

# Đồng nhất hoá vật liệu dự báo hệ số dẫn nhiệt vĩ mô của bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrol phòng nổ

## Homogenization approach for estimating the effective thermal conductivity of Lightweight Expanded Polystyrol Concrete

Vũ Việt Cường, Nguyễn Tiên Dũng, Nguyễn Đình Hải\*

Trường Đại học Giao thông vận tải

\*Email liên hệ: nguyendinhhai.1986@utc.edu.vn

### Tóm tắt:

Nghiên cứu này được thực hiện với mục đích xác định hệ số dẫn nhiệt vĩ mô của bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrol phòng nổ (LEPS - C) theo cách tiếp cận đồng nhất hóa vật liệu thông qua các tính toán giải tích. Ảnh hưởng của hàm lượng hạt polystyrol phòng nổ tới hệ số dẫn nhiệt tổng thể của LEPS - C được xác định bằng việc sử dụng các mô hình đồng nhất hóa cổ điển dựa trên nghiệm của bài toán Eshelby với việc coi pha nền là bê tông đối chứng và pha cốt là các hạt polystyrol phòng nổ có dạng hình cầu được phân bố ngẫu nhiên trong pha nền. Hàm lượng hạt polystyrol phòng nổ thay thế lần lượt là 0, 10, 20, 30 và 40% theo thể tích của bê tông đối chứng. Các kết quả tính toán giải tích nhận được bằng các mô hình đồng nhất hóa được so sánh với các kết quả thực nghiệm với sai số nhỏ cho thấy tính khả dụng của phương pháp này trong việc dự báo hệ số dẫn nhiệt vĩ mô của LEPS - C.

**Từ khóa:** LEPS - C; Hạt polystyrol phòng nổ; Hệ số dẫn nhiệt vĩ mô; Đồng nhất hoá vật liệu.

### Abstract:

This paper aims to determine the macroscopic thermal conductivity coefficient of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete (LEPS-C) using the homogenization approach through analytical calculations. The influence of expanded polystyrene on the overall thermal conductivity coefficient of LEPS-C was determined using classical homogenization models based on the solution of the Eshelby problem, with the matrix phase being concrete and the inclusion phase being expanded polystyrene particles randomly distributed in the matrix phase. The content of substituted expanded polystyrene particles was varied from 0% to 40% by volume of concrete. The analytical calculation results obtained from the homogenization models were compared with the experimental results, showing good agreement and demonstrating the efficacy of the homogenization method in predicting the macroscopic thermal conductivity of LEPS-C.

**Keywords:** LEPS - C; Expanded polystyrol particle; Macroscopic thermal conductivity coefficient; Homogenization.

### 1. Giới thiệu

Bê tông xi măng là loại vật liệu xây dựng được sử dụng phổ biến trên thế giới do nhiều ưu điểm mà nó mang lại như cường độ lớn, độ bền lâu và giá thành hợp lý bởi tận dụng được nguồn vật liệu địa phương. Tuy nhiên, vật liệu này có nhược điểm là khối lượng thể tích lớn 2000 - 2400kg/m<sup>3</sup> và khả năng cách âm,

cách nhiệt kém [1]. Để giảm khối lượng thể tích đồng thời nâng cao khả năng cách âm cách nhiệt của bê tông với nhiều giải pháp được đưa ra như bê tông bọt, bê tông cốt liệu keramzit, bê tông khí chưng áp, bê tông cốt liệu hạt polystyrol phòng nổ,... Trong các giải pháp kể trên, bê tông sử dụng hạt polystyrol phòng nổ được xem là một giải pháp mới có nhiều ưu việt, với việc sử dụng các hạt polystyrol phòng

nở, bê tông có thể giảm khối lượng thể tích xuống còn 300 - 1800kg/m<sup>3</sup> [2], [3], cùng với khả năng cách âm, cách nhiệt được cải thiện đáng kể. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng bê tông truyền thống có hệ số dẫn nhiệt khoảng 0,94 W/m.K nhưng khi bê tông có thành phần 40% hạt polystyrol thì hệ số dẫn nhiệt của nó có thể giảm xuống còn khoảng 0,4 W/m.K [4]-[6]. Các nghiên cứu cũng cho thấy khi có mặt hạt polystyrol, các tính năng cơ học của bê tông bị giảm xuống, cụ thể cường độ chịu nén của LEPS-C ghi nhận giá trị 0,28 Mpa và 4,22 Mpa cùng với khối lượng thể tích tương ứng là 200 kg/m<sup>3</sup> và 1100kg/m<sup>3</sup> với hệ số dẫn nhiệt đạt 0,073 và 0,34 W/m.K [6]. Với đặc tính cách nhiệt nêu trên, LEPS được sử dụng chế tạo các tấm tường, vách ngăn cũng như gạch rỗng cách nhiệt và được xem là một loại vật liệu tiết kiệm năng lượng [2] – [6]. Vì vậy, ngày càng có nhiều nghiên cứu được thực hiện nhằm xác định hệ số dẫn nhiệt của loại bê tông này. Bên cạnh các phương pháp thực nghiệm yêu cầu cao về thiết bị thí nghiệm, thời gian thí nghiệm cùng với đòi hỏi về kinh phí tương đối lớn [7], có thể sử dụng phương pháp số dựa trên phần tử hữu hạn với thời gian tính toán nhanh và chi phí thấp hơn, tuy nhiên phương pháp này lại đòi hỏi cấu hình máy tính cao [7]. Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu trình bày một số mô hình đồng nhất hoá vật liệu cho phép xác định hệ số dẫn nhiệt của bê tông polystyrol thông qua các phép tính giải tích đồng nhất hoá vật liệu dựa trên nghiệm của bài toán Eshelby [8]-[11] nhằm bổ sung và khắc phục cho các nhược điểm của các phương pháp đã được nêu.

Bài báo được kết cấu theo nội dung chính như sau: Phần 2 trình bày về vật liệu chế tạo và công thức thành phần của LEPS-C, phần 3 đưa ra các phương trình toán học mô tả bài toán dẫn nhiệt và các công thức giải tích của mô hình bão hoà cũng như Mori-Tanaka cho phép dự báo hệ số dẫn nhiệt có hiệu của LEPS-C, các áp dụng số của mô hình sẽ được so sánh với các kết quả thực nghiệm, phần 4 là một số kết luận và kiến nghị của nghiên cứu.

## 2. Vật liệu thành phần và thực nghiệm xác định hệ số dẫn nhiệt của LEPS-C

Nghiên cứu này trình bày thành phần tham khảo của bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrol phòng nổ được đề xuất bởi Yi Xu và cộng sự [3]. Xi măng Portland được sử dụng trong nghiên cứu là loại xi măng thông thường. Đường kính cốt liệu lớn nhất danh định nhỏ hơn 10 mm. Sử dụng cát hạt trung trong chế tạo LEPS-C. Hạt EPS phòng nổ sử dụng có khối lượng thể tích là 30 kg/m<sup>3</sup> và kích thước hạt trung bình là 3 mm.

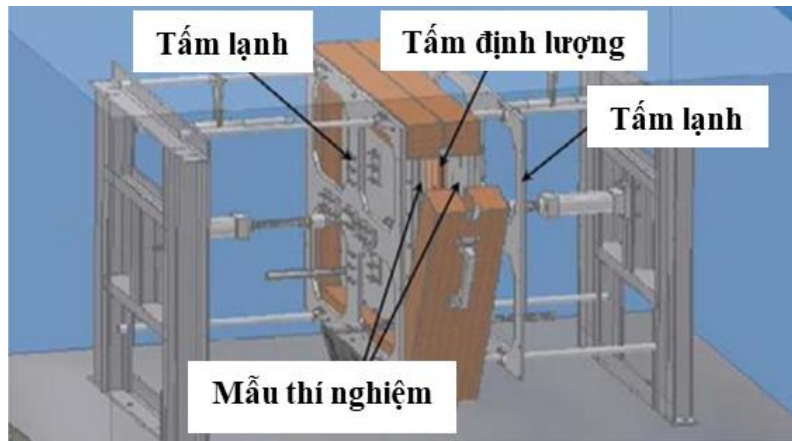
Nghiên cứu của Yi Xu đã đề xuất công thức thành phần của bê tông sử dụng hạt EPS với tỷ lệ N/X = 0,55 và tỷ lệ hạt EPS chiếm lần lượt 0, 10, 20, 30 và 40% thể tích của bê tông như sau như bảng 1 dưới đây.



**Hình 1.** Hạt EPS dùng trong nghiên cứu của Yi Xu.



**Hình 2.** Mẫu thí nghiệm LEPS-C [3].



Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm xác định hệ số truyền nhiệt của LEPS-C [3].

Bảng 1 . Công thức thành phần EPS- C đề xuất bởi Y. Xu [3].

Hỗn hợp	Hàm lượng EPS (%) theo thể tích	Xi măng (kg/m <sup>3</sup> )	Nước (kg/m <sup>3</sup> )	Cát (kg/m <sup>3</sup> )	Đá dăm (kg/m <sup>3</sup> )
A (N/X = 0.55)					
A1	0	500	275	713	872
A2	10	450	248	642	784
A3	20	400	220	570	697
A4	30	350	192	499	610
A5	40	300	165	428	523

Bảng 2. Hệ số dẫn nhiệt của các hỗn hợp LEPS – C.

Hỗn hợp	Hàm lượng EPS (%) theo thể tích	Thực nghiệm xác định hệ số dẫn nhiệt (W/m.K)
A (N/X = 0,55)		
A1	0	0,91
A2	10	0,71
A3	20	0,65
A4	30	0,56
A5	40	0,48

### 3. Mô hình đồng nhất hoá vật liệu

Nghiên cứu đề xuất sử dụng các mô hình đồng nhất hoá cổ điển được đề xuất sử dụng đều dựa trên nghiệm của bài toán Eshelby [5] dành cho pha hạt hình elip tròn xoay sử dụng cho bài toán nhiệt.

Cho bê tông polystyrol là một vật liệu tổng hợp được cấu thành bởi hai pha gồm pha hạt  $\Omega^{(1)}$  và pha nền  $\Omega^{(2)}$ . Cả hai pha đều được xem là đồng nhất và

có tính truyền nhiệt đẳng hướng với tensor hệ số dẫn nhiệt bậc hai:

$$K^{(1)} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 \end{bmatrix},$$

$$K^{(2)} = \begin{bmatrix} k_2 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Sự truyền nhiệt của vật liệu được tuân theo định luật Fourier:

$$q^{(\alpha)}(x) = K^{(\alpha)}(x) \cdot \nabla \theta^{(\alpha)}(x) \quad (2)$$

Với  $\nabla \theta^{(\alpha)}(x)$ ,  $q^{(\alpha)}(x)$  lần lượt là gradient nhiệt độ và vector dòng nhiệt của pha tại tọa độ  $x$ ,  $K^{(\alpha)}(x)$  là tensor hệ số truyền nhiệt bậc 2 của pha  $\alpha$  (với  $\alpha = 1$ , hạt polystyrol phòng nở;  $\alpha = 2$  pha bê tông hạt mịn đối chứng). Tương tự như với bài toán đàn hồi đã trình bày ở [7] tensor hệ số dẫn nhiệt vĩ mô của vật liệu tổng hợp được tính như sau:

$$K^{hom} = \sum_{\alpha=1}^n f_{\alpha} K^{(\alpha)} A^{(\alpha)} \quad (3)$$

Trong đó  $f_{\alpha}$  và  $A^{(\alpha)}$  lần lượt là tỷ lệ thể tích của hạt polystyrol trong bê tông nhẹ sử dụng hạt polystyrol phòng nở và tensor định vị bậc 2 của pha hạt polystyrol nằm trong bê tông.

Thực hiện các bước tính tương tự trong bài toán đàn hồi ta có thể xác định chính xác các tensor định vị cho bài toán nhiệt cho các mô hình đồng nhất hóa tương ứng sau [4] – [6]:

Mô hình bão hòa:

$$A_{DL}^{(1)} = [I + S^{av} [K^{(2)}]^{-1} (K^{(1)} - K^{(2)})]^{-1} \quad (4)$$

$$A_{DL}^{(2)} = \frac{1}{f_2} [I - f_1 A_{DL}^{(1)}]$$

Mô hình Mori – Tanaka:

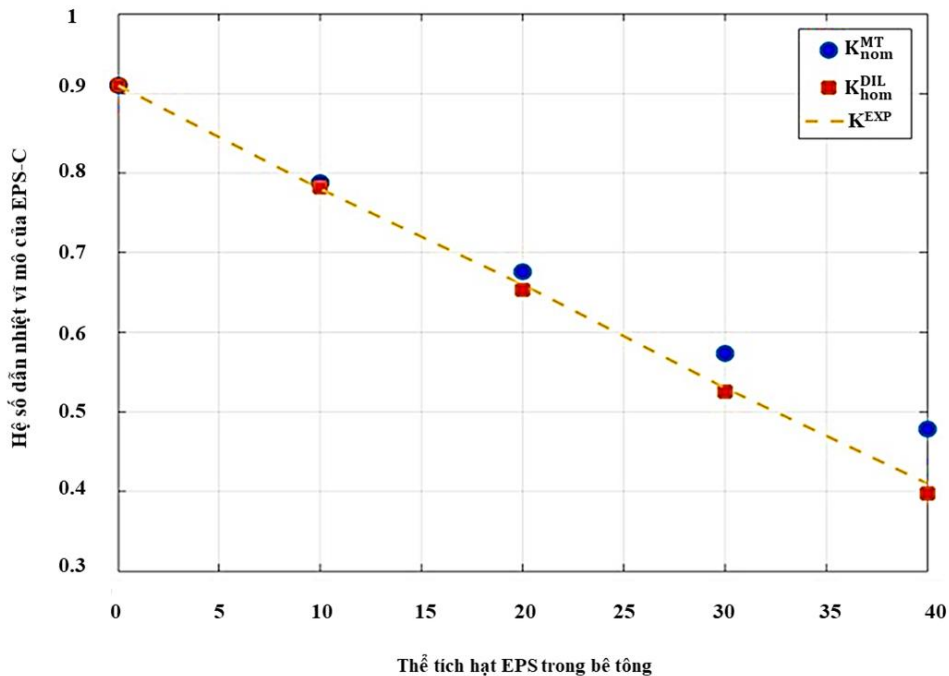
$$A_{MT}^{(2)} = [f_2 I + f_1 A_{DL}^{(1)}] \quad (5)$$

Với  $I$  là tensor đơn vị bậc 2. Thế các tensor định vị bậc 2 trong các mô hình bão hoà (4) và mô hình Mori – Tanaka (5) vào phương trình (3) sẽ nhận được công thức giải tích tensor hệ số truyền nhiệt vĩ mô của composite cho các mô hình bão hoà và Mori – Tanaka như sau:

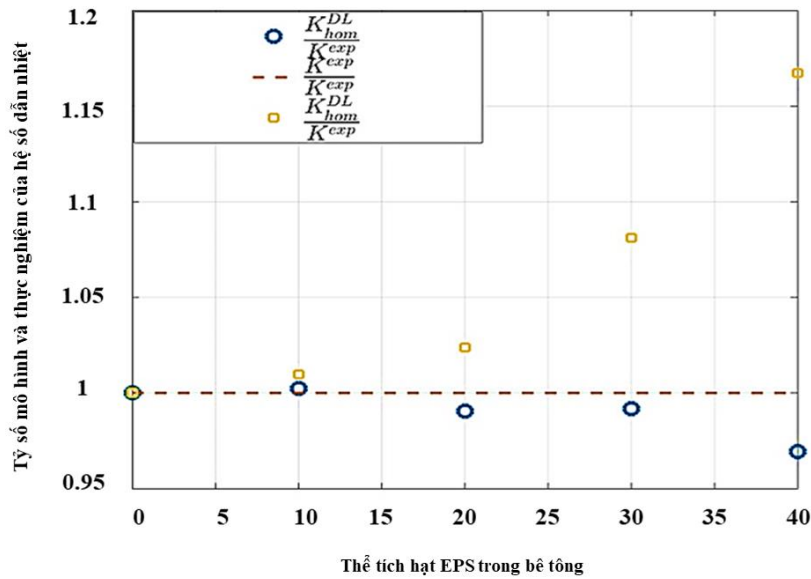
$$K_{DL}^{(hom)} = K_{DL}^{(hom)} I = \left[ \frac{3f_1(K_1 K_2 - K_2^2)}{K_1 + 2K_2} + K_2 \right] I \quad (6)$$

$$K_{MT}^{(hom)} = K_{MT}^{(hom)} I = \frac{f_1 K_1 f_2 + (1-f_1) K_2 \left[ K_2 + \frac{1}{3}(K_1 - K_2) \right]}{K_2 + \frac{1}{3}(1-f_1)(K_1 - K_2)} I \quad (7)$$

Áp dụng số cho vật liệu LEPS-C với hệ số dẫn nhiệt của bê tông đối chứng  $k_2 = 0,91$  W/m.K, hạt EPS có hệ số dẫn nhiệt  $k_1$  là 0,038 W/m.K vào các phương trình (6) và (7). Các kết quả áp dụng số của hai mô hình bão hoà và Mori- Tanaka so sánh với các kết quả thực nghiệm được trình bày ở hình 4 và 5.



**Hình 4.** Ảnh hưởng của hàm lượng hạt EPS đến hệ số dẫn nhiệt của LEPS-C.



**Hình 5.** Tương quan giữa hệ số dẫn nhiệt xác định bằng các mô hình và thực nghiệm.

Quan sát hai biểu đồ tại hình 4 và 5 có thể nhận thấy các giá trị hệ số dẫn nhiệt vĩ mô của LEPS-C xác định bằng các mô hình giải tích bão hoà và Mori – Tanaka khá sát với với các kết quả thực nghiệm. Khi giá trị thể tích thay thế của hạt EPS càng nhỏ, kết quả của mô hình càng gần với thực nghiệm. Tuy nhiên, khi tỷ lệ thể tích thay thế càng lớn, các kết quả đưa ra bởi mô hình bão hoà có phần sát với thực nghiệm hơn so với Mori – Tanaka. Cụ thể, với tỷ lệ thể tích thay thế bê tông của EPS là 10%, độ sai lệch so với thực nghiệm là 0,23% ở mô hình bão hoà và 0,97% đối với mô hình Mori – Tanaka; tại tỷ lệ thể tích thay thế là 20%, độ lệch so với thực nghiệm của mô hình bão hoà là 0,95% và mô hình Mori – Tanaka là 0,37%; đối với tỷ lệ thay thế 30%, mô hình bão hoà ghi nhận sai số 0,83% và mô hình Mori – Tanaka có sai số là 8,54%. Khi hàm lượng EPS thay thế lên tới 40%, độ sai khác so với giá trị thực nghiệm đưa ra bởi mô hình bão hoà là 3,05%, trong khi đó, mô hình Mori – Tanaka là 16,7%.

#### 4. Kết luận và kiến nghị

Trong nghiên cứu này, các mô hình đồng nhất hoá bão hoà và Mori – Tanaka trong bài toán nhiệt áp dụng cho trường hợp pha hạt có dạng hình cầu đã được sử dụng để xác định hệ số dẫn nhiệt vĩ mô của bê tông LEPS-C. Các kết quả đưa ra bởi hai mô hình giải tích khá sát so với các kết quả thực nghiệm thu được. Các kết quả tính toán cũng chỉ ra rằng khi

hàm lượng EPS thay thế càng nhỏ, kết quả tính toán bởi hai mô hình đề xuất càng gần so với thực nghiệm bởi khi đó các hạt EPS xa nhau nên tương tác giữa chúng còn nhỏ và phù hợp với các giả thuyết đã đưa ra bởi mô hình. Tuy nhiên, khi hàm lượng EPS thay thế tăng lên đến 40%, mô hình bão hoà cho các kết quả sát với các giá trị thực nghiệm hơn mô hình Mori – Tanaka. Kết quả nghiên cứu cho thấy các giả thuyết của mô hình bão hoà rất gần với thực tế vật liệu hơn trong việc mô phỏng EPSC.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải thông qua đề tài mã số “T2023-KDN-003”.

#### Tài liệu tham khảo

- [1] P. D. Hữu, Đ. V. Đông, P. D. Anh, N. T. Dũng, N. Đ. Hải; “Vật liệu mới trong xây dựng công trình giao thông”. Hà Nội, Việt Nam: NXB Giao thông vận tải. 2018.
- [2] D. J. Cook; “Expanded polystyrene concrete”. New Concrete Materials: Concrete technology and design. 1983; 1:41–69.
- [3] D. J. Cook; “Expanded polystyrene beads as lightweight aggregate for concrete”. Precast Concr. 1973; 4:691–693.
- [4] M. Kharun, A. P. Svintsov; “Polystyrene concrete as the structural thermal insulating

- material”. *International Journal of Advanced And Applied Sciences*. 2017; 4(10):40-45. DOI:10.21833/ijaas.2017.010.007.
- [5] Y. Xu, et al.; “Experimental study and modeling on effective thermal conductivity of EPS lightweight concrete”. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2016; 11(2): JTST0023. DOI:10.1299/jtst.2016jtst0023.
- [6] A. Simpson, I. G. Rattigan, E. Lavsky, G. Parr; “Thermal conductivity and conditioning of grey expanded polystyrene foams”. *Cellular polymer*. 2016; 39(6):238-262. DOI:10.1177/0262489320934263.
- [7] T. B. Việt, N. T. Kiên, T. A. Tuấn, N. Đ. Hải; “Đồng nhất vật liệu nhiều thành phần”. Hà Nội, Việt Nam: NXB Xây dựng. 2019.
- [8] D. -H. Nguyen, H. -T. Le, H. L. Quang , Q. -C. He ; “Determination of the effective conductive properties of composites with curved oscillating interfaces by a two-scale homogenization procedure”. *Computational Materials Science*. 2014 ;94:150 –162. DOI:10.1016/j.commatsci.2014.03.014.
- [9] D. H. Nguyen; “Analyse asymptotique, modélisation micromécanique et simulation numérique des interfaces courbées rugueuses dans des matériaux hétérogènes”; PhD Thesis; Université Paris – Est, France; 2014.
- [10] J. D. Eshelby, “The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion and related problems”. *Proceedings of the royal society A – Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1957; 241(1226):376–386. DOI:10.1098/rspa.1957.0133
- [11] A. Zaoui; “Matériaux hétérogènes et composites”. Paris, France: Presses de l’École polytechnique. 2000.