

# TỐI ƯU HÓA TOPOLOGY BỘ TẢN NHIỆT ĐỐI LƯU TỰ NHIÊN CHO MÔ-ĐUN LED ĐA NGUỒN

Huỳnh Văn Nam\*

Trường Đại học Công Thương Thành phố Hồ Chí Minh

\*Email: [namhv@huit.edu.vn](mailto:namhv@huit.edu.vn)

Ngày nhận bài: 12/01/2026; Ngày nhận bài sửa: 04/5/2026; Ngày chấp nhận đăng: 26/5/2026

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày phương pháp tối ưu hóa topology (Topology Optimization - TO) cho bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên sử dụng trong các mô-đun LED đa nguồn. Phương pháp trường mật độ kết hợp với phương pháp tiệm cận di động (Method of Moving Asymptotes - MMA) được sử dụng nhằm phân bố vật liệu tối ưu trong miền thiết kế dạng vành khăn. Ba nguồn nhiệt LED, được bố trí trong lõi rắn không tối ưu hóa. Quá trình truyền nhiệt được mô hình hóa bằng dẫn nhiệt trạng thái ổn định trong vật rắn với điều kiện biên đối lưu tự nhiên. Mô phỏng số được thực hiện trên phần mềm COMSOL Multiphysics. Kết quả cho thấy cấu trúc cánh dạng nhánh phi truyền thống, hình thành các đường dẫn nhiệt hiệu quả từ các nguồn LED ra môi trường, khẳng định tiềm năng của TO trong thiết kế các hệ thống làm mát thụ động hiệu suất cao cho mô-đun LED đa nguồn.

*Từ khóa:* Đối lưu tự nhiên, mô-đun LED đa nguồn, TO, phương pháp trường mật độ, MMA.

## 1. GIỚI THIỆU

Chiếu sáng trong các khu dân cư và thương mại chiếm tới 7% tổng lượng điện tiêu thụ của các quốc gia 2016 và chiếm một phần đáng kể (14-60%) trong hóa đơn tiền điện của các tòa nhà bán lẻ và văn phòng [1]. Trong thập kỷ qua, các sáng kiến được chính phủ trên toàn thế giới hỗ trợ đã thúc đẩy sự phát triển và áp dụng các sản phẩm điốt phát quang (LED) để thay thế công nghệ đèn sợi đốt đã có từ hàng trăm năm trước và các loại đèn phóng điện cường độ cao và đèn huỳnh quang mới hơn. Công nghệ LED được ước tính sẽ chiếm từ 25% đến hơn 80% lượng chiếu sáng vào năm 2020, và sự phát triển nhanh chóng cùng hiệu quả được cải thiện của chúng sẽ dẫn đến giảm 75% lượng tiêu thụ năng lượng cho chiếu sáng vào năm 2035 [1]. Các yếu tố tích cực chính khác là quang thông, tuổi thọ, phân bố ánh sáng, kích thước, độ màu, khả năng điều khiển, độ ổn định, tác động môi trường, độ bền và chi phí.

Mặc dù hiệu quả hơn so với các công nghệ chiếu sáng khác, đèn LED vẫn chỉ chuyển đổi từ 25% đến 35% năng lượng đầu vào thành ánh sáng [1], phần còn lại bị mất dưới dạng nhiệt sinh ra trong một diện tích tương đối nhỏ của chất bán dẫn phát sáng. Điều này trái ngược với đèn sợi đốt và đèn huỳnh quang, nơi nhiệt sinh ra trong các bóng đèn lớn dễ dàng được dẫn truyền qua thành bóng đèn và sau đó bức xạ và đối lưu ra môi trường xung quanh. Nhiệt độ tăng cao hoặc quá nhiệt dẫn đến sự dịch chuyển bước sóng phát xạ, giảm quang thông và giảm tuổi thọ của đèn LED. Đèn LED lớn tạo ra nhiều ánh sáng hơn trên mỗi đơn vị diện tích và tạo ra một lượng nhiệt đáng kể, do đó cần có bộ trao đổi nhiệt bên ngoài, điều này ảnh hưởng đến kích thước, độ tin cậy và chi phí. Nhiệt dư thừa phải được loại bỏ bằng cách đối lưu cưỡng bức chủ động (quạt) hoặc bằng bộ tản nhiệt thụ động dựa vào đối lưu tự nhiên.

Trong số các giải pháp làm mát hiện có, bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên vẫn được ưa chuộng cho các ứng dụng LED nhờ đặc tính làm mát thụ động, độ tin cậy cao, chi phí thấp và không tiêu thụ năng lượng phụ trợ. Các bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên truyền thống thường sử dụng cánh thẳng, cánh hướng tâm hoặc cánh răng cưa phân bố đều xung quanh lõi trung tâm. Việc thiết kế các cấu trúc cánh này chủ yếu dựa trên các tương quan thực nghiệm và được xây dựng từ lý thuyết truyền nhiệt cổ điển. Mặc dù các phương pháp này có tính ổn định và dễ áp dụng, nhưng chúng thường mang tính phụ thuộc rất nhiều vào phương pháp chế tạo và chưa khai thác tối đa tiềm năng tản nhiệt trong điều kiện đối lưu tự nhiên, đặc biệt đối với các hệ thống có nhiều nguồn nhiệt [2].

Quạt tiêu tốn nhiều năng lượng, gây tiếng ồn và dễ bị hỏng hóc, trong khi đối lưu tự nhiên cần thiết kế cẩn thận hình dạng tản nhiệt để đảm bảo hiệu suất làm mát đầy đủ. Một chiếc quạt thông thường, tương thích với kích thước của các bộ làm mát được trình bày, tiêu thụ từ 0,4W đến 1,2W, làm tăng mức tiêu thụ năng lượng từ 8% đến 24% so với giải pháp làm mát thụ động cho đèn LED 5W [3].

Mặt khác, đối lưu tự nhiên là một cơ chế truyền nhiệt làm tăng tốc dòng chất khí dựa trên sự khác biệt về mật độ do chênh lệch nhiệt độ, trong đó một bộ tản nhiệt được gắn vào nguồn nhiệt dẫn nhiệt đến bề mặt của nó, và sự chênh lệch nhiệt độ giữa bề mặt bộ tản nhiệt và không khí xung quanh tạo ra chuyển động chất khí truyền nhiệt đến môi trường xung quanh. Hiệu suất của bộ tản nhiệt phụ thuộc vào sự cân bằng giữa khả năng dẫn nhiệt ra khỏi chất bán dẫn và sự kích thích chuyển động chất khí đủ mạnh để loại bỏ nhiệt bằng đối lưu tự nhiên. Quá trình này thu hút nhiều sự chú ý và đã được nghiên cứu rộng rãi bằng cách sử dụng các kỹ thuật thực nghiệm và số học, dẫn đến một tập hợp các quy tắc thiết kế đơn giản được các nhà thiết kế và kỹ sư sử dụng. Tuy nhiên, sự đơn giản của các quy tắc này, cũng như sự phức tạp của các hiện tượng vật lý, có thể dễ dàng dẫn đến các giải pháp không tối ưu, để lại nhiều cơ hội để cải thiện [5].

Trong những năm gần đây, TO đã nổi lên như một phương pháp thiết kế, tính toán mạnh mẽ, cho phép tạo ra các bố trí vật liệu tối ưu dựa trên các định luật vật lý. Phương pháp TO dựa trên trường mật độ, ban đầu được phát triển cho các bài toán cơ học kết cấu, đã được mở rộng thành công cho các bài toán dẫn nhiệt, cho phép tự động hình thành các đường dẫn nhiệt hiệu quả trong miền thiết kế xác định [4]. So với các phương pháp tối ưu hình dạng hoặc kích thước truyền thống, TO mang lại mức độ tự do thiết kế cao hơn và có thể tạo ra các hình dạng tự do với hiệu suất vượt trội [5].

Nhiều nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của TO trong thiết kế bộ tản nhiệt và các thiết bị quản lý nhiệt. Các công trình nền tảng của Bendsøe và Kikuchi [6] cũng như Evgrafov [7] đã áp dụng TO cho các bài toán dẫn nhiệt thuần túy, cho thấy sự cải thiện đáng kể về hiệu suất truyền nhiệt so với các cấu trúc truyền thống. Gần đây hơn, Alexandersen và Sigmund [8] đã mở rộng phương pháp này sang các bài toán truyền nhiệt liên hợp và đối lưu tự nhiên, khẳng định tiềm năng lớn của TO trong các hệ thống làm mát thụ động.

Tuy nhiên, việc áp dụng TO cho bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên trong các mô-đun LED đa nguồn vẫn còn hạn chế. Phần lớn các nghiên cứu hiện nay tập trung vào một nguồn nhiệt đơn, đối lưu cưỡng bức, trong khi các mô-đun LED thực tế thường bao gồm nhiều nguồn nhiệt rời rạc bố trí trong một không gian nhỏ gọn. Sự tương tác phức tạp giữa các nguồn nhiệt và dòng đối lưu tự nhiên làm cho bài toán thiết kế trở nên khó khăn hơn, đòi hỏi các phương pháp thiết kế tiên tiến hơn.

Xuất phát từ những phân tích trên, bài báo này đề xuất TO cho thiết kế bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên cho mô-đun LED đa nguồn. Phương pháp trường mật độ kết hợp với MMA được sử dụng để phân bố vật liệu tối ưu trong miền thiết kế dạng vành khăn.

Quá trình truyền nhiệt được mô hình hóa bằng dẫn nhiệt trạng thái ổn định trong vật rắn với điều kiện biên đối lưu tự nhiên. Các mô phỏng số được thực hiện trên phần mềm COMSOL Multiphysics và các cấu trúc tối ưu thu được sẽ được phân tích và thảo luận chi tiết. Chúng tôi sử dụng các kỹ thuật và thuật toán tính toán hiện đại để thiết kế các bộ tản nhiệt thụ động hiệu quả. Phương pháp hình thái học tính toán tạo ra các cấu trúc phân nhánh giống san hô, tương tự như thực vật và sinh vật trong tự nhiên. Các cấu trúc phức tạp này có thể được sản xuất bằng công nghệ sản xuất bồi đắp, hoặc có thể truyền cảm hứng cho các thiết kế đơn giản hơn và dễ sản xuất hơn với sự suy giảm hiệu suất nhỏ. Quá trình này được kiểm chứng bằng mô phỏng số. Phương pháp luận và các phát hiện có thể được sử dụng và mở rộng hơn nữa để làm mát thiết bị điện tử, máy móc công nghiệp và các quy trình, nơi độ bền, chi phí bảo trì thấp và hiệu suất là vô cùng quan trọng.

Hình 1 cho thấy một bóng đèn LED thương mại được phát triển như một sản phẩm thay thế trực tiếp cho bóng đèn sợi đốt. Do kích thước nhỏ của chất bán dẫn, các nhà thiết kế có nhiều tự do để đề xuất các giải pháp làm mát đẹp mắt và đồng thời hiệu quả. Thiết kế là nguyên khối và bao gồm bộ tản nhiệt được thực hiện dưới dạng một vòng với một số vây thẳng dọc theo thân. Việc thực hiện nhắm đến hướng thẳng đứng của bóng đèn, trong đó các vây trở nên song song với vectơ trọng lực và tăng tốc không khí thông qua hiệu ứng ống khói.

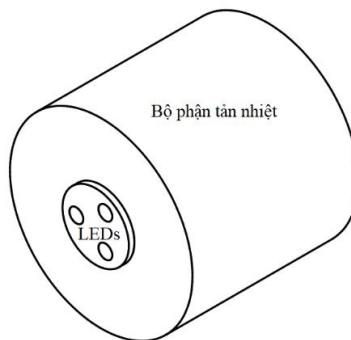


Hình 1. Một dạng đèn LED công nghiệp với bộ tản nhiệt đứng [9]

Các bộ tản nhiệt dạng lưới phức tạp dẫn nhiệt ra khỏi đế của chúng và truyền nhiệt vào không khí xung quanh, đảm bảo sự dư thừa của các đường dẫn nhiệt và dòng chảy nhằm mục đích đạt được hiệu suất không phụ thuộc vào hướng. Các cấu trúc phức tạp này được tạo ra từ hợp kim nhôm bằng phương pháp in 3D kim loại và cung cấp điểm khởi đầu cho nghiên cứu này. Hiệu suất của chúng được so sánh về mặt số học và thực nghiệm với các thiết kế được tối ưu hóa về mặt cấu trúc.

## 2. MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

Hình 2 trình bày mô hình nghiên cứu tối ưu bộ tản nhiệt cho bộ 3 đèn LED được sử dụng trong nghiên cứu này.

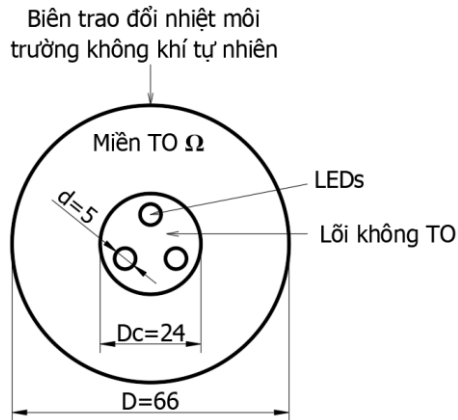


Hình 2. Mô hình nghiên cứu tối ưu bộ tản nhiệt

Trong mô hình, nguồn nhiệt từ 3 đèn LED được truyền vào khối tản nhiệt để thoát nhiệt ra môi trường không khí xung quanh. Để hiệu quả tản nhiệt tốt nhất thì bộ tản nhiệt cần được tối ưu hóa cấu trúc.

Nghiên cứu sử dụng mô hình mặt cắt ngang hai chiều của bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên cho mô-đun LED đa nguồn. Bộ tản nhiệt được giả thiết có chiều dài đủ lớn theo phương trục, do đó bài toán truyền nhiệt được xét theo chiều dài đơn vị. Trong mô hình hai chiều, chiều đơn vị được chọn  $t = 0,1m$  nhằm đảm bảo tính nhất quán về năng lượng khi mô tả nguồn nhiệt và điều kiện biên đối lưu. Cách tiếp cận này cho phép xét đến hiệu ứng trao đổi nhiệt đối lưu trên các bề mặt cánh theo phương trục dưới dạng tương đương, đồng thời giảm đáng kể thời gian tính toán so với mô hình ba chiều đầy đủ mà vẫn giữ được bản chất vật lý chính của bài toán.

Như minh họa trong Hình 3, miền tính toán bao gồm ba vùng chính: lõi rỗng không tối ưu hóa, miền thiết kế  $\Omega$  dành cho TO và biên ngoài tiếp xúc với môi trường không khí. Ba nguồn nhiệt LED dạng tròn được bố trí bên trong lõi không tối ưu hóa. Mỗi LED có đường kính  $d = 5mm$ . Các LED được giả thuyết tiếp xúc nhiệt hoàn hảo với lõi rỗng, đảm bảo truyền nhiệt hiệu quả từ nguồn nhiệt vào bộ tản nhiệt.



Hình 3. Mô hình TO trong miền 2D

Lỗ không tối ưu hóa có đường kính  $D_c=24\text{mm}$ , bao quanh lỗ là miền thiết kế  $\Omega$  dạng vành khăn, đường kính ngoài  $D=66\text{mm}$ . Trong miền này, sự phân bố vật liệu được tối ưu nhằm nâng cao khả năng tản nhiệt trong điều kiện đối lưu tự nhiên.

Trong nghiên cứu này, điều kiện biên đối lưu tự nhiên được mô hình hóa bằng hệ số đối lưu hiệu dụng  $h$  không đổi, hệ số đối lưu hiệu dụng  $h$  được xem là giá trị trung bình, đại diện cho khả năng trao đổi nhiệt tổng thể của môi trường không khí. Do mô hình tập trung vào tối ưu hóa đường dẫn dẫn nhiệt trong vật rắn,  $h$  chủ yếu ảnh hưởng đến nhiệt độ tuyệt đối, trong khi hình thái TO thay đổi không đáng kể đối với thay đổi vừa phải của hệ số đối lưu tự nhiên  $h$ .

### 3. PHƯƠNG TRÌNH NHIỆT

#### 3.1. Phương trình truyền nhiệt trong miền rắn

Quá trình truyền nhiệt trong bộ tản nhiệt được giả thiết ở trạng thái ổn định và được mô tả bởi phương trình dẫn nhiệt trong miền rắn [10]. Cụ thể được biểu diễn như trong phương trình (1), trong đó hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc vào biến thiết kế  $\gamma$ :

$$\nabla \cdot (k(\gamma) \nabla T) + Q = 0 \quad (1)$$

Trong đó:

$T$ : nhiệt độ, (K)

$k(\gamma)$ : hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng, (W/(m·K))

$\gamma$ : biến thiết kế trường mật độ chưa qua lọc,  $0 \leq \gamma \leq 1$

$Q$ : là mật độ nguồn nhiệt thể tích, (W/m<sup>3</sup>)

#### 3.2. Phương trình truyền nhiệt đối lưu tự nhiên

Quá trình trao đổi nhiệt giữa bộ tản nhiệt và môi trường không khí xung quanh được mô hình hóa thông qua điều kiện biên đối lưu tự nhiên, áp dụng trên các bề mặt ngoài của bộ tản nhiệt [10]. Phương trình (2) biểu diễn cân bằng giữa dòng nhiệt dẫn từ bên trong vật rắn ra bề mặt và dòng nhiệt đối lưu từ bề mặt ra môi trường xung quanh:

$$-k(\gamma) \nabla T \cdot \mathbf{n} = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

Trong đó:

$h$ : hệ số truyền nhiệt đối lưu tự nhiên, (W/m<sup>2</sup>·K)

$T_\infty$ : nhiệt độ môi trường xung quanh, (K)

$\mathbf{n}$ : vectơ pháp tuyến hướng ra ngoài

#### 4. BÀI TOÁN TỐI ƯU HÓA TOPOLOGY DỰA TRÊN TRƯỜNG MẬT ĐỘ

Tối ưu hóa cấu trúc [7] là một quy trình lặp đi lặp lại, phân phối vật liệu trong miền thiết kế được quy định bằng cách tối ưu hóa một thước đo hiệu suất được chọn nhằm giảm thiểu nhiệt độ trung bình của bộ tản nhiệt. Kết quả của quá trình tối ưu hóa là sự phân bố không gian dựa trên voxel của các số 0 đại diện cho các vùng rỗng và các số 1 đại diện cho các vùng đặc. Bài toán tối ưu hóa nhị phân này được nối lỏng thành phân bố mật độ liên tục, cho phép sử dụng các kỹ thuật tối ưu hóa dựa trên trường mật độ. Một chuỗi lặp đi lặp lại các mô phỏng số, các bước điều chỉnh và cập nhật thiết kế bằng lập trình toán học hoàn thành quy trình. Công nghệ tối ưu hóa cấu trúc hiện đang được sử dụng rộng rãi trong ngành công nghiệp ô tô và hàng không vũ trụ cho các ứng dụng cơ học chất rắn, giúp giảm trọng lượng và cải thiện độ cứng của các bộ phận cơ khí với mức tiết kiệm được báo cáo từ 20% đến 40% [8].

##### 4.1. Phương pháp trường mật độ

Trong phương pháp trường mật độ, biến thiết kế trường mật độ  $\gamma$  được sử dụng để mô tả sự tồn tại của vật liệu trong miền thiết kế  $\Omega$  [7]. Cụ thể,  $\gamma$  được giới hạn trong khoảng từ 0 đến 1, như thể hiện trong phương trình (3):

$$0 \leq \gamma \leq 1 \quad (3)$$

Trong đó:

$\gamma=1$ : biểu thị vùng đặc

$\gamma=0$ : biểu thị vùng rỗng

Trong quá trình tạo TO, để tránh vùng xám (không phân biệt rõ giữa vùng đặc và vùng rỗng), biến thiết kế trường mật độ  $\gamma$  được xử lý thông qua bộ lọc. Đối với kỹ thuật lọc, bộ lọc Helmholtz PDE được áp dụng để thu được biến thiết kế hiệu dụng  $\gamma_f$  như thể hiện trong phương trình (4) [11].

$$\gamma_f - R^2 \nabla^2 \gamma_f = \gamma \quad (4)$$

$\gamma_f$ : biến thiết kế trường mật độ sau lọc

Trong đó  $R$  là bán kính lọc, được coi là kích thước phân tử lưới trong nghiên cứu hiện tại. Sau quá trình lọc, một vùng mật độ chuyển tiếp đặc-rỗng được tạo ra. Để giảm vùng này, các biến thiết kế đã lọc được chiếu bằng phép chiếu tiếp tuyến hyperbolic Heaviside tron [12], được thể hiện trong phương trình (5) như sau:

$$\gamma_p = \frac{\tanh(\beta(\gamma_f - \gamma_\beta)) + \tanh(\beta\gamma_\beta)}{\tanh(\beta(1 - \gamma_\beta)) + \tanh(\beta\gamma_\beta)} \quad (5)$$

Trong đó:

$\gamma_p$  : là biến thiết kế trường mật độ sau chiếu

$\gamma_\beta$ : ngưỡng chiếu hay ngưỡng phân tách đặc-rỗng

$\beta$  : độ dốc phép chiếu,  $\beta$  nhỏ nhiều vùng xám,  $\beta$  lớn ít vùng xám

##### 4.2. Nội suy vật liệu theo phương pháp SIMP

Phương pháp SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) được sử dụng để mô tả sự phân bố vật liệu trong miền thiết kế thông qua biến mật độ  $\gamma_p \in [0,1]$ . Các tính chất vật liệu được nội suy theo hàm phạt thể hiện trong phương trình (6), nhằm loại bỏ các vùng trung gian và thu được cấu trúc rõ ràng [4].

$$k(\gamma_p) = k_{air} + \gamma_p^p (k_{solid} - k_{air}) \quad (6)$$

Trong đó:

$k_{solid}$  : hệ số dẫn nhiệt của vật liệu rắn, (W/(m·K))

$k_{air}$  : hệ số dẫn nhiệt không khí, (W/(m·K))

$p$  : hệ số phạt

##### 4.3 Hàm mục tiêu và ràng buộc

Bài toán TO được xây dựng nhằm nâng cao khả năng tản nhiệt của bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên cho mô-đun LED đa nguồn. Hàm mục tiêu được xác định dựa trên năng lượng dẫn nhiệt toàn phần trong miền thiết kế, kết hợp với khả năng kiểm soát độ phức tạp hình học của cấu trúc tối ưu [13]. Cụ thể, hàm mục tiêu tổng quát được biểu diễn như trong phương trình (7a):

$$J = (1 - q) \int_{\Omega} k(\gamma_p) |\nabla T|^2 d\Omega + q\alpha \int_{\Omega} |\nabla \gamma_p| d\Omega \quad (7a)$$

Trong đó:

$J$ : hàm mục tiêu (năng lượng dẫn nhiệt toàn phần), (W)

$\Omega$ : miền thiết kế

$T$ : nhiệt độ (K)

$k(\gamma_p)$ : hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc biến thiết kế theo mô hình SIMP

$q$ : hệ số trọng số điều chỉnh mức độ ưu tiên giữa hiệu năng truyền nhiệt và độ mượt hình học,  $\in [0, 1]$

$\alpha$ : Hệ số điều chuẩn chu vi được chuẩn hóa để đảm bảo tính tương thích giữa hai thành phần của hàm mục tiêu.

$$\alpha = \frac{h_0 h_{max}}{A} \quad (7b)$$

$h_0$ : kích thước phần tử lưới tham chiếu (m)

$h_{max}$ : kích thước lưới lớn nhất trong miền thiết kế (m)

$A$ : diện tích ban đầu miền thiết kế ( $m^2$ )

Bài toán tối ưu chịu ràng buộc về thể tích vật liệu, nhằm giới hạn lượng vật liệu rắn được sử dụng trong miền thiết kế. Ràng buộc này đảm bảo tính khả thi về mặt kỹ thuật và phản ánh các yêu cầu thực tế như khối lượng, chi phí và không gian lắp đặt của bộ tản nhiệt. Việc áp dụng ràng buộc thể tích buộc thuật toán tối ưu phân bố vật liệu một cách hiệu quả, tập trung vật liệu tại các vùng đóng vai trò quan trọng trong truyền nhiệt.

Để tránh nghiệm suy biến với việc phân bố vật liệu toàn bộ miền thiết kế, bài toán tối ưu được ràng buộc bởi điều kiện thể tích vật liệu, được thể hiện trong phương trình (8) dưới đây [4], [13]:

$$\frac{1}{A} \int_{\Omega} \gamma_p d\Omega < f \quad (8)$$

Trong đó:

$A$ : diện tích ban đầu của miền thiết kế,  $m^2$

$f$ : tỷ lệ diện tích vật liệu cho phép TO

#### 4.4. Tiêu chí hội tụ của hàm mục tiêu theo MMA

Theo nguyên lý hội tụ của phương pháp MMA, nghiệm tối ưu đạt được khi các vòng lặp liên tiếp không còn cải thiện đáng kể giá trị hàm mục tiêu và trường biến thiết kế tiến dần tới trạng thái ổn định. Cụ thể, các tiêu chí dừng được xác định dựa trên sự thay đổi tương đối của hàm mục tiêu và biến thiết kế, như thể hiện trong các phương trình (9) và (10)[14]:

$$\frac{|J^{n+1} - J^n|}{J^n} \leq \varepsilon_J \quad (9)$$

$$\frac{\|\gamma_p^{n+1} - \gamma_p^n\|}{\|\gamma_p^n\|} \leq \varepsilon_V \quad (10)$$

Hoặc đạt số vòng lặp tối đa

Phương pháp MMA không quy định sẵn các ngưỡng hội tụ mà các tiêu chí dừng được lựa chọn tùy theo bài toán. Trong nghiên cứu này, các giá trị  $\varepsilon_J = 10^{-4}$ ,  $\varepsilon_V = 10^{-3}$  và số vòng lặp tối đa  $n = 30$  được lựa chọn nhằm đảm bảo cân bằng giữa độ chính xác và chi phí tính toán [14].

#### 4.5. Khả năng chế tạo

Kết quả TO thường tạo ra hình thái tối ưu về dẫn nhiệt nhưng cấu trúc thu được có dạng nhánh phi truyền thống không phải lúc nào cũng sẵn sàng để gia công trực tiếp nếu không có bước xử lý sau

TO. Để cải thiện khả năng chế tạo, mô hình đã được tích hợp trực tiếp trong quá trình xây dựng bài toán thông qua các cơ chế lọc, chiếu và điều chuẩn chu vi.

Thứ nhất, phép lọc mật độ được áp dụng nhằm loại bỏ hiện tượng bàn cờ (checkerboard). Cơ chế này đồng thời tạo ra một kích thước đặc trưng tối thiểu, ngăn chặn sự xuất hiện của các chi tiết quá nhỏ không khả thi trong thực tế [11].

Thứ hai, phép chiếu (projection) được sử dụng để đẩy các giá trị mật độ trung gian về gần 0 hoặc 1, tạo ranh giới rõ ràng giữa vùng vật liệu và vùng rỗng. Điều này giúp hình học tối ưu có biên xác định rõ ràng, thuận lợi cho việc trích xuất đường biên dạng và xây dựng mô hình CAD[12].

Thứ ba, hàm mục tiêu (7a) bao gồm thành phần điều chuẩn chu vi cụ thể là:

$$q\alpha \int_{\Omega} |\nabla \gamma_p| d\Omega$$

Thành phần này phạt các biên có độ phức tạp cao, giảm hiện tượng răng cưa và hạn chế nhánh quá nhỏ. Nhờ đó, cấu trúc tối ưu có xu hướng hình thành các cánh liên tục và mượt thay vì các chi tiết rời rạc.

Ba cơ chế trên kết hợp lại giúp kiểm soát kích thước tối thiểu và độ trơn hình học, nâng cao đáng kể tính khả thi chế tạo của cấu trúc tối ưu.

Về triển khai thực tế, có hai hướng chính: công nghệ bồi đắp (in kim loại 3D) phù hợp với hình học nhánh phức tạp, hiệu chỉnh thiết kế hình học từ trường mật độ chiếu, làm trơn và đơn giản hóa để phù hợp với gia công CNC, ép đùn hoặc đúc.

### 5. THIẾT LẬP MÔ PHỎNG SỐ TRÊN COMSOL 6.3

Phương trình truyền nhiệt trong miền rắn được giải bằng mô-đun *Heat Transfer in Solids* dựa trên phương trình dẫn nhiệt ở trạng thái ổn định. Điều kiện biên đối lưu tự nhiên được áp dụng trên các bề mặt cánh trao đổi nhiệt với môi trường không khí xung quanh. Quá trình TO được thực hiện bằng mô-đun *Topology Optimization* trên phần mềm COMSOL Multiphysics với khai báo như bảng 1, sử dụng phương pháp SIMP kết hợp với MMA [15]. Hàm mục tiêu được trình bày trong công thức (7a) được viết theo cú pháp quy chuẩn trong phần mềm COMSOL như sau:

$$J = (1-q) * \text{compl.intop1}(k_{\text{simp}} * \text{ht.gradTmag}^2) + q * h_0 * \text{hmax\_design}/A * \\ * \text{compl.intop1}(\text{sqrt}(d(\text{compl.dtopo1.theta},x)^2 + d(\text{compl.dtopo1.theta},y)^2))^2)$$

Bảng 1. Khai báo COMSOL

| Nội dung           | COMSOL 6.3  |
|--------------------|---|
| Mô hình vật lý     | <i>Heat Transfer in Solids + Topology Optimization</i>  |
| Hình học mô phỏng  | <i>2D, cross-section</i>  |
| Chiều dài mô phỏng | <i>t = 0,1m</i>   |
| Nội suy vật liệu   | <i>k = k<sub>air</sub> + gamma<sup>p</sup> * (k<sub>solid</sub> - k<sub>air</sub>)</i>  |
| Biến thiết kế      | <i>gamma = dtopo1.theta</i>   |
| Nguồn nhiệt        | <i>Heat Source (W/m<sup>3</sup>) in LED domains</i>   |
| Điều kiện đối lưu  | <i>Convective Heat Flux on outer boundary</i>   |
| Hàm mục tiêu       | <i>(1-q) * compl.intop1(k<sub>simp</sub> * ht.gradTmag<sup>2</sup>) + q * h<sub>0</sub> * hmax_design/A * compl.intop1(sqrt(d(compl.dtopo1.theta,x)<sup>2</sup> + d(compl.dtopo1.theta,y)<sup>2</sup>))^2</i> |
| Ràng buộc thể tích | <i>Volume fraction f</i>  |
| Thuật toán tối ưu  | <i>MMA</i>  |
| Kiểu bài toán      | <i>Stationary + Topology Optimization</i>   |

Một mô phỏng tĩnh hai chiều được thực hiện liên quan đến phương pháp phân bố vật liệu. Một lưới các phần tử tứ diện được sử dụng để phân chia miền mô phỏng. Kích thước phần tử tối đa trong miền thay đổi từ  $1 \times 10^{-4}$  m trong không gian thiết kế đến  $2 \times 10^{-4}$  m trong các vùng rắn ở biên của không gian thiết kế.

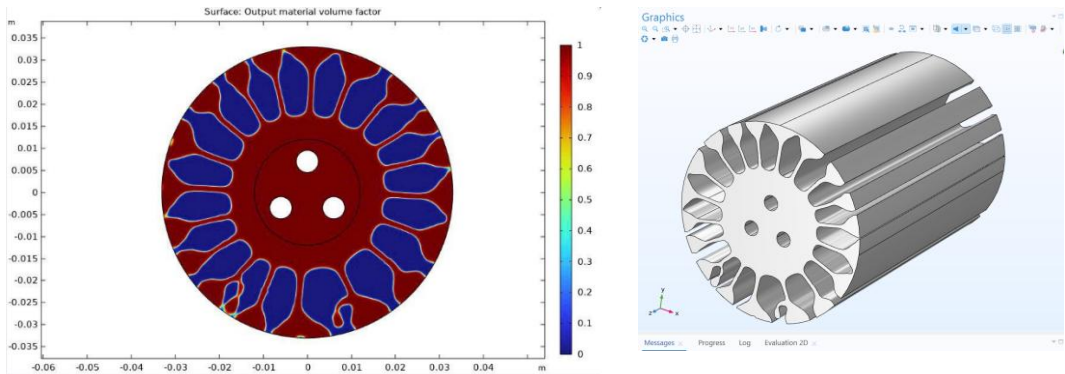
Miền mô phỏng với không gian thiết kế cho tối ưu hóa cấu trúc, cũng như các điều kiện biên và lưới được thể hiện trong Hình 2. Các điều kiện biên và giá trị của nguồn nhiệt và bộ tản nhiệt được chọn tương tự như mô hình tham số. Đề khai thác tối đa tiềm năng của công nghệ sản xuất bồi đắp, chi tiết cần phải được làm liền khối để tránh việc lắp ráp các bộ phận. Để đảm bảo điều đó, các cấu trúc được tối ưu hóa phải được kết nối với thành ngoài. Do đó, giá trị của nguồn nhiệt được chọn lớn hơn giá trị của bộ tản nhiệt, để năng lượng dư thừa buộc phải được tản ra trên vỏ rắn.

Trong quá trình tối ưu hóa, toàn bộ hệ thống, bao gồm miền thiết kế và phần nguồn nhiệt được gắn kèm, được đặt ở vị trí trung tâm trong miền mô phỏng. Độ dẫn nhiệt của hợp kim nhôm phân bố trong miền thiết kế là  $k=175 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  và dung lượng nhiệt là  $C_p=903 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , mật độ khối lượng  $\rho=2702 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Các tính chất vật lý được xem xét của không khí là  $k=0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,  $C_p=1003 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  và  $\rho=1,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 6. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 6.1. Cấu trúc topology tối ưu và phân bố vật liệu

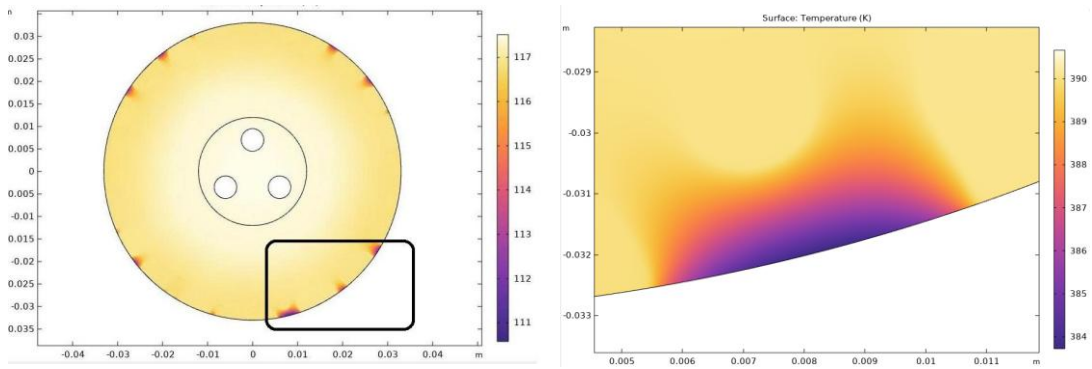
Hình 4 thể hiện phân bố vật liệu tối ưu thu được từ quá trình TO trong điều kiện đối lưu tự nhiên. Cấu trúc tối ưu hình thành các cánh không đồng đều, phát triển từ vùng trung tâm chứa các LED ra phía biên ngoài trao đổi nhiệt đối lưu. Đây là đặc trưng điển hình của phương pháp TO theo trường mật độ, trong đó vật liệu được phân bố ưu tiên tại những vùng có chênh lệch nhiệt lớn nhằm giảm điện trở nhiệt tổng thể. So với cấu trúc cánh truyền thống có phân bố đều, cấu trúc tối ưu tạo ra các đường dẫn nhiệt hiệu quả hơn trong khi vẫn thỏa mãn cùng ràng buộc tỷ phần vật liệu.



Hình 4. Trường mật độ vật liệu TO

### 6.2. Phân bố nhiệt độ và hiệu suất tản nhiệt

Phân bố nhiệt độ tương ứng với cấu trúc tối ưu được trình bày trong hình 5. Nhiệt độ lớn nhất xuất hiện tại các vùng lân cận nguồn nhiệt LED, trong khi nhiệt độ giảm dần về phía biên ngoài đối lưu tự nhiên. TO cho phép phân tán nhiệt hiệu quả từ nhiều nguồn, hạn chế sự hình thành các điểm nóng cục bộ trong miền thiết kế. Điều này cho thấy các cánh tối ưu đã cải thiện khả năng dẫn nhiệt từ LED ra các bề mặt trao đổi nhiệt đối lưu, qua đó nâng cao hiệu năng tản nhiệt tổng thể.

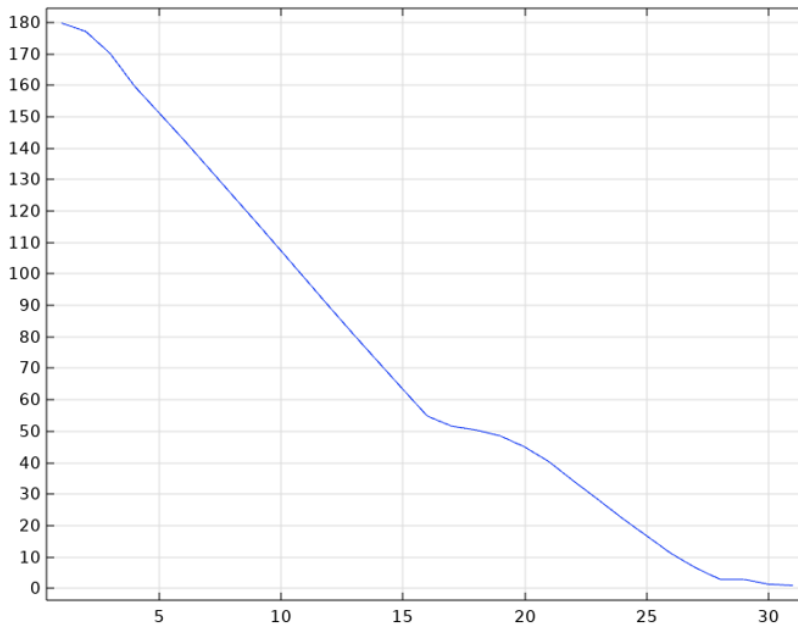


Hình 5. Trường nhiệt độ T

Hình ảnh mô phỏng trường nhiệt độ cho thấy rằng nhiệt độ được bố theo đúng hàm mục tiêu đã đề xuất nhằm đảm bảo nhiệt độ đồng đều trên toàn miền của bộ tản nhiệt.

### 6.3. Đặc tính hội tụ của quá trình tối ưu

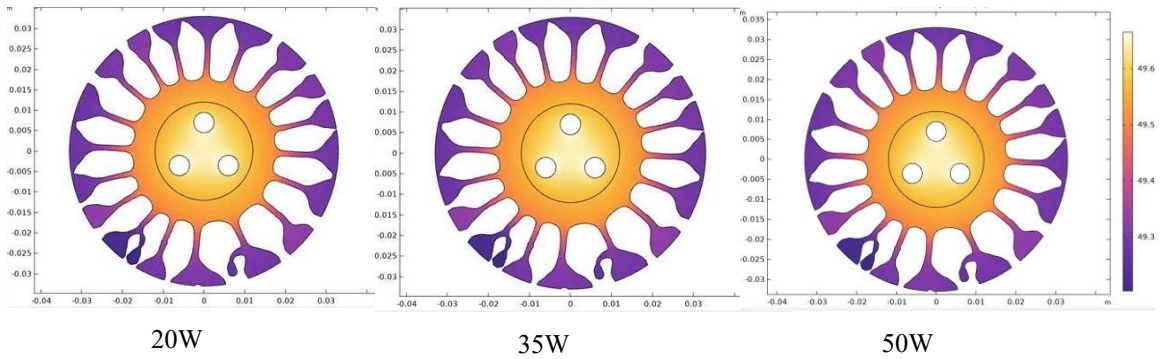
Hình 6 trình bày quá trình hội tụ của hàm mục tiêu trong TO. Giá trị hàm mục tiêu giảm đơn điệu theo số vòng lặp, cho thấy bài toán tối ưu được thiết lập ổn định và hợp lý. Trong các vòng lặp đầu, hàm mục tiêu giảm nhanh, sau đó tiến dần đến trạng thái hội tụ. Đặc tính này khẳng định hiệu quả của MMA, giúp thu được cấu trúc tối ưu hiệu quả và tránh vùng xám.



Hình 6. Quá trình hội tụ hàm mục tiêu J

### 6.4. Mô phỏng kiểm chứng

Nhằm kiểm tra độ tin cậy và mức độ chính xác của kết quả tối ưu, nghiên cứu này thực hiện 3 trường hợp khác nhau là 20W, 35W và 50W với các công suất của các đèn LED. Kết quả phân bố nhiệt độ trên bộ tản nhiệt được trình bày như trong Hình 7.



Hình 7. Phân bố nhiệt độ trên bộ tản nhiệt

Kết quả trình bày cho thấy rằng hàm mục tiêu về phân bố đều nhiệt độ đã đạt được trên toàn miền của bộ tản nhiệt. Độ chênh lệch nhiệt độ trung bình lớn nhất là 0,3 °C.

## 7. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đề xuất phương pháp TO theo trường mật độ để thiết kế bộ tản nhiệt đối lưu tự nhiên cho mô-đun LED đa nguồn. Mô hình mặt cắt hai chiều xét theo đơn vị chiều dài trục được sử dụng nhằm mô tả hiệu quả các cơ chế dẫn nhiệt và đối lưu chi phối. Cấu trúc tối ưu thu được có dạng các cánh phi truyền thống, tạo ra đường dẫn nhiệt hiệu quả từ các nguồn LED ra biên trao đổi nhiệt đối lưu. Kết quả mô phỏng số cho thấy phương pháp đề xuất giúp cải thiện khả năng phân tán nhiệt và giảm điện trở nhiệt so với các cấu trúc cánh truyền thống trong cùng điều kiện ràng buộc vật liệu. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình sẽ được mở rộng sang bài toán truyền nhiệt liên hợp đầy đủ và bổ sung các ràng buộc chế tạo nhằm tăng tính ứng dụng thực tiễn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. Morgan Pattison, M. Hansen, and J. Y. Tsao, “LED lighting efficacy: Status and directions,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 19, no. 3, pp. 134–145, Dec. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>.
- [2] S. Basavarajappa, G. Manavendra, and S. B. Prakash, “A review on performance study of finned tube heat exchanger,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1473, no. 1, p. 012030, Feb. 2020, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1473/1/012030>.
- [3] R. Wang and J. Li, “A Cooling System with a Fan for Thermal Management of High-Power LEDs,” *J. Mod. Phys.*, vol. 01, no. 03, pp. 196–199, 2010, <https://doi.org/10.4236/jmp.2010.13029>.
- [4] M. P. Bendsøe and O. Sigmund, *Topology Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6>.
- [5] J. Wu, O. Sigmund, and J. P. Groen, “Topology optimization of multi-scale structures: a review,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 63, no. 3, pp. 1455–1480, Mar. 2021, <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02881-8>.
- [6] M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, “Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 71, no. 2, pp. 197–224, Nov. 1988, [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2).
- [7] A. Evgrafov, “The Limits of Porous Materials in the Topology Optimization of Stokes Flows,” *Appl. Math. Optim.*, vol. 52, no. 3, pp. 263–277, Oct. 2005, <https://doi.org/10.1007/s00245-005-0828-z>.
- [8] L. C. Høghøj, D. R. Nørhave, J. Alexandersen, O. Sigmund, and C. S. Andreasen, “Topology optimization of two fluid heat exchangers,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 163, p. 120543, Dec. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120543>.

- [9] F. Hou, D. Yang, and G. Zhang, “Thermal analysis of LED lighting system with different fin heat sinks,” *J. Semicond.*, vol. 32, no. 1, p. 014006, Jan. 2011, <https://doi.org/10.1088/1674-4926/32/1/014006>.
- [10] T. L. Bergman, A. S. Lavine, and F. P. Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. Somerset: Wiley, 2011.
- [11] B. S. Lazarov and O. Sigmund, “Filters in topology optimization based on Helmholtz-type differential equations,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 86, no. 6, pp. 765–781, May 2011, <https://doi.org/10.1002/nme.3072>.
- [12] F. Wang, B. S. Lazarov, and O. Sigmund, “On projection methods, convergence and robust formulations in topology optimization,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 43, no. 6, pp. 767–784, Jun. 2011, <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0602-y>.
- [13] J. Asmussen, J. Alexandersen, O. Sigmund, and C. S. Andreasen, “A ‘poor man’s’ approach to topology optimization of natural convection problems,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 59, no. 4, pp. 1105–1124, Apr. 2019, <https://doi.org/10.1007/s00158-019-02215-9>.
- [14] K. Svanberg, “The method of moving asymptotes—a new method for structural optimization,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 24, no. 2, pp. 359–373, Feb. 1987, <https://doi.org/10.1002/nme.1620240207>.
- [15] COMSOL AB, “Introduction to the Optimization Module,” COMSOL AB, Stockholm, Sweden, 2024. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/documentation>

## ABSTRACT

### TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A NATURAL CONVECTION HEAT SINK FOR MULTI-SOURCE LED MODULES

Huynh Van Nam\*

*Ho Chi Minh City University of Industry and Trade*

\*Email: [namhv@huit.edu.vn](mailto:namhv@huit.edu.vn)

This paper presents a Topology Optimization approach for natural convection heat sinks applied to multi-source LED modules. The density-based method combined with the Method of Moving Asymptotes (MMA) algorithm is employed to achieve an optimal material distribution within an annular design domain. Three LED heat sources are placed inside a solid non-design core region. Heat transfer is modeled as steady-state heat conduction in solids with natural convection boundary conditions. Numerical simulations are carried out using COMSOL Multiphysics. The results reveal non-conventional branched fin structures that form efficient thermal conduction paths from the LED sources to the ambient environment, demonstrating the potential of topology optimization in the design of high-performance passive cooling systems for multi-source LED modules.

**Keywords:** Natural convection, multi-source LED module, topology optimization, density-based method.