

TỐI ƯU HÓA HIỆU QUẢ NĂNG LƯỢNG CHO KHÔNG GIAN THƯƠNG MẠI MỞ BẰNG MÀN CHẮN KHÍ ĐỘNG: NGHIÊN CỨU MÔ PHỎNG CFD TẠI DỰ ÁN THISO MALL TÂY HỒ TÂY

ThS. Lương Tiên Thành^{(a),*}, KS. Lê Quang Thái^(b), CN. Nguyễn Quang Huy^(a)

^(a)DR Fan Việt Nam

^(b)Công ty Tư vấn Thiết kế Sao

* Email: thanh.luong@drfan.com.vn; thanhlt.hvac@gmail.com; ĐT: 0912.168.158 –

0974.10.08.81

TÓM TẮT Việc kiểm soát tổn thất năng lượng tại các khu vực mở trong các công trình thương mại quy mô lớn luôn là một thách thức kỹ thuật phức tạp đối với hệ thống HVAC (Nhiệt, Thông gió và Điều hòa không khí). Sự vắng mặt của các vách ngăn vật lý dẫn đến quá trình trao đổi nhiệt - ẩm và thâm nhập của các yếu tố ngoại lai. Nghiên cứu này đánh giá hiệu năng cản nhiệt và dòng khối lượng của hệ thống màn chắn gió thông qua Mô phỏng Động lực học Lưu chất Máy tính (CFD). Dựa trên điều kiện biên thực tế tại khu vực Bắc Từ Liêm, Hà Nội, với hướng gió chủ đạo là hướng Đông (vận tốc trung bình 3,6 m/s, tối đa 6,2 m/s), mô hình phân tích sự phân bố trường nhiệt độ và nồng độ không khí ngoại vi thâm nhập. Kết quả cho thấy khi không có màn chắn, nhiệt độ tại sảnh tăng lên 34°C và nồng độ không khí thâm nhập đạt 98%. Áp dụng màn chắn với vận tốc xả 20 m/s thiết lập thành công ranh giới khí động học, cách ly hoàn toàn không gian điều hòa khỏi tác động của gió môi trường cấp 3 (3,6 m/s) và đảm bảo hiệu suất cản trên 98% đối với gió giật cấp 4 (6,2 m/s). Trong kịch bản gió giật cực đoan 8,5 m/s, vận tốc màng 35 m/s kết hợp hạ cao độ lắp đặt xuống 3m được chứng minh là cấu hình dự phòng bắt buộc để giới hạn mức rò rỉ khí dưới 2%.

TỪ KHÓA: Không gian mở, Màn chắn gió, Truyền nhiệt đối lưu, Mô phỏng CFD, Tiết kiệm năng lượng, Tối ưu hóa HVAC.

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển của kiến trúc hiện đại tại các trung tâm thương mại (TTTM) ngày càng chú trọng đến tính kết nối không gian nhằm nâng cao trải nghiệm của khách hàng. Điều này dẫn đến sự xuất hiện phổ biến của các không gian sảnh mở liên tục hoặc các lối ra vào không sử dụng vách kính vật lý. Từ góc độ Nhiệt động lực học, khu vực này trở thành ranh giới giao thoa giữa môi trường vi khí hậu được điều hòa bên trong và môi trường ngoài trời. Khi cửa hoặc không gian bị mở liên tục, sự chênh lệch áp suất không khí và động lượng của gió tạo ra quá trình đối lưu cưỡng bức và tự nhiên. Khí nóng ngoại vi sẽ tràn vào nếu áp suất ngoài dương hơn, đồng thời không khí lạnh thất thoát ra ngoài. Hậu quả là tải nhiệt của hệ thống điều hòa

tăng đột biến, kéo theo chi phí năng lượng khổng lồ, đi kèm với sự thâm nhập của bụi mịn, khói và côn trùng.

Sự xâm nhập không khí không kiểm soát là nguyên nhân hàng đầu gây thất thoát năng lượng. Gần đây, việc ứng dụng CFD để đánh giá màn chắn gió đã có những bước tiến đáng kể. Trong nghiên cứu của L. Wang và cộng sự [1] về phân tích hiệu suất môi trường trong nhà, màn chắn gió có khả năng làm giảm nhiệt độ phòng xưởng lên tới $3,9^{\circ}\text{C}$ và giảm lượng ẩm xâm nhập tới 86,6%. Tương tự, J. Carlos và cộng sự [2] đã trình bày nghiên cứu về hiệu suất của màn chắn nhiệt dưới tác động của gradient nhiệt độ chéo, nhấn mạnh rằng chỉ số tách khối (separation efficiency) bị suy giảm nghiêm trọng bởi vận tốc gió ngang ngoại vi. Đi sâu vào không gian lớn, Y. Zhao và cộng sự [3] đã chứng minh rằng các hệ thống màng chắn cục bộ có thể giảm tới hơn 50% tải nhiệt trao đổi đối lưu. Mới đây nhất, một thuật toán điều khiển góc xả tối ưu bằng mạng nén GA-BP đã được Z. Chen [4] công bố, nâng cao độ kín khí lên 26,5% so với các cấu hình tĩnh truyền thống.

Mặc dù nền tảng lý thuyết đã được khẳng định vững chắc, các nghiên cứu ứng dụng thực địa vào một không gian thương mại mở có quy mô mặt cắt ngang thông thủy khổng lồ (hoàn toàn không có vách kính) tại vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa như Hà Nội vẫn còn hạn chế. Bài viết này ứng dụng CFD để lấp đầy khoảng trống đó, cụ thể hóa các thông số vận tốc thiết kế (15 m/s, 20 m/s, 35 m/s) cho thiết bị quạt cắt gió bảo vệ không gian thông tầng tại dự án thực tế Thiso Mall, qua đó đưa ra lời giải triệt để cho bài toán tối ưu hóa năng lượng.

2. PHƯƠNG PHÁP VÀ MÔ HÌNH NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và Mô hình kiến trúc

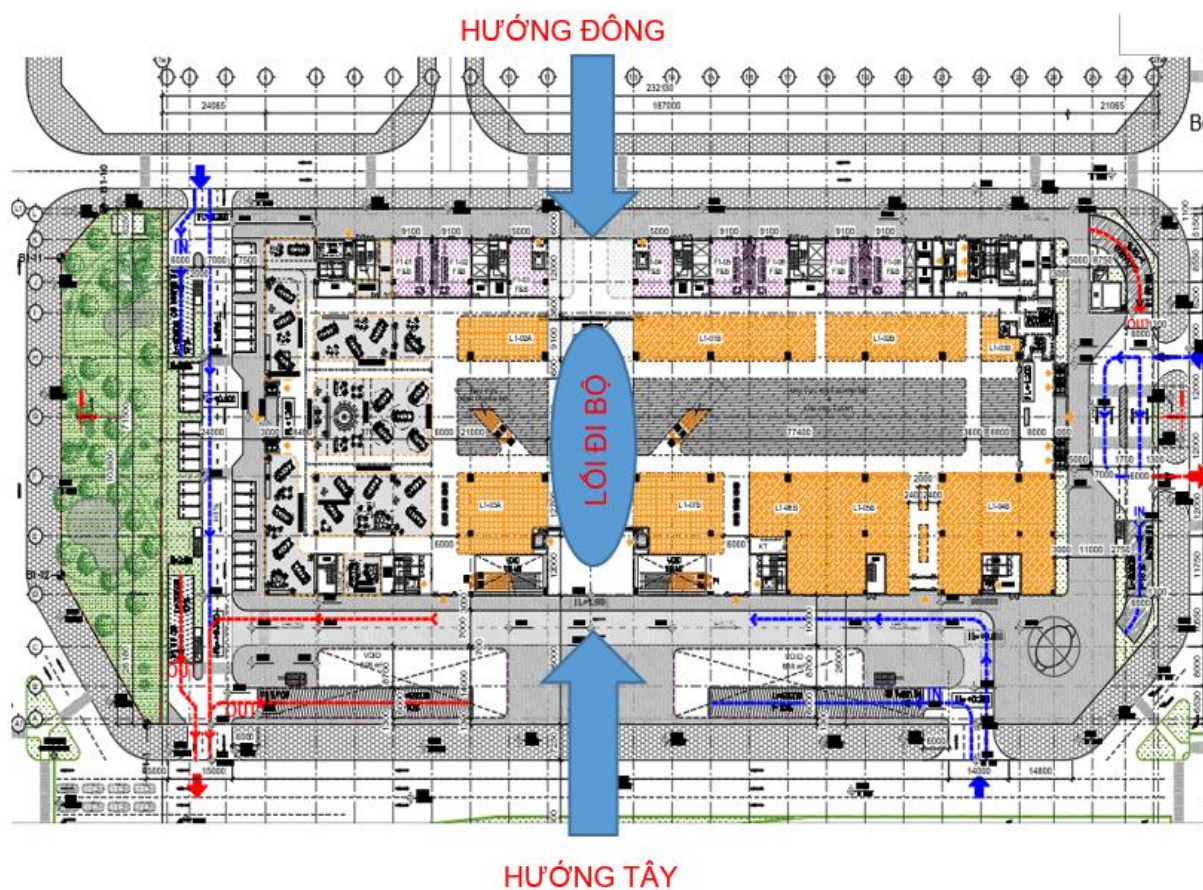
Nghiên cứu thực hiện trên nguyên mẫu là trung tâm thương mại siêu thị Thiso Mall Tây Hồ Tây (chủ đầu tư Đại Quang Minh), tọa lạc tại khu đô thị Starlake. Dự án có 5 tầng nổi và 3 tầng hầm, diện tích sàn trên 52.000m^2 , dự kiến hoàn thành năm 2027 [5].

Hình 1 dưới đây thể hiện phối cảnh và mặt cắt vị trí không gian mở của siêu thị Thiso Mall Tây Hồ Tây, cho thấy dự án thiết kế một không gian hoàn toàn mở ở sảnh chính nhằm tối ưu hóa tầm nhìn và luồng di chuyển của khách hàng. Tuy nhiên, mặt cắt ngang không gian thể hiện rõ sự vắng mặt của các hệ thống cửa vật lý cản gió. Thiết kế này tạo ra một "lỗ hổng" nhiệt động học khổng lồ, nơi bức xạ mặt trời và dòng khí nóng đối lưu có thể tự do khuếch tán vào lõi không gian các tầng nếu không có sự can thiệp của một vách ngăn nhân tạo.

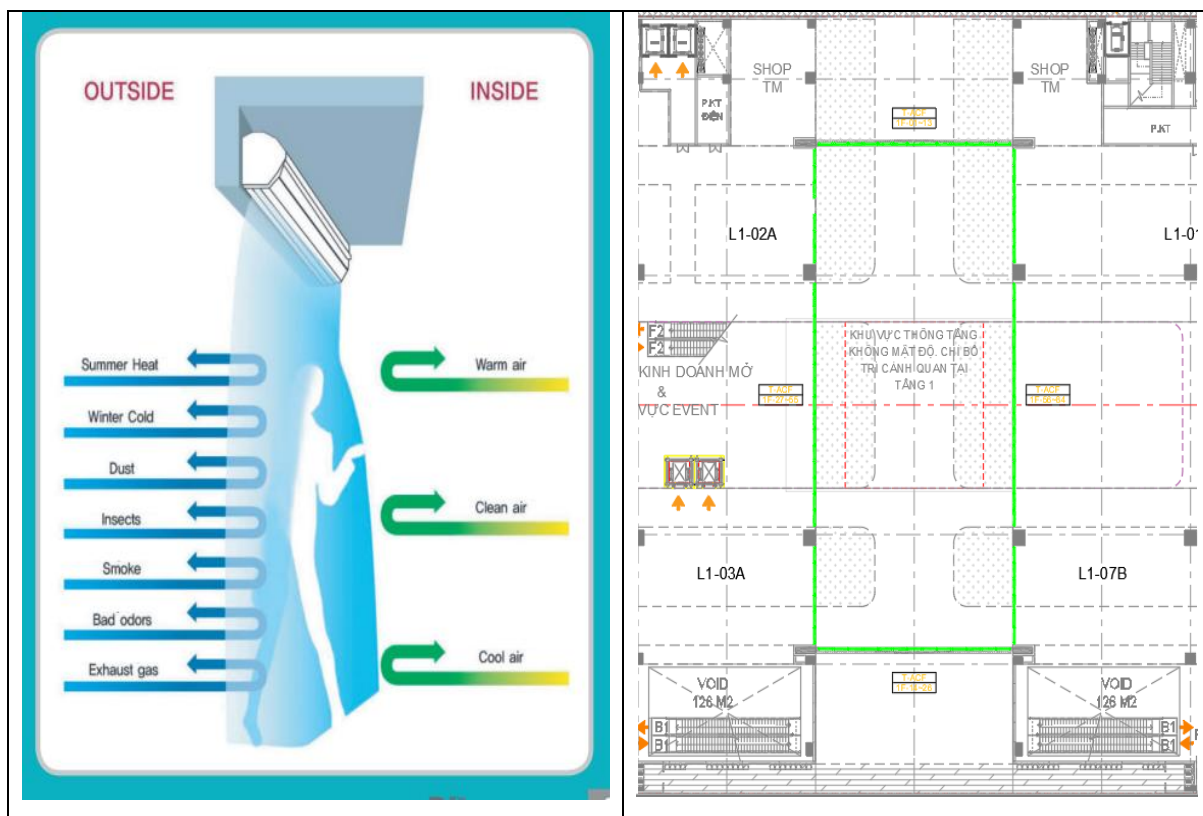


Hình 1. Hình vẽ phối cảnh và mặt cắt vị trí không gian mở của siêu thị.

Bản vẽ mặt bằng bóc tách tuyến lưu thông trên Hình 2 chỉ ra diện tích lối giao thông được tận dụng làm hành lang kinh doanh liên hoàn. Điểm cốt lõi là việc không dùng vách kính cho trục (E/11-13) & (I/11-13); (E-I/11) & (E-I/13). Cấu trúc thông suốt từ trục Đông sang Tây sinh ra hiện tượng "đường hầm gió" (wind tunnel). Bất kỳ sự chênh lệch áp suất khí quyển nào cũng sẽ tạo ra luồng gió xuyên tâm (cross-ventilation), mang theo tải nhiệt và ẩm từ bên ngoài lẫn át hoàn toàn hệ thống HVAC cục bộ của các ki-ốt.



Hình 2. Mặt bằng tổng thể dự án chỉ ra lối đi bộ cần cân nhắc giải pháp tiết kiệm năng lượng cho điều hòa.

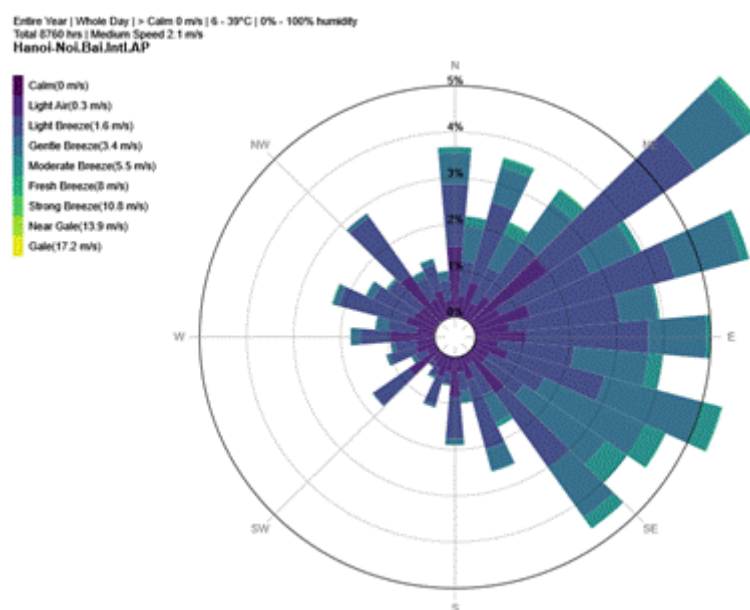


Hình 3. Nguyên lý quạt chắn gió bằng hình ảnh và khu vực dự kiến bố trí quạt chắn gió.

Phân tích nguyên lý động lượng trên Hình 3 cho thấy dòng xả tốc độ cao từ quạt ép xuống sàn hình thành lớp giáp cản dòng đối lưu tự nhiên, ngăn khí nóng, khí lạnh, bụi và côn trùng. Vị trí lắp đặt thực tế được bố trí tại hai đầu ra/vào chính của không gian thông tầng, với cao độ xả cách sàn 4m. Việc duy trì động năng chùm tia phản lực (jet flow) từ cao độ 4m xuống tận mặt sàn mà không bị phân tán bởi áp lực gió ngoài trời chính là thách thức cần được giải quyết thông qua mô phỏng.

2.2. Điều kiện biên vi khí hậu

Phần mềm mô phỏng CFD sử dụng chuỗi dữ liệu vi khí hậu thu thập trực tiếp tại trạm quan trắc quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội để thiết lập điều kiện biên đầu vào.



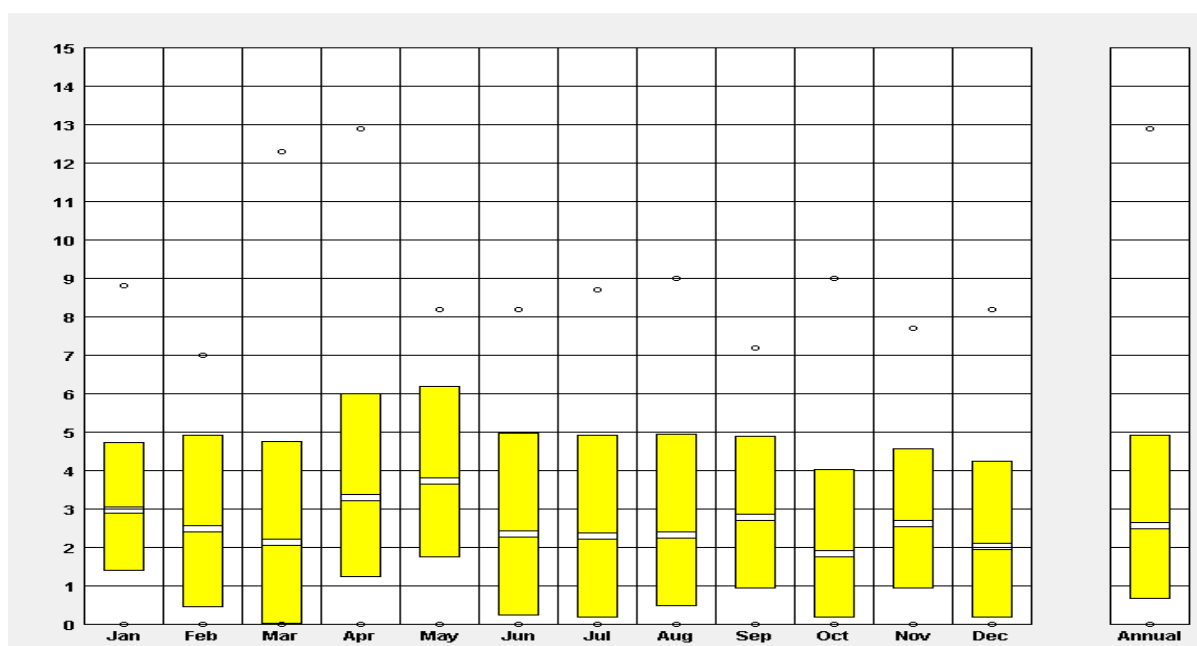
Hình 4. Biểu đồ hoa gió tại trạm quan trắc.

Hình 4 biểu diễn biểu đồ hoa gió tại trạm quan trắc Bắc Từ Liêm, Hà Nội. Phân tích tần suất và hướng gió từ biểu đồ hoa gió này khẳng định dòng động lượng gió chủ yếu đến từ phía Đông của công trình. Đây là cơ sở khoa học để chọn hướng Đông làm hướng cấp gió thiết kế trong mô hình CFD, đại diện cho kịch bản tải trọng gió lớn nhất.



Hình 5. Biểu đồ phân bố nhiệt độ trung bình các tháng tại Bắc Từ Liêm, Hà Nội.

Dữ liệu phổ nhiệt độ, thể hiện trên Hình 5, xác nhận khí hậu mùa hè là khắc nghiệt nhất. Thiết lập biên ban đầu được cố định với nhiệt độ không khí bên ngoài (T_{out}) là 34°C , và nhiệt độ không gian cần duy trì bên trong (T_{in}) là 26°C . Độ chênh 8°C này tạo ra gradient nhiệt rất lớn, sinh ra lực nổi (buoyancy force) thúc đẩy trao đổi khối lượng mạnh mẽ tại cửa mở.



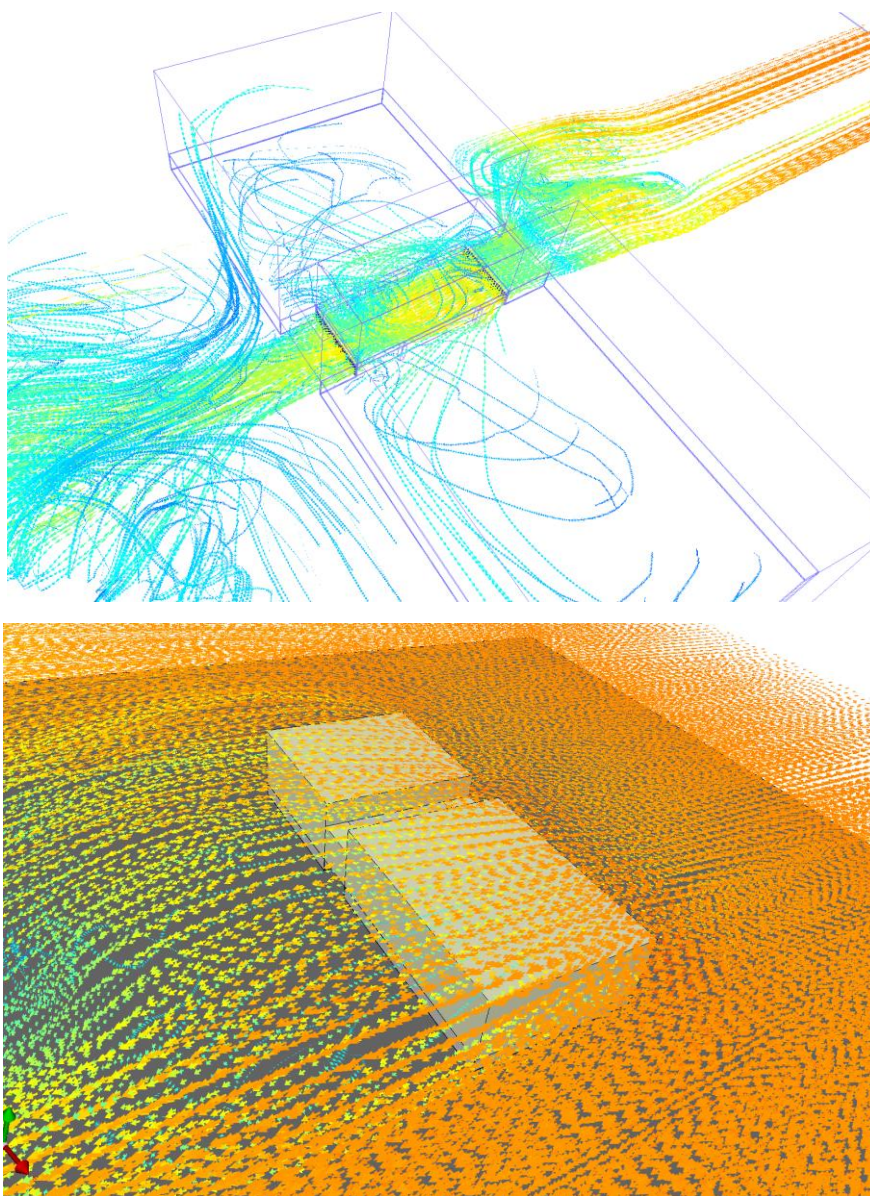
Hình 6. Biểu đồ phân bố vận tốc gió tại Bắc Từ Liêm, Hà Nội.

Theo dữ liệu gió thể hiện trên Hình 6, vận tốc cực đại tập trung vào tháng 4 và 5. Vận tốc gió trung bình được xác định là $3,6 \text{ m/s}$ (gió cấp 3), đại diện cho điều kiện vận hành phổ biến. Các cơn gió giật trung bình cao đạt $6,2 \text{ m/s}$ (cấp 4) được dùng làm kịch bản kiểm thử độ giới hạn chịu tải của thiết bị màng chắn.

Bên cạnh đó, kịch bản gió cực đoan với vận tốc 8,5 m/s cũng được đưa vào mô phỏng để đánh giá giới hạn hoạt động tối đa của hệ thống. Đồng thời, biến số về cao độ lắp đặt quạt (3m và 4m so với mặt sàn) được khảo sát nhằm đánh giá ảnh hưởng của khoảng cách xả đến động lượng luồng khí, từ đó tối ưu hóa hiệu quả cản khí.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

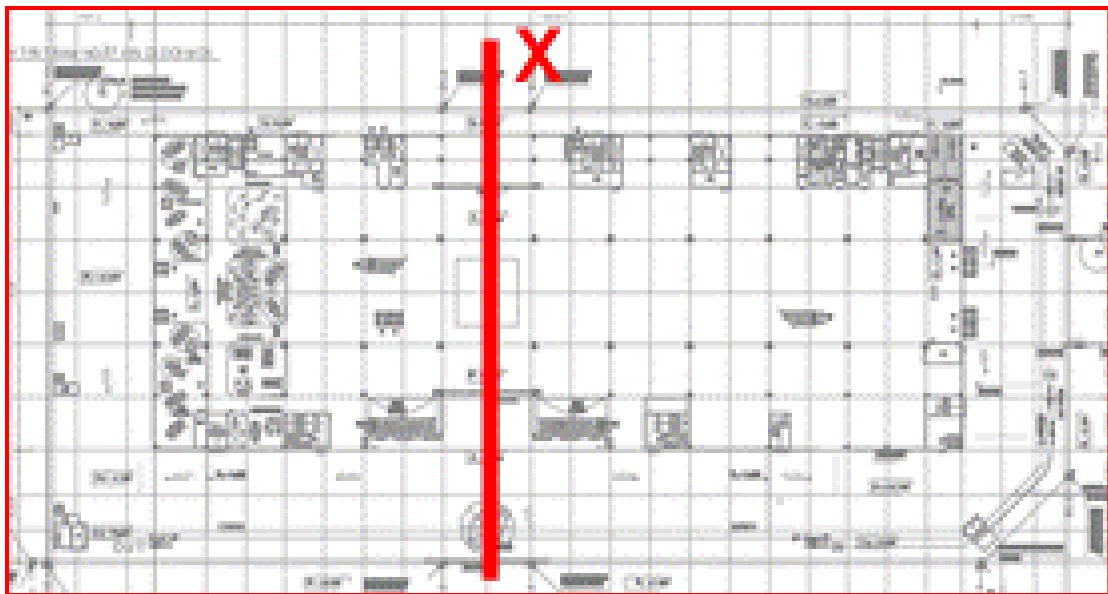
3.1. Phân tích khí động học vĩ mô tác động lên công trình [6]



Hình 7. Mô phỏng khí động vĩ mô khi gió hướng Đông tương tác với bề mặt công trình.

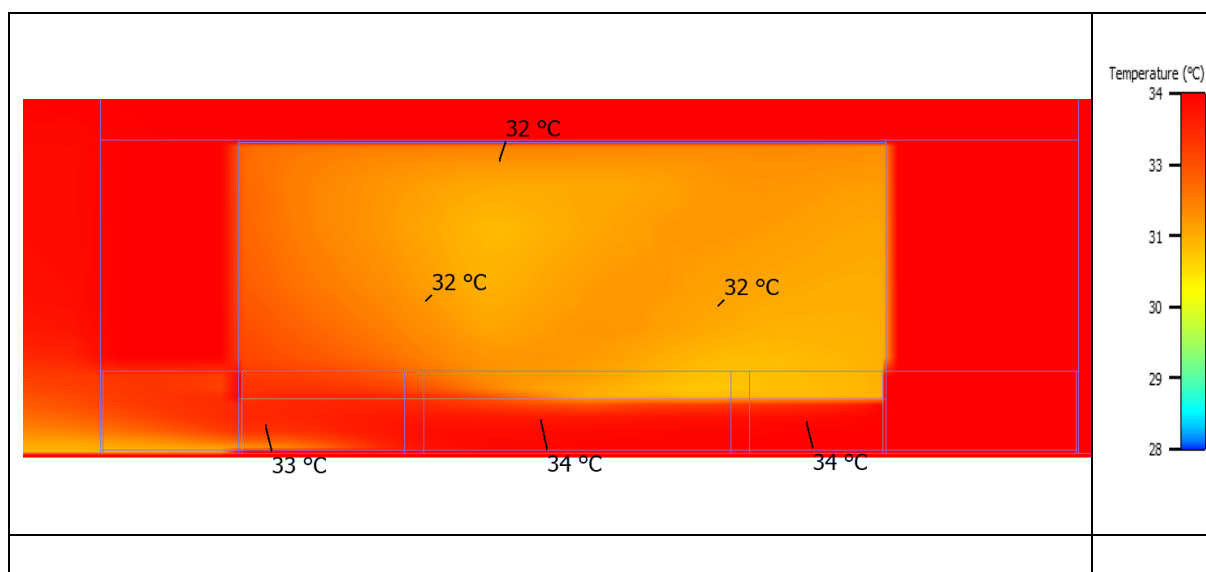
Khảo sát quỹ đạo 3D bằng các đường dòng như thể hiện trên Hình 7 chứng minh khối không khí bị rẽ nhánh khi đập vào mặt đứng, tạo ra các vùng gia tốc cực đại tại hành lang mở giữa các khối nhà (hiệu ứng Venturi). Các véc-tơ động lượng hội tụ và đâm thẳng vào bên trong, cho thấy kết cấu mặt tiền trống đang phải gánh chịu toàn bộ áp lực động học từ khí quyển, bắt buộc phải có thiết bị kiểm soát lưu chất.

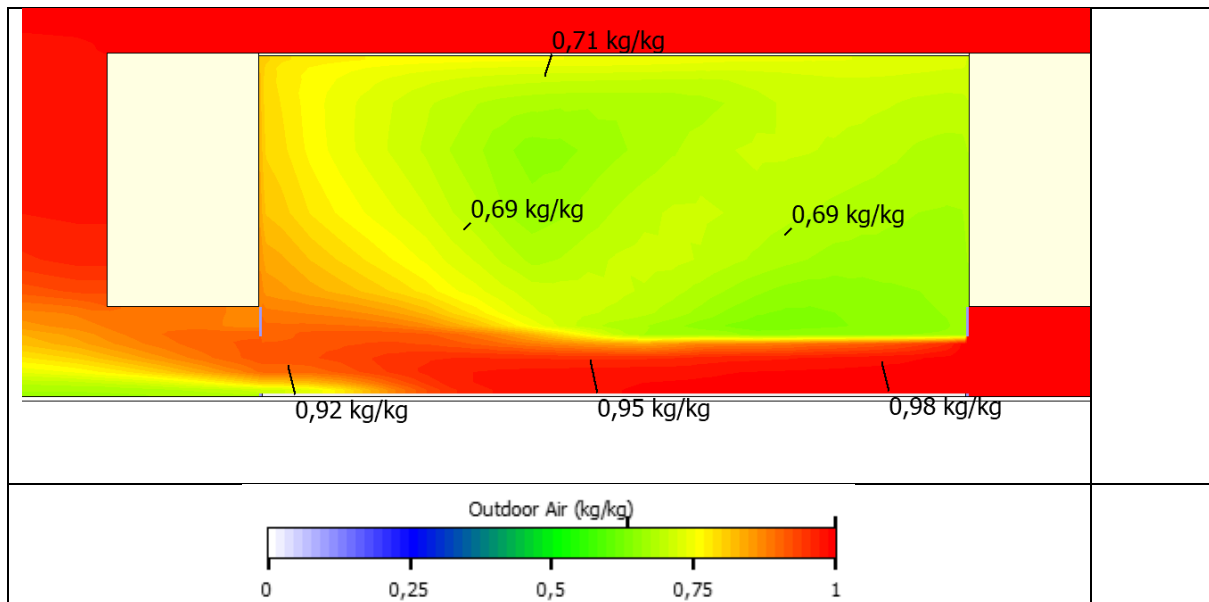
3.2. Hiệu suất nhiệt động học trong điều kiện không có màng chắn (Baseline)



Hình 8. Định vị vị trí mặt phẳng nội suy (Mặt cắt X).

Như thể hiện trên Hình 8, mặt cắt X được trích xuất trực diện qua tâm khu vực thông tầng và hành lang kinh doanh, đại diện cho mặt phẳng chịu tổn thương nhiệt năng cao nhất của công trình.

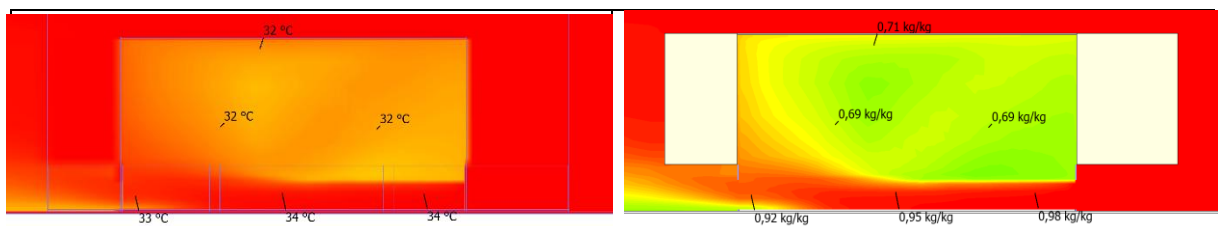




Hình 9. Trường nhiệt độ tại mặt cắt X khi không dùng màn chắn (gió 3,6 m/s).

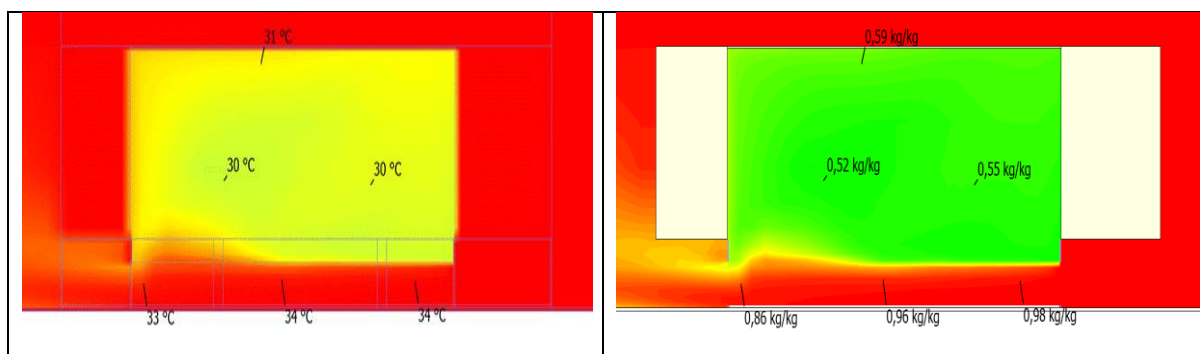
Như thể hiện trên Hình 9, kết quả trường nhiệt độ (temperature contours) trong trường hợp không có màn chắn phản ánh sự tổn thất năng lượng nghiêm trọng ở tốc độ gió 3,6 m/s. Toàn bộ khu vực sảnh thông tầng bị luồng nhiệt 34°C xuyên qua, đẩy nền nhiệt nội bộ tăng lên 32°C. Vùng tiền sảnh tiếp giáp hoàn toàn đồng hóa với nhiệt độ ngoài trời (33°C - 34°C), chứng tỏ môi trường điều hòa tại đây hoàn toàn không có tác dụng.

Đồng bộ với kết quả nhiệt độ, phân bố nồng độ khối (mass fraction), thể hiện trên Hình 10, chỉ ra luồng khí ngoài trời lần át lối thông tầng ở mức 0,71 kg/kg (71%). Ở khu vực tiền sảnh, nồng độ khí ngoại xâm đạt 0,92 - 0,98 kg/kg (92-98%). Điều này cho thấy hệ thống làm lạnh nội bộ đang phải làm việc với 100% là nguồn khí tươi chưa qua xử lý, gây lãng phí công suất hệ thống điều hòa không khí vô cùng lớn.

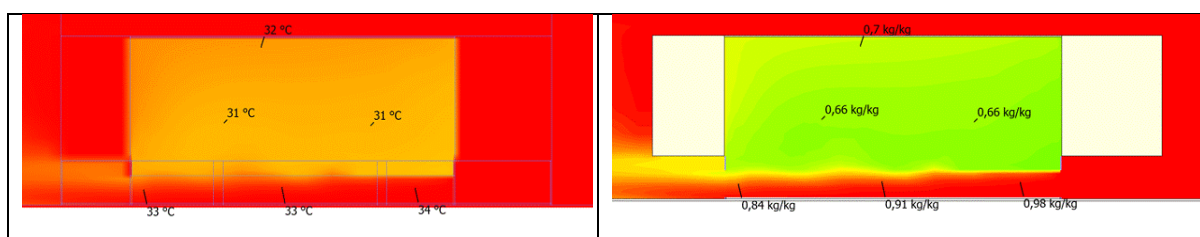


Hình 10. Trường nồng độ khối (mass fraction) khi không dùng màn chắn (gió 3,6 m/s).

Khi vận tốc gió ngoài trời tăng lên 6,2 m/s, kết quả mô phỏng trên Hình 11 cho thấy nhiệt độ khu vực thông tầng bị đẩy lên 31°C, với lượng không khí ngoại vi xâm nhập đạt 59%. Đặc biệt, ở điều kiện gió giật mạnh 8,5 m/s (hình 12), tình trạng suy giảm vi khí hậu trở nên nghiêm trọng hơn: tại cao độ 2m tính từ mặt sàn, nhiệt độ phòng đạt 29°C - 30°C với lượng lọt khí từ 30% đến 56%. Riêng khu vực sảnh hành lang chính, nhiệt độ chạm mức nhiệt độ ngoài trời (34°C) và tỷ lệ không khí bên ngoài tràn vào xấp xỉ 99%.

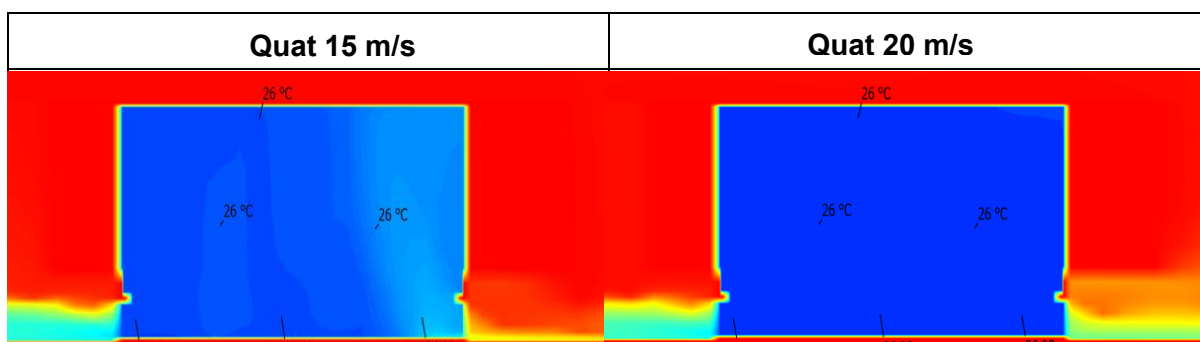


Hình 11. Trường nhiệt độ và nồng độ khối khí không dùng màn chắn dưới điều kiện gió 6,2 m/s



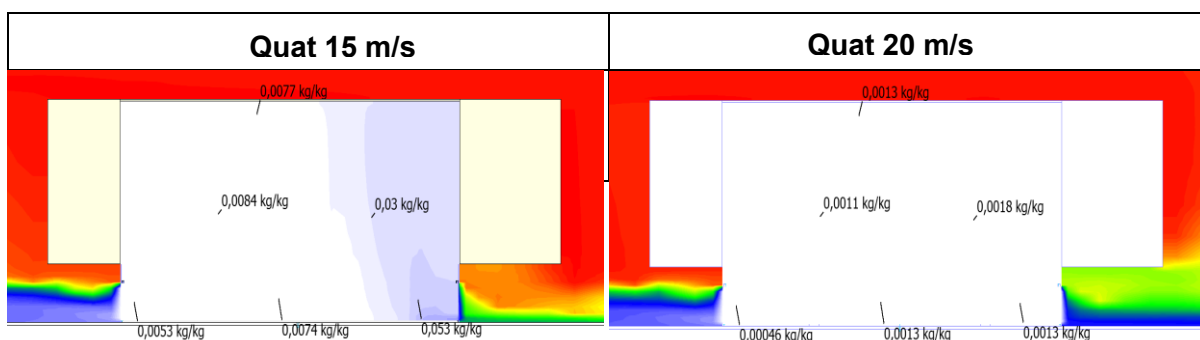
Hình 12. Trường nhiệt độ và nồng độ khối khí không dùng màn chắn dưới điều kiện gió cực đoan 8,5 m/s

3.3. Đánh giá tính tối ưu của màng chắn tại vận tốc gió môi trường trung bình (3,6 m/s) [7]



Hình 13. Đối chiếu trường nhiệt độ giữa các cấu hình vận tốc màng chắn (gió 3,6 m/s).

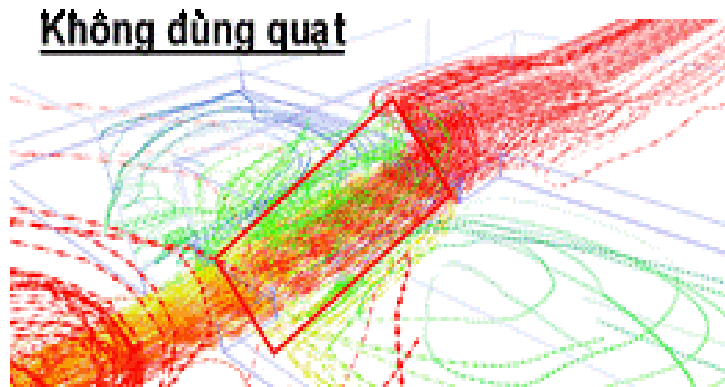
Hình 13 minh chứng động lượng từ quạt 15 m/s đủ sức đẩy lùi phần lớn khối khí nóng, đưa lõi không gian về lại mức 26°C. Mặc dù vậy, sự suy yếu của chùm tia phản lực tại lớp biên sát sàn nhà vẫn gây ra hiện tượng rò rỉ nhiệt cục bộ. Ngược lại, khi vận tốc xả đạt 20 m/s, màng khí tạo ra một ranh giới thẳng đứng tuyệt đối, triệt tiêu 100% dòng nhiệt đối lưu, cô lập hoàn toàn môi trường 34°C bên ngoài.



Hình 14. Đối chiếu trường nồng độ khối giữa các cấu hình vận tốc màng chắn (gió 3,6 m/s)

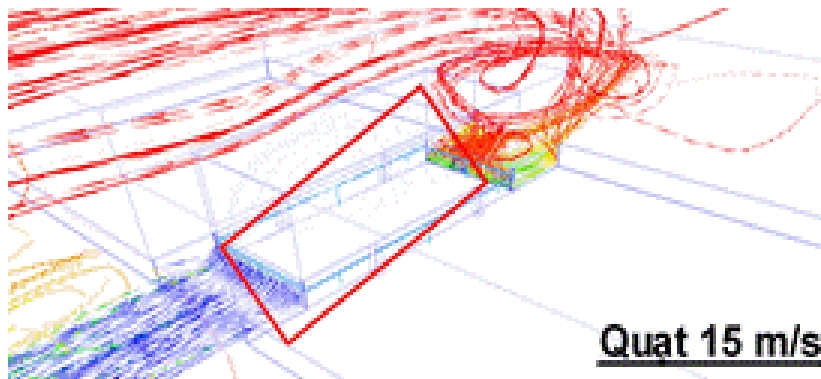
Phân tích truyền khối trên Hình 14 xác nhận tính ưu việt của cấu hình 20 m/s. Trong khi màng 15 m/s vẫn để lọt khí tại chân đế do suy giảm động năng, cấu hình 20 m/s duy trì véc-tơ hướng xuống đủ mạnh để thắng hoàn toàn áp suất động của dòng ngang 3,6 m/s, giữ nồng độ không khí ngoại vi lọt vào nhà ở mức 0%.

3.4. Đánh giá độ giới hạn chịu tải tại kịch bản gió giật cực đoan (6,2 m/s)



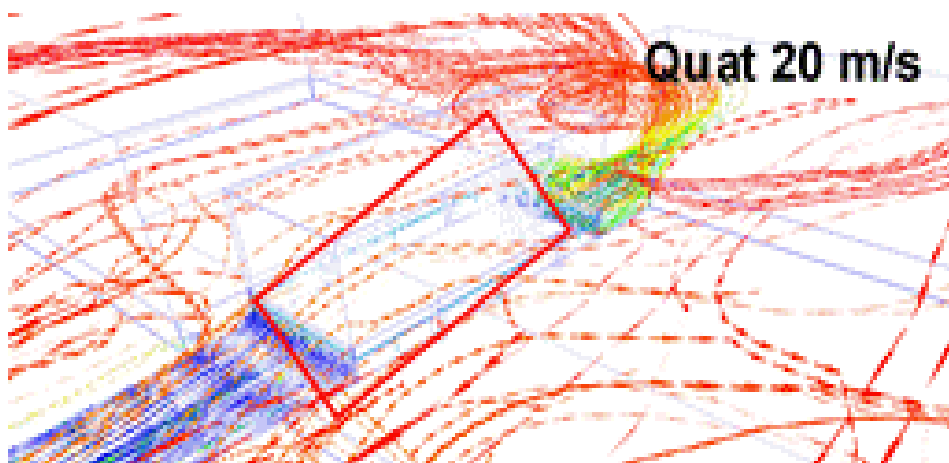
Hình 15. Phân bố đường dòng khí gió 6,2 m/s đâm xuyên công trình (Không màn chắn)

Như thể hiện trên Hình 15, dưới áp lực gió cấp 4 (6,2 m/s), mô hình véc-tơ cho thấy sự xé toạc ranh giới không gian. Dòng năng lượng cao xuyên thẳng qua hành lang tòa nhà với tốc độ lớn, mang theo tải cảm nhiệt và ẩn nhiệt không thể kiểm soát.



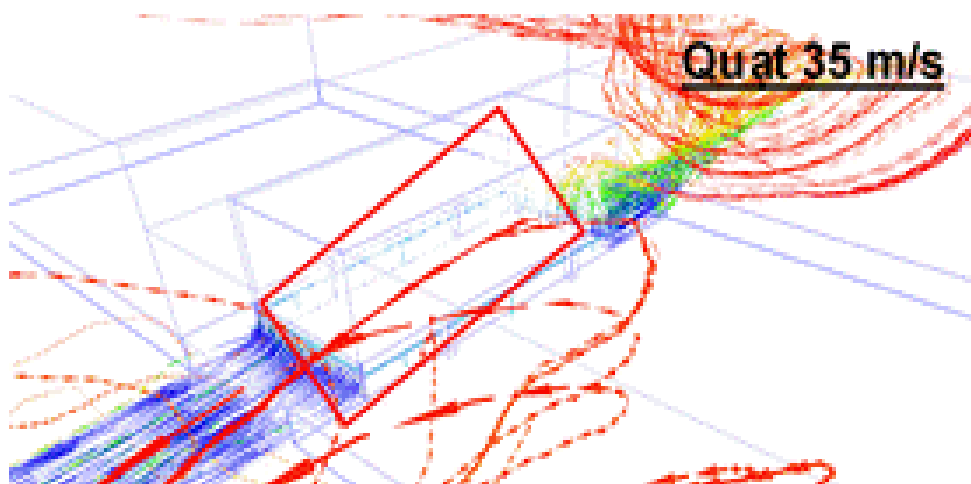
Hình 16. Sự phá hủy màng khí 15 m/s dưới tác động gió 6,2 m/s

Như thể hiện rõ trên Hình 16, áp suất động ngoại vi 6,2 m/s vượt ngưỡng cản của dòng xả 15 m/s. Hệ quả là chùm tia phản lực bị bẻ cong nghiêm trọng (deflection) hướng vào trong nhà và vỡ vụn, hệ thống mất hoàn toàn chức năng phân lập.



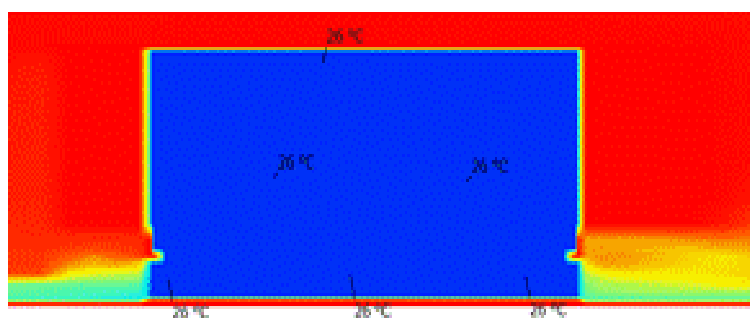
Hình 17. Biểu đồ khí động học của màng 20 m/s dưới tác động gió 6,2 m/s

Với cấu hình 20 m/s (Hình 17), màng khí tạo được lực chống trả nhưng vẫn chịu độ võng (inward deflection) rõ rệt. Dòng chảy ngang bị phản xạ bốc lên cao hoặc dạt sang bên, tuy nhiên lực cản tại khu vực chân sảnh đã bị xuyên thủng cục bộ.



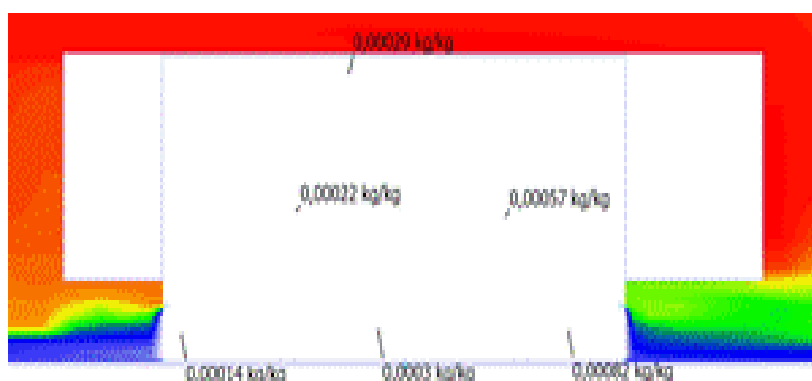
Hình 18. Phản xạ khí động học tuyệt đối với màng khí 35 m/s dưới tác động gió 6,2 m/s

Như ta thấy trên Hình 18, chỉ khi gia tốc xả được đẩy lên cực đại 35 m/s, động lượng khổng lồ mới tái lập được vách ngăn phẳng tĩnh, phản xạ ngược lại 100% các dòng gió tấn công từ bên ngoài, bảo vệ tuyệt đối lõi không gian.



Hình 19. Đối chiếu phổ nhiệt độ dưới áp lực gió giật 6,2 m/s.

Đánh giá sâu cấu hình 20 m/s, biểu đồ nhiệt độ trên Hình 19 chứng minh dù màng gió bị uốn cong, phổ nhiệt độ bên trong hầu như không biến động, hệ thống điều hòa vẫn hoạt động an toàn. Cấu hình 35 m/s đã thiết lập sự phân tách nhiệt tuyệt đối, giữ phòng ở mức chuẩn 26°C.

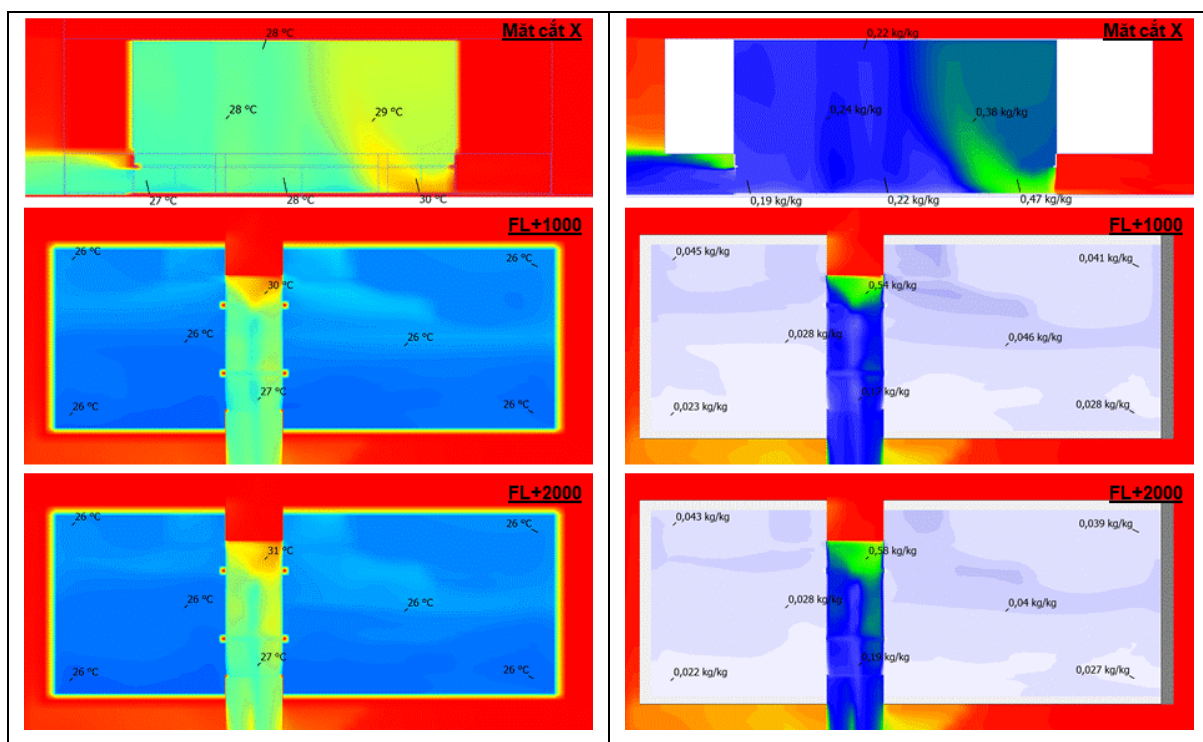


Hình 20. Đối chiếu trường nồng độ khối dưới áp lực gió giật 6,2 m/s.

Phân tích định lượng nồng độ khối trên Hình 20 khẳng định, màng 20 m/s chỉ để rò rỉ một lượng vi mô (dưới 2%) thể tích không khí ngay sát mép sàn hành lang. Trong khi đó, màng 35 m/s cản phá 100% dòng xâm nhập.

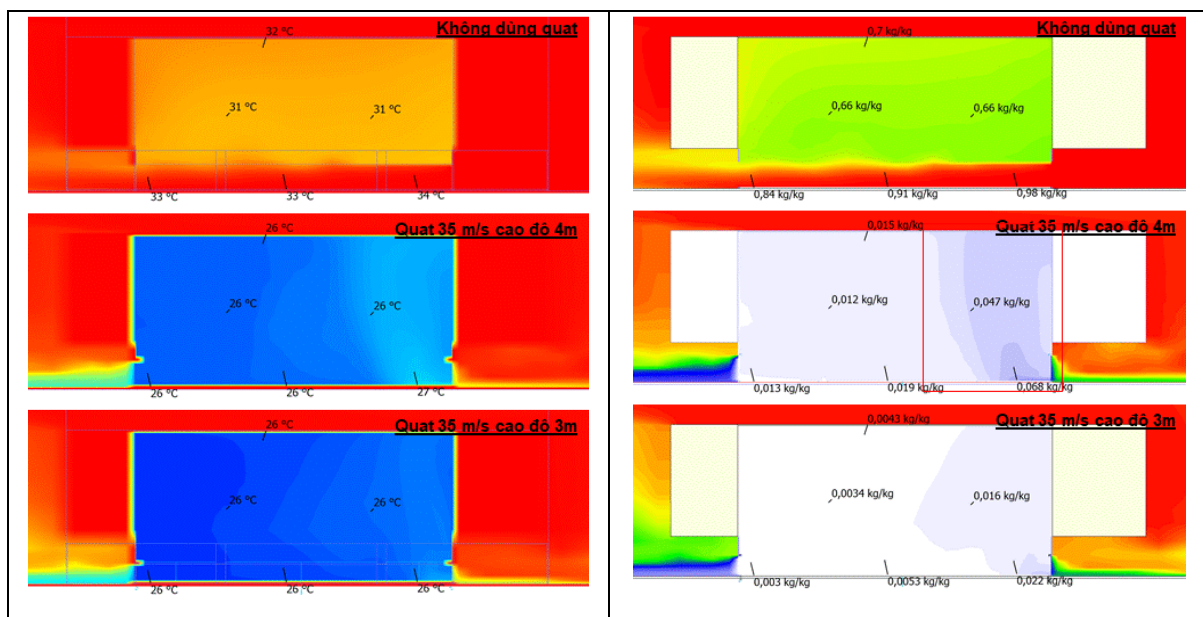
3.5. Đánh giá giới hạn chịu tải tại kịch bản gió cực đoan (8,5 m/s) và ảnh hưởng của cao độ lắp đặt

Dưới áp lực của vận tốc gió ngoài trời cực đoan 8,5 m/s, cấu hình quạt xả 20 m/s hoàn toàn mất khả năng phân lập dòng khí. Khảo sát trên mặt cắt ngang (Hình 21) cho thấy nhiệt độ khu vực hành lang chung tăng lên 31°C và lượng không khí ngoại vi tràn vào vị trí cao nhất lên tới 58%. Mức cản 20 m/s không đáp ứng được yêu cầu kỹ thuật trong điều kiện này.



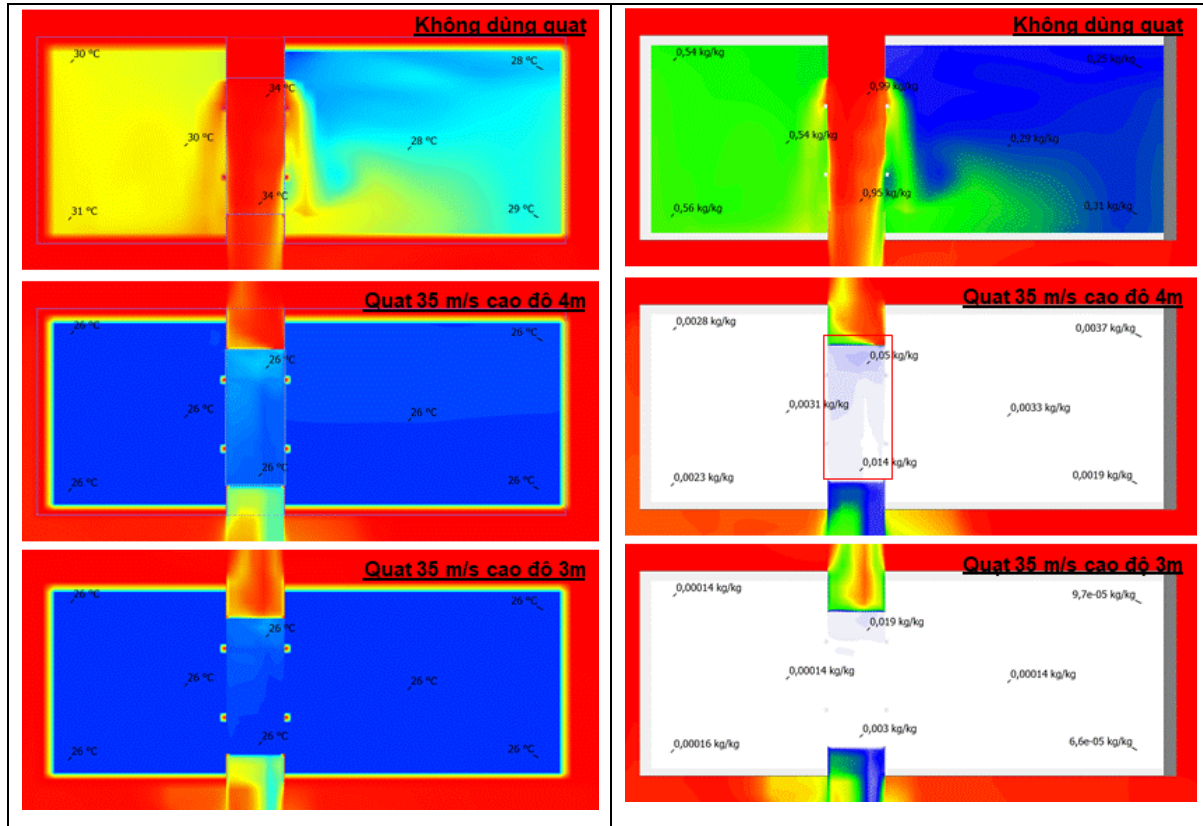
Hình 21. Sự phá vỡ ranh giới của màng khí 20 m/s dưới áp lực gió cực đoạn 8,5 m/s

Khi nâng cấp gia tốc xả lên 35 m/s, hệ thống lấy lại hiệu quả cản khí, tuy nhiên hiệu suất thực tế phụ thuộc tuyến tính vào cao độ lắp đặt thiết bị. Tại cùng điều kiện gió 8,5 m/s và thiết lập vận tốc màng 35 m/s, mô phỏng mặt cắt đứng khu vực hành lang cho thấy: nếu thiết bị treo ở độ cao 4m, lượng không khí thâm nhập cao nhất ghi nhận được ở mức 5% - 6%. Ngược lại, khi hạ thấp cao độ lắp đặt xuống 3m, động lượng dòng xả được bảo toàn tốt hơn khi chạm sàn, giúp giảm mạnh tỷ lệ lọt khí xuống chỉ còn 1% - 2% (Hình 22).



Hình 22. Phân tích mặt cắt X đánh giá hiệu quả cản khí của màng 35 m/s tại các cao độ lắp đặt 4m và 3m (gió 8,5 m/s).

Ở cả hai cấu hình cao độ của màng 35 m/s, tổn thất nhiệt đều được kiểm soát ở mức không đáng kể (hình 23).



Hình 23. Trường phân bố nhiệt độ và nồng độ tại mặt bằng cao độ FL+2000 để đánh giá màng 35 m/s theo chiều cao lắp đặt (gió 8,5 m/s).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu ứng dụng phương pháp giải tích số học CFD đã định lượng tính tất yếu của hệ thống màng chắn gió đối với bài toán năng lượng tại các công trình thương mại mở như Thiso Mall Tây Hồ Tây. Thiếu vắng thiết bị này, tòa nhà sẽ hứng chịu tổn thất nhiệt 34°C và tỷ lệ thay thế không khí nội bộ lên tới 98%.

Kết quả phân tích mô hình xác định ngưỡng động lượng tối ưu: tại điều kiện gió vi khí hậu phổ biến 3,6 m/s, vận tốc xả 20 m/s cung cấp rào cản khí động học hoàn hảo, triệt tiêu 100% lưu lượng ngoại vi. Khi đối mặt với kịch bản gió giật 6,2 m/s, màng khí 20 m/s tuy bị vòng nhưng vẫn đảm bảo cách ly trên 98% tạp khí, bảo toàn sự ổn định của trường nhiệt độ tổng thể. Việc nâng cấp cấu hình xả lên 35 m/s là giải pháp dự phòng chuyên biệt, chỉ dành cho các tình huống đòi hỏi phân lập không gian tuyệt đối.

Phân tích dữ liệu thời tiết cho thấy, tổng thời gian xuất hiện các đợt gió giật từ 8,5 m/s trở lên chỉ rơi vào khoảng 5 ngày trong năm và phân bố rải rác. Vì vậy, kịch bản gió cực đoan này rất hiếm khi xảy ra và tác động của sự lọt khí (nếu có) hầu như không ảnh hưởng đến tổng thể tải lạnh của công trình. Dưới góc độ cân bằng bài toán kinh tế - kỹ thuật, việc duy trì cấu hình thiết kế vận tốc quạt 20 m/s ở cao độ 4m là giải pháp tối ưu nhất, vừa đảm bảo môi trường vi khí hậu trong đa số thời gian, vừa tiết kiệm điện năng tiêu thụ. Việc áp dụng hệ thống quạt công suất lớn (35 m/s) hoặc hạ trần kiến trúc để lắp đặt ở cao độ 3m chỉ nên được xem xét trong các điều kiện dự án yêu cầu cách ly môi trường tuyệt đối hoặc khu vực thường xuyên chịu tác động của bão.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm nghiên cứu xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới PGS. TS Nguyễn Thế Bảo, bộ môn Công Nghệ Nhiệt Lạnh, khoa Cơ Khí, trường Đại học Bách Khoa – Đại học Quốc Gia Hồ Chí Minh – cố vấn khoa học của bài viết, Công ty TNHH DR Fan Việt Nam (đội ngũ kinh doanh phía Nam) đã cung cấp hệ thống thông số đặc tính thiết bị; Công ty TNHH Thiết kế Kiến trúc Thadico đã chia sẻ bản vẽ kiến trúc dự án Thiso Mall Tây Hồ Tây; và Công ty Tư vấn Thiết kế Sao đã hỗ trợ nguồn lực tính toán cho mô hình mô phỏng CFD.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Wang, L., et al. (2022). Performance analysis of air curtains on indoor environment and energy consumption. *Journal of Building Performance Simulation*, 15(4), 1-15.
- [2] Carlos, J., et al. (2021). Efficiency of a heated air curtain under cross-jet temperature gradients. *Proceedings of Building Simulation 2021*, IBPSA, 511-517.
- [3] Zhao, Y., et al. (2023). Differentiated Control of Large Spatial Environments: Air Curtain Grid System. *Sustainability (MDPI)*, 15(6), 5489.
- [4] Chen, Z., et al. (2024). Angle Control Algorithm for Air Curtain Based on GA Optimized Quadratic BP Neural Network. *Buildings (MDPI)*, 14(10), 3144.
- [5] Thông tin dự án của công ty TNHH thiết kế kiến trúc Thadico
- [6] Kết quả chạy mô phỏng năng lượng của công ty tư vấn thiết kế sao
- [7] Tài liệu kỹ thuật của thương hiệu thông gió DR Fan Hàn Quốc