■Ngày nhận bài: 27/8/2025 ■Ngày sửa bài: 12/9/2025 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/9/2025

Phân tích hiệu quả kỹ thuật và chi phí vòng đời của bể chứa nhôm và thép trong môi trường biển

Technical and life-cycle cost analysis of aluminum and steel storage tanks in marine environments

> TS NGUYỄN ĐÌNH HÒA*, PGS.TS NGUYỄN NGỌC LINH, PGS.TS NGUYỄN NGỌC TÂN, PGS.TS NGUYỄN TRUNG KIÊN
Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
*Tác giả liên hệ, Email: hoand@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này được thực hiện trên một kết cấu bể trụ đứng điển hình có dung tích 1.000 m^3, làm việc trong điều kiện khí hậu biển tại TP Đà Nẵng, nơi kết cấu chịu tác động mạnh của môi trường ăn mòn. Hai phương án thiết kế được khảo sát gồm: (i) bể hợp kim nhôm 6061-T6 theo tiêu chuẩn EN 1999-1-5 và (ii) bể thép S235 theo tiêu chuẩn EN 1993-4-2. Tải trọng gió được xác định theo TCVN 2737:2023 để phản ánh điều kiện thực tế tại Việt Nam. Trong quá trình thiết kế, chiều dày các tấm vỏ được tính toán để thỏa mãn đồng thời các yêu cầu về khả năng chịu lực, ổn định vỏ mỏng, thi công và lượng dư ăn mòn. Kết quả cho thấy bể hợp kim nhôm cần chiều dày lớn hơn tại các vòng gần đáy so với bể thép, trong khi vùng đỉnh có chiều dày tương đương. Tổng khối lượng kết cấu của bể thép lớn hơn khoảng 2,67 lần so với bể nhôm. Phân tích chi phí vòng đời trong 50 năm cho thấy, mặc dù chi phí đầu tư ban đầu cao hơn, bể hợp kim nhôm có tổng chi phí vòng đời thấp hơn đáng kể nhờ loại bỏ gần như hoàn toàn chi phí bảo trì chống ăn mòn. Do đó, bể hợp kim nhôm được xem là một giải pháp kết cấu bền vững và hiệu quả kinh tế cho các công trình công nghiệp yêu cầu tuổi thọ cao trong môi trường biển.

Từ khóa: Bể chứa trụ đứng, hợp kim nhôm, thép kết cấu, tiêu chuẩn châu Âu, môi trường biển, phân tích chi phí vòng đời.

ABSTRACT

This study investigates the structural performance of a typical 1000 m^3 cylindrical storage tank designed to operate in the marine climate of Da Nang City, Vietnam, where the structure is exposed to severe corrosion. Two design alternatives are considered: (i) an aluminum alloy 6061-T6 tank designed according to EN 1999-1-5, and (ii) a structural steel S235 tank designed according to EN 1993-4-2. Wind loads are determined based on TCVN 2737:2023 to reflect local site conditions. The shell thickness is calculated to satisfy requirements for material strength, thin-shell buckling resistance, constructability, and corrosion allowance. The results indicate that the aluminum tank requires greater thickness at the lower shell courses than the steel tank, while the thickness at the top region is comparable. The total weight of the steel tank is approximately 2.67 times that of the aluminum tank. A 50-year life-cycle cost analysis (LCCA) demonstrates that, despite the higher initial material cost, the aluminum tank achieves significantly lower total ownership cost by virtually eliminating corrosion protection maintenance. Therefore, aluminum alloy is considered a sustainable and cost-effective structural solution for industrial storage tanks with long service life in aggressive marine environments.

Keywords: Cylindrical storage tank, aluminum alloy, structural steel, eurocode, marine environment, life-cycle cost analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh chóng của các khu công nghiệp và kinh tế ven biển tại Việt Nam, đặc biệt tại các trung tâm kinh tế như TP Đà Nẵng, đặt ra yêu cầu cấp thiết về các giải pháp lưu trữ chất lỏng công nghiệp bền vững, có khả năng chống chịu cao trong môi trường khí hậu biển [1]. Một trong những thách thức kỹ thuật lớn nhất là sự ăn mòn do muối và độ ẩm cao, một yếu tố môi trường được định lượng và phân loại ở mức độ từ C4 đến C5 (từ cao đến rất cao) theo tiêu chuẩn quốc tế ISO 12944-2:2017 [2]. Phân loại này là một cảnh báo về tốc độ suy giảm vật liệu nghiêm trọng, đòi hỏi việc lựa chọn vật liệu và bảo trì phải được cân nhắc một cách thấu đáo ngay từ giai đoạn thiết kế. Vật liệu truyền thống cho các kết cấu bể chứa là thép carbon, vốn được ưa chuộng do cường độ cao và chi phí vật liệu ban đầu hợp lý [3]. Tuy nhiên, trong môi trường C5, thép

carbon bộc lộ nhược điểm cố hữu về chi phí vận hành và bảo trì rất lớn và lặp lại trong suốt vòng đời công trình. Chi phí này không chỉ bao gồm vật tư sơn mà còn cả chi phí nhân công, chuẩn bị bề mặt và các gián đoạn vận hành liên quan. Trong bối cảnh đó, hợp kim nhôm nổi lên như một giải pháp thay thế hiệu suất cao, đặc biệt là các mác thuộc Series 6xxx như 6061-T6, như minh họa trên Hình 1. Với khả năng chống ăn mòn vượt trội do hình thành lớp oxit bảo vệ bề mặt và trọng lượng riêng chỉ bằng khoảng 1/3 so với thép, hợp kim nhôm hứa hẹn mang lại lợi ích kinh tế đáng kể thông qua việc giảm thiểu hoặc loại bỏ gần như toàn bộ chi phí bảo trì. Bên cạnh đó, tiêu chuẩn TCVN 2737:2023 [4] đã cập nhật và hài hòa phương pháp xác định tải trọng gió với các tiêu chuẩn quốc tế, đòi hỏi các nghiên cứu ứng dụng để đánh giá tác động của nó lên thiết kế, đặc biệt là đối với các kết cấu vỏ mỏng nhạy cảm với hiện tượng mất ổn định.

Hình 1. Minh họa bể trụ đứng bằng hợp kim nhôm

Nghiên cứu này thực hiện một phân tích dựa trên việc so sánh vật liệu sử dụng, thép và hợp kim nhôm, đồng thời đặt vấn đề về sự cần thiết chuyển dịch từ triết lý thiết kế tập trung vào "chi phí đầu tư ban đầu" sang tiếp cận "tổng chi phí vòng đời". Việc áp dụng các bộ tiêu chuẩn hiện đại dựa trên rủi ro, như Eurocode và TCVN 2737:2023, chính là công cụ cho phép thực hiện sự chuyển dịch này, bằng cách cung cấp các phương pháp để định lượng hiệu suất dài hạn (như ổn định kết cấu, độ bền vật liệu) và từ đó minh chứng cho các khoản đầu tư ban đầu cao hơn. Một thách thức trong việc áp dụng đồng thời hệ thống tiêu chuẩn là hài hòa dữ liệu đầu vào. Quy chuẩn Việt Nam QCVN 02:2022 [5] cung cấp áp lực gió cơ sở (w_0) cho các vùng địa lý, trong khi quy trình chi tiết của EN 1991-1-4 yêu cầu vận tốc gió cơ bản (v_b) làm đầu vào [6]. Do đó, một bước chuyển đổi đã được thực hiện bằng cách tính toán ngược vận tốc gió tương đương từ áp lực cho trước theo công thức cơ bản $w_0 = \frac{1}{2}\rho v_b^2$, với ρ là khối lượng riêng của không khí. Tiếp theo, vận tốc này được sử dụng làm đầu vào cho quy trình tính toán theo Eurocode, đảm bảo thiết kế vừa tuân thủ quy định địa phương, vừa tận dụng được phương pháp luận của tiêu chuẩn quốc tế. Các đặc trưng cơ học của vật liệu thép và hợp kim nhôm xác định theo EN 1993-1-1:2005 [7] và EN 1999-1-1:2007 [8].

Từ đó, bài báo này trình bày các kết quả thu được trên một kết cấu bể trụ đứng điển hình có thể tích 1000 m³, nhằm phân tích: (1) So sánh kết quả tính toán kết cấu vỏ bể chứa bằng hợp kim nhôm và thép theo hệ thống tiêu chuẩn Eurocode; (2) So sánh hiệu quả kinh tế vòng đời giữa bể chứa bằng hợp kim nhôm và bằng thép. Những kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và phân tích định lượng cho việc lựa chọn vật liệu trong thiết kế các kết cấu vỏ mỏng, phù hợp với điều kiện thực tế tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP LUẬN THIẾT KẾ VÀ TÍNH TOÁN

Để đảm bảo một sự so sánh khách quan, một bộ số liệu đầu vào giống nhau về kích thước hình học, tải trọng thiết kế và các điều kiện môi trường đã được thiết lập và áp dụng cho cả hai phương án thiết kế bể chứa dầu hỏa bằng: (i) Hợp kim nhôm; (ii) Thép carbon.

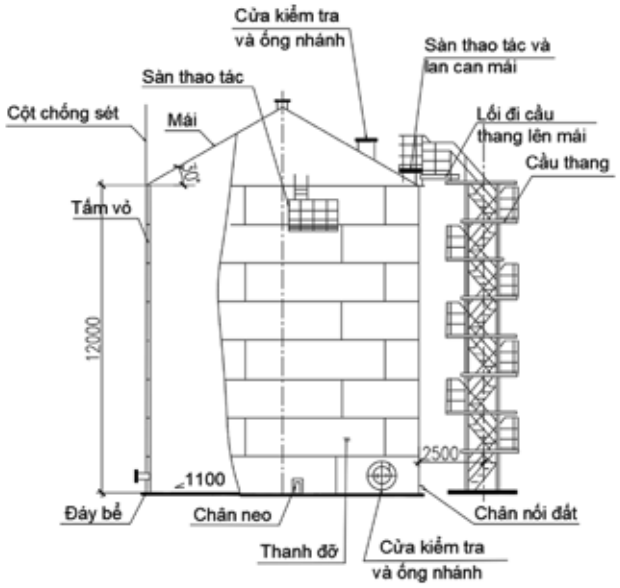
2.1. Mô hình, vật liệu và tải trọng thiết kế

Nghiên cứu được thực hiện trên một bể trụ đứng dùng chứa dầu hỏa có thể tích danh nghĩa 1000 m³, với đường kính trong $D_i = 10400$ mm và chiều cao thân bể $H = 12000$ mm, như minh họa trên Hình 2. Bể chứa này được cấu tạo từ 8 vòng kim loại, mỗi vòng có chiều cao 1500 mm. Bể chứa được thiết kế để lắp đặt và sử dụng tại TP Đà Nẵng (Vùng gió III). Các tải trọng thiết kế chính bao gồm: Áp lực thủy tĩnh từ dầu hỏa (khối lượng riêng $\rho = 820$ kg/m³); Áp lực vận tốc gió tại mái bể $q_p(H) = 1.62$ kN/m²; Áp lực hút do sự cố chân không $p_{vac} = -2.5$ kN/m².

Các vật liệu sử dụng cho kết cấu vỏ bể chứa dầu hỏa (thân bể) được lựa chọn như sau:

(i) Hợp kim nhôm 6061-T6: Giới hạn chảy $f_o = 240$ MPa, giới hạn bền $f_u = 290$ MPa, mô đun đàn hồi $E_{Al} = 70$ GPa, và khối lượng riêng $\rho_{Al} = 2660$ kg/m³. Một đặc điểm kỹ thuật quan trọng là độ bền của hợp kim nhôm bị suy giảm đáng kể trong vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ) của mối hàn, khi đó giới hạn chảy là $f_{o,haz} = 115$ MPa và giới hạn bền là $f_{u,haz} = 175$ MPa. Do đó, khi tính toán thiết kế kết cấu vỏ nhôm cần phải xét đến phương pháp thi công lắp đặt.

(ii) Thép carbon S235: Giới hạn chảy phụ thuộc vào chiều dày danh nghĩa (*t*) của tấm thép: $f_y = 235$ MPa với $t \leq 16$ mm, mô đun đàn hồi $E_a = 210$ GPa, và khối lượng riêng $\rho_{St} = 7850$ kg/m³. Tiêu chuẩn EN 1993-1-10 [9] yêu cầu độ dai va đập của vật liệu phải được đảm bảo ở nhiệt độ thiết kế kim loại tối thiểu, lấy bằng +10°C tại TP Đà Nẵng để thiên về an toàn.



Hình 2. Cấu tạo chi tiết của bể trụ đứng điển hình

2.2. Quy trình thiết kế và các bước tính toán

2.2.1. Quy trình thiết kế

Quy trình thiết kế cho kết cấu vỏ mỏng theo tiêu chuẩn châu Âu là một chuỗi các bước kiểm tra lặp lại, được thể hiện trực quan như trên Hình 3. Cụ thể như sau:

Hình 3. Quy trình thiết kế bể chứa theo tiêu chuẩn châu Âu

2.2.2. Các nguyên tắc thiết kế và công thức tính toán

Việc tính toán thiết kế thân bể trụ đứng bằng hợp kim nhôm và thép carbon được thực hiện tuân theo các quy định của các tiêu chuẩn Eurocode liên quan [10-14]. Cơ sở của việc tính toán bắt đầu từ việc xác định các tác động cơ bản và các tổ hợp bất lợi nhất ở trạng thái giới hạn cực hạn (ULS).

Áp lực thủy tĩnh tại một độ sâu *z* từ mặt thoáng chất lỏng được xác định bởi công thức (1), trong đó: $p(z)$ là áp lực thủy tĩnh tại độ sâu z; ρ là khối lượng riêng của chất lỏng; g là gia tốc trọng trường; và γ là trọng lượng riêng của chất lỏng.

$$p(z) = \rho \cdot g \cdot z = \gamma \cdot z \quad (1)$$

Từ đó, ứng suất vòng (hoop stress) σ_θ và bề dày cơ học yêu cầu tối thiểu $t_{req,mech}$ để chống lại ứng suất này được tính toán theo các công thức (2) và (3), trong đó: $\sigma_\theta(z)$ là ứng suất vòng; $p_{Ed}(z)$ là áp lực thiết kế; r là bán kính bể; t là bề dày vỏ; và f_d là cường độ thiết kế của vật liệu.

$$\sigma_\theta(z) = \frac{p_{Ed}(z) \cdot r}{t} \le f_d \quad (2)$$

$$t_{req,mech}(z) = \frac{p_{Ed}(z) \cdot r}{f_d} \quad (3)$$

Tiếp theo, các tổ hợp tải trọng ULS chi phối thiết kế bao gồm: (i) ULS-1 (Bể rỗng + Gió): Kiểm tra mất ổn định vỏ (oằn) do ứng suất nén từ áp lực gió; (ii) ULS-2 (Bể đầy + Thủy tĩnh): Kiểm tra độ bền vật liệu (chảy dẻo) do ứng suất kéo vòng; (iii) ULS-Acc (Sự cố chân không): Kiểm tra mất ổn định vỏ do áp lực hút từ bên ngoài.

2.2.3. Thiết kế bể hợp kim nhôm (EN 1999)

Thiết kế bể chứa bằng hợp kim nhôm theo EN 1999-1-1 [8] và EN 1999-1-5 [14] đặc biệt chú trọng đến sự suy giảm độ bền tại vùng ảnh hưởng nhiệt của mối hàn và độ nhạy cảm với mất ổn định do mô đun đàn hồi thấp.

Điều kiện bền theo phương vòng: Cường độ thiết kế $f_{d,Al}$ phải xét đến vùng ảnh hưởng nhiệt, được tính toán theo công thức (4), trong đó: $f_{o,haz}$ là giới hạn chảy của hợp kim nhôm tại vùng ảnh hưởng nhiệt và $\gamma_{M,Al}$ là hệ số an toàn riêng cho vật liệu nhôm.

$$f_{d,Al} = \frac{f_{0,haz}}{\gamma_{M,Al}} \quad (4)$$

Điều kiện ổn định vỏ: Kiểm tra mất ổn định (oằn) do gió hoặc chân không có dạng tổng quát được xác định theo biểu thức (5), trong đó: σ_{Ed} là ứng suất thiết kế; χ là hệ số suy giảm khả năng chịu lực do mất ổn định; σ_R là khả năng chịu ứng suất; f_o là giới hạn chảy của hợp kim nhôm; và γ_{M1} là hệ số an toàn riêng cho mất ổn định.

$$\sigma_{Ed} \le \chi \frac{\sigma_R}{\gamma_{M1}} = \chi \frac{f_0}{\gamma_{M1}} \quad (5)$$

2.2.4. Thiết kế bể thép carbon (EN 1993)

Thiết kế bể chứa bằng thép carbon được đặc trưng bởi cường độ và độ cứng cao, nhưng đòi hỏi phải kiểm tra nghiêm ngặt về nguy cơ phá hủy giòn và xem xét lượng dư ăn mòn lớn.

Điều kiện bền theo phương vòng: Cường độ thiết kế $f_{d,St}$ được tính từ giới hạn chảy của vật liệu sử dụng theo công thức (6), trong đó: f_y là giới hạn chảy của thép và $\gamma_{M,St}$ là hệ số an toàn riêng cho vật liệu thép.

$$f_{d,St} = \frac{f_y}{\gamma_{M,St}} \quad (6)$$

Điều kiện ổn định vỏ: Điều kiện kiểm tra mất ổn định có thể được biểu diễn theo ứng suất hoặc áp lực như biểu thước (7), trong đó: p_{Ed} là áp lực thiết kế và p_R là khả năng chịu áp lực.

$$p_{Ed} \le p_R \quad (7)$$

2.2.5. Lựa chọn bề dày chỉ định

Bề dày chỉ định được chọn là giá trị lớn nhất của các yêu cầu về cơ học, ổn định và thi công, cộng thêm lượng dư ăn mòn, như thể hiện trong công thức (8), trong đó: t_{spec} là bề dày chỉ địnhg; $t_{req,mech}$ là bề dày yêu cầu về độ bền; $t_{req,stb}$ là bề dày yêu cầu về độ ổn định; t_{min} là bề dày thi công tối thiểu; và t_{corr} là lượng dư ăn mòn.

$$t_{spec} = \max(t_{req,mech}, t_{req,stb}, t_{\min}) + t_{corr} \quad (8)$$

2.2.6. So sánh các bước tính toán theo EN 1999 và EN 1993

Bảng 1 tóm tắt các điểm tương đồng và khác biệt cốt lõi trong phương pháp luận thiết kế giữa hai vật liệu - Hợp kim nhôm và Thép carbon, làm nổi bật những khác biệt về nguyên lý trong cách mỗi tiêu chuẩn tiếp cận các vấn đề an toàn và độ bền lâu.

Bảng 1. So sánh phương pháp luận thiết kế bể trụ đứng bằng hợp kim nhôm và thép

Bước tính toán	Hợp kim nhôm (EN 1999)	Thép (EN 1993)
Quy tắc chung	Cùng áp dụng nguyên tắc chung về tổ hợp tải trọng và trạng thái giới hạn theo EN 1990 [10].	Cùng áp dụng nguyên tắc chung về tổ hợp tải trọng và trạng thái giới hạn theo EN 1990 [10].
Kiểm tra độ bền vòng	$f_{d,Al}$ dựa trên $f_{o,haz}$ (cường độ vùng hàn). Hệ số an toàn vật liệu $\gamma_{M,Al}$.	$f_{d,St}$ dựa trên f_y (cường độ vật liệu cơ bản). Hệ số an toàn vật liệu $\gamma_{M,St}$.
Kiểm tra mất ổn định vỏ	Mô đun đàn hồi E_{Al} thấp hơn (70 GPa) làm tăng độ mảnh, nhạy cảm hơn với mất ổn định. Quy tắc tính hệ số χ riêng cho nhôm.	Mô đun đàn hồi E_a cao hơn (210 GPa) làm giảm độ mảnh, ít nhạy cảm hơn. Hệ số χ phụ thuộc chặt chẽ vào chất lượng chế tạo.
Kiểm tra độ bền lâu và lớp sơn bảo vệ	t_{corr} nhỏ do khả năng chống ăn mòn tự nhiên. Không yêu cầu hệ sơn bảo vệ.	t_{corr} lớn và bắt buộc phải có hệ sơn bảo vệ nhiều lớp.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Dựa trên phương pháp luận đã trình bày, các tính toán chi tiết đã được thực hiện để xác định bề dày tối ưu cho thân bể theo hai phương án vật liệu sử dụng - Hợp kim nhôm và Thép carbon, từ đó phân tích sâu hơn về hiệu quả kết cấu và các yếu tố thực tiễn liên quan.

3.1. Phân tích hiệu suất kết cấu của bể hợp kim nhôm và bể thép

Bề dày chỉ định (t_{spec}) cho mỗi vòng tròn kim loại được xác định theo công thức (8), là giá trị lớn nhất của các yêu cầu về độ bền, độ ổn định và cấu tạo, cộng với lượng dư ăn mòn. Các giá trị đặc trưng cho từng vật liệu sử dụng như sau:

(i) Hợp kim nhôm: $t_{min,Al} = 5.0$ mm; $t_{corr,Al} = 1.0$ mm.

(ii) Thép carbon: $t_{min,St} = 5.0$ mm; $t_{corr,St} = 3.0$ mm.

Bảng 2 trình bày chi tiết và so sánh các kết quả cho từng vòng kim loại, được đánh số từ 1 đến 8 tính từ đáy bể đến đỉnh bể chứa, đối với kết cấu bể chứa dầu hỏa được thiết kế với kích thước, thông số vật liệu và tải trọng thiết kế trình bày tại mục 2.1.

Bảng 2. So sánh kết quả tính toán bề dày thân bể

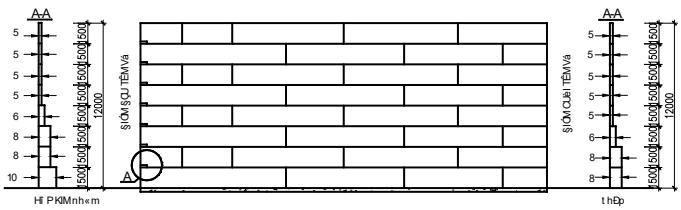
Vòng	Vật liệu	$t_{req,mech}$ (mm)	$t_{req,stb}$ (mm)	t_{min} (mm)	t_{corr} (mm)	t_{spec} (mm)	Yếu tố chi phối
1	Nhôm	7.202	~5.0	5.0	1.0	10	Độ bền
	Thép	3.524	< 5.0	5.0	3.0	8	Độ bền và Ăn mòn
2	Nhôm	6.302	~5.0	5.0	1.0	8	Độ bền
	Thép	3.084	< 5.0	5.0	3.0	8	Độ bền và Ăn mòn
3	Nhôm	5.402	~5.0	5.0	1.0	8	Độ bền
	Thép	2.643	< 5.0	5.0	3.0	6	Độ bền và Ăn mòn
4	Nhôm	4.501	~5.0	5.0	1.0	6	Ổn định
	Thép	2.203	< 5.0	5.0	3.0	5	Cấu tạo
5	Nhôm	3.601	~5.0	5.0	1.0	5	Cấu tạo
	Thép	1.762	< 5.0	5.0	3.0	5	Cấu tạo
6	Nhôm	2.701	~5.0	5.0	1.0	5	Cấu tạo
	Thép	1.322	< 5.0	5.0	3.0	5	Cấu tạo
7	Nhôm	1.801	~5.0	5.0	1.0	5	Cấu tạo
	Thép	0.881	< 5.0	5.0	3.0	5	Cấu tạo
8	Nhôm	0.9	~5.0	5.0	1.0	5	Cấu tạo
	Thép	0.441	< 5.0	5.0	3.0	5	Cấu tạo

Bảng 2 cho thấy một sự khác biệt căn bản trong nguyên tắc thiết kế chi phối hai phương án sử dụng hợp kim nhôm và thép carbon, cụ thể như sau:

(i) Đối với hợp kim nhôm: Các vòng hợp kim nhôm dưới cùng, nơi áp lực thủy tĩnh là lớn nhất, được chi phối bởi điều kiện bền vật liệu. Ngược lại, các vòng hợp kim nhôm phía trên, do mô đun đàn hồi E thấp, trở nên rất nhạy cảm với mất ổn định khi bể rỗng và chịu tải trọng gió. Do đó, thiết kế của chúng bị chi phối bởi điều kiện ổn định.

(ii) Đối với thép: Nhờ có cường độ thiết kế cao hơn và độ cứng (mô đun đàn hồi E_s) cao gấp 3 lần, bề dày cơ học yêu cầu ($t_{req,mech}$) của thép carbon nhỏ hơn đáng kể. Tuy nhiên, lợi thế lý thuyết này phần lớn bị vô hiệu hóa bởi các yếu tố thực tế. Ở ba vòng tròn thép dưới cùng, thiết kế bị chi phối bởi sự kết hợp giữa độ bền vật liệu và độ bền lâu (yêu cầu cộng thêm lượng dư ăn mòn $t_{corr} = 3.0$ mm). Đáng chú ý hơn, đối với năm vòng thép phía trên, cả yêu cầu về bền và ổn định đều thấp đến mức thiết kế bị chi phối hoàn toàn bởi yếu tố cấu tạo ($t_{min} = 5.0$ mm).

Dựa trên các giá trị t_{spec}, kích thước kết cấu phần thân bể cho mỗi phương án được thể hiện trong Hình 4. Khối lượng thân bể được tính riêng cho từng phương án vật liệu. Kết quả: phương án nhôm đạt 6 779 kg, còn phương án thép là 18 082 kg (bể có kích thước tương tự; số liệu phù hợp với [15]). Như vậy, thân bể thép nặng xấp xỉ 2,67 lần so với thân bể nhôm.



Hình 4. Sơ đồ so sánh cấu hình bề dày thân bể (đơn vị: mm)

3.2. So sánh về thi công và vận hành - bảo trì

Đối với thép carbon S235, liên kết hàn là phương pháp phổ biến để nối các chi tiết cấu kiện. Ngược lại, việc hàn các chi tiết bằng hợp kim nhôm đòi hỏi thợ hàn có tay nghề cao và phải sử dụng thiết bị chuyên dụng, do đó chi phí thi công thường cao hơn. Trong khi đó, hợp kim nhôm có khối lượng riêng nhỏ hơn đáng kể so với thép (khoảng 2,67 lần), giúp giảm chi phí vận chuyển, cho phép dùng cần cẩu nhỏ hơn và có khả năng rút ngắn tổng tiến độ lắp dựng.

Chi phí vận hành và bảo trì là yếu tố kinh tế quan trọng tạo nên sự khác biệt dài hạn giữa hai phương án sử dụng hợp kim nhôm và thép carbon. Với môi trường khí hậu biển cấp C5 như TP Đà Nẵng, bể thép phải áp dụng hệ sơn bảo vệ nhiều lớp theo tiêu chuẩn ISO 12944 để chống ăn mòn, thường sử dụng ba lớp với tổng chiều dày màng sơn khô khoảng 280-320 µm. Trong vòng đời 50 năm, tối thiểu cần một lần đại tu sơn, phát sinh chi phí OPEX đáng kể và thời gian dừng vận hành sử dụng thiết bị. Đối với bể hợp kim nhôm 6061-T6, nhờ khả năng tự thụ động hóa, thường không bắt buộc phủ sơn chống ăn mòn nếu chi tiết thiết kế và bảo trì đúng. Do đó, trong quá trình vận hành, công việc chủ yếu là kiểm tra và vệ sinh định kỳ, qua đó gần như loại bỏ chi phí liên quan đến công tác sơn phủ bảo vệ chống ăn mòn.

3.3. Phân tích chi phí vòng đời của bể hợp kim nhôm và bể thép

Để định lượng các tác động kinh tế trong dài hạn, một phân tích chi phí vòng đời (Life Cycle Cost Analysis - LCCA) được thực hiện trong khoảng thời gian 50 năm. Phương pháp này tính toán Tổng chi phí vòng đời (viết tắt là TCO) theo công thức (9) như sau:

$$TCO = CAPEX + \sum PV(OPEX) - PV(Salvage) \quad (9)$$

Trong đó: CAPEX là chi phí đầu tư ban đầu, bao gồm toàn bộ chi phí vật liệu, gia công và các chi phí phụ trợ như hệ sơn phủ bảo vệ; OPEX là chi phí vận hành - bảo trì hàng năm, bao gồm các chi phí lặp lại trong suốt vòng đời, đối với bể thép thì chi phí sơn sửa bảo trì là chủ yếu. Vì OPEX phát sinh theo từng năm nên cần chiết khấu về giá trị hiện tại (viết tắt là PV); PV(Salvage) là giá trị thu hồi cuối vòng đời hay còn gọi là giá trị còn lại, thu hồi bằng cách bán phế liệu.

Các dòng tiền được quy đổi về hiện giá theo suất chiết khấu, đảm bảo so sánh công bằng giữa các phương án vật liệu, phản ánh giá trị thời gian của tiền tệ. Các giả định chi tiết các tham số để đánh giá LCCA được trình bày trong Bảng 3 được sử dụng trên cơ sở tham khảo các thông tin thị trường trong nước tại thời điểm thực hiện nghiên cứu này [16-20].

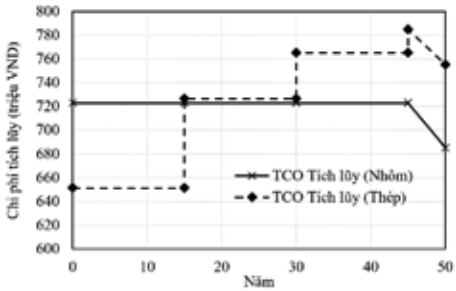
Bảng 3. Các chỉ tiêu và số liệu sử dụng cho LCCA

Hạng mục	Tham số	Giá trị	Đơn vị
Thông số tài chính	Thời gian phân tích	50	Năm
	Suất chiết khấu	4,5	%
Chi phí vật liệu và gia công	Đơn giá thép S235	20.000	VND/kg
	Đơn giá nhôm 6061-T6	85.000	VND/kg
	Đơn giá gia công thép	8.000	VND/kg
	Đơn giá gia công nhôm	21.600	VND/kg
Chi phí bảo trì (Bể thép)	Hệ sơn bảo vệ	185.000	VND/m^2
	Chu kỳ sơn lại	15	Năm
Giá trị thu hồi cuối vòng đời	Giá phế liệu nhôm	50.000	VND/kg
	Giá phế liệu thép	15.000	VND/kg

Phân tích theo các giả định trên cho thấy khác biệt kinh tế rất rõ ràng, cụ thể như sau:

(i) Đối với bể hợp kim nhôm: Mặc dù, chi phí vật liệu ban đầu cao hơn, lợi thế then chốt là OPEX rất thấp do hợp kim nhôm có khả năng tự thụ động hóa, nên thông thường không cần hệ sơn bảo vệ chống ăn mòn. Công tác bảo trì chủ yếu là kiểm tra và vệ sinh định kỳ với quy mô nhỏ, hầu như không phát sinh chi phí lớn trong suốt thời gian 50 năm.

(ii) Đối với bể thép: CAPEX ban đầu phải tính cả hệ sơn bảo vệ hiệu suất cao (làm sạch bề mặt, lớp sơn lót, lớp sơn trung gian và lớp sơn ngoài cùng). Trong giai đoạn vận hành, OPEX phát sinh định kỳ do phải thực hiện sơn đại tu sau mỗi 15 năm do làm việc trong môi trường khí hậu biển. Ngoài ra, cần phải kể đến các chi phí liên quan do việc dừng thiết bị và chuẩn bị bề mặt.



Hình 5. So sánh TCO trong 50 năm giữa bể hợp kim nhôm và bể thép

Kết quả phân tích LLCA được thể hiện trên Hình 5. Kết quả thu được cho thấy đường TCO của thép tăng bậc sau mỗi chu kỳ 15 năm, khiến tổng chi phí vòng đời của bể thép cao hơn bể hợp kim nhôm từ sau khoảng 15 năm và tiếp tục tăng lên về cuối vòng đời, kể từ năm thứ 30 trở đi. Ngược lại, đường TCO của hợp kim nhôm hầu như nằm ngang do không phát sinh chi phí bảo trì liên quan đến công tác sửa chữa và sơn bảo vệ chống ăn mòn. Tại mốc năm thứ 50, giá trị thu hồi của hợp kim nhôm cao hơn cũng góp phần làm giảm TCO ròng của phương án này. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng trong quá trình tính toán, đã giả định chi phí lớp sơn lót chống ăn mòn bên trong bể thép tương đương với chi phí sơn bảo vệ bên ngoài. Tuy nhiên, thực tế lớp lót trong thường đắt hơn do yêu cầu vật liệu và thi công khắt khe. Ngay cả với giả thiết này, kết quả vẫn cho thấy hợp kim nhôm là phương án kinh tế hơn khi phân tích chi phí vòng đời cho kết cấu bể chứa làm việc trong môi trường khí hậu biển.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày các kết quả nghiên cứu đối với một kết cấu bể trụ đứng được tính toán và thiết kế theo tiêu chuẩn châu Âu, theo hai phương án vật liệu sử dụng là hợp kim nhôm 6061-T6 và thép carbon S235, chịu tác động của áp lực gió và ăn mòn của môi trường khí hậu biển tại TP Đà Nẵng. Các kết quả thu được cho phép đưa ra một số kết luận sau:

- Thép có cường độ cơ học và độ cứng lớn nên bề dày yêu cầu về độ bền của các tấm vỏ nhỏ hơn. Tuy nhiên, khi tính đến lượng dư ăn mòn và bề dày thi công tối thiểu, lợi thế này bị triệt tiêu. Kết quả cho thấy, với cùng một thể tích thì thân bể thép nặng hơn gần 2,67 lần so với thân bể hợp kim nhôm.

- Với bể hợp kim nhôm, thiết kế được chi phối bởi độ bền vật liệu của tấm vỏ ở đáy bể và độ ổn định của tấm vỏ ở đỉnh bể. Với bể thép, bài toán bị chi phối bởi độ bền và ăn mòn của vật liệu ở đáy bể và các yêu cầu cấu tạo và thi công ở đỉnh bể, khiến một phần khả năng chịu lực của vật liệu không được khai thác hiệu quả.

- Phân tích LCCA trong 50 năm cho thấy, dù CAPEX của bể hợp kim nhôm cao hơn, nhưng OPEX gần như bằng không do không tốn chi phí sơn bảo vệ chống ăn mòn định kỳ và giá trị thu hồi cao giúp TCO của hợp kim nhôm thấp hơn trong dài hạn. Với các giải thiết được áp dụng trong nghiên cứu này, sự khác nhau về TCO giữa bể hợp kim nhôm và bể thép có thể được xác định sau khoảng 15 năm.

- Đối với các công trình công nghiệp yêu cầu tuổi thọ cao làm việc trong môi trường khí hậu biển, cần áp dụng LCCA khi lựa chọn vật liệu chế tạo. Nghiên cứu này cho thấy hợp kim nhôm là giải pháp thay thế khả thi và bền vững cho thép carbon, với điều kiện bảo đảm các yêu cầu về quy trình và chất lượng đường hàn để hạn chế tối đa phạm vi của vùng ảnh hưởng nhiệt đối với hợp kim nhôm.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện với sự tài trợ của Bộ Xây dựng thông qua đề tài: *"Nghiên cứu hướng dẫn tính toán và thiết kế kết cấu vỏ nhôm hợp kim theo tiêu chuẩn châu Âu"*, mã số RD 34-24. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Báo điện tử Chính phủ. (2024). Thúc đẩy kinh tế biển bằng các giải pháp liên ngành, liên vùng mang tính đột phá. Truy cập tại: https://baochinhphu.vn/thuc-day-kinh-te-bien-bang-cac-giai-phap-lien-nganh-lien-vung-mang-tinh-dot-pha-102240412165002793.htm

[2]. ISO 12944-2:2017 Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems - Part 2: Classification of environments. International Organization for Standardization.

[3]. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage (13th ed.). American Petroleum Institute (2020).

[4]. TCVN 2737:2023 Tải trọng và tác động. Bộ Khoa học và Công nghệ (2023).

[5]. QCVN 02:2022/BXD Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về Số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng. Bộ Xây dựng (2022).

[6]. EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. European Committee for Standardization (2005).

[7]. EN 1993-1-1:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (2005).

[8]. EN 1999-1-1:2007 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules. European Committee for Standardization (2007).

[9]. EN 1993-1-10:2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties. European Committee for Standardization (2005).

[10]. EN 1990:2002 Eurocode: Basis of structural design. European Committee for Standardization. (2002).

[11]. EN 1991-4:2006 Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks. European Committee for Standardization (2006).

[12]. EN 1993-1-6:2007 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures. European Committee for Standardization (2007).

[13]. EN 1993-4-2:2007 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-2: Tanks. European Committee for Standardization (2007).

[14]. EN 1999-1-5:2007 Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-5: Shell structures. European Committee for Standardization (2007).

[15]. https://eurotankworks.com/storage-tanks/vertical-storage-tanks/vertical-tank-vol-1000/

[16]. https://nhomducnamdinh.net/product/nhom-tam/

[17]. https://thephanoi.com.vn/bang-gia/gia-thep-tam-hom-nay.html

[18]. https://www.hungphatsteel.com/san-pham/thep-tam-cat-theo-quy-cach-yeu-cau/

[19]. https://dailysonepoxy.com/dinh-muc-son-ket-cau-thep/

[20]. https://phelieu.vn/bang-gia-thu-mua-phe-lieu/?