

# NGHIÊN CỨU ĐẶC TÍNH NHIỆT CỦA VẬT LIỆU EPOXY TRONG MÁY BIẾN ÁP KHÔ

## A STUDY ON THERMAL PROPERTIES OF EPOXY MATERIALS IN A DRY-TYPE TRANSFORMER

Phạm Hồng Hải<sup>1</sup>, Lê Đức Tùng<sup>1</sup>, Đặng Quốc Vương<sup>1</sup>, Đặng Chí Dũng<sup>1</sup>, Lê Kiều Hiệp<sup>2</sup>, Đỗ Tiến Công<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>2</sup>Viện Khoa học và Công nghệ Nhiệt – Lạnh, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Tác giả liên hệ: hai.phamhong@hust.edu.vn

(Nhận bài: 26/3/2021; Chấp nhận đăng: 28/6/2021)

**Tóm tắt** – Máy biến áp (MBA) khô đóng vai trò rất quan trọng và có mặt khắp mọi nơi trong cuộc sống của ta và đặc biệt sử dụng ở những nơi yêu cầu về an toàn phòng chống cháy nổ như hầm lò, các công trình dân dụng và công nghiệp. Việc nghiên cứu bài toán nhiệt trong MBA khô để tìm ra điểm phát nóng cục bộ trong cuộn dây luôn là chủ đề mang tính thời sự được rất nhiều các nhà nghiên cứu, chế tạo MBA trong và ngoài nước quan tâm. Song song với việc đo thực nghiệm, vấn đề này có thể được giải quyết thông qua mô phỏng số với đầu vào là các thông số hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$ , hệ số dẫn nhiệt độ  $\alpha$  và nhiệt dung riêng  $c_p$  của epoxy. Gần đây, đã có một vài nghiên cứu về các hệ số nhiệt của epoxy, nhưng khi áp dụng ở Việt Nam vẫn gặp nhiều sai số. Trong bài báo này, nhóm tác giả nghiên cứu chế tạo thiết bị đo để có thể đo được các hệ số nhiệt của vật liệu cách điện epoxy trong MBA khô.

**Từ khóa** - Hệ số dẫn nhiệt; hệ số dẫn nhiệt độ; nhiệt dung riêng; máy biến áp khô; epoxy

### 1. Đặt vấn đề

Ở những nơi có nguy cơ cháy nổ cao như nơi công cộng, chung cư... máy biến áp (MBA) khô được ưu tiên sử dụng. MBA khô thường là loại được bọc trong epoxy với cách điện lớp F (155°C) hoặc cách điện cấp H (180°C). Cách điện lớp F có nhiệt độ giới hạn là 155°C - là điểm mềm hóa của vật liệu. Do điều kiện không gian lắp đặt thường rất chật hẹp, khả năng đối lưu của không khí làm mát thường rất kém kết hợp với khả năng dẫn nhiệt của lớp vật liệu cách nhiệt không tốt, một số điểm nóng cục bộ có thể xuất hiện trong quá trình vận hành máy gây ảnh hưởng lớn đến độ ổn định và an toàn của MBA khô. Vì vậy, việc tìm ra phân bố nhiệt cũng như xác định các điểm phát nóng cục bộ ở những MBA khô là rất quan trọng. Vấn đề này có thể được xác định thông qua phương pháp thực nghiệm, tuy nhiên phương pháp này thường tiêu tốn rất nhiều thời gian và nguồn lực. Gần đây, phương pháp mô phỏng được sử dụng rộng rãi như là một giải pháp thay thế. Trong việc tính toán mô phỏng, bên cạnh các điều kiện biên, điều kiện thời gian và điều kiện hình học, điều kiện vật lý bao gồm hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$ , khối lượng riêng  $\rho$ , nhiệt dung riêng  $c_p$  cần phải được biết trước. Trên cơ sở giải xấp xỉ bài toán dẫn nhiệt bên trong lớp epoxy, trường nhiệt độ của lớp cách nhiệt này sẽ được xác định qua đó giúp dự đoán các điểm nóng cục bộ bên trong máy.

Các thông số nhiệt vật lý thường là những đại lượng vật

**Abstract** - Dry-type transformers play an important role and are used everywhere in our life, especially places where fire safety is required such as pits, civil and industrial projects. Thus, study of thermal problems in the dry-type transformer to find out the local hot spot in windings is always a topical topic that domestic and foreign researchers are very concerned. In parallel to the experimental measurement, this issue can be solved by simulating with the input parameters being the thermal conductivity  $\lambda$ , thermal diffusivity  $\alpha$  and specific heat  $c_p$ . Recently, there are several studies on heat coefficients of the epoxy material, but still getting several errors when applying in Vietnam. Therefore, in this article, authors have researched to produce a device for measuring the thermal coefficients of the epoxy material in the dry-type transformer.

**Key words** - Cast resin transformer; dry type transformer; epoxy; thermal conductivity; thermal diffusivity; specific heat

lý khó xác định, đặc biệt là hệ số dẫn nhiệt. Một số công trình nghiên cứu đã xây dựng bằng thực nghiệm về hệ số dẫn nhiệt của vật liệu cách điện, tuy nhiên sự khác biệt về phương pháp chế tạo và tỉ lệ phối trộn các phụ gia dẫn đến việc áp dụng tại Việt Nam gặp phải sai số, và không tin cậy. Hiện nay, đã có rất nhiều phương pháp xác định hệ số dẫn nhiệt của vật liệu cách điện, trong đó có thể kể đến 2 nhóm chính: Phương pháp ổn định và phương pháp không ổn định [1]. Phương pháp ổn định cần tạo ra một trường nhiệt độ ổn định nên cần thời gian cấp nhiệt lâu dẫn tới sự thay đổi về đặc tính vật liệu, các giá trị đo được thường là giá trị trung bình cho một dải nhiệt độ lớn. Đối với các trường hợp vật liệu dễ biến tính, vật liệu âm hay có hệ số dẫn nhiệt thấp, phương pháp đo không ổn định được sử dụng phổ biến. Phương pháp đo không ổn định sử dụng nguồn dòng xác định hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$  một cách nhanh và chính xác, đã được sử dụng thông dụng cho các vật liệu rắn [2], [3]. Sau khi xác định được hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$ , việc ước lượng tham số là một kỹ thuật được sử dụng rộng rãi và đã được đề xuất để xác định các thuộc tính của vật liệu cách điện [4], [5]. Quy trình tính toán đã được phát triển bởi Blackwell [4] để xác định các thuộc tính nhiệt độ của cát xây dựng. Sasaki và Fukuda [6] xác định hệ số dẫn nhiệt độ của đất bằng phương pháp ước lượng tham số phi tuyến tính. Rooke và Taylor [7] ước tính hệ số dẫn nhiệt độ của vật liệu cách điện dạng sợi. Garcia et al [8] cũng đã sử dụng

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering, Hanoi University of Science and Technology (Hai Phạm Hồng, Tung Lê-Duc, Vương Đặng Quốc, Đặng Chí Dũng)

<sup>2</sup> School of Heat Engineering and Refrigeration, Hanoi University of Science and Technology (Lê Kiều Hiệp, Đỗ Tiến Công)

kỹ thuật ước lượng tham số để xác định các đặc tính nhiệt: Hệ số dẫn nhiệt độ  $\alpha$ , nhiệt dung riêng  $c_p$  của các vật liệu cách điện epoxy sử dụng trong MBA.

Trong nước, lĩnh vực kỹ thuật nhiệt có nhiều tác giả cũng đã nghiên cứu chế tạo thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt bằng thực nghiệm. Nghiên cứu của Nguyễn Đức Lợi [9], [10], và Đinh Văn Thuận [11] đã trình bày thiết kế thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt dạng que thăm. Tuy nhiên, do giới hạn của thiết bị lấy dữ liệu chưa có datalogger lấy mẫu chuẩn đến 0,1K và 0,1s nên chưa có điều kiện chuyển dữ liệu thực nghiệm vào máy tính. Quá trình lấy mẫu được thực hiện bằng đồng hồ bấm giây. Các số liệu thu thập chưa được tổng hợp thành cơ sở dữ liệu, độ tin cậy thiết bị chưa cao.

Trong nghiên cứu này, trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu lý thuyết, các tài liệu và công trình nghiên cứu trong và ngoài nước về phương pháp xác định hệ số dẫn nhiệt, nhóm tác giả đã tìm hiểu chế tạo và sử dụng que thăm nhiệt đo hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$ . Que thăm hoạt động theo nguyên lý đo không ổn định với nguồn nhiệt đường, áp dụng tiêu chuẩn ASTM D5334 của Mỹ có độ chính xác cao. Kết quả đo đặc được lấy mẫu tự động và chuyển về máy tính qua giao tiếp USB. Kết quả thực nghiệm sau đó được xử lý bằng phần mềm QTT software 1.2 do nhóm tác giả phát triển đưa ra kết quả hệ số dẫn nhiệt của vật liệu cần đo. Sau đó, tác giả sử dụng phần mềm mô phỏng động lực học chất lưu CFD (Computational Fluid Dynamics) để ước lượng được giá trị của nhiệt dung riêng  $c_p$ .

Mẫu epoxy sử dụng được đúc từ dây chuyền sản xuất MBA khô của nhà máy Sanaky khu công nghiệp Quất Động, Thường Tín, Hà Nội. Epoxy được phối trộn từ nhựa nền có mã sản phẩm 8055A và chất đóng rắn có mã sản phẩm 8055B của hãng Jiang Te – Trung Quốc. Tỷ lệ phối trộn của hai thành phần trên là 1:1.

## 2. Phương pháp xác định các tính chất nhiệt

### 2.1. Hệ số dẫn nhiệt

Về cơ bản các phương pháp thực nghiệm xác định hệ số dẫn nhiệt của tất cả các vật liệu đều xuất phát từ nguyên lý chung là tạo một điều kiện thực nghiệm giống với điều kiện mà ở phương trình định luật Fourier (1) hoặc phương trình vi phân đạo hàm (2) riêng mô tả quá trình dẫn nhiệt của vật cần khảo sát [12]. Vì nghiệm của phương trình này bao giờ cũng chứa  $\lambda$ , do đó bằng cách đồng nhất kết quả đo đặc và kết quả tính toán về trường nhiệt độ, ta xác định được  $\lambda$ .

Phương trình định luật Fourier:

$$q = -\lambda \text{grad}(t) \quad (1)$$

Phương trình vi phân dẫn nhiệt tổng quát:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \Delta^2 t + \frac{q_v}{c_p} \quad (2)$$

Việc xác định hệ số dẫn nhiệt bằng phương pháp đo không ổn định sử dụng nguồn nhiệt dạng đường do một dây nhiệt trở - dây nung Ni - Cr có dòng điện chạy qua sinh ra được đặt trong không gian rộng vô hạn. Trong trường hợp này nhiệt được truyền theo không gian hình trụ, do vậy chọn hệ tọa độ trụ với nguồn nhiệt nằm trên trục z để biểu diễn quá trình dẫn. Trường nhiệt độ trong lớp vật liệu được biểu diễn là hàm của bán kính và thời gian,  $t = t(r, \tau)$ .

Phương trình vi phân dẫn nhiệt:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \quad (3)$$

Trong đó,  $t$ : Nhiệt độ, [°C];  $\tau$ : Thời gian, [s];  $\alpha$ : Hệ số dẫn nhiệt độ, [m<sup>2</sup>/s];  $r$ : Bán kính tính từ nguồn, [m].

Điều kiện biên loại 2 tại bề mặt của nguồn nhiệt:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_F \quad (4)$$

Trong đó,  $\lambda$ : Hệ số dẫn nhiệt, [W/mK];  $q_F$ : Mật độ dòng nhiệt, [W/m<sup>2</sup>].

Điều kiện ban đầu của quá trình dẫn nhiệt:

$$t(r, \tau = 0) = t_0 \quad (5)$$

Đặt  $\theta = t - t_0$  là nhiệt độ thừa bên trong vật so với nhiệt độ ban đầu  $t_0$ .

Sử dụng phương pháp biến đổi Laplace đưa bài toán vi phân đạo hàm riêng (3) về bài toán vi phân đạo hàm thường trong miền ảnh. Sau khi giải bài toán vi phân đạo hàm thường trên miền ảnh, nghiệm của phương trình vi phân đạo hàm thường sẽ được chuyển về không gian thực bằng phép biến đổi Laplace ngược. Lời giải chi tiết của bài toán có thể được tìm thấy trong tài liệu [5]. Ta sẽ đưa ra và sử dụng nghiệm của bài toán trong không gian thực.

$$\theta = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \left[ \ln \left( \frac{4\alpha\tau}{\gamma r^2} \right) + \frac{1}{1.1!} \left( \frac{r^2}{4\alpha\tau} \right) - \frac{1}{2.2!} \left( \frac{r^2}{4\alpha\tau} \right) + \dots \right] \quad (6)$$

Trong đó:  $\gamma = 1.78107$ ;

$\ln(\gamma) = 0,5772$  là hằng số Euler;

$q_l = 2\pi R q_F$  là mật độ dòng nhiệt trên một đơn vị chiều dài của nguồn nhiệt [W/m].

Khi  $\frac{r^2}{4\alpha\tau}$  rất nhỏ, nghiệm của bài toán hoàn toàn có thể bỏ qua các số hạng sau của phương trình (6) mà không mắc phải sai số đáng kể, khi đó:

$$\theta = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln \left( \frac{4\alpha\tau}{\gamma r^2} \right) \quad (7)$$

Biến thiên nhiệt độ tại 2 thời điểm  $\tau_1$  và  $\tau_2$  ở vị trí có bán kính  $r$ , hiệu của nhiệt độ tại hai thời điểm này được xác định theo công thức:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \theta_2 - \theta_1 = \frac{q_l}{4\pi\lambda} \ln \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \quad (8)$$

Như vậy, hệ số dẫn nhiệt có thể được xác định trực tiếp qua công thức:

$$\lambda = \frac{q_l}{4\pi(t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right) \quad (9)$$

Phương trình (9) này chính là cơ sở để xác định hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$  theo phương pháp “que thăm”. Theo phương pháp này, que thăm được cắm ngập vào khối vật liệu cần đo. Nhiệt lượng do dòng điện đi qua dây nung Ni-Cr sinh ra truyền vào vật liệu nhanh hay chậm phụ thuộc vào tính chất dẫn nhiệt của vật liệu.

Trong quá trình đo thu được biến thiên nhiệt độ  $t$  theo thời gian  $\tau$  của que thăm. Dữ liệu này được tuyến tính hóa thành một đường thẳng có dạng đa thức  $t = f(\ln(\tau))$  bằng phương

pháp bình phương tối thiểu. Độ dốc  $k$  của đường thẳng đó:

$$k = \frac{t_2 - t_1}{\ln \left( \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)} \quad (10)$$

Thay vào công thức (9) ta có hệ số dẫn nhiệt của vật liệu:

$$\lambda = \frac{q_l}{4\pi k} \quad (11)$$

Trong đó,  $q_l$ : Mật độ dòng nhiệt theo chiều dài  $l$  que thăm

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{I^2 R}{l} \quad (12)$$

## 2.2. Khối lượng riêng, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt độ

Khối lượng riêng tại một vị trí trong vật được tính bằng khối lượng của một thể tích vô cùng nhỏ chia cho thể tích vô cùng nhỏ đó. Nếu vật đó có đặc tính đồng chất thì khối lượng riêng tại mọi vị trí là như nhau và bằng khối lượng riêng trung bình.

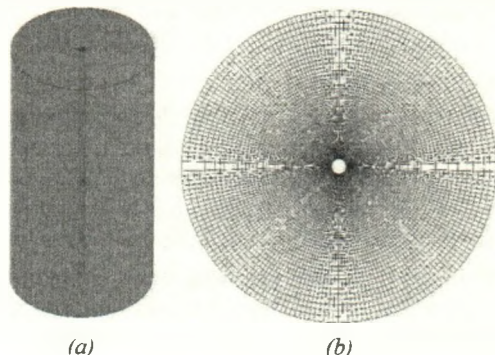
$$\rho = \frac{G}{V} \quad (13)$$

Trong đó,  $\rho$ : Khối lượng riêng trung bình,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ;  $G$ : Khối lượng của vật,  $[\text{kg}]$ ;  $V$ : Thể tích của vật,  $[\text{m}^3]$ .

Khối lượng riêng là một đại lượng vật lý phụ thuộc vào nhiệt độ tuy nhiên trong thí nghiệm này thể tích của các mẫu epoxy thay đổi không đáng kể sau quá trình gia nhiệt như vậy khối lượng riêng được coi như là không đổi:

$$\rho = 1593 \text{ kg}/\text{m}^3$$

Nhiệt dung riêng  $c_p$  được ước lượng bằng cách đưa dữ liệu thực nghiệm của hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$  và khối lượng riêng  $\rho$  vào phần mềm mô phỏng CFD thực hiện quá trình mô phỏng nguồn nhiệt dạng đường như trong điều kiện thực tế. Sau đó thay đổi giá trị nhiệt dung riêng sao cho sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian giữa thực nghiệm và mô phỏng đồng nhất với nhau.



Hình 1. (a) Mô hình (a) và lưới tính toán (b) của khối epoxy

Mối quan hệ giữa hệ số dẫn nhiệt độ  $\alpha$ , hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$ , nhiệt dung riêng  $c_p$  và khối lượng riêng  $\rho$  được thể hiện bằng công thức:

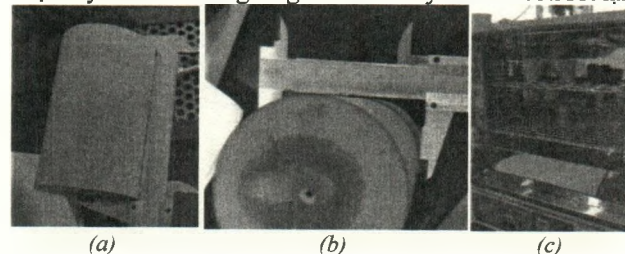
$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (14)$$

## 3. Thí nghiệm xác định đặc tính nhiệt vật liệu epoxy

### 3.1. Chuẩn bị mẫu và thiết bị

Sử dụng 3 mẫu epoxy được đúc từ dây chuyền sản xuất MBA khô của nhà máy Sanaky khu công nghiệp Quất Động, Thường Tín, Hà Nội.

Kích thước mẫu: Trụ tròn đường kính 60 mm, chiều dài 100 mm, có lỗ khoan xuyên tâm đường kính 2mm. Các mẫu được sấy ở 105°C trong 24 giờ để làm bay hơi ẩm còn sót lại.

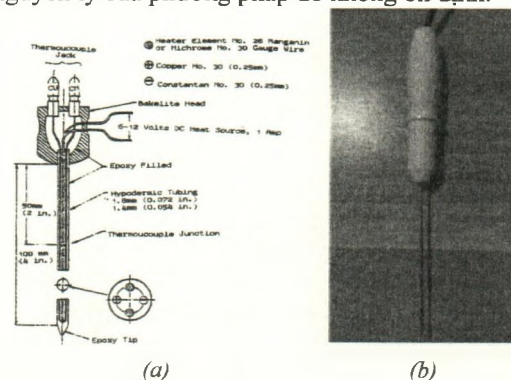


Hình 2. Đo kích thước mẫu (a, b) và sấy mẫu trong tủ ổn nhiệt (c)

### 3.2. Thiết bị đo

#### 3.2.1. Que thăm nhiệt

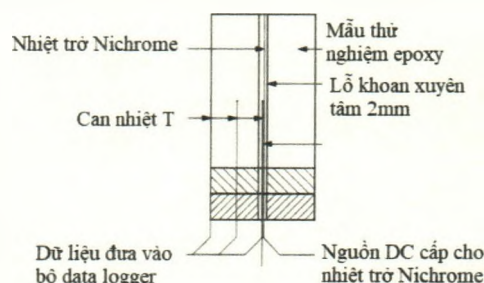
Que thăm nhiệt của bộ thiết bị Quick Thermal Test 01 - QTT01 được chế tạo tại Trung tâm thí nghiệm quá trình Nhiệt Lạnh, Viện Khoa học và Công nghệ Nhiệt Lạnh, Đại học Bách khoa Hà Nội. Que thăm QTT01 là thiết bị được chế tạo theo tiêu chuẩn ASTM D334 của Mỹ hoạt động dựa trên nguyên lý của phương pháp đo không ổn định.



Hình 3. (a) Cấu tạo kim đo hệ số dẫn nhiệt tiêu chuẩn ASTM D 5334-00 [13]; (b) Que thăm QTT01

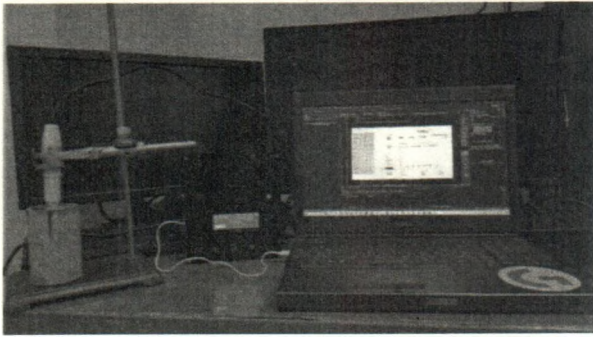
Que thăm QTT01 được chế tạo bao gồm một dây điện trở Nichrome được bọc cách điện, một cặp nhiệt điện loại T được hàn ở điểm chính giữa, cả hai dây này cùng được đặt bên trong một đoạn ống hợp kim inconel đường kính 1,8mm sao cho cả hai cùng phải thẳng và dây điện trở không được chạm chập với vỏ ống hợp kim. Sau đó, điền đầy khoảng hở trong kim bằng Magie oxit, MgO. Can nhiệt T ghi nhận sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian  $t(\tau)$  của que thăm. Dữ liệu biến thiên nhiệt độ theo thời gian  $\tau$  và được ghi nhận vào máy tính.

Cặp nhiệt điện loại T (Đồng/Constantan) của hãng OMRON. Dây đo nhiệt độ dao động trong khoảng: -270°C đến 370°C. Sai số của can nhiệt T: +/- 1,0°C hoặc +/-0,75%



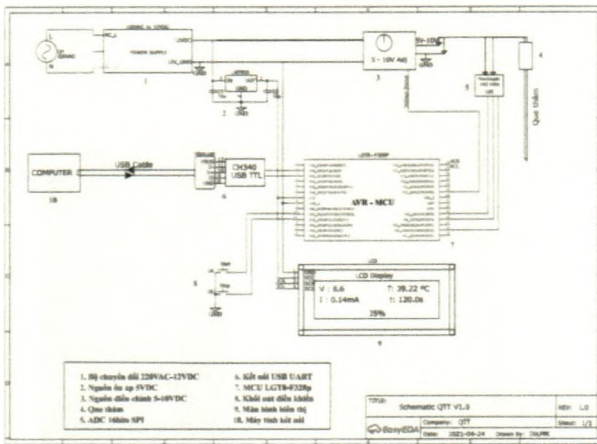
Hình 4. Giàn đồ mẫu thử và thiết bị QTT 01 đo hệ số dẫn nhiệt

Kim được gắn vào tay cầm cách điện bằng Teflon. Khi đo, que thăm được cắm ngập vào vật liệu cần đo (Hình 4).



Hình 5. Hình ảnh bộ thiết bị QTT 01

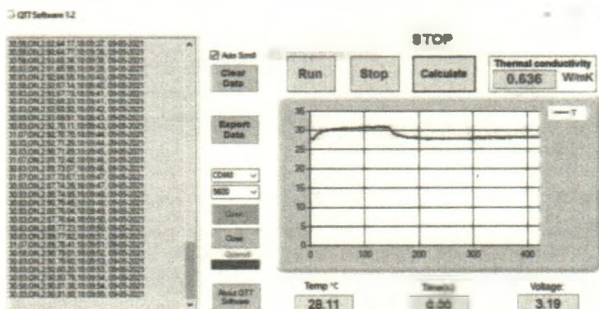
### 3.2.2. Board mạch nung và thu thập dữ liệu



Hình 6. Giản đồ mạch nung và thu thập số liệu

Cán nhiệt T ghi nhận sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian  $t(\tau)$  của que thăm. Các tín hiệu điện áp của cặp nhiệt điện được khuếch đại và chuyển đổi về dạng tín hiệu số, tín hiệu số được xử lý bằng vi xử lý Atmega328P truyền tải đến máy tính thông qua giao tiếp USB. Tốc độ lấy mẫu lớn nhất lên đến: 0,1s, độ chính xác 0,25°C

Để máy tính giao tiếp được với thiết bị QTT01, ta lập trình phần mềm xử lý và lưu trữ số liệu trên máy tính. Phần mềm QTT Software Ver 1.2 xây dựng trên cơ sở ngôn ngữ lập trình C#. Máy tính sẽ nhận tín hiệu số, giải mã tín hiệu, hiển thị tín hiệu lên màn hình và ghi các giá trị tự động theo thời gian. Dữ liệu nhiệt độ được ghi lại và có thể xuất ra dưới dạng file excel cho phép xử lý một cách đơn giản. Đồng thời, từ những dữ liệu thu được phần mềm có thể tính được hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$  (W/mK) của vật liệu cần đo. Giao diện phần mềm QTT Software Ver 1.2 được mô tả như Hình 7.

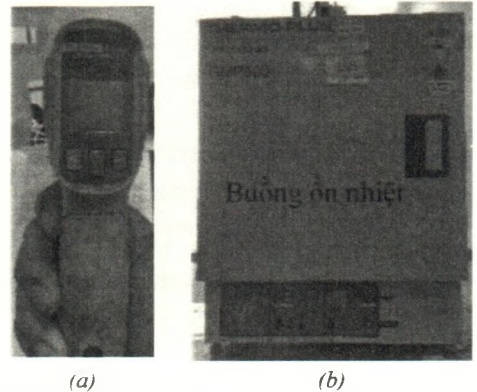


Hình 7. Giao diện phần mềm thu thập và xử lý và tính toán số liệu

### 3.2.3. Các thiết bị khác

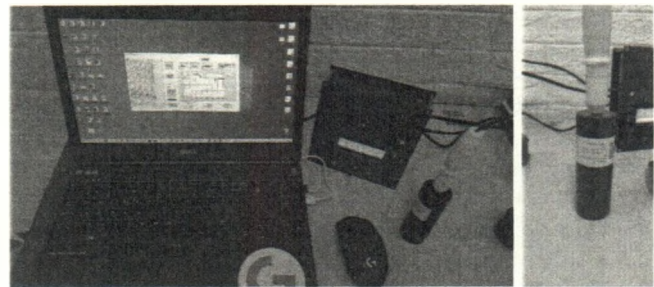
Máy đo nhiệt độ hồng ngoại Fluke 62 Max có phạm vi đo từ -30°C tới 500°C độ chính xác 0,1°C

Đối với phép đo ở nhiệt độ cao hơn nhiệt độ môi trường, mẫu được gia nhiệt trong buồng ổn nhiệt GMP 500 Thermal Plus.



Hình 8. Máy đo nhiệt độ hồng ngoại Fluke 62 (a) và buồng ổn nhiệt (b)

Que thăm được kiểm tra sai số với mẫu chuẩn Nylon của hãng Thermtest mã số 27004-85 có hệ số dẫn nhiệt  $\lambda = 0,340$  W/mK. Số liệu thực nghiệm thu được là:  $t = 25^\circ\text{C}$   $\lambda = 0,334$  W/mK. Sai số 1,76% là chấp nhận được.



Hình 9. Đo kiểm tra QTT 01 với mẫu chuẩn

### 3.3. Quy trình thí nghiệm

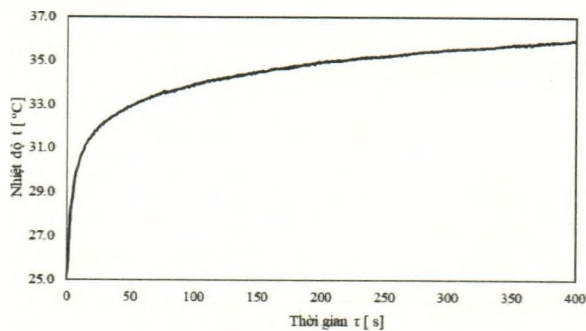
Bắt đầu thí nghiệm, đối với nhiệt độ đo yêu cầu cao hơn nhiệt độ môi trường, mẫu được gia nhiệt trong buồng ổn nhiệt được cài đặt sẵn nhiệt độ. Nhiệt độ mẫu tăng dần với tốc độ 1-2 °C/min. Sau khi đạt đến nhiệt độ thí nghiệm, chờ thời gian ổn định để đạt được trạng thái cân bằng nhiệt.

Sau khi đạt trạng thái cân bằng nhiệt, que thăm nhiệt QTT01 được đặt vào lỗ khoan xuyên tâm các mẫu và khoảng trống được lấp đầy bằng keo dẫn nhiệt có hệ số dẫn nhiệt là 15 W/mK để tăng khả năng dẫn nhiệt từ thiết bị đo đến mẫu epoxy. Điện áp trên và dòng điện qua dây điện trở Nichrome được điều chỉnh qua biến trở. Dữ liệu từ cán nhiệt T được gửi đến Board mạch có kết nối với máy vi tính. Board mạch thu thập xử lý số liệu, truyền dữ liệu về máy tính qua giao tiếp USB. Thời gian đo trong khoảng từ 3 phút đến 5 phút tùy thuộc vào điều kiện thực tế. Dữ liệu ban đầu thu được sau quá trình đo được tính toán bằng phần mềm cho ra kết quả giá trị hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$  (W/mK) của vật liệu cần đo.

### 3.4. Kết quả hệ số dẫn nhiệt

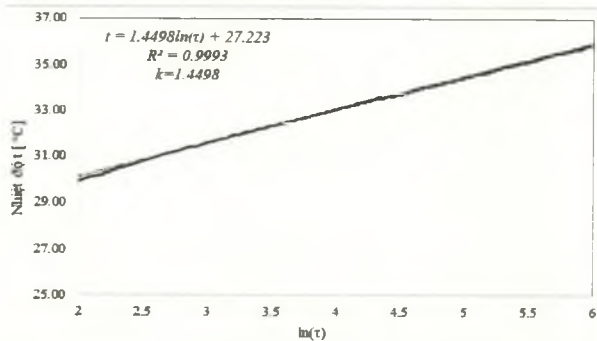
Ba mẫu của lô mẫu được lấy cho thí nghiệm này: Các mẫu được ghi nhận là số 1, 2 và 3. Mười phép đo độ dẫn

hiệt đã được thực hiện tại mỗi điểm nhiệt độ từ 25°C đến 142°C. Dữ liệu thể hiện biến thiên nhiệt độ theo thời gian của phép đo ở 25°C được ghi vào phần mềm thể hiện ở đồ thị Hình 10.



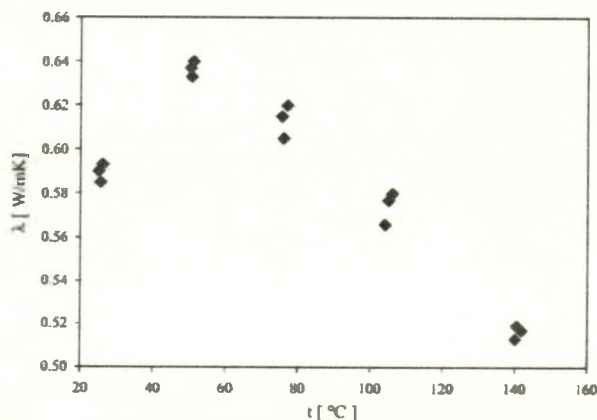
Hình 10. Biến thiên nhiệt độ theo thời gian thu được từ phép đo ở nhiệt độ 25°C

Đường cong trong Hình 10 mô tả phương trình (8). Từ dữ liệu đo đạc này, phần mềm sử dụng nguyên lý bình phương tối thiểu để tuyến tính hóa số liệu và đưa về dạng mối quan hệ giữa nhiệt độ và logarit thời gian  $t = f(\ln(\tau))$  và thu được hệ số góc  $k$  như Hình 11.



Hình 11. Đường thẳng tuyến tính giữa logarit thời gian và nhiệt độ

Từ hệ số góc  $k$  thu được sau khi tuyến tính cùng với mật độ dòng nhiệt theo chiều dài  $q_l$  của que thăm tính toán từ công thức (12), ta thu được hệ số dẫn nhiệt theo công thức (11). Kết quả hệ số dẫn nhiệt được hiển thị lên giao diện phần mềm QTT software 1.2. Thực hiện tương tự đối với các kết quả đo ở các điểm nhiệt độ từ 25°C đến 142°C ta thu được ảnh hưởng của nhiệt độ đến hệ số dẫn nhiệt được biểu diễn bằng đồ thị trong Hình 12.



Hình 12. Sự thay đổi hệ số dẫn nhiệt vật liệu epoxy theo nhiệt độ

Ta có thể quan sát thấy, xu hướng hệ số dẫn nhiệt tăng từ 25°C đến 50°C và xu hướng giảm khi nhiệt độ tăng. Giá trị hệ số dẫn nhiệt trung bình ở nhiệt độ môi trường là 0,59 W/mK.

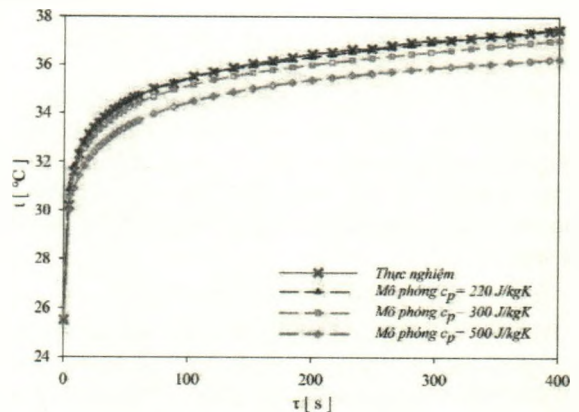
Từ số liệu thực nghiệm đo hệ số dẫn nhiệt, thực hiện khai triển Taylor biểu diễn gần đúng quan hệ  $\lambda = f(t)$  dưới dạng đa thức và có kết quả như sau:

$$\lambda(t) = 0,5612 + 2,044 \cdot 10^{-3}t - 1,68 \cdot 10^{-5}t^2 \quad (15)$$

### 3.5. Kết quả nhiệt dung riêng và hệ số dẫn nhiệt độ

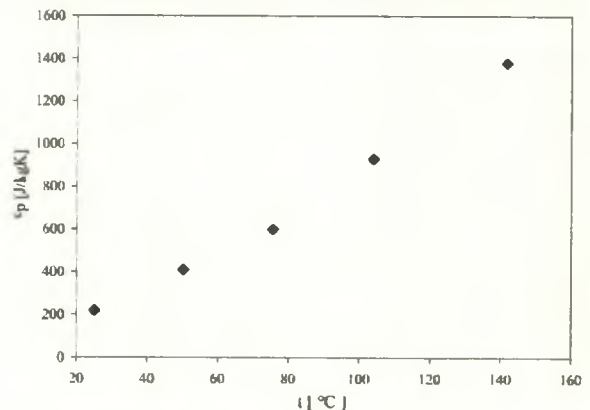
Nhiệt dung riêng  $c_p$  được ước lượng bằng cách đưa dữ liệu thực nghiệm của hệ số dẫn nhiệt  $\lambda$  và khối lượng riêng  $\rho$  từ Mục 2.2 vào phần mềm mô phỏng động lực học chất lưu - CFD.

Từ kết quả thực nghiệm và kết quả mô phỏng ta thu được các đường cong thể hiện sự thay đổi nhiệt độ  $t$  theo thời gian  $\tau$  trong quá trình thực hiện phép đo hệ số dẫn nhiệt theo phương pháp nguồn đường [5], [15] tại các nhiệt độ khác nhau.



Hình 13. Đường cong mô phỏng sự thay đổi nhiệt độ theo thời gian ứng với các nhiệt dung riêng ở 25°C

Từ Hình 13 có thể thấy, tại giá trị  $c_p = 220$  J/kgK thì đường cong thực nghiệm và đường cong mô phỏng thể hiện sự thay đổi nhiệt độ  $t$  theo thời gian  $\tau$  đồng nhất nhau nhất. Áp dụng tương tự đối với các trường hợp nhiệt độ còn lại ta thu được nhiệt dung riêng của epoxy thay đổi theo nhiệt độ.



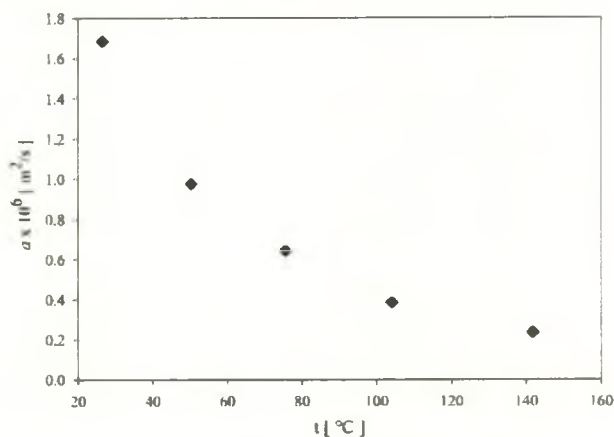
Hình 14. Sự thay đổi nhiệt dung riêng của epoxy theo nhiệt độ

Hình 14 biểu diễn ảnh hưởng của nhiệt độ đến nhiệt dung riêng. Tương tự như hệ số dẫn nhiệt từ hình dạng của đường cong, có thể thực hiện khai triển Taylor biểu diễn gần đúng quan hệ  $c_p = f(t)$  dưới dạng đa thức như sau:

$$c_p(t) = 82,61 + 4,77t + 0,031t^2 \quad (16)$$

Nhiệt dung riêng của epoxy tăng khi tăng nhiệt độ phù hợp với kết quả nhiệt dung riêng trên vật liệu tương tự [16].

Kết quả nhiệt dung riêng ở trên áp dụng vào công thức (14) ta thu được được hệ số dẫn nhiệt độ của epoxy



Hình 15. Sự thay đổi của hệ số dẫn nhiệt độ của epoxy theo nhiệt độ

Từ Hình 15 biểu diễn ảnh hưởng của nhiệt độ đến hệ số dẫn nhiệt độ (hệ số khuếch tán nhiệt) cho thấy, hệ số dẫn nhiệt độ giảm khi tăng nhiệt độ và giảm nhanh trong khoảng nhiệt độ từ 25°C đến 75°C, giảm đến 42,3%. Mỗi quan hệ  $\alpha = f(t)$  được biểu diễn gần đúng dưới dạng đa thức như sau:

$$\alpha(t) = 2,33 - 0,031t + 21,05 \cdot 10^{-5}t^2 \quad (17)$$

Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, tác giả đã xây dựng được các đường đặc tính các hệ số nhiệt của vật liệu epoxy thay đổi theo nhiệt độ và các thông số này sẽ được sử dụng để tính toán, mô phỏng, phân tích trường phân bố nhiệt trong MBA khô.

#### 4. Kết luận

Trong quá trình nghiên cứu và thực nghiệm, tác giả đã lựa chọn phương pháp đo không ổn định hay phương pháp que thăm dựa trên cơ sở lý thuyết về nguồn đường để đo hệ số dẫn nhiệt kết hợp cùng với mô phỏng động lực học chất lưu CFD để xác định các hệ số về nhiệt của vật liệu epoxy sử dụng trong MBA khô.

Trên cơ sở kết quả thực nghiệm, tác giả đã xây dựng được các đường đặc tính các hệ số nhiệt của vật liệu epoxy thay đổi theo nhiệt độ.

Bộ thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt sử dụng que thăm QTT01 cho kết quả có độ chính xác cao, kết quả đo được thu thập một cách tự động tạo thành cơ sở dữ liệu đồng thời có thể tự động tính toán ra hệ số dẫn nhiệt của vật liệu cần đo. Tuy nhiên, bộ thiết bị còn phải kết nối với máy vi tính để tính toán nên mục tiêu tiếp theo tác giả nghiên cứu chế tạo thiết

bị gọn nhẹ cầm tay cho phép sử dụng ở phòng thí nghiệm và thực địa.

Kết quả các đặc tính nhiệt của vật liệu cách điện epoxy biến thiên theo nhiệt độ xác định từ thực nghiệm, được sử dụng trong tính toán, mô phỏng phân bố nhiệt độ MBA khô bọc epoxy cũng như tìm ra điểm phát nóng cục bộ của nó sẽ được công bố ở những bài báo tiếp theo.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. Yüksel, "The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Materials", *Insul. Mater. Context Sustain.*, pp. 114–136, 2016.
- [2] A. García, E. Contreras, and B. Domínguez, "Developments in geothermal energy in Mexico-Part thirty-three. Simultaneous determination of the thermal properties of geothermal drill cores", *Heat Recover. Syst. CHP*, vol. 11, no. 2–3, pp. 131–139, 1991, doi: 10.1016/0890-4332(91)90127-P.
- [3] K. Marovelli RL, Veith, "Thermal conductivity of rock: measurement by the transient line source method", Report of investigations US Bureau of Mines, Department of the Interior, Washington DC, USA, 1964.
- [4] Blackwell JH, "Transient heat flow problems in cylindrical geometry", Ph.D. Thesis, University of Western Ontario Canada, 1952.
- [5] Blackwell JH, "A transient method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk", *J. Appl. Phys.*, vol. 25, no. 2, pp. 137–144, 1954.
- [6] A. Sasaki, S. Aiba, and H. Fukuda, "A study on the thermophysical properties of a soil", *J. Heat Transfer*, vol. 109, no. 1, pp. 232–237, 1987, doi: 10.1115/1.3248048.
- [7] S. P. Rooke and R. E. Taylor, "Transient experimental technique for the determination of the thermal diffusivity of fibrous insulation", *J. Heat Transfer*, vol. 110, no. 1, pp. 270–273, 1988, doi: 10.1115/1.3250467.
- [8] A. Garcia, E. Contreras, and S. Lopez, "Measurement of the thermal conductivity of insulating materials by a line-source technique", *High Temp. - High Press.*, vol. 23, no. 6, pp. 643–650, 1991.
- [9] G. N. Đ. Lợi, "Xác định thực nghiệm hệ số dẫn nhiệt của các vật liệu cách nhiệt", *Tạp chí Khoa học Công nghệ của 4 trường ĐHBK*, vol. 4, pp. 31–35, 1994.
- [10] K. Đ. V. T. GS Nguyễn Đức Lợi, "Chế tạo dụng cụ đo hệ số dẫn nhiệt của một số vật liệu cách nhiệt tự nhiên ở Việt nam", *Tạp chí KHCN Nhiệt*, vol. 2, pp. 9–11, 1995.
- [11] Đ. V. Thuận, "Xác định bằng thực nghiệm các đặc trưng truyền dẫn nhiệt của vật liệu cách điện và tính toán hợp lý cách nhiệt kho lạnh trong điều kiện Việt Nam", *Luận án Phó Tiến Sĩ Khoa học Đại học Bách khoa Hà Nội*, 1996.
- [12] Võ Chí Chính, *Kỹ thuật nhiệt*. NXB Khoa học Kỹ thuật Hà Nội, 2006.
- [13] ASTM, "ASTM D5334-Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure", *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 04.08, pp. 1226–1232 2000.
- [14] QCVN 09:2013/BXD, "Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 09:2013/BXD", *Bộ Xây Dựng*, pp. 28–39, 2013.
- [15] H. S. C. and J. C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, 2<sup>nd</sup> ed 1959.
- [16] A. Garcia, F. Rojas, and R. Nava, "Determination of thermal properties of casting resin systems for encapsulated transformers", *High Temp. - High Press.*, vol. 23, no. 6, pp. 651–658, 1991.