

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ MÔ HÌNH VẬT LIỆU XOPS TRONG LS-DYNA THÔNG QUA DỮ LIỆU THỰC NGHIỆM

Nguyễn Công Nghi^{a,*}, Lê Anh Tuấn^a, Đinh Quang Trung^a

^a*Bộ môn Cơ sở Kỹ thuật Công trình, Viện Kỹ thuật Công trình Đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân Sự,
236 đường Hoàng Quốc Việt, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 13/12/2021, Sửa xong 18/4/2022, Chấp nhận đăng 06/5/2022

Tóm tắt

Bài báo trình bày nghiên cứu ứng xử của vật liệu xốp XPS khi chịu nén đơn trục bằng thí nghiệm trên máy nén và thí nghiệm mô phỏng bằng phần mềm LS-DYNA. Tính đa dạng của vật liệu xốp dẫn đến sự khó khăn lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp khi tính toán mô phỏng các bài toán kỹ thuật có sử dụng vật liệu này. Nghiên cứu đánh giá sự phù hợp của một số mô hình vật liệu có sẵn trong LS-DYNA cho việc áp dụng mô phỏng của các loại vật liệu xốp khác nhau. Trong bài báo tiến hành mô phỏng mẫu nén bằng phần mềm LS-DYNA và so sánh với kết quả thí nghiệm trong phòng để đánh giá sự phù hợp của mô hình đáp ứng ứng xử thực tế của vật liệu xốp XPS.

Từ khoá: mô hình vật liệu; xốp; mô phỏng; thí nghiệm; lỗ rỗng mở; lỗ rỗng đóng kín.

RESEARCH ON EVALUATING THE XPS FOAM MATERIAL MODEL IN LS-DYNA THROUGH THE EXPERIMENTAL DATA

Abstract

This paper presents a study on the behavior of the XPS porous material when subjected to uniaxial compression by testing on the compressor and simulation experiments using LS-DYNA software. The diversity of porous materials makes it difficult to choose an appropriate material model when calculating and simulating engineering problems using this material. The study evaluates the suitability of some material models available in LS-DYNA for the simulation application of different types of porous materials. In this paper, we use compression tests simulated by LS-DYNA software and compare them with laboratory test results to evaluate the suitability of the response model of the XPS foam.

Keywords: material models; foam; simulation; testing; open cell; closed cell.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2022-16\(2V\)-13](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2V)-13) © 2022 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

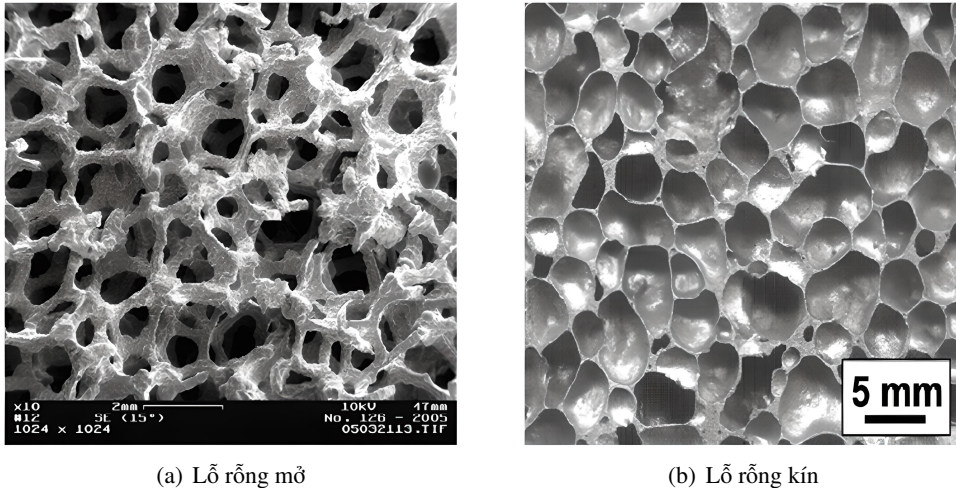
1. Giới thiệu

Vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng (vật liệu xốp) được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng khác nhau, từ hấp thụ năng lượng tác động, bao bọc để bảo vệ các thiết bị quan trọng tránh va đập, đến việc chế tạo sản phẩm gia dụng phục vụ đời sống. Đối với các mục đích khác nhau này dẫn đến một loạt các sản phẩm xốp có đặc tính thay đổi ra đời. Trong thực tế nghiên cứu, sự thay đổi các đặc tính của vật liệu góp phần tạo ra sự phức tạp của mô hình vật liệu khi nghiên cứu vật liệu xốp.

Vật liệu xốp được tạo ra với hai yếu tố quan trọng: vật liệu nền và hình thái của pha khí. Có hai hình thái pha khí trong vật liệu xốp là lỗ rỗng mở hoặc đóng kín (Hình 1) [1–5]. Các lỗ rỗng mở có cấu trúc dạng xương cho phép không khí có thể luân chuyển giữa các lỗ rỗng. Đối với cấu trúc lỗ rỗng

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: congnghi.hd@gmail.com (Nghi, N. C.)

đóng kín ngoài cấu trúc xương như lỗ rỗng mở còn được ngăn cách bởi các vách ngăn bằng pha rắn vật liệu sẽ ngăn không cho không khí thoát ra ngoài các lỗ rỗng. Ngoài ra kích thước lỗ rỗng đóng vai trò quan trọng trong ứng xử và kiểm soát tốc độ khí thoát ra khi vật liệu bị nén. Việc điều chỉnh có tính toán các thông số này cung cấp một loạt các ứng xử có thể điều chỉnh của vật liệu xốp cho các ứng dụng khác nhau.



(a) Lỗ rỗng mở

(b) Lỗ rỗng kín

Hình 1. Hình thái pha khí

Vật liệu nền có thể được làm từ nhiều loại vật liệu dạng cứng hoặc dẻo (độ linh hoạt cao). Vật liệu nền dạng cứng thường tạo ra vật liệu xốp cứng ít có khả năng đàn hồi. Cấu trúc của vật liệu bị phá vỡ do quá trình biến dạng dẻo hoặc bị bẻ gãy vật liệu nền. Trong ứng xử biến dạng dẻo, vật liệu nền trải qua biến dạng dẻo với rất ít hoặc không có khả năng phục hồi trạng thái.

Vật liệu nền có độ đàn hồi cũng được ứng dụng trong chế tạo vật liệu xốp, vật liệu nền dạng này thông thường là nhựa hoặc cao su. Vật liệu xốp đàn hồi rất linh hoạt và có độ phục hồi trạng thái cao, việc phục hồi trạng thái của vật liệu có thể là tức thời hoặc sau một khoảng thời gian. Xốp Polyurethane dẻo là điển hình của loại vật liệu này. Bên cạnh đó, vật liệu xốp có gốc nền cao su cũng được sản xuất với nhiều ứng dụng khác nhau. Vật liệu xốp đàn hồi thường có cấu trúc lỗ rỗng mở trong tự nhiên. Polystyrene, polyethylene và polypropylene được sử dụng trong các ứng dụng cấu trúc lỗ rỗng kín. Polystyrene có khuynh hướng sản xuất vật liệu xốp cứng trong khi polyethylene và polypropylene tạo ra vật liệu xốp có khả năng đàn hồi.

Sự phát triển ở trình độ cao của kỹ thuật sản xuất hiện đại đã tạo ra sự đa dạng của vật liệu xốp ứng dụng trong các lĩnh vực khác nhau. Những loại vật liệu xốp này có tính hấp thụ năng lượng lớn khi biến dạng, chống lại các va đập bất lợi cũng như giảm rung động cho đối tượng cần bảo vệ bằng các lớp bọc giảm chấn. Sự đa dạng của vật liệu xốp tạo ra nhiều khó khăn khi lựa chọn mô hình tính toán phù hợp cho vật liệu nhằm mô tả đúng ứng xử của vật liệu trong các điều kiện sử dụng khác nhau.

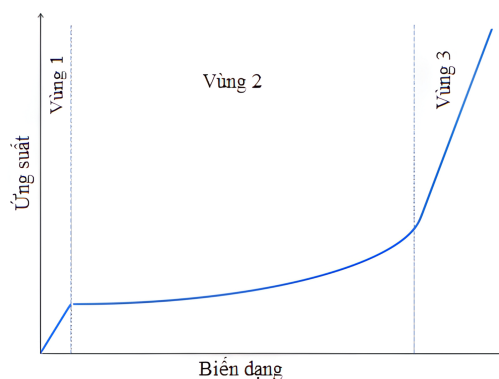
Vật liệu xốp có mật độ thấp, biểu diễn quan hệ phi tuyến tính và thường được dùng trong các ứng dụng hấp thụ năng lượng [6, 7]. Với mục tiêu ứng dụng vật liệu xốp trong việc hấp thụ tác động của tải trọng nén ép dạng xung kích như sóng xung kích của vụ nổ lên kết cấu công trình. Trong nghiên cứu đã tiến hành phân tích cấu trúc và đặc điểm của một số loại xốp khác nhau, trong đó vật liệu xốp XPS (Extruded Polystyrene) có đặc điểm nhẹ và có độ cứng cao nên phù hợp với mục tiêu kết hợp với

các vật liệu khác để tạo lớp kết cấu bảo vệ tiếp nhận sóng xung kích để giảm tải tác dụng lên công trình. Kết cấu công trình khi chịu tác dụng của sóng xung kích sẽ chịu nén ép, do đó việc nghiên cứu mô hình vật liệu của xốp XPS khi chịu tác dụng nén ép để phục vụ cho việc tính toán hiệu quả của kết cấu bảo vệ là hết sức cần thiết.

Bài báo nghiên cứu lựa chọn mô hình ứng xử của vật liệu xốp cứng XPS khi chịu nén ép bằng dữ liệu thí nghiệm trong phòng và mô phỏng trên phần mềm LS-DYNA để lựa chọn mô hình ứng xử. Các nghiên cứu này tiếp sau các nghiên cứu của Babushankar Sambamoorthy và Tuhin Halder [8], Brian Croop và Hubert Lobo [9], Qasim H. Shah và A. Topa [10], Ramaswamy K. và cs. [11]. Việc lựa chọn được mô hình vật liệu phù hợp trong LS-DYNA có ý nghĩa quan trọng trong việc nghiên cứu ứng dụng vật liệu xốp vào các bài toán kỹ thuật khác nhau và có cơ sở khoa học để đánh giá độ chính xác khi tính toán mô phỏng.

2. Ứng xử của vật liệu xốp rỗng khi chịu nén

Cơ chế ứng xử hiệu quả của vật liệu xốp là khi chịu tác dụng nén và kém hiệu quả khi chịu kéo hoặc cắt do cấu trúc hình học của vật liệu [1]. Nói chung, có ba vùng trong mối quan hệ ứng suất - biến dạng khi chịu nén của vật liệu xốp (Hình 2): vùng đàn hồi ban đầu (Vùng 1), vùng nén phẳng (Vùng 2) và vùng nén chặt (Vùng 3). Trong vùng ban đầu, vật liệu xốp có độ cứng do cường độ của bản thân vật liệu nền. Sau đó quá trình biến dạng cấu trúc hình học vật liệu làm thành phần khí bên trong bị ảnh hưởng. Trong vật liệu xốp lỗ rỗng mở khí sẽ thoát ra khỏi xốp qua các lỗ rỗng mở còn trong vật liệu xốp lỗ rỗng đóng kín khí được nén lại [6]. Với áp suất khí đủ cao sẽ phá vỡ thành lỗ rỗng để giải phóng khí trong lỗ rỗng vào khí quyển và điều này dẫn đến vỡ vĩnh viễn thành lỗ rỗng gây phá hoại không thể phục hồi cho vật liệu xốp. Mặt khác nếu vật liệu nền có cường độ đủ mạnh và độ dẻo cao, lỗ rỗng vẫn còn nguyên vẹn nhưng ép sát hoàn toàn. Khi tất cả các lỗ rỗng bị vỡ hoặc bị ép sát thì quá trình nén chặt bắt đầu, từ đây vật liệu bắt đầu có ứng xử giống như vật liệu nền thuần túy trong mối quan hệ ứng suất - biến dạng của vật liệu nền.



Hình 2. Quan hệ ứng suất - biến dạng đặc trưng của vật liệu xốp khi chịu nén

3. Thí nghiệm nén vật liệu xốp XPS

Tiến hành thí nghiệm nén đơn trục vật liệu xốp XPS trong phòng thí nghiệm nhằm nghiên cứu ứng xử của vật liệu khi chịu nén và thu thập số liệu thí nghiệm thực phục vụ việc lựa chọn mô hình vật liệu phù hợp với ứng xử thực của vật liệu ở bước tiếp theo.

3.1. Công tác chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Tiến hành cắt tạo các mẫu thí nghiệm vật liệu xốp XPS có kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm với các thông số cơ bản. Mẫu xốp XPS thí nghiệm được thể hiện trong Hình 3.



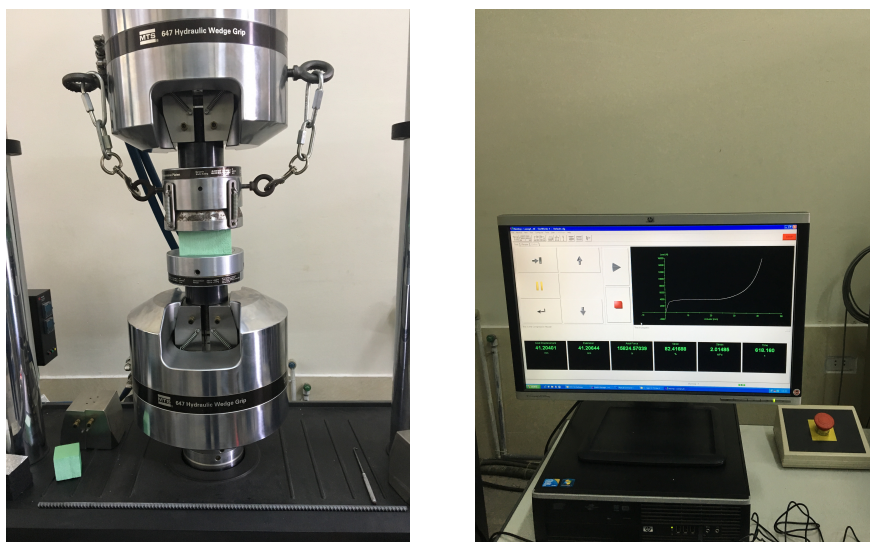
Hình 3. Mẫu xốp XPS trong thí nghiệm nén

Bảng 1. Thông số vật liệu xốp XPS theo nhà sản xuất [12]

Đặc tính	Đơn vị	Chỉ số	Phương pháp thử
Tỷ trọng	kg/m^3	40	ASTM 1622
Cường độ chịu nén	KPa	400	ASTM 1621
Độ hấp thụ nước	% (v/v)	< 1%	ASTM C272
Hệ số truyền nhiệt	W/m.k	0,28	ASTM C518
Độ ổn định kích thước	%	< 2%	

3.2. Thiết bị thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm ép mẫu xốp trên hệ thống máy kéo nén đa năng của hãng MTS sử dụng đầu gia lực 647 Hydraulic Wedge Grips có khả năng gia tải lên đến 500 kN với tốc độ nén được điều khiển. Máy ép được kết nối đồng bộ với hệ thống máy tính tích hợp phần mềm điều khiển và xử lý dữ

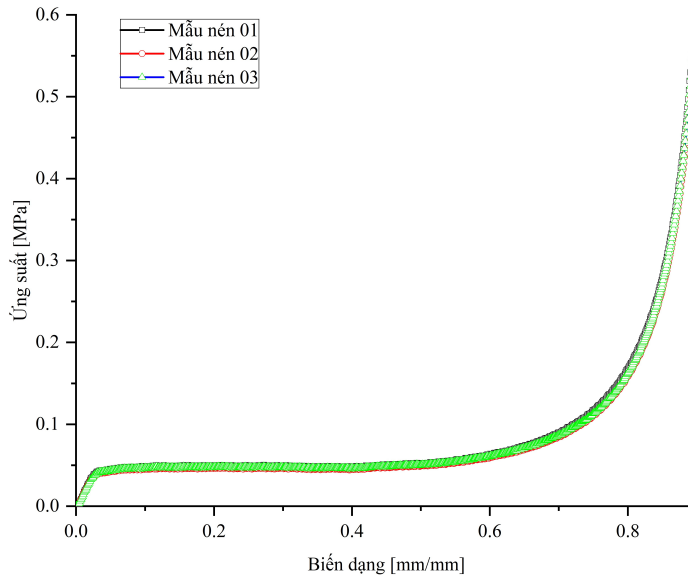


Hình 4. Quá trình tiến hành thí nghiệm nén mẫu xốp XPS

liệu chuyên dụng của hãng. Kết quả nén được thể hiện ngay trên giao diện của phần mềm giúp việc đánh giá kết quả thí nghiệm và điều chỉnh thí nghiệm kịp thời. Quá trình thí nghiệm nén mẫu trong phòng thí nghiệm được thể hiện trong Hình 4.

3.3. Kết quả thí nghiệm

Tiến hành thí nghiệm nén các mẫu xốp XPS với cùng tốc độ nén 4 mm/phút và quá trình thí nghiệm kết thúc khi mẫu nén biến dạng đạt 90%. Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng đặc trưng của vật liệu trên Hình 5.



Hình 5. Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng của mẫu XPS thí nghiệm

4. Lựa chọn mô hình vật liệu cho xốp XPS trong LS-DYNA

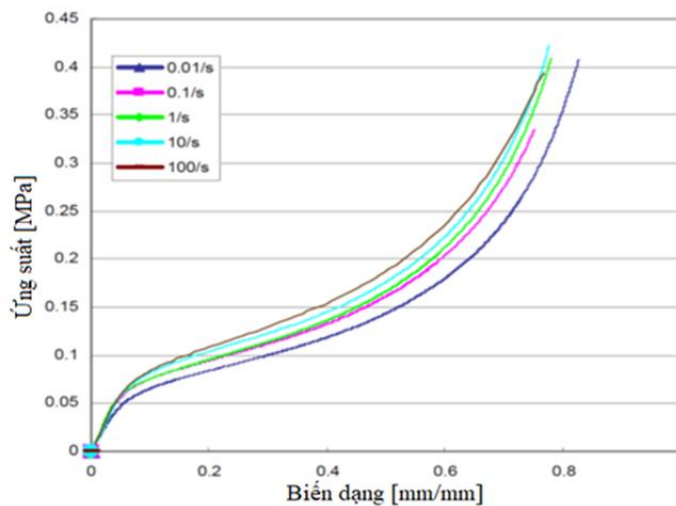
Việc nghiên cứu và tính toán với các loại vật liệu nói chung cần có sự lựa chọn mô hình ứng xử của vật liệu một cách phù hợp để kết quả tính toán đáp ứng được ứng xử thực tế của vật liệu. Có nhiều phần mềm mô phỏng mạnh mẽ đã và đang được sử dụng rộng rãi trong mô phỏng các bài toán phức tạp như Ansys, Abaqus, Hyper Work, ... Trong số đó, LS-DYNA được dùng phổ biến để nghiên cứu mô phỏng kết cấu chịu tác động của các vụ nổ, va chạm với biến dạng lớn và có thư viện phong phú các loại vật liệu khác nhau. Nội dung nghiên cứu của bài báo này lựa chọn phần mềm LS-DYNA để mô phỏng thí nghiệm nén vật liệu xốp XPS.

4.1. Đánh giá một số mô hình thông dụng

Với vật liệu xốp mềm có cấu trúc lỗ rỗng mở như xốp Polyurethane phù hợp với mô hình vật liệu MAT_LOW_DENSITY_FOAM (MAT_57). Trong trường hợp đơn giản nhất mô hình chỉ cần kết hợp với biểu đồ lực tác dụng theo thời gian là đủ để mô tả các ứng xử của vật liệu khi chịu tác dụng nén ép. Với các vật liệu dạng này, vật liệu nền không bị phá hủy mà có khả năng phục hồi tốt thì việc bổ sung quá trình dỡ tải sẽ đem lại ứng xử đầy đủ của vật liệu. Tuy nhiên quá trình phục hồi của vật liệu là khác nhau nên điều quan trọng là phải xác định các đường phục

hồi của vật liệu một cách chính xác và quá trình này sẽ xác định được các tham số dễ tải động HU và tham số hình dạng dễ tải SHAPE. Trong tài liệu hướng dẫn của LS-DYNA [13, 14] cũng đã cung cấp các số liệu tham khảo cho hai tham số trên lần lượt là 0,1 và 6, chúng có thể được điều chỉnh thông qua LS-OPT. Ngoài mô hình MAT_57 các loại vật liệu dạng này có thể sử dụng các mô hình khác như: MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63), MAT_CLOSED_CELL_FOAM (MAT_53), MAT_FU_CHANG_FOAM (MAT_83) hoặc MAT_LOW_DENSITY_SYNTHETIC_FOAM (MAT_179) và các mô hình vật liệu này cũng được áp dụng với nhiều loại xốp khác nhau [8–11].

Vật liệu xốp cứng không có khả năng phục hồi trạng thái gốc Polystyrene khi chịu nén ép thì mô hình MAT_63 là một lựa chọn phù hợp với thông số bổ sung cho mô hình thông qua mối quan hệ ứng suất - biến dạng thể tích và hệ số Poisson bằng không [15]. Thông qua nghiên cứu của Brian Croop và Hubert Lobo [9] cho thấy quan hệ ứng suất - biến dạng thể tích của xốp EPS (Expanded Polystyrene Foam) hầu như không phụ thuộc vào tốc độ nén ép (Hình 6) nên mô hình vật liệu MAT_MODIFIED_CRUSHABLE_FOAM (MAT_163) cũng là một lựa chọn tốt cho việc mô phỏng vật liệu có gốc Polystyrene. Tuy nhiên, mô hình MAT_163 là mô hình mở rộng và yêu cầu thêm nhiều hệ số thực nghiệm ngoài những thông số cơ bản của vật liệu.



Hình 6. Quan hệ ứng suất - biến dạng của xốp EPS [9]

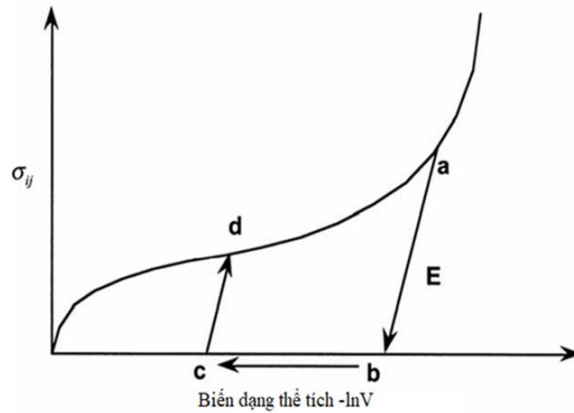
Trong nội dung tiếp theo đi sâu tìm hiểu về mô hình MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63) trong LS-DYNA đã được áp dụng thành công trong nhiều nghiên cứu trước đây [8–10].

4.2. Mô hình MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63)

Mô hình vật liệu MAT_63 có yêu cầu đơn giản khi cung cấp các thông số đầu vào với các tham số cơ bản như khối lượng riêng, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson và biểu đồ mối quan hệ giữa ứng suất - biến dạng từ thí nghiệm nén đơn trục của vật liệu. Mục đích của mô hình này là cho vật liệu xốp có thể nghiền nát (không phục hồi) khi chịu tác động và các ứng dụng khác mà ứng xử theo chu kỳ là không quan trọng.

Mô hình vật liệu xốp đẳng hướng chịu tác động nén một chiều với hệ số Poisson về cơ bản bằng không [13–15]. Quan hệ ứng suất - suất biến dạng được mô tả trong Hình 7, trong đó ví dụ về việc dỡ tải từ điểm **a** đến ứng suất cắt tại **b** sau đó dỡ tải đến điểm **c** và cuối cùng gia tải lại đến điểm **d**. Tại

thời điểm gia tải lại sẽ tiếp tục dọc theo đường cong tải. Một lưu ý quan trọng là sử dụng các giá trị khác không đối với giới hạn kéo để ngăn chặn sự hư hỏng của vật liệu dưới tải trọng kéo nhỏ [13].



Hình 7. Quan hệ ứng suất - biến dạng vật liệu xốp cứng [13]

Trong quá trình tính toán, giả định rằng mô đun đàn hồi là không đổi và ứng suất cập nhật với ứng xử đàn hồi [13]:

$$\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij}^n + E \dot{\epsilon}_{ij}^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (1)$$

trong đó, σ_{ij}^* là ứng suất được xác định thông qua mô đun đàn hồi E , ten xơ tốc độ biến dạng $\dot{\epsilon}_{ij}$ và bước thời gian Δt . Sau đó, ứng suất chính, σ_i^* ($i = 1, 3$), được so sánh với ứng suất chảy σ_y và nếu ứng suất chính vượt quá ứng suất chảy thì nó sẽ được lấy bằng giá trị của ứng suất chảy ở bước tính tiếp theo:

$$\sigma_y < |\sigma_i^*| \quad \text{thì} \quad \sigma_i^{n+1} = \sigma_y \frac{\sigma_i^*}{|\sigma_i^*|} \quad (2)$$

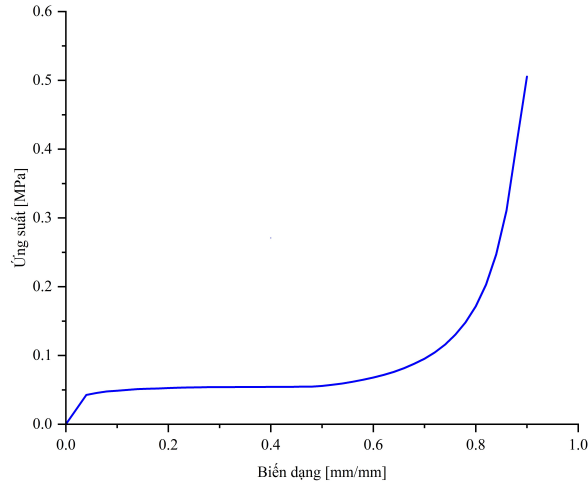
Sau khi các giá trị ứng suất chính được chia tỷ lệ, ten xơ ứng suất được chuyển đổi trở lại hệ thống tổng thể. Như đã thấy trong Hình 7, ứng suất chảy là một hàm của lôgarit tự nhiên của thể tích tương đối V , tức là biến dạng thể tích.

4.3. Mô phỏng nén xốp XPS bằng LS-DYNA

Một trong những yếu tố quan trọng khi mô phỏng trong LS-DYNA là đưa được đường quan hệ ứng suất - biến dạng (hoặc lực - chuyển vị) vào mô hình vật liệu. Với các mô hình vật liệu cho xốp nói chung thì đường quan hệ ứng suất - biến dạng cần thỏa mãn các yếu tố: Trong Vùng 1 đường quan hệ là tuyến tính (độ dốc không đổi) và trong Vùng 2 đường quan hệ là hằng số hoặc tăng nhẹ.

Từ những nhận xét trên tiến hành trung bình, tuyến tính hóa kết quả thí nghiệm nén các mẫu xốp XPS thu được đường đặc trưng quan hệ ứng suất - biến dạng với giá trị ứng suất tại điểm chuyển trạng thái Vùng 1 - Vùng 2 là 0,342 MPa và Vùng 2 - Vùng 3 là 0,498 MPa để đưa vào mô hình vật liệu khi mô phỏng.

Để tiến hành đánh giá mô hình phù hợp áp dụng cho xốp cứng XPS, lựa chọn các mô hình MAT_CRUSHABLE_FOAM (MAT_63), MAT_LOW_DENSITY_FOAM (MAT_57) và MAT_CLOSED_CELL_FOAM (MAT_53) với các thông số cơ bản của vật liệu xốp XPS và đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng trên Hình 8.



Hình 8. Quan hệ ứng suất - biến dạng sau hiệu chuẩn

Bảng 2. Tham số vật liệu xốp XPS

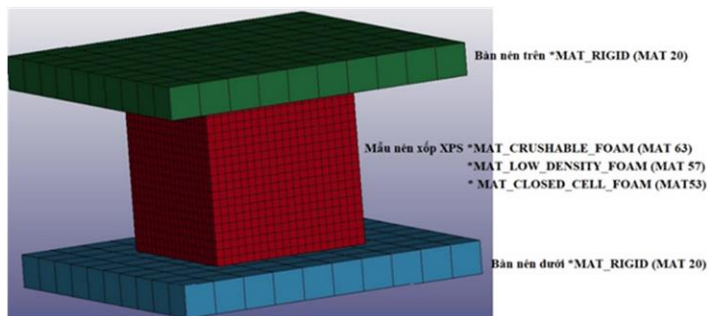
ρ (kg/m ³)	E (Pa)	μ
40	$1,17 \times E6$	0,0

Tiến hành mô phỏng mẫu xốp XPS kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm tương đương mẫu trong thí nghiệm và chia lưới sử dụng phần tử khối 8 nút kích thước $2,5 \times 2,5 \times 2,5$ mm. Bàn nén phía trên và phía dưới sử dụng vật liệu thép không bị biến dạng khi nén thông qua mã vật liệu MAT_RIGID (MAT_20). Trong mô phỏng sử dụng liên hệ CONTACT-AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE cho tương tác tiếp xúc giữa mặt xốp và bàn nén.

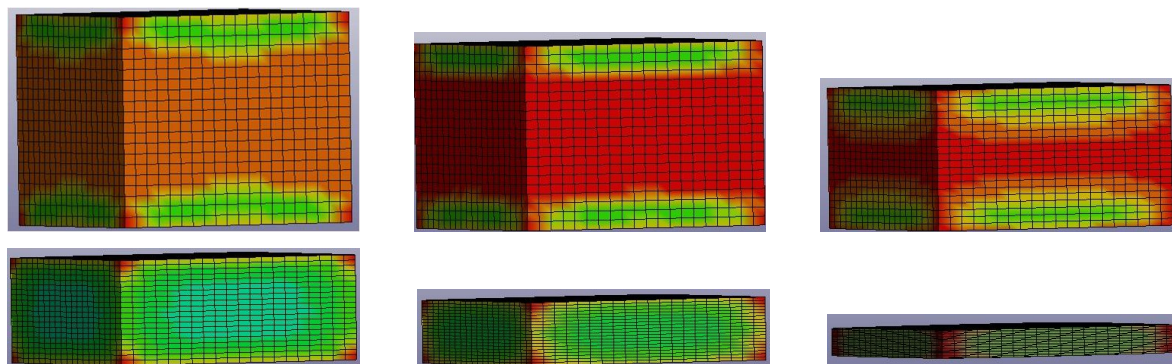
Bảng 3. Tham số mô hình vật liệu bàn nén thép

ρ (kg/m ³)	E (Pa)	μ
7850	$2,05 \times E11$	0,3

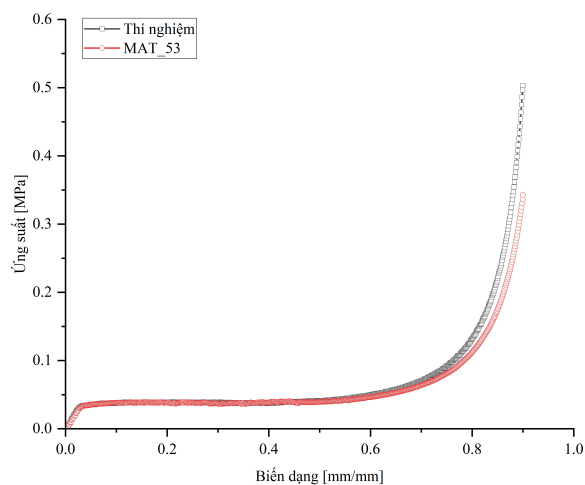
Mô hình mô phỏng mẫu xốp XPS và các kết quả đường cong quan hệ ứng suất – biến dạng trong LS-DYNA được thể hiện trên các hình từ Hình 9 đến Hình 14.



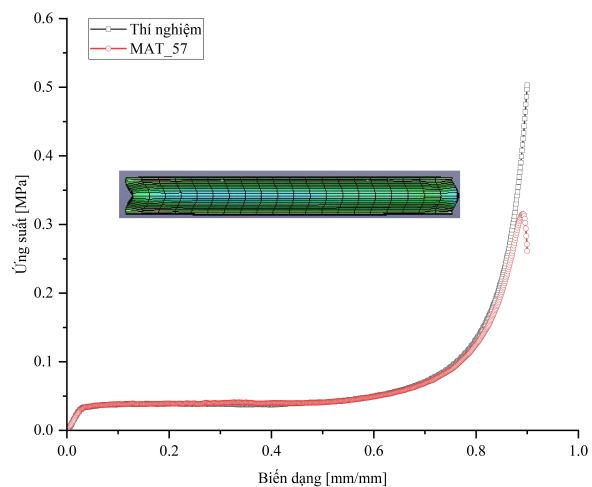
Hình 9. Mô hình mô phỏng mẫu nén xốp XPS trong LS-DYNA



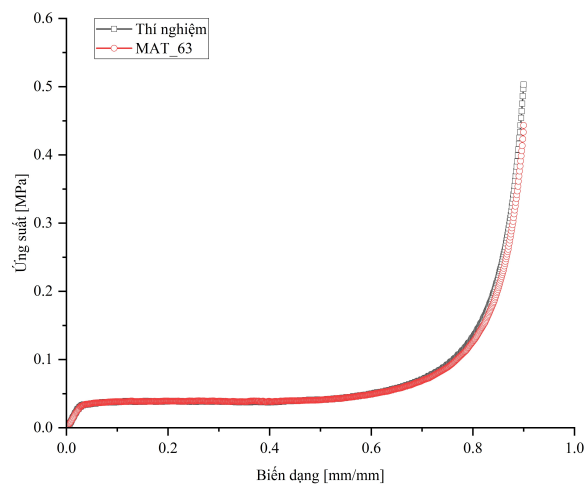
Hình 10. Quá trình mô phỏng nén ép mẫu xốp XPS trong LS-DYNA



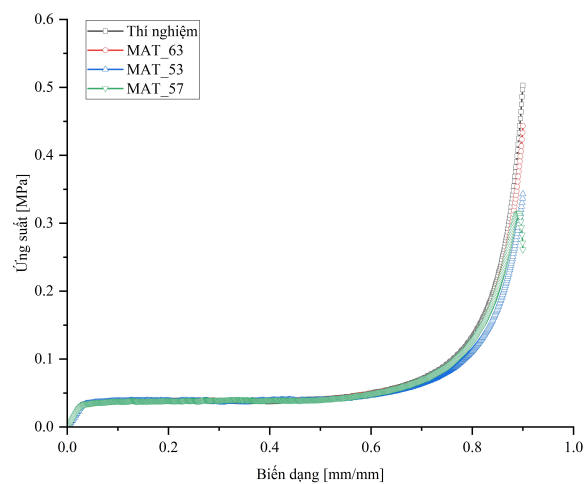
Hình 11. Kết quả mô phỏng mẫu xốp theo mô hình MAT_53



Hình 12. Kết quả mô phỏng mẫu xốp theo mô hình MAT_57



Hình 13. Kết quả mô phỏng mẫu xốp theo mô hình MAT_63



Hình 14. Tương quan kết quả nén mẫu xốp giữa các mô hình mô phỏng

Từ kết quả mô phỏng thí nghiệm nén mẫu xốp cho thấy các mô hình vật liệu có sẵn trong LS-DYNA được lựa chọn cho kết quả ứng xử sát với kết quả thí nghiệm nén mẫu. Mô hình vật liệu MAT_53 ở giai đoạn nén chặt đường cong ứng suất - biến dạng không bám sát kết quả thí nghiệm và sai lệch giá trị ứng suất lớn nhất 31,81%. Mô hình vật liệu MAT_57 ở cuối giai đoạn nén chặt mẫu thí nghiệm bị biến dạng bất thường (Hình 12).

Với mô hình vật liệu MAT_63 ở giai đoạn nén chặt (Vùng 3) có sai lệch với kết quả thí nghiệm (sai lệch giá trị ứng suất lớn nhất 11,88%) nhưng vẫn phản ánh đúng quy luật ứng xử của vật liệu. Về tổng thể đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng trong mô phỏng bám sát với kết quả thí nghiệm. Từ những kết quả này cho thấy mô hình MAT_63 là phù hợp cho mô phỏng mẫu xốp cứng không phục hồi chịu nén trong LS-DYNA.

5. Kết luận

Từ những kết quả nghiên cứu nêu trên nhận thấy:

Một số các mô hình vật liệu có sẵn cho vật liệu xốp trong thư viện của LS-DYNA đã cung cấp cho người sử dụng nhiều lựa chọn khác nhau. Một số ít trong các mô hình này được xây dựng để phản ánh phù hợp các đặc trưng quan trọng của các loại xốp cụ thể. Mỗi mô hình có những đòi hỏi khác nhau trong việc cung cấp các dữ liệu đầu vào. Trong nghiên cứu tập trung vào một số mô hình với những đòi hỏi đầu vào đơn giản nhưng vẫn phản ánh được ứng xử thực của vật liệu xốp.

Một điều quan trọng là thể hiện được các ứng xử thực tế của vật liệu trong kết quả mô phỏng, do đó cần phải hiệu chỉnh các thông số thí nghiệm cũng như mô hình để có kết quả phù hợp. Trong nghiên cứu này đã tiến hành hiệu chỉnh đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng hợp lý hơn từ các dữ liệu thí nghiệm nhằm đáp ứng tốt hơn cho mô hình vật liệu trong LS-DYNA để thu được kết quả mô phỏng hợp lý.

Thông qua nghiên cứu phương pháp xử lý mô hình vật liệu trong lý thuyết mô hình của LS-DYNA, cũng như dựa trên các nghiên cứu trước đây cho thấy các mô hình MAT_63, MAT_53 và MAT_57 là lựa chọn phù hợp để mô phỏng vật liệu xốp cứng chịu nén với yêu cầu đầu vào là các tham số cơ bản của vật liệu.

Từ kết quả khảo sát cho thấy mô hình MAT_63 phù hợp và sát với kết quả thí nghiệm, các tham số mô hình cơ bản đòi hỏi đơn giản. Đề xuất sử dụng mô hình MAT_63 cho các nghiên cứu tiếp theo khi mô phỏng các loại xốp cứng không phục hồi.

Tài liệu tham khảo

- [1] Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids*. Cambridge University Press.
- [2] Mills, N. J. (2007). *Polymer foams handbook: Engineering and biomechanics applications and design guide*. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- [3] Andrews, E. W., Huang, J.-S., Gibson, L. J. (1999). *Creep behavior of a closed-cell aluminum foam*. *Acta Materialia*, 47(10):2927–2935.
- [4] Ashby, M. F., Evans, A., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H. N. G. (2002). *Metal foams: a design guide*. *Materials & Design*, 23(1):119.
- [5] Smith, B. H., Szyniszewski, S., Hajjar, J. F., Schafer, B. W., Arwade, S. R. (2012). *Steel foam for structures: A review of applications, manufacturing and material properties*. *Journal of Constructional Steel Research*, 71:1–10.
- [6] Thom, C. (2009). *Soft materials under air blast loading and their effect on primary blast injury*. Master's Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- [7] Nerenberg, J. G. (1998). *Blast wave loading of polymeric foams*. Master's Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, Canada.

- [8] Sambamoorthy, B., Halder, T. (2001). *3rd European LS-Dyna Conference Proceedings*.
- [9] Croop, B., Lobo, H. (2009). *Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA*.
- [10] Shah, Q. H., Topa, A. (2014). *Modeling large deformation and failure of expanded polystyrene crushable foam using LS-DYNA*. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2014:1–7.
- [11] Ramaswamy, K., Patham, B., Savic, V., Tripathy, B. (2017). *Stable and accurate LS-DYNA simulations with foam material models: optimization of finite element model parameters*. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 10(2):226–233.
- [12] Công ty Cổ phần Đầu tư Phú Vương. <http://phuvuongcorp.com/e-catalogue/>.
- [13] LS-Dyna Theory Manual (2019). <https://www.lstc.com/download/manuals>.
- [14] LS-Dyna Version R12.0 (2021). *Keyword User's Manual*.
- [15] Hirth, A., DuBois, P., Weimar, K. (1998). *CADFEM Users's Meeting*. 2–40.