

MÔ PHỎNG SỐ TÍNH CHẤT CƠ HỌC CỦA VẬT LIỆU DỆT Ở CẤP ĐỘ SỢI BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

NUMERICAL SIMULATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF TEXTILE MATERIALS AT THE FIBER SCALE USING THE FINITE ELEMENT METHOD

ThS. Nguyễn Thị Lan Anh

Khoa Dệt may Thời trang, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Email: ntlanh@uneti.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một phương pháp tổng quát nhằm mô phỏng cơ học vật liệu dệt ở cấp độ sợi, trong đó xét đến toàn bộ các sợi cấu thành và tương tác tiếp xúc - ma sát giữa chúng. Một chương trình phần tử hữu hạn sử dụng bộ giải ẩn được phát triển để mô hình hóa vải dệt như một hệ các phần tử dầm chịu chuyển vị lớn. Thuật toán phát hiện và xử lý số lượng lớn tiếp xúc được xây dựng theo hướng ổn định và hiệu quả, cho phép mô phỏng các mẫu gồm vài trăm sợi. Cấu hình ban đầu của vải được xác định thông qua mô phỏng quá trình tạo kiểu dệt, cung cấp thông tin về quỹ đạo sợi và hình dạng tiết diện bó sợi. Các trường hợp tải khác nhau được áp dụng, nhằm đánh giá cơ học của vật liệu. Kết quả trên mẫu vải phủ được trình bày để minh chứng cho phương pháp đề xuất.

Từ khoá: *Vật liệu dệt; Cấp độ sợi; Phương pháp phần tử hữu hạn; Tiếp xúc - ma sát.*

ABSTRACT

This paper presents a general numerical approach for modeling the mechanical response of textile materials at the fiber scale, explicitly accounting for individual fibers and their contact-friction interactions. An implicit finite element solver is developed to represent woven fabrics as assemblies of beam elements undergoing large displacements. Robust and efficient contact detection and resolution algorithms are implemented to handle the large number of interactions arising in such structures, enabling the simulation of samples composed of several hundred fibers. The initial configuration of the fabric is determined through a weaving pattern simulation, providing detailed information on fiber trajectories and tow cross-sectional shapes. Various loading cases are then applied, to evaluate the mechanical behavior of the material. Numerical results obtained for coated fabric samples are presented to demonstrate the capabilities of the proposed approach.

Keywords: *Textile materials; Fiber scale; Finite element method; Contact-friction interaction.*

1. GIỚI THIỆU

Tính chất cơ học của composite dệt chịu ảnh hưởng quyết định từ các cơ chế xảy ra ở cấp độ sợi và bó sợi, như nén ngang, trượt tiếp xúc - ma sát và khóa sợi. Các hiện tượng này tạo nên tính phi tuyến phức tạp của vải khô và composite gia cường vải, khó dự đoán nếu chỉ phân tích ở cấp trung mô.

Cách tiếp cận ở cấp độ sợi cho phép xây dựng mô hình tổng thể trực tiếp từ đặc tính cơ học của sợi, của ma trận đàn hồi và của tương tác tiếp xúc - ma sát giữa các sợi, đồng thời tránh các giả thiết trung gian cho bó sợi. Tuy nhiên, thách thức chính là hình học ban đầu của vải (quỹ đạo sợi) không được biết trước và số lượng tiếp xúc rất lớn.

Bài báo này đề xuất một phương pháp tổng quát dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn để mô hình hóa vải khô và composite dệt ở cấp độ sợi. Các sợi được biểu diễn bằng phần tử dầm 3D trong khuôn khổ chuyển vị lớn và biến dạng hữu hạn; bài toán cân bằng giả tĩnh được giải bằng bộ giải ẩn. Cấu hình ban đầu được xác định thông qua mô phỏng theo kiểu dệt đã chọn trước khi áp dụng các trường hợp tải.

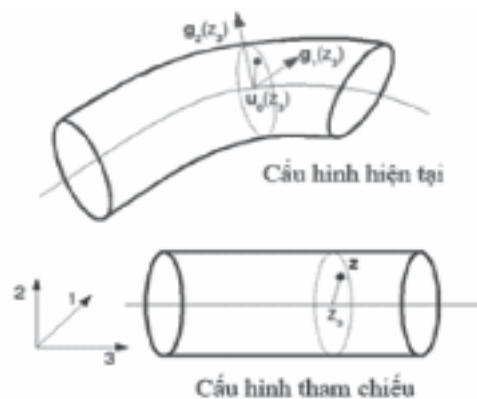
Một số nghiên cứu trước đây đã xem xét bài toán ở cấp độ sợi. Miao và cộng sự [1] sử dụng các phần tử số để xác định cấu hình ban đầu cho kết cấu bên và dệt 3D interlock. Finckh [2] mô phỏng quá trình dệt và tải động bằng bộ giải tường minh. Các nghiên cứu khác biểu diễn sợi/bó sợi bằng phần tử dầm hoặc mô hình 3D để phân tích tương tác giữa chúng [3-5]. Phương pháp trong nghiên cứu này trước đây đã được áp dụng cho các môi trường sợi rối khác [6, 7].

2. MÔ HÌNH DẦM 3D

Các mô hình dầm truyền thống giả thiết tiết diện luôn cứng và không biến dạng, do đó chuyển động của mỗi tiết diện được mô tả bởi sáu bậc tự do: ba tịnh tiến và ba quay. Cách tiếp cận này gặp hai hạn chế chính: xử lý quay lớn phức tạp và không xét được biến dạng tiết diện.

Để khắc phục, một mô hình dầm động học mở rộng với chín bậc tự do được sử dụng. Vị trí của mọi điểm trong dầm được khai triển theo đường trọng tâm thông qua ba véc-tơ động học: véc-tơ vị trí tâm tiết diện x_0 và hai véc-tơ tiết diện g_1, g_2 . Nhờ không áp đặt ràng buộc về độ lớn và góc giữa hai véc-tơ tiết diện, mô hình cho phép xét đến biến dạng phẳng của tiết diện bên cạnh các dạng biến dạng kéo, uốn, xoắn và cắt.

$$x(z_1, z_2, z_3) = x_0(z_3) + z_1 g_1(z_3) + z_2 g_2(z_3)$$



Hình 1. Ba véc-tơ động học được sử dụng để xác định vị trí trong mô hình dầm 3D

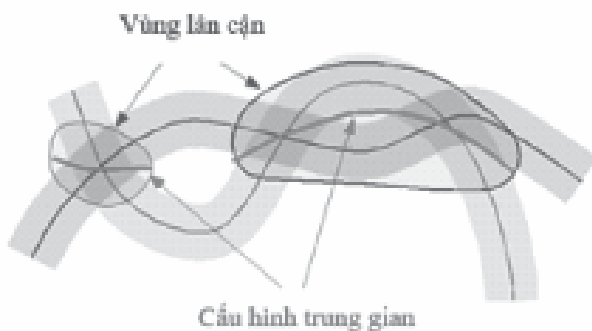
Chuyển vị của điểm vật chất được biểu diễn tương tự thông qua ba véc-tơ động học tương ứng. Do không có thành phần nào của tensor biến dạng Green-Lagrange bị triệt tiêu, mô hình có khả năng mô tả đầy đủ trạng thái biến dạng ba chiều, bao gồm cả hiệu ứng Poisson.

Vì tensor biến dạng là đầy đủ 3D, có thể áp dụng trực tiếp luật vật liệu đàn hồi ba chiều để mô hình hóa ứng xử cơ học của phần tử dầm.

3. MÔ HÌNH HÓA TIẾP XÚC

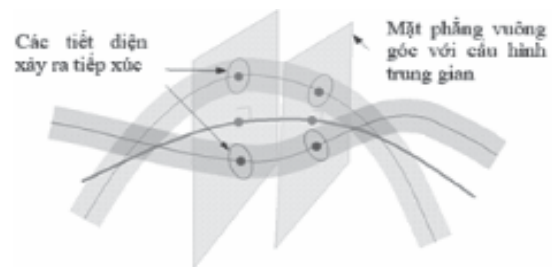
Mô hình hóa tiếp xúc đóng vai trò then chốt vì tương tác tiếp xúc - ma sát quyết định ứng xử đặc thù của kết cấu dệt. Khó khăn chính là số lượng vùng tiếp xúc lớn và luôn biến đổi, có thể xuất hiện hoặc biến mất tại bất kỳ vị trí, thời điểm nào.

Do bài toán xét chuyển vị lớn và sự tái sắp xếp sợi, phát hiện tiếp xúc phải được thực hiện lặp lại với chi phí tính toán thấp. Cấu hình tiếp xúc rất đa dạng, từ các điểm cục bộ tại giao nhau giữa các bó sợi đến các đường tiếp xúc dài giữa các sợi lân cận. Để xử lý tổng quát, phương pháp được đề xuất dựa trên việc tạo các phần tử tiếp xúc, là các cặp điểm vật chất trên bề mặt hai sợi, xác định theo tiêu chí hình học thông qua một hình học trung gian. Hình học này được xây dựng cho từng vùng lân cận, là các cặp đoạn đường trung tâm dầm nằm gần nhau, xác định bằng cách tìm các điểm gần nhất giữa hai đường. Từ đường trung gian, các mặt phẳng vuông góc được dùng để xác định các cặp tiết diện có khả năng tiếp xúc và lựa chọn các điểm biên tạo thành phần tử tiếp xúc.



Hình 2. Xác định hình học trung gian dựa trên các vùng lân cận

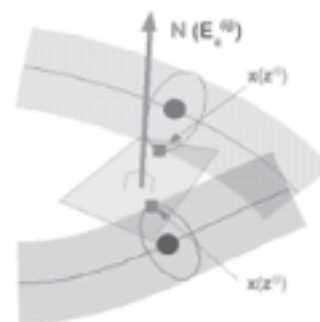
Một phần tử tiếp xúc là cặp điểm vật chất trên hai dầm khác nhau, được dự đoán có cùng vị trí trên hình học trung gian. Việc rời rạc hóa được thực hiện bằng cách phân bố các vị trí trên các hình học trung gian để sinh phần tử tiếp xúc. Vì các phần tử này phụ thuộc vào cấu hình biến dạng hiện tại, bài toán phát sinh thêm phi tuyến hình học và cần cập nhật khi nghiệm thay đổi.



Hình 3. Xác định các cặp tiết diện có khả năng phát sinh tiếp xúc

Để thiết lập điều kiện tiếp xúc, mỗi phần tử được gán một phương pháp tuyến, thường là phương nối tâm hai tiết diện tham gia tiếp xúc; phương này cũng phụ thuộc cấu hình hiện tại nên gây thêm phi tuyến. Điều kiện động học yêu cầu khe hở (gap) đo theo phương pháp tuyến luôn không âm, nhằm ngăn xuyên lún.

$$gap(E_c^{(ij)}) = (x(z^{(i)}) - x(z^{(j)}), N(E_c^{(ij)})) \geq 0$$



Hình 4. Xác định phương pháp tuyến cho một phần tử tiếp xúc

Luật tiếp xúc pháp tuyến được xây dựng theo dạng phạt, có hiệu chỉnh bậc hai cho xuyên lún rất nhỏ để ổn định thuật toán; hệ số phạt được hiệu chỉnh theo từng vùng lân cận. Ma sát tuân theo luật Coulomb, có xét chuyển vị đàn hồi thuận nghịch nhỏ trước khi trượt.

Bài toán phi tuyến được giải bằng các vòng lặp lồng nhau theo từng bước tải: (i) lập xác định và tạo phần tử tiếp xúc; (ii) lập cập nhật phương pháp tuyến; (iii) vòng lặp Newton-Raphson xử lý các phi tuyến còn lại (trạng thái tiếp xúc, ma sát, biến dạng hữu hạn). Do cấu trúc ba vòng lặp, hiệu quả tính toán phụ thuộc mạnh vào tốc độ hội tụ và cần hiệu chỉnh mô hình phù hợp.

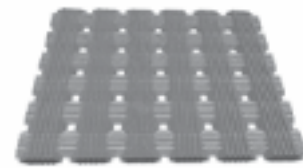
4. TÍNH TOÁN CẤU HÌNH BAN ĐẦU

Một nhiệm vụ quan trọng của mô phỏng là xác định hình học ban đầu chưa biết của kết cấu dệt. Thay vì mô phỏng toàn bộ quá trình dệt thực - tốn kém tính toán - cấu hình ban đầu được xác định từ một cấu hình phẳng giả định, trong đó các bó sợi giao và xuyên lún nhau, rồi dịch chuyển dần để tách chúng tại các điểm giao.

Tại mỗi điểm giao, kiểu dệt quy định thứ tự chồng lớp giữa các bó. Giai đoạn chuyển tiếp nhằm đảm bảo thứ tự này được thực hiện đúng. Cụ thể: (i) giữa các sợi trong cùng một bó, dùng phương pháp tuyến tiếp xúc tiêu chuẩn; (ii) giữa các sợi thuộc các bó khác nhau, chọn phương pháp tuyến theo phương thẳng đứng, định hướng theo thứ tự chồng lớp đã xác định. Nhờ đó, các bó giao nhau được đưa dần về đúng vị trí trên - dưới theo quy luật dệt. Khi không còn xuyên lún, phương pháp tuyến tiêu chuẩn được áp dụng cho toàn bộ phần tử tiếp xúc để tìm cấu hình cân bằng cuối cùng.

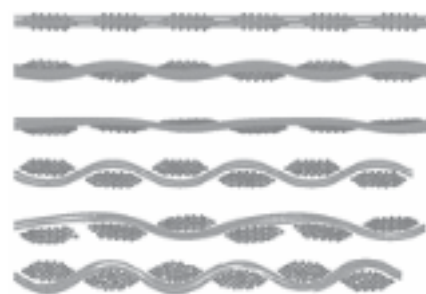
Các ứng dụng tiếp theo sử dụng cùng

một bố trí gồm 12 bó sợi thủy tinh (6 ngang, 6 dọc) nhằm tạo vải không cân bằng, với 408 sợi, 35112 nút, 316008 bậc tự do và khoảng 80000 phần tử tiếp xúc. Hai kiểu dệt được xét là dệt trơn và dệt chéo.



Hình 5. Cấu hình ban đầu của các bó sợi trước khi thực hiện quá trình dệt

Quá trình xác định hình học ban đầu tạo ra khoảng 80000 phần tử tiếp xúc; các lát cắt trung gian cho thấy các bó sợi được tách dần. Từ mô phỏng này có thể trích xuất nhiều thông tin hình học quan trọng như quỹ đạo sợi và bó sợi, biến dạng tiết diện bó, và độ cong cục bộ dọc theo sợi, phục vụ cho các phân tích tiếp theo.



Hình 6. Các lát cắt tại những bước khác nhau trong quá trình xác định cấu hình ban đầu đối với dệt trơn và dệt chéo

5. MÔ PHỎNG CÁC TRƯỜNG HỢP TẢI KHÁC NHAU

5.1. Thử nghiệm kéo hai trục trên mẫu vải khô

Các thí nghiệm kéo hai trục được thực hiện trên mẫu dệt trơn và dệt chéo.

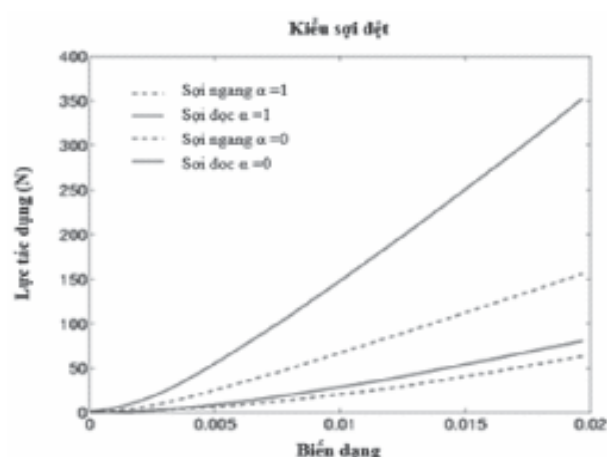


Trong thí nghiệm này, hai tỷ lệ giãn dài theo phương dọc và phương ngang đã được xét đến:

- Tỷ lệ bằng 1: Giãn dài bằng nhau theo cả hai phương.

- Tỷ lệ bằng 0: Không có giãn dài theo phương dọc.

Các đường cong tải tương ứng được biểu diễn trên Hình 7. Chúng thể hiện rõ ứng xử phi tuyến đặc trưng của loại vật liệu này.



Hình 7. Đường cong tải theo phương ngang và phương dọc trong thí nghiệm kéo hai trục trên mẫu vải khô không cân bằng đối với dệt trơn và dệt chéo

Hiệu ứng phi tuyến ở giai đoạn đầu của quá trình gia tải - thể hiện rõ hơn ở mẫu dệt chéo - chủ yếu có thể được giải thích bởi sự thay đổi hình học của vải do biến dạng của các bó sợi và khả năng tái sắp xếp các sợi bên trong bó sợi.

Điều này có thể quan sát trên Hình 8, trong đó các lát cắt của mẫu dệt chéo ở thời điểm bắt đầu và kết thúc thí nghiệm cho thấy sự thay đổi hình dạng tiết diện bó sợi cũng như quỹ đạo của các bó sợi.

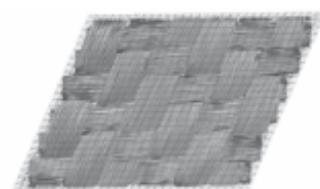


Hình 8. Các lát cắt của vải dệt chéo trước (trên) và sau (dưới) thí nghiệm kéo giãn 2%, cho thấy sự biến dạng và tái sắp xếp bên trong tiết diện các bó sợi

5.2. Thử nghiệm cắt trên composite dệt chéo

Một thí nghiệm cắt được thực hiện trên mẫu composite dệt chéo. Hình ảnh lưới biến dạng được trình bày trên Hình 9.

Biến dạng cắt có thể tiếp tục tăng cho đến khi đạt đến trạng thái “khóa”, khi các bó sợi song song lân cận bắt đầu tiếp xúc với nhau.

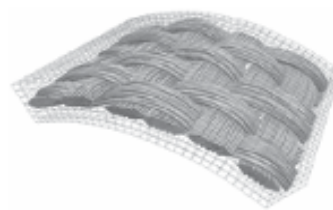


Hình 9. Hình ảnh mẫu composite dệt chéo chịu thí nghiệm cắt

5.3. Thử nghiệm uốn trên composite dệt chéo

Thử nghiệm cuối cùng được thực hiện trên mẫu composite là thử nghiệm uốn, trong đó các chuyển động quay ngược chiều nhau được áp đặt lên hai biên của mẫu (hình 10).

Thử nghiệm này cho thấy khả năng của mô hình trong việc xử lý các chuyển vị lớn.



Hình 10. Hình ảnh tổng thể của mẫu composite sau khi uốn

6. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất một phương pháp tổng quát mô phỏng ứng xử cơ học của vải và composite gia cường vải bằng phần tử hữu hạn trong khuôn khổ chuyển vị lớn và biến dạng hữu hạn, trong đó các sợi được mô hình hóa bằng dầm 3D và có xét tiếp xúc - ma sát. Trọng tâm của phương pháp là phát hiện và xử lý hiệu quả số lượng lớn tiếp xúc thông qua xác định vùng lân cận và xây dựng hình học trung gian để tự động tạo các phần tử tiếp xúc; quá trình này được cập nhật theo từng bước tải do phụ thuộc cấu hình biến dạng.

Nhờ các mô hình và thuật toán được tối ưu hóa, có thể phân tích các mẫu gồm vải trăm sợi với khoảng 100000 phần tử tiếp xúc trong thời gian hợp lý. Phương pháp được áp dụng trước hết để xác định hình học ban đầu của kết cấu dệt theo đúng thứ tự chồng lớp của kiểu dệt, đồng thời cung cấp thông tin chi tiết về quỹ đạo, hình dạng bó sợi và độ cong sợi. Khi bổ sung ma trận đàn hồi để tạo composite và áp dụng các trường hợp tải khác nhau, mô hình có khả năng tái hiện các hiệu ứng phi tuyến đặc trưng trong phạm vi tải rộng.

Với số lượng tham số đầu vào hạn chế, mô phỏng này là công cụ hiệu quả để phân tích cơ chế ở cấp sợi, dự đoán ứng xử cơ học tổng thể của composite dệt ở cấp vĩ mô, cũng như các hiện tượng cục bộ như phá hủy vi mô của sợi. ❖

Ngày nhận bài: 06/3/2026

Ngày phản biện: 18/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lomov, S. V., et al., “*Multi-scale modelling of textile composites: A review of recent developments*”. Composites Part A, 2019.
- [2]. Boisse, P., et al., “*Advanced mesoscopic finite element models for woven composite forming*”. International Journal of Material Forming, 2020.
- [3]. Durville, D., “*Contact-friction modelling in fibrous assemblies under large deformations*”. Computational Mechanics, 2019.
- [4]. Zeng, X., et al., “*Fiber-scale finite element modelling of woven composites considering frictional contact*”. Composite Structures, 2021.
- [5]. Wang, Y., et al., “*Geometrical reconstruction and mechanical prediction of 3D woven composites*”. Composites Science and Technology, 2022.
- [6]. Sherburn, M., et al., “*Digital element modelling of textile composites at the fibre scale*”. Mechanics of Materials, 2023.
- [7]. Yan, J., et al., “*Implicit finite element analysis of woven composite unit cells with contact interactions*”. Composite Structures, 2024.