

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP HCM
---oo0oo---**

PHAN THỊ ĐĂNG THU

PHÂN TÍCH TÍNH ỔN ĐỊNH KẾT CẤU DẦM BOM HƠI VẬT LIỆU COMPOSITE

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

**CHUYÊN NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ
Mã số: 9520103**

Thành Phố Hồ Chí Minh, tháng 8 năm 2021

TÓM TẮT

Luận án này trình bày việc xây dựng một mô hình số thiết lập chương trình thực nghiệm để khảo sát sự ổn định dầm bơm hơi được làm từ vật liệu composite.

Trong phần phân tích số, phương pháp đẳng hình học (Isogeometric Analysis (IGA)) được sử dụng để phân tích hiện tượng mất ổn định của dầm bơm hơi chịu lực nén dọc trục và dự đoán tải trọng mà tại đó sự phá hoại đầu tiên xảy ra. Lý thuyết dầm Timoshenko được sử dụng để xây dựng mô hình dầm làm bằng vật liệu bất đẳng hướng. Yếu tố phi tuyến tính hình học được xem xét bằng cách sử dụng khái niệm năng lượng, từ đó giải thích cho sự thay đổi của lực màng và năng lượng biến dạng khi dầm chịu uốn. Bằng cách áp dụng lý thuyết Lagrange và định luật công ảo, các phương trình cân bằng phi tuyến đã được rút xây dựng. Các phương trình này sau đó được rời rạc bằng cách sử dụng các hàm nội suy NURBS kế thừa từ phương pháp IGA để xây dựng các phương trình phi tuyến. Thuật toán Newton-Raphson sau đó được sử dụng để tìm lời giải cho các phương trình phi tuyến trên. Các kết quả số thu được từ quá trình phân tích được so sánh với kết quả thí nghiệm và cho thấy một sự tương đồng giữa kết quả thu được từ IGA và kết quả thực nghiệm. Mô hình số sau đó được sử dụng để khảo sát sự ảnh hưởng của các thông số vật liệu và hình học đối với khả năng chịu lực của dầm hơi chịu lực nén đúng tâm.

Trong phần thực nghiệm, các tính chất cơ học của vật liệu vải dệt composite được sử dụng để chế tạo dầm bơm hơi được xác định thông qua các thí nghiệm kéo dọc trục và hai trục. Các thí nghiệm xác định khả năng chịu lực của dầm hơi được thực hiện dưới áp lực được bơm khác nhau, từ đó phân tích sự ảnh hưởng của các đặc trưng vật liệu và áp lực bơm đến ứng xử ổn định của dầm hơi chịu nén đúng tâm. Các đường thực nghiệm thể hiện quan hệ lực nén và biến dạng được ghi nhận và minh họa, ngoài sự phá hoại (sự xuất hiện của các nếp nhăn) khi dầm hơi khi bắt đầu chịu lực đến lúc dầm bị phá hoại cũng được ghi nhận. Từ đó, khả năng chịu lực của dầm hơi qua các giai đoạn làm việc được ghi nhận.

CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU

1.1 Lời mở đầu

Các kết cấu dạng hơi hiện đang được sử dụng phổ biến trong các dự án công nghiệp và dân dụng, chẳng hạn như nhà phao trong khu vui chơi trẻ em, công chào, hình ảnh động vật, v.v... Tại Việt Nam, việc sử dụng các kết cấu bơm hơi là một lĩnh vực tương đối mới. Nói chung, việc thiết kế và phân tích các kết cấu bơm hơi cho các dự án lớn đã và đang phải đối mặt với những thách thức khó khăn. Điều này là do thực tế là ứng xử của kết cấu bơm hơi phụ thuộc vào áp suất bơm và vật liệu bên ngoài của kết cấu. Ngoài ra, sự thiếu hụt trong các nghiên cứu thực nghiệm về kết cấu bơm hơi cũng hạn chế việc áp dụng kết cấu này vào thực tế. Một số nhà nghiên cứu đã nghiên cứu các ứng dụng của kết cấu bơm hơi cho mục đích thực tế dựa trên các mô hình giải tích và phương pháp số. Tuy nhiên, việc sử dụng phương pháp giải tích thông thường hoặc phương pháp phân tử hữu hạn truyền thống vẫn có những giới hạn riêng.

1.2 Động lực của nghiên cứu

Việc sử dụng vật liệu vải dệt composite đã trở nên phổ biến hơn trong thời gian gần đây, chính vì vậy nhu cầu phân tích và thiết kế các kết cấu bơm hơi trở nên quan trọng hơn bao giờ hết. Chính vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện để tìm hiểu sự làm việc của kết cấu của dầm hơi chế tạo bằng vải dệt composite dưới tác dụng lực nén đúng tâm, trong đó cả phương pháp mô hình số và thực nghiệm đều được tiến hành. Bên cạnh đó, việc áp dụng phương pháp IGA để phân tích ứng xử ổn định của dầm hơi chưa từng được nghiên cứu cụ thể trước đây, do đó việc đề xuất một cách tiếp cận mới dựa trên phương pháp IGA được tiến hành.

1.3 Mục tiêu và phạm vi nghiên cứu

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là phân tích sự làm việc của dầm hơi làm bằng vải dệt composite bằng phương pháp mô phỏng số và thực nghiệm, qua đó tìm giá trị lực tới hạn và cơ chế phá hoại của kết cấu. Các mục tiêu cụ thể của nghiên cứu này có thể được tóm tắt như sau:

- 1) Phát triển một chương trình thực nghiệm để phân tích các hiện tượng mất ổn định của dầm hơi khi chịu tải nén đúng tâm.
- 2) Áp dụng phương pháp "Đẳng tham số - IGA" để phát triển một chương trình số nhằm phân tích hiện tượng mất ổn định của dầm hơi, qua đó xác định tải trọng tới hạn của dầm hơi với các điều kiện áp suất, vật liệu khác nhau.
- 3) So sánh các kết quả thực nghiệm và những kết quả thu được từ cách tiếp cận số để xác thực tính chính xác của chương trình được phát triển.

1.4 Phương pháp nghiên cứu

Để đạt được các mục tiêu nghiên cứu nêu trên, luận án này đã sử dụng một số phương pháp cụ thể như sau:

- Nghiên cứu, tìm hiểu các công trình nghiên cứu trước đây ở trong nước cũng như trên thế giới về các chủ đề của vật liệu vải dệt composite và kết cấu bơm hơi.
- Tham khảo, nghiên cứu và tổng hợp các mô hình và phương pháp tính toán của kết cấu bơm hơi làm bằng vải dệt composite, từ đó chọn một mô hình phù hợp để phát triển mô hình số dựa trên phương pháp IGA.
- Xây dựng chương trình thực nghiệm và phát triển mô hình số dựa trên nền tảng kiến thức cơ học.

1.5 Bố cục của luận án

Nội dung của luận án này được trình bày trong 6 chương như sau:

- *Chương 1* giới thiệu các thông tin cơ bản của luận án.
- *Chương 2* giới thiệu các nghiên cứu gần đây về kết cấu bơm hơi dựa trên phương pháp thực nghiệm và phương pháp mô phỏng số.
- *Chương 3* trình bày các đặc trưng cơ bản của IGA và phát triển các phương trình cơ bản cho bài toán ổn định của dầm hơi.
- *Chương 4* trình bày quá trình xây dựng mô hình số dựa trên phương pháp IGA.

- *Chương 5* trình bày quá trình xây dựng mô hình thực nghiệm, bao gồm việc lựa chọn vật liệu, kế hoạch tạo mẫu, quá trình thí nghiệm. Các kết quả thí nghiệm cũng được trình bày trong chương này.

- *Chương 6* tổng hợp những ý chính trong luận án cũng như tóm tắt những đóng góp chính và kết quả chính trong nghiên cứu này. Các kết luận và phát hiện quan trọng cũng được đề cập trong chương này.

CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN

2.1. Phương pháp giải tích

Các nghiên cứu về ứng xử cơ bản của kết cấu bơm hơi đã được thực hiện rộng rãi bởi các nhà nghiên cứu khác nhau bằng cách sử dụng phương pháp giải tích. Một số tác giả áp dụng lý thuyết dầm Euler Bernoulli để mô hình hóa dầm hơi, các nghiên cứu tiêu biểu có thể kể đến như Comer, R. L., & Levy, S. cho dầm hơi làm bằng vật liệu đẳng hướng. Sau đó, nghiên cứu của Comer và Levy đã được Webber, J.P.H. mở rộng để dự đoán tải trọng phá hoại của các dầm hơi dạng công xôn. Ngoài ra, Main et al. cũng đã thực hiện các nghiên cứu cho một dầm hơi dạng xôn xôn đẳng hướng. Sau đó, Suhey et al. xem xét ứng xử của một ống điều áp dưới tác dụng của tải phân phối đều. Bằng cách áp dụng lý thuyết dầm Euler-Bernoulli, vật liệu của dầm được cho là đẳng hướng và kết quả chuyển vị của dầm thu được từ phương pháp giải tích. Lý thuyết dầm Timoshenko được một số tác giả khác sử dụng và cho rằng đó là lý thuyết hữu hiệu để áp dụng cho bài toán khi thông số áp suất không xuất hiện trong lời giải như được đề cập trong các bài toán sử dụng lý thuyết Euler Bernoulli. Một chuỗi các phương trình phi tuyến được xây dựng bởi Fichter để phân tích bài toán uốn và xoắn của các dầm hơi hình trụ. Các phương trình này được thiết lập dựa trên ba giả định quan trọng sau: mặt cắt ngang của dầm hơi không thay đổi dưới tác dụng của tải trọng; thứ hai, chuyển vị và góc xoay mặt cắt ngang nhỏ; và biến dạng theo chu vi là không đáng kể và có thể bỏ qua. Lý thuyết Timoshenko và phương pháp cực tiểu năng lượng được sử dụng.

Sau đó, Topping, A.D. và Douglas, WJ đã phân tích độ cứng kết cấu của một dầm bơm hơi công xôn hình trụ bị ảnh hưởng bởi biến dạng lớn. Lý thuyết đàn hồi hữu hạn và lý thuyết về biến dạng nhỏ đã được sử dụng để có được kết quả phân tích rõ ràng. Các phân tích của họ cũng giải thích cho những thay đổi của hình học và vật liệu xảy ra trong quá trình bơm hơi. Wielgosz và Thomas phát triển các nghiệm giải tích cho bài toán các tấm hoặc ống bơm hơi dựa trên lý thuyết Timoshenko, các phương trình cân bằng ở trạng thái biến dạng của dầm hơi được thiết lập để tính đến độ cứng hình học và hiệu ứng lực do áp suất bên trong gây ra. Họ đã chỉ ra rằng khả năng chịu lực tới hạn tỷ lệ thuận với áp suất bơm và chuyển vị tỷ lệ nghịch với tính chất vật liệu chế tạo áp suất bơm.

Wielgosz và Thomas đã trình bày kết quả thực nghiệm và tính toán về chuyển vị của các ống hơi chịu moment uốn. Các thí nghiệm đã chỉ ra rằng ứng xử ống trông giống như của các tấm bơm hơi. Phương trình cân bằng được viết ở trạng thái biến dạng để tính đến độ cứng hình học. So sánh giữa kết quả thực nghiệm và giải tích đã chứng minh độ chính xác của lý thuyết dầm để giải quyết các vấn đề liên quan đến bài toán dầm hơi chịu uốn. Le và Wielgosz đã sử dụng nguyên lý công ảo ở dạng Lagrang và giả thuyết Saint Venant Kirchhoff thông thường với sự chuyển vị và quay hữu hạn để rút ra các phương trình phi tuyến của dầm hơi đẳng hướng. Các phương trình cân bằng phi tuyến đã được tuyến tính hóa dựa trên tham chiếu hình dạng dầm ở dạng ứng suất trước. Các phương trình tuyến tính này đã cải thiện lý thuyết của Fichter.

Mặc dù rất nhiều nhà nghiên cứu đã thực hiện nhiều nỗ lực trong việc phát triển một mô hình giải tích trong nhiều năm qua để giải quyết bài toán dầm hơi, tuy nhiên có thể thấy gần như họ chỉ tập trung vào loại vật liệu vải đẳng hướng.

2.2. Phương pháp số

Ngày nay, tính toán và thiết kế dầm hơi dầm đặt ra những thách thức đáng kể, đặc biệt là trong trường hợp các mô hình giải tích thường không thể áp dụng trong các trường hợp tổng quát về tải trọng và điều kiện biên. Chính vì vậy, một số các nghiên cứu về dầm hơi bằng cách sử dụng các phương pháp số cũng đã được tiến hành. Steeves đã sử dụng phương pháp năng lượng cực tiểu để rút ra một tập hợp các phương trình vi phân thể hiện chuyển vị của dầm bom hơi. Một xấp xỉ đơn giản hóa, trong đó giả sử rằng các mặt cắt ngang của dầm không thay đổi được sử dụng để đưa bài toán về dạng một chiều, một điều quan trọng khác là phương pháp này cho phép bao hàm áp suất vào độ cứng của dầm. Quigley et al. và Cavallaro et al. đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn để dự đoán ứng xử tuyến tính dầm vải bom hơi. Tuy nhiên, áp suất trong được xem như như một lực căng trước và được áp dụng bên ngoài dầm. Tuy nhiên, phương pháp này dẫn đến sự gia tăng không giới hạn độ cứng của dầm hơi khi áp suất bom tăng. Wielgosz và Thomas đã nghiên cứu ứng xử uốn của các ống và tấm vải bom hơi, từ đó phát triển một phần tử dầm dựa trên lý thuyết Timoshenko. Trong cách tiếp cận của họ, lực được tạo ra bởi áp lực bom bên trong kể đến cho sự tăng độ cứng của dầm. Tuy nhiên, phần tử này không xem xét nếp gấp vải khi dầm chịu lực. Bouzidi et al. đã phát triển lý thuyết và phương pháp số của cho bài toán uốn hình trụ của màng đẳng hướng điều áp. Tải trọng bên ngoài chủ yếu là một áp lực bình thường cho màng và sự phát triển đã được thực hiện theo các giả định của áp suất bom, chuyển vị lớn và biến dạng hữu hạn. Bài toán được giải dựa trên lý thuyết cực tiểu năng lượng. Suhey et al. cũng trình bày một nghiên cứu về mô phỏng số và thiết kế của một lồng nuôi trồng thủy sản mở đại dương bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn cho lý thuyết màng đẳng hướng. Sự không ổn định cho kết quả số gây ra bởi lực màng đã được loại bỏ bằng cách thêm một phần tử (shell) vỏ nhân tạo với độ cứng nhỏ. Mô hình này sau đó đã được so sánh với kết quả từ thuyết dầm sửa đổi cho kết cấu bom hơi, kết quả cho thấy kết quả số và lý thuyết tương quan với nhau. Le và Wielgosz đã rời rạc các phương trình phi tuyến thu được trước đó để xây dựng một mô hình phần tử hữu hạn cho các bài toán tuyến tính của dầm vải đẳng hướng có độ bom hơi cao. Kết quả số của họ thu được dựa trên các phần tử dầm đã được chứng minh là gần như tương tự phương pháp mô phỏng dầm bằng phần tử 3D đẳng hướng, cũng như kết quả phân tích thu được trong Le và Wielgosz. Davids và Davids và Zhang đã xây dựng một phần tử dầm hơi dựa trên lý thuyết Timoshenko để phân tích chuyển vị phi tuyến của dầm vải đẳng hướng điều áp, cũng như khảo sát sự ảnh hưởng của áp lực bom lên ứng xử của dầm. Cơ sở của việc xây dựng phần tử trên là xem xét sự gia tăng của công ảo khi có sự xuất hiện của áp suất bom. Các nghiên cứu tham số cũng đã được phân tích để chứng minh tầm quan trọng của việc kể đến áp lực trong các mô hình của họ. Gần đây, Malm et al. đã sử dụng phần tử màng vải đẳng hướng 3D để dự đoán ứng xử của dầm hơi. So sánh giữa các kết quả thu được từ phương pháp số với các kết quả lý thuyết, thực nghiệm cho thấy độ chính xác của lý thuyết dầm thông thường dùng để mô hình hóa dầm hơi làm bằng vải đẳng hướng. Trong hầu hết các nghiên cứu trước đây, vải luôn được cho là vật liệu đẳng hướng. Tuy nhiên, một số nhóm nghiên cứu cũng đã đề cập đến sự làm việc của dầm hơi làm bằng vải bất đẳng hướng. Plaut et al. đã nghiên cứu ảnh hưởng của tải trọng tuyết và gió trên một vòm bom hơi trong giả định lý thuyết vỏ mỏng tuyến tính của Sanders. Họ đã sử dụng lý thuyết này để xây dựng các phương trình điều chỉnh, bao gồm hiệu ứng của các ứng suất màng ban đầu. Vật liệu được giả định có ứng xử đàn hồi tuyến tính, không đồng nhất và trục hướng, ngoài ra các kết quả xấp xỉ thu được bằng phương pháp Rayleigh-Ritz. Plagianakos et al. cũng đã nghiên cứu việc áp dụng áp suất thấp trên các dầm hơi để ước tính khả năng làm việc của nó đối với các ứng dụng kể đến tải trọng nén dọc trục. Các thí nghiệm nén đã được tiến hành trên một số cột hình trụ với hai đầu là các gối tựa, chuyển vị của kết cấu được đo ở một số vị trí dọc theo nhịp, trong khi các lực dọc trục được xác định thực nghiệm thông qua các phép đo biến dạng. Kết quả so sánh cho thấy sự tương quan tốt giữa kết quả mô phỏng số và kết quả thực nghiệm. Bên cạnh đó, Nguyen et al. đã nghiên cứu một cách tiếp cận giải tích để tìm tải trọng nén tới hạn

cho dầm bơm hơi dựa trên lý thuyết 3D Timoshenko. Về ứng suất ổn định, mô hình dầm bơm hơi được đề xuất đã chứng minh sự điều chỉnh hiệu quả so với các mô hình trước đây, trong đó, phương pháp Lagrangian tổng của động học, lý thuyết Timoshenko, và các lý thuyết công ảo đã được áp dụng để xây dựng các phương trình cơ bản của dầm hơi.

Nhìn chung, có thể thấy một số lượng lớn các nghiên cứu trước đó đã được tiến hành để phát triển các mô hình số để giải quyết bài toán dầm hơi, tuy nhiên, nghiên cứu về ảnh hưởng của vải composite trên ứng xử kết cấu vẫn chưa được nghiên cứu. Bên cạnh đó, tất cả các nghiên cứu trước đây chỉ phát triển dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn truyền thống.

CHƯƠNG 3: CƠ SỞ LÝ THUYẾT

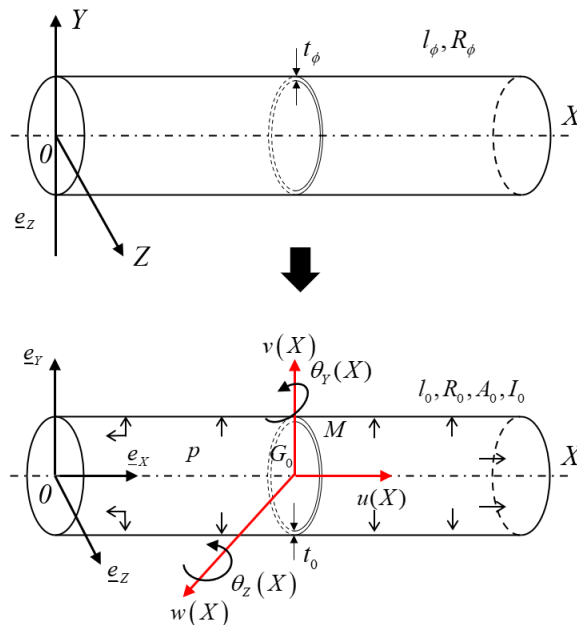
3.1 Tổng quan phương pháp đẳng hình học IGA

Trong chương này, các kiến thức tổng quan về hàm NURBS được tập trung mô tả. Những thông tin cơ bản về IGA và hàm nội suy NURBS có thể được tìm thấy trong các cuốn sách của Piegl. Thuật ngữ phân tích đẳng hình học (IGA) được đề xuất bởi T.J.R. Hughes và các cộng sự, có nghĩa là mô hình phân tích sử dụng các công cụ nội suy dựa trên các công cụ mô tả hình học vật thể và có thể hiểu như là một cải tiến của phân tích isoparametric. Ý tưởng cốt lõi của phân tích đẳng hình học là các hàm được sử dụng cho mô tả hình học trong CAD được sử dụng làm các hàm dạng trong phương pháp số truyền thống. Bằng cách này, toàn bộ quá trình chia lưới có thể được lược bỏ và hai mô hình để thiết kế và phân tích hợp nhất thành một.

3.2 Phương trình ổn định dựa trên lý thuyết cơ học vật rắn biến dạng về các vấn đề ổn định của dầm hơi

3.2.1 Mô tả toán học về dầm hơi

Trong nghiên cứu này, lý thuyết dầm Timoshenko làm từ vật liệu trục hướng được tập trung nghiên cứu. Đối với các kết cấu bơm hơi, tải được áp dụng trong hai giai đoạn: Đầu tiên, dầm bị bơm hơi lên áp suất p và các lực bên ngoài khác lên dầm. Ở bước đầu tiên, áp suất bên trong bằng không và dầm ở trạng thái ban đầu **Hình 3.1a**. Cấu hình tham chiếu tương ứng với giai đoạn đầu tiên được minh họa trong **Hình 3.1b**. Các ứng suất Green-Lagrange được sử dụng để kể đến các phi tuyến hình học.



Hình 3.1 Dầm bơm hơi: (a) ở trạng thái ban đầu và (b) trong cấu hình tham chiếu (trạng thái bơm hơi)

Hình 3.1 cho thấy một dầm hình trụ bơm hơi, trong đó l_0, R_0, t_0, A_0 thể hiện chiều dài, bán kính bên ngoài, độ dày vải, mặt cắt ngang và moment quán tính I_0 xung quanh các trục chính của quán tính Y và Z của dầm. A_0 và được I_0 cho bởi

$$A_0 = 2\pi R_0 t_0 \quad 3.1$$

$$I_0 = \frac{A_0 R_0^2}{2} \quad 3.2$$

trong đó kích thước tham chiếu l_0, R_0 và t_0 phụ thuộc vào áp lực bơm và tính chất cơ học của vải Apedo [45]:

$$l_0 = l_\phi + \frac{pR_\phi l_\phi}{2E_t t_\phi} (1 - 2\nu_{lt}) \quad 3.3$$

$$R_0 = R_\phi + \frac{pR_\phi^2}{2E_t t_\phi} (2 - \nu_{lt}) \quad 3.4$$

$$t_0 = t_\phi + \frac{3pR_\phi}{2E_t} \nu_{lt} \quad 3.5$$

trong đó l_ϕ, R_ϕ và t_ϕ tương ứng là chiều dài, độ dày vải và bán kính bên ngoài của dầm ở trạng thái ban đầu.

Áp suất bên trong p được giả định là không đổi, giúp đơn giản hóa việc phân tích và phù hợp với các quan sát thực nghiệm trong các nghiên cứu trước đây. Áp lực ban đầu diễn ra trước khi tải trọng bên ngoài được áp dụng.

Tỷ lệ độ mảnh là $\lambda_s = \frac{L}{\rho}$ với $L = \mu l_0$ là chiều dài dầm và ρ là bán kính quán tính của

dầm, lấy bằng $\rho = \sqrt{\frac{I_0}{A_0}}$

M là một điểm trên mặt cắt ngang hiện tại và G_0 trọng tâm của mặt cắt ngang hiện tại nằm trên trục X. Hai giả định đơn giản hóa của Fichter được áp dụng như sau:

- Mặt cắt ngang của dầm bơm hơi đang được xem xét được giả định là hình tròn và duy trì hình dạng của nó sau khi biến dạng, do đó không có biến dạng và mất ổn định cục bộ;
- Các góc quay xung quanh các trục quán tính chính của dầm nhỏ và góc quay xung quanh trục dầm là không đáng kể.

3.2.2 Phương trình lý thuyết

3.2.2.1 Quan hệ động học

Vật liệu được giả định là trục hướng và hướng dọc của vải được giả định trùng với trục dầm. Mô hình có thể được điều chỉnh cho phù hợp với trường hợp khác có các trục theo các hướng khác nhau. Trong trường hợp này, một góc quay bổ sung có thể được sử dụng để liên kết các hướng trục hướng và các trục dầm. Trường hợp này không được giải quyết ở đây bởi vì phần lớn các hướng chính trục hướng trùng với hướng dọc và chu vi của dầm được sử dụng trong thực tế. Với các giả thuyết được đề xuất bởi Fichter, các thành phần chuyển vị của một điểm tùy ý $M(X, Y, Z)$ trên dầm là:

$$\underline{\mathbf{u}}(M) = \begin{Bmatrix} \underline{u}_X \\ \underline{u}_Y \\ \underline{u}_Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u(X) \\ v(X) \\ w(X) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Z\theta_Y(X) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -Y\theta_Z(X) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 3.6$$

Trong đó $\underline{u}_x, \underline{u}_y, \underline{u}_z$ là các chuyển vị theo các trục tọa độ, $u(X), v(X)$ và $w(X)$ tương ứng với sự chuyển vị của trọng tâm của mặt cắt hiện tại tại trục X , liên quan đến (X, Y, Z) ; $\theta_y(X)$ và $\theta_z(X)$ là các góc quay của của trọng tâm xung quanh cả hai trục quán tính chính của dầm. Từ đó, một chuyển vị ảo tùy ý tại vị trí hiện tại của điểm vật liệu M là $\delta \underline{\mathbf{u}}$, với

$$\delta \underline{\mathbf{u}} = \begin{Bmatrix} \delta u(X) \\ \delta v(X) \\ \delta w(X) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Z \delta \theta_y(X) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -Y \delta \theta_z(X) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad 3.7$$

Định nghĩa của biến dạng tại một điểm tùy ý như một hàm của chuyển vị là:

$$\underline{\underline{\mathbf{E}}} = \underline{\underline{\mathbf{E}}}_l + \underline{\underline{\mathbf{E}}}_{nl} \quad 3.8$$

trong đó $\underline{\mathbf{E}}_l$ và $\underline{\mathbf{E}}_{nl}$ tương ứng là các biến dạng tuyến tính và phi tuyến tính Green-Lagrange. Thuật ngữ phi tuyến có tính đến các phi tuyến hình học. Các trường ứng suất phụ thuộc vào các trường chuyển vị như sau:

$$\underline{\underline{\mathbf{E}}}_l = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial X} \\ \frac{\partial u_y}{\partial Y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial Z} \\ \frac{\partial u_x}{\partial Y} + \frac{\partial u_y}{\partial X} \\ \frac{\partial u_x}{\partial Z} + \frac{\partial u_z}{\partial X} \\ \frac{\partial u_y}{\partial Z} + \frac{\partial u_z}{\partial Y} \end{Bmatrix}, \underline{\underline{\mathbf{E}}}_{nl} = \begin{Bmatrix} \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,x}^T \underline{\mathbf{u}}_{,x} \\ \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,y}^T \underline{\mathbf{u}}_{,y} \\ \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,z}^T \underline{\mathbf{u}}_{,z} \\ \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,x}^T \underline{\mathbf{u}}_{,y} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,y}^T \underline{\mathbf{u}}_{,x} \\ \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,x}^T \underline{\mathbf{u}}_{,z} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,z}^T \underline{\mathbf{u}}_{,x} \\ \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,y}^T \underline{\mathbf{u}}_{,z} + \frac{1}{2} \underline{\mathbf{u}}_{,z}^T \underline{\mathbf{u}}_{,y} \end{Bmatrix} \quad 3.9$$

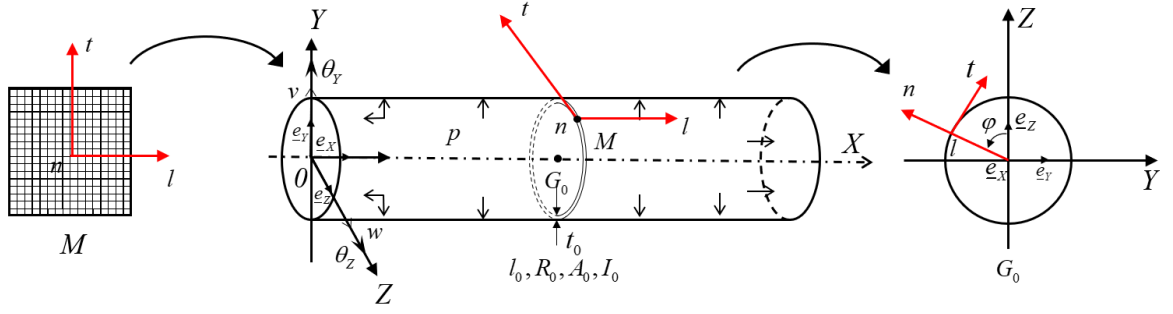
Các thuật ngữ phi tuyến có thứ tự cao hơn là tích của các vectơ được định nghĩa như sau

$$\underline{\mathbf{u}}_{,x} = \begin{Bmatrix} u_{x,x} \\ u_{y,x} \\ u_{z,x} \end{Bmatrix}, \underline{\mathbf{u}}_{,y} = \begin{Bmatrix} u_{x,y} \\ u_{y,y} \\ u_{z,y} \end{Bmatrix}, \underline{\mathbf{u}}_{,z} = \begin{Bmatrix} u_{x,z} \\ u_{y,z} \\ u_{z,z} \end{Bmatrix} \quad 3.10$$

3.2.2.2 Quan hệ ứng suất – biến dạng

Trong phần này, mối quan hệ ứng suất – biến dạng cho vật liệu trục hướng theo định lý Saint Venant-Kirchhoff được sử dụng. Phương trình năng lượng liên quan đến trường hợp này được gọi là phương trình năng lượng tự do Helmholtz. $\Phi_E = \Phi(\underline{\underline{\mathbf{E}}})$. Để mô tả ứng xử của dầm bơm hơi, hai hệ tọa độ cần được xác định: Một hệ tọa độ hướng dọc và hệ tọa độ ngang cục bộ liên quan đến từng điểm của màng trùng với hướng chính của vải như **Hình 3.2a**. Còn lại là hệ tọa độ Cartesian gắn vào dầm như **Hình 3.2b**. Các thành phần của tensor Piola-Kirchhoff thứ hai được đưa ra bởi các mối quan hệ ứng suất phi tuyến $\underline{\underline{\mathbf{S}}}$

$$\underline{\underline{\mathbf{S}}} = \underline{\underline{\mathbf{S}}}^o + \frac{\partial \Phi}{\partial \underline{\underline{\mathbf{E}}}} = \underline{\underline{\mathbf{S}}}^o + \underline{\underline{\mathbf{C}}}\underline{\underline{\mathbf{E}}} \quad 3.11$$



Hình 3.2 (a) Hệ tọa độ cục bộ, (b) Hệ tọa độ Cartesian với áp $\underline{\underline{\mathbf{S}}}$ là tensor ứng với áp suất bơm.

Trong đó

- $\underline{\underline{\mathbf{S}}}$ là tensor ứng với áp suất bơm ban đầu
- Tensor Piola-Kirchhoff thứ hai được viết trong hệ tọa độ dầm như sau

$$\underline{\underline{\mathbf{S}}} = \begin{bmatrix} S_{XX} & S_{XY} & S_{XZ} \\ & S_{YY} & S_{YZ} \\ \text{symmetrical} & & S_{ZZ} \end{bmatrix} \quad 3.12$$

- $\underline{\underline{\mathbf{C}}}$ là tensor đàn hồi bậc bốn.

Nhìn chung, tensor áp suất bơm ban đầu được giả định có dạng cầu và đẳng hướng

$$\underline{\underline{\mathbf{S}}} = S^o \underline{\underline{\mathbf{I}}} \quad 3.13$$

Trong đó $\underline{\underline{\mathbf{I}}}$ là tensor đơn vị bậc hai và $S^o = \frac{N_o}{A_o}$ là giá trị vô hướng thể hiện giá trị ứng

sức trước. Các tensor thể hiện trong tọa độ trục dầm có thể được tính toán từ tensor đàn hồi trục hướng cục bộ bằng cách sử dụng ma trận quay $\underline{\underline{\mathbf{R}}}$:

$$C_{ijkl} = R_{im} R_{jn} R_{kp} R_{lq} C_{mnpq}^{loc} \quad 3.14$$

Với $i, j, k, m, n, p, q = 1, \dots, 3$, trong đó

$$\underline{\underline{\mathbf{R}}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad 3.15$$

và

$$\underline{\underline{\mathbf{C}}}^{loc} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad 3.16$$

Tensor cuối cùng được thể hiện trong tọa độ trục dầm thu được như

$$\underline{\underline{\mathbf{C}}} = \begin{bmatrix} C_{11} & c^2 C_{12} & s^2 C_{12} & cs C_{12} & 0 & 0 \\ & c^4 C_{22} & c^2 s^2 C_{22} & c^3 s C_{22} & 0 & 0 \\ & & s^4 C_{22} & cs^3 C_{22} & 0 & 0 \\ & & & c^2 s^2 C_{22} & 0 & 0 \\ & & & & s^2 C_{66} & cs C_{66} \\ \text{symmetrical} & & & & & c^2 C_{66} \end{bmatrix} \quad 3.17$$

Trong đó $c = \cos \varphi$ và $s = \sin \varphi$, với $\varphi = (e_z, n)$ là góc giữa trục Z và vector pháp tuyến của màng. Các thành phần của tensor được cho như sau

$$C_{11} = \frac{E_t}{1 - v_{lt}v_{tl}}; C_{12} = \frac{E_tv_{tl}}{1 - v_{lt}v_{tl}};$$

$$C_{22} = \frac{E_t}{1 - v_{lt}v_{tl}}; C_{66} = G_{lt} \quad \text{and} \quad \frac{E_t}{v_{lt}} = \frac{E_t}{v_{tl}}$$

3.2.3 Nguyên lý công ảo

Các phương trình cân bằng của dầm bơm hơi được xây dựng dựa trên nguyên lý công ảo (VWP). VWP áp dụng cho dầm ở trạng thái ban đầu của nó được thể hiện như sau

$$\delta W_{\text{int}} = \delta W_{\text{ext}}^d + \delta W_{\text{ext}}^p, \forall \delta \underline{\mathbf{u}} \quad 3.18$$

$$\Leftrightarrow \int_{V_o} \underline{\mathbf{S}} : \delta \underline{\mathbf{E}} dV_o = \int_{V_o} \mathbf{f} \cdot \delta \underline{\mathbf{u}} dV_o + \{R \cdot \delta \underline{\mathbf{u}}\} + \int_{\partial V_o} \mathbf{t} \delta \underline{\mathbf{u}} dA, \forall \delta \underline{\mathbf{u}} \quad 3.19$$

trong đó \mathbf{f} và \mathbf{t} là lực trên mỗi đơn vị thể tích và màng, được thể hiện như bên trái của **phương trình 3.18**, chúng được xây dựng từ tensor Piola-Kirchhoff $\underline{\mathbf{S}}$ và biến dạng Green $\delta \underline{\mathbf{E}}$

Tensor ứng suất Green được viết trong hệ tọa độ dầm như sau

$$\delta \underline{\mathbf{E}} = \delta \underline{\mathbf{E}}_l + \delta \underline{\mathbf{E}}_{nl} \quad 3.20$$

Trong đó

$$\delta \underline{\mathbf{E}}_l = \left[\delta E_{XX}^l \quad \delta E_{YY}^l \quad \delta E_{ZZ}^l \quad \delta E_{YZ}^l \quad \delta E_{ZX}^l \quad \delta E_{XY}^l \right]^T \quad 3.21$$

$$\delta \underline{\mathbf{E}}_{nl} = \left[\delta E_{XX}^{nl} \quad \delta E_{YY}^{nl} \quad \delta E_{ZZ}^{nl} \quad \delta E_{YZ}^{nl} \quad \delta E_{ZX}^{nl} \quad \delta E_{XY}^{nl} \right]^T \quad 3.22$$

với

$$\begin{aligned} \delta E_{XX}^l &= \delta u_{,X} + Z\delta\theta_{Y,X} - Y\delta\theta_{Z,X} \\ \delta E_{YY}^l &= 0 \\ \delta E_{ZZ}^l &= 0 \\ \delta E_{YZ}^l &= 0 \\ \delta E_{XZ}^l &= \delta w_{,X} + \delta\theta_{Y,X} \\ \delta E_{XY}^l &= \delta v_{,X} - \delta\theta_Z \end{aligned} \quad 3.23$$

và

$$\begin{aligned} \delta E_{XX}^{nl} &= (u_{,X} + Z\theta_{Y,X} - Y\theta_{Z,X})\delta u_{,X} + v_{,X}\delta v_{,X} \\ &\quad + w_{,X}\delta w_{,X} + Z(u_{,X} + Z\theta_{Y,X} - Y\theta_{Z,X})\delta\theta_{Y,X} \\ &\quad - Y(u_{,X} + Z\theta_{Y,X} - Y\theta_{Z,X})\delta\theta_{Z,X} \\ \delta E_{YY}^{nl} &= \theta_Z\delta\theta_Z \\ \delta E_{ZZ}^{nl} &= \theta_Y\delta\theta_Y \\ \delta E_{YZ}^{nl} &= (\theta_Z\delta\theta_Y + \theta_Y\delta\theta_Z) \\ \delta E_{XZ}^{nl} &= \theta_Y\delta u_{,X} + (u_{,X} + Z\theta_{Y,X} - Y\theta_{Z,X})\delta\theta_Y \\ &\quad + Z\theta_Y\delta\theta_{Y,X} - Y\theta_Y\delta\theta_{Z,X} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta E_{XY}^{nl} = & -\theta_z \delta u_{,x} - Z \theta_z \delta \theta_{Y,X} \\ & -s(u_{,x} + Z \theta_{Y,X} - Y \theta_{Z,X}) \delta \theta_z + Y \theta_z \delta \theta_{Z,X}\end{aligned}\quad 3.24$$

Các lực và moment kết quả tổng quát tác động lên mặt cắt tham chiếu A_0 được thể hiện thông qua các ứng suất trong dầm bằng như sau (Q_i ($i = 1, \dots, 10$))

$$\begin{Bmatrix} N \\ T_y \\ T_z \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \int_{A_0} \begin{Bmatrix} S_{XX} \\ S_{XY} \\ S_{XZ} \\ ZS_{XX} \\ -YS_{XX} \end{Bmatrix} dA_0, \quad 3.25$$

$$Q_i = \int_{A_0} \begin{Bmatrix} -YS_{XX} \\ Z^2 S_{XX} \\ -ZS_{XY} \\ ZS_{XZ} \\ Y^2 S_{XX} \\ YS_{XY} \\ -YS_{XZ} \\ S_{YY} \\ S_{ZZ} \\ -S_{YZ} \end{Bmatrix} dA_0, \quad i = 1, \dots, 10 \quad 3.26$$

trong đó, N tương ứng với lực trục, T_y và T_z là lực cắt theo hướng Y và Z tương ứng, M_y và M_z là moment uốn quanh trục Y và Z . Số lượng các giá trị Q_i phụ thuộc vào hình học ban đầu của mặt cắt ngang:

$$\begin{aligned}N = \int_{A_0} S_{XX} dA = & N^0 + \left\{ C_{11} \left[u_{,x} + \frac{1}{2} (u_{,x}^2 + v_{,x}^2 + w_{,x}^2) \right] \right. \\ & \left. + \frac{1}{4} C_{12} (\theta_Y^2 + \theta_Z^2) \right\} A_0 + \frac{1}{2} C_{11} I_0 (\theta_{Y,Z}^2 + \theta_{Z,X}^2)\end{aligned}\quad 3.27$$

$$T_y = \int_{A_0} S_{XY} dA = \frac{1}{2} k_y A_0 C_{66} [v_{,x} - \theta_z (1 + u_{,x})] \quad 3.28$$

$$T_z = \int_{A_0} S_{XZ} dA = \frac{1}{2} k_z A_0 C_{66} [w_{,x} - \theta_Y (1 + u_{,x})] \quad 3.29$$

$$M_y = \int_{A_0} ZS_{XX} dA = (1 + u_{,x}) C_{11} \theta_{Y,X} I_0 \quad 3.30$$

$$M_z = - \int_{A_0} YS_{XX} dA = (1 + u_{,x}) C_{11} \theta_{Z,X} I_0 \quad 3.31$$

với

$$Q_1 = - \int_{A_0} YZ S_{XX} dA = \frac{1}{4} I_0 (C_{11} R_0^2 \theta_{Z,X} \theta_{Y,X} - C_{12} \theta_Z \theta_Y) \quad 3.32$$

$$Q_2 = \int_{A_0} Z^2 S_{XX} dA = \left\{ \frac{N^0}{A_0} + C_{11} \left[u_{,X} + \frac{1}{2} (u_{,X}^2 + v_{,X}^2 + w_{,X}^2) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{8} R_0^2 (3\theta_{Y,X}^2 + \theta_{Z,X}^2) \right] + \frac{1}{8} C_{12} (3\theta_Z^2 + \theta_Y^2) \right\} I_0 \quad 3.33$$

$$Q_3 = - \int_{A_0} Z S_{XY} dA = \frac{1}{4} C_{66} I_0 (3\theta_Z \theta_{Y,X} - \theta_Y \theta_{Z,X}) \quad 3.34$$

$$Q_4 = \int_{A_0} Z S_{XZ} dA = \frac{1}{4} C_{66} I_0 (\theta_Y \theta_{Y,X} - \theta_Z \theta_{Z,X}) \quad 3.35$$

$$Q_5 = \int_{A_0} Y^2 S_{XX} dA = \left\{ \frac{N^0}{A_0} + C_{11} \left[u_{,X} + \frac{1}{2} (u_{,X}^2 + v_{,X}^2 + w_{,X}^2) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{8} R_0^2 (\theta_{Y,X}^2 + 3\theta_{Z,X}^2) \right] + \frac{1}{8} C_{12} (\theta_Z^2 + 3\theta_Y^2) \right\} I_0 \quad 3.36$$

$$Q_6 = \int_{A_0} Y S_{XY} dA = \frac{1}{4} C_{66} I_0 (\theta_Z \theta_{Z,X} - \theta_Y \theta_{Y,X}) \quad 3.37$$

$$Q_7 = - \int_{A_0} Y S_{XZ} dA = \frac{1}{4} C_{66} I_0 (3\theta_{Z,X} \theta_Y - \theta_Z \theta_{Y,X}) \quad 3.38$$

$$Q_8 = \int_{A_0} S_{YY} dA = N^0 + \frac{1}{2} A_0 \left\{ C_{12} \left[u_{,X} + \frac{1}{2} (u_{,X}^2 + v_{,X}^2 + w_{,X}^2) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{8} C_{22} (3\theta_Z^2 + \theta_Y^2) \right\} + \frac{1}{8} C_{12} I_0 (3\theta_{Y,X}^2 + \theta_{Z,X}^2) \quad 3.39$$

$$Q_9 = \int_{A_0} S_{ZZ} dA = N^0 + \frac{1}{2} A_0 \left\{ C_{12} \left[u_{,X} + \frac{1}{2} (u_{,X}^2 + v_{,X}^2 + w_{,X}^2) \right] \right. \\ \left. + \frac{1}{8} C_{22} (3\theta_Y^2 + \theta_Z^2) \right\} + \frac{1}{8} C_{12} I_0 (3\theta_{Z,X}^2 + \theta_{Y,X}^2) \quad 3.40$$

$$Q_{10} = - \int_{A_0} S_{YZ} dA = \frac{1}{8} C_{22} A_0 \theta_Y \theta_Z - \frac{1}{4} C_{12} I_0 \theta_{Y,X} \theta_{Z,X} \quad 3.41$$

sau đó, công việc ảo có thể được viết như sau

$$-\delta W_{\text{int}} = \int_0^{l_0} \left\{ \begin{array}{c} A_1(X) \\ B_1(X) \\ C_1(X) \\ D_1(X) \\ E_1(X) \\ F_1(X) \\ H_1(X) \end{array} \right\}^T \times \left\{ \begin{array}{c} \delta u_{,X} \\ \delta v_{,X} \\ \delta w_{,X} \\ \delta \theta_{,Y} \\ \delta \theta_{Y,X} \\ \delta \theta_Z \\ \delta \theta_{Z,X} \end{array} \right\} dX \quad 3.42$$

Với các giá trị $A_1(X), B_1(X), C_1(X), D_1(X), E_1(X), F_1(X)$ và $H_1(X)$

$$A_1(X) = \left\{ \begin{array}{c} N \\ M_y \\ M_z \\ -T_y \\ T_z \end{array} \right\}^T \times \left\{ \begin{array}{c} 1+u_{,X} \\ \theta_{Y,X} \\ \theta_{Z,X} \\ \theta_Z \\ \theta_Y \end{array} \right\} \quad 3.43$$

$$B_1(X) = \left\{ \begin{array}{c} N \\ T_y \end{array} \right\}^T \times \left\{ \begin{array}{c} v_{,X} \\ 1 \end{array} \right\} \quad 3.44$$

$$C_1(X) = \left\{ \begin{array}{c} N \\ T_z \end{array} \right\}^T \times \left\{ \begin{array}{c} w_{,X} \\ 1 \end{array} \right\} \quad 3.45$$

$$D_1(X) = \left\{ \begin{array}{c} T_z \\ Q_4 \\ Q_7 \\ Q_9 \\ Q_{10} \end{array} \right\}^T \times \left\{ \begin{array}{c} 1+u_{,X} \\ \theta_{Y,X} \\ \theta_{Z,X} \\ \theta_Y \\ \theta_Z \end{array} \right\} \quad 3.46$$

$$E_1(X) = \left\{ \begin{array}{c} M_y \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{array} \right\}^T \times \left\{ \begin{array}{c} 1+u_{,X} \\ \theta_{Z,X} \\ \theta_{Y,X} \\ \theta_Z \\ \theta_Y \end{array} \right\} \quad 3.47$$

$$F_1(X) = \left\{ \begin{array}{c} -T_y \\ Q_3 \\ Q_6 \\ Q_8 \\ Q_{10} \end{array} \right\}^T \times \left\{ \begin{array}{c} 1+u_{,X} \\ \theta_{Y,X} \\ \theta_{Z,X} \\ \theta_Z \\ \theta_Y \end{array} \right\} \quad 3.48$$

$$H_1(X) = \begin{Bmatrix} M_z \\ Q_5 \\ Q_1 \\ Q_6 \\ Q_7 \end{Bmatrix}^T \times \begin{Bmatrix} 1+u_{,X} \\ \theta_{Z,X} \\ \theta_{Y,X} \\ \theta_Z \\ \theta_Y \end{Bmatrix} \quad 3.49$$

Công ảo của ngoại lực δW_{ext} được gây ra bởi trọng lực (tĩnh tải) và tải trọng ngoài.

Tĩnh tải, có thể bao gồm tải trọng và moment tập trung cũng như tải trọng phân bố, hoạt động giống như lực thể tích. Áp lực bơm đóng một vai trò như lực kéo tác động lên bề mặt hình trụ và ở cả hai đầu dầm. Đại lượng đầu tiên ở phía bên phải của **phương trình 3.19** có thể được viết lại dưới dạng như sau

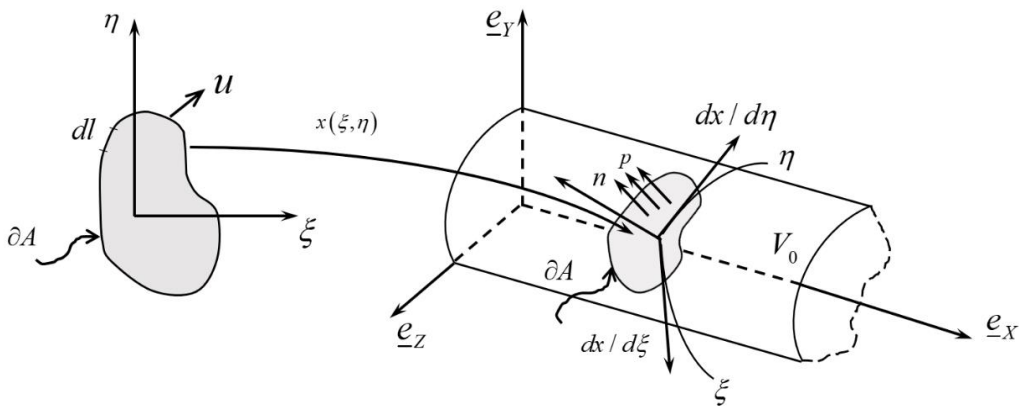
$$\delta W_{ext}^d = \int_0^{l_0} \begin{Bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta u \\ \delta v \\ \delta w \end{Bmatrix} dX$$

$$+ \sum_{i=1}^n \begin{Bmatrix} F_X(X_i) \\ F_Y(X_i) \\ F_Z(X_i) \\ M_Y(X_i) \\ M_Z(X_i) \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta u(X_i) \\ \delta v(X_i) \\ \delta w(X_i) \\ \delta \theta_Y(X_i) \\ \delta \theta_Z(X_i) \end{Bmatrix} \quad 3.50$$

Trong đó, f_x , f_y và f_z tương ứng là tải trọng phân bố dọc theo trục X , Y và Z , trong khi $F_a(b)$ và $M_a(b)$ (với $a = X, Y, Z; b = X_1, \dots, X_n$) là các phản lực từ các gối tựa và tải trọng và moment bên ngoài.

Đại lượng thứ hai ở phía bên phải của **phương trình 3.19** là công ảo gây ra bởi áp lực bơm. Công ảo này bao gồm công ảo áp lực trên bề mặt hình trụ δW_{cyl}^p và ở cả hai đầu dầm δW_{end}^p . **Hình 3.3** thể hiện một dầm bơm hơi với cấu hình tham chiếu hình trụ có áp suất đồng đều p tác động lên bề mặt hình trụ A , với vector pháp tuyến là \underline{n} . Lực bề mặt \underline{t} trong **phương trình 3.19** được thể hiện là công ảo do áp lực bơm δW_{ext}^p

$$\delta W_{ext}^p = \delta W_{cyl}^p + \delta W_{end}^p = \int_A p \underline{n} \cdot \delta \underline{u} dA \quad 3.51$$



Hình 3.3 Áp suất phân bố lên bề mặt hình trụ

Để xác định công ảo của thành phần áp suất p ($\delta W_{cyl}^p(\xi, \eta)$) tọa độ cong được sử dụng như trong hình **Hình 3.4**:

$$\begin{cases} \xi = R_o \alpha \\ \eta = X \end{cases} \quad 3.52$$

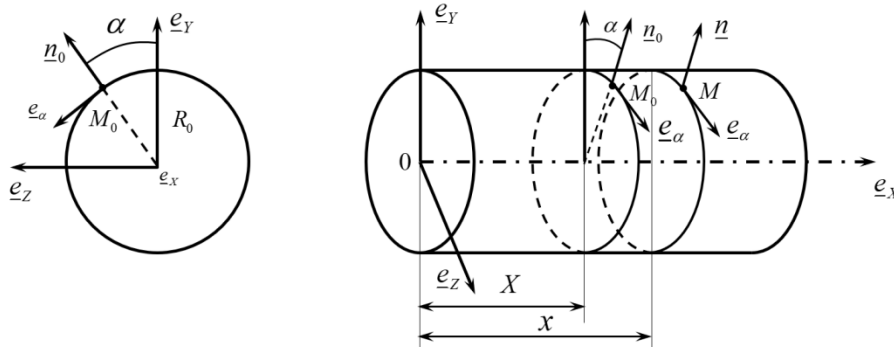
Trong đó α là góc giữa vector pháp tuyến \underline{n} ở vị trí hiện tại \underline{x} và \underline{e}_y . Tọa độ của một điểm vật liệu được đưa ra bởi M_o là

$$\underline{OM}_o = \underline{X} = \begin{pmatrix} X \\ R_o \cos \alpha \\ R_o \sin \alpha \end{pmatrix} \quad 3.53$$

Vector vị trí tại cấu hình hiện tại sau đó được tính như sau

$$\underline{OM} = \underline{x} = \underline{X} + \underline{U} = \begin{pmatrix} X + u(X) - R_o \theta_z \cos \alpha + R_o \theta_y \sin \alpha \\ v(X) + R_o \cos \alpha \\ w(X) + R_o \sin \alpha \end{pmatrix} \quad 3.54$$

Bằng cách tham số hóa các thông số, các thành phần vector pháp tuyến và diện tích có thể được thể hiện dưới dạng các vector tiếp tuyến $\frac{\partial x}{\partial \xi}$ và $\frac{\partial x}{\partial \eta}$



Hình 3.4 Định nghĩa của hệ tọa độ cong

Trong đó

$$\underline{n} = \frac{\frac{\partial x}{\partial \xi} \times \frac{\partial x}{\partial \eta}}{\left\| \frac{\partial x}{\partial \xi} \times \frac{\partial x}{\partial \eta} \right\|} = \frac{\frac{\partial x}{R_o \partial \alpha} \times \frac{\partial x}{\partial X}}{\left\| \frac{\partial x}{R_o \partial \alpha} \times \frac{\partial x}{\partial X} \right\|}; \quad 3.55$$

và

$$\begin{aligned} dA &= \left\| \frac{\partial x}{\partial \xi} \times \frac{\partial x}{\partial \eta} \right\| d\xi d\eta \\ &= \left\| \frac{\partial x}{R_o \partial \alpha} \times \frac{\partial x}{\partial X} \right\| R_o d\alpha dX \end{aligned} \quad 3.56$$

Sau đó, δW_{cyl}^p có thể được tính như sau:

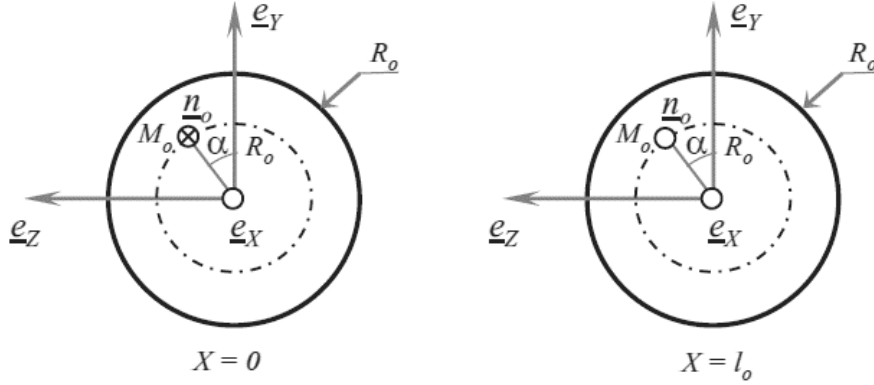
$$\delta W_{cyl}^p = \int_A p \cdot \delta \underline{\mathbf{u}} \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \times \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) d\xi d\eta \quad 3.57$$

$$= F_p \int_0^{l_o} \begin{bmatrix} -\theta_{Z,X} & \theta_{Y,X} & -w_{,X} & v_{,X} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta v \\ \delta w \\ \delta \theta_Y \\ \delta \theta_Z \end{Bmatrix} dX \quad 3.58$$

Công ảo của áp suất ở hai đầu dầm có thể được xác định một cách tương tự: bề mặt tròn tham chiếu ($X = 0$ và $X = l_o$) có thể được thể hiện bằng tọa độ cong $(\xi, \eta) = (r, r\alpha)$

$$\delta W_{end}^p = \int_A p \underline{\mathbf{n}} \cdot \delta \underline{\mathbf{u}}(l_o) dA - \int_A p \underline{\mathbf{n}} \cdot \delta \underline{\mathbf{u}}(0) dA \quad 3.59$$

$$= \left[\begin{bmatrix} 1 & \theta_Z(X_o) & -\theta_Y(X_o) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta u(X_o) \\ \delta v(X_o) \\ \delta w(X_o) \end{Bmatrix} \right]_0^{l_o} \quad 3.60$$



Hình 3.5 Định nghĩa tọa độ cơ sở cong ở đầu dầm

Từ phương trình 3.57 và phương trình 3.59, δW_{ext}^p được đưa ra bởi

$$\delta W_{ext}^p = F_p \int_0^{l_o} \begin{bmatrix} -\theta_{Z,X} & \theta_{Y,X} & -w_{,X} & v_{,X} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta v \\ \delta w \\ \delta \theta_Y \\ \delta \theta_Z \end{Bmatrix} dX \quad 3.61$$

$$+ \left[\begin{bmatrix} 1 & \theta_Z(X_o) & -\theta_Y(X_o) \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \delta u(X_o) \\ \delta v(X_o) \\ \delta w(X_o) \end{Bmatrix} \right]_0^{l_o}$$

với $F_p = p\Pi R_o^2$ là lực gây ra do áp lực bơm.

Ở đây nên lưu ý rằng phương trình 3.61 hiệu ứng lực của tải trọng bên ngoài do áp lực bơm phụ thuộc vào chuyển vị và góc quay tại vị trí điểm đang xem xét.

CHƯƠNG 4: PHÂN TÍCH HIỆN TƯỢNG MẤT ỔN ĐỊNH CỦA DẦM HƠI DỰA TRÊN PHƯƠNG PHÁP ĐẲNG HÌNH HỌC IGA

4.1 Giới thiệu

Trong thời gian gần đây, chỉ có một vài nghiên cứu liên quan đến bài toán phân tích ổn định của các kết cấu bơm hơi, trong đó gần như không có nghiên cứu nào sử dụng các phương pháp số tiên tiến, chẳng hạn như phương pháp IGA, để phân tích ứng xử mất ổn định của dầm bơm hơi composite. Do đó, nghiên cứu này tập trung vào việc phân tích mất ổn định tuyến tính và phi tuyến tính của dầm bơm hơi.

4.2 Phát triển công thức cho bài toán mất ổn định dựa trên phương pháp IGA

4.2.1 Bài toán mất ổn định tuyến tính

Trong bài toán phân tích mất ổn định tuyến tính, dầm chịu tensor áp suất dự ứng lực ban đầu $\underline{\underline{\mathbf{S}}}^0$. Trong bước tính toán đầu tiên, dầm được gán mức tải tham chiếu tùy ý $\{\mathbf{F}_{ref}\}$ và thực hiện phân tích tuyến tính tiêu chuẩn để xác định ứng suất trong phần tử trên dầm. Ma trận độ cứng ứng suất $[\mathbf{k}_\sigma]$ và ma trận độ cứng đàn hồi $[\mathbf{k}]$ cũng được thiết lập. Năng lượng biến dạng của dầm trên mỗi đơn vị thể tích là $\frac{1}{2}\underline{\underline{\mathbf{S}}}^T \underline{\underline{\mathbf{E}}}$. Như đã trình bày trong trường trước, các phương trình cân bằng được phát triển dựa trên nguyên tắc công việc ảo. Bằng cách lấy tích phân đối với miền thể tích của dầm và đối với phần diện tích mặt cắt ngang A_o và chiều dài l_o , biểu thức năng lượng biến dạng ảo của dầm bơm hơi có thể được triển khai như sau:

$$\delta U_e = \int_{V_o} \left\{ (\underline{\underline{\mathbf{S}}}^0)^T \delta \underline{\underline{\mathbf{E}}} + \underline{\underline{\mathbf{E}}}^T \cdot \underline{\underline{\mathbf{C}}} \cdot \delta \underline{\underline{\mathbf{E}}} \right\} dV_o = \delta U_m + \delta U_b \quad 4.1$$

Trong đó U_m và U_b là năng lượng biến dạng màng và năng lượng biến dạng uốn.

Thành phần năng lượng biến dạng δU_m của dầm có liên quan đến ma trận độ cứng ứng suất $[\mathbf{k}_\sigma]$ và δU_b liên quan đến độ cứng đàn hồi $[\mathbf{k}]$

$$\delta U_m = [\delta \mathbf{d}^T] [\mathbf{k}_\sigma] [\mathbf{d}] \quad 4.2$$

$$\delta U_b = [\delta \mathbf{d}^T] [\mathbf{k}] [\mathbf{d}] \quad 4.3$$

Bằng cách áp dụng quy trình rời rạc hóa, hệ phương trình tổng quát thu được như sau

$$\delta U_e = \{\delta \mathbf{d}\}^T \left([\mathbf{k}] + \lambda [\mathbf{k}_{ref}] \right) \{\mathbf{d}\} \quad 4.4$$

Trong đó λ là hệ số tỷ lệ, với $F = \lambda F_{ref}$ là lực nén dọc trục.

Các phương trình cân bằng có thể thu được bằng cách áp dụng nguyên tắc cực tiểu năng lượng. Từ đó, bài toán mất ổn định tuyến tính được thể hiện dưới dạng bài toán trị riêng như sau:

$$\left([\mathbf{K}] + \lambda_i [\mathbf{K}_{ref}] \right) \{\delta \mathbf{D}\} = 0 \quad 4.5$$

4.2.2 Bài toán mất ổn định phi tuyến

Dựa trên phương pháp Lagrangian tổng, trong đó chuyển vị của dầm được tính toán dựa trên cấu hình ban đầu, bài toán phi tuyến hình học của dầm hơi được thiết lập để phân tích hiện tượng mất ổn định của dầm khi chịu nén đúng tâm. Một ma trận độ cứng tiếp tuyến $[\mathbf{K}_T]$, bao

gồm các hiệu ứng thay đổi hình học cũng như ảnh hưởng của áp suất bơm được thiết lập. Tải trọng dọc tương ứng với bước tải i^{th} được biểu thị bằng công thức sau:

$$\{\mathbf{f}_i\} = \{\mathbf{f}_{i-1}\} + i\{\Delta\mathbf{f}\} \quad 4.6$$

Với một phần tử đã biết, phương trình cân bằng phi tuyến có thể được xây dựng dưới dạng

$$[\mathbf{k}_T]\{\Delta\mathbf{d}\} = \{\mathbf{f}_i\} \quad 4.7$$

Trong đó $[\mathbf{k}_T]$ là ma trận độ cứng tiếp tuyến của phần tử, và $\{\mathbf{f}_i\}$ và $\{\Delta\mathbf{d}\}$ là vectơ tải gia tăng và vector chuyển vị cần tìm. Sau khi lắp ghép các ma trận phần tử, phương trình cân bằng của bài toán được thể hiện như sau:

$$[\mathbf{K}_T]\{\Delta\mathbf{D}\} = \{\mathbf{F}_i\} \quad 4.8$$

Phương trình 4.8 có thể được giải bằng thuật toán Newton với các bước điều chỉnh tải $\{\Delta\mathbf{F}\}$, và cập nhật ma trận $[\mathbf{K}_T]$ sau mỗi bước tải. Ở đây, vector chuyển vị thu được sau mỗi bước lặp là $\{\mathbf{D}\}_i = \{\mathbf{D}\}_{i-1} + \{\Delta\mathbf{D}\}$, với $\{\Delta\mathbf{D}\}$ là phần gia tăng chuyển vị xác định ở bước tải i và $\{\mathbf{D}\}_{i-1}$ là vector chuyển vị ở bước tải trước đó. Điều kiện hội tụ được lấy như sau

$$\|\{\Delta\mathbf{D}\}_i\| = \left(\{\Delta\mathbf{D}\}_i^T \{\Delta\mathbf{D}\}_i \right)^{\frac{1}{2}} \leq 0.0001 \quad 4.9$$

hoặc

$$\|\{\mathbf{R}\}_i\| = \left(\{\mathbf{R}\}_i^T \{\mathbf{R}\}_i \right)^{\frac{1}{2}} \leq 0.0001 \quad 4.10$$

với $\{\mathbf{R}\}_i = \{\mathbf{R}(\mathbf{D}_{i-1})\} = [\mathbf{K}_T]\{\Delta\mathbf{D}_i\}$ là vector lực dư không cân bằng. Khi một điểm giới hạn được tiếp cận $\{\Delta\mathbf{D}\}$, gia tăng chuyển vị trở nên rất lớn. Tại một điểm hạn chế hoặc điểm phân chia, $[\mathbf{K}_T]$ trở nên suy biến.

Qui trình chung của thuật toán ở cấp độ phần tử (quy trình tích hợp số để tính toán ma trận độ cứng ở phần tử thứ j^{th}) được mô tả như sau:

Thông số tính toán: Vector chuyển vị gia tăng $\{\Delta\mathbf{D}_i\}$ của phần tử thứ j .

Các thông số cần tính: Ma trận độ cứng phần tử $[\mathbf{K}_T^e]$, vectơ tải phần tử $\{\mathbf{F}_{int}^e\}$ và $\{\mathbf{F}_{ext}^e\}$.

Lực hiện vòng lặp dựa trên số điểm Gauss theo hướng ζ :

Cho $m = 1$ đến 3, thực hiện

Đặt $\zeta = \zeta_m$ và lấy trọng số tương ứng W_m ,

Gọi chương trình con để tính hàm dạng, ma trận phần tử $[\mathbf{B}]$ và toán tử Jacobian J , tại tất cả các điểm ζ_m .

Tính $[\mathbf{B}]^T ([\Psi_{int}] - [\Psi_{ext}])[\mathbf{B}] \cdot W_m$ và công dồn vào ma trận $[\mathbf{K}_T^e]$

Tính toán hệ số tải nội bộ của phần tử $\{T_{int}^e\} \cdot W_k$ và công dồn vào $\{\mathbf{F}_{int}^e\}$

Tính toán hệ số tải bên ngoài phần tử $(\{T_{ext}^d\} + \{T_{ext}^p\}) \cdot W_k$ và công dồn vào $\{\mathbf{F}_{ext}^e\}$

kết thúc vòng lặp

4.3 Ví dụ số

Trong phần này, một số ví dụ số được thực hiện trình bày kết quả thu được từ chương trình tính được thiết lập ở phần trước. Tỷ lệ độ mảnh được định nghĩa là $\lambda_s = L / \rho$, trong đó chiều dài tính toán được xác định theo $L = \mu l_0$

4.3.1 Phân tích mất ổn định tuyến tính

Các thông số về vật liệu, hình học và giá trị áp suất được sử dụng trong ví dụ này được trình bày trong **Bảng 4.1**.

Bảng 4.1 thông số đầu vào để mô hình hóa mô hình LFEIB

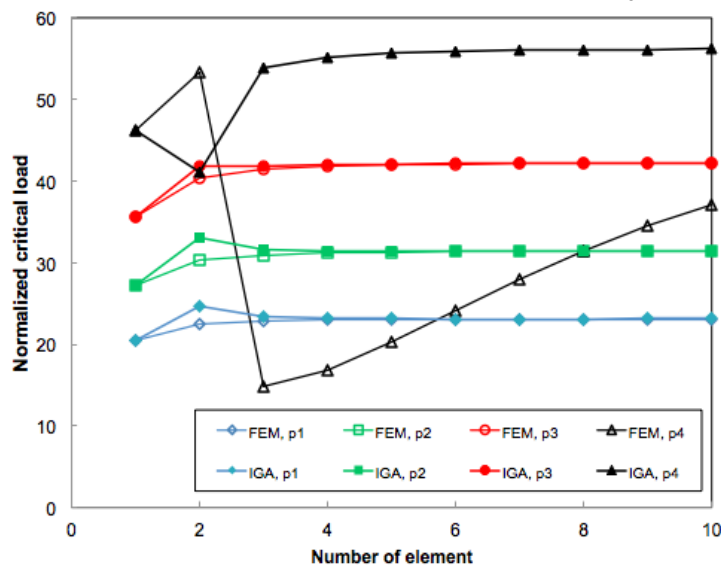
t_ϕ (m)	125×10^{-6}	
k_y	0.5	
Điều kiện biên	Dầm đơn giản	Dầm công xôn
R_ϕ (m)	0.08	0.08
l_ϕ (m)	1.15	0.65
Mô đun đàn hồi (MPa) E	250	250
Hệ số Poisson, ν	0.3	0.3
Áp suất bơm (kPa)	p_1	10
	p_2	20
	p_3	30
	p_4	40



Hình 4.1 Mô hình của một dầm bơm hơi được hỗ trợ đơn giản chịu tải nén trục.

Trong **Hình 4.1** một dầm hơi composite hình trụ liên kết khớp hai đầu và chịu tải nén dọc trục. Các thông số đầu vào được trình bày trong **Bảng 4.1**. Điều kiện biên đối với dầm đơn giản có thể được diễn tả như sau

$$u = v = 0 \text{ tại } x = 0 \text{ và } v = 0 \text{ tại } x = l_0$$



Hình 4.2 Bài toán mất ổn định tuyến tính: kiểm tra hội tụ và so sánh với kết quả FEM với hệ số tải mất ổn định cho mô hình dầm đơn giản LFEIB. ($K_c^I = 10^5 \times \sigma_{cr} / E_{eq}$)

Bảng 4.2 Hệ số tải trọng mất ổn định của dầm đơn giản LFEIB

Áp suất (kPa)	Nghiệm chính xác (1)	FEM (2)	IGA (3)	Sai số (%)	
				(2) & (1)	(3) & (1)
10	25.31	23.11	23.12	8.69	8.65
20	33.48	31.42	31.43	6.15	6.12
30	43.27	42.22	42.22	2.43	2.43
40	54.72	31.15	56.18	43.07	2.67

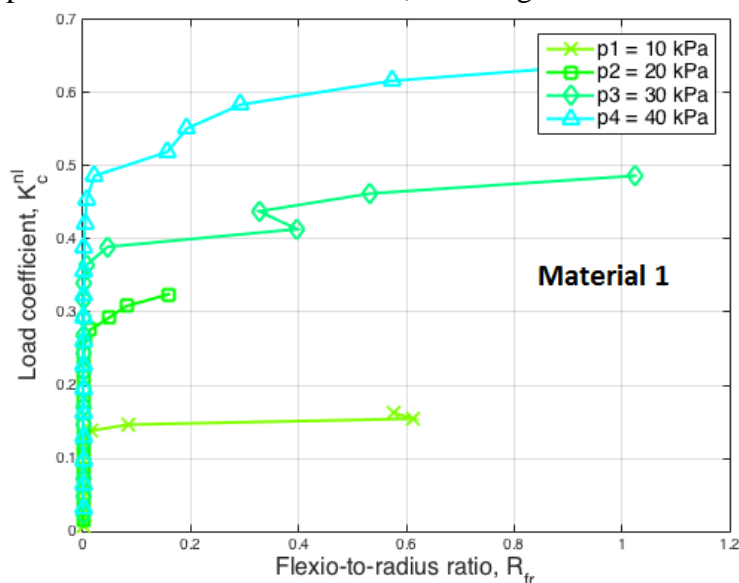
Như trong hình **Hình 4.2**, các bài toán hội tụ cho thấy 4 phần tử dầm Timoshenko dựa trên hàm NURBS bậc hai là đủ để có được kết quả hội tụ tối ưu. Kết quả thu được từ IGA cũng khá tương đồng với kết quả có được từ phần tử 3 nút tiêu chuẩn Timoshenko FEM của ông Nguyễn.

4.3.2 Phân tích mất ổn định phi tuyến

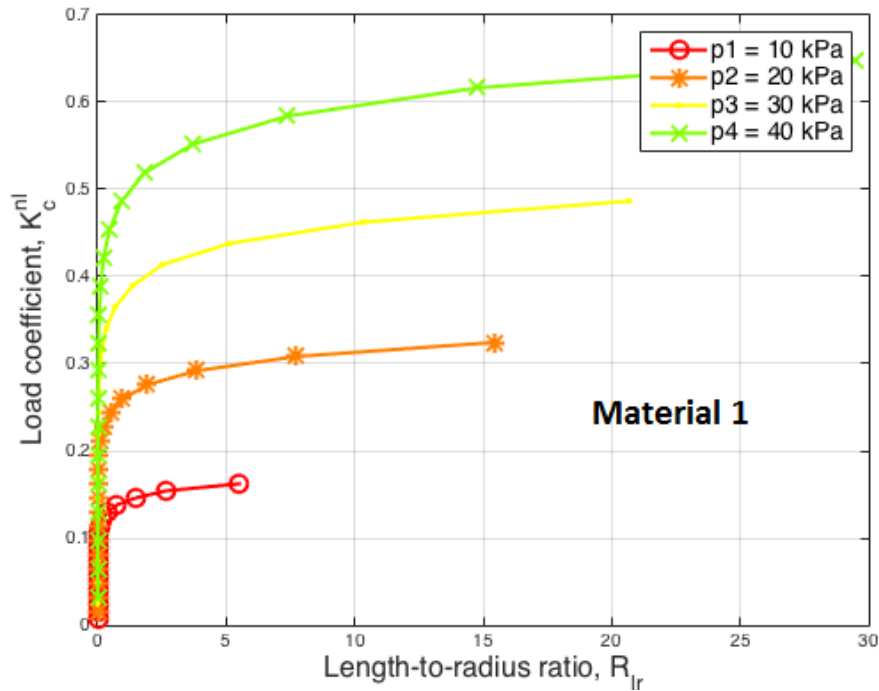
Tải trọng tới hạn được tính toán trong phân tích mất ổn định tuyến tính ở trên chỉ thích hợp trong trường hợp có rất ít hoặc không có sự liên hệ trực tiếp giữa biến dạng màng và biến dạng uốn. Với sự xuất hiện của những khuyết ban đầu của dầm, khi lực nén tác dụng lên dầm, bài toán ứng xử thực tế nên được xem xét là bài toán chuyển vị lớn hơn là bài toán mất ổn định. Do đó, phân tích mất ổn định tuyến tính có thể đưa ra lời giải không đúng cho bài toán mất ổn định. Vì vậy, bài toán mất ổn định phi tuyến của một dầm bơm hơi với điều kiện biên là các gối tựa đơn chịu tải trọng nén trục F được phân tích.

Hình 4.3 minh họa sự thay đổi của tỷ lệ uốn cong trên bán kính và tỷ lệ chiều dài trên bán kính với gia số tham số tải chuẩn hóa K_c^{nl} trong hai trường hợp vật liệu khác nhau. Ở các trường hợp có áp suất cao, các hệ số ứng xử tỷ lệ R_{fr} gần như tuyến tính. Các đường cong trở nên phi tuyến dần dần ở mức cao hơn của K_c^{nl} .

Ảnh hưởng của điều kiện biên và tính chất vật liệu được minh họa rõ ràng bằng ứng xử của dầm bơm hơi đơn giản (SS). Trong trường hợp vật liệu 1 có mô đun đàn hồi thấp, mất ổn định của dầm SS nhạy hơn ở mức áp suất bên trong cao. Nó xuất hiện chế độ nhảy ứng xử khi dầm chịu được tải nén dọc trục tăng lên. Ngược lại, sự biến dạng trong độ lệch tải không xảy ra trong trường hợp của dầm bơm hơi với điều kiện biên ngàm.



Hình 4.3 Mất ổn định phi tuyến: tỷ lệ flexion-to-radius ($R_{fr} = D_v / R_o$) với tham số tải phi tuyến chuẩn hóa ($K_c^{nl} = 10^6 \times F_i / (E_{eq} A_0)$) cho mô hình dầm đơn giản NLFEIB.



Hình 4.4 Mất ổn định phi tuyến: tỷ lệ chiều dài trên bán kính ($R_{lr} = D_u / R_o$) với tham số tải phi tuyến được chuẩn hóa K_c^{nl} cho mô hình dầm đơn giản NLFEIB.

CHƯƠNG 5: THÍ NGHIỆM MẤT ỔN ĐỊNH CỦA DẦM HƠI

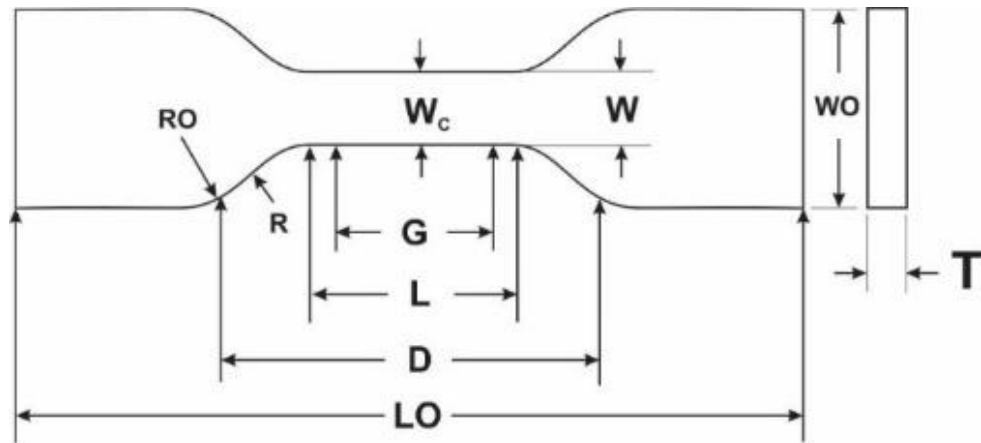
5.1 Giới thiệu

Trong chương này, các phương pháp lựa chọn vật liệu và quy trình tạo mẫu thí nghiệm dầm hơi được trình bày. Một chương trình thực nghiệm để khảo sát ứng xử mất ổn định của dầm bơm hơi được chế tạo từ vật liệu vải dệt composite được trình bày, trong đó các giá trị khác nhau của áp suất bên trong cũng được xem xét đến.

5.2 Tính chất vật liệu và lựa chọn vải

Các tính chất cơ học của vải dệt được kiểm tra trước khi chế tạo dầm bơm hơi. Quy trình kiểm tra dựa trên tiêu chuẩn STM-D638/Mẫu IV.

Một mẫu thí nghiệm dạng xương chó cho thí nghiệm kéo có kích thước hình học được trình bày như trong **Hình 5.1**.



Hình 5.1 Mẫu thí nghiệm chịu kéo

Quy trình thực nghiệm tuân theo hướng dẫn của tiêu chuẩn ASTM D638, bao gồm việc xác định các tính chất kéo của vật liệu được thi công và gia công dưới dạng mẫu thử tiêu chuẩn.

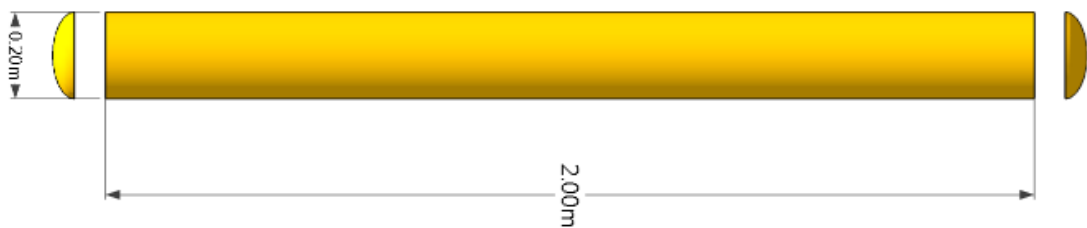
5.3 Mẫu dầm bơm hơi

Việc chế tạo mẫu dầm bơm hơi đòi hỏi phải quan tâm nhiều hơn để tránh rò rỉ không khí. Thứ nhất, thân dầm được chế tạo bằng cách nối vải dọc theo chiều dài của dầm với dán PVC 2,5 cm. Các thông số hình học của các mẫu dầm với dạng hình trụ có các thông số như sau:

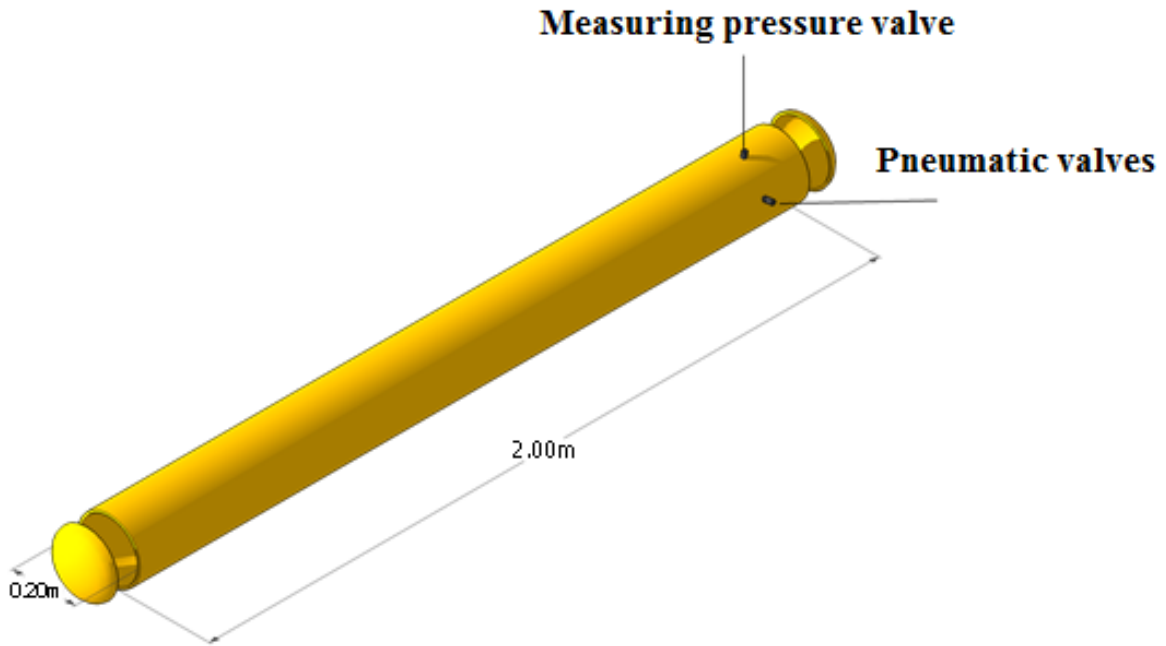
Chiều dài ban đầu: $L = 200\text{cm}$ (không bao gồm 2 mũ ở 2 đầu)

Bán kính ngoài: $R = 10\text{cm}$

Theo dữ liệu của thí nghiệm, vật liệu của mẫu 1 (sợi màu vàng) đã được chọn để thiết kế các mẫu dầm bơm hơi. Kết cấu của 2 van bơm và áp kế ở vị trí cách cuối dầm 20cm. Một lỗ nên được đặt xa lỗ còn lại theo một góc (60° - 90°).



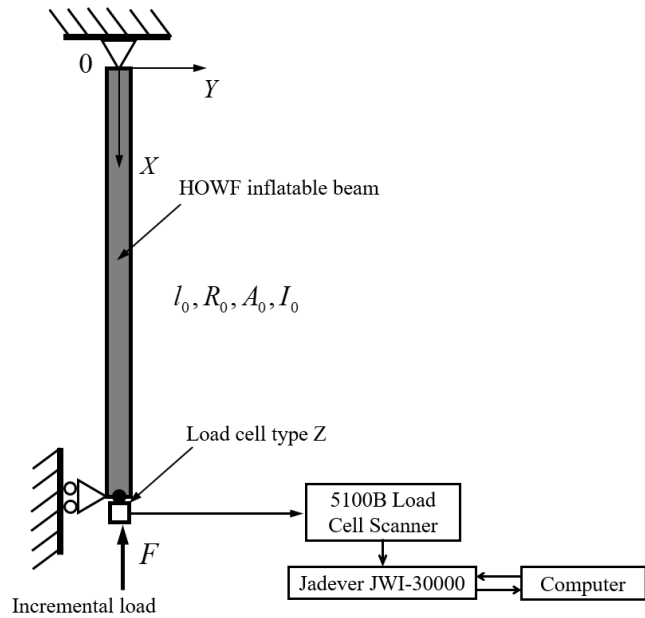
Hình 5.2 Thiết kế dầm bơm hơi



Hình 5.3 Van bơm và áp kế

5.4 Thiết lập thí nghiệm kiểm tra mất ổn định

Trong nghiên cứu này, ba dầm bơm hơi hình trụ được chế tạo với bán kính $R = 100\text{mm}$ và chiều dài của $L = 2\text{m}$. Tải nén F được tăng dần ở một đầu dầm: lúc đầu, một đầu dầm đặt lại tải F về không, và sau đó tăng dần đến F . Để hình dung các độ lệch bên của dầm trong quá trình áp lực nén dọc trục, một máy đo tốc độ độ chính xác là 1mm đã được sử dụng. Trình tự này được lặp lại cho đến khi các nếp gấp đầu tiên xuất hiện, và được gọi là điểm phá hoại. Đầu tiên, dầm phải chịu áp suất bên trong p , theo đó dầm ở trạng thái dự ứng lực. Tải trọng bên ngoài F được áp dụng bởi một ngăn xếp theo hướng trục của dầm.



Hình 5.4 Sơ đồ của dầm bơm hơi HOWF đơn giản và thiết bị đo lường để kiểm tra mất ổn định của dầm

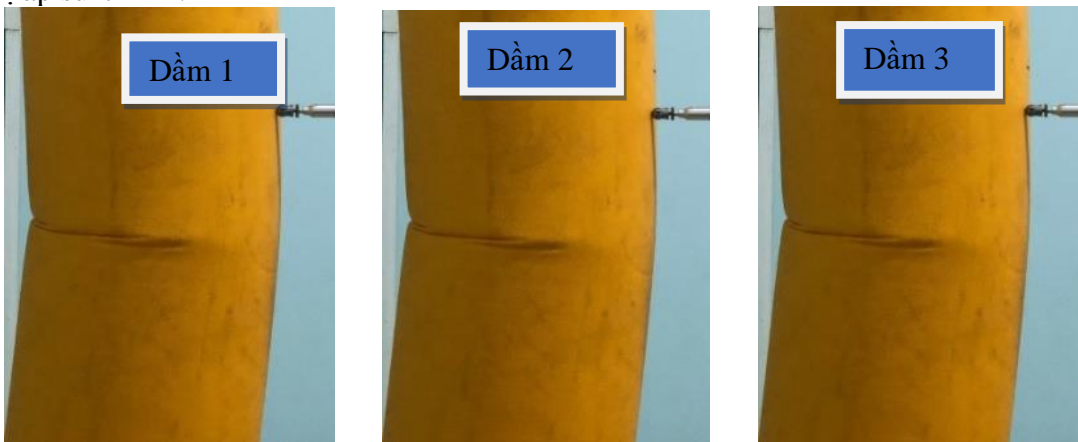
Sau khi thiết lập các thiết bị đo, dầm được bơm hơi lên đến một áp suất nhất định để duy trì hình dạng của dầm, sau đó đặt dầm vào khung thực nghiệm. Dầm sau đó được bơm hơi lên

đến áp suất thiết kế. Vì đường kính của dầm được mở rộng khi tăng áp suất không khí, các vòng trên và dưới cần được điều chỉnh để phù hợp với dầm (**Error! Reference source not found.**)



Hình 5.5 Vòng định vị có thể được điều chỉnh đường kính

Sau khi bơm hơi dầm, tải trọng nén trục được tăng dần ở đầu dưới cùng. Giá trị tải được theo dõi thông qua việc thu thập dữ liệu để kiểm soát tốc độ tải. Một mẫu dầm sẽ được thực nghiệm với bốn giá trị khác nhau của áp suất bơm, 20 kPa, 40 kPa, 60 kPa và 80 kPa. Có thể thấy trong **Hình 5.6**, các nếp gấp xuất hiện ở cùng một vị trí của dầm và không phụ thuộc vào giá trị áp suất bơm.



Hình 5.6 Vị trí nếp gấp đầu tiên xuất hiện



Hình 5.7 Những nếp gấp đầu tiên xuất hiện

Nếp gấp đầu tiên cho thấy hình dạng phá hoại khi dầm bị mất ổn định và chuyển vị lớn nhất xảy ra ở vị trí nếp gấp.

5.5 Kết quả thí nghiệm

Một thí nghiệm điển hình bao gồm các bước sau:

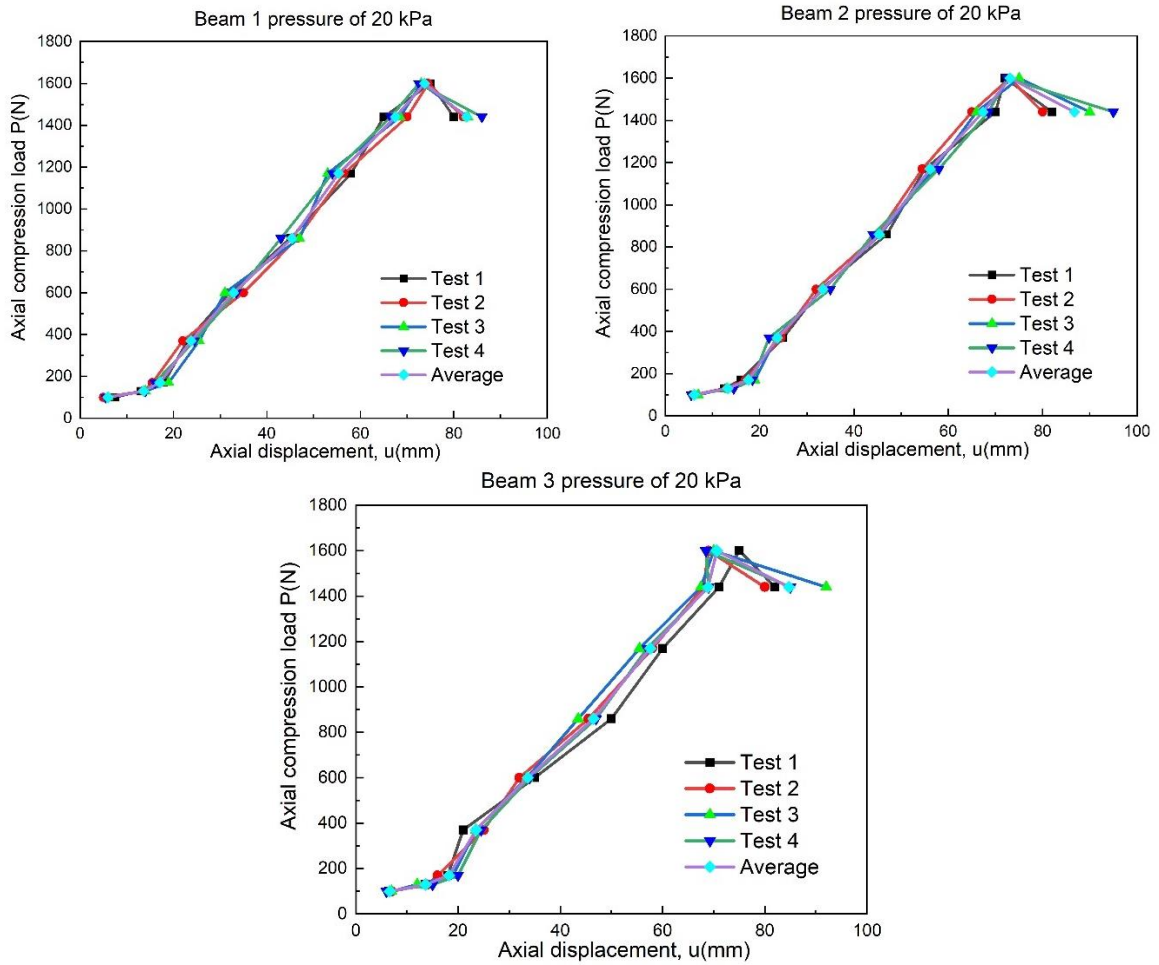
- 1) Gia tải dầm cho đến khi các nếp gấp đầu tiên xuất hiện, sau đó gỡ tải.
- 2) Gia tải dỡ tải cho dầm cho đến khi hiện tượng mất ổn định đầu tiên xảy ra nhiều lần.
- 3) Gia tải dầm cho đến khi dầm sụp đổ hoàn toàn.

5.5.1 Quan hệ tải trọng và chuyển vị u của dầm ở áp suất

5.5.1.1 Quan hệ tải trọng và chuyển vị của dầm ở áp suất 20 kPa và 80 kPa

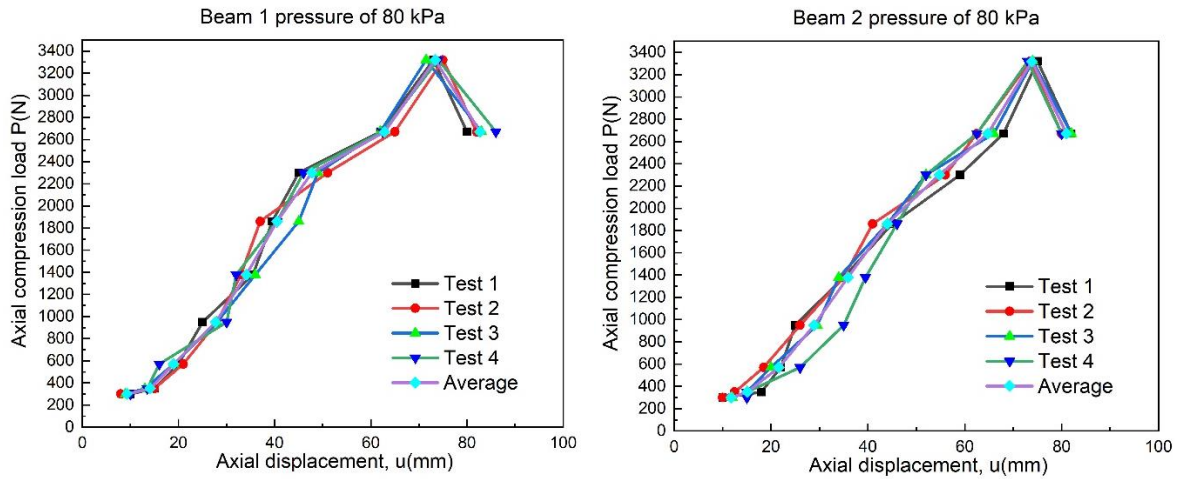
Kết quả thí nghiệm xác định mối quan hệ chuyển vị và tải trọng của dầm bơm hơi với áp suất không khí 20 kPa và 80 kPa được minh họa trong **Hình 5.8** và **Hình 5.9**. Có thể thấy rằng độ lệch lớn nhất khoảng 4,7% xảy ra ngay khi xuất hiện nếp gấp. Độ lệch nhỏ như vậy cho thấy một phương pháp đo đạc tốt được tiến hành. Ngoài ra, có thể thấy rằng sự chuyển vị dọc trục tăng tuyến tính với lực nén và độ cứng của dầm tăng lên khi tăng áp suất bơm tăng. Nếp gấp đầu tiên xuất hiện khi chuyển vị dọc trục khoảng 70 mm. Nếp gấp đầu tiên của dầm cho thấy sự mất ổn định của dầm, dẫn đến giảm đáng kể khả năng chịu tải của dầm bơm hơi. Nếp gấp xảy ra ở một vị trí tương tự trong các dầm khác, ví dụ như ở phần giữa. Điều này có thể được giải thích rằng áp suất không khí trong dầm làm tăng khả năng chịu tải của nó, nhưng áp suất không khí không ảnh hưởng đến dạng mất ổn định của dầm.

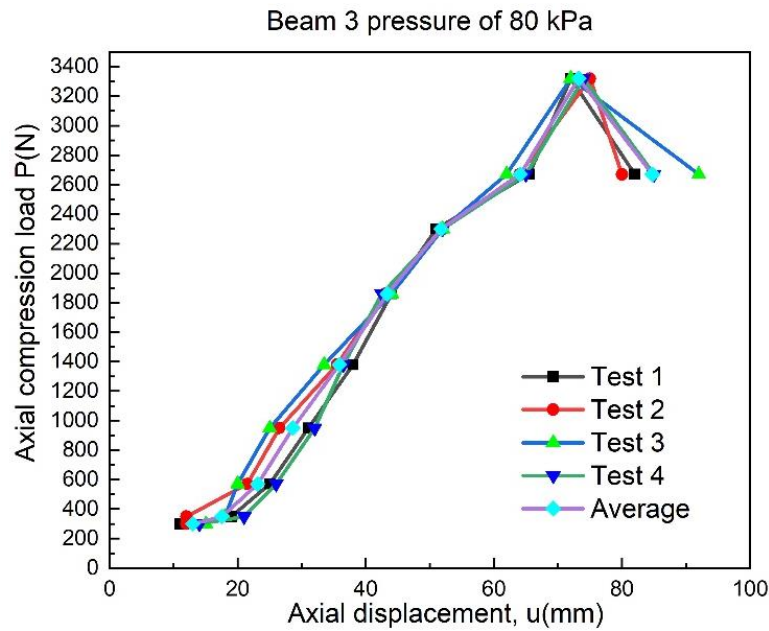
a) $p = 20 \text{ kPa}$



Hình 5.8 Tải trọng và chuyển vị của dầm ở áp suất $p = 20$ kPa

b) $p = 80$ kPa

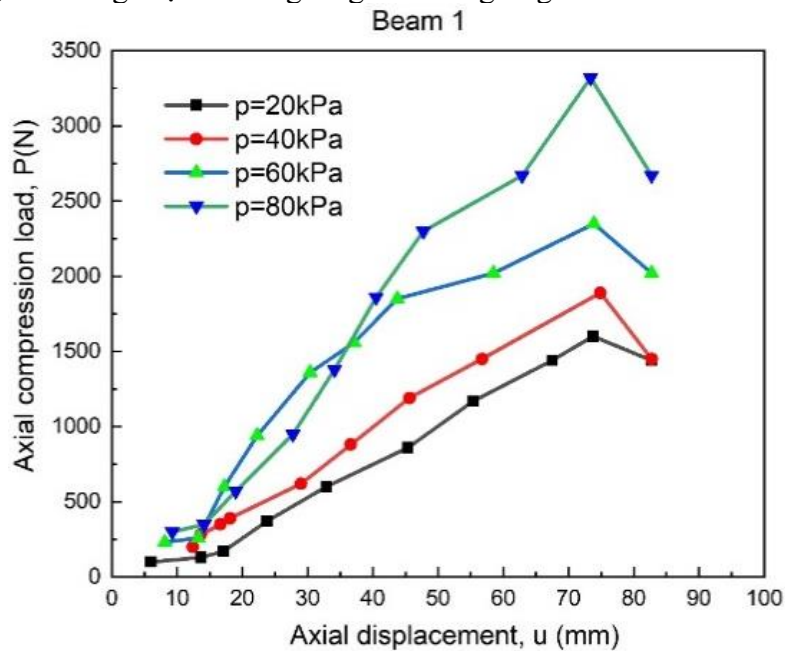




Hình 5.9 Tải trọng và chuyển vị của dầm ở áp suất $p = 80$ kPa

5.5.1.2 Dầm hơi với áp suất bơm khác nhau

Hình 5.10 cho thấy khả năng chịu lực của dầm phụ thuộc vào áp suất bơm vào dầm. Khi áp suất tăng lên, khả năng chịu tải cũng tăng lên tương ứng.

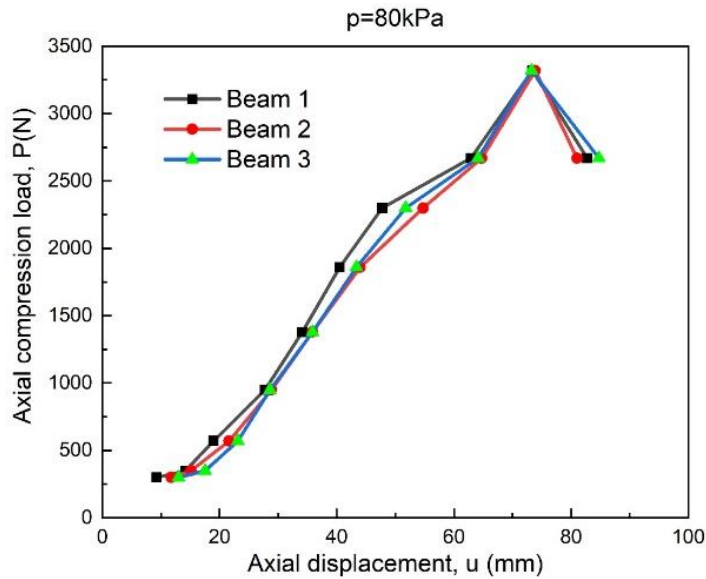


Hình 5.10 Quan hệ lực và chuyển vị của dầm ở các áp suất khác nhau

Theo kết quả thực nghiệm, khi khả năng chịu lực dọc trục của dầm cao hơn, giá trị áp suất bơm cũng đặc biệt tăng lên. Khi áp suất bơm đạt 80 kPa, khả năng chịu lực trung bình của ba dầm có thể đạt được giá trị tối đa 2342 kN. Độ lệch cao nhất của giá trị này trên các dầm so với giá trị trung bình là khoảng 5,85%. Kết quả này cho thấy tính đồng nhất của mẫu vật trong quá trình chế tạo. Các dầm được chế tạo bằng cách dán bằng phương pháp nhiệt cũng cho kết quả tương tự.

5.5.1.3 So sánh ứng xử của 3 dầm hơi ở áp suất $p = 80$ kPa

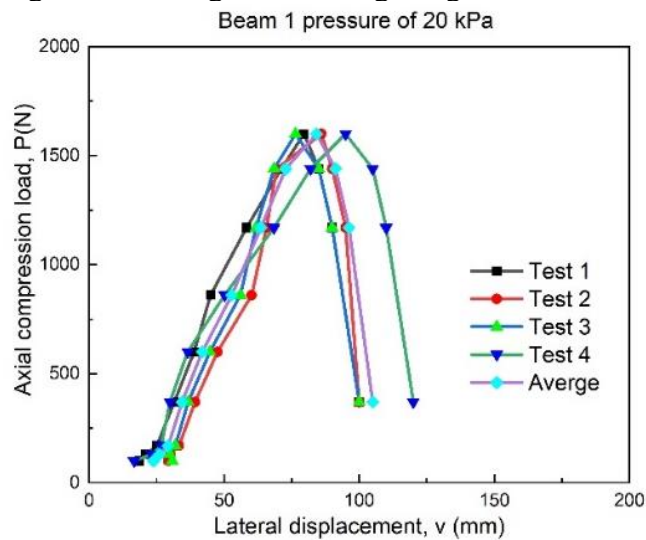
Hình 5.11 so sánh ứng xử mất ổn định của các dầm hơi với áp suất như nhau, điều này chứng tỏ rằng áp suất không khí ảnh hưởng lớn đến sự ổn định của dầm bơm hơi. Thí nghiệm cũng cho thấy khả năng chịu tải tối đa tương ứng với áp suất bơm.



Hình 5.11 So sánh 3 dầm ở áp suất $p = 80 \text{ kPa}$

5.5.2 Quan hệ tải trọng và chuyển vị quan hệ của dầm ở áp suất

Để đánh giá ảnh hưởng của mối quan hệ giữa tải trọng và chuyển vị của dầm ở áp suất thấp, mỗi dầm được kiểm tra tương ứng với giá trị áp suất bơm là 20 kPa . Thí nghiệm được thực hiện bốn lần. Kết quả thí nghiệm được trình bày trong **Hình 5.13**. Kết quả thí nghiệm cũng cho thấy khi áp suất tăng lên, khả năng chịu tải tăng đồng thời.



Hình 5.12 Quan hệ tải trọng và chuyển vị của các dầm ở áp suất $p = 20 \text{ kPa}$

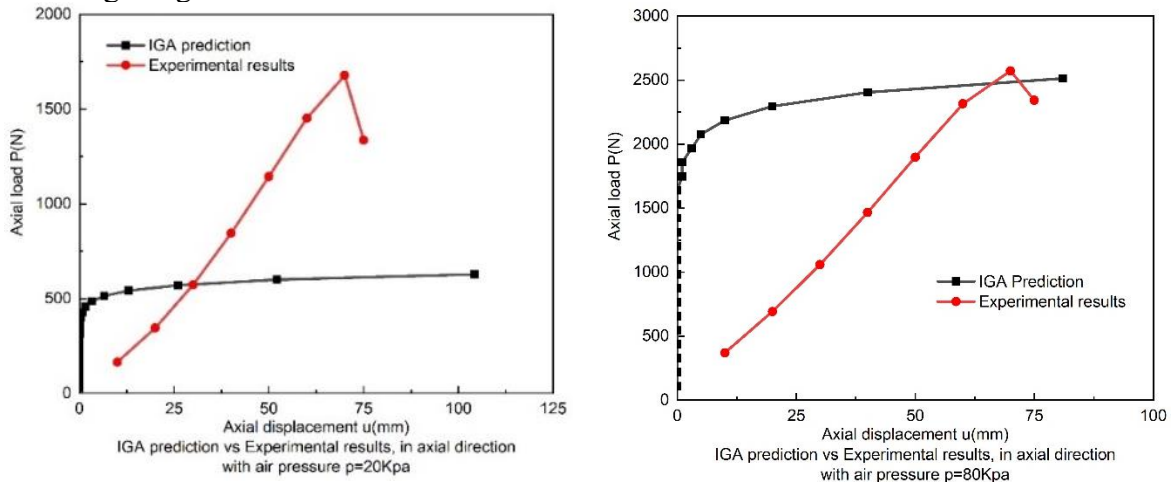
5.6 So sánh giữa các phương pháp số thử nghiệm và IGA

Hình 5.13 và **Hình 5.14** Error! Reference source not found. so sánh kết quả thực nghiệm và kết quả số thu được từ IGA. Nhìn chung, có thể thấy rằng kết quả thu được từ các thí nghiệm và kết quả từ IGA có phần giống nhau trong ứng xử kết cấu của dầm hơi khi chịu lực nén đúng tâm. Đối với các dầm có áp suất bơm thấp, có thể thấy rằng kết quả thực nghiệm và kết quả mô hình hóa không có sự tương đồng tốt. Tuy nhiên, nếu áp suất trong dầm tăng lên, dự đoán của mô hình IGA trở nên gần với kết quả thực nghiệm. Hiện tượng này có thể được giải thích như sau:

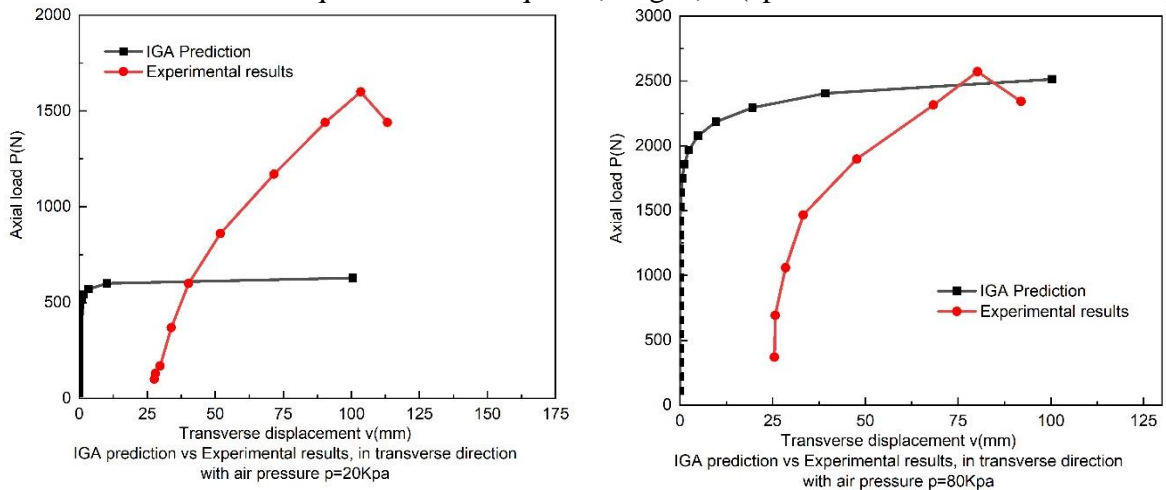
- Trong quá trình thực nghiệm, trong khi các dầm được bơm hơi và tiến hành các thí nghiệm ở áp suất thấp, dầm không đủ căng để nó có thể giữ cho dầm vững chắc tại thời điểm gia tải.

- Sự thay đổi hình dạng dầm theo phương "u" làm cho bán kính dầm tăng lên. Kết quả có thể thấy là trong các giai đoạn đầu của các thí nghiệm, các cảm biến thường nhận kết quả sớm

hơn. Tuy nhiên, khi tăng áp suất bơm trong dầm, có thể thấy rằng kết quả số và thực nghiệm khá tương đồng nhau.



Hình 5.13 So sánh kết quả IGA và kết quả thực nghiệm (áp suất bơm là 20 kPa và 80 kPa)



Hình 5.14 So sánh kết quả IGA với kết quả thực nghiệm (với áp suất bơm là 20 kPa và 80 kPa)

Sự khác biệt giữa kết quả thực nghiệm và kết quả số cho dầm có áp suất bơm thấp có thể được giải thích do một số khía cạnh, được tóm tắt như sau:

- Sự thiếu hụt thông tin vật liệu thực tế và sai sót trong quá trình ghi nhận kết quả có thể gây ra những sai sót đáng kể trong kết quả thực nghiệm.
- Kết quả mô phỏng số không tính đến sự phá hoại của vật liệu, đó có thể là lý do chính trong trường hợp áp suất bơm thấp.
- Các mô hình vật liệu được sử dụng trong cách tiếp cận số có thể không phù hợp với việc sử dụng vật liệu vải composite, điều này cần được phân tích toàn diện hơn nữa.

CHƯƠNG 6: KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, một mô hình số dựa trên phương pháp đẳng hình học IGA và một chương trình thực nghiệm đã được xây dựng để phân tích ứng xử mất ổn định của dầm hơi làm từ vật liệu composite.

Việc mô số được thực hiện dựa trên phương pháp IGA, trong đó mô hình dầm được phát triển dựa trên lý thuyết dầm của Timoshenko. Các phương trình cân bằng được xây dựng dựa trên phương pháp Lagrange tổng, trong đó ứng suất màng và ứng suất uốn được xem xét đồng

thời. Các hàm cơ sở NURBS của phương pháp IGA được sử dụng để rời rạc các phương trình vi phân cân bằng và xây dựng các phương trình dạng yếu. Phân tích mất ổn định tuyến tính và mất ổn định phi tuyến đều được thực hiện. Trong phân tích mất ổn định phi tuyến, thuật toán Newton-Raphson được áp dụng để tìm ra các quan hệ lực và chuyển vị. Bài toán xác thực và các nghiên cứu tham số khác cũng được tiến hành để cho thấy độ tin cậy của phương pháp và nghiên cứu ảnh hưởng của áp suất bơm đến ứng xử của dầm.

Trong nghiên cứu thực nghiệm, các tính chất cơ học của vật liệu vải composite được đo đạc. Sau đó, các thí nghiệm mất ổn định được thực hiện để nghiên cứu ứng xử của dầm hơi dầm với các áp suất bơm khác nhau. Kết quả thực nghiệm cũng được so sánh với những kết quả được từ phương pháp mô phỏng số.

Một số kết luận chính rút ra từ nghiên cứu này có thể được tóm tắt như sau:

- Một cách tiếp cận số dựa trên IGA đã được phát triển thành công để phân tích sự ổn định của dầm hơi chịu nén đúng tâm.
- Kết quả thu được từ phương pháp IGA là phù hợp với kết quả từ FEM truyền thống. Ngoài ra, phương pháp tiếp cận dựa trên IGA có tỷ lệ hội tụ tốt hơn FEM.
- Từ mô hình số và kết quả thực nghiệm, có thể thấy rằng khả năng chịu lực của dầm bơm hơi tăng theo áp suất bên trong.
- Các dự đoán thu được từ mô hình số dựa trên IGA cho thấy độ tin cậy cao trong trường hợp áp suất bơm tương đối lớn, đối với các trường hợp có áp suất bơm thấp, kết quả từ mô hình số cho xu hướng dự đoán tương tự với kết quả thí nghiệm, nhưng cường độ dự đoán nhỏ hơn so với kết quả thực nghiệm.

Danh sách các công bố

Các phần của luận án này đã được công bố trên các tạp chí quốc tế, tạp chí quốc gia hoặc được trình bày trong các hội nghị. Các giấy tờ này là:

- **Bài viết trên tạp chí khoa học quốc tế**

1. T. Le-Manh, Q. Huynh-Van, **Thu D. Phan**, Huan D. Phan, H. Nguyen-Xuan "Isogeometric nonlinear bending and buckling analysis of variable thickness composite plate structures ". *Composite Structures* 1 January 2017, Pages 818-826.

- **Hội nghị quốc tế**

2. **Phan Thị Đăng Thu**, Phan Đình Huân và Nguyễn Thanh Trương "Effect parametric to properties of a 2D orthogonal plain classical woven fabric composite". *Hội nghị quốc tế về Cơ khí và Tự động hóa Kỹ thuật (ICEMA)*, thành phố Hà Nội 2014- ISBN: 978-604-913-367-1, trang 509-517.

- **Hội nghị quốc gia**

3. **Phan Thị Đăng Thu**, Phan Đình Huân và Nguyễn Thanh Trương "Biaxial beam inflation test on orthotropic fabric beam"; *Hội nghị toàn quốc về cơ khí rắn*, thành phố Hồ Chí Minh 2013 - ISBN: 978-604-913-213-1, trang 1169-1176.

4. Nguyễn Thanh Trương, Phan Đình Huân, **Phan Thị Đăng Thu** "Discretizing an analytical inflatable beam model by the shellmembrane finite element". *Hội nghị toàn quốc về cơ khí rắn*, thành phố Hồ Chí Minh 2013 - ISBN: 978-604-913-213-1, trang 1221-1228.

5. **Phan Thị Đăng Thu**, Lê Mạnh Tuấn, Nguyễn Xuân Hùng, Nguyễn Thành Trương "Geometrically nonlinear behaviour of composite beams of variable fiber volume fraction in isogeometric analysis". *Hội nghị toàn quốc về cơ khí rắn*, thành phố Đà Nẵng 2015 - ISBN: 978-604-82-2028-0, Trang: 1404-1409.

6. **Phan Thị Đăng Thu**, Lê Mạnh Tuấn, Lê Hiếu Giang, Nguyễn Thanh Trương "Buckling of cylindrical inflatable composite beams using isogeometric analysis". *Kỷ yếu Hội nghị khoa học và công nghệ quốc gia về cơ khí IV*, Thành phố Hồ Chí Minh 2015, Việt Nam - ISBN: 978-604-73-3691-3, Trang 821-826.

7. **Phan Thị Đăng Thu**, Nguyễn Thành Trương, Phan Đình Huân "Mô hình dầm dầm hơi composite phi tuyến uốn uốn". *Hội thảo khoa học quốc gia về vật liệu tổng hợp và kết cấu*, thành phố Nha Trang 2016 - ISBN: 976-604-82-2026-6, Trang 699-706.

8. **Phan Thị Đăng Thu**, Nguyễn Thành Trương, Phan Đình Huân, Lê Đình Tuân "Biaxial experiments for determining material properties and joint strength of textile plain woven fabric composites". *Hội nghị toàn quốc về cơ khí rắn*, thành phố Hà Nội 2017 - ISBN: 978-604-913-722-8, trang 1174-11.