica đạt chất lượng tốt, các biên dạng, chữ và đường chỉ được khắc rõ nét, đúng theo hình dạng đã thiết kế trên phần mềm. Kích thước đo thực tế của sản phẩm gần như trùng khớp với kích thước thiết kế, chứng tỏ máy có độ chính xác gia công và khả năng lặp lại ổn định. Đồng thời, độ sâu khắc giữa các ký tự và các đường chỉ đồng đều, bề mặt gia công tương đối nhất quán. Sản phẩm lôgô của Trường Đại học Nông lâm, Đại học Huế được khắc từ vật liệu

nhựa mica (Hình 14).

Tuy nhiên, sản phẩm vẫn xuất hiện một hạn chế nhỏ là các đường nét khắc còn tương đối lớn do sử dụng mũi khắc có đường kính lớn. Hạn chế này có thể được khắc phục bằng cách thay thế mũi khắc có đường kính nhỏ hơn (0,2–0,5 mm) để nâng cao độ sắc nét khi gia công các chi tiết và ký tự nhỏ.

Thời gian hoàn thành một sản phẩm khắc gồm biên dạng, chữ và đường chỉ khoảng 15 phút, đáp ứng tốt yêu cầu chế tạo mô hình, logo, bảng tên và các sản phẩm mỹ thuật trên mica.



Hình 14. Sản phẩm được khắc từ vật liệu nhựa mica

*** Kết quả khảo nghiệm trên vật liệu bo mạch PCB:**

Thực hiện cho máy chạy chương trình để

đánh giá khả năng nội suy các chỉ đường của máy CNC mini trên bo đồng (Hình 15).



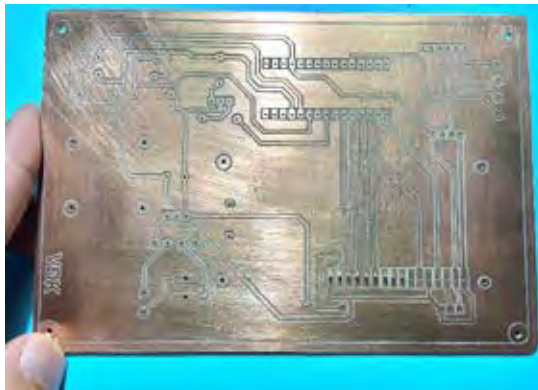
Hình 15. Đường chỉ mạch in PCB được khảo nghiệm trên máy CNC mini

Máy CNC mini được thử nghiệm khắc mạch in PCB trên bo đồng nhằm đánh giá độ chính xác của chuyển động và khả năng gia công các chi tiết nhỏ. Kết quả cho thấy máy vận hành ổn định, các đường mạch và vị trí khoan lỗ được thực hiện tương đối chính xác, đáp ứng yêu cầu chế tạo các mạch điện tử đơn

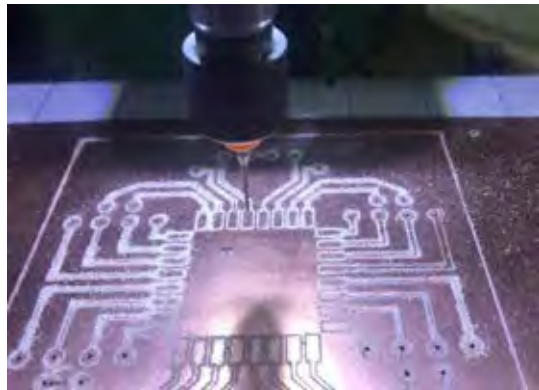
giản. Sản phẩm mạch in đồng được khắc trên bo mạch PCB (Hình 16).

Trong quá trình thử nghiệm, một số đường mạch có kích thước rất nhỏ và khoảng cách giữa các đường dẫn hẹp xuất hiện hiện tượng đứt hoặc chưa tách hoàn toàn. Nguyên nhân chủ yếu là do bề rộng đường dẫn trong bản

thiết kế quá nhỏ so với đường kính dao khắc. Vấn đề này có thể khắc phục bằng cách hiệu chỉnh trên phần mềm thiết kế PCB, tăng khoảng cách giữa các đường mạch hoặc lựa chọn dao khắc có đường kính nhỏ hơn.



Thời gian gia công hoàn thiện một mạch PCB khoảng 20 phút, bao gồm quá trình khắc các đường dẫn và khoan lỗ, cho thấy máy đáp ứng tốt yêu cầu chế tạo mô hình và phục vụ thực hành trong phòng thực hành.



Hình 16. Sản phẩm mạch in đồng được khắc trên bo mạch PCB

3.4.3. Thảo luận

Kết quả thử nghiệm cho thấy máy CNC mini hoạt động ổn định và đảm bảo được các yêu cầu đặt ra khi gia công các chi tiết kích thước nhỏ, phù hợp cho mục đích đào tạo, nghiên cứu trong lĩnh vực cơ điện tử.

Kết quả nghiên cứu đã thiết kế và chế tạo hoàn thiện máy phay CNC mini 3 trục sử dụng Arduino Uno kết hợp phần mềm GRBL. Máy có kết cấu nhỏ gọn, vận hành ổn định và được thử nghiệm gia công các sản phẩm như tranh khắc CNC, lôgô và bo mạch in (PCB) trên các vật liệu gỗ, nhựa và bo đồng PCB. Kết quả thử nghiệm cho thấy máy đáp ứng yêu cầu gia công các sản phẩm có kích thước nhỏ và có khả năng phục vụ công tác giảng dạy thực hành và nghiên cứu cho sinh viên ngành Kỹ thuật Cơ điện tử.

Tổng chi phí chế tạo sơ bộ của máy khoảng 4.500.000 đồng. Với cấu hình sử dụng Arduino Uno, bộ điều khiển GRBL và các linh kiện cơ khí, điện – điện tử phổ biến, giải pháp chế tạo có tính khả thi trong việc xây dựng thiết bị phục vụ đào tạo và nghiên cứu ở quy mô phòng thực hành.

Kết quả nghiên cứu có sự tương đồng với nghiên cứu của Nguyễn Tất Bảo [2] về thiết kế và chế tạo máy phay CNC mini. Theo nghiên cứu này, máy có khả năng gia công mạch in PCB và sử dụng cơ cấu chuyển động ba trục X, Y, Z, được điều khiển bằng Arduino Uno R3 thông qua chương trình GRBL [15]. Tương tự, máy trong nghiên cứu này cũng sử dụng cấu trúc điều khiển ba trục X, Y, Z với Arduino Uno và GRBL, đồng thời được thử nghiệm gia công chỉ trên 1 loại vật liệu là bo đồng PCB.



Hình 15. Mô hình máy CNC mini khắc bo mạch in PCB [2]

3.4.4. Hạn chế và hướng phát triển

Mặc dù máy CNC mini đã đáp ứng yêu cầu thử nghiệm đặt ra, một số vấn đề vẫn cần được tiếp tục nghiên cứu. Một số chi tiết kết cấu cơ khí có thể được thay thế hoặc gia công bằng vật liệu kim loại có độ bền và độ cứng phù hợp nhằm nâng cao độ ổn định của máy trong quá trình sử dụng lâu dài.

Bên cạnh đó, có thể nghiên cứu thay thế vít me thường bằng vít me bi nhằm giảm ma sát, cải thiện khả năng truyền động và nâng cao độ chính xác định vị của các trục. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần thực hiện đánh giá định lượng độ chính xác gia công, sai số định vị và các lần thử nghiệm của máy để có cơ sở đánh giá đầy đủ hơn về khả năng làm việc của thiết bị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Vũ Hoài Ân (2009), *Cơ sở kỹ thuật CNC tiện và phay*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật, Hà Nội.
2. Nguyễn Tất Bảo (2019), *Nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy CNC điều khiển bằng phần mềm Arduino*, Khóa luận tốt nghiệp, Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.
3. Đặng Quốc Đạt (2021), *Nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy CNC điều khiển bằng phần mềm Mach3*, Khóa luận tốt nghiệp, Khoa Cơ khí và Công nghệ, Trường Đại học Nông Lâm, Đại học Huế.
4. Nguyễn Hữu Hưởng và cs (2022), *Thiết kế chế tạo máy phay CNC mini 3 trục để gia công chi tiết máy làm bằng một số vật liệu cụ thể*, Tạp chí Công nghiệp nông thôn số 47.
5. Bùi Quý Lực (2005), *Hệ thống điều khiển số trong công nghiệp*, Nhà xuất bản Khoa học kỹ thuật, Hà Nội.
6. Đường Khánh Sơn và cs (2023), *Thiết kế chế tạo máy phay CNC 3 trục*, Tạp chí

IV. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế, chế tạo và thử nghiệm thành công máy phay CNC mini 3 trục sử dụng Arduino Uno kết hợp phần mềm GRBL. Máy có kết cấu nhỏ gọn, chi phí chế tạo hợp lý và vận hành ổn định trong quá trình thử nghiệm.

Kết quả thử nghiệm cho thấy máy có khả năng gia công trên các vật liệu như gỗ, mica và bo đồng PCB, tạo ra các sản phẩm gồm tranh khắc CNC, lôgô và mạch in PCB. Kết quả này cho thấy máy đáp ứng yêu cầu gia công các sản phẩm có kích thước nhỏ và có khả năng ứng dụng trong giảng dạy thực hành ngành Kỹ thuật Cơ điện tử.

khoa học Trường Đại học Quốc tế Hồng Bàng, Số 26-11/2023: 163-170.

7. Đường Công Truyền (2021), *Bài giảng Truyền động và điều khiển máy CNC*, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh.

8. Tính chọn động cơ trục chính, cập nhật trên website:

<https://tinhha.com.vn/tinh-toan-cac-thong-so-trong-che-do-cat-cho-qua-trinh-gia-cong-phay-va-tien-cnc/>

9. Máy CNC dùng trong công nghiệp, cập nhật ngày 17 tháng 04 năm 2015 trên website: <http://maycnc.com/may-cnc-cong-nghiep.html>

10. Diễn đàn MES LAB, *Quy tắt về hệ trục tọa độ trong máy CNC*, cập nhật ngày 22 tháng 6 năm 2017 trên website: <https://meslab.org/threads/quy-tat-ve-he-truc-toa-do-trong-may-cnc-phai-biet.54598/>.

- Ngày gửi bài: 24/08/2026
- Ngày phản biện: 16/09/2026
- Ngày duyệt đăng: 23/09/2026

CƠ GIỚI HÓA GÓP PHẦN BẢO VỆ TÀI NGUYÊN ĐẤT-NƯỚC VÀ TĂNG NĂNG SUẤT CÂY TRỒNG Ở CÁC TỈNH NAM TRUNG BỘ VÀ TÂY NGUYÊN

Phan Hiếu Hiền¹

TÓM TẮT:

Cơ giới hóa nông nghiệp không chỉ giảm lao động và tăng năng suất cây trồng, mà còn phải bảo vệ tài nguyên đất-nước. Bài tổng quan này trình bày thực trạng đất đai và nước cho nông nghiệp ở các tỉnh Nam Trung Bộ và Tây Nguyên; nổi bật là đất dốc gây xói mòn vì nước mưa chảy tràn, đất đai thoái hóa vì thiếu chất hữu cơ và dinh dưỡng. Giải pháp đưa các thiết bị cơ khí để bảo vệ đất-nước, có thể gồm ba việc: 1) san phẳng điều khiển bằng laser để dồn điền đổi thửa; 2) san phẳng điều khiển bằng laser để tạo ruộng bậc thang; và 3) bồi dưỡng chất hữu cơ cho đất. Với hai vùng nông nghiệp này, có thể gọi các giải pháp này là công nghệ cao và công nghệ mới. Các việc này đều có thể thực hiện với các thiết bị cơ khí trong tầm chế tạo hoặc sử dụng của Việt Nam, cho một nền nông nghiệp bền vững.

Từ khóa: Cơ giới hóa nông nghiệp; San phẳng laser; Ruộng bậc thang; Chất hữu cơ.

MECHANIZATION CONTRIBUTING TO SOIL AND WATER CONSERVATION AND INCREASED CROP PRODUCTIVITY IN THE SOUTH CENTRAL COAST AND CENTRAL HIGHLANDS OF VIETNAM

ABSTRACT:

Agricultural mechanization not only helps reducing manual work and increasing crop yield, should also conserve soil-and-water resources. This review paper shows the present status of soil and water use for agriculture in the Southern Central Coast and Central Highlands of Vietnam; the salient feature is the soil erosion due to rainwater runoff, and soil degradation due to lack of organic matter and nutrients. The proposed measure is to use machinery to conserve soil and water, with three activities: 1) Laser-controlled land leveling to group small fields into larger size; 2) Terrace construction by laser-controlled equipment; 3) Soil amendment with organic fertilizers. These measures for the two mentioned regions may be termed as application of high and new technologies, and with machinery within the fabrication and utilization capacities in Vietnam. for a sustainable agriculture.

Keywords: Agricultural mechanization; Laser-controlled land leveling; Terrace; Soil organic matter.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

1.1 Dẫn nhập: Tài nguyên đất-nước với cây trồng

Cơ giới hóa nông nghiệp không chỉ thay thế công lao động cực nhọc ngoài đồng, giảm chi phí và tăng năng suất cây trồng, mà còn phải bảo vệ tài nguyên đất-nước, sử dụng hiệu quả nhất 2 tài nguyên quý giá; đó là hàng triệu hecta ĐẤT và NƯỚC MƯA cho sông ngòi và trồng trọt, cho hàng triệu nông dân ít vốn. Khai thác phải đồng thời bảo vệ các tài nguyên này, để nông nghiệp được bền vững. Năng suất không thể giữ mãi ở mức cao, nếu đất đai ngày càng thoái hóa, nước tưới ngày càng thiếu. Bảo vệ đất-nước khó có thể bằng lao động thủ công (chưa đủ cho canh tác) mà phải sử dụng thiết bị cơ khí.

Bài tổng quan này trình bày thực trạng đất đai và nước cho nông nghiệp ở vùng Nam

Trung Bộ và Tây Nguyên, định hướng và giải pháp đưa các thiết bị cơ khí (bao gồm các thiết bị công nghệ cao) để bảo vệ đất-nước, nhằm giữ được một nền nông nghiệp bền vững. Nội dung –ngoài phần nhỏ cho đất trồng lúa-- nhằm đến đất cho cây trồng cạn và cây công nghiệp trên đất cao, là tiềm năng của vùng Nam Trung Bộ và Tây Nguyên.

Ghi chú: Cây trồng trên đất cao, không ngập nước thường xuyên, có thể tạm chia theo 2 thể loại: 1) Cây trồng cạn ngắn ngày (upland crops) bao gồm các cây lương thực và thực phẩm (ngô, khoai, sắn, lúa rẫy, đậu tương, lạc, đậu xanh v.v), cây bông vải. 2) Các cây lâu năm khác như cà phê, chè, cao su, cây ăn quả, v.v ... còn gọi với tên cây công nghiệp, industrial crop, cash crop ... với phương thức canh tác và thu hoạch có khác cây ngắn ngày. Riêng cây mía, tuy thu hoạch

¹ Giảng viên (đã nghỉ hưu) Đại học Nông Lâm TP Hồ Chí Minh.

* Email: phhien1948@yahoo.com

qua nhiều năm, nhưng canh tác giống với cây lương thực hơn là cây ăn quả. Thực sự công dụng có thể đan xen, ví dụ đậu lạc để rang ăn hoặc ép dầu trong nhà máy; mía có thể chế biến thành đường phèn hoặc thành ethanol cho công nghiệp...

1.2 Thực trạng sử dụng đất-nước ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên

1.2.1. Thực trạng đất nông nghiệp miền Trung và Tây Nguyên và vấn đề độ dốc

Bảng 1: Phân chia đất theo độ dốc:

	Diện tích, ha	Tỷ lệ %	Đất bằng %	Đốc < 3° %	Đốc < 15° %	Đốc > 15° %
Nam Trung Bộ,	6 587 000	100	11,8	8,7	27,5	52,1
Tây Nguyên,	9 237 000	100	2,6	18,2	25,8	53,4
ĐB Sông CửuLong	3 834 000	100	98,7	0,1	0,2	1,0

Đất dành cho sản xuất cây trồng cạn (ngăn ngày hoặc lâu năm) chỉ chiếm $\approx 12\%$ ở Nam Trung Bộ và $\approx 3\%$ ở Tây Nguyên (Bảng 1). Phần đất dốc dưới 3° (hoặc $5\%^{**}$) cần cải tạo chống xói mòn mới trồng trọt tốt. Nếu tính cả đất dốc $< 15^\circ$ thì cũng chỉ được 47- 48%. Khác với Đồng bằng sông Cửu Long gần 99% là đất bằng phẳng.

Theo phân loại qui hoạch xét về độ dốc :

* Độ dốc từ 3° đến 15° ($5\%-27\%$), là địa hình đồi thấp, như ở Tây Nguyên hoặc Đông Nam Bộ, thường trồng cây công nghiệp dài ngày như cao su, chè, cà phê, tiêu, điều, cây ăn quả, v.v, hoặc cây công nghiệp ngắn ngày như khóm, mía, bông vải v.v. [1].

* Độ dốc dưới 3° (5%) là địa hình bằng phẳng, thích hợp cho trồng lúa và rau màu.

Có thể không đồng thuận về vấn đề phân loại đất “bằng phẳng” này, giả sử xét vùng đất dốc 1° ($0,6^\circ$):

Trước đây, diện tích đất ở các tỉnh Nam Trung Bộ (từ Đà Nẵng đến Bình Thuận) là 6,6 triệu hecta (Mha) và Tây Nguyên (5 Tỉnh) là 9,2 Mha, lớn hơn nhiều so với 3,8 Mha ở Đồng bằng sông Cửu Long [1]. Sau sắp xếp, Nam Trung Bộ và Tây Nguyên sáp nhập lại thành 6 tỉnh [2]. Về địa hình đất đai (độ dốc, sa cẩu v.v.) Nam Trung Bộ và Tây Nguyên khác nhau, nên trong bài này vẫn phân biệt hai vùng nông nghiệp này.

- Trồng lúa cần đất rất bằng phẳng, lý tưởng 0% dốc, giới hạn $0,08\%$ dốc, nghĩa là thửa ruộng dài 100 m chỉ được phép chênh lệch 0,08 m (8 cm), để giữ nước cho cây lúa. Vì để không chế cỏ dại, nếu chênh lệch giữa điểm cao nhất và thấp nhất (*Max-Min*) vượt quá 15 cm/100 m (dốc $0,15\%$) cần bơm nước gấp đôi so với thửa ruộng bằng phẳng (*Max-Min*) chênh 5 cm/100 m (dốc $0,05\%$) [3]). Dốc 1% nghĩa là phải đắp bờ, chiều dài chỉ còn 5- 10 m thành các mảnh ruộng “manh mún”.

- Trồng rau màu, nếu độ dốc thửa ruộng vượt quá $0,5\%$, đất với cây trồng cạn sẽ bị xói mòn, đặc biệt với mưa nhiệt đới [4].

Cần thấy sự khác biệt về ảnh hưởng của độ dốc giữa một vùng bằng phẳng như Đồng bằng sông Cửu Long, và vùng đất dốc như Nam Trung Bộ hoặc Tây Nguyên , minh họa bằng các vòng lặp sau.

^{**} Độ dốc tính bằng %, công thức:

$$\text{Đốc, \%} = (H / L) * 100$$

với: L = chiều dài đo giữa hai điểm tính theo đường ngang,

H = chênh lệch độ cao.

Độ dốc tính bằng Góc dốc Alpha°, công thức:

$$\alpha, \text{ độ} = \arctan(H / L)$$

Ví dụ chuyển đổi: Dốc 3° (độ) = 5% .

Độ dốc% liên hệ trực quan với đo đạc. Góc dốc để hình dung về hình học.

* Đồng bằng sông Cửu Long:



Hình 1. Vòng lặp ảnh hưởng của độ dốc ở Đồng bằng sông Cửu Long

* Nam Trung Bộ hoặc Tây Nguyên : "vòng luẩn quẩn" với cây trồng cạn:



Hình 2. Vòng lặp ảnh hưởng của xói mòn đất đai ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên

Ví dụ cây bắp (ngô) ở Tây Nguyên: các khâu gieo, chăm sóc đều thủ công; khâu thu hoạch chỉ mới bằng máy khoảng 8 năm gần đây, và cũng chỉ trên một phần diện tích. Chi phí canh tác cao, đất đai bị xói mòn mất dưỡng chất, năng suất không cao như thế giới, nên không cạnh tranh được với bắp ngoại nhập. Có lẽ vì thế mà diện tích của vùng trọng điểm bắp khoảng 250 000 ha năm 2014 đã giảm xuống 166 000 ha vào năm 2024 [5].

Với đất dốc 3-15° nếu trồng cây công nghiệp như kiểu ở đất bằng, thì xói mòn đất là nghiêm trọng. Một nghiên cứu ở 3 tỉnh (cũ) Thừa Thiên-Huế, Quảng Trị, và Quảng Nam [6]: Ruộng lớn cỡ 0,5– 2 ha thường sử

dụng để trồng hoa màu, độ dốc lớn gây xói mòn đất mạnh, dẫn đến đất nhanh bị thoái hoá. Hạng đất < 3° này chiếm ≈9% ở Nam Trung Bộ, và ≈18% ở Tây Nguyên, (Bảng 1).

Cũng nghiên cứu này, với cây lúa, đất thường có độ dốc khá lớn; trồng lúa phải tiến hành ngăn bờ thành các thửa ruộng manh mún (dưới 1000 m²) để đạt độ dốc 0,1-0,2%. Thực sự, đất trồng lúa ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên gộp chung (≈653 000 ha) so với ĐBSCL chỉ bằng 17% về diện tích, và 20% về sản lượng [5]. Lý do không có nhiều đất lúa, cũng vì độ dốc, ruộng manh mún, chi phí sản xuất (VND/kg lúa) canh tác thủ công hay cơ giới đều cao, nên không đủ vốn đầu tư cho

cơ giới hóa. Viết lại "vòng luẩn quẩn" với cây lúa ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên:

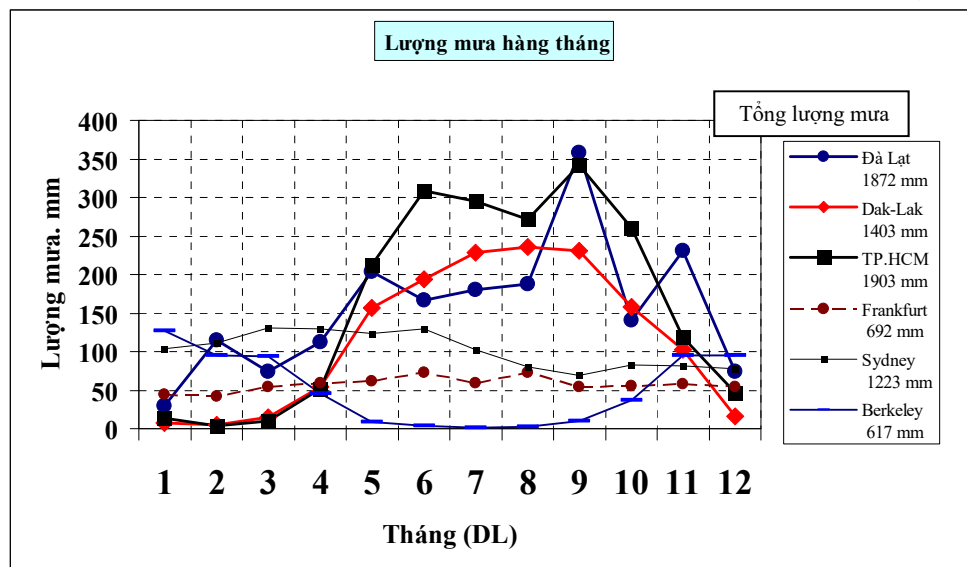


Hình 3. Vòng lặp ảnh hưởng của độ dốc ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên

Tóm lại, công nghệ cơ khí để cơ giới hóa nông nghiệp ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên phải ưu tiên giải quyết vấn đề độ dốc đất đai của hai vùng này.

1.2.2. Thực trạng sử dụng nước tưới cho nông nghiệp Nam Trung Bộ và Tây Nguyên

Lượng mưa và phân bố mưa là điểm khác biệt cơ bản của vùng nhiệt đới so với ôn đới. Hình 4 minh họa sự khác biệt này.



Hình 4: So sánh lượng mưa và phân bố mưa ở Đà Lạt, Dak-Lak, TP Hồ Chí Minh và một số thành phố Âu Mỹ. [7]

Mưa ở Việt Nam nói chung và Nam Trung Bộ /Tây Nguyên nói riêng rất cao. So sánh lượng mưa mỗi năm: Berkely (Mỹ) 620 mm; Frankfurt (Đức) 690 mm; Sydney (Úc) 1220 mm và Đà Lạt /Đak-Lak khoảng 1400-

1800 mm/năm; tính ra 1 ha nhận hơn 14 000 m³ nước mỗi năm.

Tính với vài triệu hecta đất của Nam Trung Bộ và Tây Nguyên, một lượng nước khổng lồ đã được “trời cho”, gấp hàng chục lần các hồ chứa của các thủy điện miền Trung. Tính lý thuyết, lượng mưa này đủ nước cho 2 vụ trồng lúa và màu với tổng thời gian sinh trưởng 200 ngày. Vấn đề không đơn giản, vì nước mưa: chảy tràn ra sông suối; thấm vào lòng đất, để rồi, một phần được giữ trong đất, một phần thấm xuống tầng nước ngầm, một phần cũng chảy ngầm ra sông suối, một phần bốc hơi trở lại vào không khí. Chỉ có phần giữ trong đất được sử dụng trực tiếp cho cây trồng. Sử dụng nước ngầm hay sông suối đều phải bơm hoặc đắp đập, tốn năng lượng.

Không những khác về lượng mưa, mà còn khác về cường độ. Mưa ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên tập trung khoảng 6 tháng “mưa như trút nước” đến 200 mm/trận mưa không phải là bất thường, nên nước chảy tràn làm thất thoát nước, mà còn cuốn theo đất đai và dưỡng chất cần cho cây trồng. Ngược lại, mưa ở các xứ ôn đới phân bố đều trong năm, mỗi ngày 2- 5mm (Hình 4).

Vậy, vấn đề là làm sao giữ được nước mưa ở lại tối đa trong lớp đất để rễ cây tiếp cận

II. ĐỊNH HƯỚNG: CÔNG NGHỆ VÀ THIẾT BỊ BẢO VỆ ĐẤT-NƯỚC Ở QUI MÔ LỚN

Phân phân tích trên cho thấy hướng đi của công nghệ và thiết bị cơ giới hóa cho Nam Trung Bộ và Tây Nguyên. Cần chú trọng cơ giới hóa với *công nghệ và thiết bị bảo vệ đất-nước ở qui mô lớn*. Định hướng này đòi hỏi nhiều nghiên cứu phát triển cho phù hợp với điều kiện cây trồng, khí hậu và đất đai ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên (Các tỉnh ở Bắc Trung Bộ như Huế, Quảng Trị cũng có những điều kiện tương tự). Yêu cầu chung là cải thiện và bảo vệ đất-nước, với công suất làm việc cao hơn nhiều so với lao động thủ công, đầu tư và chi phí hoạt động chấp nhận được. Năng suất cây trồng cũng phải tăng so với

được trực tiếp. Đó là tiết kiệm nước ở cấp vĩ mô, trong tình hình biến đổi khí hậu, nguồn nước cho trồng trọt ngày càng giảm. Lâu nay, chúng ta cũng có tiết kiệm nước bằng các “công nghệ cao” như tưới phun, tưới nhỏ giọt v.v; lợi điểm rất rõ, ví dụ tưới nhỏ giọt cần 5 mm so với 8 mm tưới tràn [8] thì hai vụ có thể tiết kiệm 200 mm nước. Tiếc rằng qui mô diện tích dùng các công nghệ này còn nhỏ, giả sử đạt vài ngàn hecta cũng chưa đến 1% tổng diện tích đất nông nghiệp của Nam Trung Bộ và Tây Nguyên.

Vì vậy, biện pháp nào tiết kiệm nước trời mưa đạt qui mô lớn gấp trăm lần các công nghệ cao như tưới phun /tưới nhỏ giọt đều đáng gọi là “công nghệ cao”.

Cần cơ giới hóa để bảo vệ tài nguyên **đất-nước**, bảo vệ môi trường cho một nền nông nghiệp bền vững: Hầu như chưa có nghiên cứu nào để bảo vệ đất trên qui mô lớn; cũng có nhiều nghiên cứu chống xói mòn đất nhưng thường chỉ trên vài ngàn m², chưa nhân rộng được lên hàng trăm ngàn hecta của vùng Đông Nam Bộ và Tây Nguyên; và đất đai ngày càng bạc màu và cạn kiệt nguồn nước.

canh tác thông thường. Để đạt chi phí thấp, có thể tham khảo mô hình “chủ máy làm dịch vụ” phổ biến với cơ giới hóa lúa ở Đồng bằng Sông Cửu Long [9]. Tham khảo thêm ở Mỹ 70 năm trước. Chưa có IT, eCloud v.v, mà nông nghiệp họ giàu hơn rất nhiều, vì họ làm cơ giới hóa và bảo vệ đất đai và tiết kiệm nước [10].

III. CÁC GIẢI PHÁP VÀ THIẾT BỊ

Đề nghị 03 giải pháp với công nghệ và thiết bị tương ứng: 1) San phẳng điều khiển bằng laser để dôn điền đôi thửa. 2) San phẳng điều khiển bằng laser để tạo ruộng bậc thang; và 3) Bồi dưỡng chất hữu cơ cho đất. Các giải pháp này đều trong khả năng chế tạo hoặc ứng dụng tại địa phương:

3.1 San phẳng điều khiển bằng laser để dồn điền đổi thửa

Thửa ruộng càng lớn càng thuận tiện cho máy móc hoạt động. Qui mô sản xuất nông sản hàng hóa càng nhỏ, chi phí sản xuất (mỗi kg lúa, bắp, v.v.) càng cao. So sánh chi phí sản xuất giữa miền Trung và Đồng bằng Sông Cửu Long theo kích thước thửa ruộng, có thể thấy được quan hệ giữa hai yếu tố này [9]).

Để tạo thửa ruộng lớn hơn, thuận lợi là có thiết bị san laser, cấu tạo và nguyên lý hoạt động như Hình 5: Tia laser từ bộ phát tín hiệu laser tạo thành một mặt chuẩn laser cố định song song với mặt phẳng nằm ngang [3]. Bộ nhận nhận tín hiệu laser lắp cố định trên gầu san, và có gắn các cảm biến xác định vị trí tương đối của mặt phẳng laser do bộ phát tạo

ra so với vách chuẩn của bộ nhận. Hệ thống thủy lực nối với của máy kéo điều khiển tự động nâng hạ gầu san, để tạo mặt ruộng bằng phẳng [11).

Với lúa nước, san phẳng để tạo ra một thửa ruộng bằng phẳng với diện tích như mong muốn, đa số trường hợp là hợp nhất nhiều mảnh ruộng nhỏ lại, và kiểm soát được mức nước cho cây lúa phát triển, tạo tiền đề ứng dụng cơ giới hóa tiếp theo. San laser được áp dụng phổ biến ở Mỹ, Úc v.v. từ thập kỷ 1980. Ở Việt Nam san laser đã được Viện Lúa IRRI chuyên giao; ở Đồng bằng Sông Cửu Long từ 2004 đến 2025 đã san được khoảng 5000 ha đất lúa [12], thấp hơn Ấn Độ trong cùng thời gian đã san hơn 1 triệu hecta.



Hình 5: Liên hợp máy san phẳng laser và máy kéo 55 HP [13]

Việc dồn điền ở Nam Trung Bộ, và Tây Nguyên đã được thực hiện thành công tại hai nơi:

Năm 2008, tại Huyện Lâm Hà (cũ), Lâm Đồng, Công ty Giống Cây Trồng Miền Nam đã san laser trên diện tích 29 ha gồm hơn 330 mảnh nhỏ và độ cao khác nhau, gộp thành 40 thửa ruộng mỗi thửa 0,5- 1 ha (Hình 6). Đánh

giá hiệu quả qua sản xuất hạt giống lúa xác nhận sau khi san laser: Tăng năng suất lúa giống từ 3,0 tấn/ha lên 4,7 tấn/ha; giảm chi phí thủy lợi; giảm chi phí sử dụng máy gặt đập liên hợp; giảm công lao động (làm cỏ, nước). Tổng cộng giảm chi phí và tăng năng suất là 14,5 triệu đồng /ha [14].



Hình 6: Ruộng lúa lai tại Lâm Hà, sau khi san phẳng)

Năm 2012, tại huyện Easup (cũ) Đak-Lak, một trang trại tư nhân đã san laser, kết hợp máy ủi trước đó (do độ dốc lớn) đã san 20 ha, phá bỏ gộp những mảnh ruộng nhỏ 0,1- 0,2 ha có độ chênh lệch 10 cm- 20 cm, thành các thửa lớn 0,5- 1,0 ha (Hình 7a và 7b), độ chênh lệch chỉ còn 2 cm- 4 cm [15]. Nhờ vậy, áp dụng được máy sạ khô (Hình 7c) tiết kiệm nhân công sạ, và kịp thời vụ do nhiều diện tích cần sạ. Năng suất thu hoạch được 5,4 tấn/ha, so với năng suất trung bình 5,0 tấn/ha của nông dân địa phương. Tổng tiết kiệm vật tư so với ruộng của nông dân địa phương khoảng 1,1 triệu đ/ha. Tổng tăng lợi nhuận (do tăng năng suất và tiết kiệm vật tư) là 3,2 triệu đồng/ha. Ước lượng nếu nông dân địa

phương đầu tư ≈ 8 triệu /ha để san laser, thì sẽ được hoàn vốn sau 3 mùa vụ.

Với đất lúa, từ 2 mô hình ở Lâm Đồng và Đak-Lak, có thể thấy 2 lợi ích khác của san laser:

a) Tăng diện tích đất hữu hiệu thêm khoảng 5- 7% (nhờ phá bỏ ruộng), tức là tăng sản lượng lúa 5- 7% (vẫn giữ các biện pháp nông học như cũ).

b) Thuận tiện cho cơ giới hóa do giảm được 10- 15% thời gian quay vòng với thửa ruộng lớn hơn; vận hành máy hiệu quả hơn.

Ghi chú: Gần đây, máy cấy lúa càng được áp dụng nhiều; thửa ruộng bằng phẳng là điều kiện cần để cấy máy.



a: San laser ở DakLak, 2012. Photo: T.V. Khanh



b: Các thửa ruộng tuy chênh lệch độ cao, nhưng đủ lớn (0,5-1 ha) cho cơ giới hóa.



c: Thiết bị sạ khô ứng dụng trên đồng ruộng đã san phẳng laser [15]

Hình 7. Ứng dụng san phẳng laser trong nông nghiệp

Các thuận lợi trên tế cũng ứng với các ưu điểm về môi trường; số liệu ở Đồng bằng sông Cửu Long đã giảm vật tư đầu vào (nước, phân, thuốc v.v) đồng nghĩa với giảm khí nhà kính, mức giảm là 0,25 tấn CO₂/ha/vụ [15].

Nhưng, các thuận lợi về kỹ thuật, kinh tế, và môi trường cũng song hành với các khó khăn về mặt xã hội. Thứ nhất là suy nghĩ "tư hữu" của nông dân. Trên giấy tờ là "quyền sử dụng đất" nhưng thực tế nông dân nào cũng nghĩ đến "sở hữu" trên mảnh ruộng mình đã làm lâu nay, theo ý ông ta thì nhiều hơn mảnh bên cạnh của người khác. Không chịu dồn điền đổi thửa vì chưa thấy lợi ích gì, chỉ thấy nguy cơ bị thua thiệt. Thứ hai là ý chí của nhà quản lý. Có chủ trương ở cấp cao, nhưng chưa nhiều động thái cụ thể ở cấp dưới. Để xây dựng nông thôn thường chú ý đến thủy lợi, "điện đường trường trạm", ít nơi có biện pháp

để thửa ruộng lớn hơn. Mỗi địa phương đều có bản đồ sử dụng đất của mỗi hộ, nhưng nếu hỏi thêm có bao nhiêu hộ canh tác "da beo" và khoảng đường trung bình giữa các thửa ruộng không liền kề này, khó có câu trả lời được ngay...

Vấn đề xã hội khá phức tạp, cần có chính sách phù hợp để giải quyết. Cần đặt mục tiêu cho canh tác lúa ở Nam Trung Bộ và Tây Nguyên là: thửa ruộng phải tối thiểu cỡ 0,5 ha và mỗi hộ canh tác trên các thửa liền kề nhau; từ đó có các chính sách phù hợp.

3.2 San phẳng ruộng điều khiển bằng laser để tạo ruộng bậc thang

Với cây trồng cạn (đậu, bắp v.v) trên đất có độ dốc không lớn, cỡ 1-2%, san laser tạo mặt ruộng có độ dốc 0,3% để có thể tiêu thoát nước từ từ, nhưng cũng không được quá 0,5% vì xói mòn đất xảy ra do nước chảy tràn

mạnh. Thiết bị san với dốc nghiêng theo hai hướng hiện có sẵn trên thị trường.

Nhưng với đất có độ dốc lớn hơn, cỡ 3-10%, không thể san như trên vì khối lượng đất đào-đắp quá lớn. Phải tạo thành những ruộng bậc thang đồng mức (contour terraces). Ruộng bậc thang đã có cả ngàn năm ở Tây Bắc bộ là những dải đồng mức rộng 1- 2 m chỉ hợp với canh tác thủ công; nhưng khó cơ giới hóa trên các bậc thang quá hẹp này. Ý tưởng thực hiện của ông cha ta đời trước cần được nâng tầm lên với thiết bị cơ giới, san

Làm dải đồng mức như trên cũng là cách tốt nhất để giữ đất, chính xác là giữ độ phì nhiêu đất đai. Một tài liệu ở Nebraska của Mỹ [16] cho thấy khả năng giảm đến 80% lượng thất thoát đất trôi, nhờ kỹ thuật canh tác theo dải đồng mức bậc thang.

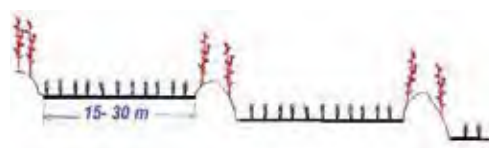


Hình 9: Cơ giới hóa trên ruộng bậc thang [17]

Năm 2013, kỹ thuật làm bậc thang đồng mức để cơ giới hóa như trên đã được công ty Trimble (Mỹ) thực hiện với hệ thống lái tự động AutoSteer, thông tin và điều khiển qua GIS. Công ty đã thực hiện thí điểm 8 hecta ở Indonesia [19]. Sau khi khảo sát địa hình và vẽ đường đồng mức yêu cầu, máy kéo sẽ tự động lái theo chương trình; tài xế chỉ ngồi theo dõi màn hình trên máy kéo (Hình 10). Đây là *công nghệ cao*, ứng dụng hệ thống thông tin địa lý GIS và lái tự động [18]. Từ 2025, hệ thống tự động điều khiển này đã được công ty mía đường TTC áp dụng ở Tây Ninh (Thông tin từ TS Trần Tấn Việt, Cty TTC).

Giữ nước được, mùa mưa 7 tháng sẽ có nước cho 8- 9 tháng, mùa khô 5 tháng chỉ

phẳng laser. Các dải ruộng bậc thang “cơ giới hóa” có bề rộng 15- 30 m, để giảm bớt khối lượng đất đào đắp; và cũng thuận lợi cho việc vận hành máy, máy kéo có thể chạy hàng trăm mét, tăng hiệu suất sử dụng máy (Hình 8 và 9). Độ dốc mỗi bậc thang khoảng 0,3%,. Kỹ thuật sử dụng laser để san phẳng không vượt tầm tay chúng ta. Đầu tư kiến thiết mỗi hecta ước lượng 25- 50 triệu đồng, cũng không quá lớn so với ích lợi lâu dài và bền vững cho nông nghiệp.



Hình 8: Sơ đồ dải đồng mức bậc thang cho cơ giới hóa



Hình 10: Hệ thống "AutoSteer" của Trimble để tạo ruộng bậc thang [18]

thiếu nước 3- 4 tháng, vậy mỗi năm cũng có thể làm được hai vụ cây ngắn ngày.

3.3 Giải pháp: Bồi dưỡng chất hữu cơ cho đất

Chất hữu cơ trong đất đã được xác lập có 4 vai trò: Cải thiện kết cấu đất tạo thông thoáng cho bộ rễ cây; giữ được các khoáng chất, bớt thất thoát phân hóa học, và giữ thêm nước, chống khô hạn; tạo môi trường sống cho vi sinh vật có ích trong đất, góp phần tăng năng suất cây trồng; thêm dưỡng chất cho cây trồng.

Đất đai Việt Nam, trồng lúa hay trồng màu, theo nhiều nghiên cứu đã công bố, đa số thiếu chất hữu cơ, thậm chí ở mức nghiêm trọng. Nguyên nhân do nông dân quá tin cậy vào phân hóa học. Còn hữu cơ thì “có ra mà không có vào”. Lúa ở Đồng bằng sông Cửu

Long, do bị đập ngăn ở thượng nguồn, và do đê bao ở địa phương, nên phù sa mang hữu cơ ngày càng giảm đi. Bắp, đậu, mía v.v ở miền Đông Nam bộ và Tây Nguyên trồng ở đất “hơi dốc” bị xói mòn nên cũng dần mất chất hữu cơ.

Để bồi dưỡng hữu cơ cho đất đai trên diện rộng, khó có thể theo hướng “hữu cơ cao cấp” như trồng rau hoa ở đô thị (mỗi kg phân hữu cơ giá 4000- 10000 đ, bằng giá lúa!). Số lượng phải cỡ hàng chục tấn mỗi hecta, nên chi phí phải tối thiểu. Đáp ứng yêu cầu này, nguồn nguyên liệu làm phân hữu cơ phải rẻ và ít tốn chi phí vận chuyển, nghĩa là phải có sẵn trên đồng ruộng. Vậy chỉ có hai nguồn:

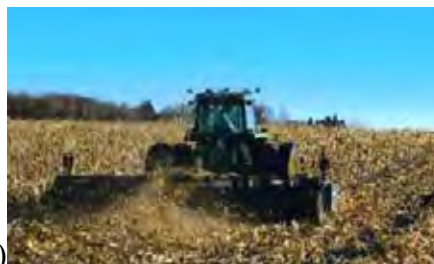
- a) Dư thừa cây trồng sau khi thu hoạch;
- b) Cỏ dại trên đồng. Dùng nguồn nào thì cũng phải băm nát để chúng mau phân hủy.

Thị trường các máy băm này có sẵn trên thế giới (Hình 11); để rút ngắn thời gian nghiên cứu, chúng ta có thể nhập mẫu [20] và thu nhỏ lại cho phù hợp với cỡ máy kéo tại địa phương; công nghệ chế tạo các máy băm này cũng không quá tầm ngành cơ khí trong nước.

Có thể băm cây trước khi làm đất hoặc trồng; hoặc có thể băm giữa các hàng cây khi cỏ đã mọc cao (Hình 12). Đã áp dụng cho 200 ha của một nông trại trồng chuối và ca cao ở Huyện Easup, Đak-Lak. Vùng này rất nghèo hữu cơ, (rừng cây lơ thơ gọi là “rừng khớp”). Nông trại đã “nuôi” cỏ Mỹ (*Pennisetum setaceum*) và dùng máy thu hoạch và băm cỏ rải giữa hàng cây ăn trái, như thế có được hàng chục tấn chất hữu cơ mỗi ha (Thông tin cá nhân từ TS Phạm Hồng Đức Phước).



(a)



(b)

Hình 11: Các máy băm dư thừa thực vật, (a): Kuhn [21]; (b) Loftness (Mỹ) [22]



Hình 12: Máy cắt-băm "cỏ Mỹ" tại một nông trại trồng chuối và ca cao ở Easup, Đak-Lak (made in VietNam) Photo: Phạm H.D. Phước

Một số nghiên cứu ứng dụng về bồi dưỡng hữu cơ cho đất đã được triển khai thành công, như: xử lý rơm lúa thành phân bón ở Đồng bằng Sông Cửu Long [23], sử dụng biochar trong canh tác lúa ở Thừa Thiên- Huế [24]. Cần phát triển các ứng dụng này cho Nam Trung Bộ và Tây Nguyên.

IV. KẾT LUẬN

Đã trình bày thực trạng đất và nước cho nông nghiệp ở vùng Nam Trung Bộ và Tây Nguyên, mà mức độ xói mòn đất-nước khá trầm trọng do đất dốc và mưa lớn. Trong lúc vẫn tiếp tục phát triển các công nghệ thông

minh có hiệu quả hiện nay, cần thêm định hướng và giải pháp đưa các thiết bị cơ khí (bao gồm các thiết bị công nghệ cao) để bảo vệ đất-nước, cho nông nghiệp bền vững. Đã đề nghị 03 giải pháp cơ bản, với các thiết bị tương ứng: san phẳng để dồn điền đổi thửa; san phẳng tạo ruộng bậc thang thuận lợi cho cơ giới hóa; bồi dưỡng hữu cơ cho đất; và trồng cây trên luống.

Các giải pháp canh tác khác cho cây trồng lâu năm như cà-phê, sầu riêng v.v, không san laser mà vẫn giảm bớt rửa trôi (như trồng trên mô, đào hồ trữ nước v.v); do hạn chế độ dài bài báo, nên không bàn chi tiết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Trọng Uyên. 2013. *Hiện trạng đồng ruộng ở một số Tỉnh phía Nam*. Kỷ yếu Hội thảo "San phẳng đồng ruộng ứng dụng kỹ thuật điều khiển laser" do Dự án Sau thu hoạch lúa gạo ADB-IRRI-VN tổ chức tại TP Tân An, 15-16 / 3 / 2013.
2. Ngô Minh. 2026. *Diện tích 34 Tỉnh Thành Việt Nam*. <https://bankervn.com/danh-sach-cac-tinh-thanh-viet-nam/>
3. Rickman J. 2002. *Land leveling: a reference guide*. IRRI, Philippines.
4. Arnold R (Ed.). 1986. *Land forming for improved surface irrigation*, 11st edition. NSW Agriculture.
5. GSO (Tổng Cục Thống kê). 2025. *Số liệu thống kê nông lâm nghiệp 1990-2024*.
6. Nguyễn Trường Giang. 2013. *Kết quả khảo sát thực tế độ chênh lệch mặt đồng ở các tỉnh Quảng Trị, Thừa Thiên Huế và Quảng Nam*. Kỷ yếu Hội thảo: "Các giải pháp sau thu hoạch lúa gạo và san phẳng ruộng ứng dụng kỹ thuật laser ở Khu vực Bắc Bộ, Trung Bộ, và Tây Nguyên" TP Quảng Ngãi, 30-31 / 7 / 2013. Dự án Sau thu hoạch lúa gạo ADB-IRRI-Việt Nam.

Tất cả các giải pháp đều nhằm tăng năng suất cây trồng, và tăng thu nhập cho đại đa số nông dân. Cần thêm các nghiên cứu chi tiết hơn, với các đề tài kết hợp với các cơ sở sản xuất nông nghiệp và các cơ quan nghiên cứu phát triển/ chế tạo máy nông nghiệp, để có thêm các số liệu kỹ thuật và kinh tế phù hợp với địa phương.

Lời cảm ơn: Tác giả chân thành cảm ơn ThS. Nguyễn Thanh Long và PGS. TS Đỗ Minh Cường (Trường Đại học Nông Lâm Huế) đã đọc bản thảo và góp nhiều ý kiến phù hợp.

7. <http://www.worldclimate.com>

8. Bordovsky J. P. 2019. *Low-energy precision application (LEPA) irrigation: a forty-year review*. Transactions of the ASABE. Vol. 62(5): 1343-1353. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
9. Phan Hieu Hien. 2023. *Rice mechanization advances in Viet Nam from 2000*, pp.409-418. In: *Viet Nam Rice: Reformation towards sustainability and prosperity* Financial Publ. House, Hà Nội.
10. USDA. 1960. *The Yearbook of Agriculture: Power to produce*. US Department of Agriculture.
11. Nguyễn Đức Cảnh, Phạm D. Lam, Trần V, Khanh, Phan H.Hiền. 2010. *San phẳng ruộng điều khiển bằng laser*. Trích từ: "Công nghệ sau thu hoạch lúa gạo ở Việt Nam", tài liệu Dự án ADB-IRRI RETA N°.6489, Nxb Nông nghiệp, Tp Hồ Chí Minh.
12. Nguyễn Thanh Nghi, Nguyễn Đức Khuyến, Phan Hiếu Hiền. 2025. *Hiện trạng và Triển vọng Cơ giới hóa NN ở các Tỉnh phía Nam*. Báo cáo Hội thảo Agritechnica 14-02-2025, TP Hồ Chí Minh.

13. Phan Hiều Hiền T. V. Khanh, N. Đ. Cảnh, N. T. Nghi, N. V. Xuân. 2015. *Ứng dụng công nghệ cao và giảm phát thải nhà kính trong sản xuất lúa: San laser*. Kỷ yếu Hội thảo “Định hướng nghiên cứu và ứng dụng tiến bộ kỹ thuật trong sản xuất lúa theo hướng ứng dụng công nghệ cao đến năm 2020 và định hướng đến 2030”, tháng 12-2015 tại An Giang.
14. Hàng Phi Quang, Ngô V Giáo, Nguyễn H. Anh. 2013. . *San phẳng laser và hiệu quả trong sản xuất lúa giống và cây trồng cạn*. Kỷ yếu Hội thảo "San phẳng đồng ruộng ứng dụng kỹ thuật điều khiển laser" tổ chức tại TP Tân An, 15-16 / 3 / 2013.
15. Trương Thị Thanh Nhân. 2013. *Báo cáo quá trình ứng dụng thiết bị san phẳng đồng ruộng điều khiển bằng laser*. Kỷ yếu Hội thảo "San phẳng đồng ruộng ứng dụng kỹ thuật điều khiển laser" tổ chức tại TP Tân An, 15-16 / 3 / 2013.
16. Dickey E., T. Hamer, D.L. Hay, P.Jasa, T.Peterson. 1985. *Terrace Systems for Nebraska*. Univ. Nebraska Cooperative Extension Bulletin G85-750-A.
17. SERA (Southern Extension and Research Activity). 2023. *Terraces*. North Carolina State University, <https://sera17.wordpress.ncsu.edu/terraces/>
18. Guo, W. 2018. *Application of GIS and Automated Guidance System in Optimizing Contour and Terrace Farming*. Agriculture 2018, N°8, p142-; www.mdpi.com/journal/agriculture
19. Heyward M. 2013. *San laser từ góc độ nhà chế tạo và phân phối thiết bị Trimble*. Kỷ yếu Hội thảo: "Các giải pháp sau thu hoạch lúa gạo và san phẳng ruộng ứng dụng kỹ thuật laser ở Khu vực Bắc Bộ, Trung Bộ, và Tây Nguyên". TP Quảng Ngãi, 30-31 / 7 / 2013.
20. Zhang Z., A. D. McHugh, H. Li, S. Ma, Q. Wang, J. He, K. Zheng. 2017. *Global overview of research and development of crop residue management machinery*. Applied Engineering in Agriculture, Vol. 33(3): 329-344. ASABE.
21. <https://www.kuhn.com/>
22. <https://www.loftness.com/media/>
23. DCP (Department of Crop Production). 2023. *Technical manual: Rice straw management towards circular economy and low emission in the Mekong Delta*. Ministry of Agriculture and Rural Development, Vietnam.
24. Trần Thị Xuân Phương, N.T. Giang, H.T. Nghĩa, T.Đ. Hạnh, P.X. Phương, N.T. Ngọc, Đỗ M. Cường, T.L. Sinh. 2022. *Hiệu quả của biochar trong canh tác lúa ở Thừa Thiên- Huế*. HUAF J. Agr. Science and Technology, Vol. 6(3) pp3196-3204.

- Ngày gửi bài: 12/08/2026
- Ngày phản biện: 28/08/2026
- Ngày duyệt đăng: 20/09/2026

TẠP CHÍ CÔNG NGHIỆP NÔNG THÔN: CẦU NỐI TRI THỨC VÀ KIẾN TẠO PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

Tạp chí Công nghiệp Nông thôn (tên tiếng Anh: *Journal of Rural Industry*, mã chuẩn quốc tế ISSN: 1859-4026) là cơ quan báo chí chuyên ngành trực thuộc Hội Cơ khí Nông nghiệp Việt Nam. Với sứ mệnh truyền thông khoa học, Tạp chí đóng vai trò nòng cốt trong công tác phổ biến kiến thức, giới thiệu các thành tựu nghiên cứu và thúc đẩy ứng dụng công nghệ phục vụ phát triển nông nghiệp, công nghiệp cùng kinh tế nông thôn.

Khởi nguồn từ bản tin “Cơ điện nông nghiệp & Chế biến nông lâm sản” thành lập tháng 10/2004 và ra mắt số đầu tiên vào tháng 12/2004, đơn vị đã từng bước kiện toàn tổ chức. Đến ngày 28/01/2011, ấn phẩm chính thức hoạt động theo Giấy phép báo chí số 124/GP-BTTTT do Bộ Thông tin và Truyền thông cấp. Tiếp nối hành trình hiện đại hóa báo chí khoa học, năm 2026, cơ quan được cấp đổi Giấy phép hoạt động tạp chí in và tạp chí điện tử số 29/GP-BVHTTDL ngày 03/03/2026. Uy tín học thuật của Tạp chí tiếp tục được khẳng định vững chắc khi được Hội đồng Giáo sư Nhà nước công nhận vào danh mục các tạp chí khoa học chuyên ngành được tính điểm công trình.

Không gian học thuật và phản ánh thực tiễn toàn diện

Tạp chí tập trung xây dựng hệ thống bài viết chuyên sâu trên nhiều lĩnh vực trọng điểm:

- Cơ khí – động lực, cơ điện, tự động hóa và cơ giới hóa đồng bộ trong nông nghiệp;
- Công nghệ chế biến, công nghệ sau thu hoạch và bảo quản nông – lâm – thủy sản;
- Chuyển đổi số, tối ưu hóa năng lượng tái tạo, giảm phát thải và sản xuất xanh;
- Phát triển kinh tế nông thôn, bảo tồn và phát huy giá trị các làng nghề truyền thống gắn với chuỗi cung ứng hiện đại.

Không dừng lại ở lý thuyết hàn lâm, các ấn phẩm luôn ưu tiên giới thiệu những mô hình trình diễn kỹ thuật tiêu biểu, các giải pháp cải tiến dây chuyền thiết bị và những đề tài nghiên cứu có khả năng thương mại hóa cao.

Gắn kết viện – trường – doanh nghiệp vì nền nông nghiệp hiện đại

Với triết lý hành động “khoa học gắn liền với đời sống”, Tạp chí là diễn đàn học thuật uy tín quy tụ đông đảo các nhà khoa học, giảng viên, nghiên cứu sinh, kỹ sư thực hành cùng cộng đồng doanh nghiệp và nhà quản lý. Đây là không gian trao đổi tri thức cởi mở, nơi các báo cáo phân tích thực nghiệm và giải pháp công nghệ được cọ xát thực tế, góp phần rút ngắn khoảng cách từ phòng thí nghiệm tới đồng ruộng và nhà máy.

Nhằm đáp ứng yêu cầu hội nhập và công nghiệp hóa nông nghiệp trong giai đoạn mới, Tạp chí Công nghiệp Nông thôn mong muốn tiếp tục mở rộng hợp tác với các chuyên gia, tổ chức nghiên cứu và doanh nghiệp trên cả nước. Sự đồng hành của quý bạn đọc và cộng tác viên chính là nền tảng vững chắc để Tạp chí không ngừng nâng cao chất lượng biên tập, chuẩn hóa chất lượng bài báo khoa học và phát huy tối đa vai trò động lực thúc đẩy kinh tế nông thôn Việt Nam chuyển dịch theo hướng xanh, hiện đại và bền vững.

Số: 77 /CV-TCCNNT
Vv: “Mời tham gia viết bài khoa học”

Hà Nội, ngày 14 tháng 11 năm 2025

THƯ MỜI VIẾT BÀI KHOA HỌC

Kính gửi: Nhà khoa học, Chuyên gia, Giảng viên, Nghiên cứu sinh và các tác giả quan tâm

Tạp chí Công nghiệp Nông thôn là cơ quan thông tin khoa học uy tín, thực hiện sứ mệnh tuyên truyền chủ trương, đường lối của Đảng, chính sách và pháp luật của Nhà nước, đồng thời cập nhật các tiến bộ khoa học kỹ thuật trong sản xuất, chế biến, bảo quản nông lâm thủy sản, phát triển ngành nghề nông thôn và kinh tế thương mại dịch vụ nông thôn.

Với mục tiêu thúc đẩy các hoạt động nghiên cứu khoa học, tăng cường trao đổi học thuật và công bố các kết quả nghiên cứu có giá trị trong lĩnh vực về Cơ khí, Động lực, Cơ giới hoá trong nông nghiệp, Tự động hoá và Nông nghiệp thông minh, Công nghệ bảo quản và chế biến nông, lâm, thủy sản ... Ban Biên tập Tạp chí Công nghiệp Nông thôn trân trọng kính mời Quý tác giả gửi bài viết khoa học để đăng tải trên tạp chí của chúng tôi.

Với uy tín khoa học cao: Tạp chí được Hội đồng Giáo sư Liên ngành **Cơ khí – Động lực** và Hội đồng Giáo sư Liên ngành **Hóa học và Công nghệ thực phẩm** công nhận, với mỗi bài viết được tính 0,5 điểm theo Quyết định số 26/QĐ-HĐGSNN ngày 11 tháng 7 năm 2025 của Hội đồng Giáo sư Nhà nước.

Các bài viết được đánh giá bởi đội ngũ chuyên gia đầu ngành trong nước và quốc tế, đảm bảo chất lượng khoa học cao nhất. cùng với, cơ hội hợp tác quốc tế, Tạp chí khuyến khích các bài viết có tính ứng dụng quốc tế, mở rộng cơ hội hợp tác nghiên cứu toàn cầu.

Thông tin liên hệ và gửi bài viết

Email nhận bài: khoahocnnt@gmail.com

Hotline : 0865.988.388; Website: <https://congnghiiepnongthon.vn/>

Ban Biên tập Tạp chí Công nghiệp Nông thôn hy vọng nhận được sự quan tâm và tham gia của Quý tác giả người Việt Nam, các nhà khoa học quốc tế, để cùng nhau đóng góp vào sự phát triển bền vững của lĩnh vực cơ điện, cơ khí, động lực, cơ giới nông nghiệp, chế biến nông sản và ngành nghề nông thôn và thúc đẩy các nghiên cứu mang tầm ảnh hưởng toàn cầu.

Xin trân trọng cảm!

Nơi nhận:

- Như trên;
- Lưu Văn phòng;

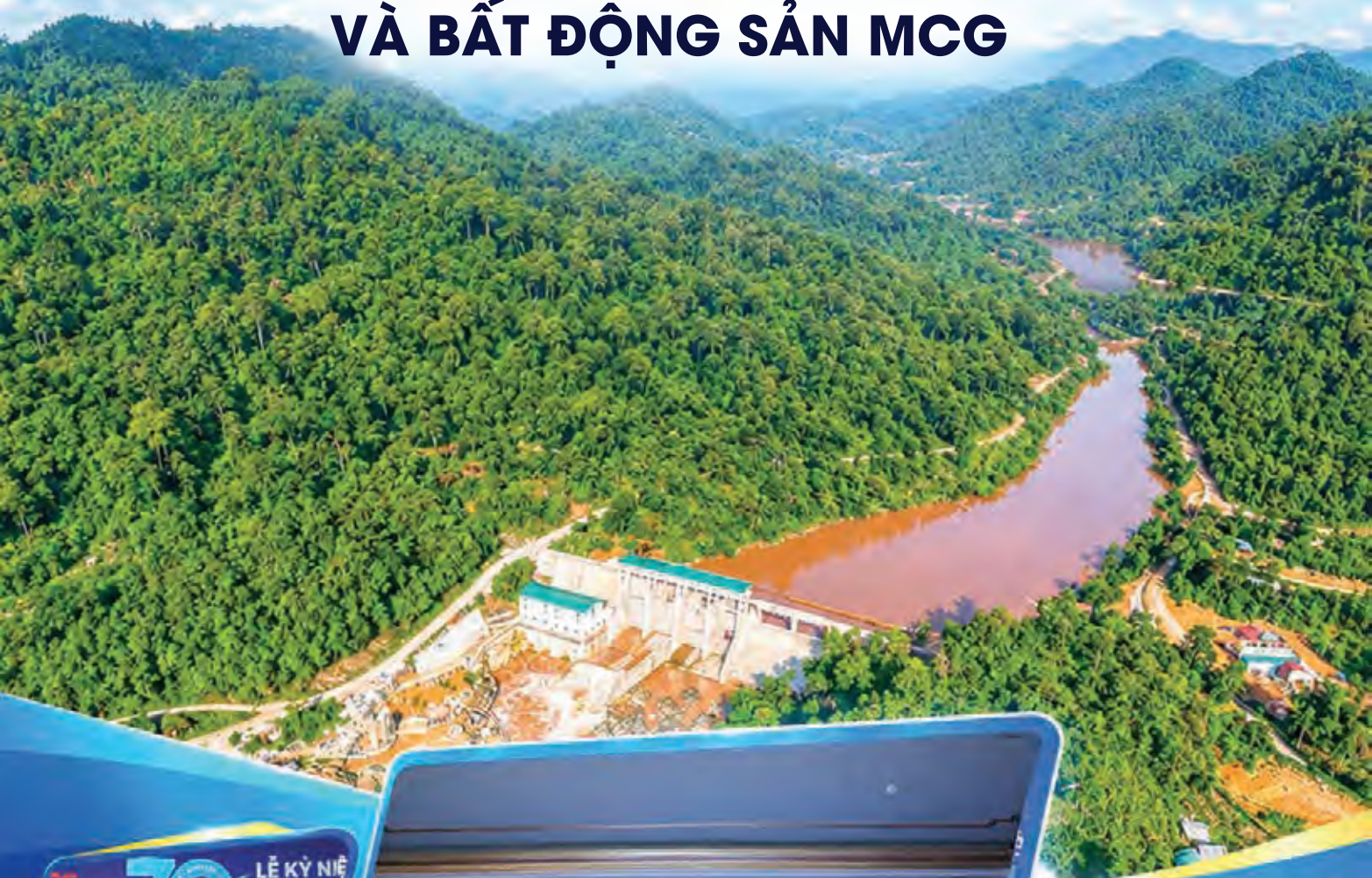
TM. TẠP CHÍ CÔNG NGHIỆP NÔNG THÔN
TỔNG BIÊN TẬP

Đã ký

Nhà báo, TS. Lê Ngọc Ánh



CÔNG TY CỔ PHẦN NĂNG LƯỢNG VÀ BẤT ĐỘNG SẢN MCG



XÂY GIÁ TRỊ DỰNG NIỀM TIN



ĐỘI NGŨ VIÊN CHỨC



**BỘ MÔN KỸ THUẬT CƠ KHÍ,
TỰ ĐỘNG HÓA VÀ XÂY DỰNG**



**BỘ MÔN
CÔNG NGHỆ THỰC PHẨM**



**KHOA CƠ KHÍ VÀ CÔNG NGHỆ
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM, ĐẠI HỌC HUẾ**

Địa chỉ: 102 Phùng Hưng, Phường Phú Xuân, Thành phố Huế