TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG XÁC ĐỊNH HỆ SỐ SHGC HỆ KHUNG VÀ KÍNH

NUMERICAL SIMULATION FOR DETERMINING THE SHGC OF FRAMES AND GLAZING

Vũ Thành Trung, Trần Phương[1], Vũ Trung Kiên

Viện Khoa học công nghệ xây dựng
Email: [1]phuongtran.ibst@gmail.com

DOI: https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses1-18

TÓM TẮT: Bài báo này nghiên cứu phương pháp mô phỏng tính toán hệ số SHGC của hệ khung kính nhằm tối ưu hóa hiệu suất năng lượng trong các tòa nhà hiện đại. Mục tiêu là phân tích và xếp hạng các giải pháp thiết kế kính trong việc kiểm soát nhiệt độ và tiết kiệm năng lượng. Sử dụng các phần mềm mô phỏng tiên tiến như EnergyPlus và THERM, nghiên cứu tiến hành mô phỏng chi tiết về hiệu suất nhiệt của các hệ kính và khung khác nhau dưới tác động của điều kiện môi trường cụ thể. Kết quả cho thấy, sự lựa chọn vật liệu kính và thiết kế khung có ảnh hưởng đáng kể đến hệ số SHGC, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến mức độ tiêu thụ năng lượng của công trình. Các phương pháp cải tiến trong thiết kế khung kính có thể giảm đáng kể lượng nhiệt không mong muốn xâm nhập vào không gian sống. Việc áp dụng mô phỏng tính toán SHGC là một công cụ hiệu quả trong quá trình thiết kế xanh, giúp gia tăng khả năng tiết kiệm năng lượng và tăng cường sự thoải mái nhiệt cho người sử dụng.

TỪ KHOÁ: hệ mặt dựng nhôm kính, SHGC, mô phỏng nhiệt.

ABSTRACT: This paper investigates a simulation method for calculating the Solar Heat Gain Coefficient (SHGC) of frame-glazing systems to optimize energy performance in modern buildings. The objective is to analyze and rank glazing design solutions for temperature control and energy savings. Using advanced simulation software such as EnergyPlus and THERM, the study conducts detailed simulations of the thermal performance of different glazing and frame systems under specific environmental conditions. The results show that the choice of glazing materials and frame design has a significant impact on SHGC, thereby directly affecting a building's energy consumption. Improved approaches in frame-glazing design can substantially reduce unwanted heat entering interior spaces. Applying SHGC simulations is an effective tool in green design, helping to enhance energy savings and improve thermal comfort for occupants.

KEYWORDS: aluminum-glass façade/curtain-wall systems, SHGC, thermal simulation.

1. MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng và các thách thức về biến đổi khí hậu toàn cầu, hiệu quả năng lượng trong lĩnh vực xây dựng đã trở thành một trong những ưu tiên chiến lược hàng đầu. Trong đó, các toà nhà và ngành xây dựng chiếm khoảng 32-34% tổng tiêu thụ năng lượng và chịu trách nhiệm cho khoảng 34% lượng phát thải CO_2 liên quan đến năng lượng (năm 2023) [1], và lớp vỏ bao che công trình đóng vai trò then chốt trong việc quyết định hiệu suất vận hành của các toà nhà [2]. Trong các thành phần của lớp vỏ, hệ thống cửa sổ và vách kính được xem là mắt xích yếu nhất về nhiệt, thường là nguồn gây thất thoát hoặc thu nhiệt lớn nhất, ảnh hưởng trực tiếp đến nhu cầu năng lượng cho hệ thống điều hòa không khí [3].

Để đánh giá định lượng hiệu suất của hệ thống cửa sổ, các chuyên gia sử dụng ba chỉ số chính: Hệ số truyền nhiệt (U-value), Hệ số thu nhiệt mặt trời (SHGC - Solar Heat Gain Coefficient) và Hệ số truyền sáng (VLT - Visible Light Transmittance). Trong khi U-value đo lường khả năng cách nhiệt tổng thể, SHGC lại là chỉ số đặc biệt quan trọng đối với các công trình tại vùng khí hậu nhiệt đới nóng ẩm như Việt Nam. SHGC định nghĩa phần năng lượng mặt trời được truyền vào bên trong nhà, trở thành nguồn nhiệt trực tiếp làm tăng tải lạnh [4]. Do đó, việc lựa chọn các giải pháp cửa sổ có SHGC thấp là một chiến lược thiết kế thụ động cơ bản và hiệu quả để giảm tiêu thụ năng lượng và nâng cao tiện nghi nhiệt cho người sử dụng [5].

Tuy nhiên, một sai lầm phổ biến trong thực hành thiết kế hiện nay là việc đánh giá SHGC thường chỉ dựa trên các thông số của riêng phần kính (SHGC tâm kính) mà bỏ qua ảnh hưởng đáng kể của hệ thống khung. Khung cửa, đặc biệt là các loại khung kim loại không có cầu cách nhiệt, hoạt động như một cầu nhiệt (thermal bridge) nghiêm trọng, không chỉ làm tăng U-value tổng thể mà còn ảnh hưởng đến lượng nhiệt truyền vào không gian bên trong thông qua dẫn nhiệt và bức xạ nhiệt bề mặt [6], [7]. Các tiêu chuẩn quốc tế như của Hội đồng Đánh giá Cửa sổ Quốc gia Hoa Kỳ (NFRC) đã nhấn mạnh rằng hiệu suất của cửa sổ phải được đánh giá trên toàn bộ hệ thống, bao gồm cả khung, kính và đệm, thông qua phương pháp tính toán bình quân gia quyền theo diện tích [8]. Sự thiếu vắng các nghiên cứu định lượng, so sánh một cách hệ thống hiệu suất của các loại hệ khung kính phổ biến tại Việt Nam theo một phương pháp luận chuẩn hóa đang tạo ra một khoảng trống kiến thức, gây khó khăn cho các kiến trúc sư và kỹ sư trong việc lựa chọn giải pháp tối ưu và phù hợp nhất.

Bài báo này được thực hiện nhằm giải quyết khoảng trống đó. Mục tiêu chính của nghiên cứu bao gồm: (1) Trình bày và áp dụng một phương pháp luận rõ ràng, sử dụng các công cụ mô phỏng số đã được kiểm chứng quốc tế như THERM, WINDOW và Optics để tính toán SHGC cho toàn bộ hệ khung kính; (2) Phân tích, so sánh và xếp hạng hiệu suất nhiệt một cách định lượng của một số loại hệ khung kính phổ biến, từ cơ bản đến tiên tiến; và (3) so sánh kết quả mô phỏng năng lượng với kết quả thử nghiệm.

Nội dung bài báo được cấu trúc thành các phần chính: tiếp theo phần Mở đầu là phần Tổng quan nghiên cứu, trình bày các khái niệm nền tảng và các công trình liên quan. Phần ba mô tả chi tiết phương pháp luận nghiên cứu, bao gồm quy trình mô phỏng và các giả định. Phần bốn trình bày và thảo luận các kết quả mô phỏng. Cuối cùng, phần năm đưa ra các kết luận chính và các khuyến nghị cho thực hành thiết kế tại Việt Nam.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1. Các khái niệm cơ bản về hiệu suất nhiệt của cửa sổ

Hiệu suất nhiệt của hệ thống cửa sổ được quyết định bởi sự cân bằng phức tạp giữa các cơ chế truyền nhiệt và truyền năng lượng bức xạ. Sự truyền nhiệt qua cửa sổ bao gồm ba hình thức chính: dẫn nhiệt qua các vật liệu rắn (kính, khung), đối lưu trong các khoang khí và tại các bề mặt, và bức xạ nhiệt sóng dài giữa các bề mặt có nhiệt độ khác nhau [9]. Các chỉ số hiệu suất chính được định nghĩa như sau:

- Hệ số truyền nhiệt (U-value, W/m²K): Đo lường tốc độ truyền nhiệt qua một đơn vị diện tích của cửa sổ do chênh lệch nhiệt độ giữa môi trường bên trong và bên ngoài. U-value càng thấp, khả năng cách nhiệt của cửa sổ càng tốt [8], [9].

- Hệ số thu nhiệt mặt trời (SHGC - Solar Heat Gain Coefficient): Là tỷ số giữa tổng lượng nhiệt mặt trời đi vào không gian bên trong (bao gồm cả phần truyền qua trực tiếp và phần được kính hấp thụ rồi tỏa vào trong) và tổng lượng bức xạ mặt trời chiếu tới mặt ngoài. SHGC là một giá trị không thứ nguyên từ 0 đến 1. SHGC càng thấp, lượng nhiệt mặt trời đi vào càng ít, giúp giảm tải làm mát hiệu quả [8], [10].

- Hệ số truyền sáng (VLT - Visible Transmittance): Là tỷ lệ phần trăm của phổ ánh sáng nhìn thấy được truyền qua cửa sổ. VLT cao giúp tối đa hóa việc tận dụng ánh sáng tự nhiên, qua đó giảm chi phí năng lượng cho chiếu sáng nhân tạo, nhưng cũng có thể làm tăng nguy cơ gây chói nếu không được thiết kế và kiểm soát hợp lý [2], [9].

2.2. Các tiêu chuẩn và công cụ mô phỏng

Để đảm bảo tính nhất quán và độ tin cậy trong việc đánh giá hiệu suất cửa sổ, các tiêu chuẩn và công cụ mô phỏng đã được phát triển và công nhận rộng rãi trên toàn thế giới. Hội đồng Đánh giá Cửa sổ Quốc gia Hoa Kỳ (NFRC) đã thiết lập các bộ tiêu chuẩn như NFRC 100 (cho U-value) và NFRC 200 (cho SHGC và VLT), cung cấp các quy trình chi tiết về điều kiện biên, phương pháp mô phỏng và công thức tính toán cho toàn bộ hệ thống cửa sổ, bao gồm cả phần kính và khung (area-weighted average) [8], [11]. Tiêu chuẩn ISO 15099 cũng là một tài liệu tham khảo quan trọng trên phạm vi quốc tế, cung cấp các thuật toán chi tiết làm nền tảng cho nhiều phần mềm mô phỏng [12].

Để thực hiện các tính toán phức tạp này, các chuyên gia thường sử dụng bộ công cụ phần mềm chuyên dụng được phát triển bởi Phòng thí nghiệm Quốc gia Lawrence Berkeley (LBNL). Quy trình mô phỏng bao gồm việc sử dụng kết hợp nhiều công cụ, mỗi công cụ có một chức năng chuyên biệt:

- OPTICS: Là phần mềm được sử dụng để xây dựng và tính toán các đặc tính quang học (truyền qua, phản xạ, hấp thụ) cho các lớp kính đơn hoặc các lớp kính phức hợp không có sẵn

trong thư viện tiêu chuẩn. Đối với các hệ kính dán an toàn như mẫu kính được nghiên cứu trong bài báo này (bao gồm lớp PVB), OPTICS được sử dụng để tạo ra một "lớp vật liệu tương đương" (equivalent layer) cho cụm kính dán đó. Kết quả từ OPTICS sau đó được lưu lại và nhập vào thư viện của phần mềm WINDOW để sử dụng trong các bước tiếp theo.

- THERM: Là công cụ phân tích truyền nhiệt hai chiều (2D) bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Nó được sử dụng để mô phỏng chính xác mặt cắt của khung cửa, tính toán hệ số truyền nhiệt của riêng phần khung (Uf) và phân tích ảnh hưởng của các cầu nhiệt (thermal bridges). Kết quả từ THERM là một đầu vào quan trọng cho phần mềm WINDOW [6], [7].

- WINDOW: Là công cụ trung tâm để tích hợp các thành phần và tính toán hiệu suất tổng thể. Nó thực hiện tính toán truyền nhiệt một chiều (1D) qua vùng tâm kính, cho phép người dùng xây dựng các cấu trúc kính hộp (IGU) từ các lớp kính đơn (từ thư viện chuẩn hoặc từ OPTICS), khai báo các lớp phủ, loại khí và độ dày khoang. Quan trọng nhất, WINDOW kết hợp kết quả U-khung từ THERM với kết quả U-tâm kính của chính nó để tính toán ra U-value và SHGC cho toàn bộ hệ thống cửa sổ [13].

Bằng cách tuân thủ luồng công việc này, nghiên cứu đảm bảo rằng các chỉ số hiệu suất được tính toán một cách chi tiết, chính xác và có cơ sở khoa học vững chắc.

2.3. Các công nghệ kính và khung hiện đại

Sự phát triển không ngừng của khoa học vật liệu đã mang đến nhiều giải pháp công nghệ tiên tiến nhằm cải thiện đáng kể hiệu suất nhiệt của hệ thống cửa sổ:

- Công nghệ kính: Việc chuyển từ kính đơn sang *kính hộp (Insulated Glazing Unit - IGU),* bao gồm hai hay nhiều lớp kính ngăn cách bởi một lớp khí trơ (thường là Argon), giúp giảm đáng kể hệ số truyền nhiệt U-value [2], [3]. Công nghệ đột phá nhất là *kính phủ phát xạ thấp (Low-E),* một lớp phủ kim loại siêu mỏng, trong suốt, có khả năng phản xạ bức xạ nhiệt sóng dài. Lớp phủ Low-E giúp giữ ấm vào mùa đông và ngăn nhiệt vào mùa hè, cải thiện cả U-value và SHGC một cách hiệu quả [14], [15]. Ngoài ra, *kính nhuộm màu (Tinted) và kính phản quang (Reflective)* cũng là các giải pháp phổ biến để giảm SHGC, mặc dù chúng thường làm giảm cả hệ số truyền sáng VLT [2].

- Công nghệ khung: Để giải quyết vấn đề cầu nhiệt qua khung kim loại, công nghệ *nhôm có cầu cách nhiệt (Aluminum with Thermal Break)* đã được phát triển. Một dải vật liệu có độ dẫn nhiệt thấp (thường là polyamide) được chèn vào giữa các profle nhôm mặt trong và mặt ngoài, giúp cắt đứt đường truyền nhiệt và giảm đáng kể U-khung [6], [7]. Bên cạnh đó, các vật liệu như *nhựa uPVC* hay *gỗ* với đặc tính cách nhiệt tự nhiên cũng là những lựa chọn hiệu quả để chế tạo khung cửa sổ tiết kiệm năng lượng [7].

Việc kết hợp đồng bộ các công nghệ kính và khung hiện đại cho phép tạo ra các hệ thống cửa sổ có hiệu suất cao, đáp ứng các yêu cầu ngày càng khắt khe về tiết kiệm năng lượng và tiện nghi cho người sử dụng. Nghiên cứu này sẽ áp dụng các phương pháp luận và công cụ tiêu chuẩn nêu trên để đánh giá một cách định lượng hiệu quả của các giải pháp kết hợp này trong bối cảnh cụ thể của Việt Nam.

3. PHƯƠNG PHÁP

Phương pháp nghiên cứu được xây dựng dựa trên quy trình mô phỏng số chi tiết, tuân thủ các tiêu chuẩn quốc tế để đảm bảo tính chính xác và khả năng so sánh của kết quả. Quy trình bao gồm việc lựa chọn và định nghĩa các mẫu nghiên cứu, mô phỏng chi tiết các thành phần bằng phần mềm chuyên dụng, và cuối cùng là tổng hợp để tính toán các chỉ số hiệu suất tổng thể.

3.1. Lựa chọn đối tượng mô phỏng

Nghiên cứu lựa chọn 4 mẫu hệ khung kính, được thiết kế để tạo thành một chuỗi nâng cấp hiệu suất logic, phản ánh các giải pháp thực tế trên thị trường. Việc này cho phép phân tích và định lượng hiệu quả của từng yếu tố cải tiến: loại kính, thiết kế hình học của khung và việc bổ sung vật liệu cách nhiệt.

Mẫu khung:

- Khung nhôm hộp: Sử dụng một profle nhôm hộp có cầu cách nhiệt, đại diện cho một thiết kế hiện đại, phổ biến. Các biến thể của mẫu này bao gồm việc lấp đầy hoặc không lấp đầy khoang rỗng bằng vật liệu cách nhiệt.

- Khung nhựa uPVC: Một profle uPVC nhiều khoang điển hình có lõi thép gia cường, được chọn để so sánh với giải pháp nhôm.

Mẫu kính:

- *Kính đơn:* Kính trong (clear glass) dày 8 mm.

- Kính hộp Low-E phức hợp (IGU): Cấu trúc hiệu suất cao gồm: Kính Low-E 5 mm + Khoang

khí 12 mm (chứa 100% không khí) + Kính trong 4 mm + Lớp PVB 1,52 mm + Kính trong 4 mm.

Bảng 1: Mô tả chi tiết các mẫu hệ khung kính được mô phỏng

Mẫu	Loại khung	Cấu tạo kính	Ghi chú
1	Khung nhôm hộp (không lõi xốp)	Kính đơn trong 8mm	Mẫu cơ sở (Baseline): Phản ánh tình huống sử dụng khung hiện đại nhưng với kính đơn cơ bản.
2	Khung nhôm hộp (không lõi xốp)	Kính hộp Low-E phức hợp	Nâng cấp kính: Đánh giá hiệu quả khi chỉ nâng cấp lên kính hộp hiệu suất cao.
3	Khung nhôm hộp (có lõi xốp cách nhiệt)	Kính hộp Low-E phức hợp	Tối ưu hóa khung nhôm: Lấp đầy các khoang rỗng lớn của khung bằng xốp PU, đại diện cho giải pháp nhôm cao cấp.
4	Khung nhựa uPVC lõi thép	Kính hộp Low-E phức hợp	Giải pháp vật liệu thay thế: So sánh trực tiếp hiệu suất của uPVC với hệ nhôm được tối ưu hóa.

3.2. Quy trình mô phỏng tính toán U-value và SHGC

Quy trình tính toán tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn của Hội đồng Đánh giá Cửa sổ Quốc gia Hoa Kỳ (NFRC), cụ thể là NFRC 100 cho U-value và NFRC 200 cho SHGC, sử dụng bộ phần mềm LBNL THERM và WINDOW phiên bản 7.8 [8], [11].

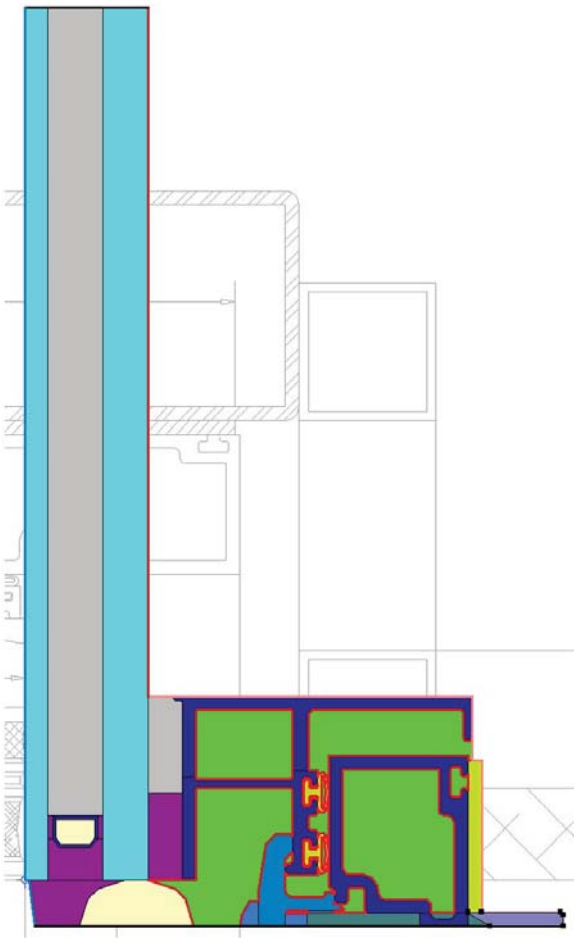
Bước 1: Mô hình hóa mặt cắt khung với THERM 7.8. Mô hình hình học 2D của các mặt cắt khung (đầu, ngưỡng, cạnh bên) được xây dựng chi tiết. Các vật liệu cấu thành được khai báo với các đặc tính nhiệt tương ứng từ thư viện vật liệu chuẩn của phần mềm.

- *Đối với Mẫu 1 và 2:* Mô hình khung nhôm hộp có cầu cách nhiệt, các khoang rỗng lớn được khai báo là "Không khí" (Air).

- *Đối với Mẫu 3:* Dựa trên mô hình của Mẫu 2, vật liệu của các khoang rỗng lớn được thay thế bằng "Polyurethane Foam Insulation (Spray Applied)" để mô phỏng việc bơm foam cách nhiệt.

- *Đối với Mẫu 4:* Một profile khung nhựa uPVC nhiều khoang điển hình có lõi thép gia cường được xây dựng.

Điều kiện biên được áp dụng theo tiêu chuẩn NFRC 100. Phần mềm sẽ thực hiện phân tích phần tử hữu hạn để xác định sự phân bố nhiệt độ và dòng nhiệt, từ đó xuất ra một file. THM chứa mô hình nhiệt hoàn chỉnh của mặt cắt khung.



Hình 1: Cấu tạo hệ kính mẫu 2

Bước 2: Mô hình hóa hệ kính và tích hợp hệ thống với WINDOW 7.6. Quy trình này được thực hiện hoàn toàn trong phần mềm WINDOW:

- *Xây dựng thư viện kính (Glass Library):* Cấu trúc của kính đơn (Mẫu 1) và kính hộp Low-E phức hợp (Mẫu 2, 3, 4) được khai báo chi tiết về độ dày, loại kính, lớp phủ, và loại khí trong khoang (100% không khí). WINDOW sẽ tính toán các chỉ số quang-nhiệt cho vùng tâm kính (center-of-glass).

- *Nhập mô hình khung (Frame Library):* Các file.THM đã tạo ở Bước 1 được nhập vào thư viện khung của WINDOW.

- *Tạo sản phẩm hoàn chỉnh (Window Library):* Một sản phẩm cửa sổ hoàn chỉnh được tạo ra bằng cách kết hợp một mô hình khung từ Frame Library và một hệ kính từ Glass Library. Kích thước cửa sổ mô hình được giữ cố định theo tiêu chuẩn để đảm bảo tính nhất quán khi so sánh.

- *Tính toán kết quả tổng thể:* Phần mềm WINDOW, dựa trên các mô hình chi tiết của khung và kính, sẽ tự động thực hiện các phép tính phức tạp theo tiêu chuẩn NFRC để xác định các chỉ số hiệu

suất cho toàn bộ hệ thống cửa sổ (whole window performance). Kết quả cuối cùng được xuất ra bao gồm U-value tổng thể và SHGC tổng thể.

3.3. Quy trình thử nghiệm

Lưu ý: Không giống như U-value được đo trực tiếp bằng buồng nhiệt, hệ số SHGC được xác định bằng phương pháp tính toán dựa trên dữ liệu đo quang phổ theo tiêu chuẩn ISO 9050 (hoặc EN 410).

Đo lường quang phổ:

+ Mẫu thử nghiệm được đặt trong một máy quang phổ kế (spectrophotometer) có quả cầu tích hợp.

+ Thiết bị sẽ đo độ truyền quang phổ $\tau(\lambda)$ và độ phản xạ quang phổ $\rho(\lambda)$ của mẫu trên toàn bộ dải sóng năng lượng mặt trời (thông thường từ 300 nm đến 2500 nm). Kết quả là một bộ dữ liệu về khả năng truyền và phản xạ ánh sáng tại từng bước sóng cụ thể.

Tính toán các đặc tính năng lượng mặt trời:

Từ dữ liệu quang phổ đo được, các giá trị tích hợp cho toàn bộ dải năng lượng mặt trời sẽ được tính toán theo công thức của tiêu chuẩn. Các giá trị chính bao gồm:

+ *Độ truyền trực tiếp năng lượng mặt trời (τe):* Phần trăm tổng năng lượng mặt trời đi xuyên qua kính.

+ *Độ phản xạ trực tiếp năng lượng mặt trời (ρe):* Phần trăm tổng năng lượng mặt trời bị kính phản xạ lại.

+ *Độ hấp thụ năng lượng mặt trời (αe):* Phần trăm năng lượng mặt trời bị khối vật liệu kính hấp thụ, được xác định bằng công thức: $\alpha e = 1 - \tau e - \rho e$.

Xác định hệ số SHGC:

+ Hệ số SHGC (hay g-value) là tổng của phần năng lượng truyền trực tiếp và phần năng lượng thứ cấp (do kính hấp thụ rồi tỏa nhiệt vào trong).

+ Hệ số SHGC được xác định như sau:

$$SHGC = \tau e + qi$$

Trong đó:

τe là độ truyền trực tiếp năng lượng mặt trời (đã tính ở bước 2);

qi là hệ số truyền nhiệt thứ cấp vào trong. Thành phần này được tính từ độ hấp thụ (αe) và các hệ số trao đổi nhiệt quy ước theo tiêu chuẩn. Nó đại diện cho phần nhiệt mà kính tỏa vào nhà sau khi đã nóng lên do hấp thụ năng lượng mặt trời.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

4.1. Phân tích so sánh kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng chi tiết cho 4 mẫu nghiên cứu, bao gồm các chỉ số hiệu suất tổng thể và các chỉ số thành phần, được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2: Kết quả mô phỏng U-value, SHGC và VT cho các mẫu nghiên cứu

Mẫu	Mô tả	U-factor (W/m^2K)	SHGC	VT
1	Nhôm hộp (không xốp) + Kính đơn 8mm	5,405	0,811	0,806
2	Nhôm hộp (không xốp) + Kính hộp Low-E	1,930	0,269	0,351
3	Nhôm hộp (có xốp) + Kính hộp Low-E	1,927	0,268	0,351
4	uPVC + Kính hộp Low-E	1,745	0,253	0,351

Các kết quả này cho phép rút ra những phân tích sâu sắc về hiệu quả của từng biện pháp cải tiến:

- Tác động chi phối của hệ kính: Sự khác biệt lớn nhất về hiệu suất được quan sát thấy khi chuyển từ Mẫu 1 (kính đơn) sang Mẫu 2 (kính hộp Low-E). U-value giảm 64% và SHGC giảm 67%. Điều này cho thấy rằng việc lựa chọn hệ kính là yếu tố quyết định hàng đầu đến hiệu suất nhiệt của cửa sổ. Việc sử dụng kính hộp có lớp phủ phát xạ thấp là biện pháp can thiệp mang lại hiệu quả cao nhất.

- Hiệu quả cận biên của việc tối ưu hóa khung: So sánh giữa Mẫu 2 và Mẫu 3 cho thấy việc bổ sung xốp cách nhiệt vào các khoang rỗng của khung nhôm chỉ mang lại một sự cải thiện rất nhỏ cho hiệu suất tổng thể (U-value và SHGC chỉ giảm thêm khoảng 0,1 - 0,2%). Hiện tượng này có thể được giải thích bởi "hiệu ứng pha loãng" (dilution effect), khi mà sự cải thiện ở phần khung (chỉ chiếm ~ 20% diện tích) không tạo ra thay đổi lớn cho giá trị trung bình của toàn bộ cửa sổ, vốn bị chi phối bởi phần kính (chiếm ~ 80% diện tích).

- Vai trò của vật liệu khung: So sánh giữa các giải pháp cao cấp, hệ khung nhựa uPVC (Mẫu 4) thể hiện hiệu suất nhiệt tốt hơn hệ khung nhôm được tối ưu hóa (Mẫu 3), với U-value thấp hơn khoảng 9,4% và SHGC thấp hơn khoảng 5,6%. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của độ dẫn nhiệt tự nhiên của vật liệu làm khung.

4.2. Xác thực phương pháp luận: So sánh kết quả mô phỏng và thí nghiệm

Để đánh giá độ tin cậy và tính ứng dụng thực tế của phương pháp mô phỏng, kết quả tính toán cho Mẫu 2 (Khung nhôm hộp không xốp + Kính hộp Low-E) đã được so sánh với kết quả từ các thí nghiệm thực địa/thử nghiệm trong phòng thí nghiệm cho một sản phẩm có cấu tạo tương đương.

Bảng 3: So sánh kết quả mô phỏng (Mẫu 2) và kết quả thí nghiệm

Chỉ số	Kết quả Mô phỏng (WINDOW)	Kết quả Thí nghiệm	Chênh lệch (%)
U-value (W/m^2K)	1,930	1,55	24,5%
SHGC	0,269	0,24	12,1%

Kết quả so sánh cho thấy mức độ tương quan cao giữa giá trị mô phỏng và giá trị thí nghiệm, với mức chênh lệch nằm trong khoảng 12,1%. Sự tương đồng này khẳng định phương pháp mô phỏng theo tiêu chuẩn NFRC là một công cụ đáng tin cậy để dự đoán và so sánh hiệu suất nhiệt của các hệ thống cửa sổ. Các nghiên cứu quốc tế cũng đã chỉ ra rằng các mô hình này thường cho kết quả có độ chính xác cao khi so sánh với các phép đo trong điều kiện phòng thí nghiệm được kiểm soát chặt chẽ [16], [17].

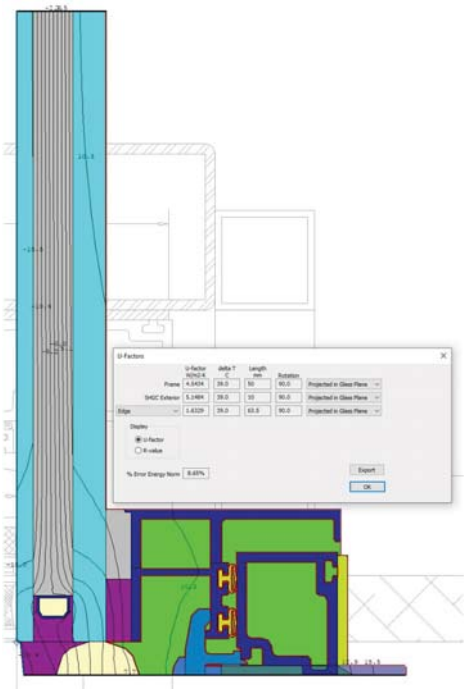
Tuy nhiên, một mức độ chênh lệch nhất định là không thể tránh khỏi và có thể được lý giải bởi các yếu tố sau:

- Chất lượng thi công: Hiệu suất thực tế của sản phẩm lắp đặt tại công trường có thể bị ảnh hưởng bởi chất lượng lắp đặt, các khe hở và cầu nhiệt tại vị trí tiếp giáp với tường, những yếu tố mà mô hình lý tưởng không thể nắm bắt hết.

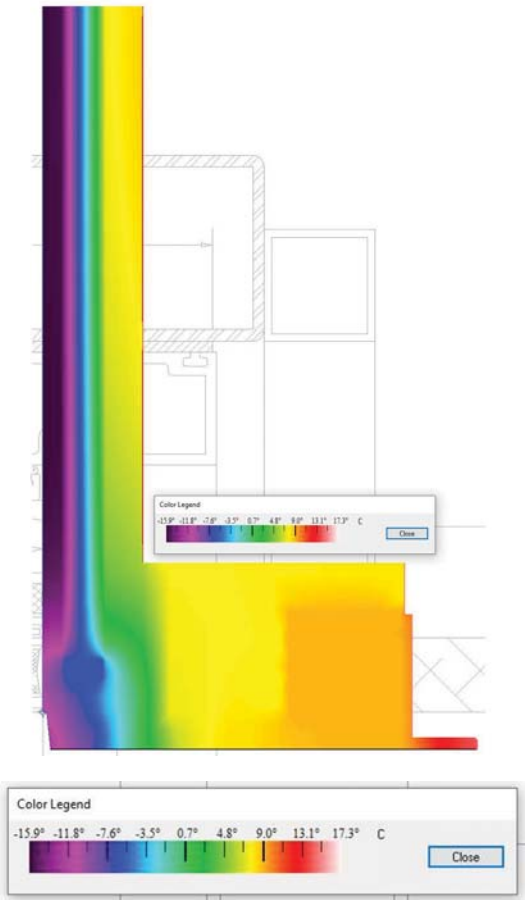
- Sai khác vật liệu: Đặc tính nhiệt và quang học của vật liệu trong thực tế có thể có dung sai so với dữ liệu được khai báo trong thư viện phần mềm.

- Điều kiện thử nghiệm: Điều kiện biên trong thí nghiệm (đặc biệt là thí nghiệm thực địa) có thể biến động và khác biệt so với điều kiện tiêu chuẩn, trạng thái ổn định được sử dụng trong mô phỏng.

Mặc dù có những yếu tố trên, sự tương đồng giữa hai bộ kết quả cho phép kết luận rằng quy trình mô phỏng được trình bày trong nghiên cứu này là một công cụ mạnh mẽ và hợp lệ. Nó không chỉ cung cấp các giá trị hiệu suất đáng tin cậy mà còn là một phương pháp hiệu quả để so sánh tương đối giữa các giải pháp thiết kế khác nhau, giúp đưa ra các quyết định sáng suốt và có cơ sở khoa học trong giai đoạn thiết kế công trình.



Hình 2: Đặc trưng nhiệt của thanh đứng - Mẫu 2



Hình 3: Phân bố nhiệt của thanh đứng - Mẫu 2

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày và áp dụng một phương pháp luận mô phỏng hệ thống, tuân thủ các tiêu chuẩn quốc tế của NFRC, để tính toán và đánh giá định lượng hiệu suất nhiệt của các hệ thống cửa sổ và vách kính. Bằng cách sử dụng bộ công cụ phần mềm chuyên dụng THERM và WINDOW, nghiên cứu đã phân tích chi tiết hiệu quả của từng yếu tố cải tiến, từ việc nâng cấp loại kính đến việc tối ưu hóa và lựa chọn vật liệu khung.

Các kết quả phân tích trên 4 mẫu hệ khung kính điển hình đã dẫn đến những kết luận quan trọng sau:

- Việc nâng cấp đồng bộ cả khung và kính là yếu tố then chốt: Bước chuyển đổi từ một hệ khung nhôm kính đơn thông thường (Mẫu 1) sang hệ khung nhôm có cầu cách nhiệt kết hợp với kính hộp Low-E (Mẫu 2) mang lại một bước nhảy vọt về hiệu suất. Kết quả mô phỏng cho thấy Hệ số truyền nhiệt tổng thể (U-value) giảm 64% (từ 5,405 xuống 1,930 W/m²K) và Hệ số thu nhiệt mặt trời (SHGC) giảm 67% (từ 0,811 xuống 0,269). Điều này khẳng định đây là biện pháp can thiệp mang lại hiệu quả cao nhất và là nền tảng cho các thiết kế tiết kiệm năng lượng.

- Hiệu quả cận biên của việc tối ưu hóa khung nhôm: Nghiên cứu chỉ ra rằng, khi một hệ thống đã đạt đến mức hiệu suất cao (như Mẫu 2), việc tối ưu hóa thêm bằng cách bơm xốp cách nhiệt vào các khoang rỗng của khung (Mẫu 3) chỉ mang lại lợi ích rất nhỏ. Cả U-value và SHGC chỉ cải thiện thêm khoảng 0,1 - 0,2%. Phát hiện này nhấn mạnh "hiệu ứng pha loãng", trong đó hiệu suất tổng thể bị chi phối bởi thành phần có diện tích lớn nhất là kính. Điều này gợi ý rằng, về mặt chi phí - hiệu quả, việc đầu tư vào hệ kính tốt nhất có thể là ưu tiên hàng đầu.

- Ưu thế của vật liệu có độ dẫn nhiệt thấp: Khi so sánh các giải pháp hiệu suất cao, hệ khung nhựa uPVC (Mẫu 4) cho thấy hiệu quả nhiệt tốt hơn hệ khung nhôm có cầu cách nhiệt đã được tối ưu hóa (Mẫu 3). Cụ thể, U-value của hệ uPVC thấp hơn 9,4% và SHGC thấp hơn 5,6%, cho thấy vai trò không thể bỏ qua của đặc tính dẫn nhiệt tự nhiên của vật liệu làm khung.

- Xác thực độ tin cậy của phương pháp mô phỏng: Kết quả mô phỏng cho mẫu tham chiếu (Mẫu 2) đã được so sánh với dữ liệu thí nghiệm thực tế, cho thấy sự tương quan tốt. Sự tương đồng này, cùng với các nghiên cứu xác thực quốc tế, khẳng định rằng quy trình mô phỏng theo tiêu chuẩn NFRC là một công cụ đáng tin cậy để dự đoán và so sánh hiệu suất tương đối giữa các sản phẩm.

Bài báo này cung cấp một bộ số liệu định lượng và một phương pháp luận rõ ràng, giúp các kiến trúc sư, kỹ sư và chủ đầu tư tại Việt Nam có cơ sở khoa học vững chắc để đưa ra quyết định lựa chọn vật liệu vách kính phù hợp. Thay vì lựa chọn dựa trên kinh nghiệm hoặc thông tin không đầy đủ, các bên liên quan có thể sử dụng phương pháp này để đánh giá và xếp hạng các giải pháp, hướng tới các công trình tiết kiệm năng lượng và bền vững hơn.

Hạn chế của nghiên cứu bao gồm việc số lượng các loại hình học khung còn hạn chế và chưa xem xét đến phân tích chi phí - lợi ích trong vòng đời dự án (LCCA). **Hướng nghiên cứu trong tương lai** có thể mở rộng danh mục các loại khung kính phổ biến trên thị trường Việt Nam, tích hợp phân tích LCCA để đưa ra các khuyến nghị tối ưu cả về kỹ thuật và kinh tế, và tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm sâu rộng hơn để xây dựng một bộ dữ liệu tham chiếu toàn diện cho ngành xây dựng trong nước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] United Nations Environment Programme và Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC) (2025), *2024/2025 Global Status Report for Buildings and Construction*, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.

[2] Aguilar-Santana J.L., Jarimi H., Velasco-Carrasco M. và cộng sự. (2020). Review on window-glazing technologies and future prospects. *Int J Low-Carbon Tech*, 15(1), 112-120.

[3] Cuce E. và Riffat S.B. (2015). A state-of-the-art review on innovative glazing technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 695-714.

[4] Sullivan R., Arasteh D., Kim J.J. và cộng sự. (1987). An Indices Approach for Evaluating the Performance of Fenestration Systems in Nonresidential Buildings. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.

[5] Somasundaram S., Thangavelu S.R., và Chong A. (2020). Effect of Existing Façade's Construction and Orientation on the Performance of Low-E-Based Retrofit Double Glazing in Tropical Climate. *Energies*, 13(8), 2016.

[6] de Gastines M., Correa É., và Pattini A. (2019). Heat transfer through window frames in EnergyPlus: model evaluation and improvement. *Advances in Building Energy Research*, 13(1), 138-155.

[7] Van Den Bossche N., Buffel L., và Janssens A. (2015). Thermal Optimization of Window Frames. *Energy Procedia*, 78, 2500-2505.

[8] National Fenestration Rating Council (2023). Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence. .

[9] Li X. và Wu Y. (2025). A review of complex window-glazing systems for building energy saving and daylight comfort: Glazing technologies and their building performance prediction. *Journal of Building Physics*, 48(4), 496-540.

[10] Lu S., Li Z., Zhao Q. và cộng sự. (2017). Modified calculation of solar heat gain coefficient in glazing façade buildings. *Energy Procedia*, 122, 151-156.

[11] National Fenestration Rating Council (2024). THERM 7 / WINDOW 7 NFRC Simulation Manual.

[12] Laouadi A. (2009). Thermal performance modelling of complex fenestration systems. *Journal of Building Performance Simulation*, 2(3), 189-207.

[13] Arasteh D., Kohler C., và Griffith B. (2009), *Modeling Windows in Energy Plus with Simple Performance Indices*.

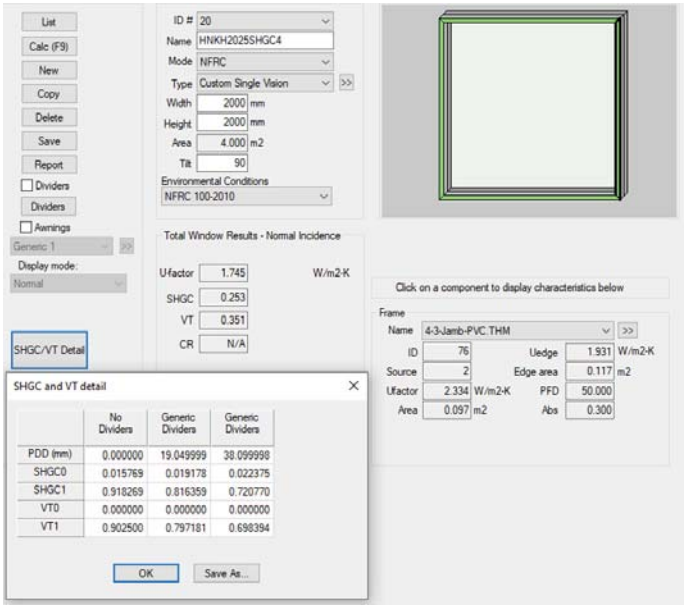
[14] Somasundaram S., Chong A., Wei Z. và cộng sự. (2020). Energy saving potential of low-e coating based retrofit double glazing for tropical climate. *Energy and Buildings*, 206, 109570.

[15] Ahmadi S. (2025). From Efficiency to Sustainability: A Review of Low-Emission Glass. *Advances in the Standards & Applied Sciences*, 3(1), 4-14.

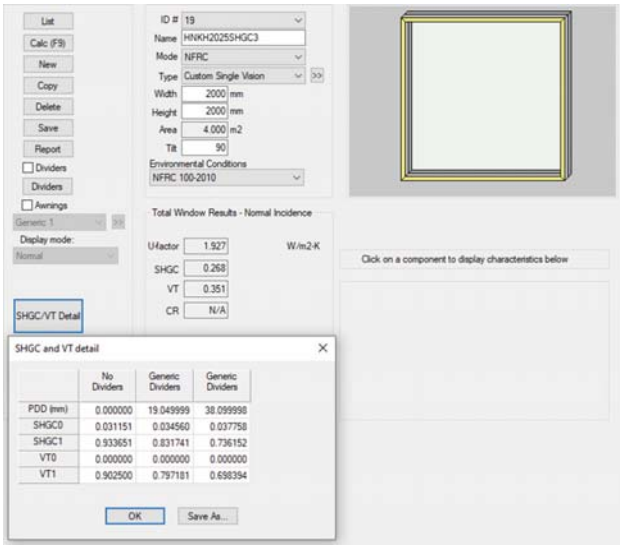
[16] Klems J.H., Warner J.L., và Kelley G.O. (1995). A Comparison Between Calculated and Measured SHGC for Complex Fenestration Systems.

[17] Robinson P. và Littler J. (1993). Thermal performance assessment of an advanced glazing system. *Solar Energy*, 50(2), 129-134.

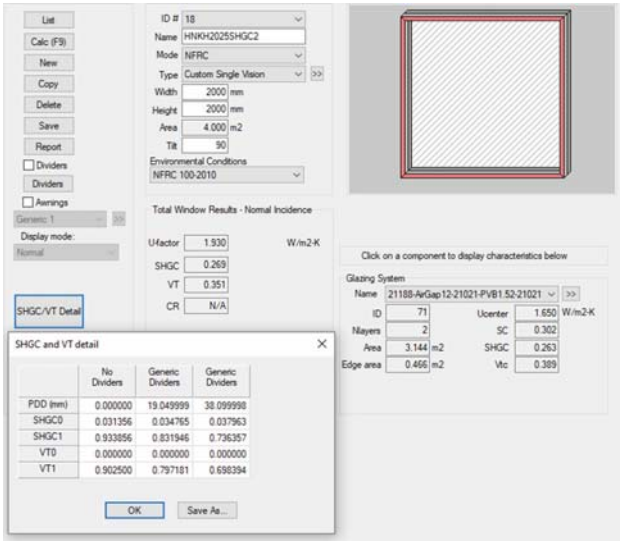
PHỤ LỤC:
KẾT QUẢ SGHC TỪ PHẦN MỀM WINDOW



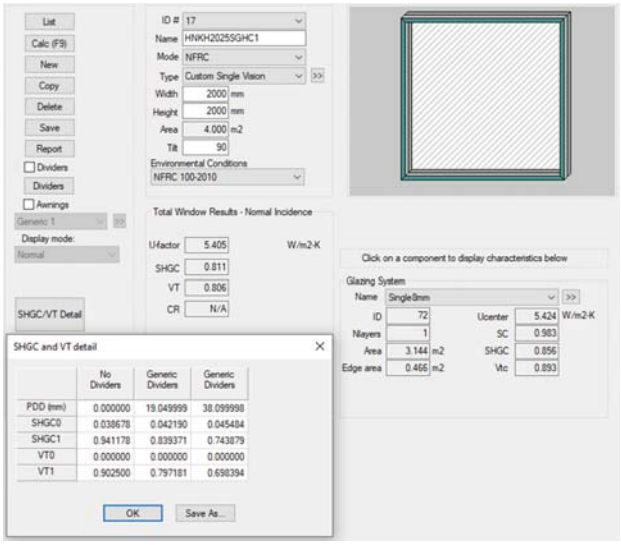
Hình 4: Kết quả SHGC - Mẫu 1



Hình 5: Kết quả SHGC - Mẫu 2



Hình 6: Kết quả SHGC - Mẫu 3



Hình 7: Kết quả SHGC - Mẫu 4