

Đánh giá khả năng chịu lực của cột nhôm tạo hình nguội theo các tiêu chuẩn hiện hành của Australia/New Zealand, Hoa Kỳ và Châu Âu

Mai Trọng Nghĩa^{1*}, Phạm Ngọc Hiếu¹

¹ Bộ môn Kết cấu thép – gỗ, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

TỪ KHOÁ

Nhôm tạo hình nguội
Tiêu chuẩn hiện hành
Australia
Hoa Kỳ
Châu Âu
Khả năng chịu lực

TÓM TẮT

Nhôm tạo hình nguội là một dạng kết cấu mới, được sản xuất bằng cách áp dụng công nghệ định hình nguội vốn được phát triển cho các tiết diện thép thành mỏng, với các dạng mặt cắt điển hình như chữ C và chữ Z. So với nhôm cán nóng truyền thống, nhôm định hình nguội có nhiều ưu điểm về hiệu quả sản xuất, giúp giảm thời gian và chi phí chế tạo, đồng thời phù hợp cho các kết cấu nhẹ và các môi trường có yêu cầu cao về khả năng chống ăn mòn. Tuy nhiên, các tiêu chuẩn thiết kế nhôm hiện hành trên thế giới chủ yếu được xây dựng dựa trên các cấu kiện nhôm cán nóng và chưa có các quy định thiết kế riêng cho nhôm tạo hình nguội, đặc biệt đối với các tiết diện hở và thành mỏng rất nhạy cảm với hiện tượng mất ổn định tổng thể. Bài báo này trình bày một nghiên cứu mở rộng nhằm đánh giá khả năng chịu tải của cột nhôm tạo hình nguội tiết diện chữ C thông qua việc áp dụng và so sánh ba hệ tiêu chuẩn thiết kế kết cấu nhôm gồm tiêu chuẩn Australia/New Zealand (AS/NZS), tiêu chuẩn Châu Âu (Eurocode 9, EC9) và tiêu chuẩn Hoa Kỳ (AA 2015), thí nghiệm và mô phỏng thí nghiệm thông qua phần mềm ABAQUS. Nghiên cứu được thực hiện trên cơ sở một bài toán cột nhôm điển hình với các đặc trưng hình học, điều kiện biên và đặc tính vật liệu được sử dụng thống nhất từ các nghiên cứu đã công bố. Quy trình xác định khả năng chịu tải của cột được thực hiện độc lập theo từng tiêu chuẩn, bao gồm đánh giá độ mảnh, xác định ứng suất tới hạn và tính toán cường độ nén danh nghĩa. Kết quả cho thấy sự khác biệt giữa các tiêu chuẩn trong dự báo khả năng chịu tải, phản ánh sự khác nhau trong cách tiếp cận bài toán mất ổn định tổng thể. Từ đó cho thấy sự cần thiết phải tiếp tục hoàn thiện các quy định thiết kế cho cấu kiện nhôm tạo hình nguội.

KEYWORDS

Cold-formed aluminum
Current standards
Australia
America
Europe
Capacities

ABSTRACT

Cold-formed aluminum is an emerging structural system manufactured using cold-forming technology originally developed for thin-walled steel sections, typically with C- and Z-shaped profiles. Compared with conventional hot-rolled aluminum members, cold-formed aluminum offers several advantages in manufacturing efficiency, including reduced production time and fabrication cost, while being well suited for lightweight structures and environments requiring high corrosion resistance. However, existing aluminum design standards worldwide are primarily developed for hot-rolled aluminum members and do not provide specific provisions for cold-formed aluminum sections, particularly for open and thin-walled profiles that are highly sensitive to global buckling phenomena. This paper presents an extended study to evaluate the load-carrying capacity of cold-formed aluminum C-section columns through the application and comparison of three major aluminum structural design standards: the Australia/New Zealand Standard (AS/NZS), the European Standard (Eurocode 9, EC9), and the American Aluminum Design Standard (AA 2015). The investigation combines design calculations, experimental results, and numerical simulations conducted using the finite element software ABAQUS. The study is based on a representative aluminum column problem with geometric characteristics, boundary conditions, and material properties consistently adopted from previously published studies. The load-carrying capacity of the columns is independently determined according to each design standard, including the evaluation of slenderness, determination of critical stress, and calculation of nominal compressive strength. The results reveal noticeable differences among the design standards in predicting the load-carrying capacity, reflecting the variations in their approaches to global buckling behavior. These findings highlight the need for further development and refinement of design provisions specifically for cold-formed aluminum structural members.

*Liên hệ tác giả: nghiamt@hau.edu.vn

Nhận ngày 14/03/2026, sửa xong ngày 25/03/2026, chấp nhận đăng ngày 26/03/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2026.1281>

1. Đặt vấn đề

Các kết cấu nhôm đã xuất hiện tương đối muộn trong lĩnh vực kỹ thuật kết cấu và được đặc trưng bởi khối lượng riêng nhỏ cùng khả năng chống ăn mòn vượt trội [1]. Những đặc tính này khiến nhôm trở thành một vật liệu hấp dẫn trong xây dựng hiện đại, mang lại cả lợi ích kinh tế và hiệu quả cạnh tranh so với các vật liệu truyền thống. Khối lượng riêng thấp của nhôm tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình vận chuyển và lắp dựng, đồng thời giảm tải trọng truyền xuống móng, giảm nhu cầu năng lượng trong cả giai đoạn thi công và khai thác công trình, cũng như hạn chế yêu cầu về nhân công xử lý thủ công. Bên cạnh đó, khả năng chống ăn mòn rất tốt của nhôm giúp giảm đáng kể nhu cầu bảo trì và đảm bảo hiệu quả làm việc ổn định trong các môi trường khắc nghiệt. Do đó, kết cấu nhôm đặc biệt phù hợp cho các công trình làm việc trong điều kiện môi trường khắc nghiệt, chẳng hạn như môi trường biển yêu cầu độ bền lâu cao, cũng như các hệ mái nhíp lớn, nơi việc giảm trọng lượng bản thân giúp đơn giản hóa quá trình chế tạo, vận chuyển và lắp dựng [2].

Nhôm cũng được ứng dụng rộng rãi trong các hệ kết cấu bằng tải nhíp lớn dùng để vận chuyển vật liệu rời, chẳng hạn như than đá, từ các mỏ khai thác ngầm đến các cảng ven biển [2]. Các hệ bằng tải dạng mô-đun này có thể kéo dài tới khoảng 100 km và có thể di dời tương đối dễ dàng nhờ đặc tính nhẹ của nhôm. Hơn nữa, khả năng chống ăn mòn vượt trội của vật liệu này cho phép vận hành lâu dài trong các điều kiện môi trường có tính ăn mòn cao [3].

Xét về phương diện công nghệ chế tạo, các cấu kiện kết cấu nhôm thường được sản xuất thông qua hai quy trình chính: cán nóng và tạo hình nguội (cold forming). Phương pháp cán nóng đã được thiết lập từ lâu như một quy trình sản xuất tiêu chuẩn và được áp dụng rộng rãi trên toàn thế giới. Ngược lại, công nghệ tạo hình nguội chỉ mới được áp dụng cho nhôm trong thời gian gần đây thông qua việc cải tiến các dây chuyền cán nguội vốn được phát triển cho thép. Cách tiếp cận này đã cho phép sản xuất các tiết diện nhôm cán nguội, chủ yếu dưới dạng tiết diện chữ C và tiết diện chữ Z. So với phương pháp cán nóng, quá trình tạo hình nguội mang lại một số ưu điểm đáng kể, bao gồm thời gian sản xuất ngắn hơn, mức tiêu thụ năng lượng thấp hơn, và chi phí chế tạo giảm [2]. Do đó, các tiết diện nhôm tạo hình nguội ngày càng thu hút sự quan tâm của cả giới công nghiệp và cộng đồng nghiên cứu.

Một số lượng đáng kể các nghiên cứu trước đây đã khảo sát ứng xử kết cấu của các cấu kiện hợp kim nhôm, đặc biệt thông qua các nghiên cứu thực nghiệm và phân tích đối với tiết diện cán nóng dạng rỗng vuông và chữ nhật, như đã được trình bày trong các công trình trước ([4]–[6]). Trong khi đó, các cấu kiện thép tạo hình nguội đã được nghiên cứu rất rộng rãi ([7]–[12]). Gần đây, sự quan tâm ngày càng tăng đã được dành cho ứng xử kết cấu của các tiết diện nhôm cán nguội. Đặc biệt, các nghiên cứu thực nghiệm và mô hình số đã được thực hiện đối với các cấu kiện nhôm cán nguội tiết diện chữ C, từ đó dẫn đến việc phát triển các khuyến nghị thiết kế cho loại cấu kiện này trong một loạt các nghiên cứu trước đây ([13]–[23]). Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu thực nghiệm và phân tích số đã được thực hiện nhằm khảo

sát ứng xử chịu nén của cột nhôm tạo hình nguội tiết diện chữ C, qua đó cung cấp các dữ liệu quan trọng về khả năng chịu lực và các dạng phá hoại liên quan đến mất ổn định tổng thể. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm và phân tích số [15–17] đã được thực hiện nhằm khảo sát ứng xử chịu nén của cột nhôm tạo hình nguội tiết diện chữ C, qua đó cung cấp các dữ liệu quan trọng về khả năng chịu lực và các dạng phá hoại liên quan đến mất ổn định tổng thể.

Về mặt thiết kế, các tiêu chuẩn thiết kế chính về kết cấu nhôm hiện hành trên thế giới có thể kể đến là tiêu chuẩn Australia/New Zealand AS/NZS 1664.1 [24], tiêu chuẩn Châu Âu BSEN 1999 [25] và tiêu chuẩn Hoa Kỳ AA: 2020 [26], chủ yếu được xây dựng dựa trên các nghiên cứu và kinh nghiệm thiết kế đối với các cấu kiện nhôm cán nóng. Trong các tiêu chuẩn này, khả năng chịu nén của cột nhôm được đánh giá thông qua các công thức mất ổn định đàn hồi và phi đàn hồi, có xét đến độ mảnh của cấu kiện, đặc trưng tiết diện và các hệ số an toàn quy định. Tuy nhiên, các quy định này vẫn chưa phản ánh đầy đủ ứng xử kết cấu đặc thù của các cấu kiện nhôm tạo hình nguội có tiết diện hở thành mỏng, vốn thể hiện cơ chế mất ổn định phức tạp hơn so với các cấu kiện nhôm truyền thống.

Báo cáo này do đó sẽ sử dụng các tiêu chuẩn hiện hành trên để tính toán khả năng chịu lực của cột nhôm tạo hình nguội dựa theo các tiết diện trên thị trường. Các kết quả tính toán sau đó được so sánh với các kết quả số hóa thu thập được từ báo cáo của Pham [27]. Từ kết quả so sánh đó sẽ đưa ra những đánh giá sơ bộ về việc áp dụng các tiêu chuẩn nhôm hiện hành trong xác định khả năng chịu lực của cột nhôm tạo hình nguội bị phá hoại do mất ổn định tổng thể.

Trong phạm vi bài báo này, giả thiết các tiết diện có độ mảnh tiết diện nhỏ để phá hoại xảy ra theo mất ổn định tổng thể, từ đó tập trung so sánh sự khác biệt giữa các tiêu chuẩn trong bài toán ổn định tổng thể. Việc nghiên cứu với các cấu kiện với tiết diện có độ mảnh lớn với mất ổn định cục bộ, méo được đề cập trong các nghiên cứu tiếp theo.

2. Tóm tắt về thí nghiệm và mô hình số hóa của cột nhôm tạo hình nguội

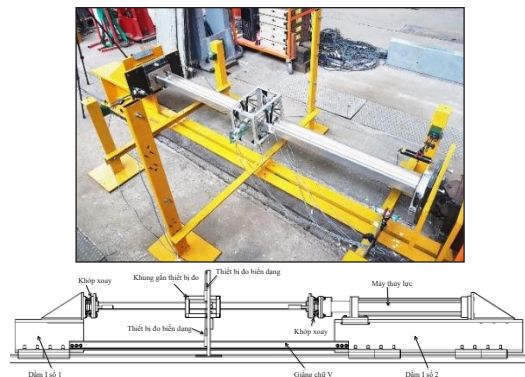
2.1. Tóm tắt về thí nghiệm cột nhôm tạo hình nguội

Một chương trình thí nghiệm về cột nhôm chữ C tạo hình nguội đã được thực hiện tại Đại học Sydney, Australia nhằm tìm hiểu về ứng xử và khả năng chịu lực của loại cấu kiện này [27], có bố trí như trong Hình 1. Vật liệu nhôm là loại vật liệu mềm, đồng thời ở dạng tiết diện thành mỏng, nên loại cấu kiện này có tồn tại nhiều sai lệch hình học do quá trình chế tạo, vận chuyển và gia công. Các sai lệch hình học này đã được chứng minh là có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử và cường độ của cấu kiện, được đo đạc trước khi mang mẫu đi thí nghiệm. Đồng thời, các đặc trưng cơ học của vật liệu như giới hạn chảy dẻo, mô đun biến dạng và biểu đồ ứng suất–biến dạng được xác định thông qua các thí nghiệm kéo mẫu vật liệu, được biểu diễn như trên Hình 2.

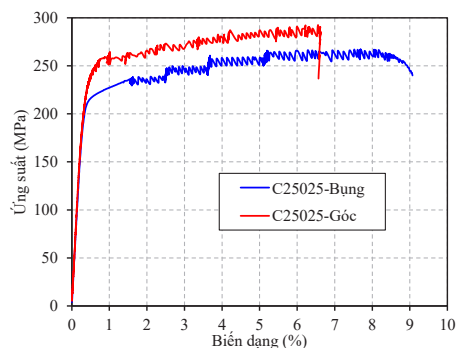
Các nghiên cứu thực nghiệm về cột nhôm định hình nguội đã được tiến hành tại Đại học Sydney (Úc), sử dụng các mặt cắt chữ C đại diện cho các sản phẩm nhôm định hình nguội thương mại. Trong nghiên

cứu này, mặt cắt C10030 điển hình được lựa chọn, đặc trưng bởi chiều cao danh nghĩa khoảng 100 mm và độ dày thành 3,0 mm. Các thí nghiệm được thực hiện dưới hai điều kiện biên khác nhau được thiết kế để mô phỏng các ràng buộc đầu cột thực tế, với các bậc tự do quay quanh các trục chính được kiểm soát một cách thích hợp. Hình 3 thể hiện một mẫu thí nghiệm C10030 dài 2,0m bị phá hoại do bị mất ổn định uốn xoắn. Dữ liệu thí nghiệm thu được là cơ sở cho việc phát triển mô hình mô phỏng phục vụ cho việc mở rộng nghiên cứu để thu thập thêm số liệu.

*Ghi chú: C10030-2.0 m là mẫu có tiết diện cao danh nghĩa 100 mm, chiều dày 3,0 mm và chiều dài cấu kiện là 2,0 m.



Hình 1. Mô hình thí nghiệm cầu kiện chịu nén.



Hình 2. Đường ứng suất – biến dạng của phần bụng phẳng và phần góc của tiết diện C25025.

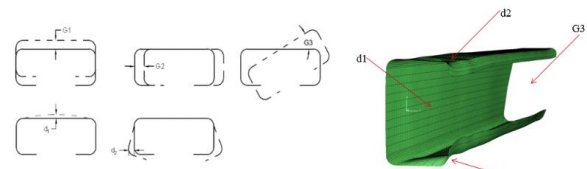


Hình 3. Mất ổn định uốn-xoắn của mẫu thí nghiệm.

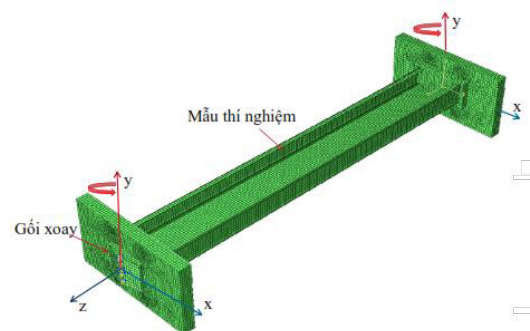
2.2. Thiết lập mô hình mô phỏng thí nghiệm thông qua phần mềm ABAQUS

Xây dựng mô hình mô phỏng thí nghiệm bằng phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần mềm ABAQUS nhằm mô tả chính xác đặc điểm làm việc của cấu kiện nhôm tạo hình nguội chịu nén. Bài toán tính toán ở đây xác định khả năng chịu lực của cột nhôm với các loại tiết diện và chiều dài theo bảng 2.

Trước tiên, các thông số cơ học của vật liệu và quan hệ ứng suất – biến dạng được đưa vào mô hình dựa trên kết quả thí nghiệm nhằm bảo đảm độ tin cậy của tính toán. Một nội dung quan trọng khác là việc xem xét sai lệch hình học ban đầu của cấu kiện vì đây là yếu tố ảnh hưởng lớn đến hiện tượng mất ổn định. Sai lệch này được đo bằng thiết bị laser dọc theo chiều dài mẫu, thu được các điểm rời rạc phản ánh độ lệch thực tế. Các điểm đo sau đó được chuyển thành dạng hàm toán học bằng chuỗi Fourier để mô tả đường cong sai lệch một cách liên tục. Số lượng chu kỳ của chuỗi được lựa chọn tùy theo chiều dài mẫu và đặc trưng bước sóng mất ổn định cục bộ có ảnh hưởng đáng kể đến ứng xử kết cấu. Quy trình đưa sai lệch hình học vào mô hình số được trình bày trong báo cáo [27]. Trước hết, tiết diện chuẩn được dựng lại bằng CAD và nhập vào ABAQUS để tạo mô hình ban đầu chưa có các sai lệch này. Tập dữ liệu của mô hình này được xuất ra rồi kết hợp với số liệu sai số đã xử lý để làm đầu vào cho chương trình MATLAB. Đoạn mã này đưa sai lệch theo đường đo và nội suy các điểm trung gian nhằm bảo đảm tính liên tục hình học. Sau khi xử lý, tập dữ liệu mới chứa đầy đủ sai lệch thực tế được nhập lại vào ABAQUS, hình thành mô hình hoàn chỉnh phục vụ phân tích. Một mẫu cấu kiện nhôm chữ C được đưa sai lệch hình học vào được minh họa như Hình 4.



Hình 4. Sai số hình học đo đạc được đưa vào mô hình phần tử hữu hạn.



Hình 5. Mô hình phân tử hữu hạn của cột chịu nén.

Độ tin cậy của mô hình mô phỏng số được đánh giá thông qua việc so sánh trực tiếp kết quả mô phỏng với kết quả thí nghiệm, như

trình bày trong Bảng x. Kết quả cho thấy giá trị tải trọng tới hạn thu được từ mô phỏng số P_{num} có xu hướng khá gần với kết quả thí nghiệm P_{test} . Tỷ số P_{num}/P_{test} dao động trong khoảng 0,83–0,98, với giá trị trung bình xấp xỉ 0,93, cho thấy mức độ phù hợp tốt giữa hai phương pháp. Đặc biệt, các mẫu có xét đến độ lệch tâm ngẫu nhiên (ký hiệu “e”) cho kết quả mô phỏng sát hơn với thí nghiệm so với các mẫu nén đúng tâm, phản ánh hợp lý điều kiện làm việc thực tế của cầu kiện. Đề xuất độ lệch tâm ngẫu nhiên bằng 1/1500 chiều dài mẫu, giá trị này được tham khảo từ các nghiên cứu trước của Becque, Pham và Schafer. Sai khác nhỏ giữa mô phỏng và thí nghiệm chủ yếu do ảnh hưởng của sai số hình học ban đầu, điều kiện biên và biến thiên đặc tính vật liệu trong thí nghiệm thực. Nhìn chung, kết quả so sánh cho thấy mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng có độ tin cậy tốt, có thể sử dụng để thực hiện các nghiên cứu tham số và mô phỏng hàng loạt nhằm mở rộng phạm vi khảo sát khả năng chịu lực của cột nhôm tạo hình nguội.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm và kết quả mô phỏng số.

Mẫu thí nghiệm	P_{test} (kN)	P_{num} (kN)	P_{num} / P_{test}
C10030-2.0m-1	91.25	79.62	0.87
C10030-2.0m-1e	81.00	79.62	0.98
C10030-2.0m-2e	81.38	79.62	0.98
C10030-2.5m-1	70.64	58.54	0.83
C10030-2.5m-2e	60.10	58.54	0.97
C10030-2.5m-3e	61.60	58.54	0.95
C10030-3.0m-2	49.45	42.91	0.87
C10030-3.0m-1e	46.76	42.91	0.92
C10030-3.0m-3e	44.65	42.91	0.96

trong đó:

P_{test} : kết quả thí nghiệm

P_{num} : kết quả mô phỏng bằng phần mềm ABAQUS

2.3. Đánh giá độ tin cậy của phương pháp mô phỏng thí nghiệm qua phần mềm ABAQUS

Độ tin cậy của mô hình mô phỏng được đánh giá thông qua việc so sánh trực tiếp kết quả mô phỏng với kết quả thí nghiệm, như trình bày trong Bảng 2. Kết quả cho thấy giá trị tải trọng tới hạn thu được từ mô phỏng P_{num} có xu hướng khá gần với kết quả thí nghiệm P_{test} . Tỷ số P_{num}/P_{test} dao động trong khoảng 0,83–0,98, với giá trị trung bình xấp xỉ 0,93, cho thấy mức độ phù hợp tốt giữa hai phương pháp. Đặc biệt, các mẫu có xét đến độ lệch tâm ngẫu nhiên (ký hiệu “e”) cho kết quả mô phỏng sát hơn với thí nghiệm so với các mẫu nén đúng tâm, phản ánh hợp lý điều kiện làm việc thực tế của cầu kiện. Nhìn chung, kết quả so sánh cho thấy mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng thông qua phần mềm ABAQUS có độ tin cậy tốt, có thể sử dụng để thực hiện các nghiên cứu tham số và mô phỏng hàng loạt nhằm mở rộng phạm vi khảo sát khả năng chịu lực của cột nhôm tạo hình nguội.

3. Khả năng chịu lực của cột nhôm theo tiêu chuẩn hiện hành của Australia, Hoa Kỳ và Châu Âu theo điều kiện ổn định tổng thể

3.1. Theo tiêu chuẩn Australia/New Zealand AS/NZS 1664.1.1997

Theo Tiêu chuẩn Kết cấu Nhôm Australia/New Zealand AS/NZS 1664.1:1997, khả năng chịu lực của cột nhôm chịu nén dọc trục được xác định dựa trên phương pháp thiết kế theo trạng thái giới hạn (Limit State Design – LSD), trong đó trạng thái giới hạn cường độ ứng với mất ổn định tổng thể được xem là trạng thái chi phối đối với các cầu kiện chịu nén mảnh. Đối với cột chịu nén đúng tâm, khả năng chịu lực danh định được xác định bằng tích của ứng suất nén giới hạn thiết kế và diện tích tiết diện nguyên, được biểu diễn như sau:

$$N = F_L A_g \quad (1)$$

trong đó: F_L là ứng suất nén giới hạn, đã xét đến ảnh hưởng của chảy vật liệu và mất ổn định tổng thể; A_g là diện tích tiết diện nguyên của cầu kiện. Ứng suất giới hạn F_L được xác định như một hàm của độ mảnh tương đương không thứ nguyên λ , đại diện cho ảnh hưởng tổng hợp của chiều dài cầu kiện, điều kiện biên, đặc trưng hình học tiết diện và ứng xử mất ổn định đàn hồi. Giá trị λ được xác định theo biểu thức:

$$\lambda = \frac{kL}{\pi r} \sqrt{\frac{F_{cy}}{E}} \quad (2)$$

trong đó: k là hệ số chiều dài tính toán; L là chiều dài cầu kiện; r là bán kính quán tính của tiết diện theo trục mất ổn định chi phối; F_{cy} là giới hạn chảy chịu nén của vật liệu; và E là mô đun đàn hồi của nhôm. Tùy thuộc vào giá trị của λ , ứng suất giới hạn F_L được xác định theo biểu thức từng đoạn, phản ánh ba miền ứng xử khác nhau của cầu kiện chịu nén:

- Cột ngắn ($\lambda \leq S_1^*$), trong đó khả năng chịu lực bị chi phối bởi chảy vật liệu;
- Cột có độ mảnh trung gian ($S_1^* \leq \lambda \leq S_2^*$), trong đó xảy ra mất ổn định phi tuyến (oằn dẹo);
- Cột mảnh ($\lambda \geq S_2^*$), trong đó mất ổn định đàn hồi chi phối khả năng chịu lực.

Các biểu thức xác định F_L tương ứng được cho như sau:

$$F_L = \begin{cases} \phi_{cc} F_{cy}, & (\lambda \leq S_1^*) \\ \phi_{cc} (B_c - D_c \lambda), & (S_1^* \leq \lambda \leq S_2^*) \\ \frac{\phi_{cc} F_{cy}}{\lambda^2}, & (\lambda \geq S_2^*) \end{cases} \quad (3)$$

trong đó: B_c và D_c là các hệ số ổn định được quy định trong tiêu chuẩn, phụ thuộc vào loại hợp kim và trạng thái nhiệt luyện của nhôm; ϕ_{cc} là hệ số sức kháng, xét đến các bất định trong xác định đặc trưng vật liệu và mô hình tính toán.

$$\phi_{cc} = \begin{cases} 1 - 0,21\lambda \leq 0,95 & (\lambda \leq 1,2) \\ 0,14\lambda + 0,58 \leq 0,95 & (\lambda > 1,2) \end{cases} \quad (4)$$

Đối với cột nhôm tạo hình nguội có tiết diện hở thành mỏng, chẳng hạn như tiết diện chữ C, hiện tượng mất ổn định tổng thể có thể xảy ra dưới dạng uốn, xoắn hoặc uốn–xoắn. Trong trường hợp này, độ mảnh tương đương λ được lấy bằng giá trị lớn nhất tương ứng với các

dạng mất ổn định theo các trục chính và dạng uốn-xoắn, nhằm đảm bảo dạng mất ổn định nguy hiểm nhất được xét đến trong thiết kế. Cần lưu ý rằng các quy định trong Tiêu chuẩn AS/NZS 1664.1:1997 chủ yếu được xây dựng dựa trên các nghiên cứu thực nghiệm và phân tích đối với các cấu kiện nhôm cán nóng và ép đùn. Do đó, khi áp dụng cho các cột nhôm tạo hình nguội, vốn có đặc trưng là bản mỏng và tiết diện hở, độ chính xác của tiêu chuẩn cần được kiểm chứng thêm thông qua các kết quả thí nghiệm và mô phỏng số nâng cao.

3.2. Theo tiêu chuẩn Hoa Kỳ Aluminum Association AA: 2020

Theo Tiêu chuẩn Nhôm Hoa Kỳ – Aluminum Design Manual (ADM, 2015), khả năng chịu lực của cấu kiện cột nhôm chịu nén đúng tâm được xác định trên cơ sở cường độ chịu nén danh định của cấu kiện, có xét đến các trạng thái giới hạn gồm chảy vật liệu, mất ổn định cấu kiện và mất ổn định cục bộ, cũng như tương tác giữa mất ổn định tổng thể và mất ổn định cục bộ. Đối với thiết kế theo phương pháp hệ số tải trọng và hệ số sức kháng (LRFD), khả năng chịu lực thiết kế của cột được xác định theo: $\phi_c P_n$

trong đó: P_n là khả năng chịu nén danh định của cấu kiện và ϕ_c là hệ số sức kháng theo quy định của tiêu chuẩn. Khả năng chịu nén danh định do mất ổn định cấu kiện được xác định bằng: $P_n = F_{cr} A_g$

trong đó: F_{cr} là ứng suất tới hạn chịu nén của cấu kiện và A_g là diện tích tiết diện nguyên. Ứng suất tới hạn F_{cr} được xác định như một hàm của độ mảnh lớn nhất của cột, xét đến các dạng mất ổn định có thể xảy ra. Tùy thuộc vào giá trị độ mảnh, F_{cr} được xác định theo ba miền ứng xử khác nhau:

- Miền chảy vật liệu, khi độ mảnh nhỏ, ứng suất tới hạn được lấy bằng giới hạn chảy chịu nén của vật liệu;
- Miền mất ổn định phi đàn hồi, khi độ mảnh trung gian, F_{cr} được xác định theo biểu thức giảm tuyến tính theo độ mảnh;
- Miền mất ổn định đàn hồi, khi độ mảnh lớn, F_{cr} được xác định theo công thức Euler cải tiến cho nhôm.

Đối với mất ổn định uốn, độ mảnh của cột được xác định theo:

$$\lambda = \frac{kL}{r} \quad (5)$$

trong đó: k là hệ số chiều dài tính toán; L là chiều dài cấu kiện; và r là bán kính quán tính của tiết diện theo trục mất ổn định chi phối.

Khi:

$$\lambda \leq \lambda_1 : P_{nc} = F_{cy} A_g$$

$$\lambda_1 < \lambda < \lambda_2 : P_{nc} = \left(B_c - D_c \lambda \right) \left(0,85 + 0,15 \frac{C_c - \lambda}{C_c - \lambda_1} \right) A_g \quad (6)$$

$$\lambda \geq \lambda_2 : P_{nc} = \frac{0,85\pi^2 E}{\lambda^2}$$

trong đó

λ_1, λ_2 là các giá trị độ mảnh tương đương, và được xác định trong Mục E.2 của Tiêu chuẩn;

B_c, C_c, D_c được xác định trong Bảng B.4.1 và B.4.2 của Tiêu chuẩn; A_g là diện tích của tiết diện nguyên; F_{cy} là giới hạn chảy chịu nén.

3.3. Theo tiêu chuẩn BS EN 1999-1-1:2007 Eurocode 9

Cơ sở xác định khả năng chịu lực của cột nhôm theo Eurocode 9, Theo Eurocode 9 – EN 1999-1-1:2007, việc thiết kế kết cấu nhôm được thực hiện dựa trên nguyên lý thiết kế theo trạng thái giới hạn, phù hợp với các yêu cầu chung của EN 1990 – Cơ sở thiết kế kết cấu. Đối với các cấu kiện chịu nén, trạng thái giới hạn cường độ do mất ổn định tổng thể là trạng thái giới hạn chi phối trong thiết kế. Khả năng chịu lực thiết kế của cột nhôm chịu nén đúng tâm được xác định thông qua sức chịu nén mất ổn định của cấu kiện, có xét đến ảnh hưởng của chảy vật liệu, mất ổn định uốn, xoắn hoặc uốn-xoắn, tùy thuộc vào hình dạng tiết diện và điều kiện liên kết. Sức chịu nén thiết kế của cột được xác định theo biểu thức:

$$N_{b,Rd} = \chi A_{f0,d} \quad (7)$$

trong đó: A là diện tích tiết diện nguyên của cấu kiện; $f_{0,d}$ là cường độ chảy thiết kế của nhôm; χ là hệ số suy giảm do mất ổn định, phản ánh ảnh hưởng của độ mảnh và dạng mất ổn định chi phối. Hệ số suy giảm χ được xác định như một hàm của độ mảnh tương đối không thứ nguyên $\bar{\lambda}$, được xác định theo:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_{0,k}}{N_{cr}}} \quad (8)$$

trong đó $f_{0,k}$ là cường độ chảy đặc trưng của vật liệu, và N_{cr} là lực tới hạn đàn hồi tương ứng với dạng mất ổn định chi phối của cột. Giá trị N_{cr} được xác định dựa trên phân tích đàn hồi, xét đến các dạng mất ổn định có thể xảy ra, bao gồm:

- Mất ổn định uốn quanh các trục chính;
- Mất ổn định xoắn;
- Mất ổn định uốn-xoắn đối với các tiết diện hở hoặc không đối xứng.

Đối với mỗi dạng mất ổn định, độ mảnh tương đối $\bar{\lambda}$ được xác định riêng, và giá trị lớn nhất sẽ được sử dụng trong tính toán nhằm đảm bảo dạng mất ổn định nguy hiểm nhất được xét đến. Hệ số suy giảm χ được xác định theo đường cong mất ổn định tương ứng với loại tiết diện và dạng mất ổn định, có xét đến hệ số không hoàn hảo hình học α , phản ánh ảnh hưởng của sai lệch ban đầu và ứng xử phi tuyến của vật liệu nhôm. Biểu thức tổng quát xác định χ được Eurocode 9 quy định thống nhất cho các cấu kiện chịu nén. Cần lưu ý rằng Eurocode 9 được xây dựng chủ yếu trên cơ sở nghiên cứu đối với các cấu kiện nhôm cán nóng và ép đùn. Khi áp dụng cho các cột nhôm tạo hình nguội, vốn có đặc trưng là tiết diện thành mỏng và tiết diện hở, cần đặc biệt quan tâm đến tương tác giữa mất ổn định tổng thể và mất ổn định cục bộ, cũng như kiểm chứng mức độ phù hợp của các đường cong mất ổn định quy định trong tiêu chuẩn thông qua thí nghiệm và mô phỏng số. Trong bài báo này, bài toán tính toán ở đây xác định khả năng chịu lực của cột nhôm với các loại tiết diện và chiều dài theo bảng 2.

Đối với mỗi chiều dài cột, khả năng chịu lực nén của cấu kiện được xác định độc lập theo từng tiêu chuẩn thiết kế, bao gồm tiêu chuẩn Australia/New Zealand (AS/NZS), tiêu chuẩn Châu Âu (Eurocode 9 – EC9) và tiêu chuẩn Hoa Kỳ (AISC/ADM). Quy trình tính toán được thực hiện theo các bước: xác định độ mảnh tương đương của cột trên cơ sở

chiều dài tính toán và đặc trưng hình học tiết diện; xác định ứng suất hoặc lực tới hạn tương ứng với các dạng mất ổn định có thể xảy ra, bao gồm mất ổn định uốn theo các trục chính và mất ổn định uốn-xoắn đối với tiết diện hở; và cuối cùng xác định khả năng chịu lực nén danh nghĩa của cột theo các công thức và giả thiết riêng của từng tiêu chuẩn.

4. So sánh tính toán của các tiêu chuẩn với kết quả qua mô phỏng thí nghiệm bằng phần mềm ABAQUS , một số nhận xét.

Khả năng chịu lực của cầu kiện nhôm được xác định theo các tiêu chuẩn hiện hành với các tiết diện có độ mảnh tiết diện nhỏ, nhằm đảm bảo các cầu kiện bị phá hoại theo điều kiện mất ổn định tổng thể. Các tiết diện này dao động từ C50 đến C250, nghĩa là chiều cao tiết diện dao động từ 50mm đến 250 mm. Mô hình số phần tử hữu hạn cũng được phát triển cho các loại tiết diện này, thu được kết quả được đưa ra chi tiết trong báo cáo của Phạm [27]. Các kết quả được tổng hợp trong Bảng 2.

Tỉ số giữa kết quả tính toán theo tiêu chuẩn và kết quả mô hình số được xác định, nhằm đưa ra các đánh giá ban đầu về độ chính xác

của các tiêu chuẩn trong dự đoán khả năng chịu lực của cầu kiện nhôm tạo hình nguội phá hoại do mất ổn định tổng thể. Các giá trị trung bình và độ lệch chuẩn được xác định bao gồm (1,083; 0,156), (0,963; 0,101); (0,988; 0,097) theo tương ứng các Tiêu chuẩn Australia, Hoa Kỳ và Châu Âu. Kết quả này đã chỉ ra rằng, tiêu chuẩn Australia đang đưa ra các dự đoán thiếu an toàn, với khả năng chịu lực đánh giá cao hơn so với khả năng chịu lực của cầu kiện. Đồng thời các dự đoán thiếu tính thống nhất và dao động trong khoảng rộng. Tiêu chuẩn Hoa Kỳ trái lại đưa ra các dự đoán khá thiên về an toàn và các kết quả dự đoán hội tụ hơn so với Tiêu chuẩn Australia. Tiêu chuẩn Châu Âu đưa ra dự đoán tốt nhất về khả năng chịu lực với tỉ số trung bình gần với giá trị 1,0 nhất và với độ hội tụ về kết quả cao nhất.

Trên đây là đánh giá sơ bộ việc sử dụng các tiêu chuẩn nhôm hiện hành trong dự đoán khả năng chịu lực của cầu kiện nhôm bị phá hoại do mất ổn định tổng thể với số lượng mẫu giới hạn. Việc đánh giá sâu hơn về độ tin cậy hay hệ số giảm tải của các tiêu chuẩn hiện hành yêu cầu thu thập nhiều số liệu hơn và phát triển một số phân tích độ tin cậy. Các đánh giá này đang được phát triển và sẽ được trình bày trong các nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả.

Bảng 2. Kết quả khả năng chịu lực của cột.

Tiết diện	Chiều dài (m)	P_{ASNZS} (kN)	P_{AA} (kN)	P_{EU} (kN)	P_{num} (kN)	P_{ASNZS}/P_{num}	P_{AA}/P_{num}	P_{EU}/P_{num}
C5030	0.2	69.24	69.24	80.33	83.21	0.832	0.832	0.965
C5030	0.3	67.03	66.51	78.99	79.38	0.844	0.838	0.995
C5030	0.4	63.93	62.74	77.39	74.99	0.853	0.837	1.032
C5030	0.5	60.84	59.03	75.34	69.12	0.880	0.854	1.090
C8030	0.5	97.58	97.27	103.97	108.62	0.898	0.896	0.957
C8030	0.6	93.53	92.28	102.26	105.07	0.890	0.878	0.973
C8030	0.7	89.51	87.44	100.21	102.39	0.874	0.854	0.979
C10025	2.0	69.61	62.95	67.46	67.99	1.024	0.926	0.992
C10025	3.0	37.08	31.59	33.69	33.90	1.094	0.932	0.994
C10025	4.0	22.07	18.82	20.67	19.81	1.114	0.950	1.043
C10025	5.0	15.09	12.89	14.33	13.16	1.147	0.979	1.089
C10030	1.5	103.54	97.01	111.78	110.16	0.940	0.881	1.015
C10030	2.0	86.18	78.16	86.31	79.62	1.082	0.982	1.084
C10030	2.5	65.07	56.68	58.78	58.54	1.112	0.968	1.004
C10030	3.0	47.84	40.79	43.54	42.91	1.115	0.951	1.015
C10030	4.0	29.08	24.83	27.23	25.19	1.154	0.986	1.081
C10030	5.0	20.27	17.33	19.23	16.83	1.204	1.030	1.143
C10030	6.0	15.31	13.09	14.64	12.23	1.252	1.070	1.197
C15025	4.0	49.95	42.28	44.01	41.05	1.217	1.030	1.072
C15025	5.0	33.19	28.12	29.01	26.53	1.251	1.060	1.093
C15030	2.5	113.68	103.55	108.85	114.54	0.992	0.904	0.950
C15030	3.0	95.43	84.59	86.56	95.38	1.001	0.887	0.908
C15030	4.0	61.29	52.22	55.09	59.50	1.030	0.878	0.926
C15030	5.0	41.22	35.15	38.14	38.76	1.063	0.907	0.984
C15030	6.0	30.22	25.79	27.91	27.23	1.110	0.947	1.025

Tiết diện	Chiều dài (m)	P_{ASNZS} (kN)	P_{AA} (kN)	P_{EU} (kN)	P_{num} (kN)	P_{ASNZS}/P_{num}	P_{AA}/P_{num}	P_{EU}/P_{num}
C20030	6.0	55.84	47.58	43.44	45.22	1.235	1.052	0.961
C20030	7.0	42.41	36.16	32.33	33.49	1.266	1.080	0.965
C20030	8.0	33.66	28.72	24.95	26.09	1.290	1.101	0.956
C25025	8.0	33.28	30.55	17.23	24.39	1.364	1.253	0.706
C25030	8.0	43.66	37.07	23.93	32.08	1.361	1.156	0.746
Giá trị trung bình						1.083	0.963	0.998
Độ lệch chuẩn						0.156	0.101	0.097

trong đó:

P_{num} : kết quả mô phỏng bằng phần mềm ABAQUS
 P_{AA} : kết quả tính toán theo tiêu chuẩn Hoa Kỳ (AISC/ADM)
 P_{ASNZS} : kết quả tính toán theo tiêu chuẩn Australia/New Zealand
 P_{EU} : kết quả tính toán theo tiêu chuẩn Châu Âu (Eurocode 9 – EC9)

5. Kết luận

Qua các số liệu khảo sát và so sánh trong báo cáo, một số nhận xét về đánh giá khả năng chịu lực của cột nhôm tạo hình nguội theo các tiêu chuẩn hiện hành của Australia/New Zealand, Hoa Kỳ và Châu Âu khi tính toán mất ổn định tổng thể:

(a) Tiêu chuẩn Hoa Kỳ thường cho kết quả thiên về an toàn, trong khi tiêu chuẩn Australia/New Zealand có xu hướng thiếu an toàn; tiêu chuẩn Châu Âu cho kết quả dự đoán tốt và ổn định nhất.

(b) Kết quả tính toán theo tiêu chuẩn áp dụng cần được kiểm chứng hoặc hiệu chỉnh khi áp dụng cho tiết diện nhôm tạo hình nguội, do các tiêu chuẩn hiện hành chủ yếu được phát triển cho nhôm cán nóng.

(c) Các nhận xét trên chỉ áp dụng trong trường hợp mất ổn định tổng thể chi phối; trong thực tế cần tính toán kiểm tra độc lập với các dạng mất ổn định khác (mất ổn định cục bộ, méo) với cấu kiện thành mỏng.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Szumigala, M., Polus, Ł.: Applications of aluminium and concrete composite structures. *Procedia Eng.* 108(61), 544–549 (2015).
- [2]. Blue Scope Lysaghts: Permalite – Aluminium roll-formed purlin solutions. Permalite Aluminium Building Solutions Pty Ltd., Eagle Farm Qld 4009 (2015).
- [3]. Mazzolani, F.M.: Aluminium structural design. Springer-Verlag GmbH, Wien (2003).
- [4]. Su, M.N., Young, B., Gardner, L.: Deformation-based design of aluminium alloy beams. *Eng. Struct.* 80, 339–349 (2014).
- [5]. Zhu, J.H., Young, B.: Design of aluminium alloy flexural members using direct strength method. *J. Struct. Eng.* 135(5), 558–566 (2009).
- [6]. Faella, C., Mazzolani, F.M., Piluso, V., Rizzano, G.: Local buckling of aluminium members: testing and classification. *J. Struct. Eng.* 126(3) (2000).
- [7]. Pham, N.H., Vu, Q.A.: Effects of stiffeners on the capacities of cold-formed steel channel members. *Steel Constr.* 14(4), 270–278 (2021).
- [8]. Pham, N.H.: Investigation of sectional capacities of cold-formed perforated steel channel sections. *Steel Construction*, 16(2), 105–113 (2023).
- [9]. Pham, N.H.: Investigation of sectional capacities of cold-formed steel SupaCee sections. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Civil Engineering. ICCE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 213 (2021). <https://doi.org/10.1007/978-981-19-1260-3>
- [10]. Pham, N.H., Vu, Q.A.: Flexural capacities of cold-formed steel channel and SupaCee sections about the weak-axis. *International Journal of GEOMATE*, 25(108), 224–232 (2023). <https://doi.org/10.21660/2023.108.3903>
- [11]. Pham, N.H.: Sectional capacities of cold-formed perforated steel channel columns. *Materials Today: Proceedings*, 85, 113–117 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.273>
- [12]. Pham, N.H.: Investigation of web hole effects on capacities of cold-formed steel channel members. In: *Lecture Notes in Civil Engineering*, 161–175 (2023).
- [13]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Global buckling capacity of cold-rolled aluminium alloy channel section beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 179, 106521 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106521>
- [14]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Design of cold-rolled aluminium alloy channel beams subject to global buckling. *Thin-Walled Structures*, 180, 109885 (2022).
- [15]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Member capacity of cold-rolled aluminium alloy channel columns – Part I: experimental investigation. *Thin-Walled Structures*, 200 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111959>
- [16]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Member capacity of cold-rolled aluminium alloy channel columns – Part II: numerical investigation and design. *Thin-Walled Structures*, 200 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111960>
- [17]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Finite element simulation of member buckling of cold-rolled aluminium alloy 5052 channel columns. In: *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 54, pp. 263–268 (2020). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_39
- [18]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Experimental investigation of the member buckling of cold-rolled aluminium alloy 5052 channel columns. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Advances in Steel Structures*, Hong Kong (2018).
- [19]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Evaluation of current standards in designing cold-rolled aluminium channel beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869 (2020). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/7/072034>
- [20]. Pham, N.H.: Elastic global buckling moments of cold-rolled aluminium alloy asymmetric section beams. In: *E3S Web of Conferences. EDP Sciences* (2023). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341003004>
- [21]. Pham, N.H.: Numerical investigation of cold-rolled aluminium alloy stub columns with perforations undergoing local buckling. *Iranian Journal of*

- Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 47(6), 3453–3463 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01179-7>
- [22]. Pham, N.H.: Numerical investigation of sectional buckling behaviors of cold-rolled aluminium alloy channel columns. *Key Engineering Materials*, 942, 173–180 (2023).
- [23]. Pham, N.H., Pham, C.H., Rasmussen, K.J.R.: Experimental and numerical investigation of global buckling behaviour of cold-rolled aluminium alloy asymmetric section beams. *Thin-Walled Structures*, 217 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.113788>
- [24]. Australia/New Zealand AS/NZS1664.1:1997, Aluminium Structures. Part 1: Limit State Design.
- [25]. The Aluminum Association. *Aluminum Design Manual*, The Aluminum Association, Washington, DC, USA (2020)
- [26]. European Committee for Standardization (CEN), Eurocode 9: Design of Aluminium Structures – Part 1-1: General Structural Rules, BS EN 1999-1-1, Brussels, Belgium (2007)
- [27]. Phạm Ngọc Hiếu. Áp dụng các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu nhôm của Australia, Hoa Kỳ và Châu Âu trong xác định khả năng chịu lực của cấu kiện nhôm chữ C tạo hình nguội. Đề tài Khoa học cấp trường, Đại học Kiến trúc Hà Nội, 2023.