

KHẢO SÁT SỰ TRUYỀN NHIỆT CỦA MỘT DÒNG PHUN NGANG VUÔNG GÓC VỚI TƯỜNG PHẪNG

Nguyễn Anh Tuấn¹

Tóm tắt: Bài báo này báo cáo nghiên cứu về truyền nhiệt của một cấu hình dòng phun không ngập vuông góc lên bề mặt kim loại được nung nóng. Một dòng phun chất lỏng là nước được thực hiện theo phương ngang vuông góc lên một tấm kim loại đồng đặt theo phương đứng trong môi trường không khí. Các hình ảnh trường nhiệt độ bề mặt kim loại được chụp bằng camera nhiệt hồng ngoại được sử dụng để thảo luận các ảnh hưởng của các thông số lên sự truyền nhiệt của cấu hình dòng phun.

Từ khoá: Truyền nhiệt, dòng phun.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Một dòng chất lỏng hoặc khí được phun lên trên bề mặt có thể tăng cường khả năng trao đổi nhiệt giữa bề mặt và chất lưu. Cấu hình dòng này được sử dụng trong rất nhiều ứng dụng truyền nhiệt như làm mát trong quá trình tạo hình vật liệu, xử lý nhiệt, làm mát các linh kiện điện tử công suất, pin xe điện, gia nhiệt các bề mặt quang học để khử sương mù, làm mát các chi tiết của tuabin nhiệt điện, sấy vật liệu như giấy, vải và nhiều quy trình công nghiệp khác. Bên cạnh tính ứng dụng cao, đa dạng và hiệu quả của dòng phun lên bề mặt, việc nghiên cứu cấu hình dòng này cũng rất thú vị về mặt lý thuyết. Đặc điểm chung của cấu hình dòng phun lên bề mặt phẳng có thể được chia thành ba vùng khác nhau gồm khu vực dòng phun tự do, khu vực dòng đình trệ (va đập vào bề mặt) và khu vực dòng lớp biên phát triển trên bề mặt. Việc nghiên cứu về cấu hình dòng phun lên bề mặt nhận được rất nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu trong nhiều thập niên qua cũng như hiện nay vì tính phức tạp của cấu hình này. Một số các bài báo giới thiệu tổng quan các đặc điểm cơ bản cũng như tổng hợp các nghiên cứu từ trước đến nay về cấu hình dòng phun lên bề

mặt như của các tác giả Devahdhanush V.S. et al. (1), hay Zuckerman N. et al. (2). Hầu hết các nghiên cứu tập trung vào đặc tính dòng chảy, truyền nhiệt, truyền khối lượng giữa các khu vực dòng trong cấu hình dòng phun này sử dụng các phương pháp đo thực nghiệm và mô phỏng số. Trong vài năm trở lại đây, với sự phát triển của công nghệ, một số tác giả đã sử dụng phương pháp chụp ảnh nhiệt hồng ngoại để nghiên cứu một số dạng của cấu hình dòng phun vuông góc lên mặt phẳng được gia nhiệt. Tuy nhiên các nghiên cứu sử dụng phương pháp chụp ảnh nhiệt hồng ngoại với dòng phun lên bề mặt vẫn còn khá ít. Có thể kể đến một số công bố nổi bật của Mayank Modak et al. (3) và Ekaterina Koroteeva et al. (4). Đây là phương pháp mới, đòi hỏi công nghệ, kỹ thuật và thiết bị đắt tiền. Ở trong nước, các nghiên cứu về cấu hình dòng phun lên bề mặt hầu như rất ít. Một tác giả của bài báo này đã thực hiện các nghiên cứu và đã có các công bố quốc tế liên quan đến cấu hình dòng phun vuông góc với bề mặt phẳng (5 – 6). Các nghiên cứu này tập trung chủ yếu vào đặc trưng dòng của cấu hình dòng phun tác động thẳng góc lên bề mặt phẳng với các loại chất lỏng khác nhau và các thông số của cấu hình khác nhau. Việc nghiên cứu về đặc trưng truyền nhiệt của cấu hình dòng này vẫn chưa được thực hiện đầy đủ.

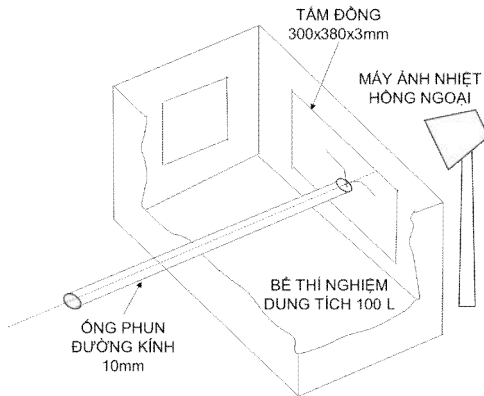
¹ Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sẽ khảo sát trường nhiệt độ của bề mặt tấm phẳng có nhiệt độ cao được làm mát bằng cấu hình dòng phun không ngập tác dụng vuông góc lên bề mặt bằng phương pháp chụp ảnh nhiệt hồng ngoại. Sử dụng máy ảnh nhiệt hồng ngoại để chụp sẽ cho hình ảnh trường nhiệt độ tức thời của bề mặt

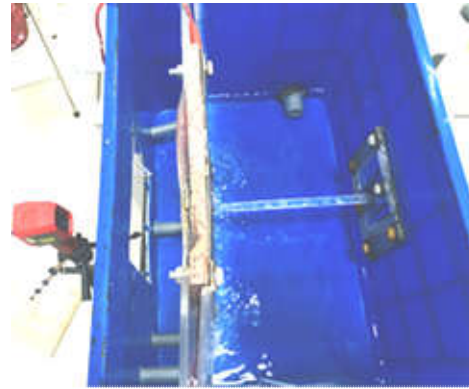
phun. Từ đó sẽ thảo luận các thông số ảnh hưởng đến khả năng truyền nhiệt của cấu hình dòng phun vuông góc lên bề mặt nhiệt không ngập trong chất lỏng tác động.

2. CÔNG CỤ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Thiết lập thí nghiệm



(a) Sơ đồ thí nghiệm



(b) Ảnh chụp thực tế thí nghiệm

Hình 1. Thí nghiệm chụp ảnh nhiệt bề mặt nhiệt

Hình 1 mô tả thiết lập hệ thống thí nghiệm chụp hình ảnh nhiệt bề mặt nhiệt của dòng phun vuông góc lên bề mặt phẳng. Một ống tròn có đường kính 10 mm đã được sử dụng trong thí nghiệm để phun theo phương ngang vào bề mặt phẳng bằng kim loại đồng được gia nhiệt để tạo một dòng lớp biên chảy trên bề mặt. Hệ thống phun được đặt trong một bể thí nghiệm hình chữ nhật có dung tích 100 lít. Đường ống này được lắp vào một mạch tuần hoàn chất lỏng là nước, bao gồm một bể ổn định nhiệt độ (sử dụng loại tủ đông Sanaka, Việt Nam), một máy bơm ly tâm 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 $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

quanh (chu vi) tấm kim loại. Vật liệu làm thanh gia nhiệt là thép inox không gỉ SUS304. Thanh gia nhiệt có công suất 2KW, với bộ kiểm soát nhiệt độ bằng cách điều chỉnh hiệu điện thế của nguồn cung cấp cho thanh gia nhiệt.

Để chụp ảnh nhiệt, chúng tôi sử dụng một máy ảnh chụp nhiệt hồng ngoại model UTi172S (Hình 2). Các thông số của máy ảnh được mô tả trong bảng 1.

Một tấm đồng kim loại nguyên chất (99.9%) với kích thước 300x370x2mm, độ dẫn nhiệt là 385W/m.K được sử dụng làm bề mặt nhiệt để phun làm mát. Tấm kim loại đồng này được gia nhiệt ở nhiệt độ khoảng 100°C . Để nung nóng tấm kim loại đồng, chúng tôi sử dụng hai thanh gia nhiệt hình chữ L ép vào bốn cạnh bao xung



Hình 2. Máy ảnh chụp nhiệt hồng ngoại Uti172S

Bảng 1. Thông số kỹ thuật máy chụp ảnh nhiệt hồng ngoại UTi172S

Độ phân giải hồng ngoại	120x90 pixels
Màn hình	2.4"/TFT
Trường quan sát (FOV)	50°x38°
Độ nhạy nhiệt (NETD)	60mk
Độ phân giải không gian (IFOV)	7.3mrad
Dải nhiệt đo	-20°C~400°C
Độ chính xác của máy	±2°C
Độ phân giải ảnh	648x488 pixels
Kích thước máy	196x63x75mm
Khối lượng tịnh	310g

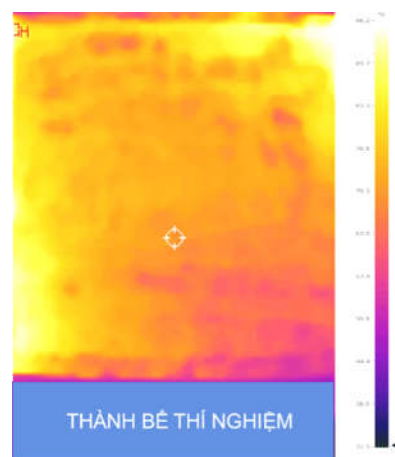
2.2. Mô tả quá trình thí nghiệm

Ông tròn thẳng, đường kính trong $D=10\text{mm}$ phun vuông góc lên bề mặt kim loại đồng đặt trong bể thí nghiệm (65cm x 44cm x 38cm, 100 lít) có trang bị cửa sổ kính. Khoảng cách giữa ống phun và bề mặt gia nhiệt được thiết lập theo hệ số không thứ nguyên lần lượt là $H/D = 1, 2$ và 4 (trong đó, H là khoảng cách giữa ống phun và bề mặt gia nhiệt, D là đường kính ống phun = 10mm). Chất lỏng được sử dụng để phun là nước sạch với nhiệt độ được kiểm soát bằng bể làm mát được cải tạo từ tủ đông Sanaky và cấp nhiệt. Khi tấm kim loại đồng được gia nhiệt và duy trì ở 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 vuông góc lên bề mặt kim loại đồng đã được gia nhiệt. Vận tốc dòng phun sẽ được thay đổi thông qua một biến tần để điều chỉnh công suất của bơm. Trong thí nghiệm chụp ảnh nhiệt, bề mặt tấm đồng cần được để lộ để camera nhiệt hồng ngoại chụp ảnh nhiệt trực tiếp. Do đó các vật liệu cách nhiệt để bao bọc tấm đồng không được sử dụng. Thí nghiệm chụp ảnh nhiệt được thực hiện tháng 9 để đảm bảo nhiệt độ môi trường xung quanh thí nghiệm khoảng $35 \pm 2^\circ\text{C}$ nhằm hạn chế ảnh hưởng lên tấm kim loại đồng làm nóng. Thời gian chụp ảnh nhiệt khoảng 20 đến 30 giây cho mỗi một trường hợp thí nghiệm. Trước mỗi lần chụp ảnh nhiệt, nhiệt độ của tấm kim loại đồng,

của nước trong bể ổn định nhiệt và bể thí nghiệm sẽ được kiểm tra trực tiếp bằng can nhiệt độ để đảm bảo các dải nhiệt độ cho phép. Các thí nghiệm chụp ảnh nhiệt được thực hiện trong điều kiện trang thiết bị hiện có của phòng thí nghiệm Bộ môn kỹ thuật hệ thống công nghiệp, Khoa cơ khí, Trường đại học Thủy lợi.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Hình ảnh phân bố nhiệt trên bề mặt phun

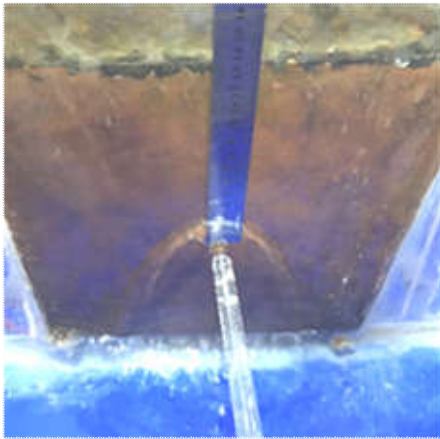


Hình 3. Hình ảnh trường nhiệt độ khí chưa phun, nhiệt độ bề mặt kim loại $80 \pm 2^\circ\text{C}$

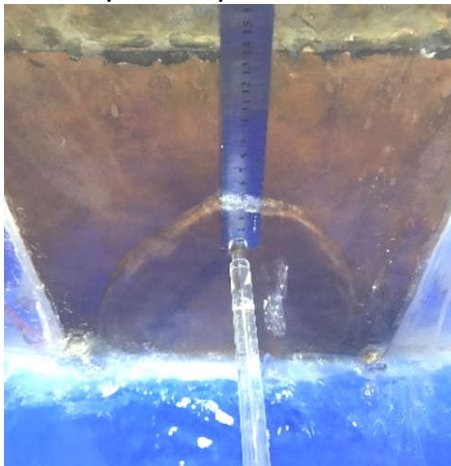
Hình 3, thể hiện trường nhiệt độ khí chưa phun. Nhiệt độ của bề mặt tấm kim loại tương đối đồng đều, khoảng $80 \pm 2^\circ\text{C}$. Hình 4 là các kết quả các trường nhiệt trên bề mặt phun khi sử dụng máy ảnh chụp nhiệt hồng ngoại tương ứng với hình ảnh chụp hình dạng vành chất

lông trên bề mặt kim loại với các số Re khác nhau tại cửa ra của ống phun. Các hình ảnh này

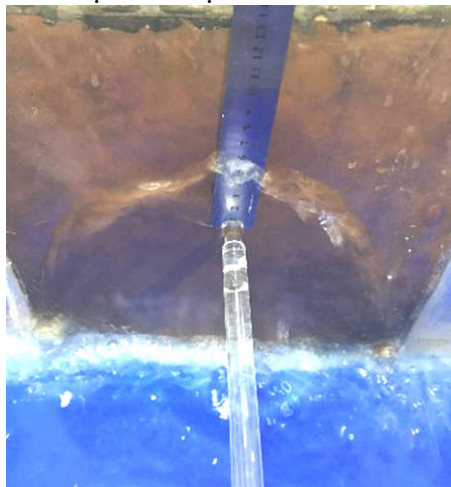
được thực hiện với cùng một khoảng cách phun $H/D = 1$.



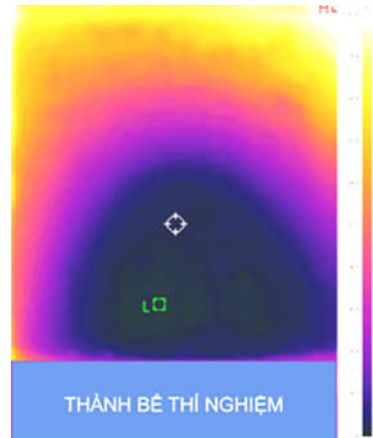
(a) Hình ảnh dòng phun không ngập lên bề mặt kim loại với $Re = 9000$



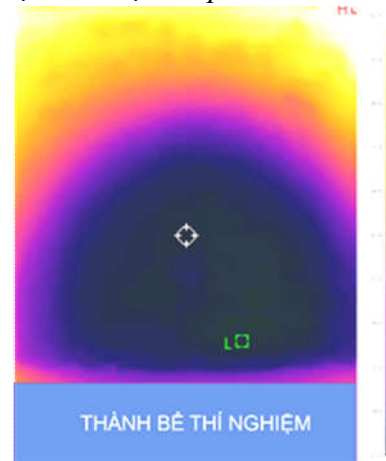
(b) Hình ảnh dòng phun không ngập lên bề mặt kim loại với $Re = 12000$



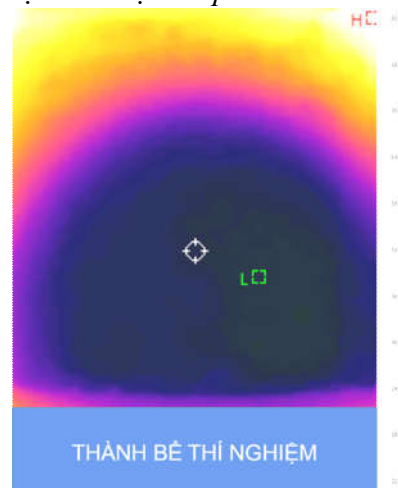
(c) Hình ảnh dòng phun không ngập lên bề mặt kim loại với $Re = 14000$



(d) Hình ảnh phân bố trường nhiệt độ bề mặt kim loại khi phun với $Re = 9000$



(e) Hình ảnh phân bố trường nhiệt độ bề mặt kim loại khi phun với $Re = 12000$



(h) Hình ảnh phân bố trường nhiệt độ bề mặt kim loại khi phun với $Re = 14000$

Hình 4. Hình ảnh trường nhiệt độ và hình ảnh dòng trên bề mặt kim loại

Để tổng quát hoá, chúng tôi sử dụng số Reynolds là một số không thứ nguyên được tính theo vận tốc dòng chất lỏng tại lõi ra của ống phun. Số Reynolds được xác định theo công thức $Re = \rho \cdot v \cdot D / \mu$, trong đó, v (m/s) là vận tốc trung bình của dòng trong ống (được xác định từ cảm biến đo lưu lượng của dòng trong hệ thống), D (mm) là đường kính trong của ống phun, $\mu = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ và $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$ là độ nhớt động lực học và khối lượng riêng của nước ở nhiệt độ 20°C . Các hình ảnh phân bố trường nhiệt độ của bề mặt kim loại đồng trước khi phun và sau khi phun sẽ được máy ảnh chụp nhiệt hồng ngoại ghi lại. 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° . Cụ thể hình 4a, b, c là các hình ảnh vành chất lỏng trên bề mặt kim loại với các số Re lần lượt tương ứng là $Re = 9000$ (hình 4a), $Re = 12000$ (hình 4b), $Re = 14000$ (hình 4c). Đối với hình ảnh trường nhiệt độ, chúng tôi chụp thẳng góc với mặt phẳng kim loại. Hình 4d là hình ảnh chụp trường nhiệt độ trên bề mặt kim loại khi phun với số $Re=9000$, và hình 4a là hình ảnh vành chất lỏng của dòng lớp biên trên bề mặt kim loại với số $Re=9000$ tương ứng. Rõ ràng trong khu vực dòng đình trệ khi chất lỏng được phun va chạm vào bề mặt và khu vực dòng thành tường, nhiệt độ của bề mặt kim loại giảm rất mạnh (màu xanh đen ở trong và xanh ở vành ngoài). Trong khi khu vực tấm kim loại phía bên ngoài vành nước thì nhiệt độ của tấm kim loại vẫn cao hầu như không giảm nhiệt độ (màu đỏ và màu cam). Cụ thể, nhiệt độ bề mặt kim loại tại khu vực dòng đình trệ giảm mạnh nhất so với nhiệt các vùng khác. Cấu hình dòng phun vuông góc lên tường phẳng ở trong nghiên cứu này được bố trí dòng phun theo phương ngang, tường phẳng theo phương đứng nên vành chất

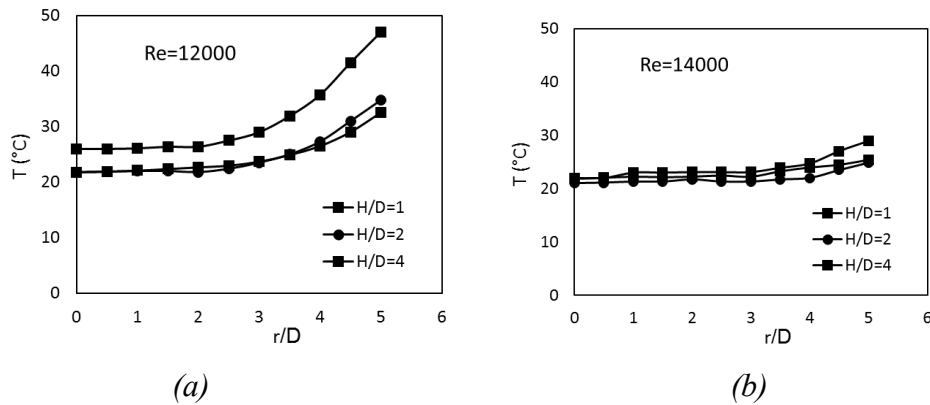
lỏng có dạng hình parabol do ảnh hưởng của gia tốc trọng trường. Hình ảnh trường nhiệt độ giảm trên bề mặt cũng có dạng parabol giống với hình dạng của vành chất lỏng. Khi số vận tốc dòng phun tăng lên lần lượt tương ứng với số $Re = 12000, 14000$ thì khu vực giảm nhiệt độ trên bề mặt tấm kim loại (vùng xanh đen và xanh) cũng được mở rộng ra theo hướng kính tương ứng với việc tăng số Re, khu vực nhiệt độ cao (vùng đỏ và da cam) bị thu hẹp lại (các hình 4e, h). Kết quả này cho thấy cấu hình dòng phun tác động vuông góc lên thành tường phẳng có khả năng tạo ra sự truyền năng lượng nhiệt cao tại vùng dòng bị ngưng trệ và vùng dòng lớp biên trên thành tường. Tuy nhiên khi dòng lớp biên càng phát triển ra bên ngoài thì khả năng truyền nhiệt sẽ giảm dần.

Trong điều kiện hạn chế về trang thiết bị của phòng thí nghiệm, do ảnh hưởng của môi trường xung quanh lên nhiệt độ tấm kim loại, nhiệt độ trực tiếp trên tấm kim loại được sử dụng để biểu diễn mối quan hệ này thay cho việc sử dụng các thông số khác như số Nusselt (Nu), hệ số truyền nhiệt hoặc thông lượng nhiệt. Việc sử dụng nhiệt độ trực tiếp tuy chưa thể đánh giá định lượng chính xác được hiệu suất truyền nhiệt của hệ thống. Nhưng mối quan hệ nhiệt độ với khoảng cách không thứ nguyên (r/D) vẫn có thể được sử dụng để thảo luận định tính các ảnh hưởng của các thông số lên hiệu quả truyền nhiệt của dòng phun tác động vuông góc với bề mặt kim loại. Để khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến sự thay đổi nhiệt độ này, chúng tôi tiến hành vẽ đồ thị mối quan hệ giữa nhiệt độ trên bề mặt tấm kim loại theo hướng dòng chảy đi ra trên bề mặt (r/D) với các thông số như số Re, khoảng cách phun (H/D). Việc xác định khoảng cách r/D trên bề mặt tấm kim loại được tiến hành như sau. Chúng tôi đã sử dụng một chiếc thước để đánh dấu và chia các khoảng cách r/D

từ tâm phun ra đến bên ngoài vành nước lần lượt r/D là 1, 2, và 4. Các hình 4a, 4b, 4c đã được chụp với thước chia vạch. Sau khi đánh dấu các vị trí này ở mặt sau của tấm kim loại, chúng tôi sẽ xác định nhiệt độ tại vị trí đó bằng

cách di chuyển con trỏ màn hình đến vị trí để hiện giá trị nhiệt độ trên màn hình của camera chụp ảnh nhiệt hồng ngoại.

3.2. Ảnh hưởng của khoảng cách phun đến nhiệt độ trên bề mặt phun

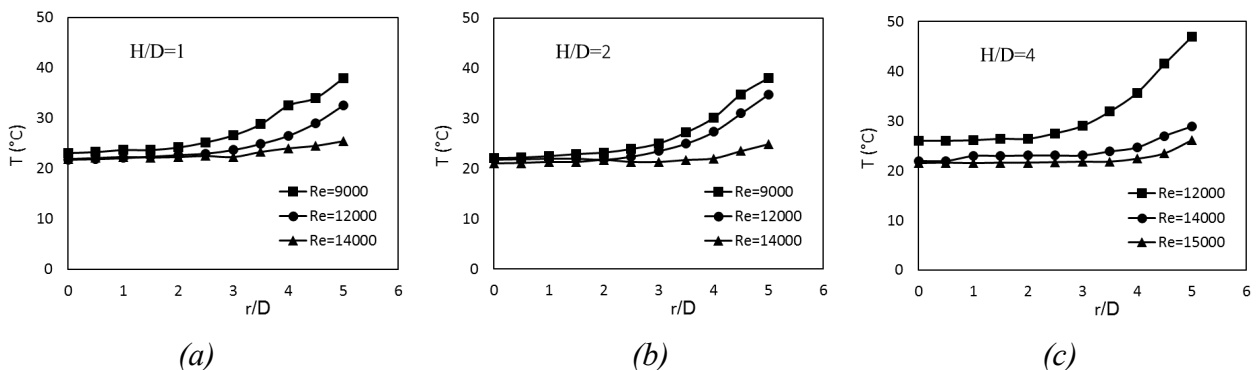


Hình 5. Sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt kim loại với các khoảng cách phun H/D khác nhau, (a) với số $Re = 1200,0$ (b) với số $Re = 14000$

Hình 5 là các đồ thị mô tả mối quan hệ giữa sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt kim loại với các khoảng cách phun khác nhau. Hình 5a cho số $Re = 12000$ và hình 5b cho số $Re = 14000$. Ba khoảng cách phun $H/D = 1, 2$ và 4 được khảo sát. Với số $Re = 12000$ ở trường hợp $H/D = 1$ cho thấy sự tăng nhiệt độ trên bề mặt kim loại là lớn hơn cả so với hai trường hợp còn lại là $H/D = 2$ và 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. Tuy nhiên với trường hợp $Re = 14000$ thì cả ba khoảng cách $H/D = 1, 2$ và 4 của cấu hình dòng phun đều có khả năng làm mát như nhau. Sự khác biệt không đáng kể.

3.3. Ảnh hưởng của số Re đến sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt phun



Hình 6. Đồ thị miêu tả thay đổi nhiệt độ với trên bề mặt kim loại với các số Re khác nhau (a) khoảng cách vòi phun và bề mặt kim loại $H/D=1$, (b) khoảng cách vòi phun và bề mặt kim loại $H/D=2$, (c) khoảng cách vòi phun và bề mặt kim loại $H/D=4$

Hình 6 là các đồ thị mô tả mối quan hệ giữa sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt kim loại theo hướng dòng lớp biên chảy trên thành tường. Hình 6a với khoảng cách phun $H/D = 1$, tại vùng tâm phun (khu vực ngưng trệ của dòng khí va chạm vào bề mặt kim loại), nhiệt độ là thấp nhất. Nhiệt độ tăng dần khi dòng chất lỏng chạy trên bề mặt tấm kim loại đi ra ngoài theo phương hướng kính. Cụ thể, nhiệt độ thay đổi rất nhỏ với $r/D = 0, 1, 2$. Khi r/D lớn hơn 3 thì có sự tăng nhiệt độ rất mạnh đối với các trường hợp $Re = 9000$ và 12000 . Tuy nhiên với $Re = 14000$ thì sự tăng nhiệt độ không đáng kể. Rõ ràng, số Re có ảnh hưởng đến mức độ giảm nhiệt độ bề mặt phun. Các trường hợp $H/D = 2$ (hình 6b), và $H/D = 4$ (hình 6c) cũng cho thấy kết luận tương tự, nhưng có sự khác nhau về mức độ tăng nhiệt độ trên bề mặt theo hướng dòng chảy trên tường phẳng. Nhiệt độ tăng mạnh nhất ở trường hợp $H/D = 4$ với $Re = 12000$, nhưng với $Re = 14000$, và 15000 nhiệt độ tăng không đáng kể. Trong cả ba trường hợp $H/D = 1, 2$, và 4 , thì trường hợp số $Re = 14000$, và 15000 cho khả năng giảm nhiệt độ trên bề mặt kim loại tốt nhất. Các trường hợp này rất hiệu quả khi sử dụng cấu hình dòng phun vuông góc lên tường phẳng trong các ứng dụng làm

mát các thiết bị điện tử công suất, cánh tuabin nhiệt điện, pin xe điện.

4. KẾT LUẬN

Việc khảo sát trường nhiệt độ bề mặt tường phẳng với cấu hình dòng phun vuông góc lên bề mặt kim loại đồng không ngập đã được thực hiện bằng phương pháp chụp ảnh nhiệt hồng ngoại. Kết quả cho thấy nhiệt độ giảm rất mạnh tại khu vực dòng ngưng trệ. Tại khu vực dòng lớp biên trên thành tường, nhiệt độ tăng dần theo hướng dòng chất lỏng chảy từ vùng ngưng trệ đi ra ngoài theo hướng kính. Với trường hợp khoảng cách phun khác nhau và số Re khác nhau sẽ cho kết quả giảm nhiệt độ trên bề mặt khác nhau. Với $Re=14000$, cấu hình dòng cho hiệu quả làm mát như nhau với cả ba trường hợp $H/D = 1, 2$ và 4 , sự thay đổi nhiệt độ trên bề mặt kim loại được gia nhiệt là không đáng kể. Về cơ bản các kết quả bước đầu này đã giúp đánh giá định tính các thông số ảnh hưởng lên hiệu quả truyền nhiệt của dòng phun vuông góc với bề mặt phẳng. Tuy nhiên, việc nghiên cứu cần được tiếp tục trong tương lai, đặc biệt trong việc nâng cấp và hoàn thiện việc thiết lập thí nghiệm để đạt được các kết quả chính xác hơn cho các công bố tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Devahdhanush V.S., Issam Mudawar, *Review of Critical Heat Flux (CHF) in Jet Impingement Boiling*, International Journal of Heat and Mass Transfer 169 (2021).
- Zuckerman N, Lior N, *Jet impingement heat transfer: Physics, Correlations, and Numerical modeling*, Advances in Heat Transfer, Vol. 39 (2006), pp. 565-631.
- Mayank Modak, Santosh K. Sahu, Hyun Sun Park, *An experimental study on heat transfer of different aqueous surfactant solutions horizontal impinging jet using infrared thermography*, Applied Thermal Engineering 188 (2021)
- Ekaterina Koroteeva, Anastasia Shagiyanova, Irina Znamenskaya, Nikolay Sysoev, *Time-resolved thermographic analysis of the near-wall flow of a submerged impinging water jet*, Experimental Thermal and Fluid Science 121 (2021)

Nguyen Anh Tuan, Hiroshi Mizunuma, *Advection of shear-induced surfactant threads and turbulent drag reduction*, Journal of Rheology, 57 (6) (November 2013), pages 1819 – 1832
Nguyen Anh Tuan, Hiroshi Mizunuma, *Laminar and turbulent impinging jet in surfactant solutions*, Nihon Reoroji Gakkaishi (Journal of Rheology Society, Japan) Vol. 41, No. 2 (May 2013), pages 67-73

Abstract:

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HEAT TRANSFER FOR A FREE JET
IMPINGING ON A FLAT SURFACE**

This paper reports the study of heat transfer of a free jet impinging on the heated flat surface. The horizontal free jet of water was impinged on the vertical surface, which was the heated copper metal plate. The images of temperature field on the copper plate were taken with an infrared thermal camera. Thus, the thermal images were used to discuss the heat transfer of the impinging jet.

Keywords: Heat transfer, impinging jet.

Ngày nhận bài: 30/01/2023

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2023