

Mô phỏng bằng hình ảnh 3D lò nung chảy thủy tinh Borosilicate chạy hoàn toàn bằng điện

Hai loại lò nung chảy thủy tinh hoàn toàn bằng điện 15T/d và 36t/d, được mô phỏng và phân tích bằng phần mềm ANSYS FLUENT 14.0 và cộng thêm mô hình bằng hình ảnh MHD. Sự phân bố mật độ năng lượng điện, phân bố nhiệt độ, và trường vận tốc của hai mô hình lò nung chảy thủy tinh này đã được phân tích. Mật độ năng lượng điện và nhiệt độ ban đầu tăng sau đó giảm từ giữa lò ra đến thành lò theo phương ngang. Xu hướng tương tự cũng được quan sát thấy từ mặt trên lò xuống đáy lò theo phương thẳng đứng. Sự phân bố nhiệt độ này tạo nên các dòng thủy tinh chảy tuần hoàn bên trong và bên ngoài trong lò nung chảy hoàn toàn bằng điện (sau đây gọi là lò thủy tinh điện). Người ta chứng minh được là tồn tại một mối quan hệ kết nối không ổn định giữa dòng chảy thủy tinh tuần hoàn bên ngoài và đường ống của lò điện 15t/d. Bằng chứng thực nghiệm của mối liên hệ này được trình bày bằng các hình ảnh sọc thủy tinh hình vòng cung của các mẫu sản phẩm ống thủy tinh tương ứng. Phân tích của chúng tôi làm bộc lộ một số lỗi thiết kế trong điều kiện làm việc của hai loại lò này. Các kết quả mô phỏng của hai lò này được so sánh.

I. Giới thiệu:

So sánh với thủy tinh nổi soda-lime-silica, thủy tinh borosilicate có các tính năng tuyệt vời về ổn định nhiệt độ, ổn định hóa học, đặc tính và tính chất cơ học, đặc tính quang học. Thủy tinh borosilicate có thị trường rộng lớn và có thể được sử dụng trong một số lĩnh vực mới có giá trị gia tăng cao. Việc sản xuất thủy tinh borosilicate có nhiều khó khăn về công nghệ do độ nhớt cao, nhiệt độ nóng chảy cao và tính dễ bay hơi của boron và **sự tách pha** của boron và silicon. Một lò nung chảy sử dụng điện hoàn toàn có thể khắc phục được những khó khăn này. Phần lớn sản phẩm thủy tinh borosilicate (chủ yếu là hình ống và hình que) được sản xuất bởi một lò thủy tinh điện, duy trì một tỷ lệ sản phẩm đạt chất lượng 88% đến 90%. Các sản phẩm thủy tinh borosilicate chịu ảnh hưởng của hình dạng lò, loại hình cung cấp điện, vị trí và sắp xếp các điện cực, và thậm chí cả độ dẫn điện của thủy tinh nóng chảy. Tuy nhiên, hầu hết các nhà nghiên cứu có ít kiến thức về phân bố mật độ năng lượng điện, phân bố nhiệt độ, và trường vận tốc trong lò thủy tinh, chúng đương nhiên sẽ làm phát sinh các vấn đề chất lượng trong sản xuất thủy tinh borosilicate. Do đó, sự đều đặn trong cung cấp nhiệt bằng điện, cơ chế nung chảy thủy tinh, và hướng dòng chảy thủy tinh nên được phân tích. Điều này góp phần rất lớn vào thiết kế lò điện quy mô lớn. Trong điều kiện đảm bảo chất lượng sản phẩm thủy tinh, mở rộng kích thước lò thủy tinh điện dự kiến sẽ cải thiện việc sử dụng nhiệt lượng trong quá trình sản xuất thủy tinh. Nghiên cứu này giúp nâng cao chất lượng sản phẩm thủy tinh sản xuất bằng lò thủy tinh điện và cải thiện việc sử dụng năng lượng nung nóng trong tất cả các lò nung chảy chạy bằng điện.

Các nghiên cứu về mô phỏng lò nung chảy bằng điện tập trung ở một số nhóm.

Austin và Bourne1 xuất bản một bài viết về mô phỏng 2D của một lò điện. Mô hình tính toán không gian hai chiều của quá trình nung chảy thủy tinh được nghiên cứu; những tác động của các cấu hình khác nhau của các điện cực được thảo luận.

Choudhary xây dựng một mô hình tính toán 3D để tính toán sự tỏa nhiệt theo định luật Jun, dòng chảy thủy tinh, và sự truyền nhiệt trong lò thủy tinh điện. Nhiệt độ của khối thủy tinh được quan sát thấy là rất giống nhau với nhiệt độ chênh lệch lớn ở gần **khu vực biên**. Các mô hình dòng chảy thủy tinh được tính toán, nhìn chung tương đối phức tạp với một số các vòng lặp chuyển động tuần hoàn.

Giessler và Thess trình bày một nghiên cứu tính toán không gian 3D của thủy tinh nung chảy trong lò nấu tròn nhỏ được nung nóng bởi hai điện cực hình que. Kết quả cho thấy rằng lực Lorentz cho ta một phương pháp mới để điều chỉnh các dòng đối lưu do nhiệt điều khiển của thủy tinh nóng chảy, dẫn đến một sự cải thiện có thể trong quá trình trộn.

Bezuidenhout và các đồng sự phát triển một mô hình khí động học tính toán 3D để nghiên cứu dòng lực bên trong của một lò hình tròn, sử dụng điện ba pha để nấu chảy các quặng của nhóm bạch kim. Mô hình này cung cấp một nền tảng cho các nghiên cứu mô hình trong tương lai, mà khi kết hợp với những tiến bộ nhanh chóng trong năng lực tính toán, có thể cải thiện sự hiểu biết về môi trường có nhiều tác động trong lò nung chảy bằng điện. Tuy nhiên, nên xác nhận thêm các kết quả này để có được sự tin tưởng hoàn toàn về kết quả của mô hình này.

Reynolds và Jones khảo sát một lò điện hồ quang DC, 2 điện cực bằng nghiên cứu các hình ảnh ban đầu về cách hai dòng hồ quang plasma xuất hiện trong lò này. Kết quả cho thấy quỹ đạo hồ quang đi theo một đường tròn, với bán kính cong tỷ lệ thuận với khoảng cách điện cực và gần như độc lập với sự biến động về điện như dòng điện.

Phần mềm ANSYS FLUENT 14.0 (ANSYS, Inc., Canonsburg, PA) đã được sử dụng trong nghiên cứu này để mô phỏng hai lò điện nung chảy thủy tinh borosilicate và khảo sát phân bố mật độ năng lượng điện, phân bố nhiệt độ, và trường vận tốc. Các quy định về đặc tính của tình trạng được nung chảy hoàn toàn của các dòng thủy tinh trong lò điện được xác định. Các kết quả mô phỏng hai lò được so sánh với nhau. Các nguyên nhân gây ra các khuyết tật sản phẩm cũng đã được thảo luận để tạo điều kiện cho sự phát triển công nghệ nung chảy bằng điện.

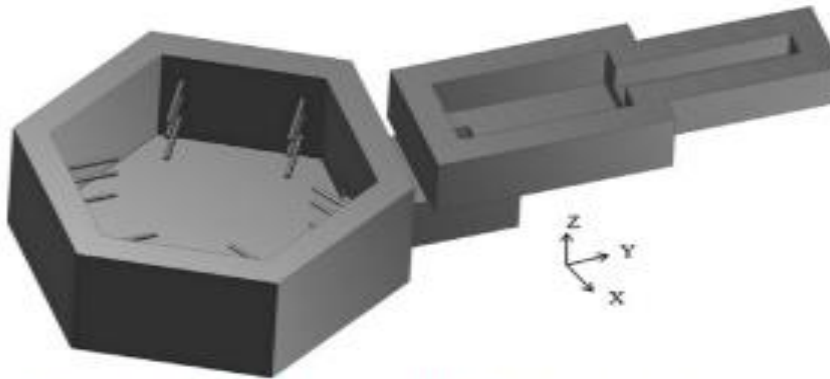


Fig. 1. Structural diagram of a 15t/d all-electric melting furnace.

Hình 1 : Sơ đồ cấu trúc lò thủy tinh điện 15t/d

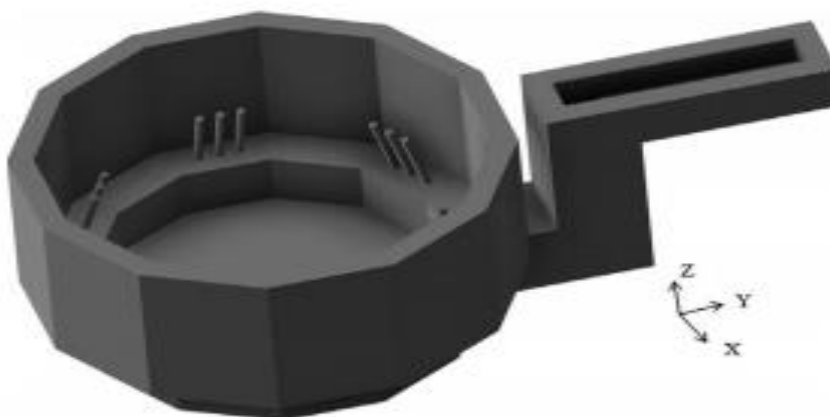


Fig. 2. Structural diagram of a 36t/d all-electric melting furnace.

Hình 2 : Sơ đồ cấu trúc lò thủy tinh điện 36t/d

II. Mô hình tính toán

(1) Đối tượng nghiên cứu

Hoạt động của cả hai lò thủy tinh điện 15t/d và 36t/d được sử dụng là các đối tượng nghiên cứu. Hình 1 trình bày một sơ đồ cấu trúc của lò thủy tinh điện 15t/d. Khu vực nung chảy có hình 6 góc. Diện tích của khu vực nung chảy là $8,0 \text{ m}^2$, và độ sâu 2,2 m. Lò này sử dụng nguồn điện ba pha. Hình dạng của các điện cực là **hình gậy**, và vật liệu là molybdenum. Tất cả các điện cực được lắp đặt trong lò theo phương ngang. Các điện cực được lắp đặt trong lò theo các bề mặt tiếp nối nhau, mỗi bề mặt có sáu điện cực. Đường kính của các điện cực là 75 mm, và phần điện cực nằm trong lò thủy tinh dài 600 mm.

Hình 2 trình bày một sơ đồ cấu trúc của lò 36t/d. Khu vực nung chảy có hình mười hai góc. Diện tích mặt cắt ngang ngang là $21,0 \text{ m}^2$ và chiều sâu là 3 m. Lò này cũng sử dụng nguồn cấp điện ba pha. Các điện cực molybdenum hình gậy, được lắp đặt dạng xiên trong lò điện này. Các điện cực được lắp đặt ở các bề mặt tiếp nối nhau. Đường kính của các điện cực là 100 mm, và phần điện cực nằm trong lò thủy tinh dài 1000 mm.

Hướng chiều rộng, chiều dài và chiều dọc được ký hiệu là X, Y, Z, tương ứng, trong cả hai loại lò.

(2) Mô hình giả thuyết

Các giả định đã được đơn giản hóa được sử dụng trong các phân tích như sau :

1. Thủy tinh trong lò là dòng chất lỏng Newton không nén được, và những tác động của các bọt thủy tinh sẽ được bỏ qua.
2. Tác động của khối thủy tinh nguội (một tác động giữ cho bề mặt khối thủy tinh bị nguội) được bỏ qua. Mặt tiếp giáp giữa khối thủy tinh nguội và lò thủy tinh được coi như điều kiện của vận tốc đầu vào.
3. Ảnh hưởng của vật liệu chịu lửa trên thành lò được bỏ qua và được coi như bề mặt bức xạ nhiệt.
4. Vật liệu chịu lửa được cách nhiệt
5. Tác động của vật liệu các điện cực và lớp vỏ làm mát bằng nước được bỏ qua và được coi như một khối đẳng thế.

III. Các điều kiện biên và đặc tính vật liệu

(1) Các điều kiện biên

Các điều kiện biên được tóm tắt trong bảng I :

Bảng I : Các điều kiện biên của mô hình

Table I. Boundary Conditions of the Model					
Yield (t/d)	Y_{F1}	15	Y_{F2}	36	
Vận tốc đầu vào	Inlet velocity (m/s)	v_{F1}	1.023×10^{-5}	v_{F2}	0.965×10^{-6}
Nhiệt độ đầu vào	Inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	T_{0F1}	1450	T_{0F2}	1450
Nhiệt độ đầu ra	Outlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	T_{1F1}	1250	T_{1F2}	1250
Áp lực đầu ra	Outlet pressure	P_{F1}	0	P_{F2}	0
Độ dày thành lò	Wall thickness (m)	t_{F1}	0.3	t_{F2}	0.3
Độ dẫn nhiệt	Thermal conductivity [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	λ_{F1}	5	λ_{F2}	5
Nhiệt độ dòng thủy tinh tự do	Free stream temperature ($^{\circ}\text{C}$)	T_{2F1}	100	T_{2F2}	100
Điện áp các điện cực	Voltage of the electrodes (V)	U_{F1}	L_1 350 L_2 350 L_3 250	U_{F2}	250

Trong bảng: F1 là lò điện 15t/d; F2 là lò điện 36t/d, L1,L2,L3 là các điện cực lớp trên, giữa và dưới của lò điện 15t/d

Theo giả thiết này, bề mặt trên cùng của khu vực nung chảy được coi là đầu vào. Và trên cơ sở khối lượng sản xuất và diện tích khu vực đầu vào, vận tốc đầu vào của lò điện 15t/d là $1,023 \times 10^{-5}$ m/s, và lò 36t/d là $0,965 \times 10^{-6}$ m/s. Hướng vận tốc là đi xuống. Nhiệt độ ban đầu của dòng thủy tinh nóng chảy chảy vào là 1450 °C.

Coi đường ống như là cổng xả có áp và giá trị là 0 Pa, nhiệt độ 1250 °C.

Độ dày thành lò là 0,3 m, độ dẫn nhiệt là 5 W(m K)^{-1} , và nhiệt độ dòng thủy tinh tự do là 100 °C. Trong lò thủy tinh điện 15t/d, điện áp của các điện cực lớp trên, giữa và dưới lần lượt là 350, 350, và 250 V. Trong lò thủy tinh điện 36t/d, điện áp của các điện cực là 350V.

(2) Các đặc tính vật liệu

Thành phần thủy tinh được thể hiện trong Bảng II. Đó là thành phần của thủy tinh Pyrex.

Các đặc tính nhiệt vật lý của thủy tinh nung chảy được tóm tắt trong bảng III. Độ dẫn nhiệt có hiệu quả và nhiệt dung riêng của thủy tinh nóng chảy là không đổi, trong khi mật độ, độ nhớt và độ dẫn điện của thủy tinh nóng chảy phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ.

Độ dẫn nhiệt có hiệu quả và nhiệt dung riêng được tính bằng phần mềm thương mại Glass Engineer System. Lập trình phần mềm dựa trên nhiều tham khảo, các tham khảo chính [6-8].

Độ nhớt được tính theo công thức:

$$\lg(\eta) = A + B/(T - T_0) \quad (1)$$

Trong đó η là độ nhớt, T_0 là hằng số, A và B dựa trên các thành phần thủy tinh, T là nhiệt độ của thủy tinh nóng chảy. A và B cũng được tính toán bằng phần mềm thương mại Glass Engineer System

Độ dẫn điện được tính theo công thức:

$$\lg 1/\nu = a + b/T \quad (2)$$

Trong đó ν là độ dẫn điện, a và b là dựa trên thành phần thủy tinh, T là nhiệt độ của thủy tinh nóng chảy.

Trong nghiên cứu này, a và b là các thông số được làm phù hợp từ đường cong nhiệt - điện trở trong tham khảo [9]. Thành phần thủy tinh là (% khối lượng): SiO₂ 80,5% , Na₂O 3,9% , K₂O 1.0% , CaO 0,4% , Al₂O₃ 2,0% , và B₂O₃ 11,9% .

Theo tham khảo [10], mật độ có thể được tính theo công thức

$$\rho = 2474,4 - 0.2022 T \quad (3)$$

Trong đó ρ là mật độ và T là nhiệt độ của thủy tinh nóng chảy .

Thành phần của thủy tinh (% khối lượng): SiO₂ (78-90%), B₂O₃ (10-13 %), CaO (0-2%), Al₂O₃ (1-3%), Na₂O + K₂O (5-10 %).

(3) Các giải pháp số học

Phần mềm Inventor được sử dụng để tạo ra mô hình tính toán cho lò thủy tinh. Phần mềm Gambit được sử dụng để tạo ra các điều kiện biên, trong đó đầu vào, đầu ra, thành lò và các kiểu điều kiện biên cụ thể khác được xác định. Các mô hình phụ thêm về sự chuyển động FLUENT và mô hình MHD đã được sử dụng như một chương trình giải để xác định các đặc tính vật liệu, điều kiện biên, các hàm UDF- User-defined function (nếu cần thiết), và các thông số khác. Các thuật ngữ vận tốc và áp lực được khớp nối với nhau bằng cách áp dụng các thuật

toán đơn giản hơn trong tất cả các vùng lò. Sơ đồ dòng chảy của mô phỏng này được thể hiện trong hình 3.

Bảng III : Các đặc tính nhiệt vật lý của thủy tinh nung chảy

Table III. Thermophysical Properties of the Molten Glass⁶⁻¹⁰

Physical property	Units	Value
Mật độ	Density	kg/m^3
Độ dẫn nhiệt	Efficient thermal conductivity	$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$
Độ nhớt	Viscosity	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
Nhiệt dung riêng	Specific heat	$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
Độ dẫn điện	Electric conductivity	S/m

$\rho = 2474.4 - 0.20221T$
100
$\text{Lg}(\eta) = A + B/(T - T_0)$ $A = -4.4807, B = 6416.7631,$ $T_0 = 270.92$
1006
$\text{Lg}1/\nu = a + b/T$ $a = 0.2546, b = 1288.3865$

Hình 3 : Sơ đồ dòng chảy của giải pháp mô hình

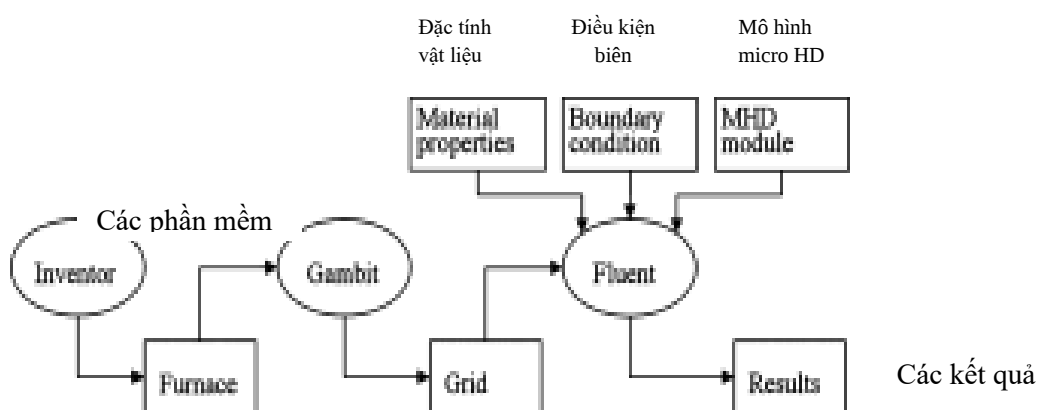


Fig. 3. Flow diagram of model solution.

IV. Các kết quả mô phỏng của lò điện 15t/d

(1) Phân bố mật độ năng lượng điện

Mật độ năng lượng điện được định nghĩa là nhiệt lượng Joule được tạo ra bằng năng lượng điện trong mỗi đơn vị thể tích trong một đơn vị thời gian. Hình 4 cho thấy phân bố mật độ năng lượng điện trong các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh. Các mã màu là các giá trị logarit của mật độ năng lượng điện. Hình 4 (a) - (d) là các mặt cắt ngang ở các lớp điện cực trên, giữa, và dưới qua tâm điện cực và ở trên đường ống, tương ứng; Hình 4 (e) và (f) là các mặt cắt dọc ở tâm lò theo trục Y và ở tâm điện cực. Các số liệu cho thấy phân bố mật độ năng lượng điện là rất không đồng đều. Mật độ năng lượng điện cao nhất ở đầu của các điện cực lớp giữa gần bằng 10^8 W/m^3 , giảm còn 10^6 W/m^3 ở chân điện cực lớp giữa và giảm còn 10^5 W/m^3 ở thành lò. Mật độ năng lượng điện thấp nhất ở giữa lò = 1 W/m^3 . Các số liệu cũng cho thấy, mật độ năng lượng điện giảm mạnh với sự gia tăng khoảng cách tính từ các đầu điện cực. Mật độ năng lượng điện thấp hơn nhiều ở khu vực giữa lò so với khu vực gần các điện cực.

Do phân bố của các điện cực là không đồng đều, nên điện trường không đồng đều. Theo định luật Joule, năng lượng điện tỉ lệ thuận với điện trở dây dẫn và bình phương dòng điện. Sự phân bố điện trở của thủy tinh sẽ không đổi ở điều kiện làm việc ổn định. Định lý Gauss nói rằng các đường điện trường xuất phát từ các điện cực. Mật độ đường điện trường gần điện cực dày đặc; do đó, mật độ năng lượng điện cũng cao. Điều ngược lại sẽ đúng cho các khu vực ở xa các điện cực.

(2) Phân bố nhiệt độ

Hình 5 cho thấy sự phân bố nhiệt độ trong các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh. Các mã màu thể hiện các giá trị nhiệt độ. Bốn mặt cắt ngang có chiều cao khác nhau (1,6, 1,2, 0,5 và 0,3 m) theo hướng dọc theo chiều cao của lò được đánh dấu (a), (b), (c), (d). Hình 5 cho thấy các hình thức chung của phân bố nhiệt độ là giống nhau. Nhiệt độ ở các đầu điện cực là cao nhất bằng 1587 °C, 1.648 °C, 1.629 °C, và 1600 °C. Nhiệt độ giảm dần khi càng cách xa các điện cực. Các đường cong đẳng nhiệt là gần giống đường tròn. Ban đầu nhiệt độ tăng và sau đó giảm từ giữa lò ra đến thành lò, vì mật độ năng lượng điện ở gần các điện cực theo phương nằm ngang là cao, trong khi mật độ năng lượng điện thấp ở khu vực giữa lò (do ở xa các điện cực). Thành lò hấp thụ một lượng nhiệt và, do đó, nhiệt độ của thủy tinh nóng chảy gần thành lò thấp. Như thể hiện trong hình 5, chênh lệch nhiệt độ cao nhất trong mỗi mặt cắt ngang (a), (b), (c) và (d) là 30 °C, 80 °C, 60 °C và 40 °C.

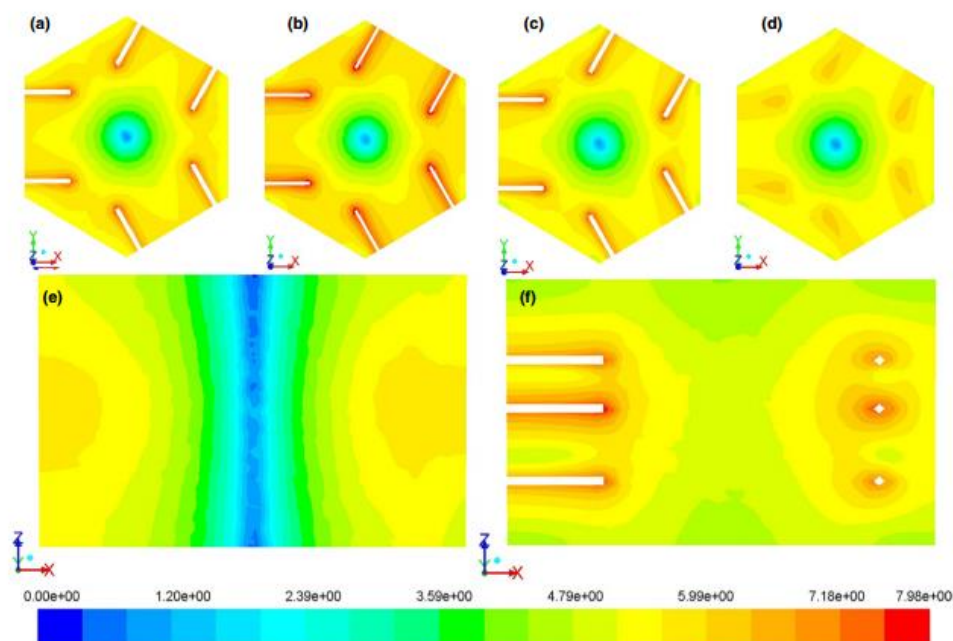
Hình 5 (e) và (f) là các mặt cắt dọc theo trục Y qua tâm lò và cắt qua tâm điện cực. Nhiệt độ ban đầu tăng và sau đó giảm từ đỉnh đến đáy lò. Nhiệt độ cao nhất (1648 °C) là ở dưới các điện cực ở lớp giữa.

Quá trình thủy tinh tan chảy trong lò bao gồm việc phân hủy silicate, sự hình thành của thủy tinh nóng chảy, tinh lọc thủy tinh tan chảy, đồng nhất hóa, và làm mát. Phân hủy silicat và hình thành thủy tinh nóng chảy xảy ra trong vùng lò có nhiệt độ thấp. Đó là quá trình mà trong đó khối thủy tinh được nung và nóng chảy thành thủy tinh nóng chảy. Trong suốt quá trình phân hủy silicate, một loạt các thay đổi vật lý và hóa học xảy ra, và phản ứng pha rắn chính được hoàn thành với một số lượng lớn khí thoát ra. Phần chất rắn tạo thành thủy tinh nóng chảy khi nhiệt độ tăng. Ở đây vẫn còn tồn tại rất nhiều bọt và sọc, thành phần và đặc tính hóa học không đồng đều. Tuy nhiên, lượng lớn các bọt cần được thoát ra trong quá trình tinh lọc thủy tinh tan chảy. Việc loại bỏ bọt đòi hỏi thủy tinh có độ nhớt thấp; do đó, nó có thể được hoàn thành trong khu vực có nhiệt độ cao gần điểm nóng. Trong quá trình này việc loại bỏ bọt làm chuyển động thủy tinh nóng chảy và có một tác động đồng nhất hóa nhất định. Sau đó là quá trình đồng nhất hóa. Do có sự chuyển dịch do nhiệt của thủy tinh nóng chảy và sự khuếch tán qua lại, sọc dần mất đi, thành phần hóa học của thủy tinh và chỉ số khúc xạ sẽ tiến tới đồng nhất. Thủy tinh chảy ra khỏi lò trong quá trình đồng nhất hóa, và nhiệt độ sẽ thấp hơn so với trong quá trình tinh lọc thủy tinh nóng chảy. Trong quá trình nung chảy thủy tinh, nhiệt độ tăng cao bằng nhiệt độ của quá trình tinh lọc thủy tinh nóng chảy và sau đó giảm đến nhiệt độ của quá trình tạo dạng. Không có bất kỳ ngọn lửa nung nóng nào trong lò thủy tinh điện; nhiệt được tạo ra trực tiếp từ các điện cực thông qua công nghệ làm nóng chảy theo chiều thẳng đứng. Mô phỏng của phân bố nhiệt dọc theo chiều cao của lò là phù hợp với điều kiện thực tế.

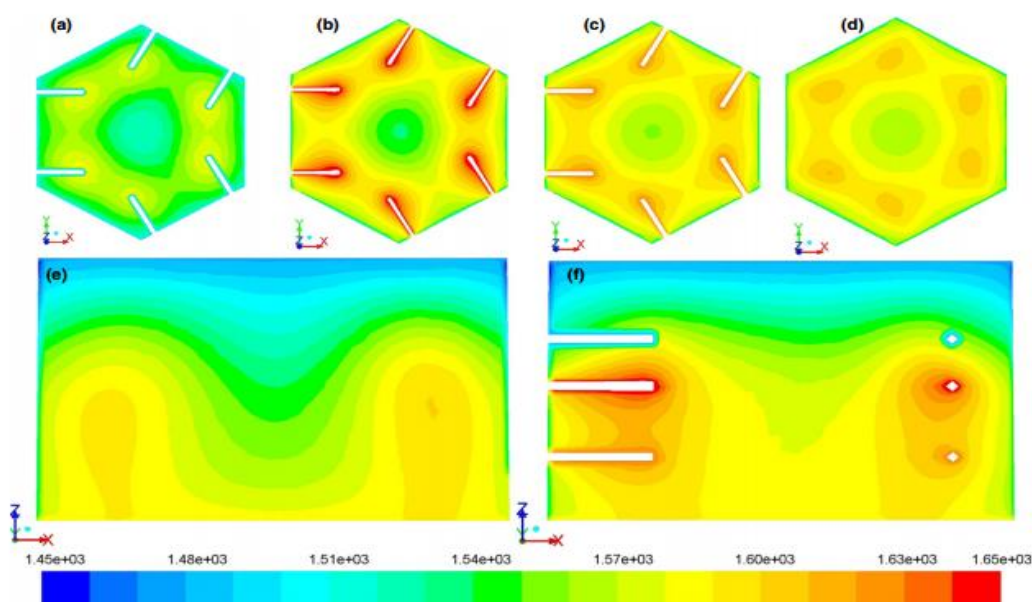
(3) Trường vận tốc của thủy tinh

Hình 6 cho thấy phim chụp vận tốc theo trục Z ở các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh. Hình 6 (a) - (d) là các mặt cắt ngang ở lớp điện cực trên, giữa và dưới qua tâm điện cực và ở trên đường ống. Hình 6 (e) và (f) cho thấy các mặt cắt dọc ở tâm lò theo trục Y và cắt ở tâm điện cực. Các mã màu cho thấy giá trị vận tốc. Các đường màu đen trong các hình này là đường giá trị = 0. Các giá trị âm thể hiện dòng chảy hướng xuống dưới, và giá trị dương thể hiện dòng chảy hướng lên trên. Như thể hiện trong hình 6 (a) - (d), thủy tinh gần thành lò và

ở vùng giữa lò cho thấy một dòng thủy tinh chảy xuống, trong khi đó vùng gần các điện cực cho thấy một dòng thủy tinh chảy hướng lên trên.



Hình 4 : Phim chụp phân bố mật độ năng lượng điện trong các mặt cắt ngang khác nhau của lò thủy tinh. (a) $z = 1,6$ m (qua tâm điện cực lớp trên); (b) $z = 1,2$ m (qua tâm điện cực lớp giữa); (c) $z = 0,5$ m (qua tâm điện cực lớp dưới); (d) $z = 0,3$ m (trên đường ống); (e) $x = 0,875$ (qua tâm lò dọc theo trục Y) m; (f) $x = 0,3$ m (qua tâm điện cực).



Hình 5 : Phim chụp phân bố nhiệt độ trong mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh. . (a) $z = 1,6$ m (qua tâm điện cực lớp trên); (b) $z = 1,2$ m (qua tâm điện cực lớp giữa); (c) $z = 0,5$ m (qua tâm điện cực lớp dưới); (d) $z = 0,3$ m (trên đường ống); (e) $x = 0,875$ (khu vực giữa lò dọc theo trục Y) m; (f) $x = 0,3$ m (tâm điện cực). Đơn vị: $^{\circ}\text{C}$.

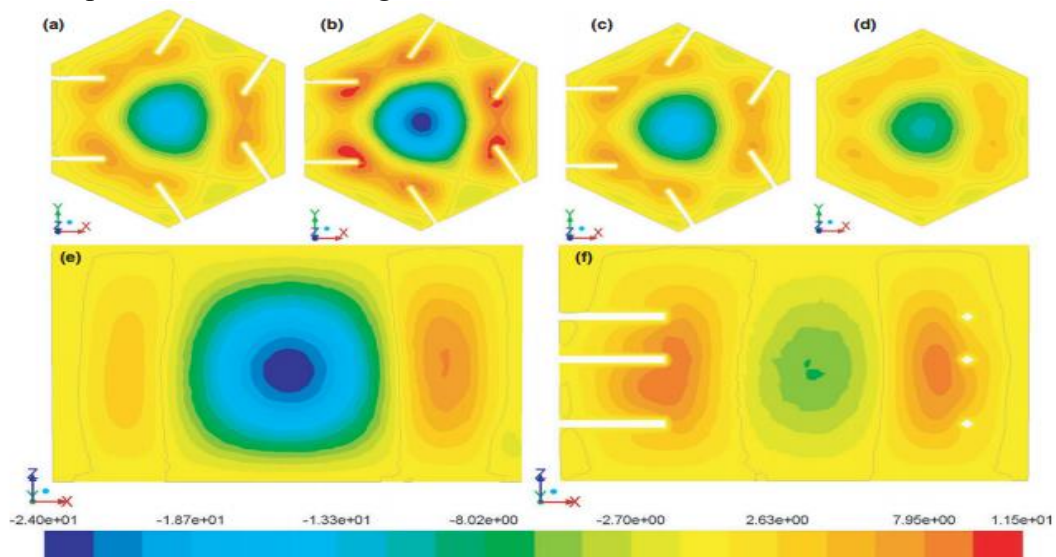
Hình 7 trình bày một sơ đồ vector của mặt cắt qua tâm lò dọc theo chiều dài của lò. Hai dòng chuyển động tuần hoàn cơ bản xuất hiện trong lò thủy tinh. Dòng bên trái chảy theo chiều kim đồng hồ, dòng bên phải ngược chiều kim đồng hồ. Hai dòng tuần hoàn gặp nhau ở tâm lò theo phương thẳng đứng. Dòng tuần hoàn gồm một dòng hướng lên trên, và một dòng hướng xuống dưới. Dòng tuần hoàn bao gồm một dòng hướng lên gần các điện cực và một dòng chảy xuống ở khu vực tâm lò, được xác định là dòng tuần hoàn bên trong nghiên cứu này. Dòng tuần hoàn gồm một dòng hướng lên trên gần các điện cực và một dòng chảy xuống gần thành lò được xác định là dòng tuần hoàn bên ngoài. Các kết quả mô phỏng cho thấy rằng vận tốc tối đa của dòng hướng lên trên là $4,56 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, nhanh hơn so với vận tốc đầu vào 400 lần. Vận tốc tối đa của dòng chảy xuống là $6,89 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, nhanh hơn so với vận tốc đầu vào 600 lần. Lò nung chảy chạy bằng điện có những sự đối lưu mạnh, và thành phần chính là dòng tuần hoàn bên trong.

Các dòng tuần hoàn trong các lò nung chảy chạy điện chủ yếu được tạo thành do sự chênh lệch nhiệt độ. Chênh lệch mật độ là do chênh lệch nhiệt độ do sự giãn nở vì nhiệt. Mật độ thấp (nhiệt độ cao) thủy tinh dịch chuyển lên và mật độ cao (nhiệt độ thấp) thủy tinh dịch chuyển xuống do trọng lực. Phân tích chỉ ra rằng, nhiệt độ thấp ở khu vực giữa lò và thành lò, nhiệt độ cao ở khu vực gần các điện cực, do đó tạo ra hai dòng tuần hoàn.

Điều kiện hoạt động của các dòng tuần hoàn là khác nhau dọc theo chiều dài của lò. Một bên của lò nối với đường ống. Trong nghiên cứu này, các dòng tuần hoàn được chia thành bốn phần (từ đầu đến cuối của lò). Các phần này được đánh dấu là I, II, III, và IV. Các dòng tuần hoàn I và IV là các dòng tuần hoàn bên ngoài, và các dòng tuần hoàn II và III là các dòng tuần hoàn bên trong (Hình. 8).

(4) Sự khớp nối giữa phân bố mật độ năng lượng điện, phân bố nhiệt độ và trường vận tốc

Hoạt động bình thường của lò thủy tinh là kết quả của sự tương tác giữa các trường. Do có trường vận tốc, mà thủy tinh nóng chảy nhiệt độ thấp, tạo thành bởi một lượng thủy tinh mới, chảy xuống từ khu vực giữa lò. Đây là một lý do khác làm cho nhiệt độ ở vùng giữa lò thấp hơn vùng gần các điện cực. Thủy tinh hấp thụ nhiệt và nhiệt độ dần tăng lên khi nó chảy xuống. Một phần thủy tinh chảy thẳng ra khỏi đường ống mang đi một số lượng nhiệt, trong khi một phần khác hòa với dòng tuần hoàn.



Hình 6 : Phim chụp vận tốc theo trục Z trong các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh. (a) $z = 1,6 \text{ m}$ (qua tâm điện cực lớp trên); (b) $z = 1,2 \text{ m}$ (qua tâm điện cực lớp giữa); (c) $z = 0,5 \text{ m}$ (qua tâm điện cực lớp dưới); (d) $z = 0,3 \text{ m}$ (trên đường ống); (e) $x = 0,875$ (qua tâm lò dọc theo trục Y) m; (f) $x = 0,3 \text{ m}$ (qua tâm điện cực). Đơn vị: m / h

Trong quá trình chuyển động tuần hoàn, nhiệt độ thủy tinh tăng lên khi đến gần các điện cực. Một phần nhiệt tỏa ra cho thủy tinh nhiệt độ thấp, và một phần nhiệt được lấy đi bởi thủy tinh chuyển động tuần hoàn và truyền cho thủy tinh ở nhiệt độ thấp. Do đó nhờ sự cân bằng tương tác của trường vận tốc và phân bố nhiệt độ mà lò thủy tinh có thể hoạt động ổn định. Không có mối quan hệ trực tiếp giữa phân bố mật độ năng lượng điện và trường vận tốc; chúng chịu ảnh hưởng gián tiếp của phân bố nhiệt độ. Phân bố mật độ năng lượng điện ảnh hưởng đến phân bố nhiệt độ, và mật độ thủy tinh nóng chảy thay đổi theo nhiệt độ, đến lượt nó, sẽ ảnh hưởng đến trường vận tốc. Trường vận tốc ảnh hưởng đến phân bố nhiệt độ, và tính dẫn điện bị ảnh hưởng trực tiếp bởi nhiệt độ, và đến lượt nó, ảnh hưởng đến phân bố mật độ năng lượng điện. Vì vậy, để có sự phân bố nhiệt độ và trường vận tốc hợp lý, quan trọng là phải sắp xếp các điện cực hợp lý và có được một phân bố mật độ năng lượng điện lý tưởng.

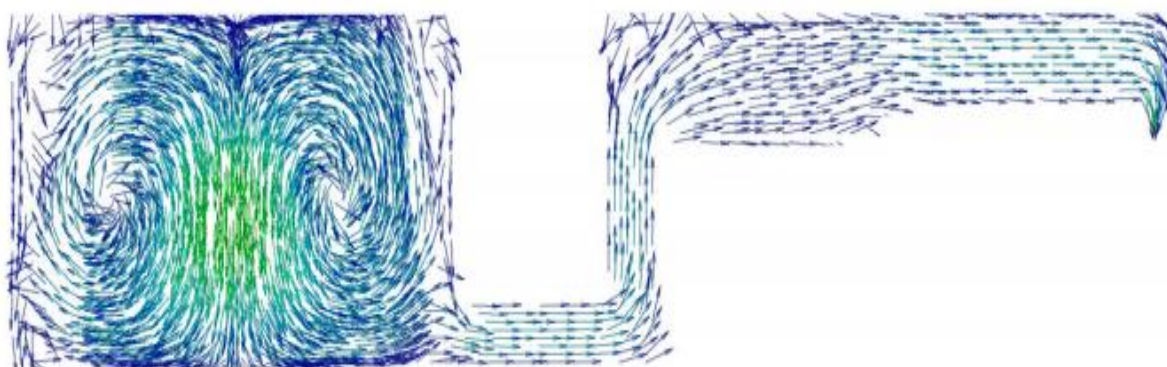


Fig. 7. Velocity vector diagram of $x = 0.875$ m (furnace center) section.

Hình 7. Sơ đồ vector vận tốc trong mặt cắt $x = 0.875$ (qua tâm lò)

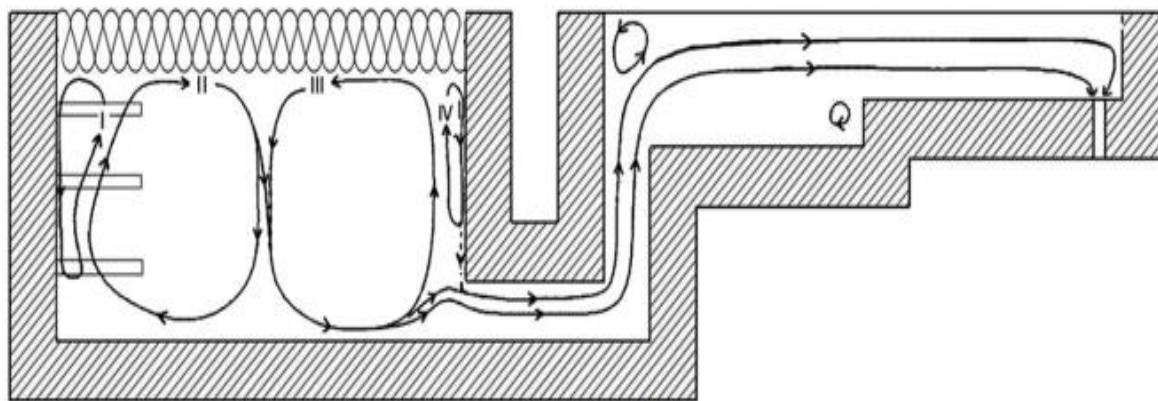


Fig. 8. Glass furnace flow diagram of the 15t/d all-electric melting furnace.

Hình 8: Sơ đồ dòng thủy tinh trong lò điện 15t/d

V. Các kết quả mô phỏng lò điện 36t / d

(1) Phân bố mật độ năng lượng điện

Hình 9 cho thấy phân bố mật độ năng lượng điện trong các mặt cắt ngang và dọc khác nhau (các mặt cắt qua tâm lò dọc theo chiều dài lò và qua tâm điện cực) của lò thủy tinh. Các mã màu thể hiện các giá trị logarit của mật độ năng lượng điện. Phân bố mật độ năng lượng điện

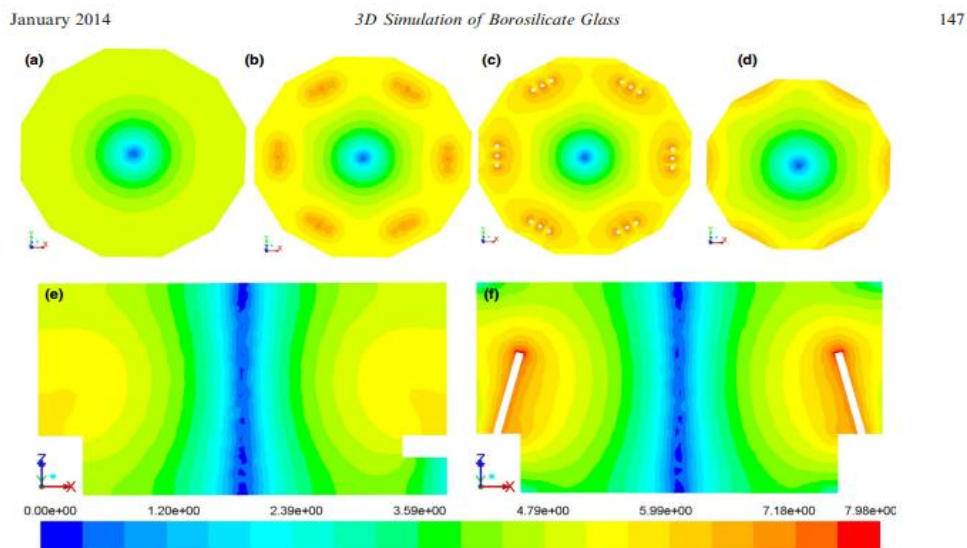
trong lò thủy tinh này tương tự như các lò nung chảy hoàn toàn bằng điện với điện cực được lắp đặt vào lò theo chiều ngang. So với các điện cực lắp đặt theo chiều ngang, điện cực lắp xiên gần với thành lò hơn, làm tăng đáng kể mật độ năng lượng điện. Tại thành lò mật độ năng lượng điện khoảng 10^6 W / m^3 . Do khu vực giữa lò nằm xa các điện cực, mật độ năng lượng điện thấp (khoảng 1 W / m^3). Các điện cực được lắp đặt xiên trong lò thủy tinh. Sự phân bố điện cực là tương đối đồng đều, do đó tạo ra phân bố mật độ năng lượng điện tương đối đồng đều.

(2) Phân bố nhiệt độ

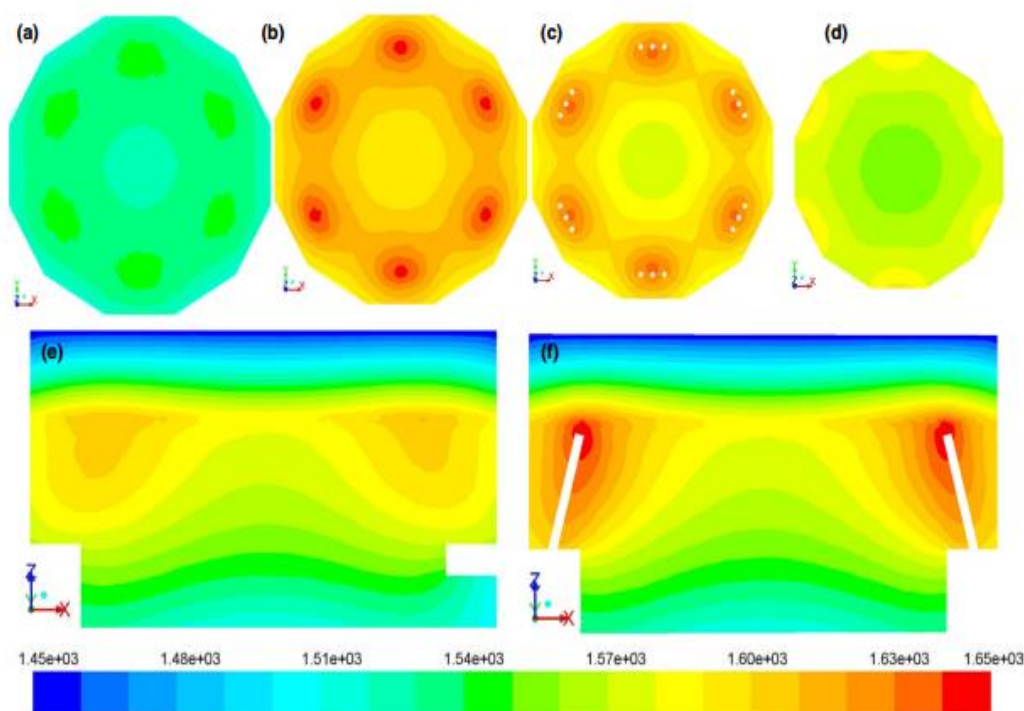
Hình 10 cho thấy sự phân bố nhiệt độ trong các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh này. Các mã màu thể hiện cho các giá trị nhiệt độ. Hình 10 (a) - (d) cho thấy bốn mặt cắt ngang theo chiều cao của lò. Các khoảng chiều cao là 2.4, 2.0, 1.5, và 0.8 m. Nhiệt độ phân bố tương tự như trong lò điện 15t / d. Nhiệt độ tại các đầu điện cực là cao nhất bằng 1620°C và giảm dần khi càng xa điện cực. Nhiệt độ tăng và sau đó giảm dần từ giữa lò ra thành lò. So với lò điện 15t / d, chênh lệch nhiệt độ cao nhất trong mỗi mặt cắt của lò điện 36t / d thấp hơn bằng 15°C , 50°C , 45°C và 20°C .

Hình 10(e) và (f) là các mặt cắt thẳng đứng qua tâm lò theo trục Y và qua tâm điện cực. Phân bố nhiệt độ tương tự như trong lò điện 15t / d. Ban đầu nhiệt độ tăng và sau đó giảm dần từ trên xuống dưới theo hướng thẳng đứng. Tuy nhiên, nhiệt độ cho thấy một phân bố gần như được phân lớp

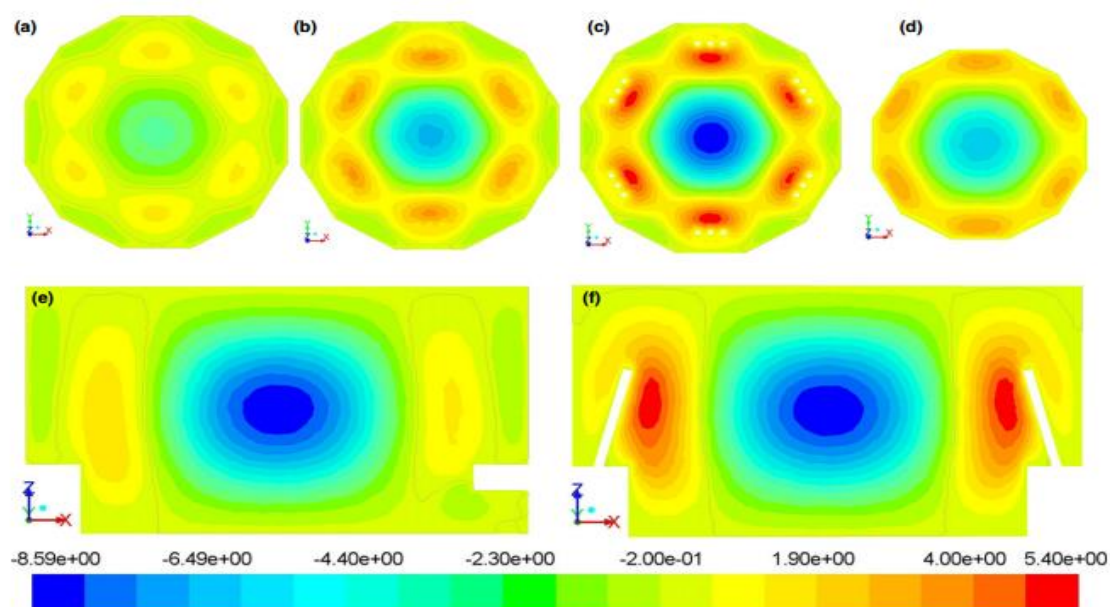
Phân bố nhiệt độ bị ảnh hưởng bởi phân bố mật độ năng lượng điện. Và bởi vì các điện cực được chèn xiên, mật độ năng lượng điện gần thành lò tăng lên, do đó nhiệt độ ở đó cũng tăng lên. Hình dạng mười hai góc của cấu trúc lò điện 36t / d giải quyết vấn đề góc chết và làm cho nhiệt độ gần thành lò tăng lên; do đó, chênh lệch nhiệt độ lớn nhất trong các mặt cắt ngang giảm. Phân bố điện cực và đường điện trường đồng đều theo phương thẳng đứng. Như vậy, giảm độ phức tạp về nhiệt độ và phân bố nhiệt độ theo lớp trở nên rõ ràng.



Hình 9 : Phim chụp phân bố mật độ năng lượng điện trong các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh điện. (a) $z = 2,4 \text{ m}$; (b) $z = 2,0 \text{ m}$; (c) $z = 1,5 \text{ m}$; (d) $z = 0,8 \text{ m}$ (phía trên phần co nhỏ lại); (e) $x = 2,56 \text{ m}$ (qua tâm lò theo trục Y); (f) $x = 2,56 \text{ m}$ (qua tâm điện cực).



Hình 10: Phim chụp phân bố nhiệt độ trong các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh. (a) $z = 2,4$ m; (b) $z = 2,0$ m; (c) $z = 1,5$ m; (d) $z = 0,8$ m (phía trên phần co nhỏ lại); (e) $x = 2,56$ m (qua tâm lò theo trục Y); (F) $x = 2,56$ m (qua tâm điện cực). Đơn vị: $^{\circ}\text{C}$.



Hình 11 : Phim chụp vận tốc trong các mặt cắt khác nhau của lò thủy tinh. (a) $z = 2,4$ m; (b) $z = 2,0$ m; (c) $z = 1,5$ m; (d) $z = 0,8$ m (phía trên phần co nhỏ lại); (e) $x = 2,56$ m (qua tâm lò theo trục Y); (F) $x = 2,56$ m (qua tâm điện cực). Đơn vị: m/h

(3) Trường vận tốc thủy tinh

Hình 11 cho thấy phim chụp vận tốc theo trục Z của các mặt cắt khác nhau ở khu vực nung chảy thủy tinh. Các mã màu thể hiện các giá trị vận tốc. Các đường màu đen trong hình là đường giá trị 0. Giá trị âm cho thấy vận tốc hướng đi xuống, và giá trị dương cho thấy vận tốc hướng lên. Hình 11 (a) - (d) cho thấy bốn mặt cắt ngang theo chiều cao của lò với các khoảng chiều cao là 2.4, 2.0, 1.5, và 0.8 m, tương ứng. Trong lò có một dòng chảy xuống gần thành lò và vùng giữa lò, trong khi có một dòng chảy lên trên ở gần các điện cực. Tương tự như lò điện 15t/d, lò điện 36t/d cũng có hai dòng thủy tinh tuần hoàn.

Hình 12 cho thấy các dòng tuần hoàn được chia thành bốn phần từ đầu đến cuối của lò; các phần được đánh dấu là I, II, III, và IV. Hình 11 (e) và (f) là các mặt cắt theo chiều dọc. Một dòng chảy xuống xuất hiện ở gần thành lò. Tuy nhiên, phần co nhỏ lại ở trên đường ống tách dòng chảy IV ra khỏi đường ống. Trong trường hợp này, hỗn hợp vật liệu không tan chảy hoàn toàn hoặc vật liệu chịu lửa bị ăn mòn bị ngăn không cho chảy trực tiếp vào đường ống và ảnh hưởng xấu đến chất lượng của các sản phẩm thủy tinh. Sự khớp nối giữa phân bố mật độ năng lượng điện, phân bố nhiệt độ, và trường vận tốc được mô tả trong phần 4.4.

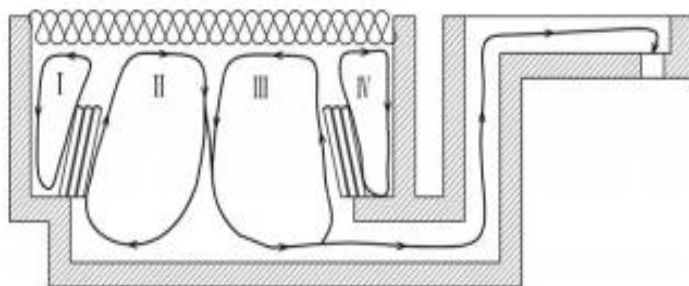


Fig. 12. Glass furnace flow diagram of the 36t/d all-electric melting furnace.

Hình 12 : Sơ đồ dòng chảy thủy tinh trong lò điện 36t/d

VI. So sánh và phân tích

(1) So sánh các phân bố trường vật lý

Phân bố điện cực và cách thức chèn điện cực vào trong lò điện làm cho phân bố mật độ năng lượng điện không đồng đều. Việc so sánh hai lò điện cho thấy một số đặc điểm của phân bố mật độ năng lượng điện. Tại khu vực thành lò và giữa lò, mật độ năng lượng điện thấp hơn nhiều so với khu vực xung quanh các điện cực. Theo phương ngang, mật độ năng lượng điện tăng và sau đó giảm dần từ giữa lò ra thành lò. Theo hướng thẳng đứng, nó tăng và sau đó giảm từ trên xuống dưới.

Các đặc tính tương tự được quan sát thấy trong phân bố nhiệt độ như là một kết quả của phân bố mật độ năng lượng điện và trường vận tốc. Theo chiều ngang, nhiệt độ ban đầu tăng và sau đó giảm dần từ giữa lò ra thành lò. Theo hướng thẳng đứng, nhiệt độ tăng và sau đó giảm từ trên xuống dưới. Điểm nóng nằm ở giữa lò và gần các điện cực; Tuy nhiên, chiều cao điểm nóng là khác nhau trong hai lò.

Chênh lệch nhiệt độ bên trong lò thủy tinh ảnh hưởng lớn đến trường vận tốc. Các đặc tính phân bố nhiệt độ theo chiều ngang gây ra các dòng chảy tuần hoàn bên trong và bên ngoài. Các dòng chảy tuần hoàn được chia thành bốn phần (I, II, III, và IV) từ đầu đến cuối của lò trong mặt cắt qua tâm lò. Các dòng chảy tuần hoàn I và IV là các dòng tuần hoàn bên ngoài, trong khi các dòng II và III là các dòng tuần hoàn bên trong.

Các mô phỏng vật lý của lò điện của Stanek cho thấy có các dòng tuần hoàn bên trong và bên ngoài tồn tại trong lò nung chảy chạy hoàn toàn bằng điện. Các kết quả của Stanek phù hợp với các kết quả mô phỏng của chúng tôi.

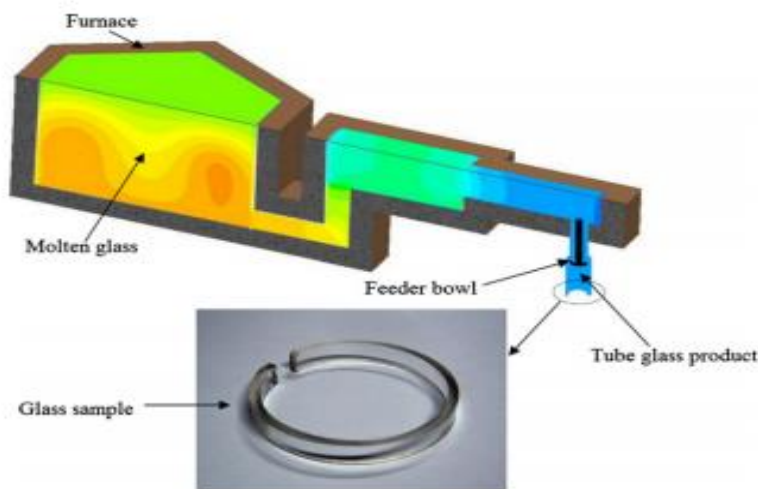
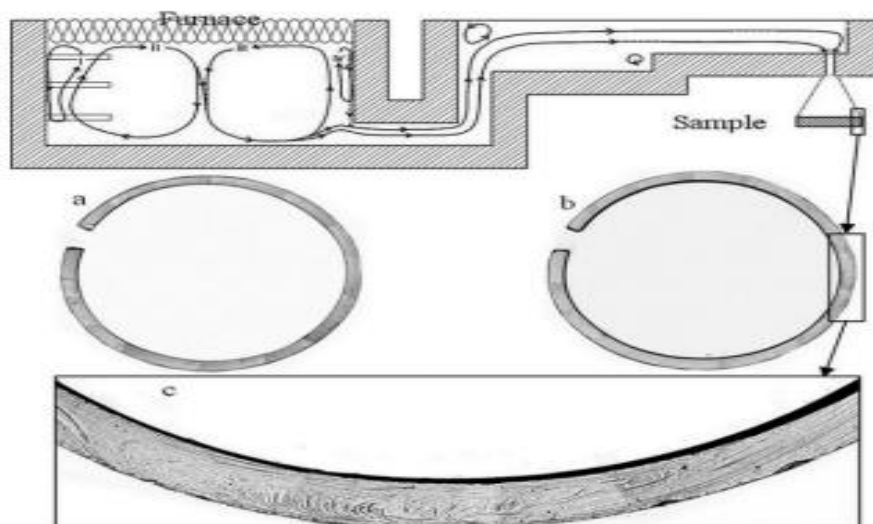


Fig. 13. Schematic of the tube glass production process.

Hình 13: Sơ đồ quá trình sản xuất ống thủy tinh

(2) Phân tích tính đồng đều của thủy tinh

Hình 13 trình bày một sơ đồ của quá trình sản xuất ống thủy tinh trong lò điện 15t / d. Thủy tinh nung chảy trong lò chảy vào bát cấp thủy tinh và chảy tràn ra để tạo thành các sản phẩm thủy tinh hình ống. Bản đồ vật lý của mẫu thủy tinh cho ta một hướng đồ họa của việc thủy tinh chạy quanh khi tạo thành ống. Hình 14 cho thấy các hình ảnh sọc hình khuyên trong mẫu sản phẩm ống thủy tinh từ các lô sản xuất khác nhau. Hình 14 (a) là hình ảnh sản phẩm ống thủy tinh có các sọc hình khuyên từ một lô sản xuất đã được chấp nhận. Hiện tượng các sọc thành tầng trong hình này là rõ ràng và về cơ bản có phân bố hình cong. Hiện tượng tương tự cũng được quan sát thấy trong các kết quả mô phỏng, chỉ ra rằng có những dòng tuần hoàn bên trong và bên ngoài xuất hiện trong lò nung chảy chạy hoàn toàn bằng điện.



Hình 14 : Các hình ảnh sọc thủy tinh theo mặt cắt hình tròn của các mẫu sản phẩm ống thủy tinh, từ các lô sản xuất khác nhau: (a) : đạt chất lượng, (b) chất lượng kém, (c) hình ảnh phóng to của một phần của cùng mẫu sản phẩm.

Hình 14(b) cho thấy hình ảnh sọc hình khuyên của các mẫu sản phẩm thủy tinh hình ống chất lượng kém, và hình 14(c) cho thấy hình ảnh phóng to hơn của một phần của cùng mẫu sản phẩm. Các sọc thủy tinh là rắc rối và cho thấy độ đồng đều kém. Phần sọc này bắt nguồn từ dòng chuyển động tuần hoàn IV trong dung dịch thủy tinh, nó làm cho hỗn hợp không tan chảy hoàn toàn hoặc vật liệu chịu lửa bị ăn mòn chảy thẳng vào đường ống.

Hiện tượng này không được quan sát thấy trong hình 14(a) trong cùng điều kiện đang làm việc. Một lý do có thể cho hiện tượng này là do dòng chuyển động tuần hoàn IV trong cùng điều kiện làm việc không kết nối với đường ống. Sự xuất hiện hiện tượng này rõ ràng là phụ thuộc vào điều kiện hoạt động.

Phần co nhỏ lại là phần đáy của lò điện 36t/d, phần này tách dòng chảy xuống IV khỏi đường ống và ngăn cản hiệu quả hỗn hợp thủy tinh không nóng chảy hoàn toàn hoặc vật liệu chịu lửa bị ăn mòn chảy trực tiếp vào đường ống, do đó đảm bảo chất lượng cao của sản phẩm thủy tinh

VII. Kết luận

Hai lò nung chảy thủy tinh borosilicate hoàn toàn bằng điện, gọi là lò điện 15t / d và 36t / d, được phân tích thông qua phần mềm ANSYS FLUENT 14.0 và mô hình MHD phụ thêm. Phân bố mật độ năng lượng điện, phân bố nhiệt độ, và trường vận tốc thủy tinh đã được phân tích thông qua mô phỏng, và các kết quả được xác nhận thông qua các hình ảnh sọc thủy tinh. Dưới đây là những kết luận thu được từ nghiên cứu này.

1. Các dạng của phân bố mật độ năng lượng điện và phân bố nhiệt độ diễn ra trong hai loại lò điện như sau: Mật độ năng lượng điện và nhiệt độ được thấy là ban đầu tăng và sau đó giảm từ giữa lò đến thành lò theo phương ngang; và mật độ năng lượng điện và nhiệt độ tăng và sau đó giảm dần từ trên xuống dưới lò theo phương thẳng đứng. Điểm nóng của lò điện 15t / d nằm gần các đầu của các điện cực lớp giữa. Nhiệt độ ở điểm nóng là 1648 ° C. Chênh lệch nhiệt độ tối đa trong mặt cắt ngang là 80 ° C. Điểm nóng của lò điện 36t / d nằm gần phần đỉnh của các điện cực. Nhiệt độ ở điểm nóng là 1620 ° C. Chênh lệch nhiệt độ tối đa trong mặt cắt ngang là 50 ° C.

2. Cả hai lò có các dòng chảy tuần hoàn của thủy tinh bên trong và bên ngoài do ảnh hưởng của phân bố mật độ năng lượng điện và phân bố nhiệt độ. Các dòng thủy tinh tuần hoàn được chia thành bốn phần, từ đầu đến cuối lò trong mặt cắt ngang qua tâm lò. Các phần này được đánh dấu là các dòng chảy tuần hoàn I, II, III, và IV. Dòng chảy I và IV là các dòng chảy bên ngoài, trong khi dòng chảy II và III là các dòng chảy bên trong.

3. Các kết quả mô phỏng và kết quả lấy mẫu cho thấy trong lò điện 15t / d, dòng chảy IV có thể làm cho hỗn hợp không được nung chảy hoàn toàn hoặc vật liệu chịu lửa bị ăn mòn chảy trực tiếp vào đường ống. Trong lò điện 36t / d, phần co nhỏ lại ở trên đường ống có thể ngăn chặn sự xuất hiện của hiện tượng nói trên. Như vậy, một phần co nhỏ nên được thiết lập phía trên đường ống của lò thủy tinh điện.