

NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH NHIỆT ĐỘNG HỌC CỦA KẾT CHỨA KHÍ HÓA LỎNG TRONG QUÁ TRÌNH BƠM VÀ NHẬN HÀNG TRÊN TÀU LNG/LPG

STUDY OF THE THERMODYNAMIC PROPERTIES OF CRYOGENIC LIQUID-GAS
STORAGE TANKS DURING LOADING AND DISCHARGE OPERATIONS ON
LNG/LPG CARRIERS

Dương Xuân Quang

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email: duongxuanquang@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng nhiệt động học cho kết chứa LNG/LPG trên nền tảng MATLAB Simulink nhằm phân tích sự tương tác giữa truyền nhiệt, biến đổi pha và biến thiên áp suất. Kết quả cho thấy nhiệt xâm nhập từ môi trường gây ra hiện tượng phân tầng nhiệt rõ rệt, thúc đẩy quá trình tích lũy năng lượng tại không gian hơi và hình thành khí bay hơi (BOG). Áp suất trong kết tăng phi tuyến và đạt ngưỡng giới hạn thiết kế 1.0 MPa sau 22.5 giờ lưu trữ, cung cấp cơ sở định lượng để xác định thời gian lưu trữ an toàn (holding time). Phân tích nguồn nhiệt xác nhận truyền nhiệt qua thành vỏ là cơ chế chi phối chính (41.9%), bên cạnh đóng góp từ hệ thống đường ống và phản ứng nội sinh. Mô hình này là công cụ hiệu quả để dự báo đặc tính nhiệt động, hỗ trợ tối ưu hóa vận hành và an toàn cho tàu LNG/LPG.

Từ khóa: Kết chứa LNG; MATLAB Simulink; Phân tầng nhiệt; Khí bay hơi (BOG).

ABSTRACT

This study develops a thermodynamic simulation model for LNG/LPG storage tanks using MATLAB Simulink to analyze the interaction between heat transfer, phase change, and pressure fluctuations. The results indicate that ambient heat ingress leads to significant thermal stratification, driving energy accumulation in the vapor space and the formation of boil-off gas (BOG). The tank pressure exhibits a non-linear upward trend, reaching the design limit of 1.0 MPa after 22.5 hours, providing a quantitative basis for determining the safe holding time. Heat source analysis confirms that heat ingress through the tank walls is the dominant mechanism (41.9%), followed by contributions from piping systems and internal reactions. This model serves as an effective tool for predicting thermodynamic characteristics, supporting operational optimization and safety assessments for LNG/LPG carriers.

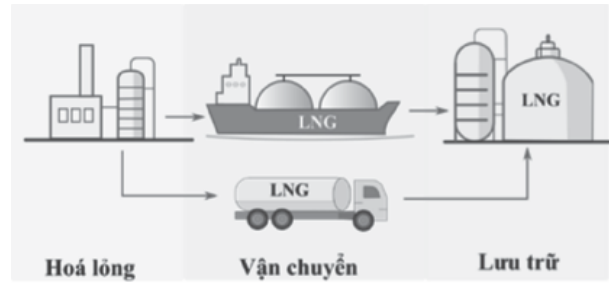
Keywords: LNG storage; MATLAB Simulink; Thermal stratification; Boil-off gas (BOG).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh chuyển dịch năng lượng toàn cầu nhằm giảm phát thải khí nhà kính, khí tự nhiên hóa lỏng (LNG) và khí dầu mỏ hóa lỏng (LPG) đang đóng vai trò quan trọng như các nguồn năng lượng trung gian hướng tới mục tiêu trung hòa carbon. Theo International Energy Agency (IEA, 2023), nhu cầu LNG toàn cầu tiếp tục tăng trưởng ổn định, đặc biệt tại khu vực châu Á – Thái Bình Dương, kéo theo sự gia tăng nhanh chóng về số lượng tàu vận chuyển LNG/LPG và quy mô hệ thống lưu trữ cryogenic trên tàu [1].

Các hệ thống kết chứa màng hoặc kết Moss thường xuyên chịu tác động nhiệt từ môi trường, gây phát sinh hiện tượng bay hơi tự nhiên (BOG) và làm biến đổi trạng thái nhiệt động nội tại. Đặc biệt, trong quá trình bơm dỡ (loading/discharging), các cơ chế trao đổi khối, năng lượng và biến đổi pha diễn ra phức tạp, ảnh hưởng trực tiếp đến áp suất vận hành và độ bền kết cấu theo quy định của Bộ luật IGC và IMO.

Trong quá trình bơm dỡ (discharging) và nhận hàng (loading), trạng thái nhiệt động học của kết chứa biến đổi mạnh do tương tác đồng thời của các cơ chế: (i) trao đổi khối giữa kết và hệ thống đường ống; (ii) trao đổi năng lượng dưới dạng enthalpy của dòng vào/ra; (iii) truyền nhiệt qua kết cấu cách nhiệt; và (iv) biến đổi pha giữa lỏng – hơi trong không gian hai pha. Các biến đổi này ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn vận hành, độ bền kết cấu kết và hiệu suất năng lượng của hệ thống. Nghiên cứu của Wang và cộng sự [2] đã chỉ ra rằng tốc độ gia tăng áp suất trong kết LNG phụ thuộc mạnh vào hệ số truyền nhiệt tổng hợp và điều kiện vận hành của hệ thống tái ngưng tụ hơi. Tương tự, [3], [4] chứng minh rằng mô hình cân bằng năng lượng hai pha cho phép dự đoán chính xác xu hướng áp suất trong kết màng khi thực hiện dỡ hàng với lưu lượng lớn.



Hình 1. Sơ đồ sản xuất, vận chuyển và lưu trữ khí hóa lỏng

Bên cạnh đó, các nghiên cứu kinh điển về nhiệt động học kỹ thuật như của Smith, Van Ness và Abbott [5] cung cấp cơ sở lý thuyết cho việc xây dựng mô hình cân bằng khối lượng – năng lượng cho hệ hai pha. Tuy nhiên, phần lớn các công trình trước đây tập trung vào trạng thái tĩnh hoặc điều kiện vận chuyển dài ngày, trong khi các giai đoạn chuyển tiếp nhanh như loading/discharging vẫn chưa được phân tích đầy đủ trong điều kiện khai thác thực tế trên tàu biển [2], [6], [7].

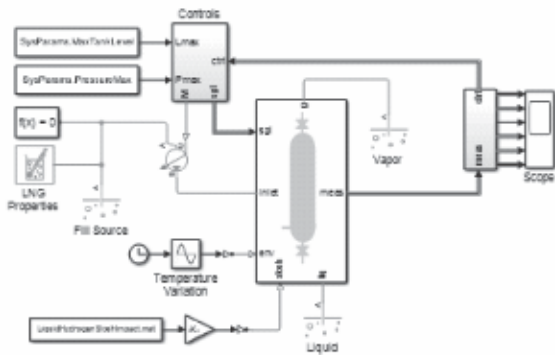
Mặc dù các nghiên cứu kinh điển đã thiết lập nền tảng về cân bằng khối lượng – năng lượng, việc phân tích các giai đoạn chuyển tiếp nhanh trong điều kiện khai thác thực tế vẫn còn hạn chế. Do đó, nghiên cứu này xây dựng mô hình nhiệt động học động (dynamic model) sử dụng MATLAB Simulink nhằm: (1) Dự báo biến thiên áp suất và nhiệt độ theo thời gian; (2) Đánh giá ảnh hưởng của tốc độ bơm và dòng enthalpy vào/ra; và (3) Xác định giới hạn vận hành an toàn. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở định lượng để tối ưu hóa chiến lược kiểm soát BOG và nâng cao hiệu suất năng lượng cho các tàu chở khí hóa lỏng hiện đại.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu tập trung phân tích đặc tính

hiệt động học hệ hai pha lỏng – hơi (LNG/LPG) trong két chứa cryogenic trên tàu vận tải suốt quá trình bơm và nhận hàng. Mô hình xem xét tổng thể tương tác giữa lớp cách nhiệt, hệ thống đường ống và không gian hơi dưới tác động của nhiệt xâm nhập môi trường và dòng enthalpy vào/ra. Đặc biệt, nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của hiện tượng dao động chất lỏng (sloshing) đến sự xáo trộn nhiệt và gia tăng áp suất nội tại. Để giải quyết bài toán đa vật lý này, phương pháp mô phỏng số trên nền tảng MATLAB Simulink được ứng dụng nhằm dự báo chính xác diễn biến trạng thái của hệ thống trong điều kiện khai thác thực tế.



Hình 2. Sơ đồ khối mô hình mô phỏng nhiệt động học của két chứa LNG/LPG trong môi trường Simulink sử dụng thư viện Simscape Fluids

Nghiên cứu ứng dụng thư viện Simscape Fluids trong môi trường MATLAB Simulink để xây dựng mô hình nhiệt động học động, mô tả các quá trình truyền nhiệt, dòng chảy và biến đổi pha trong két chứa LNG/LPG. Phương pháp này chuyển hóa các phần tử vật lý (bồn chứa, hệ thống van, đường ống) thành các khối chức năng tương tác, cho phép giải hệ phương trình vi phân thường (ODE) về cân bằng khối lượng và năng lượng theo thời gian thực.

Quy trình thực hiện bao gồm các giai đoạn cốt lõi: (1) Thiết lập mô hình vật lý đa lớp (lỏng, hơi, vỏ két và cách nhiệt); (2) Xác

định điều kiện biên về nhiệt độ môi trường, áp suất vận hành và lưu lượng bơm; (3) Mô phỏng động học quá trình truyền nhiệt và bay hơi; và (4) Tích hợp các mô hình thực nghiệm về hiện tượng sloshing. Cách tiếp cận này giúp dự báo chính xác sự biến thiên các thông số nhiệt động của hệ thống trong suốt chu kỳ khai thác thực tế.

2.2. Giả thiết

Để phù hợp với cấu trúc mô hình trong Simulink và đảm bảo tính khả thi tính toán, các giả thiết sau được áp dụng:

- Hệ gồm hai pha: lỏng và hơi;
- Pha lỏng không nén được, pha hơi tuân theo phương trình trạng thái khí lý tưởng;
- Các tính chất nhiệt vật lý phụ thuộc nhiệt độ;
- Hệ được mô hình hóa theo dạng tham số tập trung (lumped parameter);
- Quá trình chuyển pha xảy ra tại mặt phân cách lỏng – hơi;
- Ảnh hưởng của sloshing được xét thông qua hệ số hiệu chỉnh truyền nhiệt.

2.3. Mô hình toán

• Phương trình bảo toàn khối lượng:

Trong môi trường Simulink, cân bằng khối lượng được mô tả dưới dạng phương trình vi phân:

$$\begin{aligned} \frac{dm_l}{dt} &= \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} - \dot{m}_{boil} \\ \frac{dm_v}{dt} &= \dot{m}_{boil} - \dot{m}_{vent} \end{aligned} \quad (1)$$

Các phương trình này được triển khai thông qua các khối tích phân (Integrator blocks) trong Simulink.

• **Phương trình bảo toàn năng lượng:**

Cân bằng năng lượng của hệ được viết dưới dạng:

$$\frac{d}{dt}(\mu) = \dot{Q}_{tot} + \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} \quad (2)$$

Trong đó, tổng nhiệt lượng truyền vào hệ bao gồm:

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{wall} + \dot{Q}_{pipe} + \dot{Q}_{slosh} \quad (3)$$

Các thành phần nhiệt này được mô hình hóa bằng các khối truyền nhiệt trong Simscape.

• **Mô hình truyền nhiệt:**

Truyền nhiệt qua thành kết được biểu diễn bằng mô hình điện trở nhiệt tương đương:

$$\dot{Q}_{wall} = \frac{T_{env} - T_l}{R_{tot}} \quad (4)$$

Trong Simulink, mô hình này được xây dựng bằng các phần tử nhiệt (thermal blocks) liên kết giữa môi trường và môi chất trong kết.

• **Mô hình bay hơi (BOG):**

Tốc độ bay hơi được xác định từ cân bằng năng lượng:

$$\dot{m}_{boil} = \frac{\dot{Q}_{tot}}{h_{fg}} \quad (5)$$

Giá trị này được sử dụng để cập nhật khối lượng pha hơi trong mô hình động.

• **Phương trình trạng thái:**

Áp suất pha hơi trong kết được xác định theo phương trình:

$$PV = m_v RT \quad (6)$$

Phương trình này được triển khai trong Simulink thông qua các khối toán học cơ bản, liên kết với các biến trạng thái của hệ.

• **Mô hình hóa ảnh hưởng dao động (sloshing):**

Trong mô hình Simulink, ảnh hưởng của dao động chất lỏng không được mô tả trực tiếp bằng CFD mà được đưa vào dưới dạng hệ số hiệu chỉnh:

$$\dot{Q}_{slosh} = \beta \cdot \dot{Q}_{wall} \quad (7)$$

Hệ số β được xác định từ dữ liệu thực nghiệm hoặc tài liệu tham khảo.

Kết quả mô phỏng thu được từ mô hình trong MATLAB Simulink cho thấy các quá trình nhiệt – khối trong kết chứa LNG/LPG diễn ra với mức độ tương tác phức tạp giữa truyền nhiệt, biến đổi pha và tích tụ năng lượng theo thời gian.

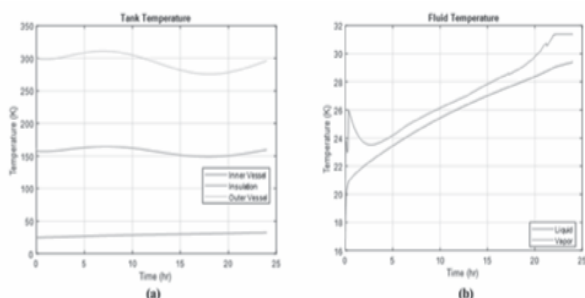
3. KẾT QUẢ VÀ BÀN LUẬN

3.1. Truyền nhiệt qua kết cấu kết chứa

Kết quả mô phỏng trong khoảng thời gian 25 giờ cho thấy sự tương tác nhiệt phức tạp giữa môi trường bên ngoài và các thành phần của hệ thống lưu trữ LNG/LPG, thể hiện rõ qua các đặc trưng sau:

Phản ứng với môi trường (Hình 3.1a): Vỏ ngoài (Outer Vessel) chịu ảnh hưởng trực tiếp của điều kiện môi trường, với nhiệt độ biến thiên tuần hoàn theo dạng gần hàm sin trong khoảng 275 K đến 310 K. Nhờ hiệu quả của lớp cách nhiệt (Insulation), nhiệt độ tại lớp trung gian này được duy trì ổn định quanh giá trị xấp xỉ 160 K, qua đó hình thành một rào cản nhiệt đáng kể. Cấu trúc này giúp hạn chế đáng kể dòng nhiệt xâm nhập vào bên trong, đảm bảo

vỏ trong (Inner Vessel) duy trì ở mức nhiệt độ siêu thấp (dưới 30 K), phù hợp với điều kiện lưu trữ LNG/LPG.



Hình 3. Sự thay đổi nhiệt độ của két chứa theo thời gian

Sự phân tầng nhiệt của lưu chất (Hình 3.1b): Kết quả mô phỏng cho thấy sự phân tách rõ rệt về nhiệt độ giữa hai pha lỏng và hơi. Pha hơi (Vapor) có xu hướng gia tăng nhiệt độ nhanh hơn và duy trì ở mức cao hơn pha lỏng khoảng 3 K đến 5 K tại thời điểm cuối chu kỳ. Hiện tượng này phản ánh sự tích tụ năng lượng trong không gian hơi (ullage space), nơi không được làm mát trực tiếp bởi khối chất lỏng. Sự phân tầng nhiệt này đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy quá trình bay hơi tự nhiên, góp phần làm gia tăng lượng khí bay hơi (BOG) trong két chứa.

Kết quả mô phỏng cho thấy mặc dù hệ thống cách nhiệt hoạt động hiệu quả trong việc hạn chế dòng nhiệt xâm nhập, nhiệt lượng vẫn tích tụ dần trong két chứa, dẫn đến sự gia tăng nhiệt độ của cả hai pha. Hiện tượng phân tầng nhiệt giữa pha lỏng và pha hơi làm cho pha hơi trở thành vùng tích tụ năng lượng, từ đó thúc đẩy quá trình bay hơi tự nhiên và làm tăng áp suất trong két. Điều này nhấn mạnh vai trò quan trọng của các hệ thống quản lý khí bay hơi (BOG) cũng như việc tối ưu hóa điều kiện vận hành nhằm đảm bảo an toàn và nâng cao hiệu quả khai thác.

3.2. Phân tích các nguồn nhiệt xâm nhập

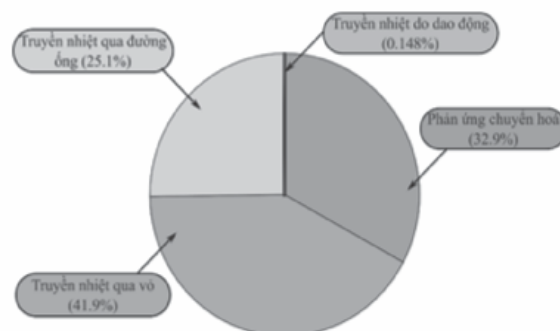
Kết quả phân tích cho thấy tổng nhiệt lượng xâm nhập vào hệ được phân bổ không đồng đều giữa các nguồn khác nhau:

Truyền nhiệt qua thành vỏ: Chiếm tỷ trọng lớn nhất (41.9%), cho thấy bề mặt kết là con đường chính dẫn nhiệt từ môi trường vào hệ. Điều này nhấn mạnh vai trò then chốt của thiết kế và vật liệu cách nhiệt.

Phản ứng chuyển hóa isomer: Đóng góp 32.9% tổng nhiệt, là nguồn nhiệt nội sinh đáng kể. Mặc dù hiện tượng này đặc trưng hơn trong các hệ cryogenic như hydro lỏng, kết quả cho thấy nếu tồn tại, nó có thể ảnh hưởng đáng kể đến áp suất và cân bằng năng lượng của hệ.

Truyền nhiệt qua đường ống: Chiếm 25.1%, phản ánh vai trò của các điểm kết nối và cầu nhiệt tại hệ thống đường ống trong việc gây thất thoát nhiệt.

Ảnh hưởng của dao động chất lỏng (Sloshing effect): Chỉ chiếm khoảng 0.148%, cho thấy tác động không đáng kể trong điều kiện mô phỏng tĩnh. Tuy nhiên, trong điều kiện vận hành thực tế trên biển, yếu tố này có thể trở nên quan trọng hơn do ảnh hưởng của chuyển động tàu.



Hình 4. Tỷ lệ nguồn nhiệt xâm nhập vào két chứa

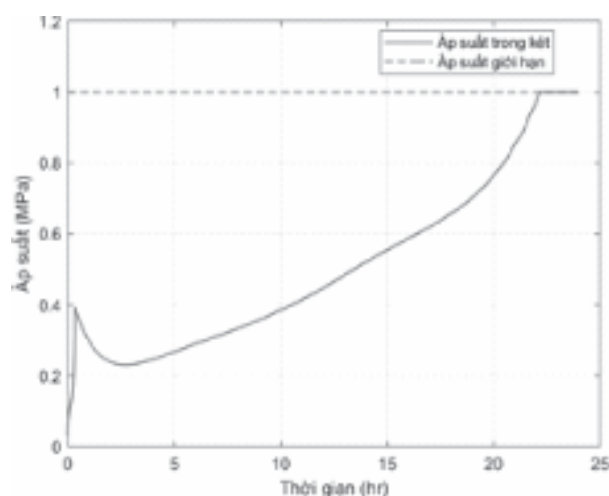
3.3. Biến thiên áp suất

Diễn biến áp suất trong két (tank pressure) có mối quan hệ chặt chẽ với sự gia tăng nhiệt độ của pha hơi. Kết quả mô phỏng cho thấy áp suất trải qua ba giai đoạn đặc trưng:

➤ Giai đoạn ổn định ban đầu (0-2 giờ): Áp suất xuất hiện dao động nhỏ trong thời gian ngắn, sau đó giảm về khoảng 0.22 MPa, phản ánh quá trình thiết lập cân bằng nhiệt động giữa pha lỏng và pha hơi.

➤ Giai đoạn tăng áp tự nhiên: Từ khoảng giờ thứ 3, áp suất bắt đầu tăng dần theo thời gian do sự tích tụ khí bay hơi (BOG). Đáng chú ý, sau mốc 20 giờ, tốc độ gia tăng áp suất trở nên rõ rệt hơn, cho thấy sự tích lũy nhiệt trong hệ đạt đến mức đáng kể.

➤ Giới hạn an toàn: Tại thời điểm xấp xỉ 22.5 giờ, áp suất trong két đạt giá trị khoảng 1.0 MPa, tương ứng với ngưỡng thiết kế. Thông số này có ý nghĩa quan trọng trong việc xác định thời gian lưu trữ an toàn (holding time), đồng thời là cơ sở để kích hoạt hệ thống van xả nhằm đảm bảo an toàn kết cấu.



Hình 5. Sự thay đổi nhiệt độ của két chứa theo thời gian

Kết quả mô phỏng cho thấy áp suất trong két tăng tỉ lệ thuận với quá trình tích tụ nhiệt và bay hơi. Sau giai đoạn xác lập cân bằng nhiệt động ban đầu (0-2 giờ), áp suất tăng dần và chuyển sang trạng thái tích lũy năng lượng mạnh sau mốc 20 giờ, khi khả năng “đệm nhiệt” của pha lỏng suy giảm.

Đặc biệt, hệ thống đạt ngưỡng áp suất giới hạn 1.0 MPa tại thời điểm 22.5 giờ. Việc xác định mốc thời gian này cung cấp cơ sở định lượng quan trọng cho thiết kế hệ thống kiểm soát áp suất và tối ưu hóa chu kỳ vận hành an toàn trên các tàu LNG/LPG, khẳng định thời gian lưu trữ an toàn phụ thuộc phi tuyến vào cường độ tích lũy nhiệt theo thời gian.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xây dựng thành công mô hình mô phỏng nhiệt động học động cho hệ thống két chứa LNG/LPG trên nền tảng MATLAB Simulink, cho phép phân tích sự tương tác đa vật lý giữa truyền nhiệt môi trường, biến đổi pha và động lực học áp suất. Các kết quả chính được rút ra như sau:

- Hệ thống cách nhiệt đóng vai trò then chốt trong việc duy trì ổn định nhiệt độ vỏ trong. Tuy nhiên, hiện tượng phân tầng nhiệt (thermal stratification) giữa pha lỏng và pha hơi vẫn diễn ra, trở thành nhân tố chính thúc đẩy tích lũy năng lượng tại không gian trống (ullage) và hình thành khí bay hơi (BOG).

- Áp suất trong két biến thiên phi tuyến theo tốc độ tăng nhiệt pha hơi. Tại mốc 22.5 giờ, áp suất chạm ngưỡng thiết kế 1.0 MPa khi khả năng hấp thụ nhiệt của khối lỏng bão hòa. Đây là thông số định lượng quan trọng để xác định thời gian lưu trữ an toàn (holding time) và thiết lập quy trình vận hành van xả áp hoặc hệ thống tái hóa lỏng.

- Phân tích cân bằng nhiệt xác định truyền nhiệt qua thành vỏ chiếm tỷ trọng lớn nhất (41.9%), tiếp sau là phản ứng nội sinh (32.9%) và các cầu nhiệt tại hệ thống đường ống (25.1%). Kết quả này nhấn mạnh việc tối ưu hóa các chi tiết kết nối cơ học là giải pháp cấp thiết để giảm thiểu tổn thất năng lượng.

Mô hình đề xuất là công cụ dự báo tin cậy cho việc đánh giá an toàn và tối ưu hóa vận hành tàu LNG/LPG. Giai đoạn tiếp theo, nghiên cứu cần tích hợp các hiệu ứng động lực học chất lỏng phức tạp như hiện tượng xáo trộn (sloshing) ba chiều và ảnh hưởng của độ đầy (filling level) nhằm nâng cao độ chính xác trong điều kiện vận hành thực tế trên biển.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT25-26.56. ❖

Ngày nhận bài: **16/3/2026**

Ngày phản biện: **28/3/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. IGU, “*International Gas Union: World LNG Report*”, 2013. Accessed: Mar. 03, 2026. [Online]. Available: <https://www.igu.org/igu-reports/lng2023-world-lng-report>
- [2]. C. Wang, Y. Ju, and Y. Fu, “*Dynamic modeling and analysis of LNG fuel tank pressurization under marine conditions*”. *Energy*, vol. 232, no. 6, p. 121029, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.121029.
- [3]. G. M. Jeon, J. C. Park, and S. Choi, “*Multiphase-thermal simulation on BOG/BOR estimation due to phase change in cryogenic liquid storage tanks*”. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 184, no. 27, p. 116264, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116264.
- [4]. Y. P. Jo, M. S. F. Bangi, S. H. Son, J. S. Il Kwon, and S. W. Hwang, “*Dynamic modeling and offset-free predictive control of LNG tank*”. *Fuel*, vol. 285, p. 119074, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.FUEL.2020.119074.
- [5]. J. M. Smith, “*Introduction to chemical engineering thermodynamics*”. *J. Chem. Educ.*, vol. 27, no. 10, p. 584, Oct. 1950, doi: 10.1021/ed027p584.3.
- [6]. L. Morozuk, B. Kosoy, V. Sokolovska-Yefymenko, and V. Ierin, “*Analysis of Mixing Processes of LPG Gases in Tanks When Transporting by Sea*”. *Dynamics*, vol. 2, no. 3, pp. 219-233, Sep. 2022, doi: 10.3390/DYNAMICS2030011.
- [7]. G. E. Scarponi, G. Landucci, F. Heymes, and V. Cozzani, “*Experimental and numerical study of the behavior of LPG tanks exposed to wildland fires*”. *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 114, pp. 251-270, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.PSEP.2017.12.013.