

XÁC ĐỊNH HỆ SỐ DẪN NHIỆT CHO VẬT LIỆU PHỨC HỢP HAI THÀNH PHẦN

THE DETERMINATION OF THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT FOR TWO COMPOSITE MATERIALS

Bùi Thị Hương Lan*

Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng¹

*Tác giả liên hệ: bthlan@dut.udn.vn

(Nhận bài: 08/8/2022; Chấp nhận đăng: 26/9/2022)

Tóm tắt - Trong tính toán kỹ thuật nhiệt, hệ số dẫn nhiệt là một đại lượng vật lý quan trọng và cần thiết. Để có được giá trị của đại lượng này thì phương pháp xác định chủ yếu bằng thực nghiệm, đo đạc và thống kê thành các bảng để người dùng có thể tra cứu. Hầu hết các vật liệu đồng chất đã có các bảng giá trị. Vật liệu phức hợp thì khá phức tạp vì phụ thuộc vào nhiều yếu tố và các bảng cũng chỉ đưa ra một khoảng giá trị để người dùng có thể chọn lựa theo chủ quan cá nhân. Trong bài báo tác giả trình bày một phương pháp giải tích nhằm tìm ra công thức có thể tính toán được giá trị hệ số dẫn nhiệt cho hợp chất 2 pha dạng rắn + rắn, rắn + khí, rắn + lỏng, khí + khí. Công thức này cho phép người dùng có thể sử dụng để tính toán cho các vật liệu phức hợp thường gặp trong thực tế khi đã biết thành phần thể tích r_i và hệ số dẫn nhiệt đơn chất λ_i của từng thành phần trong hỗn hợp.

Từ khóa - Hệ số dẫn nhiệt phức hợp; công nghệ nhiệt; vật liệu nhiệt; hệ số dẫn nhiệt

1. Đặt vấn đề

Vật liệu phức hợp được dùng khá phổ biến trong kỹ thuật, các kết cấu như tường nhà, tường kho lạnh, tường lò công nghiệp, vật liệu cách nhiệt, ... Các kết cấu này thường nhiều thành phần phối liệu để tạo nên hình dạng, kích thước tiêu chuẩn để xây lắp.

Trong tính toán kỹ thuật hệ số dẫn nhiệt λ của vật liệu có ý nghĩa vô cùng to lớn. Hệ số dẫn nhiệt của đơn chất phụ thuộc vào độ tinh khiết, cấu trúc mạng tinh thể, nhiệt độ. Với hợp chất thì phụ thuộc vào thành phần, pha, tỷ trọng, nhiệt độ, độ ẩm của vật liệu, ... [1, 2].

Có nhiều phương pháp có thể xác định được giá trị của đại lượng vật lý này. Đa số sử dụng phương pháp thực nghiệm và lập thành bảng để tra cứu. Các phương pháp số phần lớn dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn, sai phân hữu hạn, phương pháp biến đổi nhanh chuỗi Fourier, phương pháp phần tử biên, ...

Theo bài báo “Phương pháp mới xác định hệ số dẫn nhiệt và hệ số dẫn nhiệt độ các vật liệu âm” nhóm tác giả đã sử dụng phương pháp giải tích gần đúng của bài toán dẫn nhiệt và khuếch tán âm trong một tấm phẳng với điều kiện biên loại 2 đối xứng khi Fourier đủ bé để xác định hệ số dẫn nhiệt cho vật liệu sấy ứng dụng trong kỹ thuật sấy [3].

Tác giả Trần Anh Bình cũng có một phương pháp riêng để khảo sát ảnh hưởng của hình dáng, kích thước cốt liệu tới hệ số dẫn nhiệt hiệu quả của vật liệu không đồng nhất [4].

Abstract - In thermal engineering calculations, the coefficient of thermal conductivity is an important and necessary physical quantity. To get the value of this quantity, the method is mainly determined by experiment, measurement and statistics into tables. Most homogenous materials already have value tables. Composite materials are quite complex because they depend on many factors and the tables also only give a range of values for users to choose according to their individual subjectivity. In this article, we represent a formula that can calculate the value of the thermal conductivity coefficient for the compound. There are only results for some compounds in 2 phases: solid + solid, solid + gas, solid + liquid, and gas + gas. This formula allows the user to use it to calculate any composite material encountered in practice when the volume composition r_i and the simple thermal conductivity λ_i of each component in the mixture are known.

Key words - Complex coefficient of thermal conductivity; thermal technology; thermal materials; coefficient of thermal conductivity

Các nghiên cứu của nhiều tác giả khác cũng đều đưa ra được một phương pháp tính gần đúng cho hệ số dẫn nhiệt cụ thể thuộc đối tượng nghiên cứu. Vật liệu phức hợp nói chung khá phức tạp và rất hay dùng trong kỹ thuật. Chúng có thành phần và kết cấu rất đa dạng. Việc xác định λ bằng thực nghiệm rất tốn kém.

Hiện nay các bảng thông số cho hợp chất cũng chỉ cho số liệu nằm trong một dải phụ thuộc vào tỷ trọng để người dùng có thể chọn lựa và đưa vào phép tính. Đối với đơn chất thì đã có khá đầy đủ và dễ dàng tra cứu hơn. Còn với hợp chất có nhiều thành phần phức tạp, cần đến thông số này thì chưa có số liệu cụ thể để có thể tra cứu hoặc tính toán.

Trong bài báo này tác giả muốn trình bày một phương pháp đơn giản cho phép xác định hệ số dẫn nhiệt λ của vật liệu có nhiều thành phần và nhiều pha trong hỗn hợp một cách đơn giản khi đã biết thành phần thể tích r_i và hệ số dẫn nhiệt đơn chất λ_i cho từng thành phần trong hỗn hợp đó. Tuy nhiên, trong quá trình tính toán với khối lượng các phép tính lớn nên tác giả chỉ mới trình bày được kết quả của một số vật liệu 2 thành phần đại diện cho các dạng rắn + rắn, rắn + khí, rắn + lỏng, khí + khí.

2. Bài toán

2.1. Phát biểu bài toán

Thông thường vật liệu phức hợp được kết hợp giữa các pha với nhau như: rắn + rắn, khí + khí, rắn + lỏng, rắn + khí, ... trong các pha cũng có thể có nhiều chất khác nhau với điều

¹ The University of Danang - University of Science and Technology (Bui Thi Huong Lan)

kiện các chất chỉ là hỗn hợp cơ học không gây ra các phản ứng hóa học. Bài toán có thể phát biểu như sau:

Cho trước khối vật liệu kích thước $V = F \times \delta$ không đồng nhất, gồm n thành phần phân bố đều. Mỗi thành phần thứ i có hệ số dẫn nhiệt λ_i và thành phần thể tích $r_i = V_i/V$ đã biết. Cần xác định hệ số dẫn nhiệt λ của vật liệu theo r_i , λ_i và n [5].

2.2. Các giả thiết nghiên cứu

Sự hỗn hợp của thành phần các chất trong vật liệu rất đa dạng, có khi chỉ là hỗn hợp cơ học, có khi là hỗn hợp hóa học và sinh ra thành phần chất khác. Sự liên kết các hạt liệu trong hỗn hợp cũng khác nhau, có những hỗn hợp không cần chất liên kết nhưng cũng có những hỗn hợp để liên kết được với nhau cần phải có keo liên kết hoặc là các tác nhân bên ngoài như lực cơ học (ép, nén,...). Để nghiên cứu được cần phải có các giả thiết:

- Mỗi thành phần được phân bố đều và đẳng hướng trong thể tích hỗn hợp.

- Nếu tách ra và giữ nguyên thể tích riêng v_i của thành phần i , thì hệ số dẫn nhiệt λ_i của nó không đổi và bằng λ_i của đơn chất đã cho.

- Mỗi thành phần có pha không đổi, có thể ở pha rắn, lỏng, hoặc khí, có thể tích riêng v_i và khối lượng riêng ρ_i không đổi, như khi nó tồn tại ở dạng một đơn chất tự do.

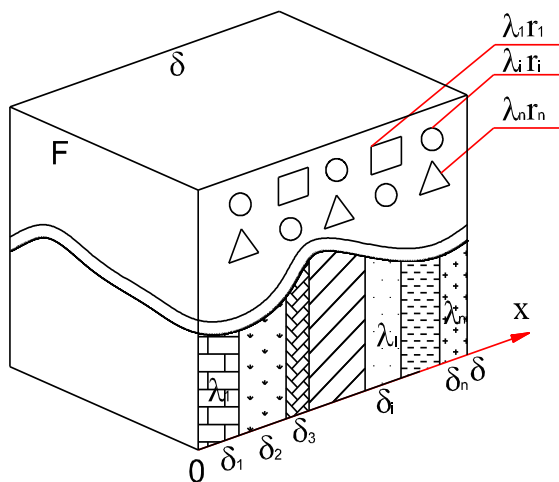
- Hỗn hợp không làm thay đổi tính chất hay thông số vật lý của mỗi thành phần, so với khi nó tồn tại ở dạng đơn chất.

Với các giả thiết nêu trên hầu hết trong thực tế thường được đáp ứng khi chế tạo các vật liệu phức hợp [5].

2.3. Lập công thức tính $\lambda(r_i, \lambda_i, n)$

2.3.1. Công thức tổng quát tính $\lambda(n, r_i, \lambda_i)$

Nếu tách riêng mỗi thành phần thứ i , giữ nguyên thể tích V_i của nó và xếp lần lượt các lớp vào thể tích V theo hướng δ , thì theo các giả thiết trên, nhiệt trở theo hướng δ của $V = \sum V_i = F \sum \delta_i$ là không đổi, bài toán có thể được mô tả như Hình 1 [5].



Hình 1. Mô tả bài toán tính $\lambda(r_i, \lambda_i, n)$

Nhiệt trở dẫn nhiệt cho các lớp vật liệu trong mô tả bài toán:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$$

Trong đó, δ_i là chiều dày của lớp thứ i không bị nén, bằng: $\delta_i = \frac{V_i}{F} = \frac{V_i}{V/\delta} = r_i \delta$

R: Nhiệt trở của khối vật liệu phức hợp;

λ : Hệ số dẫn nhiệt của vật liệu phức hợp;

δ : Bề dày của khối vật liệu phức hợp;

λ_i, r_i : Hệ số dẫn nhiệt và thành phần thể tích của lớp thứ i ;

Giải phương trình $\frac{\delta}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{r_i \delta}{\lambda_i}$ sẽ tìm được:

$$\lambda(n, r_i, \lambda_i) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{\lambda_i} \right)^{-1}, [W/mK] \quad (1)$$

2.3.2. Công thức tính hệ số dẫn nhiệt của vật liệu 2 thành phần

Cho biết hỗn hợp có khối lượng riêng ρ gồm 2 thành phần, có hệ số dẫn nhiệt và khối lượng riêng λ_1, ρ_1 và λ_2, ρ_2 cần tính λ của hỗn hợp.

Theo 4 giả thiết đã nêu, có thể xác định các thành phần thể tích r_1, r_2 theo hệ 2 phương trình mô tả các tính chất của hỗn hợp không bị nén như sau:

$$\begin{cases} r_1 + r_2 = 1 \\ r_1 \rho_1 + r_2 \rho_2 = \rho \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} r_1 = (\rho - \rho_2) / (\rho_1 - \rho_2) \\ r_2 = (\rho_1 - \rho) / (\rho_1 - \rho_2) \end{cases} \quad (2)$$

Trong các công thức trên, theo chiều tăng của khối lượng riêng ta nên đặt $\rho_1 < \rho < \rho_2$.

Thay giá trị r_1, r_2 vào công thức tổng quát sẽ có:

$$\lambda(\rho, \rho_1, \lambda_1, \rho_2, \lambda_2) = \left(\sum_{i=1}^2 \frac{r_i}{\lambda_i} \right)^{-1} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\rho_2 - \rho_1)}{\lambda_1 (\rho - \rho_1) + \lambda_2 (\rho_2 - \rho)} \quad (3)$$

Theo thuyết động học phân tử thì $\lambda = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{C}_v$ nghĩa

là hệ số dẫn nhiệt của một vật tỷ lệ thuận với khối lượng riêng của vật đó. Do đó nếu $\rho_1 < \rho < \rho_2$ thì $\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$ [5].

2.4. Hàm phân bố $\lambda(\rho)$ của vật liệu 2 thành phần

Khi chế tạo vật liệu phức hợp, ta có thể thay đổi thành phần r_i của đơn chất để thu được vật liệu có khối lượng riêng ρ và hệ số dẫn nhiệt λ theo ý muốn.

Với vật liệu 2 thành phần có $(\rho_1, \rho_2, \lambda_1, \lambda_2)$ không đổi, quan hệ giữa λ và ρ của vật liệu là hàm số xác định theo công thức (3) lập được ở mục trên, có dạng:

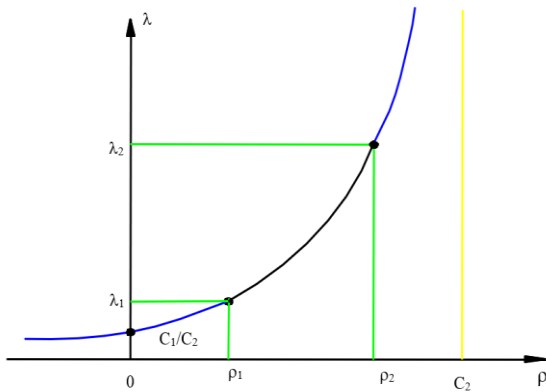
$$\lambda(\rho) = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\rho_2 - \rho_1)}{\lambda_1 (\rho - \rho_1) + \lambda_2 (\rho_2 - \rho)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\rho_2 - \rho_1)}{\lambda_2 \rho_2 - \lambda_1 \rho_1 - \rho} = \frac{C_1}{C_2 - \rho} \quad (4)$$

Trong đó:

$$C_1 = \lambda_1 \lambda_2 \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}, \left[\frac{\text{kgW}}{\text{m}^4 \text{K}} = \frac{\text{kg}^2}{\text{m}^2 \text{s}^3 \text{K}} \right]$$

$$C_2 = \frac{\lambda_2 \rho_2 - \lambda_1 \rho_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, [\text{kg/m}^3]$$

Hàm phân bố $\lambda(\rho) = \frac{C_1}{C_2 - \rho}$ có đồ thị là một đoạn hypebol như Hình 2. Đó là một hàm đơn trị tăng đơn điệu trong miền xác định ($\rho_1 < \rho < \rho_2$) thì có ($\lambda_1 < \lambda < \lambda_2$).



Hình 2. Đồ thị hàm $\lambda(\rho)$

3. Ứng dụng bài toán

3.1. Ứng dụng bài toán để tính C_1, C_2 cho các vật liệu 2 thành phần thường dùng trong kỹ thuật

3.1.1. Cho vật liệu rắn dạng bột/hạt

Vật liệu rắn dạng bột/ hạt được xem là hỗn hợp cơ học của hạt rắn với không khí, hoặc là các vật liệu xốp. Trong tự nhiên, vật liệu dạng bột tồn tại rất phong phú và đa dạng ví dụ trong thực phẩm: các loại bột ngũ cốc, bột cà phê, bột sữa hoặc dạng hạt như ngô, thóc, cà phê,... Trong xây dựng: bột đá, bột xi măng, cát khô,... hoặc dạng xốp như bê tông xốp, bông thủy tinh, bông khoáng,... Theo phương

trình (4), hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc vào khối lượng riêng của hỗn hợp và các hệ số C_1, C_2 trong công thức. Các hệ số này (theo cách đặt) phụ thuộc vào bản chất của từng loại vật liệu, tức hệ số dẫn nhiệt và khối lượng riêng của từng thành phần, có thể lập bảng tính C_1, C_2 cho một số vật liệu thông dụng gồm 2 thành phần như Bảng 1.

3.1.2. Vật liệu dạng hỗn hợp rắn + rắn

Hỗn hợp dạng rắn + rắn được coi là hỗn hợp cơ học giữa 2 chất rắn thành phần và không phản ứng hóa học để tạo thành chất khác. Trong kỹ thuật dạng hỗn hợp này cũng khá đa dạng như hỗn hợp vữa khô của xi măng và cát, bê tông cốt sắt, hỗn hợp phối liệu để tạo hình viên gạch mộc bằng quá trình ép nén, các tấm ép hỗn hợp định hình,... Theo phương trình (4), ta cũng tính được C_1, C_2 và kết quả tính toán cho 2 vật liệu đại diện là vữa khô và bê tông cốt sắt được cho trong Bảng 1.

3.1.3. Vật liệu dạng rắn + lỏng

Tương tự vật liệu dạng rắn + lỏng cũng được giả thiết chỉ là hỗn hợp cơ học giữa 2 pha rắn + lỏng mà không gây phản ứng hóa học để tạo ra chất khác. Dạng vật liệu này tồn tại khá phổ biến, ví dụ như vật liệu ướt như cát ướt, các dạng hạt ướt không bị thấm, bông thủy tinh ướt, ... Với dạng hỗn hợp này ta vẫn có thể sử dụng lý thuyết nêu trên để tính toán hệ số dẫn nhiệt cho hỗn hợp, kết quả tính toán cũng được mô tả trong Bảng 1 với 2 chất đại diện là cát ướt và bông thủy tinh ướt.

Trong Bảng 1 tác giả trình bày kết quả tính toán C_1 và C_2 theo các thành phần trong hỗn hợp. Các giá trị dùng để tính toán ra hệ số dẫn nhiệt cho các hợp chất đại diện có 2 thành phần tả như Bảng 1 theo công thức (4).

Bảng 1. Bảng tính C_1, C_2 cho một số vật liệu 2 thành phần với nhiều pha khác nhau

| Dạng vật liệu | Tên vật liệu | Thành phần | | λ [W/mK] | | ρ , [kg/m ³] | | C1 | C2 |
|---------------|--------------------|------------|-----------|------------------|-------------|-------------------------------|----------|--------|--------|
| | | 1 | 2 | λ_1 | λ_2 | ρ_1 | ρ_2 | | |
| Bột/hạt | Bột than | Than đá | Không khí | 0,86 | 0,026 | 1500 | 1,2 | 40,2 | 1546,7 |
| | Xi măng bột | Xi măng | Không khí | 1,38 | 0,026 | 1800 | 1,2 | 47,7 | 1834,5 |
| | Bột sỏi | Sỏi | Không khí | 0,36 | 0,026 | 1840 | 1,2 | 51,5 | 1983 |
| | Bột xi | Xi | Không khí | 0,3 | 0,026 | 1300 | 1,2 | 37 | 1423 |
| R-R | Vữa khô | Xi măng | Cát | 1,38 | 0,98 | 1800 | 2000 | 76,2 | 2490 |
| | Bê tông cốt sắt | Bê tông | Sắt | 2,1 | 74,4 | 1600 | 7880 | 13571 | 8062,4 |
| R-K | Bê tông xốp | Bê tông | Không khí | 2,1 | 0,026 | 1600 | 1,2 | 42,1 | 1620 |
| | Bông thủy tinh | Thủy tinh | Không khí | 0,74 | 0,026 | 2500 | 1,2 | 67,3 | 2591 |
| | Gạch xốp | Gạch | Không khí | 0,77 | 0,026 | 1800 | 1,2 | 48,4 | 1863 |
| | Giấy amiăng | Amiăng | Không khí | 0,2 | 0,026 | 2600 | 1,2 | 77,7 | 2988 |
| R-L | Cát ướt | Cát | Nước | 0,98 | 0,6 | 2000 | 1000 | 1547,3 | 3579 |
| | Bông thủy tinh ướt | Thủy tinh | Nước | 0,74 | 0,6 | 2500 | 1000 | 4757 | 8928,6 |

3.1.4. Tính λ của khí (không khí) loãng hoặc chân không kỹ thuật

Không khí loãng được coi là hỗn hợp của hai khí chủ yếu là nitơ và ôxi. Chân không kỹ thuật là hỗn hợp của không khí và chân không tuyệt đối. Không khí trong khí quyển có phân bố cột áp là:

$$p(y) = \begin{cases} p_0 \exp\left(\frac{-gy}{RT_0}\right) \\ p_0 \left(1 - \frac{gy}{C_p T_0}\right)^{C_p/R} \end{cases}$$

Theo phương trình trạng thái, ta có: $\frac{p}{\rho} = RT \Rightarrow \rho = \frac{p}{RT}$

thay vào (4) ta được:

$$\lambda(y, T, (\lambda_1, \lambda_2, \rho_1, \rho_2, p_0, T_0)) = \text{const} = \begin{cases} \frac{C_1}{C_2 - p_0 \exp\left(\frac{-gy}{RT_0}\right)} \\ \frac{C_1}{C_2 - p_0 \left(1 - \frac{gy}{C_p T_0}\right)^{C_p/R}} \end{cases} \quad (5)$$

Đối với không khí loãng và chân không kỹ thuật, hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc vào cột áp và nhiệt độ của môi trường khảo sát theo biểu thức (5).

3.1.5. Tính λ của dung dịch coi là hỗn hợp của hai chất lỏng

Dung dịch được coi là hỗn hợp của hai thành phần, trong đó sự hòa tan vào nhau của các thành phần đảm bảo các yêu cầu của giả thiết bài toán, ví dụ dung dịch glycol thì khi đó công thức (4) cũng có thể áp dụng được, tuy nhiên việc sử dụng dạng dung dịch trong kỹ thuật nhiệt thường không phổ biến cũng như hạn chế của tác giả nên trong bài báo này chưa kịp nghiên cứu.

Bảng 2. Bảng tính λ vật liệu phức hợp và sai số so với giá trị thực nghiệm tại các bảng thông số

| Vật liệu | Thành phần | | ρ [kg/m ³] / r_i [%] | | | λ đo, [W/mK] | | | λ_t , [W/mK] | ϵ , % |
|----------------|----------------|----------------|---|------------|--------|----------------------|-------------|----------------|----------------------|----------------|
| | 1 | 2 | ρ_1 | ρ_2 | ρ | λ_1 | λ_2 | λ_{TN} | | |
| Vữa | Cát | Xi măng | 2000 | 1500 | 1800 | 0,98 | 1,38 | 1,12 | 1,109 | 1,1 |
| Gạch xốp | Gạch | Không khí | 1800 | 1,2 | 1200 | 0,77 | 0,026 | 0,07 | 0,073 | 4,2 |
| Không khí | N ₂ | O ₂ | $r_1=0,79$ | $r_2=0,21$ | 1,2 | 0,0251 | 0,0262 | 0,026 | 0,0253 | 1,1 |
| Bông thủy tinh | Thủy tinh | Không khí | 2500 | 1,2 | 200 | 0,85 | 0,026 | 0,03 | 0,028 | 6,1 |
| Bột than | Than đá | Không khí | 1500 | 1,2 | 850 | 0,86 | 0,026 | 0,062 | 0,058 | 6,5 |

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng được công thức cho phép tính toán gần đúng giá trị hệ số dẫn nhiệt cho các loại vật liệu phức hợp hai thành phần và có kiểm chứng lại để chứng minh cho tính đúng đắn của công thức, kết quả so sánh của 5 loại vật liệu phức hợp đại diện trong kỹ thuật nhiệt cho sai số khá nhỏ (quanh ngưỡng 5%) nên kết quả của bài báo có thể ứng dụng để tính toán một cách gần đúng hệ số dẫn nhiệt cho những hợp chất khó đo đạc bằng thực nghiệm.

Kết quả tính toán không bị sai lệch quá nhiều so với việc đo đạc bằng thực nghiệm và điều quan trọng nữa là có thể xác định hệ số dẫn nhiệt cho bất kì vật liệu đa chất nào trong kỹ thuật.

Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng để các kỹ sư, các nhà khoa học vật liệu tham khảo để xác định một cách gần đúng hệ số dẫn nhiệt cho những vật liệu phức hợp không có trong các bảng tra cứu về đại lượng vật lý nhiệt này.

Trong bài báo còn có hướng mở để tác giả tiếp tục nghiên cứu thêm cho vấn đề này khi hỗn hợp nhiều thành phần hơn nữa.

3.2. Kết quả tính toán cho một số dạng vật liệu

Sử dụng lý thuyết trên, tính toán cho một số vật liệu điển hình cho các pha hỗn hợp ta có thể lập bảng tính toán C_1, C_2 cho các vật liệu với các dạng hỗn hợp khác nhau của các pha, có thể tổng kết trong Bảng 1.

3.3. Kiểm tra sai số của công thức

Để kiểm chứng lại công thức đã thiết lập trong Mục 2.3 và 2.4, tác giả đã sử dụng bảng các thông số vật lý của các vật liệu trong thực tế đã biết, sử dụng công thức để tính toán và kiểm tra sai số tương đối $\epsilon = \left| \frac{1 - \lambda_i / \lambda_{TN}}{\lambda_{TN}} \right|$ giữa λ_i tính theo công thức và λ_{TN} đã được tra cứu từ các bảng thực nghiệm phụ lục 7 [tr 308], phụ lục 8 [tr 309], phụ lục 15 [tr 316], [1] của 5 loại vật liệu hỗn hợp của 2 pha rắn + rắn, rắn + khí và khí + khí trong Bảng 2.

Trong Bảng 2 tác giả tính toán sai số giữa kết quả tính toán theo công thức (4) và (5) cho các hợp chất 2 thành phần của một số chất đại diện với kết quả đo thực nghiệm được tra tại các bảng phụ lục của tài liệu tham khảo. Kết quả với sai số khá hợp lý, quanh ngưỡng 5%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hoàng Ngọc Đồng, Thái Ngọc Sơn, *Kỹ thuật nhiệt, Nhà Xuất Bản Xây dựng, 2015*
- [2] Vũ Diễm Hương, Nguyễn Đức Lợi, Lê Xuân Khuông, *Vật liệu Kỹ thuật nhiệt*, NXB Giáo dục, 1998.
- [3] Trần Văn Phú, Nguyễn Hay, Lê Quang Huy, "*Phương pháp mới xác định hệ số dẫn nhiệt và hệ số dẫn nhiệt độ các vật liệu âm*", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng* số 7- 2014 (tr 52-58).
- [4] Trần Anh Bình, "*Sử dụng phương pháp XFEM/level-set để khảo sát ảnh hưởng của kích thước, hình dạng cốt liệu tới hệ số dẫn nhiệt hiệu quả của vật liệu không đồng nhất*", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, số 3/01-2017, (tr 19-24).
- [5] Bùi Thị Hương Lan, *Nghiên cứu tính toán hệ số dẫn nhiệt của vật liệu phức hợp*, Đề tài cấp Trường mã số T2012-02-49, năm 2012.
- [6] N.I.Kôskin, M.G.Sirkêvich, *Sổ tay vật lý cơ sở*. Nhà xuất bản công nhân kỹ thuật Hà Nội và nhà xuất bản Mir Maxcova, 1987.
- [7] Nguyễn Hoa Thịnh, Nguyễn Đình Đức, *Vật liệu composite cơ học và công nghệ*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2002.
- [8] Hoàng Kim Cơ, Phạm Kim Đình, Lê Xuân Khuông, *Kỹ thuật nhiệt luyện kim*, NXB Giáo dục, 1998.
- [9] Nguyễn Bốn, *Các phương pháp tính trong KHKH và truyền nhiệt*, Tài liệu lưu hành nội bộ, 1995.