

## NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀY LỚP CÁU CẶN ĐẾN HIỆU SUẤT NHIỆT CỦA BỘ TRAO ĐỔI NHIỆT KIỂU ỐNG VỎ

STUDY THE EFFECT OF FOULING THICKNESS ON THE THERMAL PERFORMANCE OF SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGERS

ThS. Nguyễn Đức Bình\*, ThS. Nguyễn Mạnh Chiề

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email: binhnd.vck@vimaru.edu.vn

### TÓM TẮT

*Bộ trao nhiệt (BTN) có vai trò quan trọng trong các hệ thống nhiệt – lạnh. Cá*u cặn do các phần tử vật liệu không mong muốn tích tụ trên bề mặt kênh dẫn của BTN. Cáu cặn làm tăng sức cản thủy – nhiệt động lực, giảm hiệu quả và hiệu suất truyền nhiệt của thiết bị. Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp cáu cặn đến hiệu quả làm việc của thiết bị trao đổi nhiệt kiểu ống vỏ, sử dụng trong bộ gia nhiệt không khí, bằng phương pháp mô phỏng số. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu suất nhiệt suy giảm theo sự gia tăng của chiều dày lớp cáu cặn. Điều này hoàn toàn phù hợp với những kết quả khảo sát bằng lý thuyết cũng như thực nghiệm.

**Từ khóa:** Trao đổi nhiệt; Cáu cặn; Mô phỏng số; Hệ số truyền nhiệt; Dòng chảy.

### ABSTRACT

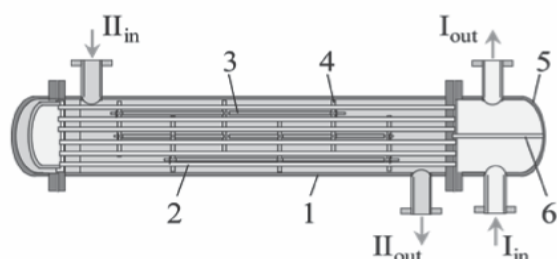
*Heat exchangers play an important role in heat and cooling systems. Fouling is due to by unwanted material particles accumulating on the surface of the heat transfer surfaces. These deposits increase hydro-thermodynamic resistance, reducing the heat transfer capacity, thus the thermal performance of the devices. This article studies the influence of fouling thickness on the performance of a shell-and-tube heat exchanger, which is used in an air heater, by using numerical simulation methods. The results show that thermal efficiency decreases with the increase in scale layer thickness. This is well agreed with the previously theoretical and experimental publications.*

**Keywords:** Heat exchanger; Fouling; Numerical simulation; Heat transfer coefficient; Flow.

## 1. TỔNG QUAN

Cấu cặn là lớp vật liệu không mong muốn bám kết lên bề mặt truyền nhiệt của BTN. Chúng làm giảm tiết diện kênh dẫn, thay đổi độ nhám bề mặt, tăng sức cản thủy-nhiệt động lực, làm giảm hiệu quả truyền nhiệt giữa các dòng chất lỏng. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy, cấu cặn là nguyên nhân chính gây ra tổn thất năng lượng, gia tăng chi phí khai thác, bảo dưỡng và sửa chữa thiết bị [1-4].

Sự phát triển của sản xuất và xã hội dẫn đến sử dụng ngày càng nhiều hơn các bộ trao nhiệt. Vì vậy, nghiên cứu cơ chế hình thành, đánh giá tác hại, dự đoán tốc độ phát triển lớp cấu cặn, xây dựng chiến lược bảo trì nhằm khôi phục tính năng làm việc của các bộ trao nhiệt là một thách thức lớn. Các nghiên cứu về cấu cặn hiện nay bao gồm: mô hình hóa và mô phỏng [5-7], đánh giá ảnh hưởng [8-14], phân tích các yếu tố tác động [1, 3], dự báo tốc độ phát triển [2, 15, 16] và xây dựng chiến lược bảo trì [4, 17, 18].



Hình 1. Bộ trao đổi nhiệt kiểu ống – vỏ:  
I – Chất lỏng lạnh, II – Chất lỏng nóng, 1 – Vỏ,  
2 – Ống, 3 – Thanh giằng, 4 – Tấm hướng dòng,  
5 – Nắp che, 6 – Vách ngăn

Bộ trao nhiệt kiểu ống – vỏ có cấu trúc đơn giản, linh hoạt, độ cứng vững cao, dễ chế tạo và bảo dưỡng nên được sử dụng phổ biến nhất [11]. Sơ đồ cấu trúc bộ trao nhiệt kiểu ống – vỏ được minh họa như trên Hình 1. Thiết bị

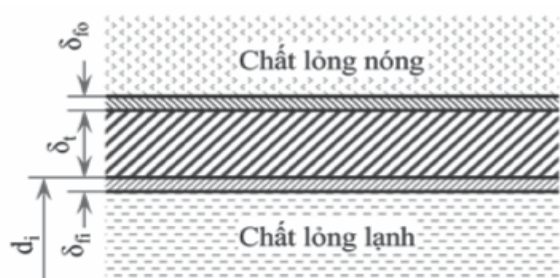
bao gồm các thành phần cấu tạo cơ bản như: Đường ống dẫn (I và II), vỏ (1), cụm ống (2), thanh giằng (3), tấm hướng dòng (4), nắp đáy (5) và vách ngăn (6). Mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp cấu cặn đến hiệu quả làm việc của bộ trao nhiệt kiểu ống vỏ, bằng phương pháp mô phỏng số.

## 2. MÔ HÌNH TOÁN

### 2.1. Giả thiết

Mô hình đánh giá ảnh hưởng của chiều dày lớp cấu cặn đến hiệu quả làm việc của thiết bị trao đổi nhiệt kiểu ống vỏ được trình bày như trên Hình 2. Mô hình toán được xây dựng dựa trên những giả thiết sau [19]:

- Cấu cặn phân bố đều trên các bề mặt truyền nhiệt;
- Hệ số truyền nhiệt tổng thể  $U = \text{const}$ ;
- Nhiệt độ của mỗi chất lỏng là đồng đều trên mọi tiết diện ngang;
- Bỏ qua truyền nhiệt trong các vách chuyển hướng;
- Nhiệt lượng truyền  $Q = \text{const}$ ,
- Nhiệt lượng trao đổi với môi trường xung quanh không đáng kể.



Hình 2. Mô hình truyền nhiệt qua ống có cấu cặn

## 2.2. Xác định các thông số đánh giá

Nhiệt lượng trao đổi giữa các dòng chất lỏng Q (kW), xác định theo công thức (1) [14, 15]:

$$Q = \dot{m}_c c_{pc} (T_{co} - T_{ci}) = \dot{m}_h c_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (1)$$

Trong đó:  $\dot{m}$  – Lưu lượng khối lượng của dòng chất lỏng (kg/s);  $c_p$  – Nhiệt dung riêng của chất lỏng (kJ/kgK);  $T_i, T_o$  – Nhiệt độ tại cửa vào và nhiệt độ tại cửa ra của chất lỏng (K); c và h – Chất lỏng nóng và lạnh.

Hệ số truyền nhiệt tổng thể U (W/m<sup>2</sup>K), xác định theo công thức (2) [14, 15]:

$$U = \frac{Q}{A \times F \times LMTD} \quad (2)$$

Trong đó: A – Diện tích bề mặt truyền nhiệt (m<sup>2</sup>); F – Hệ số hiệu chỉnh nhiệt độ; LMTD – Chênh nhiệt độ trung bình logarit (K). Chênh nhiệt độ trung bình logarit LMTD (K), với bộ trao nhiệt có các dòng chất lỏng chất lỏng chảy ngược chiều, tính theo công thức (3) [14, 15]:

$$LMTD = \frac{(T_{hi} - T_{co}) - (T_{ho} - T_{ci})}{\ln \left( \frac{T_{hi} - T_{co}}{T_{ho} - T_{ci}} \right)} \quad (3)$$

Hệ số cấu cặn  $R_f$  được xác định theo công thức (4) [14, 15]:

$$R_f = \frac{1}{U_i} - \frac{1}{U_o} \quad (4)$$

Trong đó:  $U_i$  và  $U_o$  (W/m<sup>2</sup>K) – Tương ứng là hệ số truyền nhiệt tổng thể của thiết bị đã có và chưa có cặn.

## 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Ví dụ áp dụng

Bảng 1. Các thông số cơ bản của bộ trao nhiệt ống – vỏ

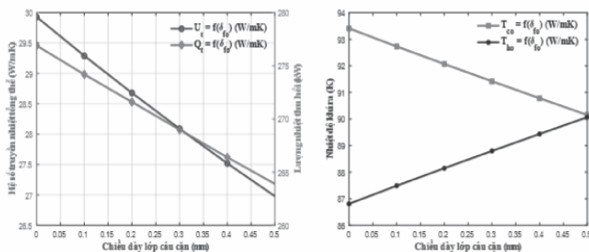
| Thông số                            | Ký hiệu | Đơn vị | Trị số |
|-------------------------------------|---------|--------|--------|
| Đường kính ngoài của ống            | $d_o$   | m      | 0.04   |
| Đường kính trong của ống            | $d_i$   | m      | 0.036  |
| Hệ số truyền nhiệt của vật liệu ống | k       | W/mK   | 16.2   |
| Số ống                              | N       | -      | 365    |
| Chiều dài ống                       | $L_t$   | m      | 4.65   |
| Chiều dài vỏ                        | $L_s$   | m      | 5.65   |
| Chiều rộng vỏ                       | B       | m      | 1.4    |
| Chiều cao vỏ                        | H       | m      | 1.2    |

Đối tượng khảo sát được chọn là một bộ trao nhiệt kiểu ống – vỏ được sử dụng để tận dụng nhiệt thải từ máy sấy. Khí xả từ máy sấy có nhiệt độ 150 (°C), độ ẩm tuyệt đối 0.08 (kg<sub>v</sub>/kg<sub>a</sub>) đi vào bộ trao nhiệt với lưu lượng 4.17 (m<sup>3</sup>/s) và lưu động ở phía ngoài ống. Không khí lạnh ngoài môi trường có nhiệt độ 30 (°C), độ ẩm tương đối 46% đi vào bộ trao nhiệt với lưu lượng 4.17 (m<sup>3</sup>/s) và lưu động ở phía trong ống. Các thông số cơ bản của bộ trao nhiệt được cho trong Bảng 1.

Trên cơ sở mô hình toán và các thông số của bộ trao nhiệt, nhóm tác giả phát triển một chương trình máy tính trên nền tảng phần mềm EES. Chương trình tính có thể tự động tra các thông số nhiệt động của chất lỏng và giải mô hình toán với những phương trình được cung cấp. Trong nghiên cứu này, cả khí thải và không khí đều được coi là không khí ẩm. Cấu cặn chỉ

xảy ra ở phần vỏ do khí xả có nhiều tạp chất. Độ dày của lớp cặn được khảo sát trong khoảng 0 đến 0.5 mm. Hệ số truyền nhiệt của lớp cặn được lựa chọn là 0.05 (W/mK).

### 3.2. Thảo luận



Hình 3. Ảnh hưởng của chiều dày lớp cặn đến hiệu quả làm việc của BTN

Hình 3 trình bày kết quả khảo sát hiệu quả làm việc của BTN kiểu ống – vỏ với các độ dày khác nhau của lớp cặn. Khi tăng chiều dày lớp cặn từ 0 (mm) (ống sạch) lên 0.5 (mm), hệ số truyền nhiệt tổng thể  $U$  giảm 9.86%, từ 29.93 (W/m<sup>2</sup>K) xuống 26.98 (W/m<sup>2</sup>K); nhiệt độ dòng khí nóng tại cửa ra tăng khoảng 3.76%, từ 86.81 (°C) lên 90.07 (°C); tương tự, nhiệt độ dòng khí lạnh giảm khoảng 3.49%, từ 93.41 (°C) xuống 90.15 (°C). Kết quả là lượng nhiệt trao đổi giữa hai dòng khí giảm khoảng 4.69%, từ 276.9 (kW) xuống 263.9 (kW). Điều này cho thấy, hiệu quả truyền nhiệt giảm tương ứng với sự gia tăng của chiều dày lớp cặn, hệ thống làm việc ngày càng kém hiệu quả.

### 4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày của lớp cặn đến hiệu quả nhiệt của nhóm thiết bị trao đổi nhiệt kiểu ống – vỏ bằng phương pháp mô phỏng số. Kết quả khảo sát thực hiện trên một thiết bị được thiết kế để thu hồi nhiệt thải từ máy sấy vải sợi. Từ kết quả đạt được, có thể kết luận như sau:

- Cấu cặn làm suy giảm chức năng làm việc của bộ trao nhiệt nói riêng và hệ thống năng lượng nói chung.
- Cấu cặn làm tăng mức tiêu thụ năng lượng, tăng chi phí bảo trì và sửa chữa thiết bị.
- Lớp cặn càng dày, hiệu quả trao đổi nhiệt càng giảm, do đó làm giảm hiệu suất chung của hệ thống.

### Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT24-25.48.❖

### Tài liệu tham khảo:

- [1]. Shen, C., et al., “Characteristics of fouling development in shell-and-tube heat exchanger: Effects of velocity and installation location”. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014. 77: p. 439-448.
- [2]. Sundar, S., et al., “Fouling modeling and prediction approach for heat exchangers using deep learning”. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020. 159.
- [3]. Varnaseri, M. and S.M. Peyghambarzadeh, “Scale Formation in Heat Exchangers”. 2024: Springer Nature Switzerland.
- [4]. Lê Quang Hưng, N.T.M.L., Nguyễn Khánh Toàn, Nguyễn Thị Lan Anh, “Xử lý cặn lắng động trong thiết bị trao đổi nhiệt của phân xưởng CDU Nhà máy Lọc dầu Dung Quất bằng hóa phẩm”. Tạp chí Dầu Khí, 2016. 7: p. 8.
- [5]. Ogbonnaya, S.-K. and O.-O. Ajayi, “Fouling phenomenon and its effect on heat exchanger: A review”. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2017. 9(1): p. 1-12.
- [6]. Tang, S.-Z., et al., “Parametric study on fouling mechanism and heat transfer characteristics of tube bundle heat exchangers for reducing fouling considering the deposition and removal mechanisms”. Fuel, 2018. 211: p. 301-311.

- [7]. Diaz-Bejarano, E., F. Coletti, and S. Macchietto, “*Modeling and Prediction of Shell-Side Fouling in Shell-and-Tube Heat Exchangers*”. Heat Transfer Engineering, 2018. 40(11): p. 845-861.
- [8]. Ajayi, O.O. and S.K. Ogbonnaya, “*Fouling Phenomenon and Its Effect on Heat Exchanger: A Review*”. Frontiers in Heat and Mass Transfer, 2017. 9.
- [9]. Lemos, J.C., A.L.H. Costa, and M.J. Bagajewicz, “*Design of shell and tube heat exchangers considering the interaction of fouling and hydraulics*”. AIChE Journal, 2022. 68(5).
- [10]. Markowski, M. and P. Trzcinski, “*On-line control of the heat exchanger network under fouling constraints*”. Energy, 2019. 185: p. 521-526.
- [11]. Nakao, A., et al., “*Incorporating Fouling Modeling into Shell-and-Tube Heat Exchanger Design*”. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017. 56(15): p. 4377-4385.
- [12]. Trafczynski, M., et al., “*The influence of fouling on the dynamic behavior of PID-controlled heat exchangers*”. Applied Thermal Engineering, 2016. 109: p. 727-738.
- [13]. Trafczynski, M., M. Markowski, and K. Urbaniec, “*Energy saving potential of a simple control strategy for heat exchanger network operation under fouling conditions*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. 111: p. 355-364.
- [14]. Trần Ngọc Trung, N.H.H., Triệu Hùng Trường, “*Giám sát và đánh giá hệ số tắc nghẽn tại bộ trao đổi nhiệt dạng tấm giàn công nghệ xử lý khí Hải Thạch*”. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, 2019. 60(1): p. 9.
- [15]. Jradi, R., C. Marvillet, and M.-R. Jeday, “*Application of an Artificial Neural Network Method for the Prediction of the Tube-Side Fouling Resistance in a Shell-And-Tube Heat Exchanger*”. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2022. 18(5): p. 1511-1519.
- [16]. Wang, J., et al., “*Fouling prediction of heat exchanger surface under alternating magnetic field based on IGWO – SVR*”. International Journal of Thermal Sciences, 2023. 184.
- [17]. Pogiatis, T., et al., “*Identifying optimal cleaning cycles for heat exchangers subject to fouling and ageing*”. Applied Energy, 2012. 89(1): p. 60-66.
- [18]. Przemyslaw Trzcinski, M.M., “*Diagnosis of the fouling effects in a shell and tube heat exchanger using artificial neural network*”. Chemical Engineering Transactions, 2018. 70: p. 6.
- [19]. Takemoto, T., Crittenden, B. D., & Kolaczowski, S. T., “*Interpretation of Fouling Data in Industrial Shell and Tube Heat Exchangers*”. Chemical Engineering Research and Design, 1999. 77: p. 10.