

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

EXPERIMENTAL SURVEY OF FACTORS AFFECTING TO THE HEAT TRANSMISSION OF SUBMERGED IMPINGING JET

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

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2025.010>

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu thực nghiệm về sự truyền nhiệt của một cấu hình dòng phun ngập 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 và ngập trong môi trường nước. Trường nhiệt độ tại bề mặt tấm kim loại được khảo sát thông qua camera chụp ảnh 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) ứng với các trường hợp tỷ số khoảng cách phun với đường kính ống và số Reynolds khác nhau. 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 ngập, thực nghiệm.

ABSTRACT

This paper experimentally investigates the heat transfer of a submerged impinging jet stream configuration 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 metal plate of copper material placed vertically and submerged in an aqueous medium. The temperature field at the surface of the metal plate is investigated through an infrared thermal imaging camera. 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) corresponding to cases where the ratio of injection distance to pipe diameter and Reynolds number is different. Discussions of the influence of several parameters on the heat transfer of this jet configuration are discussed.

Keywords: Heat transfer, submerged impinging jet, experimental.

¹Trường Đại học Thủy lợi

²Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: nguyenvanthanh.dhcn@gmail.com

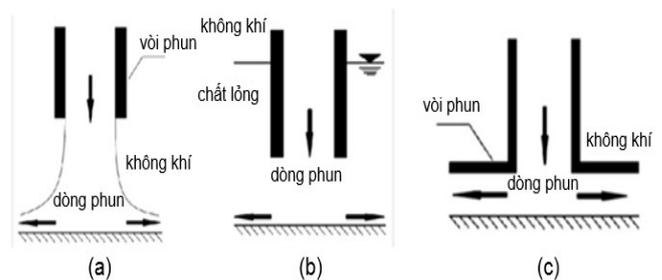
Ngày nhận bài: 20/9/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/11/2024

Ngày chấp nhận đăng: 26/01/2025

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. Đặc điểm của dòng impinging jet đã và đang được xem xét trong nhiều nghiên cứu và một số tài liệu. 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 impinging jet khi nó tác động lên một bề mặt là một hàm phức tạp của nhiều tham số: số Reynolds (Re), 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 [3, 4].



(a) Cấu hình dòng phun tự do; (b) cấu hình dòng phun ngập;
(c) Cấu hình dòng phun bị giới hạn

Hình 1. Các cấu hình dòng phun vuông góc bề mặt phẳng [6]

Cấu hình dòng phun impinging jet tức là dòng phun chất lỏng có nhiệt độ thấp hơn lên một bề mặt có nhiệt độ cao hơn, thông qua một hoặc nhiều vòi phun. 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, dòng phun ngập - submerged impinging jet và dòng phun bị giới hạn - confined impinging jet, được minh họa trong hình 1.

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách phun, số Reynolds tới sự truyền nhiệt của dòng phun ngập (submerged impinging jet) lên một tấm kim loại phẳng được gia nhiệt bằng phương pháp chụp ảnh nhiệt độ bề mặt tấm.

2. CÔNG CỤ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết tính toán

Hệ số truyền nhiệt đối lưu (h) được xác định theo công thức:

$$h = \frac{q_{\text{joule}} - q_s}{T_w - T_j} \tag{1}$$

Với: h - hệ số truyền nhiệt đối lưu (W/m².K); q_{joule} - tổng thông lượng nhiệt cấp tới tấm từ nguồn (thanh trở nhiệt) (W/m²); q_s - thông lượng nhiệt bị tổn thất qua dẫn nhiệt và đối lưu của tấm kim loại với không khí (W/m²); T_w - nhiệt độ từng điểm cục bộ được xét trên tấm theo hướng kính từ vị trí tâm phun (K); T_j - nhiệt độ trung bình dòng phun (K).

q_{joule} được xác định theo công thức:

$$q_{\text{joule}} = \frac{P}{A} \tag{2}$$

Với: P - tổng công suất các thanh trở nhiệt sử dụng (W); A - diện tích xung quanh tấm đồng (m²).

q_s được xác định theo công thức:

$$q_s = h_{\text{nb}}(T_b - T_a) \tag{3}$$

Với: h_{nb} - hệ số truyền nhiệt đối lưu tự nhiên của tấm kim loại với không khí (W/m².K); T_b - nhiệt độ trung bình của tấm kim loại sau khi được gia nhiệt, đo bằng camera nhiệt (K); T_a - nhiệt độ môi trường không khí xung quanh tấm, đo bằng nhiệt kế (K).

$$Re = \frac{V.D}{\nu} \tag{4}$$

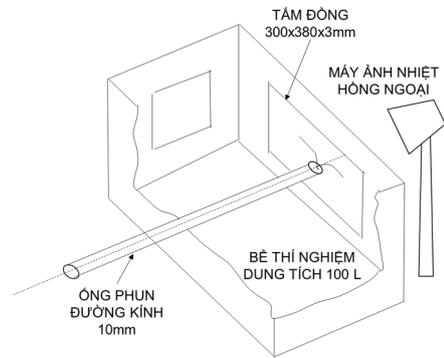
Với: Re - số Reynolds của dòng phun trong ống; V - vận tốc trung bình dòng trong ống phun (m/s); D - đường kính trong ống phun (m); ν - độ nhớt động học của nước trong ống (m²/s).

$$Nu = \frac{h.D}{\lambda} \tag{5}$$

Với: Nu - số Nusselt; D - đường kính trong ống (m); λ - hệ số dẫn nhiệt của chất lỏng (W/m.K); h - hệ số truyền nhiệt đối lưu (W/m².K)

2.2. Thiết lập thí nghiệm

Hình 2 mô tả hệ thống thí nghiệm khảo sát nhiệt độ tấm kim loại thông qua chụp ảnh nhiệt bề mặt tấm này, với điều kiện tấm được đặt ngập trong nước. Nước được phun qua một ống tròn có đường kính trong D = 10mm theo phương ngang và vuông góc với bề mặt của tấm kim loại trong khi tấm này được gia nhiệt để tạo nhiệt độ mong muốn ban đầu (ở đây là khoảng 42°C). Hệ thống phun trên được đặt trong một bể thí nghiệm hình chữ nhật có dung tích 100 lít bằng nhựa và chứa nước đủ ngập tấm. 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 2. Hình ảnh hệ thống thí nghiệm

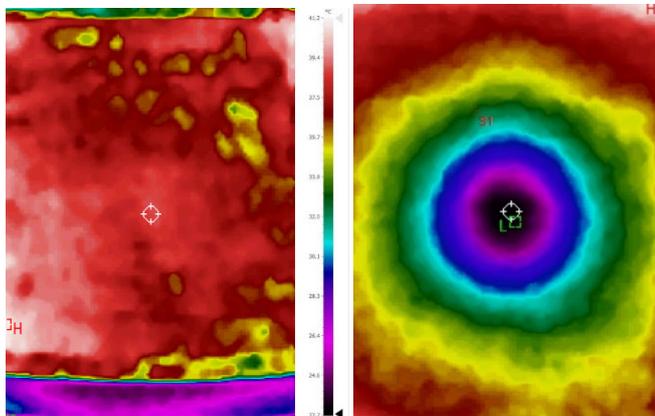
Tấm đồng kim loại nguyên chất có kích thước 300x370x3mm, để nung nóng tấm, nhóm tác giả sử dụng 02 thanh gia nhiệt hình chữ L ép vào bốn cạnh bao xung quanh tấm. Vật liệu làm thanh gia nhiệt là thép không gỉ SUS304. Thanh gia nhiệt có công suất 2kW/thanh, với bộ kiểm soát nhiệt độ bằng cách điều chỉnh 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 UTi172S.

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, $D = 10\text{mm}$). 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.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

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

Hình 3a thể hiện trường nhiệt độ trên tấm đồng khi chưa thực hiện phun với nhiệt độ của bề mặt tấm tương đối đồng đều, khoảng 42°C và hình 3b thể hiện trường nhiệt độ khi đã phun.



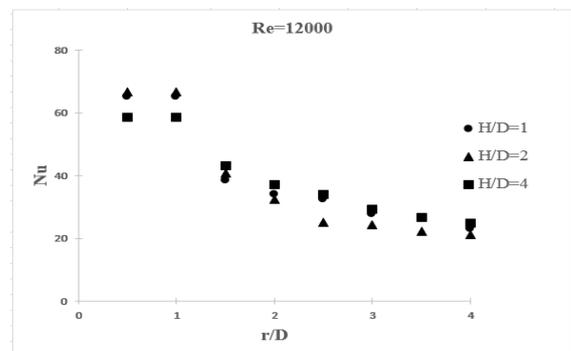
(a) Hình ảnh trường nhiệt độ khi chưa phun, nhiệt độ bề mặt kim loại $42 \pm 2^\circ\text{C}$
 (b) Hình ảnh nhiệt trên tấm kim loại với $Re = 12000, H/D = 1$

Hình 3. Một số hình ảnh kết quả nhiệt trên bề mặt tấm kim loại

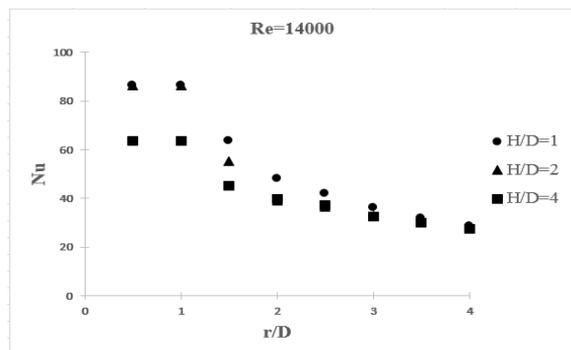
3.2. Ảnh hưởng của khoảng cách phun đến sự truyền nhiệt của cấu hình

Hình 4 là các đồ thị mô tả mối quan hệ giữa sự thay đổi số Nu trên bề mặt tấm kim loại theo tỷ số r/D khi các khoảng cách phun thay đổi. Các hình 4a, 4b, 4c đều cho thấy: (i) số Nu lớn nhất tại khu vực tâm phun, sau đó giảm dần số Nu từ tâm phun ra ngoài theo hướng kính của

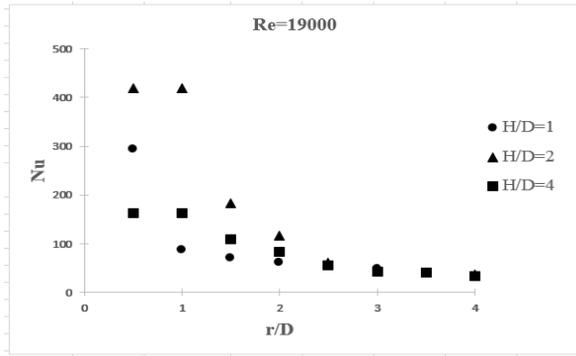
vành nước khi phun; (ii) Khi tăng khoảng cách phun, số Nu có bước giảm đáng kể tại khu vực gần tâm phun ($r/D \leq 1$) và giảm dần theo chiều tăng r/D ; (iii) trong vùng r/D nhỏ hơn 1 cho kết quả tương đối rõ ràng khoảng cách phun nhỏ ($H/D = 1, 2$) cho hiệu quả truyền nhiệt tốt hơn so với khoảng cách phun lớn ($H/D = 4$). Một số điểm phía sau đó ($r/D > 1$) trong các đồ thị không theo quy luật là do sai số của quá trình thí nghiệm. Sự cản trở bởi nước trong bể đối với dòng phun và dòng chảy bao gây ra tán nước phun trên tấm kim loại đặc biệt ở vùng xa tâm phun rất khó kiểm soát, có thể ảnh hưởng đến kết quả. Ví dụ trường hợp $H/D = 2$ lại có Nu nhỏ hơn trường hợp $H/D = 4$. Ngoài ra còn do cấu hình dòng phun ngập có sự truyền nhiệt giữa nước trong bể với tấm kim loại. Trong mỗi lần thí nghiệm (với một trường hợp H/D), ở vị trí xa tâm phun có thể sự trao đổi nhiệt này lại không giống nhau dẫn đến kết quả số Nu không theo quy luật. Ngoài ra, tại các hình 4a, 4b, ta thấy trong vùng $r/D \leq 1$ thì trường hợp $H/D = 1, H/D = 2$ có hiệu quả truyền nhiệt gần như nhau và cao hơn trường hợp $H/D = 4$; nhưng ở hình 4c ta thấy trường hợp $H/D = 2$ truyền nhiệt tốt hơn $H/D = 1$ tiếp theo là $H/D = 4$. Điều này có thể đưa ra giải thích là đối với dòng phun có vận tốc lớn tới một giá trị đủ lớn như trường hợp $Re = 19000$ thì khoảng cách phun $H/D = 2$ lại truyền nhiệt tốt hơn $H/D = 1$, do khi khoảng cách quá gần sẽ gây ảnh hưởng tới diện tích tiếp xúc của dòng phun với tấm gia nhiệt cũng như sự ổn định của dòng chảy bao.



(a)



(b)



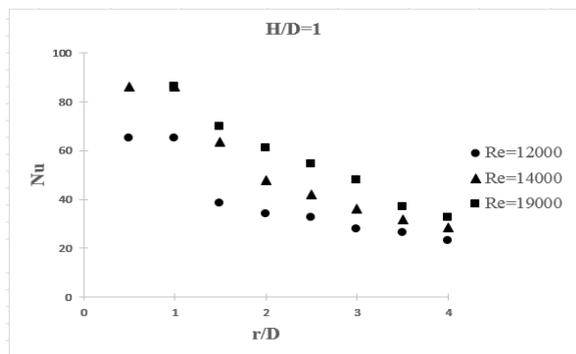
(c)

Hình 4. 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; (c) với số Re = 19000

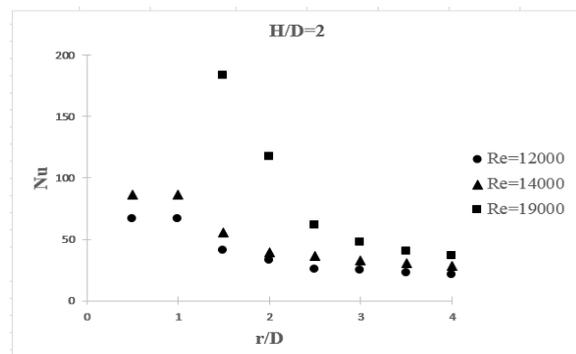
3.3. Ảnh hưởng của số Reynolds đến sự truyền nhiệt của cấu hình

Hình 5 là các đồ thị mô tả mối quan hệ giữa 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.

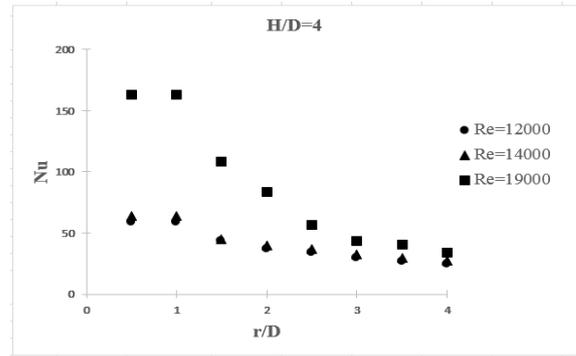
Cũng theo hình 4, các trường hợp ở đây đều cho kết quả truyền nhiệt tốt nhất tại khu vực tâm phun của cấu hình và giảm dần ra xa tâm theo hướng kính. Ở đây, tất cả các trường hợp đều dễ dàng cho thấy với cùng một khoảng cách phun H, thì số Re lớn hơn sẽ cho khả năng làm mát tốt hơn. Điều này cũng giống với xu hướng của các nghiên cứu trước đây trên thế giới.



(a)



(b)



(c)

Hình 5. Đồ thị thể hiện sự thay đổi số Nu theo r/D 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

Với khoảng cách phun có tỷ số H/D = 1 thì sự phân hóa khả năng làm mát giữa các trường hợp ứng với các số Re = 12000, Re = 14000 và Re = 19000 là rõ ràng hơn cả. Với trường hợp khoảng cách phun H/D = 2 cho tới trường hợp H/D = 4 thì đồ thị ứng với số Re = 12000 và Re = 14000 mặc dù vẫn tuân theo xu thế nhưng chênh lệch không nhiều và có sự phân hóa giảm dần từ trường hợp H/D = 2 tới trường hợp H/D = 4. Điều này có thể giải thích do cấu hình dòng phun ngập nên có sự cản trở dòng phun bởi nước trong bể, dẫn đến khi khoảng cách phun gần thì dòng sẽ tương tác với tấm kim loại nhiệt tốt hơn, tuân theo quy luật, còn với khoảng cách phun xa thì dòng phun khi tới tương tác với tấm kim loại đã bị yếu đi và ảnh hưởng tới kết quả truyền nhiệt, phải tăng số Re lên cao tức là vận tốc dòng phun lớn thì sức cản của nước trong bể mới không ảnh hưởng nhiều tới kết quả truyền nhiệt, từ đó chúng ta sẽ thấy sự phân hóa rõ hơn khi tốc độ dòng thấp.

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 ngập trong nước đã được thực hiện bằng phương pháp thí nghiệm và chụp ảnh nhiệt hồng ngoại theo bài báo này. Kết quả cho thấy hiệu quả truyền nhiệt mạnh tại khu vực dòng ngưng trệ (khu vực tâm phun). Tại khu vực dòng chảy bao trên thành tường có r/D = 1 bắt đầu có bước giảm mạnh số Nu, hiệu quả truyền nhiệt bắt đầu kém đi 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 nhiệt là khác nhau. Cùng số Re, khoảng cách phun nhỏ cho hiệu quả truyền

hiệu quả hơn so với khoảng cách phun lớn trong một giới hạn vận tốc nhất định. Với các trường hợp cùng khoảng cách phun thì dòng có số Re lớn hơn sẽ cho hiệu quả truyền nhiệt tốt hơn. Các nghiên cứu này mang lại hiệu quả khi ứng dụng để chế tạo cấu hình dòng phun 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]. Devahdhanush V.S., Issam Mudawar, "Review of Critical Heat Flux (CHF) in Jet Impingement Boiling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 2021.

[2]. Zuckerman N., Lior N., "Jet impingement heat transfer: Physics, Correlations, and Numerical modeling," *Advances in Heat Transfer*, 39, 565-631, 2006.

[3]. D. J. Womac, S. Ramadhyani, F. P. Incropera, "Correlating Equations for Impingement Cooling of Small Heat Sources with Single Circular Liquid Jets," *J. Heat Transfer*, 115(1), 106-115, 1993.

[4]. K. Jambunathan, E. Lai, M. A. Moss, B. L. Button, "A review of heat transfer data for single circular jet impingement," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 13, 2, 106-115, 1992.

[5]. Yuanwei Lyu, Jingzhou Zhang, Xichen Liu, Yong Shan, "Experimental study of single-row chevron-jet impingement heat transfer on concave surfaces with different curvatures," *Chinese Journal of Aeronautics*, 32, 10, 2275-2285, 2019.

[6]. M. Molana, S. Banooni, "Investigation of heat transfer processes involved liquid impingement jets: a review," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30, 03, 413 - 435, 2013.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Trong Dzung¹, Nguyen Van Thanh², Nguyen Anh Tuan¹

¹Thuy Loi University, Vietnam

²Hanoi University of Industry, Vietnam