

KHẢO SÁT THỰC NGHIỆM MỘT SỐ YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG TỚI SỰ TRUYỀN NHIỆT CỦA DÒNG PHUN TỰ DO

EXPERIMENTAL SURVEY OF SOME FACTORS AFFECTING TO THE HEAT TRANSMISSION
OF FREE - IMPINGING JET

Nguyễn Trọng Dũng¹,
Nguyễn Văn Thành^{2,*}, Nguyễn Anh Tuấn¹

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.170>

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu thực nghiệm về sự truyền nhiệt của một cấu hình dòng phun tự do lên bề mặt tấm kim loại phẳng được nung nóng. Một dòng phun chất lỏng là nước được thực hiện theo phương ngang thông qua một ống mica có đường kính trong $D = 10\text{mm}$ lên bề mặt tấm kim loại bằng vật liệu đồng đặt theo phương thẳng đứng trong môi trường không khí. Trường nhiệt độ tại bề mặt tấm kim loại được khảo sát thông qua chụp ảnh camera nhiệt hồng ngoại. Từ đó kết quả được sử dụng để tính toán và vẽ đồ thị quan hệ số Nusselt theo tỷ số tọa độ hướng kính với đường kính ống phun (r/D). Các thảo luận về ảnh hưởng của một số thông số lên sự truyền nhiệt của cấu hình dòng phun này được trao đổi.

Từ khóa: Truyền nhiệt, dòng phun tia tự do.

ABSTRACT

This paper experimentally investigates the heat transfer of a free-impinging jet to a heated flat metal plate surface. A water jet stream is carried out horizontally through a mica tube with an inner diameter of $D = 10\text{mm}$ onto the surface of a copper metal sheet placed vertically in the atmosphere. The temperature field at the metal plate surface is investigated through infrared thermal camera imaging. From there, the results are used to calculate and plot the Nusselt coefficient relationship according to the ratio of the radial coordinate to the nozzle diameter (r/D). Discussions of the influence of several parameters on the heat transfer of this jet stream configuration are discussed.

Keywords: Heat transfer, free impinging jet.

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyenvanthanh.dhcn@gmail.com

Ngày nhận bài: 20/02/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 28/6/2023

Ngày chấp nhận đăng: 15/10/2023

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dòng phun (impinging jet) được sử dụng rộng rãi để làm mát công nghiệp trong các ứng dụng như thiết bị điện, cánh của tuabin khí, thép nóng, ủ kim loại, tôi luyện thủy tinh, làm khô giấy và hàng dệt may,... vì nó có hiệu suất cao về tốc độ truyền nhiệt và dễ thực hiện trong nhiều hệ

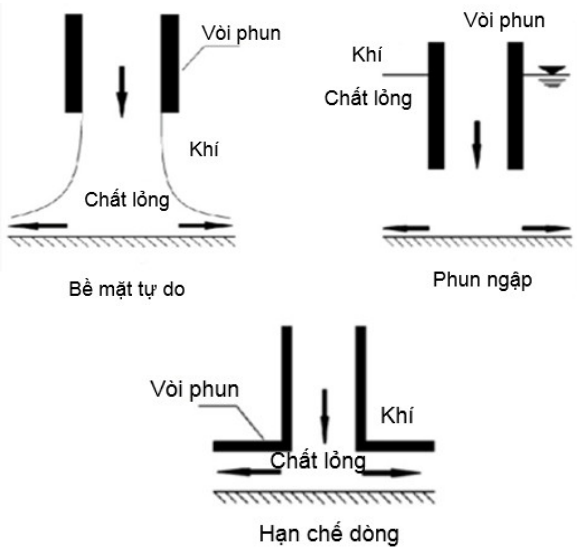
thống khác nhau. Ví dụ như sự phát triển gần đây của chip điện tử (VLSI) đã nảy sinh nhu cầu làm mát kỹ thuật có khả năng hấp thụ dòng nhiệt cao tới 200 W/cm^2 . Việc làm mát các chip VLSI là một công việc khó khăn nhưng cần thiết để đảm bảo cho độ tin cậy và hiệu quả hoạt động của nó. Nhiệt độ bề mặt chip thường được duy trì trong khoảng từ 50°C đến 100°C để tránh suy giảm hiệu năng hoặc logic của hệ thống. Sự nghiêm ngặt của các yêu cầu làm mát đã loại trừ trường hợp làm mát bằng không khí đối lưu cưỡng bức thông thường mà ở đây làm mát bắt buộc sử dụng chất làm mát dạng lỏng [2].

Đặc điểm của dòng phun đã và đang được xem xét trong nhiều nghiên cứu và một số tài liệu. Dòng phun tia được sử dụng ngay ở nơi mong muốn có tốc độ truyền nhiệt cao. Để cải thiện thiết kế của các hệ thống này, nhiều nghiên cứu về các đặc tính, các thông số ảnh hưởng đến tốc độ truyền nhiệt đã được tiến hành. Tốc độ truyền nhiệt dòng phun tia khi nó tác động lên một bề mặt là một hàm phức tạp của nhiều tham số: số Nusselt (Nu), số Reynolds (Re), số Prandtl (Pr), khoảng cách giữa vòi phun và tấm,... Ngoài ra, các ảnh hưởng của hình dạng vòi phun, giới hạn dòng chảy, hệ số phục hồi và tiêu tán nhiệt độ,... đều đã được chứng minh là có ý nghĩa [2, 3].

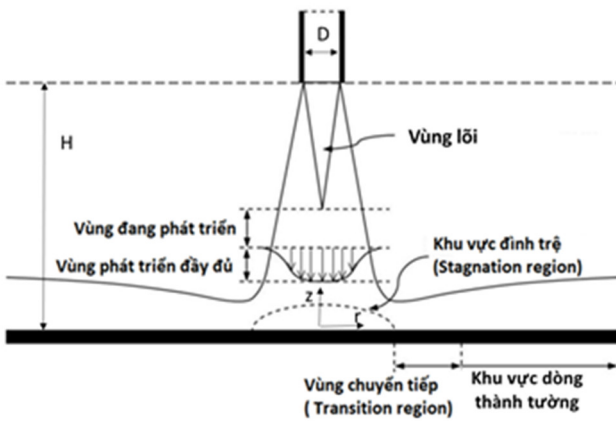
Các cấu hình chất lỏng phun lên bề mặt có thể chia ra ba loại: dòng phun không ngập hay dòng phun tự do - free impinging jet (chất lỏng được phun vào môi trường không khí hay bề mặt tấm đặt trong không khí), dòng phun ngập - submerged impinging jet (chất lỏng được phun vào môi trường chất lỏng cùng loại hay tấm đặt trong môi trường chất lỏng đó) và dòng phun bị giới hạn - confined impinging jet (vùng phun có bề mặt giới hạn), được minh họa trong hình 1. Cấu hình dòng phun không ngập khá phổ biến vì có nhiều ứng dụng về làm mát trong các hệ thống công nghiệp, ví dụ làm mát thép cán, làm mát cánh tuabin khí,...

Hầu hết các nghiên cứu về dòng phun lên bề mặt là các dòng phun tác động vuông góc với bề mặt đó (90°), chỉ một số ít là các dòng phun xiên (nghiêng). Đối với cấu hình dòng phun tự do, sau khi ra khỏi vòi phun, chất lỏng đi vào vùng pha khí, thường là không khí trước khi nó va chạm vào bề

mặt tấm. Dòng phun này bao gồm ba vùng chính: vùng dòng tự do (vùng lõi), vùng dòng chất lỏng đình trệ và vùng dòng chất lỏng chảy trên bề mặt (dòng thành tường - hoặc có thể gọi là vùng dòng chảy bao trên bề mặt), hình 2.



Hình 1. Các cấu hình dòng phun vuông góc bề mặt phẳng [5]



Hình 2. Cấu hình dòng phun vuông góc bề mặt phẳng [1]

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ khảo sát sự truyền nhiệt của dòng phun không ngập với một tấm kim loại phẳng được gia nhiệt bằng phương pháp chụp ảnh nhiệt độ bề mặt tấm. Sử dụng máy ảnh nhiệt hồng ngoại để chụp sẽ cho hình ảnh trường nhiệt độ của bề mặt được phun. Từ đó sẽ thảo luận về các thông số ảnh hưởng đến khả năng truyền nhiệt của cấu hình dòng phun vuông góc lên bề mặt nhiệt không ngập trong chất lỏng.

2. CÔNG CỤ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết tính toán

$$h = \frac{q_{joule} - q_s}{T_w - T_j} \quad [4] \quad (1)$$

Với:

h - hệ số truyền nhiệt đối lưu (W/m².K);

q_{joule} - tổng thông lượng nhiệt cấp tới tấm từ nguồn (W/m²);

q_s - thông lượng nhiệt bị tổn thất qua đối lưu tấm với không khí (W/m²);

T_w - nhiệt độ điểm cục bộ trên tường (K);

T_j - nhiệt độ dòng phun (K).

$$q_{joule} = \frac{P}{A} \quad [4] \quad (2)$$

Với: P - công suất các thanh trở nhiệt (W);

A - diện tích xung quanh tấm đồng (m²).

$$q_s = h_{nb}(T_b - T_a) \quad [4] \quad (3)$$

Với:

h_{nb} - hệ số truyền nhiệt đối lưu tự nhiên với không khí (W/m².K);

T_b - nhiệt độ trung bình của tường (K);

T_a - nhiệt độ môi trường không khí xung quanh tường (K).

$$Re = \frac{V.D}{\nu} \quad [4] \quad (4)$$

Với: Re - số Reynolds của dòng phun trong ống;

V - vận tốc trung bình dòng trong ống phun (m/s);

D - đường kính trong ống phun (m);

ν - độ nhớt động học của nước trong ống (m²/s).

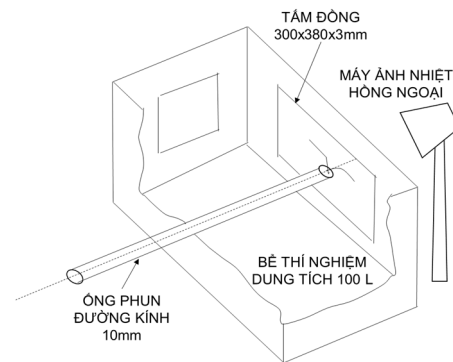
$$Nu = \frac{h.D}{\lambda} \quad [4] \quad (5)$$

Với: Nu - số Nusselt;

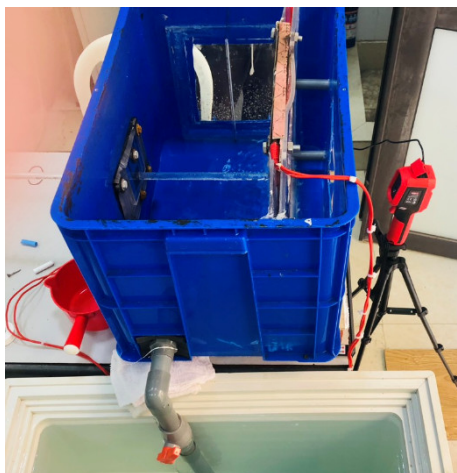
λ - hệ số dẫn nhiệt của chất lỏng (W/m.K).

2.2. Thiết lập thí nghiệm

Hình 3 mô tả hệ thống thí nghiệm khảo sát nhiệt độ tấm kim loại thông qua chụp ảnh nhiệt bề mặt tấm này khi có dòng nước phun vuông góc lên bề mặt phẳng của tấm. Nước được phun qua một ống tròn có đường kính trong D = 10mm theo phương ngang và vuông góc với bề mặt của tấm phẳng vật liệu kim loại đồng trong khi tấm này được gia nhiệt để tạo nhiệt độ mong muốn ban đầu. Hệ thống phun trên được đặt trong một bể thí nghiệm hình chữ nhật có dung tích 100 lít bằng nhựa và không chứa nước. Ống phun được lắp vào một mạch tuần hoàn dòng nước, bao gồm một bể chứa và làm lạnh nước, một máy bơm ly tâm cung cấp năng lượng cho dòng chảy và một đồng hồ đo lưu lượng điện từ (FD-M5A, Keyence, Nhật Bản). Nhiệt độ nước trong ống được duy trì ở nhiệt độ 20 ± 2°C.



(a) Sơ đồ hệ thống thí nghiệm

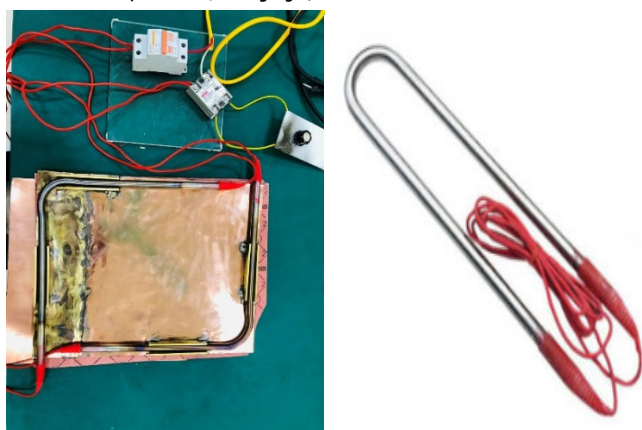


(b) Ảnh thí nghiệm thực tế

Hình 3. Hình ảnh hệ thống thí nghiệm



Hình 4. Máy ảnh nhiệt hồng ngoại Uti1725



Hình 5. Thanh trở nhiệt 220VAC- 2kW

Tấm đồng kim loại nguyên chất (99,9%) có kích thước 300x380x3mm, độ dẫn nhiệt là 385W/m.°K, được gia nhiệt ở nhiệt độ trước khi phun khoảng 80°C. Để nung nóng tấm kim loại đồng, nhóm tác giả sử dụng 02 thanh gia nhiệt hình chữ L ép vào bốn cạnh bao xung quanh tấm. Vật liệu làm thanh gia nhiệt là thép không gỉ SUS304. Thanh gia nhiệt có công suất 2kW/thanh, với bộ kiểm soát nhiệt độ

bằng cách điều chỉnh hiệu điện thế của nguồn cung cấp cho thanh gia nhiệt.

Để khảo sát nhiệt độ tấm kim loại, nhóm tác giả sử dụng một máy ảnh chụp nhiệt hồng ngoại model UTi1725 (hình 4).

2.3. Mô tả quá trình thí nghiệm

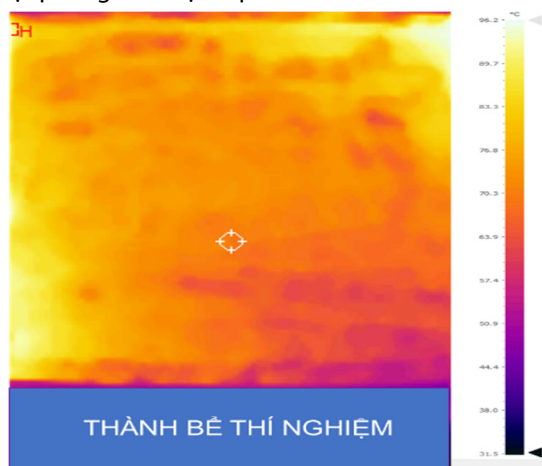
Ống tròn thẳng, đường kính trong $D=10\text{mm}$ được bố trí theo phương ngang và vuông góc với bề mặt tấm kim loại đồng đặt trong bể thí nghiệm (65cm x 44cm x 38cm, 100 lít) có trang bị cửa sổ kính, bể chỉ chứa không khí. Khoảng cách giữa miệng ống phun và bề mặt tấm được thiết lập lần lượt theo tỷ số là $H/D = 1, 2$ và 4 (trong đó, H là khoảng cách giữa miệng ra ống phun và bề mặt tấm gia nhiệt, D là đường kính trong ống phun, $D = 10\text{mm}$). Dung dịch được sử dụng để làm mát là nước với nhiệt độ được duy trì ở $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Khi tấm kim loại đồng được gia nhiệt đạt nhiệt độ $80 \pm 2^\circ\text{C}$, bơm sẽ được khởi động để bơm nước trong bể ổn định nhiệt độ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ đưa đến ống phun để phun lên bề mặt tấm kim loại đồng này. Lưu lượng dòng phun sẽ được thay đổi thông qua một biến tần để điều chỉnh tốc độ hay lưu lượng của bơm. Lưu lượng được ghi chép lại để tính toán số Reynolds của dòng chảy. Camera nhiệt sẽ ghi lại hình ảnh nhiệt trên tấm đồng (qua cửa sổ kính), bấm chụp liên tục trong khoảng 20s đầu sau khi phun. Nước phun ra từ ống tạo thành dòng chảy bao trên bề mặt tấm với một độ dài nhất định sau đó rơi xuống đáy bể và chảy qua lỗ thoát ra ngoài để đảm bảo dòng phun là không ngập.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

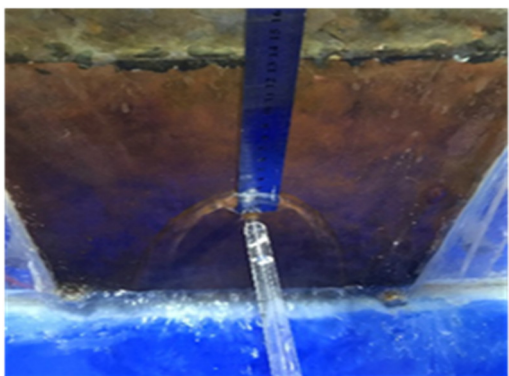
3.1. Hình ảnh phân bố nhiệt trên bề mặt tấm kim loại

Hình 6 thể hiện trường nhiệt độ trên tấm đồng khi chưa thực hiện phun. Nhiệt độ của bề mặt tấm tương đối đồng đều, khoảng 80°C.

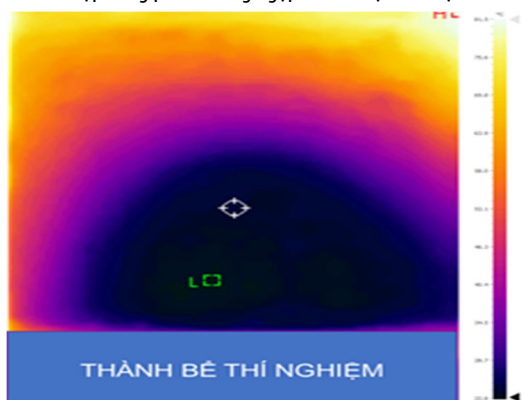
Thiết lập thí nghiệm không cho phép chụp thẳng góc hình ảnh vành chất lỏng trên bề mặt phun, nên chúng được chụp theo phương nghiêng một góc khoảng 30 độ. Đối với việc chụp ảnh trường nhiệt độ tấm thì được chụp thẳng góc với mặt phẳng kim loại từ phía sau tấm.



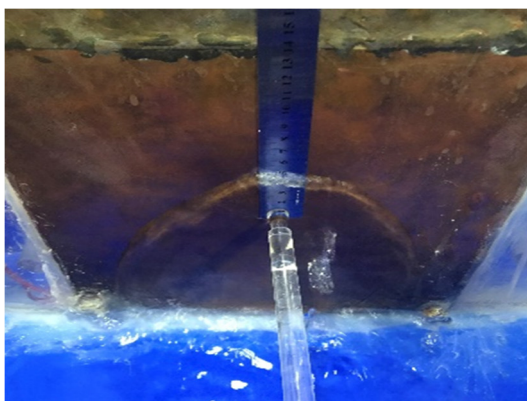
Hình 6. Hình ảnh trường nhiệt độ khi chưa phun, nhiệt độ bề mặt kim loại $80 \pm 2^\circ\text{C}$



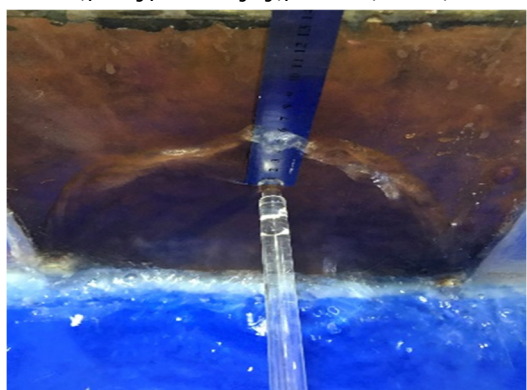
(a) Hình ảnh chụp dòng phun không ngập lên bề mặt kim loại với $Re = 9000$



(b) Hình ảnh chụp nhiệt bề mặt kim loại khi phun với $Re = 9000$



(c) Hình ảnh chụp dòng phun không ngập lên bề mặt kim loại với $Re = 12000$

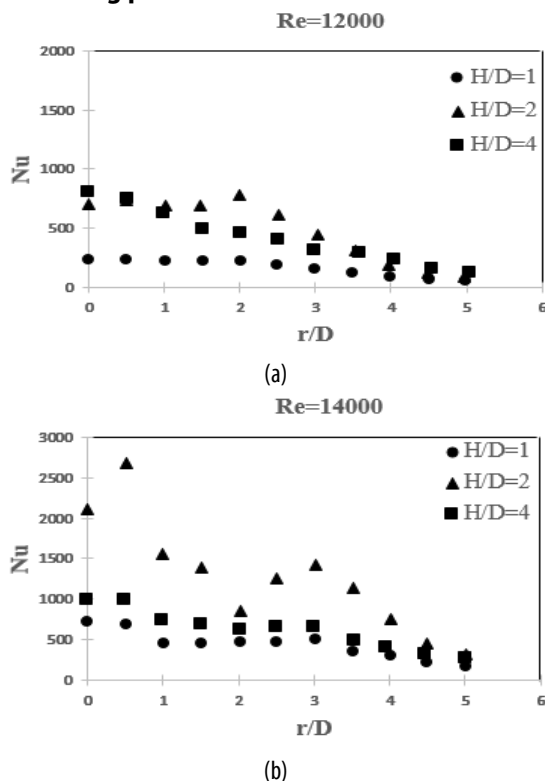


(d) Hình ảnh chụp dòng phun không ngập lên bề mặt kim loại với $Re = 14000$

Hình 7. Một số hình ảnh dòng phun trên bề mặt tấm kim loại và ảnh chụp nhiệt độ tấm

Để khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến sự thay đổi nhiệt độ này, nhóm tác giả tiến hành vẽ đồ thị quan hệ giữa số Nusselt (Nu) theo tỷ số r/D với r là tọa độ hướng kính của các điểm xét trên bề mặt tấm kim loại tính từ tâm phun ra ngoài theo dòng chảy bao và D là đường kính trong ống phun, với sự ảnh hưởng của các thông số như số Reynolds (Re), khoảng cách phun H (trên đồ thị thể hiện tỷ số H/D).

3.2. Ảnh hưởng của khoảng cách phun đến sự truyền nhiệt của dòng phun



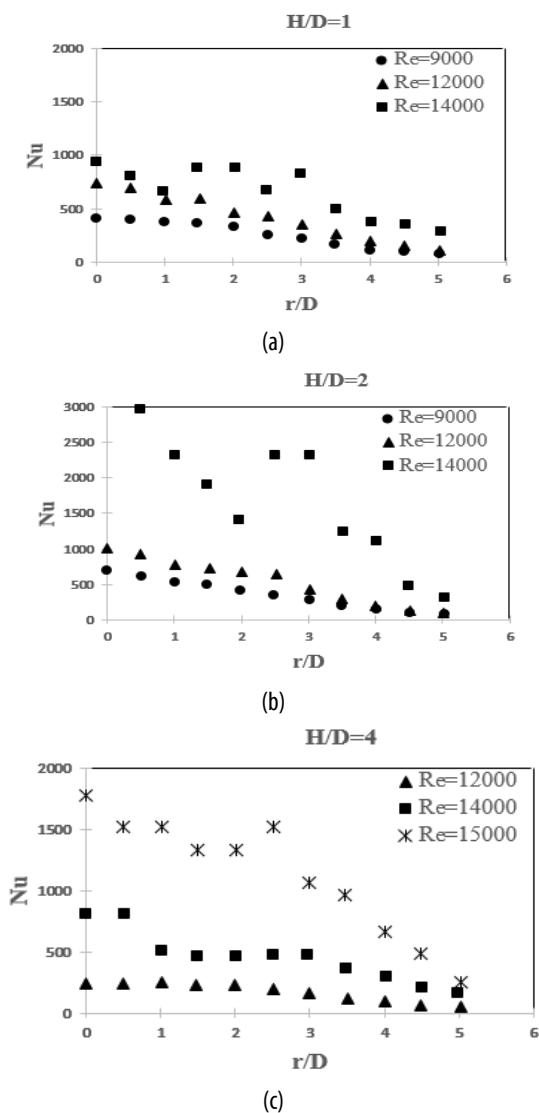
Hình 8. Sự thay đổi số Nu theo tỷ số r/D với các khoảng cách phun H/D khác nhau, (a) với số $Re = 12000$ (b) với số $Re = 14000$

Hình 8 là các đồ thị mô tả mối quan hệ giữa sự thay đổi số Nu trên bề mặt tấm kim loại với các khoảng cách phun khác nhau. Hình 8a cho số $Re = 12000$ và hình 8b cho số $Re = 14000$. Ba khoảng cách phun $H/D = 1, 2$ và 4 được khảo sát. Tất cả các trường hợp đều cho thấy có sự giảm nhiệt độ lớn nhất tại tâm phun, sau đó tăng nhiệt dần ra ngoài theo hướng kính (thể hiện bằng sự giảm số Nu từ tâm phun ra ngoài). Với số $Re = 12000$, trường hợp $H/D = 1$ cho thấy số Nu là nhỏ hơn cả so với hai trường hợp còn lại là $H/D = 2$ và 4 , và trường hợp $H/D = 2$ có số Nu cao hơn tại một số điểm từ $r/D = 1$ đến $r/D = 3,5$ so với trường hợp $H/D = 4$. Như vậy với trường hợp $Re = 12000$ thì các khoảng cách phun $H/D = 2$ và 4 của cấu hình dòng phun lên bề mặt kim loại sẽ cho khả năng làm mát tốt hơn trường hợp có $H/D = 1$. Ở số $Re = 14000$ thì cả hai khoảng cách phun $H/D = 1, H/D = 4$ của cấu hình dòng phun cho khả năng làm mát gần như nhau, sự khác biệt không đáng kể. Tuy nhiên trường hợp $H/D = 2$ ở đây cho số Nu cao hơn rõ rệt so với hai trường hợp còn lại, tức là khả năng làm mát tốt hơn. Ngoài ra, ở tất cả các trường hợp chúng ta có thể thấy trên đồ thị Nu có một đoạn ở

khoảng giữa đồ thị có bước nhảy lên rồi mới tiếp tục đi xuống, điều này có thể được giải thích là do vận tốc tại vị trí này của dòng chảy bao tăng lên đáng kể nên có tốc độ truyền nhiệt tốt hơn các vị trí phía r/D lớn hơn, dẫn đến số Nu có bước nhảy. Một số điểm trong đồ thị không theo quy luật có thể do sai số của quá trình thí nghiệm.

3.3. Ảnh hưởng của số Re đến sự truyền nhiệt của dòng phun

Hình 9 là các đồ thị mô tả mối quan hệ giữa sự thay đổi số Nu của sự truyền nhiệt dòng phun lên tấm kim loại theo hướng dòng lớp biên chảy trên bề mặt tấm ở các trường hợp số Re khác nhau.



Hình 9. Đồ thị thể hiện sự thay đổi số Nu với các số Re khác nhau

(a) khoảng cách vòi phun và bề mặt kim loại có $H/D = 1$, (b) khoảng cách vòi phun và bề mặt kim loại có $H/D = 2$, (c) khoảng cách vòi phun và bề mặt kim loại có $H/D = 4$

Cũng như hình 8 xét trên, tất cả các trường hợp đều cho kết quả làm mát tốt nhất tại tâm phun của dòng. Đồng thời, tất cả các trường hợp đều cho thấy với cùng một khoảng cách phun H , thì số Re lớn hơn sẽ cho khả năng làm mát tốt

hơn. Điều này cũng giống với xu hướng của các nghiên cứu trước đây trên thế giới.

Với khoảng cách phun có tỷ số $H/D = 1$ và $H/D = 4$ thì sự phân hóa khả năng làm mát giữa các trường hợp số Re là rất rõ ràng. Còn đối với khoảng cách phun $H/D = 2$ thì trường hợp số $Re = 9000$ và $Re = 12000$ mặc dù vẫn tuân theo xu thế nhưng chênh lệch không nhiều, trường hợp số $Re = 14000$ thì phân hóa rõ hơn. Ngoài ra, ta có thể thấy các trường hợp đều cho kết quả số Nu chênh nhiều giữa khu vực tâm phun (khu vực dòng ngưng trệ, khoảng từ $r/D = 0$ tới $r/D = 3$) với khu vực ngoài tâm phun theo phương hướng kính. Tức là tại khu vực dòng ngưng trệ làm mát tốt hơn rất nhiều so với vùng xa tâm. Một số nhận xét về bước nhảy đồ thị và sai số thí nghiệm cũng tương tự hình 8.

4. KẾT LUẬN

Việc khảo sát hiệu quả truyền nhiệt giữa dòng phun với thành tường phẳng theo cấu hình dòng phun vuông góc lên bề mặt tấm kim loại không ngập đã được thực hiện bằng phương pháp thí nghiệm và chụp ảnh nhiệt hồng ngoại. Kết quả cho thấy hiệu quả truyền nhiệt rất mạnh tại khu vực dòng ngưng trệ (khu vực tâm phun), khu vực dòng chảy bao có vận tốc lớn (khoảng $r/D = 1$ tới $r/D = 3$). Tại khu vực dòng chảy bao trên thành tường có r/D lớn hơn 3, hiệu quả truyền nhiệt kém hơn và giảm dần theo hướng dòng chảy từ vùng ngưng trệ đi ra ngoài theo hướng kính (hướng tăng của r/D). Các cấu hình có khoảng cách phun khác nhau và số Re khác nhau sẽ cho hiệu quả truyền nhiệt giữa dòng nước với tấm kim loại là khác nhau. Với trường hợp $Re = 12000$ và $Re = 14000$, khoảng cách phun có tỷ số $H/D = 2$ cho hiệu quả truyền nhiệt tốt hơn cả so với $H/D = 1$ và $H/D = 4$. Với các trường hợp cùng khoảng cách phun thì số Re lớn hơn sẽ cho hiệu quả truyền nhiệt tốt hơn. Các nghiên cứu này rất hiệu quả khi ứng dụng cấu hình dòng phun tự do vuông góc lên tấm phẳng trong các hệ thống làm mát thiết bị điện tử công suất, cánh tuabin nhiệt điện, pin xe điện...

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Zuckerman N, Lior N, 2006. *Jet impingement heat transfer: Physics, Correlations, and Numerical modeling*. Advances in Heat Transfer, Vol. 39, pp. 565-631.
- [2]. D. J. Womac, S. Ramadhyani, F. P. Incropera, 2015. *Correlating Equations for Impingement Cooling of Small Heat Sources with Single Circular Liquid Jets*. Journal of Heat Transfer.
- [3]. K. Jambunathan, E. Lai, M. A. Moss, B. L. Button, 1992. *A review of heat transfer data for single circular jet impingement*. Heat and Fluid Flow, Vol. 13, No. 2.
- [4]. Yuanwei Lyu, Jingzhou Zhang, Xichen Liu, Yong Shan, 2019. *Experimental study of single-row chevron-jet impingement heat transfer on concave surfaces with different curvatures*. Chinese Journal of Aeronautics.
- [5]. M. Molana, S. Banooni, 2013. *Investigation of heat transfer processes involved liquid impingement jets: a review*. Article in Brazilian Journal of Chemical Engineering.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Trong Dzung¹, Nguyen Van Thanh², Nguyen Anh Tuan¹

¹Faculty of Mechanical Engineering, Thuy Loi University, Vietnam

²Hanoi University of Industry, Vietnam