

PHƯƠNG PHÁP CHIA LƯỚI CẤU TRÚC DỰA TRÊN PHÂN VÙNG ĐA KHỐI ĐỂ MÔ PHỎNG 3D DÒNG PHUN LÀM MÁT PIN XE ĐIỆN

Nguyễn Anh Tuấn^{1*}, Nguyễn Văn Kỵ¹

Tóm tắt: Các phương pháp chia lưới truyền thống thường gặp khó khăn trong việc duy trì tính liên tục và đảm bảo chất lượng lưới khi làm việc với các trường dòng chảy phức tạp, hoặc có hình học phức tạp. Việc này dẫn đến giảm độ chính xác tính toán đồng thời làm tăng chi phí tính toán. Phương pháp chia lưới cấu trúc dựa trên phân vùng đa khối là một hướng tiếp cận mới để tăng hiệu quả tính toán khi giải quyết các bài toán mô phỏng số động lực học chất lỏng cho các cấu hình dòng chảy phức tạp. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp chia lưới cấu trúc dựa trên phân vùng đa khối để mô phỏng 3D dòng phun vuông góc với mặt phẳng để làm mát pin xe điện. Kết quả cũng được so sánh với so sánh với các phương pháp chia lưới truyền thống.

Từ khoá: CFD, chia lưới cấu trúc, phân vùng đa khối, truyền nhiệt.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các mô phỏng số CFD hiện nay, thời gian dành cho việc tạo lưới thường chiếm khoảng 60% tổng thời gian của toàn bộ chu trình tính toán (Zhang, 2017). Hơn nữa, chất lượng của lưới ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của kết quả, đặc biệt là khi xét đến các định dạng yêu cầu độ chính xác và độ phân giải cao. Trong các bài toán dòng chảy hai pha như sóng và tia nước, cần phải sử dụng lưới có mật độ đủ cao và càng vuông góc càng tốt tại các bề mặt hoặc giao diện tự do. Một ví dụ khác là quá trình cập nhật lưới động trong chuyển động sáu bậc tự do, cũng đòi hỏi lưới có chất lượng cao (Cai et al., 2017; Zhan et al., 2017). So với lưới không có cấu trúc, lưới có cấu trúc có cấu trúc lưu trữ dữ liệu đơn giản hơn và số lượng ô lưới giảm đáng kể. Do đó, ngày càng nhiều nhà nghiên cứu ưa chuộng sử dụng lưới có cấu trúc, đặc biệt là các loại lưới có cấu trúc gắn khối, lưới có cấu trúc ghép khối và lưới có cấu trúc chồng lấp (Romero Gomez & Richmond, 2016). Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đề xuất phương pháp tạo lưới có cấu trúc với sự can thiệp của người dùng, ứng dụng trong trường hợp mô phỏng số dòng phun làm mát các thiết bị sinh nhiệt, nhằm cải thiện chất lượng lưới, độ chính xác và thời gian tính toán.

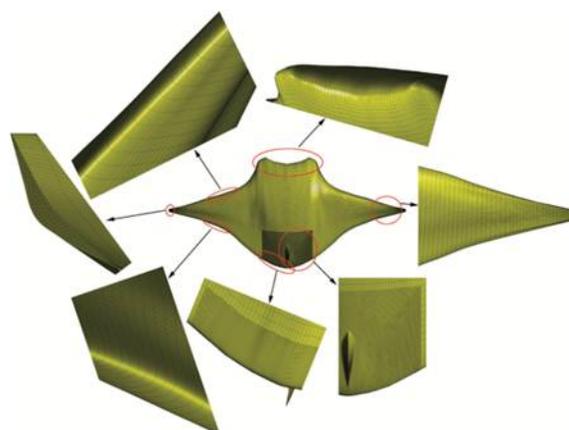
2. CÔNG CỤ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp chia lưới cấu trúc trong các bài toán dòng chảy phức tạp dựa trên phân vùng đa khối

Trong mô phỏng động lực học chất lưu, việc lựa chọn và chia lưới đóng vai trò quyết định đến cả hiệu quả tính toán lẫn độ chính xác kết quả của bài toán mô phỏng. Lưới cấu trúc được sử dụng nhờ tính ổn định số học cao, khả năng giảm thiểu sai số rời rạc và yêu cầu bộ nhớ thấp. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của lưới cấu trúc là khó áp dụng cho hình học phức tạp do ràng buộc về sự sắp xếp tuần tự và quy luật hóa phân tử. Để

khắc phục hạn chế này, kỹ thuật phân vùng đa khối được áp dụng. Phương pháp này cho phép miền tính toán phức tạp được chia tách thành nhiều khối con có hình dạng đơn giản hơn, từ đó dễ dàng xây dựng lưới cấu trúc cục bộ trong từng khối. Cách tiếp cận này vừa duy trì được các ưu điểm truyền thống của lưới cấu trúc (tính ổn định, tiêu tốn RAM thấp), vừa mở rộng khả năng ứng dụng cho hình học cong, gấp khúc hoặc nhiều chi tiết phức tạp. Sự kết hợp này đem lại nhiều ưu điểm như:

- Tính chính xác và hiệu quả tính toán: Lưới cấu trúc duy trì chất lượng cao trong từng khối (block), giúp giảm sai số và tăng tốc độ hội tụ.
- Khả năng thích nghi với hình học phức tạp: Phân vùng đa khối tạo điều kiện cho việc điều chỉnh độ mịn lưới theo từng vùng, cải thiện khả năng bắt được các hiện tượng dòng chảy cục bộ như dòng lớp biên mỏng, dòng xoáy hay dòng tách lớp.
- Tối ưu tài nguyên: So với việc dùng lưới phi cấu trúc trên toàn miền, phương pháp này tiết kiệm đáng kể bộ nhớ và thời gian tính toán, đồng thời vẫn bảo toàn được khả năng mô tả hình học phức tạp.



Hình 1. Mô hình cá đuối khi sử dụng chia lưới cấu trúc và phân vùng đa khối

¹Khoa Cơ khí, Trường Đại học Thủy lợi

* Tác giả liên hệ

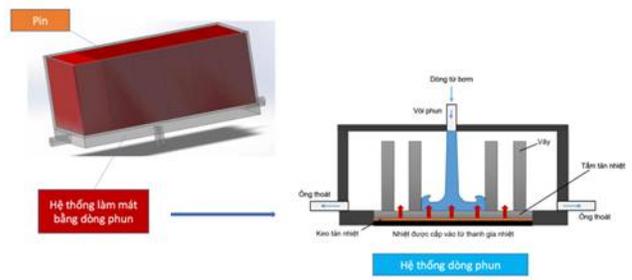
Như vậy, sự kết hợp giữa lưới cấu trúc và kỹ thuật phân vùng đa khối không chỉ là một giải pháp dung hòa giữa tính chính xác và tính linh hoạt, mà còn hướng tới việc tối ưu hóa tài nguyên tính toán – yếu tố đặc biệt quan trọng trong các mô phỏng CFD quy mô lớn, điển hình như nghiên cứu của tác giả (Wen-Hao Cai, 2021) đã mô phỏng chuyển động của cá đuối như trên hình 1. Do chiều rộng cơ thể cá đuối lớn hơn nhiều so với chiều dài của nó, và chuyển động lướt chủ yếu diễn ra trong mặt phẳng XZ nên nếu chia lưới thông thường thì sẽ không tập trung vào các chuyển động chính mà chia đều trên các vùng. Nó ảnh hưởng đến độ chính xác và tăng số lượng các phần tử tính toán trên những vùng không cần thiết. Do đó cần thay thế bằng kỹ thuật phân vùng đa khối. Để làm rõ hơn tính ưu việt trên, nhóm tác giả đề xuất phương pháp tạo lưới có cấu trúc với sự can thiệp của người dùng, ứng dụng trong trường hợp mô phỏng số dòng phun làm mát các thiết bị sinh nhiệt như pin trên xe ô tô điện, nhằm cải thiện chất lượng lưới và độ chính xác tính toán.

2.2. Trường hợp nghiên cứu

Trong hệ thống làm mát pin của xe ô tô điện, việc duy trì nhiệt độ ổn định và kiểm soát hiệu quả quá trình tản nhiệt đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo hiệu suất vận hành, độ bền và độ an toàn của bộ nguồn. Trong số các phương pháp làm mát đã được đề xuất, kỹ thuật dòng phun từ trên xuống nổi bật nhờ khả năng tạo ra dòng chảy trực tiếp tác động lên bề mặt làm mát, từ đó nâng cao hệ số truyền nhiệt cục bộ và làm giảm đáng kể nhiệt độ tại các vùng sinh nhiệt tập trung. Mục tiêu của nghiên cứu này là mô phỏng số quá trình dòng chảy và truyền nhiệt trong hệ thống làm mát bằng dòng phun từ trên xuống, trong đó dòng phun tác động trực tiếp vào các vây trụ gắn trên tấm tản nhiệt. Nghiên cứu đặc biệt tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của kỹ thuật chia lưới cấu trúc dựa trên phân vùng đa khối so với các loại lưới phi cấu trúc thường dùng. Thông qua đó, nghiên cứu nhằm làm rõ sự khác biệt về hiệu quả tính toán, độ chính xác của kết quả mô phỏng và mức độ phù hợp của từng phương pháp chia lưới trong việc tái hiện đặc trưng dòng chảy phức tạp và quá trình truyền nhiệt của hệ thống.

2.2.1. Xây dựng mô hình bài toán

Hệ thống làm mát pin được thiết kế dựa trên nguyên lý truyền nhiệt từ đáy tấm làm mát lên bề mặt và các vây tản nhiệt, nơi nhiệt lượng được loại bỏ nhờ dòng chất lỏng làm mát. Cụ thể, chất lỏng được bơm qua vòi phun tại lối vào (inlet), phun trực tiếp đến bề mặt tấm tản nhiệt. Khi va chạm với bề mặt, dòng chất lỏng hình thành các dòng chảy phụ và tiếp tục di chuyển qua các kênh vi mô giữa các vây, từ đó làm mát đồng thời cả vây và bề mặt tản nhiệt, trước khi thoát ra ngoài qua hai cửa ra với kích thước của bộ tản nhiệt được mô tả như trên hình 2, chất làm mát dùng trong hệ thống là dung dịch nước với các thông số như trong bảng 1.



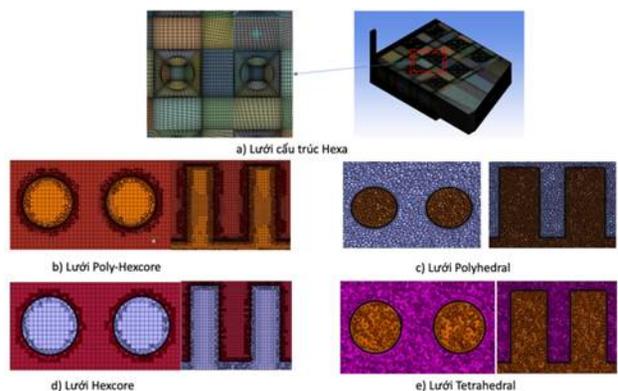
Hình 2. Mô hình hệ thống làm mát sử dụng dòng phun

Bảng 1. Thông số của chất làm mát

Thông số	Giá trị
Nhiệt độ	293,15°K
Khối lượng riêng (ρ)	998,2 kg/m ³
Nhiệt dung riêng (C_p)	4182 J/(kg.°K)
Hệ số dẫn nhiệt (k)	0,6 W/(m.°K)
Độ nhớt (η)	0,001003 (Pa.s)

2.2.2. Thiết lập điều kiện biên và chia lưới cấu trúc

Trong nghiên cứu này, việc chia lưới và mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Ansys Fluent. Tuy nhiên, do đặc tính đối xứng trục thường gặp trong các cấu hình dòng phun, việc mô phỏng toàn bộ miền tính toán ba chiều (3D) sẽ dẫn đến tiêu tốn đáng kể tài nguyên tính toán. Để nâng cao hiệu quả mô phỏng mà vẫn duy trì độ chính xác, nghiên cứu đã khai thác tính đối xứng hình học của bài toán bằng cách áp dụng mô hình 3D một phần tư ($1/4$) đối xứng trục. Theo đó, chỉ một phần tư của hình học gốc được giữ lại, nhóm tác giả tiến hành chia lưới cấu trúc với sự can thiệp thủ công đảm bảo lưới được chia mịn tại các vùng quan trọng như bề mặt va chạm và các khe giữa các vây. Ngoài ra, sử dụng công cụ Fluent Meshing trong phần mềm Ansys để chia lưới phi cấu trúc: lưới hexcore, polyhexcore, tetrahedral, polyhedral để so sánh đánh giá chất lượng giữa chia lưới cấu trúc áp dụng phân vùng đa khối và các lưới phi cấu trúc như trên hình 3.



Hình 3. Chia lưới cho mô hình với các loại lưới khác nhau

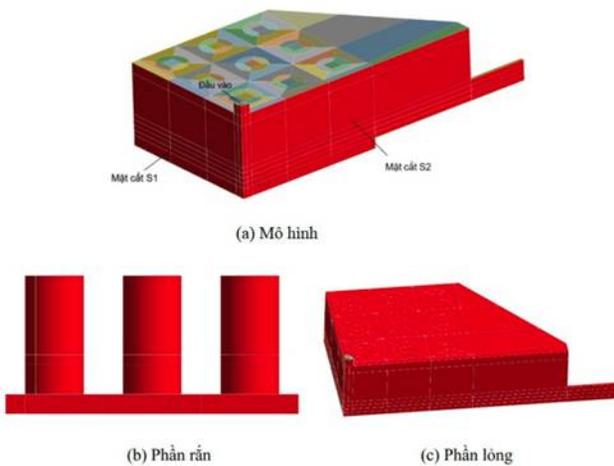
Sử dụng công cụ kiểm tra lưới trên phần mềm ta có bảng thống kê số phần tử của các loại lưới như trên bảng 2, cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các loại lưới

về số phần tử và đặc điểm hình học. Lưới polyhedral có số phần tử ít nhất, chỉ cần 727.025 phần tử, trong khi lưới tetrahedral lên tới 2.030.019 phần tử, tức gấp khoảng 2,5 lần. Lưới poly-hexcore cũng thể hiện ưu điểm khi giảm khoảng 10–20% số phần tử so với lưới hexcore nhờ sử dụng phần tử đa diện ở vùng chuyển tiếp, đồng thời số phần tử lăng trụ trong lớp biên cũng giảm tương ứng. Mặc dù lưới tetrahedral có số phần tử nhiều gấp đôi

lưới hexa khi dùng cùng kích thước chia lưới, điều này không đảm bảo kết quả chính xác hơn. Lưới cấu trúc hexa thường ổn định và tin cậy hơn nhờ phần tử đều đặn và sắp xếp logic, cho phép mô tả gradient nhiệt độ, áp suất và vận tốc chính xác hơn, đặc biệt ở lớp biên. Ngược lại, lưới tetrahedral và các biến thể sử dụng phần tử đa diện có thể gặp hạn chế về độ chính xác tại vùng hình học phức tạp, ngay cả khi tổng số phần tử lớn hơn.

Bảng 2. Tổng số phần tử của các loại lưới

Loại lưới	Hexa	Poly-Hexcore	Polyhedral	Hexcore	Tetrahedral
Số phần tử	1077213	939821	727025	1139403	2030019



Hình 4. Điều kiện biên mô phỏng

Tiếp theo, ta thiết lập các điều kiện biên cho bài toán. Mô phỏng được thực hiện trên miền ba chiều (3D) với giả thiết trạng thái ổn định (steady-state), sử dụng mô hình k - epsilon. Vận tốc dòng chảy mô phỏng là $v = 2$ m/s; Nhiệt độ đầu vào của dòng 293.15°K; Cường độ xoáy 4%; Điều kiện biên cửa ra được thiết lập là áp suất; Các mặt cắt trực S_1 và S_2 được thiết lập với điều kiện biên đối xứng; Bề mặt liên kết giữa chất lỏng và rắn được thiết lập là bề mặt không trượt; Thông lượng nhiệt dưới đáy tấm tản nhiệt được thiết lập là 200 kW/m²; Các bề mặt khác được thiết lập là cách nhiệt như mô tả trên hình 4.

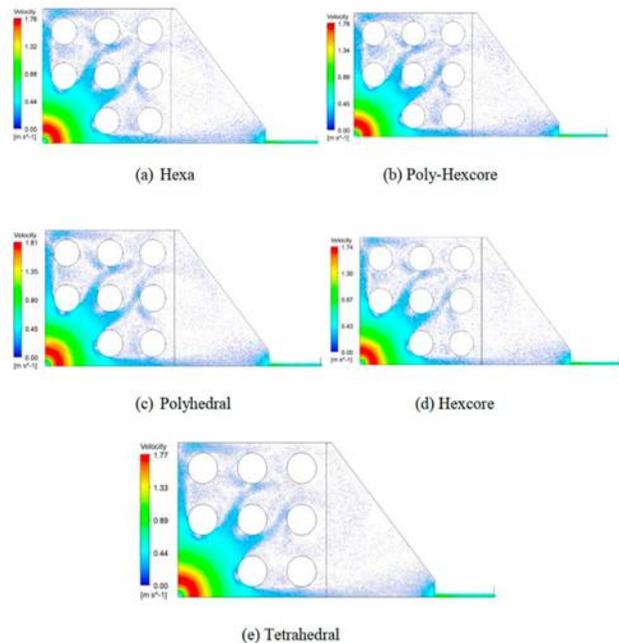
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Tiến hành chạy mô phỏng bài toán ta thu được các kết quả mô phỏng như sau:

- Trường vận tốc:

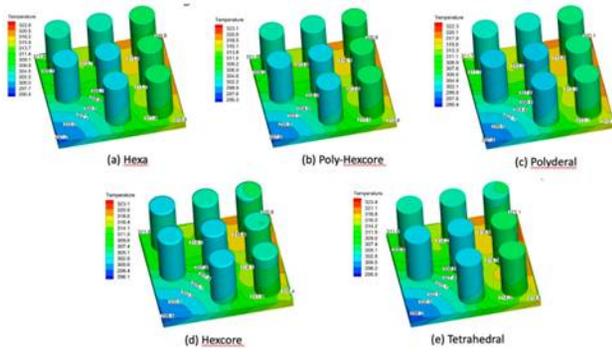
Kết quả phân bố vận tốc và các đường dòng trên bề mặt tản nhiệt, như thể hiện trong hình 5, cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các loại lưới. Đối với lưới tetrahedral, dòng chảy qua các vùng hẹp thể hiện mức độ nhiễu động cao hơn, với gradient vận tốc tại lớp biên không được mô tả rõ nét. Điều này được phản ánh qua sự phân tán màu sắc tại các khu vực có biến thiên vận tốc lớn, cho thấy khả năng bắt gradient của lưới còn hạn chế. Trong khi đó, lưới polyhedral cho

thấy sự cải thiện về tính ổn định của dòng chảy tại các vùng hẹp và phân bố vận tốc hợp lý hơn, mặc dù độ chính xác ở lớp biên vẫn còn hạn chế. Lưới polyhexcore thể hiện khả năng mô tả phân bố vận tốc tốt hơn, với gradient vận tốc ở vùng biên được cải thiện rõ rệt so với polyhedral. Tương tự, lưới hexcore cho thấy sự mô tả dòng chảy tại vùng biên ổn định và rõ ràng hơn cả polyhexcore và polyhedral, nhờ cấu trúc lai giữa phần tử lục diện và phần tử phi cấu trúc. Đáng chú ý, lưới cấu trúc hexa đạt được kết quả vượt trội, với gradient vận tốc được mô tả sắc nét nhất, phân bố vận tốc mượt mà và không xuất hiện các nhiễu loạn giả tạo tại vùng hẹp cũng như lớp biên. Sự khác biệt này cho thấy vai trò quan trọng của hình dạng phần tử trong việc tái hiện các đặc trưng dòng chảy phức tạp và ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của kết quả mô phỏng CFD.



Hình 5. Dòng chảy thứ cấp trên bề mặt tản nhiệt với các loại lưới khác nhau

- Trường nhiệt độ:



Hình 6. Nhiệt độ của tấm tản nhiệt với các loại lưới khác nhau

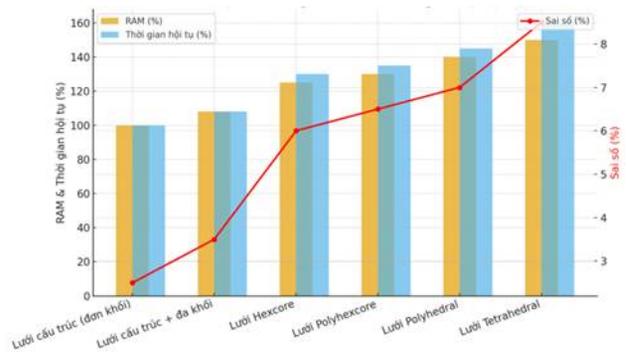
Dựa trên kết quả phân bố nhiệt độ trình bày trong hình 6, có thể nhận thấy sự khác biệt đáng kể giữa các loại lưới. Lưới tetrahedral cho thấy phân bố nhiệt trên bề mặt tấm tản nhiệt và các vây bị phân mảnh, không đồng đều tại các vùng tiếp xúc. Sự chuyển đổi màu sắc không mượt mà phản ánh hiện tượng gradient nhiệt độ bị đứt gãy. Lưới polyhedral cải thiện hơn so với tetrahedral với sự mô tả gradient nhiệt độ rõ nét hơn, tuy nhiên vẫn xuất hiện hiện tượng chuyển tiếp không liên tục, đặc biệt tại các biên và các góc hẹp. Ngược lại, lưới polyhexcore cho thấy phân bố nhiệt khá đồng đều, đặc biệt ở vùng trung tâm và trên bề mặt tấm, với gradient nhiệt độ được cải thiện đáng kể. Lưới hexcore tiếp tục nâng cao mức độ chính xác, phân bố nhiệt độ gần tương đương với lưới cấu trúc hexa, đồng thời thể hiện sự mượt mà trong gradient nhiệt độ giữa bề mặt tấm và các vây. Đặc biệt, lưới hexa cấu trúc đạt được kết quả tốt nhất, với phân bố nhiệt độ đồng đều trên toàn miền tính toán. Các vùng tiếp xúc giữa tấm và vây cũng như khu vực biên được mô tả chính xác, phản ánh đúng bản chất vật lý của hiện tượng truyền nhiệt.

Mặt khác, ta sử dụng công cụ và phân tích dữ liệu trong phần mềm Ansys Fluent để thống kê về tài nguyên sử dụng trên máy tính khi sử dụng các loại lưới khác nhau như trên hình 7, kết quả tổng hợp từ bảng số liệu và biểu đồ cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các loại lưới theo ba tiêu chí: mức tiêu thụ bộ nhớ RAM, thời gian hội tụ và sai số tính toán. Lưới cấu trúc đơn khối giữ vai trò chuẩn tham chiếu, với RAM và thời gian hội tụ thấp nhất, đồng thời đạt sai số chỉ 2,5%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Cai, W. H., Zhan, J. M., Gong, Y. J., & Hu, W. Q. (2017), *Further investigation of the six-dof hollow gravity anchor: Impact of the internal slant angle*, Marine Structures, 56, 85–98.
- Zhang, L. P. (2017), *Grid generation technology for computational fluid dynamics*, Beijing, China. Science Press.
- Zhan, J. M., Chen, X. B., Gong, Y. J., & Hu, W. Q., (2017), *Numerical investigation of the interaction between an inverse T-type fixed/floating breakwater and regular/irregular waves*, Ocean Engineering, 137, 110–119.

Khi áp dụng phân vùng đa khối, RAM và thời gian hội tụ tăng nhẹ (~8%) và sai số tăng lên 3,5%, phản ánh sự đánh đổi giữa tính linh hoạt hình học và hiệu năng tính toán. Ở nhóm lưới phi cấu trúc, Hexcore và Polyhexcore cho kết quả cân bằng hơn, với RAM tăng từ 25 đến 30%, thời gian hội tụ tăng từ 30 đến 35% và sai số ở mức trung bình (từ 6 đến 6,5%). Trong khi đó, Polyhedral và đặc biệt Tetrahedral kém hiệu quả hơn, khi RAM tăng 140–150%, thời gian hội tụ tăng 45–60% và sai số cao nhất (7–8,5%). Nhìn chung, lưới cấu trúc vẫn là lựa chọn tối ưu về độ chính xác và chi phí tính toán. Các dạng lai (Hexcore, Polyhexcore) có thể coi là giải pháp trung gian hợp lý, dung hòa giữa khả năng mô tả hình học phức tạp và hiệu suất tính toán, trong khi lưới Polyhedral và Tetrahedral chỉ nên dùng khi hình học quá khó tạo lưới cấu trúc.



Hình 7. So sánh mức độ sử dụng RAM và thời gian hội tụ giữa các loại lưới

4. KẾT LUẬN

Lưới cấu trúc dựa trên phân vùng đa khối là phương pháp phù hợp hơn khi mô phỏng các hệ thống dòng chảy và truyền nhiệt phức tạp, đặc biệt trong các bài toán có hình học và điều kiện biên rõ ràng như hệ thống làm mát qua các vây trụ. Nó cung cấp độ chính xác cao hơn và khả năng kiểm soát tốt hơn trong quá trình mô phỏng. Tuy nhiên, trong các trường hợp mô phỏng với hình học không đồng nhất hoặc phức tạp hơn, lưới phi cấu trúc vẫn có thể là một lựa chọn phù hợp với sự linh hoạt và tính toán hiệu quả.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Đổi mới sáng tạo Vingroup (VINIF) trong Dự Án mã số VINIF.2023.DA210

- Romero-Gomez, P., & Richmond, M. C. (2016), *Numerical simulation of circular cylinders in free-fall*, Journal of Fluids and Structures, 61, 154.
- Wen-Hao Cai, Jie-Min Zhan, Ying-Ying Luo. (2021), *User-intervened structured meshing methods and applications for complex flow fields based on multiblock partitionin*, Journal of Computational Design and Engineering.

Abstract:

STRUCTURED MESH GENERATION BASED ON MULTI-BLOCK PARTITIONING FOR 3D SIMULATION OF JET COOLING IN ELECTRIC VEHICLE BATTERY PACKS

Traditional meshing methods often face difficulties in maintaining continuity and ensuring mesh quality when applied to complex flow fields or geometries. These limitations can lead to reduce computational accuracy and increase computational cost. Structured mesh generation based on multi-block partitioning represents a novel approach to improve computational efficiency in solving numerical fluid dynamics problems involving complex flow configurations. In this study, we employ the structured meshing method based on multi-block partitioning to perform a three-dimensional simulation of a jet impinging perpendicularly onto a surface for cooling electric vehicle battery packs. The results are also compared with those obtained using traditional meshing methods.

Keywords: CFD, structured mesh generation, multi-block partitioning, heat transfer.

Ngày nhận bài: 25/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 06/10/2025