

NGHIÊN CỨU, ĐỀ XUẤT HƯỚNG PHÁT TRIỂN CÁC GIẢI PHÁP HỖ TRỢ TÁI CHẾ CHẤT THẢI DỆT MAY

Tạ Hanh¹

TÓM TẮT

Sự bùng nổ của thời trang gây áp lực lớn lên môi trường do lượng chất thải dệt may khổng lồ và tỷ lệ tái chế thấp. Trong bối cảnh đó, tái chế cơ học nổi lên như giải pháp tối ưu nhờ chi phí thấp và quy trình tinh giản. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất hiện nay là việc bảo tồn đặc tính lý hóa của xơ tái chế. Bài báo xác định các yếu tố then chốt để nâng cao hiệu suất bao gồm: cải tiến kỹ thuật tiền xử lý, ứng dụng phân loại tự động và tối ưu hóa cơ chế nghiền cắt, mở xơ. Đây là nền tảng quan trọng để thúc đẩy kinh tế tuần hoàn trong ngành dệt may.

Từ khóa: Chất thải dệt may, Tính bền vững, Tái chế cơ học

RESEARCH AND PROPOSALS FOR DEVELOPING SOLUTIONS TO SUPPORT TEXTILE WASTE RECYCLING

ABSTRACT:

The "fast fashion" boom has surged global textile consumption, yet recycled fiber shares remain record low, causing severe environmental strain on landfills. Consequently, developing scalable recycling solutions is imperative for a circular economy. Among existing technologies, mechanical recycling stands out due to its cost-efficiency and streamlined processes. However, preserving the fiber's physicochemical properties remains a major challenge. This paper analyzes current research bottlenecks, emphasizing that advanced pre-treatment, automated sorting, and optimizing shredding and opening mechanisms are crucial. Understanding these structural variables is the foundation for enhancing the value and performance of recycled textile products.

Key word: Mechanical recycling, Sustainability, Textile waste.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự tăng trưởng của thị trường thời trang đã đẩy nhu cầu dệt may toàn cầu tăng đột biến. Năm 2023, sản lượng xơ thế giới đạt 124 triệu tấn và dự báo chạm mốc 160 triệu tấn vào năm 2030. Đáng quan ngại, cơ cấu thị trường đang chứng kiến sự thống trị của xơ nhân tạo (chiếm 70%) – loại vật liệu phụ thuộc nặng nề vào nhiên liệu hóa thạch, trong khi các dòng xơ bền vững và xơ tự nhiên có xu hướng sụt giảm tỷ trọng. Ngay cả với xơ tự nhiên như bông, quy trình canh tác vẫn gây áp lực cực đoan lên tài nguyên nước (20.000 lít/1kg bông hạt).

Hệ quả tất yếu của chu kỳ tiêu thụ ngắn là khối lượng chất thải dệt may khổng lồ phát sinh mỗi năm. Tại các thị trường điển hình như Hoa Kỳ, Trung Quốc, Ấn Độ ... báo cáo của EPA cho thấy phần lớn chất thải dệt may (triệu tấn phát sinh), gây ra các thảm họa sinh thái như phát thải khí nhà kính, rò rỉ hóa chất và phát tán vi nhựa. Dù tiềm năng kinh tế và

môi trường của việc tái chế là rất lớn (tiết kiệm 45 USD/tấn chi phí xử lý và giảm tương đương khí thải của 550.000 ô tô mỗi năm), nhưng thực tế chỉ có khoảng 1% tổng sản lượng xơ được thu hồi từ nguồn tái chế.

Về mặt công nghệ, tái chế cơ học hiện nổi lên là giải pháp khả thi nhất nhờ ưu thế về chi phí vận hành, vốn đầu tư thấp và quy trình tinh giản, không sử dụng dung môi độc hại. Tuy nhiên, phương pháp này đang đối mặt với "nút thắt" kỹ thuật lớn: hiện tượng suy giảm cơ tính và chiều dài xơ do ứng suất vật lý trong quá trình xé, dẫn đến hệ quả (tái chế xuống cấp).

Do đó, việc tối ưu hóa các thông số công nghệ, làm rõ cơ chế tương tác lý học giữa thiết bị và vật liệu là yêu cầu cấp bách. Bài báo này tập trung phân tích các thành tựu hiện hữu và nhận diện rào cản kỹ thuật để đề xuất lộ trình bảo toàn đặc tính xơ, hướng tới hiện thực hóa mô hình kinh tế tuần hoàn bền vững cho ngành công nghệ may mặc.

¹Đại học Công Nghiệp và Thương Mại Hà Nội

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Điểm khác biệt của nghiên cứu này chính là sự tập trung chuyên biệt vào chuỗi giá trị thu hồi xơ tái chế – một phân khúc thường bị xem nhẹ trong một số nghiên cứu. Nghiên cứu thực hiện đánh giá nghiêm ngặt các rào cản kỹ thuật và các giải pháp đột phá trong quy trình thu hồi xơ thông qua tác động vật lý, từ đó xác định các khoảng trống lập luận và định hình lộ trình nghiên cứu cho lĩnh vực này.

Các tài liệu tham khảo được sàng lọc, chuẩn hóa qua 03 giai đoạn:

1. Sàng lọc sơ bộ: Đánh giá tiêu đề dựa trên mức độ tương quan với công nghiệp tái chế cơ học.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tổng quan và các thách thức trong tái chế cơ học dệt may

3.1.1. Phân loại các phương thức tái chế dệt may

Hệ thống tái chế dệt may được phân tầng dựa trên mức độ phân rã cấu trúc vật liệu thành 04 phân khúc chính: Tái chế vải, xơ, polyme và monome.

- Tái chế vải: Bảo tồn nguyên trạng cấu trúc dệt, chủ yếu thông qua phân loại và tái thiết kế. Dù hiệu quả kinh tế cao nhưng phương pháp này hạn chế về tính nhất quán và tiêu chuẩn chất lượng sản phẩm đầu ra.

- Tái chế xơ: Đây là trọng tâm của ngành công nghiệp hiện đại, sử dụng các tác động cơ học để phá vỡ cấu trúc vải/sợi thành trạng thái xơ rời nhưng vẫn bảo tồn được bản chất polyme.

- Tái chế Polyme & Monome: Sử dụng các tác động nhiệt-cơ hoặc hóa học sâu để phá vỡ liên kết phân tử. Mặc dù cho phép thu hồi vật liệu có độ tinh khiết cao, nhưng các phương pháp này đòi hỏi chi phí đầu tư hạ tầng lớn và tiêu thụ năng lượng đáng kể [1].

3.1.2. Quy trình công nghệ và tính tương thích của vật liệu

Dây chuyền tái chế cơ học tiêu chuẩn bao gồm các công đoạn: Xử lý sơ bộ → Phân loại → Nghiền nhỏ → Mỡ xơ/Xé xơ. Hiệu suất

2. Rà soát tóm tắt: Định vị các nghiên cứu tập trung vào khía cạnh kỹ thuật xử lý xơ.

3. Phân tích nội dung toàn văn: Tuyển chọn các dữ liệu thực nghiệm để đưa vào báo cáo cuối cùng.

Ngoài ra, phương pháp theo dõi tài liệu tham khảo chéo và việc tích hợp các báo cáo thị trường từ những tổ chức uy tín đã được thực hiện để đảm bảo tính thực tiễn của nghiên cứu. Các khía cạnh về kỹ thuật kéo sợi, phân tích kinh tế lượng và đánh giá vòng đời môi trường được coi là nằm ngoài phạm vi hẹp của bài báo này nhằm tập trung tối đa vào cơ chế thu hồi xơ cơ học.

vận hành của các dây chuyền công nghiệp hiện nay có thể đạt từ 50 kg/h đến 3000 kg/h [2].

Tính tương thích của vật liệu là một biến số quan trọng. Công nghệ này đạt hiệu quả tối ưu trên các xơ tự nhiên như Bông (Cotton), Len (Wool) và một số xơ tổng hợp như Acrylic nhờ khả năng bảo tồn cấu trúc sau khi chịu lực xé. Ngược lại, việc tái chế cơ học các loại xơ tổng hợp bền dai như Nylon gặp nhiều rào cản do:

- Kinh tế: Chi phí thu gom và xử lý cơ học hiện cao hơn chi phí sản xuất xơ nguyên sinh từ dầu mỏ [2].

- Kỹ thuật: Bản chất hóa lý của xơ tổng hợp thường phù hợp hơn với phương pháp tái chế nhiệt (nấu chảy) hoặc hóa học để đạt được đặc tính xơ tái chế tương đương xơ nguyên sinh (vòng lặp kín).

Tuy nhiên, trước sự thống trị của sợi tổng hợp trên thị trường, việc đổi mới các thông số kỹ thuật trong máy xé để giảm thiểu hiện tượng "tái chế xuống cấp" cho các loại xơ như Polyester đang trở thành ưu tiên nghiên cứu hàng đầu nhằm cải thiện tính khả thi về cả môi trường lẫn kinh tế.

3.2. Phân tích nguyên liệu đầu vào trong quy trình tái chế cơ học

Phân loại và nguồn gốc các dòng chất thải dệt may

Bảng 1. Hệ thống hóa nguồn gốc và đặc điểm lý tính của các dòng chất thải dệt may

Phân nhóm rác	Loại hình chất liệu cụ thể	Nguồn gốc phát sinh
Hậu công nghiệp & Trước tiêu dùng	Xơ pha trộn, xơ chải, đầu sợi thô, xơ phế phẩm từ máy kéo sợi vòng.	Công đoạn Kéo sợi
	Vải vụn, đầu khúc vải, biên vải phế phẩm, hồ vải thừa.	Công đoạn Dệt
	Mẫu vải thử, vải lỗi sọc, vải rách, xơ dị hình (dày/mỏng).	Công đoạn Đan len
	Vải lỗi sắc độ (shading), nếp gấp vĩnh viễn, sai lệch hoàn tất.	Công đoạn Nhuộm
	Phế liệu cắt (cutting waste), sản phẩm lỗi may, in ấn, thêu.	Công đoạn May mặc
Sau tiêu dùng	Quần áo cũ, dệt gia dụng (chăn, ga), vải kỹ thuật, vải không dệt đã qua sử dụng.	Người tiêu dùng cuối cùng

Trong kinh tế tuần hoàn dệt may, việc nhận diện chính xác nguồn gốc chất thải là tiền đề quyết định hiệu suất thu hồi. Chất thải dệt may hiện nay được phân tầng thành ba nhóm chiến lược: Hậu công nghiệp, Trước tiêu dùng và Sau tiêu dùng.

Chất thải hậu công nghiệp: Bao gồm các phế liệu phát sinh trực tiếp từ quy trình sản xuất thượng nguồn (kéo sợi, dệt vải). Đây là nguồn nguyên liệu có độ tinh khiết cao nhất.

Chất thải trước tiêu dùng: Đề cập đến các sản phẩm may mặc thành phẩm nhưng chưa được đưa ra thị trường do lỗi kỹ thuật (QC), tồn kho dư thừa hoặc lỗi thiết kế.

Chất thải sau tiêu dùng: Bao gồm hàng may mặc và dệt dụng cụ đã qua sử dụng, thải bỏ từ hộ gia đình hoặc các khu vực dịch vụ (khách sạn, bệnh viện). Đây là dòng rác thải chiếm tỷ trọng lớn nhất nhưng cũng phức tạp nhất do sự đa dạng về thành phần sợi và mức độ nhiễm bẩn [1, 2, 6].

Dựa trên phân tích của Raluca (2023), Bảng 1 hệ thống hóa các dòng chất thải phát

sinh theo từng công đoạn cụ thể trong chuỗi cung ứng dệt may [4]:

3.3. Tương quan giữa nguyên liệu đầu vào và hiệu suất thu hồi xơ

Chiều dài xơ là thông số kỹ thuật cốt yếu định vị khả năng tái ứng dụng của vật liệu. Các nghiên cứu thực nghiệm chỉ ra rằng, cấu trúc và tình trạng của nguyên liệu đầu vào ảnh hưởng trực tiếp đến xác suất đứt gãy xơ trong quá trình xé cơ học.

Chất thải Trước tiêu dùng sở hữu ưu thế vượt trội về tính đồng nhất và độ sạch, cho phép quy trình xé đạt hiệu quả cao với mức độ hư tổn vật lý tối thiểu. Ngược lại, chất thải Sau tiêu dùng đối mặt với "nút thắt" về sự biến thiên trong hỗn hợp sợi, sự hiện diện của elastane và các phụ liệu (khóa, nút). Đặc biệt, sự suy giảm cơ tính tự nhiên của xơ sau quá trình sử dụng và giặt lâu ngày khiến xơ dễ bị đứt đoạn hơn khi chịu ứng suất cơ học.

Bảng 2 so sánh dữ liệu thực nghiệm về khả năng giữ chiều dài xơ của hai dòng chất thải chính [2]:

Bảng 2. So sánh chiều dài xơ thu hồi giữa các nguồn nguyên liệu tái chế

Loại xơ	Loại hình nguyên liệu đầu vào	Chiều dài xơ đầu ra (mm)
Bông	Phế liệu cắt từ xưởng may (Trước tiêu dùng)	6 – 21
	Đầu sợi/Sợi cứng (Trước tiêu dùng)	6 – 26
	Sợi thô, mép biên vải (Trước tiêu dùng)	6 – 21
	Vải Denim/Jean cũ (Sau tiêu dùng)	6 – 18
Len	Phế liệu cắt từ xưởng may (Trước tiêu dùng)	20 – 60

	Đầu sợi/Mép biên vải (Trước tiêu dùng)	20 – 60
	Sản phẩm len cũ (Sau tiêu dùng)	20 – 50

Từ dữ liệu trên, có thể thấy xơ bông tái chế từ nguồn sau tiêu dùng (như Denim) thường ngắn hơn đáng kể so với nguồn trước tiêu dùng. Với xơ ngắn (thường <15mm), việc kéo lại sợi 100% tái chế gặp nhiều trở ngại về độ bền và độ xù lông. Do đó, các nghiên cứu tương lai cần tập trung vào việc tối ưu hóa công nghệ mở xơ nhẹ nhàng (gentle opening) và các phương pháp tiền xử lý hóa lý để làm giảm độ kết dính cấu trúc vải, giúp xơ được tách ra một cách nguyên vẹn hơn, từ đó nâng cao giá trị gia tăng cho các dòng rác thải sau tiêu dùng phức tạp.

3.4. Tiền xử lý: Giai đoạn quyết định sự bảo tồn lý tính xơ

Trong kỹ thuật tái chế cơ học, tiền xử lý không chỉ đơn thuần là làm sạch mà là một quá trình chuẩn bị cấu trúc chiến lược. Hiệu quả của giai đoạn này ảnh hưởng trực tiếp đến độ tinh khiết của nguyên liệu và khả năng bảo toàn chiều dài xơ ở các bước xử lý cường độ cao tiếp theo.

3.4.1. Quy trình làm sạch và phân rã sơ bộ

Quy trình tiền xử lý trong môi trường công nghiệp bắt đầu bằng việc tháo kiện và loại bỏ các thành phần phi dệt may. Các dòng chất thải thường được vận chuyển dưới dạng kiện nén chặt, bọc nhựa hoặc buộc dây kim loại, đòi hỏi hệ thống tháo dỡ chuyên dụng để tránh gây hư hại thiết bị hạ nguồn [3].

Hệ thống xử lý hiện đại tích hợp các đơn vị tự động hóa bao gồm:

- Máy mở kiện và băng tải: Giải phóng vật liệu khỏi trạng thái nén.
- Hệ thống tách kim loại: Bảo vệ các tang trống răng cưa khỏi hư hỏng do khóa kéo, cúc áo hoặc dị vật kim loại.
- Vệ sinh công nghiệp: Sử dụng các tác nhân như chất tẩy rửa chuyên dụng, Ozone hoặc CO₂ lỏng để khử nhiễm các tạp chất hữu cơ (mồ hôi, dầu mỡ) và vô cơ (cát, bụi) mà không làm suy yếu liên kết phân tử của xơ.

3.4.2. Giải pháp hóa lý trong bảo tồn chiều dài xơ

Một bước tiến đột phá trong nghiên cứu tiền xử lý là việc kiểm soát ma sát liên kết. Ma sát cao trong quá trình xé cơ học là nguyên nhân chính gây ra ứng suất nhiệt, làm nóng chảy xơ tổng hợp và gây đứt gãy xơ tự nhiên.

Việc ứng dụng các chất bôi trơn bề mặt, điển hình là Polyethylene Glycol (PEG 4000), trên các dòng vải pha Cotton-Polyester đã cho thấy những kết quả khả quan. Cơ chế của chất bôi trơn bao gồm:

1. Giảm độ kết dính (Cohesion reduction): Làm yếu các lực liên kết giữa các sợi trong cấu trúc dệt thoi/dệt kim.

2. Giảm ứng suất cắt: Cho phép các răng của máy mở xơ tách rời cấu trúc vải một cách "nhẹ nhàng" (gentle opening), từ đó giảm thiểu hiện tượng rút ngắn chiều dài xơ

Tuy nhiên, việc tích hợp chất bôi trơn vào quy trình quy mô lớn vẫn cần các nghiên cứu sâu hơn về nồng độ tối ưu cho từng loại hỗn hợp xơ cụ thể, cũng như đánh giá tác động của chúng đối với quá trình nhuộm và hoàn tất ở chu kỳ sản xuất tiếp theo. Ngoài ra, chi phí vận hành và tính bền vững sinh thái của các hóa chất bôi trơn này là những biến số cần được định lượng trong mô hình kinh tế tuần hoàn của ngành.

3.5. Phân loại: Mất xích then chốt trong kiểm soát chất lượng xơ tái chế

Phân loại (Sorting) được coi là quy trình mang tính quyết định đến giá trị thương mại của sản phẩm sau tái chế. Sự không đồng nhất về bản chất polymer, cấu trúc dệt và mức độ nhiễm bẩn trong các dòng chất thải dệt may hiện nay đòi hỏi một quy trình phân tách nghiêm ngặt để đảm bảo các đặc tính cơ lý của xơ thu hồi đạt tiêu chuẩn kéo sợi.

Một trong những thách thức kỹ thuật lớn nhất là sự hiện diện của Elastane (Spandex). Các dòng vải có hàm lượng elastane vượt

ngưỡng 5% gây ra trở ngại lớn cho quá trình phân tách cơ học do tính đàn hồi cao, đòi hỏi ứng suất cắt lớn hơn để phá vỡ cấu trúc sợi, từ đó làm gia tăng hư hại vật lý lên xơ nền (xơ bông hoặc polyester). Việc nhận diện và loại biên các dòng vải này là ưu tiên hàng đầu trong các hệ thống phân loại hiện đại.

3.5.1. Sự trỗi dậy của các công nghệ phân loại tiên tiến

Để đạt được hiệu quả kinh tế quy mô, ngành công nghiệp đang dịch chuyển mạnh mẽ từ phân loại thủ công sang các giải pháp tự động hóa tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI).

Bảng 3. Đánh giá ưu nhược điểm của các công nghệ phân loại dệt may hiện nay

Công nghệ	Nguyên lý cốt lõi	Ưu thế chiến lược	Hạn chế kỹ thuật
NIR Spectroscopy	Hấp thụ dao động trong vùng 780–2526 nm.	Tốc độ cao, dễ triển khai quy mô công nghiệp.	Kém hiệu quả với vải màu tối và sợi pha trộn.
Raman Spectroscopy	Tán xạ ánh sáng không đàn hồi.	Phân tích định lượng chính xác, không phá hủy mẫu.	Dễ bị nhiễu do hiện tượng huỳnh quang.
RGB Imaging	Phân tích dựa trên kênh màu và kết cấu bề mặt.	Hiệu quả trong phân loại theo màu sắc và hoa văn.	Không thể nhận diện bản chất hóa học của xơ.
Hyperspectral	Kết hợp dữ liệu phổ và bản đồ không gian.	Độ chính xác tối ưu, phân loại được mọi loại xơ.	Chi phí đầu tư cao, yêu cầu tập dữ liệu lớn.

- Quang phổ Raman tích hợp AI: Vượt trội hơn NIR trong việc phân tích dao động phân tử không đàn hồi, cung cấp dữ liệu định lượng chính xác về thành phần sợi. Việc ứng dụng các thuật toán Học sâu như CNN, RNN và GAN giúp xử lý các phổ Raman phức tạp, cho phép phân loại vật liệu theo thời gian thực với độ chính xác cao.

- Hình ảnh siêu phổ (HSI): Công nghệ này tạo ra một "dấu vân tay" hóa học cho từng mảnh vải bằng cách kết hợp dữ liệu không gian và quang phổ. HSI có khả năng phân biệt chính xác giữa Cotton, Polyester và Rayon ngay cả khi chúng có ngoại quan tương đồng,

Theo Faghih và cộng sự (2025), ba trụ cột công nghệ chính bao gồm: Quang phổ học, Phân tích hình ảnh và Hình ảnh siêu phổ (HSI).

- Quang phổ cận hồng ngoại (NIR): Là kỹ thuật phổ biến nhất hiện nay nhờ khả năng nhận diện polymer tốc độ cao dựa trên đặc trưng hấp thụ dao động phân tử (700–2500 nm). Tuy nhiên, NIR gặp rào cản lớn với các vật liệu màu tối (do carbon black hấp thụ toàn bộ tín hiệu) và các dòng vải pha trộn phức tạp (ví dụ: Cotton/Polyester) [5].

giải quyết triệt để hạn chế của các phương pháp hình ảnh RGB thông thường.

3.5.2. Chiến lược "Thiết kế để tái chế" và Gắn thẻ kỹ thuật số

Bên cạnh giải pháp phần cứng, xu hướng Thiết kế sinh thái (Eco-design) đang thúc đẩy việc sử dụng các hệ thống truy xuất nguồn gốc số hóa.

- Mã QR và RFID: Được nhúng trực tiếp vào sản phẩm để lưu trữ thông tin về thành phần sợi và quy trình xử lý hóa học. Tuy nhiên, việc tách bỏ các thẻ này trước khi xé cơ học vẫn là một rào cản về mặt chi phí và công nghệ.

- Sợi quang tử: Một giải pháp đầy hứa hẹn khi nhúng các sợi polymer đặc biệt vào vải trong quá trình dệt. Các sợi này tạo ra phản xạ quang học đặc trưng, cho phép máy phân loại nhận diện chính xác nguồn gốc mà không cần thêm vật liệu ngoại lai.

3.5.3. Thách thức và lộ trình tương lai

Mặc dù tiềm năng của AI và cảm biến là rất lớn, nhưng thực tế các hệ thống phân loại công nghiệp hiện nay mới chỉ đạt hiệu suất thực tế ở mức thấp do sự đa dạng quá mức của rác thải sau tiêu dùng. Khoảng trống giữa nghiên cứu phòng thí nghiệm và triển khai thực địa (hiện mới đạt khoảng 10% độ chính xác mục tiêu trong môi trường hỗn hợp) mở ra cơ hội lớn cho các nghiên cứu về Định vị động và Tương tác Robot-Người nhằm tối ưu hóa chuỗi giá trị tuần hoàn [5]

3.6. Công nghệ Xé nhỏ (Shredding) trong xử lý chất thải dệt may

3.6.1. Hệ thống máy nghiền và vai trò trong chu trình tái chế

Máy nghiền là thiết bị cốt lõi trong các hệ thống quản lý chất thải hiện đại, được thiết kế chuyên biệt để xử lý đa dạng các nguồn vật liệu từ rác thải điện tử, kim loại đến nhựa và gỗ [4]. Trong bối cảnh khủng hoảng rác thải dệt may toàn cầu, máy nghiền dệt may đã trở thành công cụ thiết yếu cho các tổ chức từ khu vực công (bệnh viện, quân đội) đến khu vực tư nhân (chuỗi bán lẻ, nhà sản xuất) nhằm tối ưu hóa việc thu hồi tài nguyên sợi.

Quá trình xé nhỏ đóng vai trò giảm kích thước vật lý ban đầu của chất thải (quần áo, thảm, vải nội thất), tạo tiền đề cho các bước tách xơ tinh ở giai đoạn sau [4]. Để đảm bảo hiệu suất, các hệ thống này thường tích hợp đồng bộ các thiết bị phụ trợ như:

- Hệ thống nạp và vận chuyển: Băng tải và phễu tùy chỉnh.

- Hệ thống an toàn: Máy dò kim loại để bảo vệ lưỡi cắt.

- Hệ thống xử lý đầu ra: Máy ép kiện và hệ thống nén khí.

Cấu hình trực cắt quyết định trực tiếp đến chất lượng mảnh vụn:

- Cấu hình trục kép: Phù hợp cho việc phá hủy cấu trúc tổng thể và giảm kích thước thô.

- Cấu hình trục ba hoặc bốn: Sử dụng các trục quay ngược chiều để tạo ra kích thước hạt đồng nhất và nhất quán hơn. Sự đồng nhất này là yếu tố tiên quyết để nâng cao hiệu suất thu hồi xơ chất lượng cao ở các công đoạn xử lý sâu [4].

3.6.2. Tối ưu hóa thông số vận hành và các biến số ảnh hưởng

Hiệu suất của quy trình xé nhỏ không chỉ phụ thuộc vào cơ khí mà còn chịu tác động lớn từ đặc tính hóa lý của vật liệu đầu vào. Các nghiên cứu thực nghiệm của Utebay và cộng sự (2019) đã chỉ ra những tương quan quan trọng:

- Tác động của thuốc nhuộm: Vải cotton chưa nhuộm cho ra xơ có hàm lượng xơ ngắn (SFC) thấp hơn và độ bền cao hơn so với vải đã nhuộm. Điều này cho thấy các tác nhân hóa học trong quá trình nhuộm có thể làm suy giảm tính toàn vẹn cấu trúc của xơ cellulose.

- Cấu trúc dệt: Vải dệt kim đơn cho phép thu hồi xơ dài và bền hơn so với các cấu trúc dệt chặt, do lực liên kết giữa các vòng sợi lỏng lẻo hơn.

- Cường độ xử lý: Việc tăng số lần cắt lên 03 lần giúp tối ưu hóa độ mở của vải; tuy nhiên, vượt quá ngưỡng này sẽ dẫn đến sự suy giảm cơ tính trầm trọng. Điều này nhấn mạnh sự đánh đổi giữa mức độ phân rã vật liệu và chất lượng xơ bảo tồn.

Bên cạnh đó, nghiên cứu trên vải denim đã làm sáng tỏ vai trò của tốc độ trống và thời gian xử lý [1]. Kết quả cho thấy việc tăng tốc độ trống tương đối giúp cải thiện sản lượng sợi mà không làm gia tăng đáng kể lượng bụi mịn (vật liệu thất thoát). Tuy nhiên, do denim có độ bền cơ học đặc thù, các thông số này cần được kiểm chứng thêm trên dải rộng các loại vải dệt thoi và dệt kim khác để xây dựng một bộ thông số vận hành tiêu chuẩn cho ngành tái chế cơ học.

Việc tinh chỉnh đồng bộ giữa đặc tính vật liệu và thông số máy móc chính là chìa khóa để tối đa hóa năng suất đồng thời duy trì được

chất lượng xơ tái chế tiệm cận với xơ nguyên bản.

3.7. Công nghệ Mở sợi trong tái chế cơ học

3.7.1. Cơ chế vận hành của máy mở sợi

Quá trình mở sợi (thường gọi là xé sợi) là giai đoạn quyết định trong việc giải phóng các xơ đơn lẻ từ cấu trúc vải hoặc sợi phế thải [4]. Công nghệ này đặc biệt hiệu quả đối với các nhóm xơ chủ đạo như bông, len và acrylic. Cơ chế cốt lõi bao gồm việc sử dụng lực kéo cơ học liên tiếp thông qua các cụm tang trống (xi lanh) gắn răng cưa để phá vỡ liên kết của hàng dệt.

Thông thường, một dây chuyền công nghiệp bao gồm từ 01 đến 06 trống sắp xếp nối tiếp:

- Trống sơ cấp: Thực hiện mở thô các mảnh vải vụn.

- Các trống kế tiếp: Dần dần tinh chế và tách rời các cụm xơ thành xơ đơn lẻ nhờ mật độ răng cưa dày hơn và tốc độ quay cao hơn.

- Các hệ thống hiện đại còn tích hợp bộ điều khiển giám sát chất lượng trực tuyến, hệ thống ngưng tụ xơ và thiết bị hút bụi trung tâm để đảm bảo môi trường làm việc và độ sạch của sản phẩm đầu ra.

Nghiên cứu trên máy Shirley Analyzer đã chỉ ra một nghịch lý kỹ thuật: việc tăng số lần đi qua máy giúp cải thiện chiều dài xơ trung bình và chiều dài tứ phân vị trên, nhưng đồng thời làm gia tăng tỷ lệ nút thắt (neps) và hàm lượng xơ ngắn do tác động va đập liên tục của răng cưa. Tương tự, Kanan (2024) khẳng định hệ thống 07 con lăn mang lại Chỉ số Chất lượng Sợi (FQI) vượt trội hơn hẳn các thiết lập ít con lăn đối với phế liệu denim.

3.7.2. Tác động của độ hao mòn vật liệu và điều kiện môi trường

Một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng xơ tái chế là tình trạng vật lý của nguyên liệu đầu vào gồm:

- Mức độ hao mòn: Quần áo cũ (bị mòn nhiều) thực tế lại tạo ra xơ tái chế dài hơn so với vải mới. Lý do là sự mài mòn trong quá trình sử dụng đã làm yếu đi cấu trúc liên kết

sợi, giúp máy mở xơ tách rời chúng dễ dàng hơn mà không gây đứt gãy xơ do ứng suất cơ học.

- Điều kiện khí quyển: Độ ẩm và nhiệt độ môi trường không cho thấy tác động đáng kể đến chiều dài xơ bông trong quá trình mở, tuy nhiên cần có thêm nghiên cứu đối với các loại xơ có khả năng hút ẩm cao như len để xác nhận tính khái quát này.

3.7.3. Tương quan giữa cấu trúc vải và khả năng thu hồi xơ

Hiệu suất của quá trình mở sợi bị chi phối mạnh mẽ bởi cấu trúc hình học của hàng dệt:

- Cấu trúc dệt: Vải dệt kim hoặc vải dệt thoi có mật độ lỏng lẻo thường cho xơ tái chế dài và chất lượng cao hơn so với vải dệt chặt. Điều này do lực cản ma sát giữa các sợi trong cấu trúc dệt lỏng thấp hơn, giảm thiểu ứng suất cắt lên xơ.

- Hình dạng mẫu và hướng cấp liệu: Các nghiên cứu gần đây của Lindström (2024) chỉ ra rằng việc cấp liệu theo đường chéo đối với các mẫu hình tròn giúp cải thiện đáng kể khả năng kéo sợi và thu hẹp phân bố chiều dài xơ. Trong khi đó, các mẫu hình chữ nhật lại giúp giảm thiểu lượng vải chưa mở.

Tổng kết: Việc tối ưu hóa quá trình mở sợi đòi hỏi sự cân bằng giữa số lần xử lý và cường độ tác động cơ học. Sự khác biệt về các thông số dệt thoi/dệt kim (chiều dài mũi khâu, mật độ sợi dọc/ngang) chính là những biến số tiềm năng cần được định lượng hóa trong các nghiên cứu tương lai để tối đa hóa tỷ lệ thu hồi xơ hữu dụng.

3.8. Đánh giá chất lượng xơ tái chế trong quá trình tái chế cơ học

Chất lượng xơ tái chế là biến số quyết định khả năng kéo sợi (spinnability) và hiệu suất lý tính của sản phẩm dệt may cuối cùng. Việc đánh giá định lượng các đặc tính xơ không chỉ giúp tối ưu hóa dây chuyền sản xuất mà còn đảm bảo vật liệu đáp ứng được các tiêu chuẩn khắt khe về thẩm mỹ và độ bền cơ học.

Các chỉ số kỹ thuật cốt lõi bao gồm:

- Phân bố chiều dài xơ: Chiều dài trung bình (ML) và hàm lượng xơ ngắn (SFC).

- Đặc tính hình học và cơ lý: Độ mịn (fineness), độ bền kéo (STR) và chỉ số đồng nhất (UI).

- Mức độ tạp chất: Số lượng nút thắt (neps) và hiệu suất tách xơ.

Để đo lường các thông số này, các thiết bị tiêu chuẩn công nghiệp như Máy phân tích Shirley, hệ thống HVI (High Volume Instrument) và đặc biệt là AFIS (Advanced Fiber Information System) của Uster được sử dụng rộng rãi nhằm cung cấp dữ liệu phổ chi tiết về tình trạng xơ sau khi xử lý.

3.8.1. Chỉ số chất lượng xơ (FQI) và Chỉ số ổn định kéo sợi (SCI)

Để đánh giá toàn diện tiềm năng của xơ tái chế, hai chỉ số tích hợp thường được sử dụng:

1. Chỉ số Chất lượng Xơ (FQI):

$$FQI = (ML \times STR) / \text{Độ mịn}$$

Chỉ số này cho phép so sánh hiệu quả của các điều kiện xử lý khác nhau đối với chất lượng xơ thu hồi.

2. Chỉ số Độ nhất quán Kéo sợi (SCI):

Thường áp dụng cho xơ bông, SCI tổng hợp các giá trị về độ bền, chiều dài trung bình nửa trên (UHML), chỉ số đồng nhất (UI) và giá trị Micronaire (phản ánh cả độ mịn và độ trưởng thành của xơ).

Nghiên cứu của Béchir và cộng sự (2018) đã chỉ ra một sự đánh đổi quan trọng: Khi tăng số lần đi qua máy mở xơ từ 1 đến 7, giá trị FQI tăng lên do xơ được tách rời và làm sạch tốt hơn. Tuy nhiên, giá trị SCI lại có xu hướng giảm, cho thấy tính nhất quán trong quá trình kéo sợi bị suy giảm [5]. Điều này đặt ra yêu cầu phải kiểm soát chặt chẽ cường độ xử lý cơ học để duy trì tính toàn vẹn cấu trúc của xơ.

3.8.2. Định lượng mức độ mở xơ trong tái chế cơ học

Mức độ mở xơ (Degree of opening) định lượng tỷ lệ xơ đã được tách rời hoàn toàn khỏi cấu trúc vãi. Hiện có hai phương pháp tiếp cận chính:

Phương pháp trực tiếp (Hiệu suất tách):

Xác định thông qua việc phân loại thủ công hoặc máy móc các thành phần trong hộp giao hàng (delivery box) để tách riêng xơ đã

mở (MSF) và các mảnh sợi/vãi chưa mở (MNFS).

$$\text{Hiệu suất (\%)} = (MSF / MFS) \times 100,$$

Mặc dù trực quan, phương pháp này chưa phản ánh được chất lượng nội tại hoặc khả năng kéo sợi của xơ sau khi tách [4].

Phương pháp gián tiếp (Đo Micronaire):

Lindström và cộng sự (2024) đề xuất sử dụng giá trị Micronaire để ước tính mức độ mở xơ dựa trên độ thấm khí của khối xơ. Bằng cách so sánh mẫu tái chế với các hỗn hợp tham chiếu (tỷ lệ 0/100 đến 100/0 giữa xơ đã mở và chưa mở), nghiên cứu xác định mức độ mở xơ dao động từ 40% đến 60%.

Kết luận kỹ thuật: Việc đánh giá chất lượng không thể chỉ dựa trên một chỉ số duy nhất. Sự kết hợp giữa các phép đo vật lý (AFIS/HVI) và các chỉ số tích hợp (FQI/SCI) là cần thiết để dự báo chính xác hành vi của xơ tái chế trong các công đoạn sản xuất hạ nguồn.

3.9. Tái chế cơ học: Lộ trình tuần hoàn và các biến số vật liệu

3.9.1. Tái chế vòng kín so với Tái chế vòng hở

Hiệu quả của tái chế cơ học trong việc thúc đẩy nền kinh tế tuần hoàn được đánh giá qua hai mô hình chiến lược:

Tái chế vòng kín: Đây là mô hình lý tưởng nơi chất thải dệt may được tái tích hợp trực tiếp vào cùng một chuỗi giá trị sản phẩm ban đầu (ví dụ: quần áo cũ tái chế thành sợi kéo sợi cho hàng may mặc mới) [5].

Lợi ích môi trường: Đánh giá vòng đời (LCA) chỉ ra rằng tái sử dụng 1 kg quần áo có thể tiết kiệm 65 kWh (đối với bông) và lên đến 90 kWh (đối với polyester) so với sản xuất nguyên liệu nguyên sinh.

Thách thức: CLR đòi hỏi nguyên liệu đầu vào có độ tinh khiết cực cao, chủ yếu dựa vào chất thải trước tiêu dùng (Pre-consumer) để duy trì các đặc tính cơ lý như độ bền và độ cứng của xơ.

Tái chế vòng hở (Open-loop Recycling - OLR): Còn được gọi là tái chế "xuống cấp" (Downcycling), nơi vật liệu được chuyển đổi thành các sản phẩm có giá trị thấp hơn hoặc

không liên quan đến ngành may mặc như vật liệu cách nhiệt, giặt lau công nghiệp, lớp lót thảm hoặc vải không dệt.

Đặc điểm: OLR thường là đích đến của chất thải sau tiêu dùng (Post-consumer) do sự không đồng nhất về thành phần và sự suy giảm chiều dài xơ sau quá trình xử lý cơ học cường độ cao. Mặc dù OLR giúp trì hoãn việc rác thải bị đưa ra bãi chôn lấp (MSW), nó vẫn

chưa giải quyết triệt để bài toán tuần hoàn vĩnh cửu nếu thiếu các đổi mới trong kỹ thuật tái tạo xơ.

3.9.2. Tính đặc thù của xơ trong hệ thống tái chế

Khả năng thích ứng của quy trình tái chế cơ học phụ thuộc mật thiết vào bản chất polymer của xơ:

Bảng 4. So sánh khả năng tuần hoàn theo loại xơ

Đặc tính	Xơ Len	Xơ Bông
Độ bền chu kỳ	Cao (duy trì cấu trúc tốt qua nhiều lần kéo lại)	Trung bình (chiều dài xơ giảm nhanh)
Lộ trình phổ biến	Vòng kín & Vòng hở	Bán khép kín (cần pha trộn nguyên sinh)
Ứng dụng chủ đạo	Hàng dệt kim cao cấp, chăn len	May mặc phổ thông, vải không dệt
Thách thức chính	Giữ được độ mảnh và độ mềm	Bảo tồn chiều dài xơ để kéo sợi cao chi số

Xơ Len: Có lịch sử tái chế lâu đời từ Thế chiến I và thể hiện tính linh hoạt vượt trội. Cấu trúc vảy và độ đàn hồi tự nhiên của len cho phép nó chịu đựng tốt hơn các tác động của quy trình kéo sợi chải (carding) và kéo sợi hỗn hợp, giúp len dễ dàng tham gia vào cả hai lộ trình CLR và OLR.

4. KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG

Tương lai của tái chế dệt may cơ học phụ thuộc vào việc thu hẹp khoảng cách chất lượng giữa xơ tái chế và xơ nguyên sinh thông qua tối ưu hóa công nghệ mở xơ và thiết kế sản phẩm "hướng tới tái chế".

Bài đánh giá này khẳng định vai trò không thể thay thế của tái chế cơ học như một trục cột chiến lược trong việc chuyển đổi ngành dệt may sang mô hình kinh tế tuần hoàn bền vững. Dù đã đạt được những bước tiến công nghệ nhất định, quá trình tối ưu hóa chất lượng xơ và hiệu quả xử lý vẫn đối mặt với nhiều rào cản kỹ thuật phức tạp.

4.1. Những thách thức cốt lõi

Nghiên cứu nhấn mạnh sự cần thiết của những đổi mới mang tính đặc thù cho từng loại sợi. Đặc biệt, việc tái chế cơ học sợi tổng hợp — thành phần chiếm tỷ trọng lớn nhất

Xơ Bông: Mặc dù là xơ tự nhiên được tiêu thụ nhiều nhất, bông gặp thách thức lớn do chiều dài xơ bị rút ngắn đáng kể sau mỗi chu kỳ tái chế cơ học. Để đảm bảo khả năng kéo sợi, xơ bông tái chế thường phải pha trộn (blend) với xơ nguyên sinh theo tỷ lệ nhất định, tạo thành mô hình tái chế bán khép kín trong chuỗi cung ứng thời trang hiện đại — cần được đầu tư mạnh mẽ để sản xuất ra các dòng xơ tái chế chất lượng cao mà vẫn đảm bảo tính khả thi về mặt kinh tế.

Thách thức lớn nhất hiện nay nằm ở dòng chất thải sau tiêu dùng. Sự không đồng nhất về cấu trúc, mức độ ô nhiễm và sự hiện diện của các loại vải pha trộn đòi hỏi một hệ thống giải pháp đồng bộ từ khâu phân loại đến tiền xử lý.

4.2. Lộ trình nghiên cứu ưu tiên

Để nâng cao khả năng mở rộng quy mô và tính bền vững, các hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào các mắt xích sau:

Tối ưu hóa Tiền xử lý: Xác định loại và nồng độ chất bôi trơn (lubricants) tối ưu cho từng hỗn hợp sợi cụ thể nhằm giảm ma sát liên kết, bảo tồn chiều dài xơ và giảm thiểu dấu chân môi trường của hóa chất.

Hệ thống Phân loại thông minh: Phát triển và ứng dụng các công nghệ hỗ trợ AI và Quang phổ học (NIR/HSI) để nhận diện chính xác vải pha trộn, nâng cao độ tinh khiết của nguyên liệu đầu vào — yếu tố tiên quyết cho chất lượng đầu ra.

Cơ học hóa cấu trúc dệt: Cần có các nghiên cứu hệ thống về tác động của các thông số cấu trúc vải (chiều dài mũi khâu, mật độ sợi dọc/ngang) đến hiệu suất thu hồi xơ. Việc định lượng hóa mối quan hệ giữa công đoạn xé thô và mở xơ tinh sẽ giúp tinh chỉnh các thông số máy móc để giảm thiểu hư tổn vật lý lên xơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Gan, S.; Xiao, S.; Liu, T.; Wang, C.; Li, S.; Sun, Y.; Tang, Y. *Tái chế sợi PET phế thải tại chỗ bằng cách đưa sợi phế thải dưới dạng bột nghiền vào để cải thiện chất lượng sản phẩm, tăng hiệu quả năng lượng và giảm tác động đến môi trường*. Tạp chí Kỹ thuật Sợi và Sản xuất. 2024
2. Damayanti, D.; Wulandari, LA; Bagaskoro, A.; Rianjanu, A.; Wu, HS *Các lộ trình khả thi cho công nghệ tái chế dệt may*. Polymers 2021 , 13 , 3834.
3. Celep, G.; Tetik, GD; Yilmaz, F. Những hạn chế của việc tái chế dệt may: *Lý do đằng sau sự phát triển của các loại sợi bền vững thay thế*. Trong Dệt may thế hệ tiếp theo ; IntechOpen: London, Vương quốc

Biến số môi trường: Nghiên cứu sâu hơn về tác động của độ ẩm đến hành vi lý tính của xơ tự nhiên (len, lanh) trong quá trình xử lý cơ học để thiết lập điều kiện khí quyển tối ưu cho nhà xưởng tái chế.

4.3. Tầm nhìn chiến lược

Một hệ thống tái chế cơ học hiệu quả trong tương lai phải là sự hợp nhất của ba yếu tố: Phân loại tự động hỗ trợ AI, Tiền xử lý hóa lý tiết kiệm chi phí và Cơ chế mở xơ tối ưu hóa. Việc giải quyết các "nút thắt" này không chỉ giúp giảm chi phí xử lý mà còn bảo tồn tối đa giá trị tài nguyên, trực tiếp giảm bớt gánh nặng sinh thái mà chuỗi cung ứng thời trang đang đặt lên hành tinh.

Anh, 2022.

4. Huang, X.; Tan, Y.; Huang, J.; Zhu, G.; Yin, R.; Tao, X.; Tian, X. *Công nghiệp hóa việc tái chế chất thải dệt may theo chu trình mở và khép kín hướng tới sự bền vững: Một bài đánh giá*. Tạp chí Sản xuất Sạch. 2024
5. Yousef, S.; Tatariants, M.; Tichonovas, M.; Kliucininkas, L.; Lukošius, S.; Yan, L. *Công nghệ xanh bền vững để thu hồi sợi bông và polyester từ chất thải dệt may*. Tạp chí Sản xuất Sạch. 2020 , 254 , 120078.
6. Raluca, BRAD *Kinh tế tuần hoàn và tái chế trong ngành dệt may*. Ann. Univ. Oradea. Fascicle Text. Leatherwork 2023 , 24 , 17–26.

- Ngày gửi bài: 25/05/2026
- Ngày phản biện: 27/05/2026
- Ngày duyệt đăng: 02/06/2026