

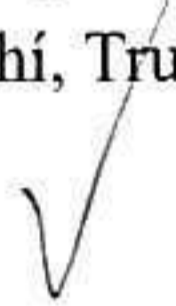
MÔ PHỎNG SỐ QUÁ TRÌNH LÀM ĐÁ DÙNG PHƯƠNG PHÁP CỔ ĐỊNH BIÊN

NUMERICAL SIMULATION OF SOLIDIFICATION BY USING THE FIXED GRID TECHNIQUE

KS. Nguyễn Đại Phú¹, ThS. Hồ Thị Mỹ Nữ², TS. Nguyễn Minh Phú¹

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

²Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP. Hồ Chí Minh



TÓM TẮT

Trong bài báo này, vấn đề làm đá trong máy đá viên tinh khiết được mô phỏng và phân tích. Đá được đông đặc phía trong ống khi nước chảy màng từ trên xuống nhà nhiệt cho môi chất lạnh sôi bên ngoài. Mô phỏng dựa trên hệ phương trình vi phân biến đổi pha trong tọa độ trụ và truyền nhiệt khi sôi. Hệ phương trình với điều kiện biên là mặt phân pha di động được giải bằng phương pháp cố định biên. Kết quả mô phỏng được so sánh với thực nghiệm để kiểm tra độ tin cậy của chương trình. Ngoài ra, các nghiên cứu tham số cũng được trình bày.

Từ khóa: *Máy đá, mô phỏng số, phương pháp cố định biên, phương pháp sai phân hữu hạn.*

ABSTRACT

In this study, an ice making problem has been developed and analyzed. Ice is frozen inside tubes cooled externally by boiling directly. The simulation was based on the governing equations of phase change heat transfer in cylindrical coordinate and boiling heat transfer. The system of partial differential equations with moving boundary was solved by using the fixed grid technique. Simulation result coincides well with experimental result. Parametric studies and kinematic simulation of melting process were also presented.

Keywords: *Ice maker, numerical simulation, fixed grid technique, finite difference method.*

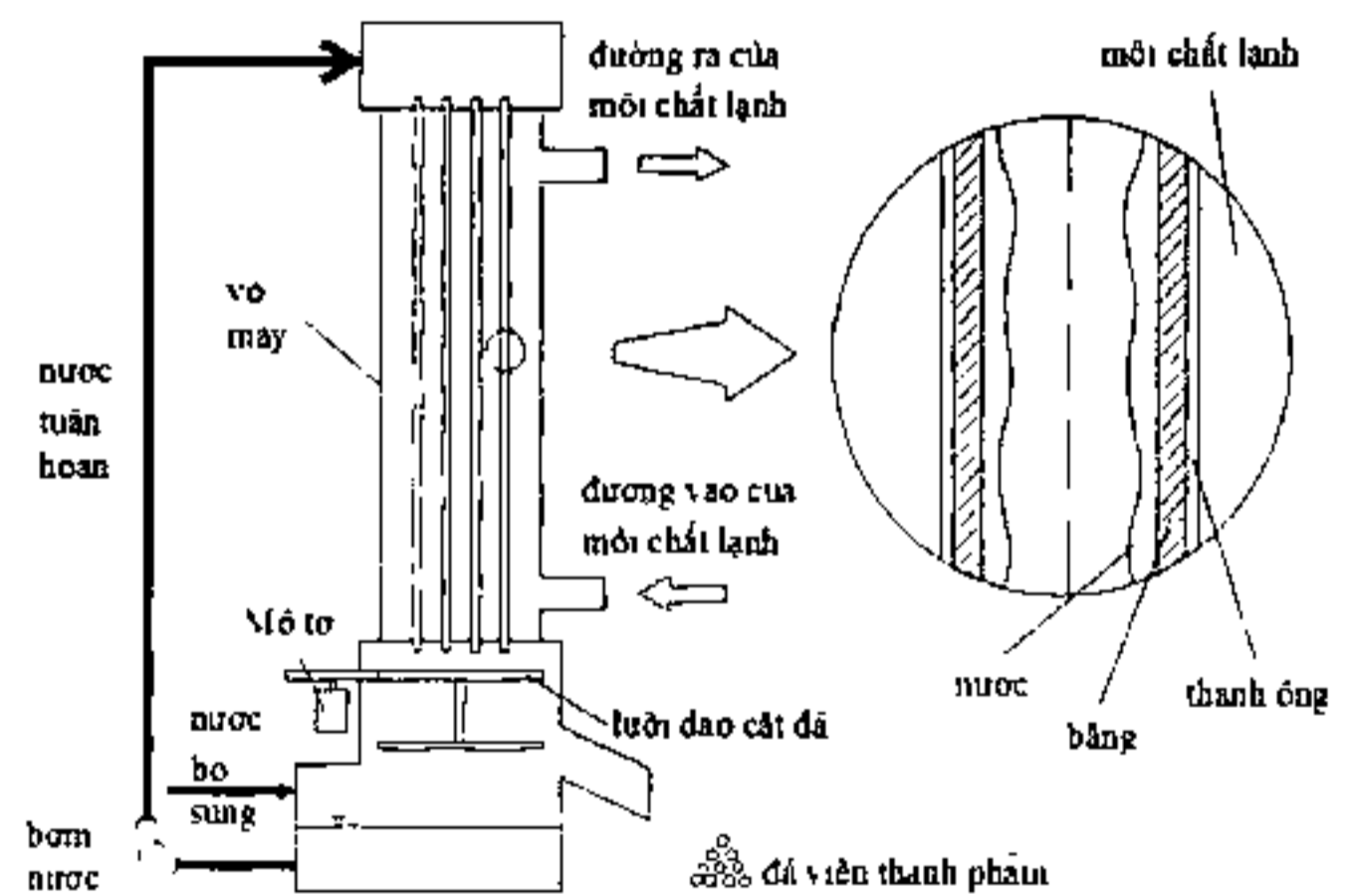
1. GIỚI THIỆU

Làm đá nói chung và trữ nhiệt ẩn nói riêng, đang được quan tâm trong những thập kỷ gần đây do khả năng trữ nhiệt của nó. Đặc biệt, nước đá được sử dụng rộng rãi để làm lạnh thức uống ở các quốc gia nhiệt đới cũng như dự trữ hải sản trên các tàu cá. Hóa rắn của các vật liệu biến đổi pha thường sử dụng các lưu chất truyền nhiệt một pha trong các nghiên cứu trước. Điều này, dẫn đến hiệu quả của máy lạnh thấp do chất tải lạnh trung gian, như các dung dịch glycol, nước muối. Lee và Jones [1] đã phát triển hệ thống trữ năng lượng dạng băng tan ngoài ống cho các chế độ trữ và xả trữ. Lưu chất truyền nhiệt thay đổi pha được sử dụng trong mô hình của họ, các kết quả được công nhận bởi thực nghiệm. Sasaguchi và cộng sự [2] đã đề xuất mô hình số để phân tích truyền nhiệt thay đổi pha quanh các ống. Họ đã giữ nhiệt độ vách không đổi trong các phân tích. Các ảnh hưởng của nhiệt độ nước ban đầu đến các thông số khác đã được trình bày trong nghiên cứu của họ. Gần đây, Buyruk và cộng sự [3] cũng khảo sát sự hóa rắn sử dụng phần mềm Fluent, với các cấu hình ống tương tự như nghiên cứu của Sasaguchi và cộng sự. Ismail và Jesus [4] đã nghiên cứu hóa rắn quanh ống trong khi dung dịch ethylene glycol chảy bên ngoài. Ismail và Henríquez [5] đã mô phỏng trữ ẩn nhiệt trong các vỏ hình cầu trong khi dung dịch ethylene glycol chảy qua các lớp trái cầu. Mô hình tương tự cũng được nghiên cứu bởi Ismail, Henríquez và Silva [6] trong đó các quả cầu băng được nhúng trong lưu chất truyền nhiệt một pha tĩnh. Ảnh hưởng của kích thước và vật liệu quả cầu, nhiệt độ ban đầu của chất thay đổi pha và nhiệt độ của lưu chất truyền nhiệt theo thời gian để hoàn thành đông đặc đã được xem xét trong các nghiên cứu trên. Cơ chế hóa rắn mới đã được nghiên cứu thực nghiệm trên bề mặt trụ thẳng đứng bởi Mohamed [7]. Các bọt khí đã được phun trong chất thay đổi pha và ống được làm lạnh

bởi dung dịch ethylene glycol. Kết quả chỉ ra rằng tốc độ hình thành băng tăng từ 20-45%, do các bọt khí. Tối ưu hóa làm đá đã được khảo sát bởi Chie, Lacroix [8] và Zhao, Liu, Kang [9]. Bề dày lớp đá trên tấm phẳng được tối ưu theo thời gian thu hoạch. Có thể sản xuất cùng lượng đá trong khoảng thời gian ngắn hơn trước khi tối ưu hóa.

Máy đá viên tinh khiết được sử dụng rộng rãi ở Việt Nam. Tuy nhiên, nghiên cứu đặc tính quá trình hình thành đá trong tháp đá chưa được đề cập. Trong bài báo này, trình bày hệ phương trình vi phân của quá trình làm đá trong tháp đá viên tinh khiết. Phương pháp cổ điển biên được sử dụng để giải hệ phương trình trên với điều kiện biên di động. Kết quả mô phỏng được so sánh với kết quả thực nghiệm để khẳng định độ tin cậy.

2. MÔ HÌNH TOÁN



Hình 1. Tháp làm đá viên dạng ống

Hình 1, trình bày mô hình vật lý của quá trình làm đá trong tháp đá. Môi chất lạnh được cho tuần hoàn bên ngoài thành ống làm nước đá. Truyền nhiệt xảy ra giữa môi chất lạnh và nước lỏng thông qua một nhóm các ống Inox. Nước lỏng được bơm lên đỉnh tháp và rơi xuống đáy thùng đựng nước thải do trọng lực. Nước bổ sung được thêm vào để bù đắp cho sự hình thành băng. Trong sản xuất

nước đá viên dạng ống, đá sẽ hình thành trên bề mặt bên trong của ống và phát triển cho đến khi đường kính của lõi bên trong đạt đến một kích thước nhất định. Sau đó, quá trình rã đông bằng khí nóng bắt đầu và các băng ống nước đá được cắt theo chiều dài mong muốn rơi qua một lưỡi dao cắt vào một khay phía dưới để thu lại. Mô hình toán của quá trình làm đá được thành lập như sau:

Lớp đá:

$$\frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s}{\partial r} \quad (1)$$

$$r = R(t); T_s = T_f, k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = \rho_s \Delta H \frac{dR}{dt} \quad (2a)$$

$$r = r_i; T_s = T_w, k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \quad (2b)$$

$$t = 0; R(0) = r_i \quad (2c)$$

Vách ống:

$$\frac{1}{\alpha_w} \frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_w}{\partial r} \quad (3)$$

$$r = r_i; T_s = T_w, k_s \frac{\partial T_s}{\partial r} = k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \quad (4a)$$

$$r = r_0; -k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} = h(T_w - T_\infty) \quad (4b)$$

$$t = 0; T_w = T_\infty \quad (4c)$$

Thực hiện biến đổi không thứ nguyên bằng cách đặt các biến như sau:

$$\hat{t} = \frac{\alpha_s t}{(r_0 - r_i)^2} = \frac{\alpha_s t}{D^2} \quad (5)$$

$$\hat{r}_s = \frac{r - r_i}{r_i - R(t)} \quad (6)$$

$$\hat{r}_w = \frac{r - r_i}{r_0 - r_i} \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{r_i - R(t)}{r_0 - r_i} = \frac{r_i - R(t)}{D} \quad (8)$$

$$\theta_s = \frac{T_s - T_\infty}{T_f - T_\infty} \quad (9)$$

$$\theta_w = \frac{T_w - T_\infty}{T_f - T_\infty} \quad (10)$$

Khi đó các phương trình truyền nhiệt và các điều kiện biên ở dạng không thứ nguyên như sau:

Lớp đá:

$$\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial \hat{r}_s^2} + \frac{\varphi}{\hat{r}_s \varphi + R_r} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}_s} + \hat{r}_s \varphi \frac{d\varphi}{d\hat{t}} \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}_s} - \varphi^2 \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{t}} = 0 \quad (11)$$

$$\hat{r}_s = 0; \theta_s = \theta_w, \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}_s} - R_1 \varphi \frac{\partial \theta_w}{\partial \hat{r}_w} = 0 \quad (12a)$$

$$\hat{r}_s = -1; \theta_s = 1, \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}_s} + \frac{\varphi}{Ste} \frac{d\varphi}{d\hat{t}} = 0 \quad (12b)$$

$$\hat{t} = 0; \varphi = 0 \quad (12c)$$

Vách ống:

$$\frac{\partial^2 \theta_w}{\partial \hat{r}_w^2} + \frac{1}{\hat{r}_w + R_r} \frac{\partial \theta_w}{\partial \hat{r}_w} - \frac{R_2}{R_1} \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{t}} = 0 \quad (13)$$

$$\hat{r}_w = 0; \theta_s = \theta_w, \frac{\partial \theta_s}{\partial \hat{r}_s} - R_1 \varphi \frac{\partial \theta_w}{\partial \hat{r}_w} = 0 \quad (14a)$$

$$\hat{r}_w = 1; \frac{\partial \theta_w}{\partial \hat{r}_w} + Bi \theta_w = 0 \quad (14b)$$

$$\hat{t} = 0; \theta_w = 0 \quad (14c)$$

Có thể thấy, điều kiện biên di chuyển (2b) ở $r=R(t)$ được chuyển sang điều kiện biên cố định (12b) ở $\hat{r}_s=-1$. Các hệ số không thứ nguyên trong các phương trình trên là:

$$R_1 = \frac{k_w}{k_s} \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{\rho_w c_{pw}}{\rho_s c_{ps}} \quad (16)$$

$$Ste = \frac{c_{ps}(T_f - T_\infty)}{\Delta H} \quad (17)$$

$$Bi = \frac{hD}{k_w} \quad (18)$$

$$R_r = \frac{r_i}{r_o - r_i} = \frac{r_i}{D} \quad (19)$$

Các phương trình trên được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Sai phân hệ phương trình trên, ta được hệ phương trình đại số tuyến tính dạng ba đường chéo. Do đó, thuật toán Thomas được sử dụng để giải hệ phương trình đại số này. Các chương trình tính toán được viết dùng MATLAB, với sai số cho phép được xác định trước. Để tuyến tính hóa các phương trình, hai đại lượng sau cần phải xấp xỉ sai phân hữu hạn:

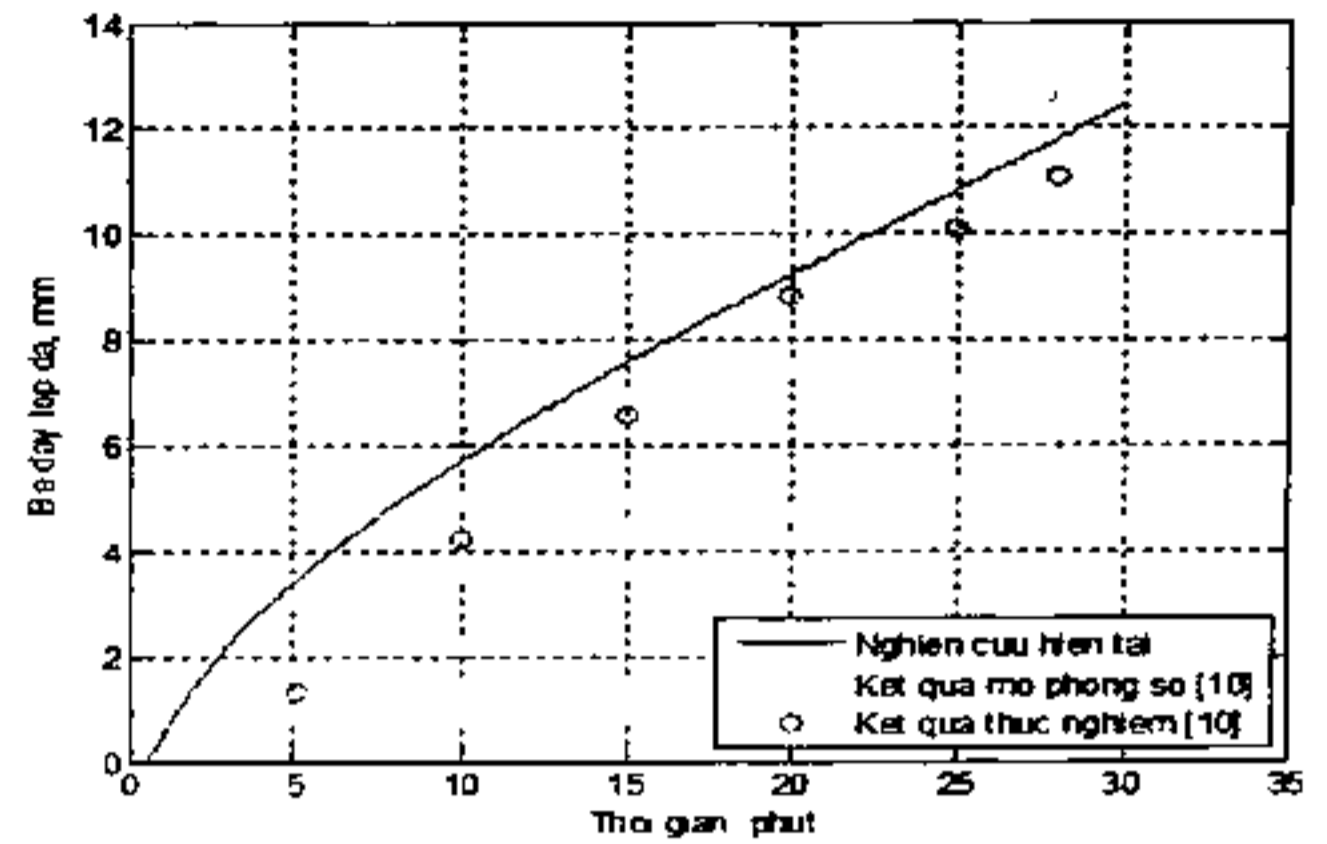
$$\varphi = \frac{\varphi_i^{n+1} + \varphi_i^n}{2} \quad (20)$$

$$\frac{d\varphi}{d\hat{t}} = \frac{\varphi_i^{n+1} - \varphi_i^n}{\Delta \hat{t}} \quad (21)$$

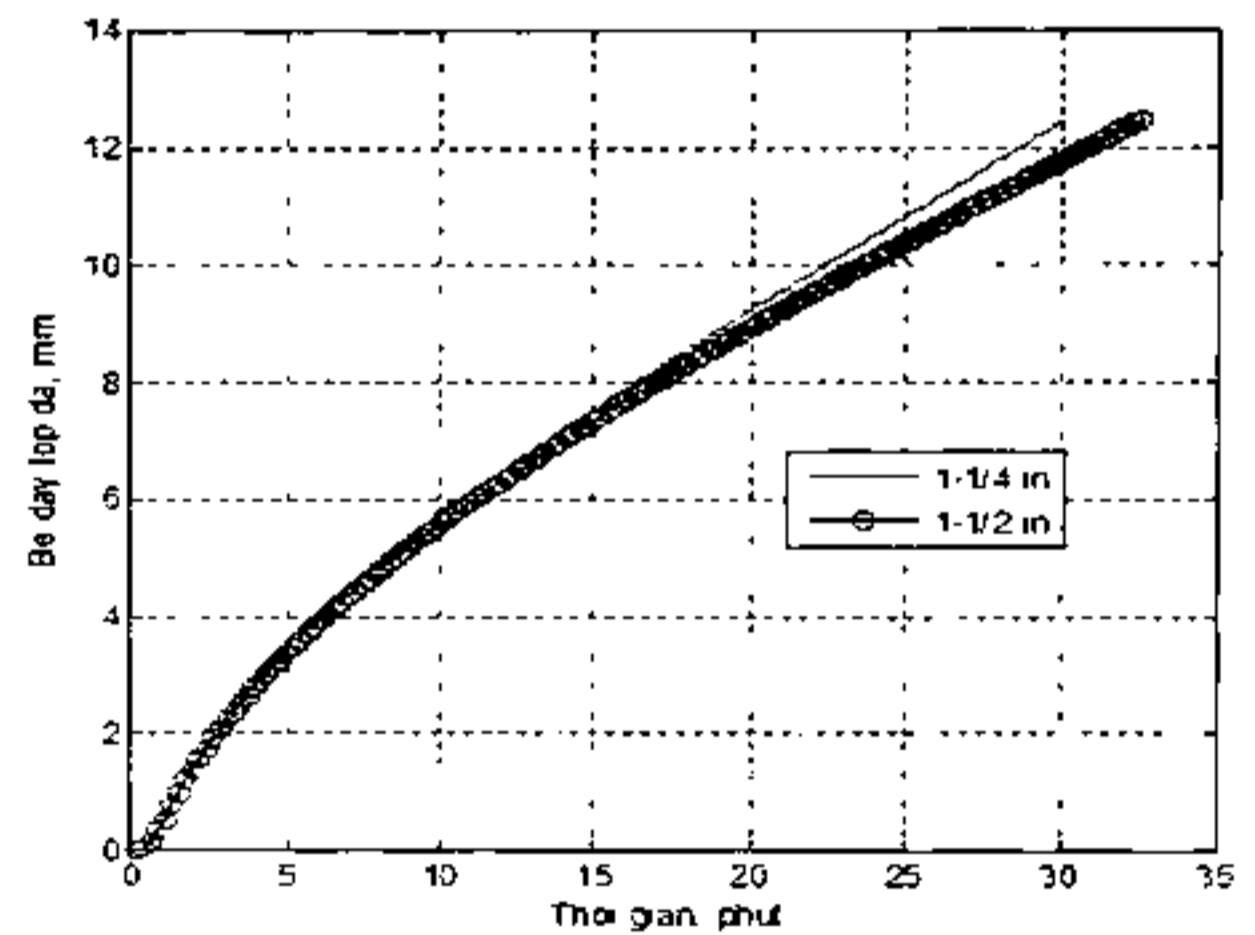
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 2, trình bày so sánh kết quả mô phỏng từ hệ phương trình trên với kết quả mô phỏng và thực nghiệm từ nghiên cứu trước [10]. Từ đồ thị, ta có thể thấy kết quả từ nghiên cứu này gần kết quả thực nghiệm hơn so với kết quả mô phỏng khác [10]. Điều này khẳng định tính chính xác của chương trình tính toán ở trên. Hình 3, trình bày ảnh hưởng của đường kính ống đến thời gian làm đá. Có thể thấy, với cùng bề dày (12,5 mm) ống đường kính 1-1/2 in tốn thời gian hơn khoảng 2,5 phút so với ống 1-1/4 in. Hình 3, trình bày ảnh hưởng của thông số R1 đến thời gian làm đá. Thông số

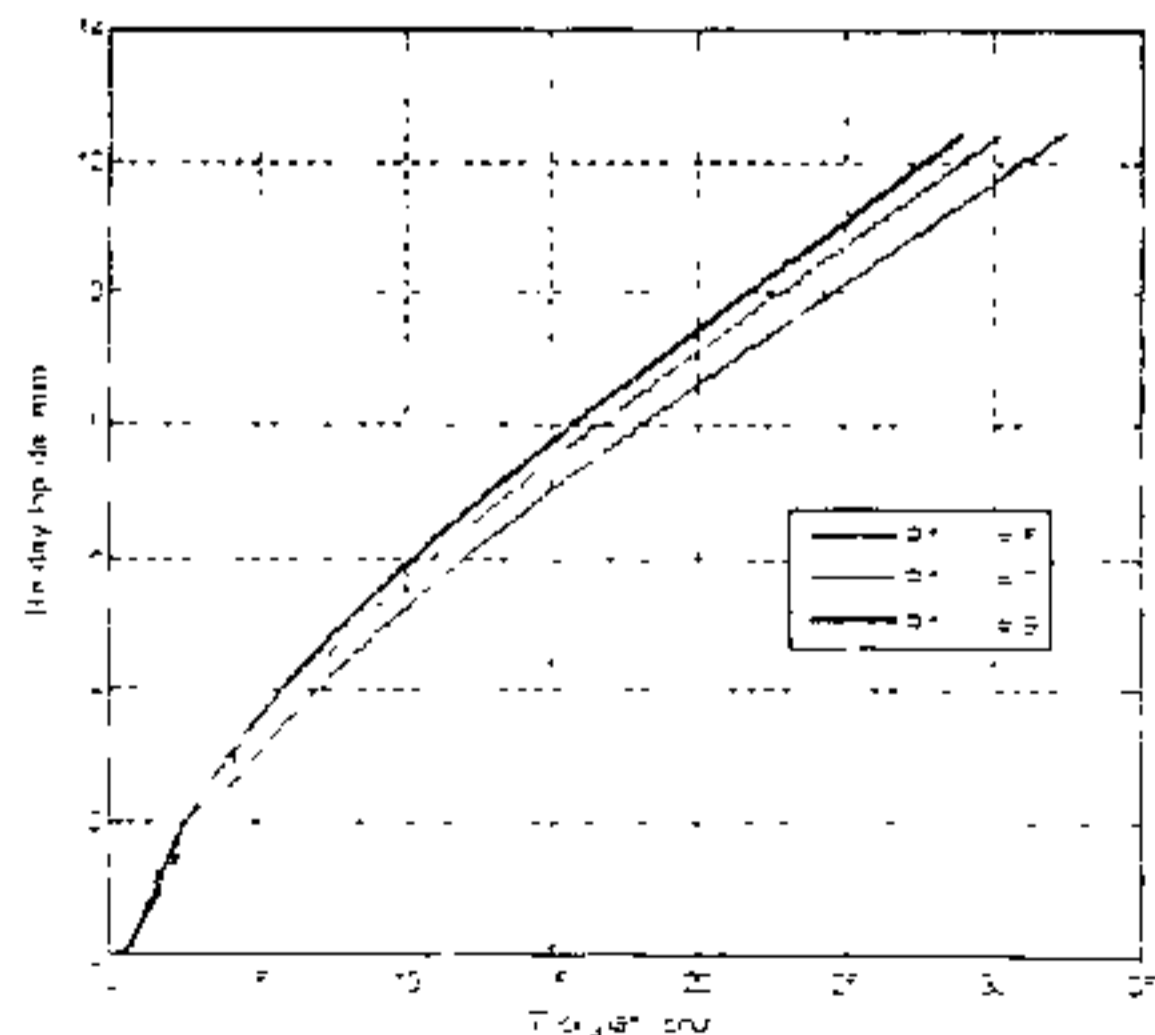
R1 được định nghĩa trong phương trình 15 thể hiện khả năng dẫn nhiệt của vật liệu làm ống. R1 càng lớn thời gian làm đá càng nhanh như đã chỉ ra trong hình 4.



Hình 2. So sánh kết quả

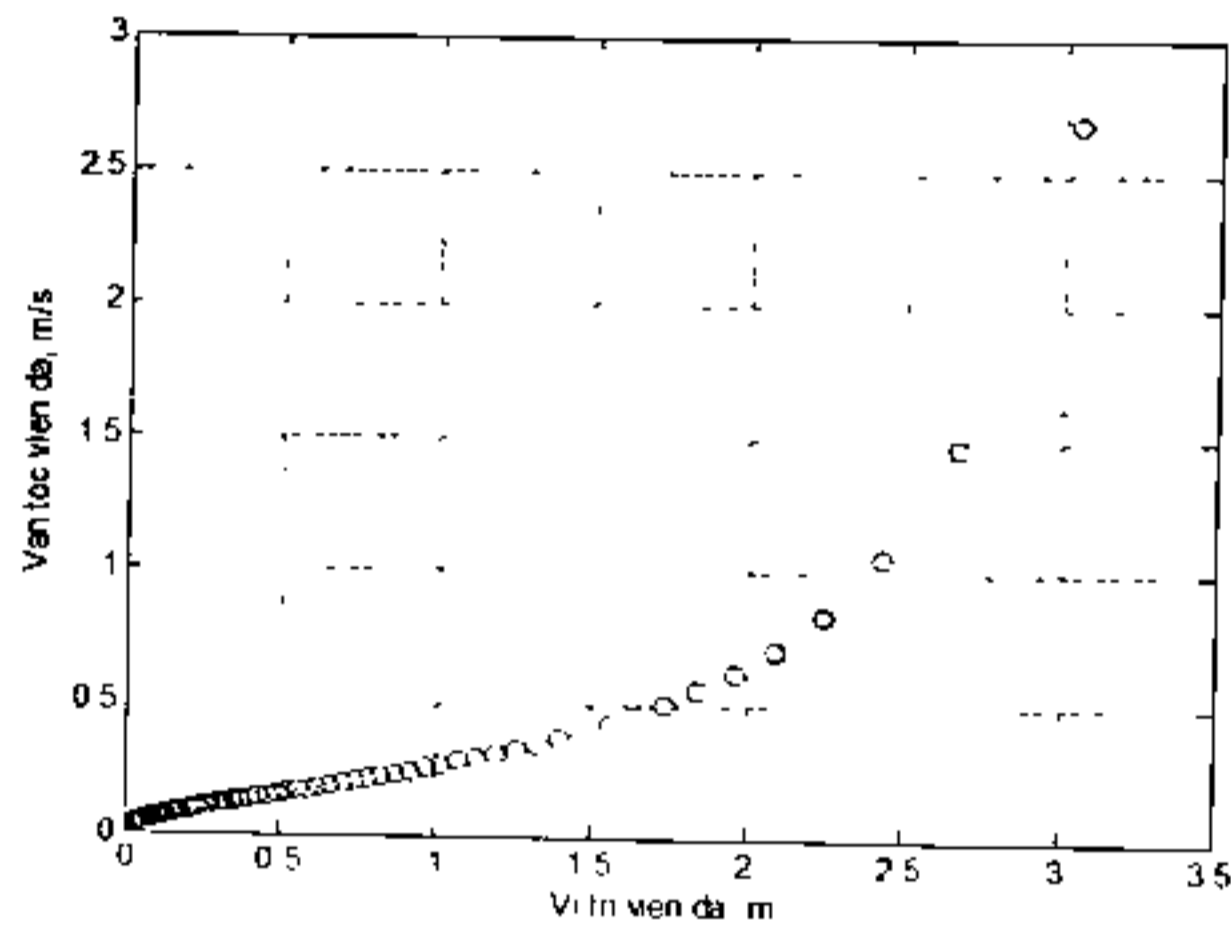


Hình 3 Ảnh hưởng của đường kính ống

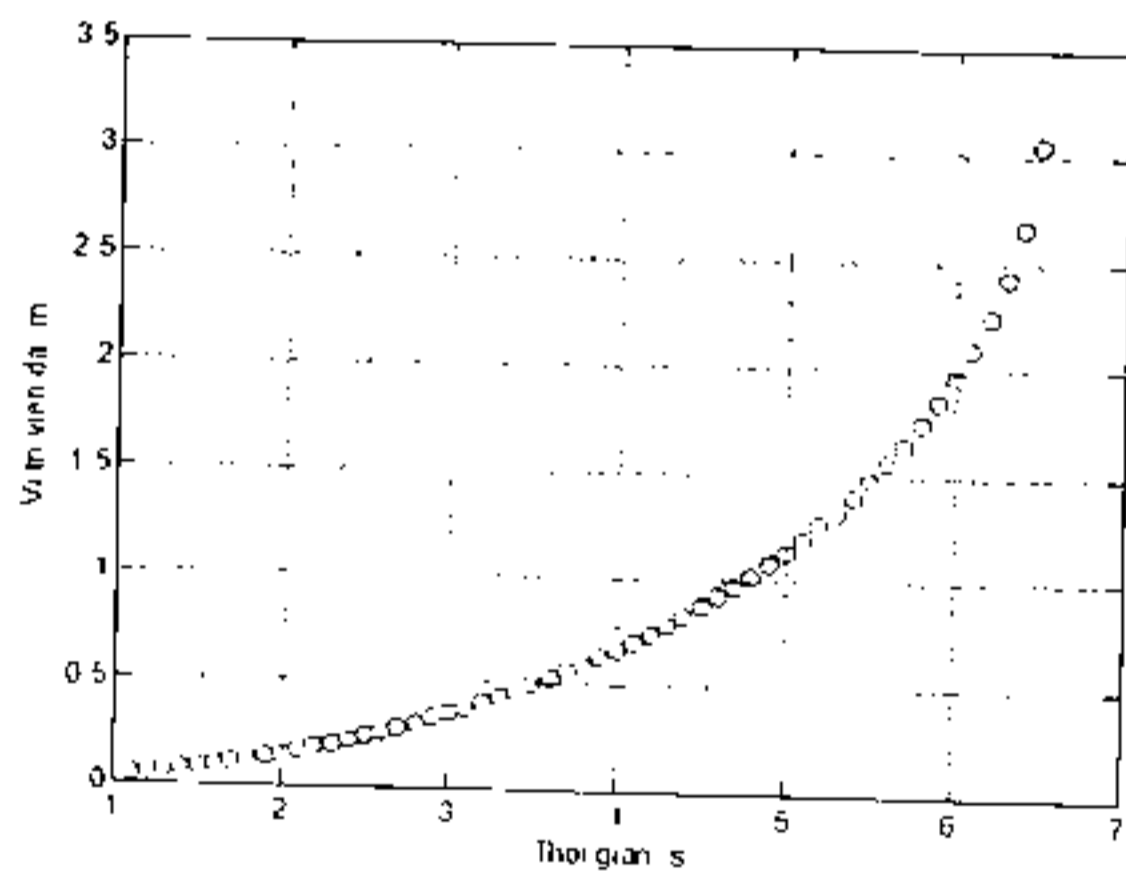


Hình 4 Ảnh hưởng của vật liệu làm ống

Hình 5 và 6, trình bày các kết quả mô phỏng động học quá trình xả đá. Kết quả mô phỏng để đánh giá thời gian xả đá nhằm mục đích điều khiển máy đá hay tối ưu hóa quá trình làm đá. Từ hình 5 có thể thấy tốc độ viên đá rơi càng nhanh theo vị trí rơi. Điều này là do ảnh hưởng của rơi tự do của cây đá trong trọng trường. Đến hết tháp đá vận tốc viên đá lên đến hơn 2,5 m/s. Hình 6 cho thấy sau khoảng 6,5 giây kể từ khi đá rơi thì cây đá rơi hết tháp đá.



Hình 5. Vận tốc cây đá ở các vị trí khi rơi



Hình 6. Thời gian cây đá 3m rơi hết tháp đá

4. KẾT LUẬN

Mô phỏng số để khảo sát ảnh hưởng của các thông số trong quá trình sản xuất nước đá viên đã được trình bày trong bài báo này. Hệ phương trình vi phân được chuyển sang dạng không thứ nguyên được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Kết quả cho thấy độ

chính xác của mô phỏng so với thực nghiệm. Các kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của đường kính ống, hệ số dẫn nhiệt của ống và mô phỏng động học quá trình xả đá được trình bày và phân tích. Nội dung bài báo được mong đợi để cung cấp các công cụ cho quá trình thiết kế và tối ưu hóa máy đá viên tinh khiết. ❖

Ngày nhận bài: 23/4/2017

Ngày phản biện: 15/5/2017

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lee, A.H.W. and J.W. Jones, 1996, "Modeling of an ice-on-coil thermal energy storage system," *Energy Conversion and Management*, Vol. 37, No. 10: pp. 1493~1507.
- [2]. Sasaguchi, K., K. Kusano, and R. Viskanta, 1997, "A numerical analysis of solid-liquid phase change heat transfer around a single and two horizontal, vertically spaced cylinders in a rectangular cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, No. 6, pp. 1343~1354.
- [3]. Buyruk, E., Fertelli, A. and Sonmez, N., 2009, "Numerical investigation for solidification around various cylinder geometries," *Journal of Scientific and Industrial Research*, Vol. 68, pp. 122~129.
- [4]. Ismail, K.A.R. and A.B. de Jesus, 2001, "Parametric study of solidification of PCM around a cylinder for ice-bank applications," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 24, No. 8, pp. 809~822.
- [5]. Ismail, K.A.R. and J.R. Henriquez, 2002, "Numerical and experimental study of spherical capsules packed bed latent heat storage system," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, No. 15, pp. 1705~1716.
- [6]. Ismail, K.A.R., J.R. Henriquez, and T.M. da Silva, 2003, "A parametric study on ice formation inside a spherical capsule," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 42, No. 9, pp. 881~887.
- [7]. Mohamed, M.M., 2005, "Solidification of phase change material on vertical cylindrical surface in holdup air bubbles," *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 3, pp. 403~411.
- [8]. Cliche, A. and M. Lacroix, 2006, "Optimization of ice making in laminar falling films," *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, No. 15-16, pp. 2260~2270.
- [9]. Zhao, J.D., N. Liu, and Y.M. Kang, 2008, "Optimization of ice making period for ice storage system with flake ice maker," *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 9, pp. 1623~1627.
- [10]. Tangthieng, C., 2011, "Effect of tube diameter on the specific energy consumption of the ice making process," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 5, pp. 701~707.