

ỨNG DỤNG PHẦN MỀM MÔ PHỎNG ĐỂ XÂY DỰNG PHƯƠNG TRÌNH TIÊU CHUẨN TỎA NHIỆT ĐỐI VỚI LƯU CHẤT CHẢY RỐI TRONG ỐNG

USING CFD SIMULATION SOFTWARE FOR BUILDING THE STANDARD TEMPERATURE EQUATION OF TURBULENT PIPE FLOW

Thái Ngọc Sơn*, Trần Thị Mỹ Linh

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: thnson@dut.udn.vn

(Nhận bài: 30/9/2021; Chấp nhận đăng: 18/11/2021)

Tóm tắt - Phương trình tiêu chuẩn tỏa nhiệt là phần kiến thức rất quan trọng trong chương trình đào tạo ngành Kỹ thuật Nhiệt. Để giúp sinh viên hiểu rõ phần kiến thức này, tác giả đã tiến hành chế tạo thiết bị thí nghiệm, sử dụng công cụ mô phỏng (CFD) trợ giúp trong việc xác định nhiệt độ của vách, xử lý kết quả thí nghiệm, xây dựng thành công phương trình tiêu chuẩn xác định hệ số tỏa nhiệt của môi chất đối lưu cưỡng bức ở chế độ chảy rối trong ống. So sánh với các công thức phổ biến thường được sử dụng như công thức Mikheev, công thức Petukhov, nhận thấy sai số trong phạm vi tiến hành thí nghiệm và mô phỏng hoàn toàn có thể chấp nhận được; Đặc biệt với công thức Petukhov, sai số chỉ dưới 6%. Điều này cho thấy, tiềm năng của việc sử dụng phương pháp mô phỏng trong việc nghiên cứu các bài toán tương tự. Kết quả được sử dụng để làm tài liệu đào tạo bậc cao học và kỹ sư ngành Kỹ thuật Nhiệt.

Từ khóa - Phương trình tiêu chuẩn; mô phỏng; động lực học chất lưu; hệ số tỏa nhiệt; đối lưu cưỡng bức

Abstract - The standard temperature equation is an important knowledge of the thermal engineering programme. In order to help students understand clearly about this part, the authors have fabricated experimental equipment, used a simulation tool (CFD) to determine the temperature of the wall, process the experimental data and successfully built the standard equation of defining the convection coefficient of the forced convection fluid at the turbulent flow mode in the tube. By comparison with commonly used formulas such as Mikheev formula and Petukhov one, the error in the experimental and simulated ranges is completely acceptable, especially with the Petukhov one, the error is less than 6%. This shows, the potential of using simulation in studying similar problems. This result is used as training materials for master and undergraduate programs in Thermal Engineering.

Key words - Criteria equation; simulation; Computational Fluid Dynamics (CFD); coefficient of convective heat transfer; forced convection

1. Đặt vấn đề

Một trong những mô hình trao đổi nhiệt đối lưu cưỡng bức thường gặp trong kỹ thuật là trường hợp chất lưu chảy rối trong ống. Khi đó, để tính hệ số tỏa nhiệt, trong các tài liệu dạy kỹ thuật nhiệt trong nước [Hoàng Ngọc Đồng; PLD; NDL] cũng như ngoài nước [Txvetkov; Khrustalov, Bejan] thường hướng sinh viên đến việc sử dụng phương trình tiêu chuẩn Colburn [1] hoặc Mikheev [2, 3]. Đây là những công thức đơn giản, thích hợp để tính nhanh, tính gần đúng các bài toán truyền nhiệt. Cùng với các công thức trên, công thức Petukhov phức tạp hơn khá nhiều cũng được đề cập trong 1 số tài liệu [1, 4, 5]. Các công thức trên đây cho kết quả chênh lệch nhau khá nhiều, sai số giữa chúng có thể lên trên 30% (Trường hợp $Re=500000$ với nước ở nhiệt độ $30^{\circ}C$). Trong quá trình giảng dạy cần hướng dẫn sinh viên hiểu về phương pháp đồng dạng và việc xây dựng các phương trình tiêu chuẩn, đồng thời có phương pháp đánh giá một cách khoa học các dữ liệu có sai số lớn như vài công thức trong đã nêu trên.

Hiện nay, việc sử dụng các phần mềm mô phỏng khá phổ biến, trong lĩnh vực truyền nhiệt cũng không ngoại lệ. Chúng tôi đã thiết kế thiết bị thí nghiệm để nghiên cứu trường hợp tỏa nhiệt đối lưu cưỡng bức chất lưu chảy rối trong ống, xây dựng phương trình tiêu chuẩn dựa trên kết quả tính toán bằng CFD với sự kiểm tra bằng thí nghiệm, đối chiếu so sánh một số công thức phổ biến để thấy sự hợp lý của phương pháp. Đó cũng chính là nội dung của một số

bài thí nghiệm học phần Truyền nhiệt, Thiết bị trao đổi nhiệt, Thực tập nhiệt lạnh 1 của ngành Kỹ thuật Nhiệt, chương trình đào tạo cử nhân tích hợp kỹ sư mà trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng đang xây dựng

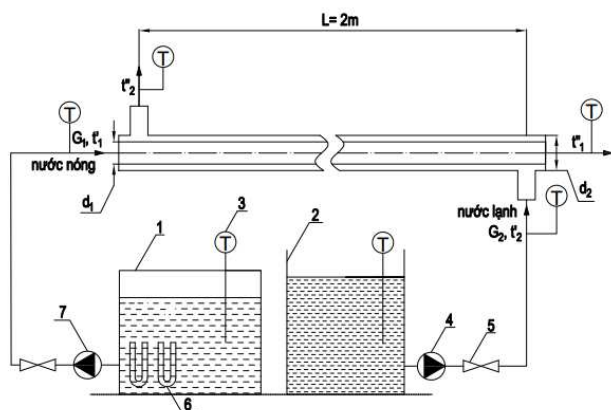
2. Kết quả nghiên cứu và khảo sát

2.1. Xây dựng thiết bị và tiến hành thí nghiệm

Thiết bị được xây dựng với mục đích phục vụ học tập, rèn luyện kỹ năng đo đạc, minh chứng lý thuyết, xử lý kết quả thí nghiệm qua các bài thực hành khác nhau cho các học phần cơ sở như Truyền nhiệt và Thiết bị trao đổi nhiệt. Thiết bị có dạng ống lồng ống (Hình 1), môi chất là nước. Sử dụng nước trong thí nghiệm do nước không độc hại; việc đo đạc và điều chỉnh nhiệt độ cũng như lưu lượng của nước khá dễ dàng. Nước nóng chảy trong ống trụ, nước lạnh chảy ngược chiều trong khe hình vành khăn. Ống được bọc cách nhiệt lý tưởng. Khi đó, bề mặt trao đổi nhiệt là bề mặt ống nhỏ, đoạn có chiều dài L . Mô hình này đơn giản, đã được sử dụng để xây dựng phương trình tiêu chuẩn theo hướng tiếp cận khác với các kích thước và dụng cụ đo lường khác [6], là 1 phần trong thiết bị thí nghiệm đã được chế tạo ở Hình 2, gồm: Ống trong là ống inox, có đường kính $d_2/d_1 = 19/17$ mm; Ống ngoài cũng bằng inox, có đường kính trong $D = 30$ mm; Chiều dài bề mặt trao đổi nhiệt $L = 2$ m. Lựa chọn inox làm vật liệu để đảm bảo độ bền của thiết bị. Ống làm thẳng, chiều dài lớn hơn đường kính khá nhiều (Hơn 50 lần) với mục đích nghiên cứu

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Thai Ngoc Son, Tran Thi My Linh)

phương trình tiêu chuẩn tỏa nhiệt của chất lưu chuyển động ổn định trong ống thẳng. Đường kính lựa chọn khá nhỏ để giảm lưu lượng khí thí nghiệm. Tất cả các đoạn ống, cũng như bình chứa nước được bọc cách nhiệt rất tốt.



Hình 1. Mô hình thí nghiệm

Chuẩn bị nước nóng ở bình 1, nước lạnh ở bình 2 đạt yêu cầu nhiệt độ đầu vào của các môi chất trong thí nghiệm. Bật bơm nước nóng 7 và bơm nước lạnh 4. Điều chỉnh lưu lượng bằng cách đóng từ từ từng bước các van. Tại mỗi vị trí đóng van; tiến hành đo lưu lượng được các giá trị như trong Bảng 1. Sau thời gian quãng 5 phút, hệ thống ổn định nhiệt, tiến hành đo nhiệt độ của nước nóng đầu vào t_1' , đầu ra t_1'' ; Nhiệt độ của nước lạnh đầu vào t_2' , đầu ra t_2'' bằng thiết bị đo nhiệt độ điện tử TA-288 với độ phân giải đến $0,1^\circ\text{C}$. Lưu lượng của các môi chất được xác định bằng đồng hồ đo lưu lượng điện tử G1/2 với đơn vị đo là l/min (lít trên phút), thể hiện đến phần trăm của đơn vị. Mỗi bài thí nghiệm thực hiện tối thiểu 3 lần đo, mỗi lần cách nhau 2-3 phút. Số liệu để tính toán là giá trị trung bình theo số lần đo.



Hình 2. Thiết bị chế tạo thực tế

Đối với bài thí nghiệm xác định phương trình tiêu chuẩn của chất lưu chuyển động trong ống, chúng tôi tiến hành 20 thí nghiệm ứng với giá trị các tiêu chuẩn $Re_f \in [11200; 21800]$, $Pr_f \in [3,0; 4,2]$. Tiêu chuẩn Re_f và Pr_f chỉ thay đổi trong phạm vi vừa phải, đủ để đáp ứng nhu cầu thí nghiệm để phục vụ học tập. Với mục đích hướng dẫn sinh viên thực hành xây dựng phương trình tiêu chuẩn, lưu lượng và nhiệt độ các môi chất được tính toán trước, sau đó thực hiện thí nghiệm rồi lựa chọn một nhóm vài thí nghiệm (Trong trường hợp chúng tôi trình bày là 5 thí nghiệm) có chung 1 giá trị tiêu chuẩn Re_f như trong Bảng 3. Kết quả thí nghiệm

sau khi xử lý, tính giá trị trung bình được thể hiện trong Bảng 1, trong đó lưu lượng được thể hiện bằng đơn vị khối lượng kg trong 1 phút kg/min

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm

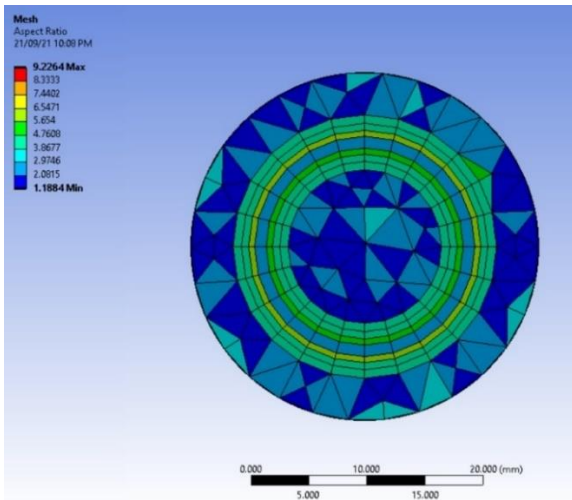
Bài	Đầu vào				Đầu ra	
	G_1 , kg/min	t_1' , $^\circ\text{C}$	G_2 , kg/min	t_2' , $^\circ\text{C}$	t_1'' , $^\circ\text{C}$	t_2'' , $^\circ\text{C}$
1	5,72	44,9	14,14	24,8	38,2	27,0
2	5,51	49,8	19,69	20,2	37,8	23,0
3	5,09	55,1	14,14	24,7	44,3	28,8
4	4,81	59,8	20,38	25,1	44,4	28,2
5	4,44	65,0	14,21	30,0	51,6	34,7
6	5,53	65,0	10,05	29,8	54,9	36,5
7	6,10	60,1	20,36	24,9	48,0	28,0
8	6,59	55,0	20,01	19,9	43,7	23,2
9	7,00	50,1	20,09	20,0	39,5	22,9
10	7,57	44,9	19,97	19,9	38,1	22,7
11	6,85	65,0	13,38	30,1	54,0	36,3
12	7,29	60,3	13,30	30,1	51,5	34,7
13	7,80	55,2	13,37	24,9	46,6	30,7
14	8,50	50,0	16,95	24,8	43,1	28,6
15	8,99	44,7	15,35	25,2	40,4	28,5
16	8,32	65,2	15,21	24,9	52,5	31,3
17	8,90	60,0	20,20	25,3	49,1	29,2
18	9,45	54,9	14,94	25,2	46,7	31,0
19	10,12	49,7	15,20	25,0	43,8	29,7
20	10,94	45,2	13,60	24,9	41,6	29,0

2.2. Mô phỏng mô hình thí nghiệm, so sánh kết quả mô phỏng và thí nghiệm

Đối với học phần truyền nhiệt, sinh viên cần hiểu rõ về phương pháp đồng dạng. Việc xây dựng các phương trình tiêu chuẩn chỉ có thể thực hiện dựa trên hàng loạt thí nghiệm với độ chính xác nhất định. Đặc biệt khi xây dựng phương trình tiêu chuẩn của trường hợp chất lưu chuyển động trong ống cần đo được nhiệt độ của vách, tuy nhiên đối với thiết bị thí nghiệm hiện tại, việc này không thể thực hiện với độ chính xác cao được. Vấn đề này có thể giải quyết bằng cách tính toán, sử dụng phương trình tiêu chuẩn của chất lưu chuyển động trong hình vành khăn; Tuy nhiên, khi đó phụ thuộc khá nhiều vào độ chính xác của phương trình đó [6]. Nhiệt độ của vách cũng có thể xác định bằng cách sử dụng phương pháp mô phỏng các thí nghiệm, vừa góp phần tăng kỹ năng áp dụng phương pháp số vào thực tế, vừa tăng kỹ năng xử lý kết quả thí nghiệm, hiểu sâu hơn về lý thuyết truyền nhiệt. Chương trình đào tạo ngành Kỹ thuật Nhiệt trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng đã đưa các học phần hướng dẫn sinh viên áp dụng phần mềm mô phỏng để giải bài toán kỹ thuật vào học tập từ khóa học 2018.

Nhóm tác giả tiến hành thực hiện mô phỏng mô hình thí nghiệm nói trên bằng phần mềm ANSYS Fluent phiên bản dành cho sinh viên với khả năng mô hình hóa các đặc tính cơ học chất lưu và trao đổi nhiệt, với sự phụ thuộc các thông số vật lý của chất lưu và vách theo nhiệt độ. Do số nút bị giới hạn của phiên bản học tập nên mô hình chỉ gồm

ống bên trong đường kính $d_2/d_1 = 19/17$ mm, 1 mặt trụ đoạn nhiệt bao bên ngoài đường kính $D = 30$ mm, dài 2 m. Mô hình được thiết kế bằng ANSYS Design Modeler, sau đó dùng ANSYS Meshing để chia lưới. Sử dụng phương thức (Method) chia cạnh (Edge sizing) theo số phần (Number of Divisions): Chu vi ống trong chia 24 phần; ống ngoài chia 30 phần. Để xử lý lớp biên của quá trình trao đổi nhiệt giữa 2 môi chất, tác giả sử dụng phương thức Inflation đối với 2 bề mặt trong và ngoài của ống trong, mỗi bên gồm 3 lớp (layer) với tỷ lệ tăng trưởng (Growth Rate) là 1.2. Các vật thể (Body) bao gồm chất lưu nóng, lạnh, ống trong được chia tự động với kích thước phần tử (Element Size) lựa chọn là 40 mm; Khi đó toàn bộ mô hình bao gồm 494829 phần tử với Aspect Ratio từ 1,18 đến 9,22. Việc chia lưới được tiến hành sao cho đảm bảo yêu cầu mô hình không vượt quá 512000 phần tử, đáp ứng giới hạn của phiên bản ANSYS Fluent giành cho sinh viên.



Hình 3. Chia lưới trong tiết diện 1 đầu của thiết bị

Lựa chọn giải bài toán với mô hình chảy rối k- ϵ , phương trình năng lượng, thông số vật lý của chất lưu và của ống phụ thuộc theo nhiệt độ, sai số tất cả các phương trình 10^{-6} . Biên của chất lưu ở đầu vào là dạng dòng chảy khối lượng (Mass Flow Rate) với các khai báo về lưu lượng, nhiệt độ, phương dòng chảy. Đầu ra dạng áp suất (Pressure outlet) với các thông số mặc định không ảnh hưởng đến kết quả trao đổi nhiệt trong ống. Lớp ống bọc ngoài cùng được cài đặt ở chế độ biên đoạn nhiệt với mật độ dòng nhiệt (Heat flux) bằng 0. Thông số đầu vào các bài mô phỏng trùng khớp hoàn toàn với các bài thí nghiệm trong Bảng 1. Kết quả mô phỏng thu được là nhiệt độ đầu ra của các dòng môi chất, nhiệt độ trung bình của vách trong của ống trong t_w (Bảng 2). Các giá trị nhiệt độ này đều được xác định bằng hàm trung bình theo diện tích của nhiệt độ tại các mặt tương ứng (areaAve (Temperature) @hot_outlet; areaAve (Temperature) @ cold_outlet; areaAve (Temperature) @ wall hot_fluid inner_pipe). Độ chính xác của kết quả mô phỏng được thể hiện trong Bảng 2 qua việc so sánh nhiệt độ đầu ra chất lưu nóng và lạnh của mô phỏng và thực nghiệm. Với mức độ sai số nói trên khoảng 4%, các thông số vật lý dùng để tính toán các tiêu chuẩn trong phương trình tỏa nhiệt liên quan đến nhiệt độ trung bình của chất lưu cũng nhỏ. Điều này cho thấy, có độ tin cậy nhất định giữa kết quả thí nghiệm và mô phỏng.

Bảng 2. Kết quả mô phỏng, sai số giữa mô phỏng và thí nghiệm

Bài	Mô phỏng			Sai số Mô phỏng / Thí nghiệm	
	t_1'' , °C	t_2'' , °C	t_w , °C	$\epsilon_{t1''}$, %	$\epsilon_{t2''}$, %
1	38,2	27,4	33,4	3,56	0,11
2	38,9	23,2	31,2	1,09	2,47
3	44,1	28,7	37,2	3,65	1,38
4	45,5	28,4	36,9	3,19	1,83
5	50,9	34,3	43,3	2,83	2,66
6	53,4	36,1	47,1	3,75	1,95
7	47,0	28,7	38,6	1,73	0,38
8	42,8	23,8	34,4	1,77	1,08
9	40,1	23,4	32,7	3,51	2,45
10	37,0	22,8	30,8	3,19	1,85
11	53,7	35,8	47,1	2,72	2,35
12	51,0	35,1	45,2	1,37	1,29
13	46,5	29,9	40,6	0,49	1,73
14	42,7	28,5	37,2	2,99	0,6
15	39,5	28,2	35,3	1,08	0,71
16	53,2	31,3	45,5	2,53	2,34
17	49,2	29,9	41,7	0,99	0,7
18	47,0	30,1	41,2	1,01	2,53
19	43,5	29,1	38,5	3,4	1,32
20	40,6	28,6	36,7	0,29	1,75

2.3. Xây dựng phương trình tiêu chuẩn từ kết quả mô phỏng

Phương trình tiêu chuẩn của chất lưu chuyển động cưỡng bức trong ống được biểu diễn dưới dạng:

$$Nu_f = C Re_f^m Pr_f^p \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (1)$$

Để xây dựng được phương trình này, ta cần có tập hợp các tiêu chuẩn Nu_f , Re_f , Pr_f và Pr_w .

Vì số liệu đầu vào của bài toán mô phỏng và thí nghiệm là như nhau nên kết hợp giữa Bảng 1 và Bảng 2, ta sẽ có lưu lượng, nhiệt độ trung bình của môi chất nóng t_{f1} và nhiệt độ của vách về phía môi chất chảy trong ống t_w , do đó ta sẽ có các tiêu chuẩn Re_f , Pr_f và Pr_w . Từ các giá trị nhiệt độ đầu vào t_1' và đầu ra t_1'' của nước nóng, ta tính được biến thiên enthalpy của nước nóng, cũng là nhiệt lượng tỏa từ nước nóng vào vách theo công thức Newton, qua đó xác định hệ số tỏa nhiệt α .

$$Q = G_1 C_{p1} (t_1' - t_1'') = \pi d_1 \alpha (t_{f1} - t_w) \quad (2)$$

Tiêu chuẩn Nu_f được xác định theo công thức

$$Nu_f = \frac{\alpha d_1}{\lambda_f} \quad (3)$$

Như vậy ta có tập hợp các tiêu chuẩn Re_f , Pr_f , Pr_w và Nu_f như Bảng 3. Trong 20 bài thí nghiệm, mỗi nhóm 5 bài thí nghiệm có giá trị Re_f giao động trong phạm vi nhỏ hơn 1,5%, mỗi nhóm có giá trị trung bình $Re_{fi} = idem$ (Bảng 3).

Hệ số C và các số mũ m, p được xác định bằng cách lấy

logarit 2 vế của (1). Cụ thể

$$\ln \left[Nu_f \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{-0,25} \right] = p \ln(Pr_f) + \ln(CRe_f^m) \quad (4)$$

Đặt

$$Nu^* \triangleq Nu_f \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{-0,25} \quad (5)$$

Biểu thức (4) trở thành:

$$\ln(Nu^*) = p \ln(Pr_f) + \ln(CRe_f^m) \quad (6)$$

Bảng 3. Các tiêu chuẩn đồng dạng

Bài	Pr _f	Pr _w	Re _f	Re _{fi}	Sai số ε _{Re}	Nu _f
1	4,20	5,01	11154	Re _{f1} = 11280	1,12	81,92
2	3,97	5,26	11286		0,05	79,34
3	3,60	4,61	11379		0,87	77,28
4	3,40	4,64	11287		0,06	73,77
5	3,10	4,06	11296		0,14	71,87
6	3,04	3,77	14337	Re _{f2} = 14515	1,23	88,65
7	3,35	4,47	14527		0,08	90,92
8	3,64	4,90	14584		0,47	94,60
9	3,91	5,09	14518		0,02	97,67
10	4,25	5,32	14611		0,66	102,33
11	3,03	3,76	17813	Re _{f3} = 17857	0,25	105,46
12	3,23	3,91	17941		0,47	109,43
13	3,51	4,29	17802		0,30	112,69
14	3,82	4,61	18033		0,99	117,58
15	4,16	4,80	17695		0,90	120,88
16	3,04	3,88	21597	Re _{f4} = 21645	0,22	121,70
17	3,28	4,19	21569		0,35	125,26
18	3,51	4,23	21616		0,13	130,99
19	3,80	4,47	21564		0,37	135,92
20	4,09	4,65	21879		1,08	142,65

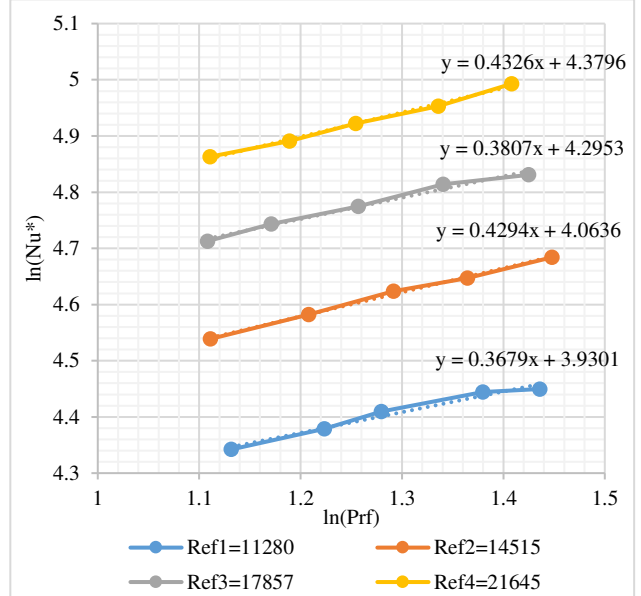
Trong hệ tọa độ $\ln(Nu^*) - \ln(Pr_f)$ quan hệ (6) có dạng một đường thẳng, được xác định bằng công cụ Trendline của Excel. Trong đó, p_i là hệ số góc của đường thẳng đối với mỗi giá trị Re_{fi} (Hình 4); Số mũ p trong phương trình tiêu chuẩn xác định theo phép tính trung bình cộng bằng biểu thức:

$$p = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 p_i = 0,403 \quad (7)$$

Bảng 4. Để xây dựng phương trình tiêu chuẩn

Bài	Re _{fi}	ln(Pr _f)	ln(Nu*)	ln(Re _f)	ln(Nu**)
1	Re _{f1} = 11280	1,44	4,45	9,32	3,80
2		1,38	4,44	9,33	3,78
3		1,28	4,41	9,34	3,79
4		1,22	4,38	9,33	3,76
5		1,13	4,34	9,33	3,78
6	Re _{f2} = 14515	1,11	4,54	9,57	4,00
7		1,21	4,58	9,58	3,98
8		1,29	4,62	9,59	3,98
9		1,36	4,65	9,58	3,99

10	Re _{f3} = 17857	1,45	4,68	9,59	4,01
11		1,11	4,71	9,79	4,18
12		1,17	4,74	9,79	4,19
13		1,26	4,77	9,79	4,19
14		1,34	4,81	9,80	4,20
15		1,42	4,83	9,78	4,20
16	Re _{f4} = 21645	1,11	4,86	9,98	4,32
17		1,19	4,89	9,98	4,31
18		1,25	4,92	9,98	4,34
19		1,34	4,95	9,98	4,35
20		1,41	4,99	9,99	4,37



Hình 4. Đồ thị dùng để xác định số mũ p của tiêu chuẩn Pr_f

Với số mũ p của tiêu chuẩn Pr đã được xác định, biểu thức (7) có thể viết dưới dạng:

$$\ln \left(\frac{Nu^*}{Pr_f^p} \right) = m \ln(Re_f) + \ln C \quad (8)$$

Đặt

$$Nu^{**} \triangleq \frac{Nu^*}{Pr_f^p} \quad (9)$$

Khi đó công thức (8) sẽ trở thành:

$$\ln(Nu^{**}) = m \ln(Re_f) + \ln C \quad (10)$$

Xây dựng đồ thị $\ln(Nu^{**}) = f[\ln(Re_f)]$, dùng công cụ Trendline của Excel, xác định được hàm số bậc nhất đi qua các giá trị mô phỏng với sai số bình phương nhỏ nhất (Hình 5):

$$y = 0,8646x - 4,2852 \quad (11)$$

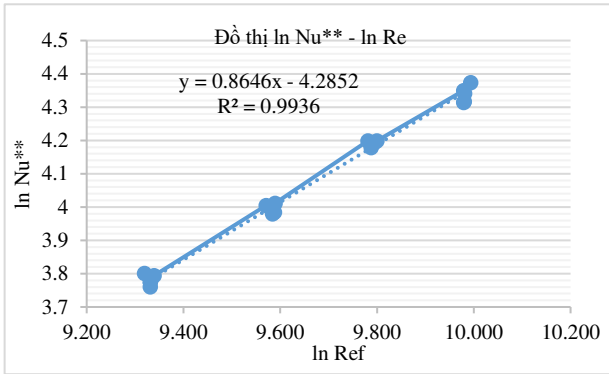
Trong đó, y tương ứng với tung độ $\ln(Nu^{**})$; x tương ứng với hoành độ $\ln(Re_f)$. Đối chiếu với (10) ta xác định được $m=0,865$ là hệ số góc của đường thẳng (11), còn hệ số C xác định theo tung độ q là giao của đường thẳng (11) với trục tung bằng công thức

$$C = e^q = e^{-4,285} = 0,0138 \quad (12)$$

Như vậy, phương trình tiêu chuẩn tỏa nhiệt của chất lưu

chảy rối trong ống trong phạm vi $Re_f \in [11200; 21800]$, $Pr_f \in [3,0; 4,2]$ được xây dựng từ kết quả mô phỏng là:

$$Nu_f = 0,0138 Re_f^{0,865} Pr_f^{0,403} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (13)$$



Hình 5. Đồ thị dùng để xác định số mũ m của tiêu chuẩn Re_f và hệ số C

2.4. Đánh giá kết quả xây dựng phương trình tiêu chuẩn từ mô phỏng và các tài liệu

Để tính hệ số tỏa nhiệt ở chế độ môi chất chảy rối trong ống, các tài liệu dạy kỹ thuật nhiệt trong nước cũng như ngoài nước thường đưa ra phương trình tiêu chuẩn Colburn [1]

$$Nu_f = 0,023 Re_f^{0,8} Pr_f^{1/3} \quad (14)$$

hoặc Mikheev [2, 3, 4]

$$Nu_f = 0,021 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (15)$$

Đây là những công thức đơn giản, thích hợp để tính nhanh, tính gần đúng các bài toán truyền nhiệt. Hai công thức này khá tương đồng với nhau, sai lệch trong phạm vi 5%. Cùng với các công thức trên, công thức Petukhov phức tạp hơn cũng được đề cập trong 1 số tài liệu [1, 4, 5, 7]

$$Nu_f = \frac{\frac{\xi}{8} Re_f Pr_f \psi}{1 + \frac{900}{Re_f} + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8} \left(Pr_f^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}} \quad (16)$$

Tài liệu [1] cập nhật năm 2020 đánh giá phương trình tiêu chuẩn của Gnielinski dưới đây là phương trình hiện đại, áp dụng cho 1 khoảng khá rộng tiêu chuẩn Re và Pr $2300 \leq Re_f \leq 5 \cdot 10^6$; $0,6 \leq Pr_f \leq 10^5$:

$$Nu_f = \frac{\frac{\xi}{8} (Re_f - 1000) Pr_f \psi}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8} \left(Pr_f^{\frac{2}{3}} - 1 \right)}} \quad (17)$$

Trong công thức (16) và (17), ψ là hệ số xác định ảnh hưởng chiều dòng nhiệt; ξ là hệ số trở kháng ma sát tính theo công thức

$$\xi = (1,82 \lg Re_f - 1,64)^{-2} \quad (18)$$

Khi bỏ qua chiều dòng nhiệt, lập Bảng 5 so sánh giá trị của tiêu chuẩn Nu_f^{CFD} trong phạm vi đã tiến hành xây dựng đồ thị $Re_f \in [11200; 21800]$, $Pr_f \in [3,0; 4,2]$ với các giá trị Nu_f^M theo công thức Mikheev (15); Nu_f^P theo công thức Petukhov (16); Nu_f^G theo công thức (17).

Bảng 5. So sánh tiêu chuẩn Nu theo công thức đã xây dựng với các tài liệu chuyên ngành

Re_f	Pr_f	Nu_f^{CFD}	Nu_f^M	Nu_f^P	Nu_f^G	$\varepsilon_M, \%$	$\varepsilon_P, \%$	$\varepsilon_G, \%$
11200	3,0	68,3	58,4	66,4	63,1	16,8	2,8	8,2
11200	3,6	73,5	63,2	71,8	68,0	16,3	2,4	8,2
11200	4,2	78,3	67,5	76,7	72,3	15,9	2,1	8,3
16000	3,0	92,9	77,7	89,1	86,2	19,5	4,3	7,9
16000	3,6	100,1	84,1	96,5	93,0	19,0	3,7	7,6
16000	4,2	106,6	89,8	103,1	99,2	18,6	3,3	7,5
21800	3,0	121,4	99,6	115,0	112,3	21,9	5,6	8,2
21800	3,6	130,8	107,7	124,7	121,5	21,4	4,8	7,6
21800	4,2	139,2	115,1	133,4	127,1	21,0	4,4	7,4

Bảng 5 cho thấy, trong phạm vi tiến hành mô phỏng, công thức Nu_f^{CFD} sai lệch so với công thức Nu_f^M theo Mikheev xuống dưới 22%; Chênh lệch so với công thức Nu_f^P theo Petukhov xuống dưới 6%, chênh lệch so với công thức Nu_f^G theo Gnielinski xuống dưới 9%. Điều này cho thấy, việc sử dụng dữ liệu mô phỏng bằng CFD để xây dựng phương trình tiêu chuẩn cho kết quả tương đối chính xác, có thể dùng để nghiên cứu các vấn đề khi gặp khó khăn về thí nghiệm

3. Kết luận

Tác giả đã tiến hành mô phỏng mô hình ống lồng ống về trao đổi nhiệt giữa 2 môi chất, kiểm tra các kết quả cơ bản của mô hình mô phỏng bằng thiết bị thí nghiệm. Số liệu mô phỏng được xử lý để xây dựng phương trình tiêu chuẩn của môi chất chảy trong ống trong phạm vi $Re_f \in [11200; 21800]$, $Pr_f \in [3,0; 4,2]$. So sánh với các công thức thường dùng hiện tại trong ngành Kỹ thuật Nhiệt cho thấy sai số có thể chấp nhận được, việc sử dụng dữ liệu mô phỏng bằng CFD để xây dựng phương trình tiêu chuẩn cho kết quả tương đối chính xác, có thể dùng để nghiên cứu các vấn đề khi gặp khó khăn về thí nghiệm.

Kết quả nghiên cứu có thể đưa vào giảng dạy trong học phần Truyền nhiệt, Thiết bị trao đổi nhiệt, Khí động lực học ứng dụng (CFD) của ngành Kỹ thuật Nhiệt, cũng như trong học phần Kỹ thuật Nhiệt của các ngành đào tạo kỹ sư trong toàn trường Đại học Bách khoa – Đại học Đà Nẵng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J. H. Lienhard IV, J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 5th ed. Cambridge, Massachusetts: Phlogiston Press, 2020.
- [2] Ерофеев В.Л., Семенов П.Д., Пряхин А.С., *Теплотехника*, Москва, Академкнига, 2008.
- [3] Hoàng Ngọc Đồng, Thái Ngọc Sơn, *Kỹ thuật nhiệt*, NXB Xây dựng, 2015.
- [4] Б. М. Хрусталева [и др.], *Тепло- и массообмен*, Ч. 1. Минск: БНТУ, 2007.
- [5] Adrian Bejan, Allan D. Kraus, *Heat transfer handbook*, John Wiley & Sons, 2003
- [6] Thái Ngọc Sơn, Bùi Thị Hương Lan, “Thiết kế chế tạo thiết bị thí nghiệm xác định các hệ số trong phương trình tiêu chuẩn tỏa nhiệt cưỡng bức trong ống”, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, 11(108), 2016, 5 trang (37-41).
- [7] Đặng Quốc Phú, Trần Thế Sơn, Trần Văn Phú, *Truyền nhiệt*, NXB Giáo dục, 2007.