MÔ PHỎNG XOÁY TÁCH RỜI TRONG NGHIÊN CỨU CÁC ĐẶC TRƯNG KHÍ ĐỘNG CỦA DÒNG CHẢY RỐI TRÊN VÙNG TƯƠNG TÁC

Nguyễn Trung Dũng^{1,*}, Nguyễn Anh Tuấn², Trần Thế Hùng²

¹Hệ Quản lý học viên sau đại học, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn
²Khoa Hàng không vũ trụ, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Dòng chảy rối trên vùng tương tác là hiện tượng phổ biến và xuất hiện nhiều trong lĩnh vực hàng không vũ trụ. Việc nghiên cứu dòng chảy rối trên vùng tương tác bằng phương pháp số phù hợp trong điều kiện tại Việt Nam. Hai phương pháp mô phỏng số được sử dụng trong phần lớn các nghiên cứu là phương pháp mô phỏng trực tiếp DNS và phương pháp mô phỏng xoáy lớn LES, trong khi có rất ít nghiên cứu sử dụng phương pháp mô phỏng xoáy tách rời DES. Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng các phương pháp mô phỏng số như trung bình Reynolds RANS và mô phỏng xoáy tách rời DES để xây dựng một mô hình mô phỏng số cho phép nghiên cứu các đặc trưng khí động của dòng rối trên vùng tương tác. RANS được sử dụng để đánh giá sự độc lập của lưới. Với phương án lưới được lựa chọn tiến hành mô phỏng DES cho hai mô hình bao gồm mô hình DES-2D và mô hình DES-3D. Xử lý dữ liệu trường vận tốc thu được bằng mã nguồn Matlab, kết quả cho thấy các tham số của dòng trung bình đã bám sát kết quả thực nghiệm, trong khi động năng rối còn có sự sai số lớn. Phân tích POD và Q-criterion đã thể hiện được một số cấu trúc kích thước lớn trên vùng tương tác.

Từ khóa: Tương tác dòng chảy rối; mô phỏng xoáy tách rời; các tham số khí động; phân tích dữ liệu.

1. Đặt vấn đề

Khi có hai dòng chất lưu chuyển động song song với vận tốc khác nhau thì tại khu vực giao nhau giữa hai dòng tính từ vị trí gặp nhau theo hướng xuôi dòng sẽ hình thành vùng tương tác chảy rối hay còn được gọi là dòng chảy rối trên vùng tương tác (*turbulent mixing layer - TML*). Trong nhiều thập kỷ, TML luôn là đối tượng được quan tâm nghiên cứu bởi sự phổ biến của nó trong kỹ thuật, đặc biệt là trong lĩnh vực hàng không [1-3]. Một số ví dụ về TML như hiện tượng trộn nhiên liệu đốt với dòng khí oxy hóa trong buồng đốt của động cơ dòng thẳng buồng đốt siêu thanh (scramjet), hay sự tương tác giữa luồng phụt phía sau động cơ tên lửa và máy bay phản lực với dòng khí bao quanh vỏ [4]. Các hiểu biết về dòng chảy rối trên vùng tương tác đóng vai trò quan trọng và là kiến thức lõi trong các nghiên cứu nâng cao hiệu suất động cơ scramjet, nghiên cứu giảm tiếng ồn

^{*} Email: dungnt42ncs@lqdtu.edu.vn

DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v19.n01.719

động cơ tên lửa, nghiên cứu ổn định lực đẩy động cơ, nghiên cứu tương tác cũng như ảnh hưởng của sóng xung kích và hiện tượng tách dòng bao vật. Bên cạnh đó, nghiên cứu TML còn giúp giải thích cụ thể các hiện tượng vật lý và làm cơ sở để đề xuất các biện pháp nâng cao chất lượng khí động của thiết bị bay.

Các nghiên cứu ban đầu về TML chủ yếu sử dụng phương pháp thực nghiệm như nghiên cứu sự ảnh hưởng của khối lượng riêng tới cấu trúc dòng chảy đặc trưng trên vùng tương tác bởi Brown và Roshko [2], nghiên cứu dòng chảy rối trên vùng tương tác chịu nén bởi Goebel và Dutton [5], và mới đây là nghiên cứu ảnh hưởng tính nén tới đặc tính vùng tương tác bởi Kim và cộng sự [6]. Các kết quả nghiên cứu đã phát hiện được sự tồn tại của các cấu trúc liên kết kích thước lớn (*lagre-scale coherent structures*), cũng như sự tồn tại của vùng tự đồng dạng khi tương tác chảy rối phát triển hoàn toàn. Với dòng trên âm, Dupont và cộng sự [7] đã chỉ ra sự xuất hiện sóng xung kích làm tăng tính chảy rối và sự hỗn loạn của dòng chảy trên tương tác. Tuy nhiên, phương pháp thực nghiệm đòi hỏi chi phí cao về thiết bị và dụng cụ đo. Bên cạnh đó, việc chỉ thực hiện được trong điều kiện phòng thí nghiệm gây khó khăn khi áp dụng vào các trường hợp kỹ thuật thực tế.

Cùng với sự phát triển kỹ thuật và khoa học máy tính, nhiều nghiên cứu về TML sử dụng mô phỏng số đã được thực hiện. Một số công trình điển hình như: Nghiên cứu cấu trúc lớn trên vùng tương tác bằng phương pháp xoáy lớn bởi McMullan và cộng sự [8], mô phỏng xoáy lớn của dòng chảy rối trên vùng tương tác sử dụng mô hình xoáy kéo dài bởi Mattner và cộng sự [9], hay nghiên cứu tương tác sóng xung kích với dòng chảy rối trên vùng tương tác l10]. Bên cạnh đó, Zhang và cộng sự [11] sử dụng phương pháp mô phỏng trực tiếp đã trực quan hóa được nhiều cấu trúc dòng chảy rối trên vùng tương tác như cấu trúc vòng chữ *U*, cấu trúc dạng kẹp tóc, cấu trúc dạng gân sườn. Daotong Chong và cộng sự [12] đã tiến hành nghiên cứu về cơ chế hình thành và phát triển các xoáy trong khu vực chuyển tiếp trên TML. Tổng hợp kết quả cho thấy phương pháp xoáy lớn và mô phỏng số trực tiếp thường được sử dụng trong nghiên cứu dòng chảy cho TML.

Có thể thấy rằng, xây dựng một mô hình mô phỏng đáng tin cậy có vai trò quan trọng trong mô phỏng số. Tuy nhiên, tại Việt Nam nguồn tài nguyên máy tính còn tương đối hạn chế, việc sử dụng các mô hình bậc cao như phương pháp xoáy lớn và mô phỏng số trực tiếp còn gặp nhiều khó khăn. Do vậy, xây dựng các mô hình tính toán bậc thấp, tiết kiệm thời gian mà vẫn đảm bảo được độ chính xác có vai trò quan trọng. Mục đích của bài báo là đưa ra mô hình tính toán phù hợp cho bài toán TML. Cụ thể, phương pháp mô phỏng xoáy tách rời DES với các tham số tính toán phù hợp được xây dựng và khảo sát. Kết quả mô phỏng DES sau khi xử lý bằng mã nguồn Matlab được so sánh với thực nghiệm và các nghiên cứu đã được công bố. Từ đó, nghiên cứu cho thấy tính khả thi của việc sử dụng DES trong nghiên cứu về vùng tương tác chảy rối.

2. Mô hình mô phỏng

2.1. Phương pháp mô phỏng DES

Mô phỏng xoáy tách rời DES được đề xuất bởi Spalart [13, 14]. Đây là một phương pháp mô phỏng số được xây dựng cho các dòng chảy có số Reynolds cao và cần mô tả chính xác dòng xoáy gần và xa sau vật. Trong thực tế, RANS giải quyết tốt các thông số dòng trung bình, vốn là các thông số chủ yếu được các kỹ sư quan tâm. Còn LES giải được bài toán không dừng và cho kết quả tính toán chính xác hơn, nhưng lại đòi hỏi chi phí tính toán cao hơn. Là sự kết hợp giữa RANS và LES, phương pháp DES cho phép cân bằng chi phí tính toán và độ chính xác của kết quả.

Trên cùng một lưới, DES sử dụng RANS giải quyết các lớp biên sát tường cứng và sử dụng LES để giải quyết các lớp cách xa tường. DES nguyên bản sử dụng một sơ đồ chuyển đổi giữa hai phương pháp RANS và LES dựa trên 2 tham số ràng buộc đó là khoảng cách ô lưới Δ và khoảng cách với tường cứng *d*. Cụ thể, sơ đồ có thể biểu diễn dưới dạng $\tilde{d} \equiv \min(d, C_{DES}\Delta)$, ở đó $\Delta \equiv \max(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$, C_{DES} là hằng số thực nghiệm. Nếu $d\ll\Delta$ thì \tilde{d} được thay thế *d* trong số hạng chứa $(\tilde{v}/d)^2$ và mô hình chuyển thành RANS cho khu vực sát tường, khi $\Delta \ll d$ ứng với khu vực xa tường thì mô hình SGS trong phương pháp LES.

2.2. Miền tính toán và dữ liệu thực nghiệm tham chiếu

Miền tính có kích thước $800 \times 200 \times 30$ (mm) được sử dụng cho trường hợp 3D và miền tính có kích thước 800×200 (mm) được sử dụng cho trường hợp 2D. Vách ngăn là một vách phẳng hình chữ nhật coi như có độ dày bằng 0, có kích thước 100×30 (mm) cho trường hợp 3D và chỉ dài 100 mm cho trường hợp 2D. Vách ngăn chia biên lối vào thành 2 phần không đều: phần ứng với dòng vào vận tốc cao U_1 có bề rộng 80 mm, phần ứng với dòng vào vận tốc cao U_1 có bề rộng 80 mm, phần ứng với dòng vào vận tốc thấp U_2 có bề rộng 120 mm. Vùng tương tác tính từ mép vách ngăn tới biên lối ra dài 700 mm. Các biên trên và dưới của miền tính với điều kiện biên là tường không nhớt. Vách ngăn ứng với điều kiện biên là tường không trượt (Hình 1). Hệ trục tọa độ với gốc tọa độ O đặt tại mép vách ngăn, phương Ox nằm ngang theo chiều dòng chảy, phương Oy theo phương đứng, phương Oz vuông góc với hình vẽ hướng về phía người đọc. Các điều kiện biên được tham khảo từ mô hình của Martha [15] và Konark [16].



Hình 1. Mô hình TML với vách ngăn phẳng.

Nghiên cứu thực nghiệm về dòng chảy rối trên vùng tương tác của Kim và cộng sự [6] được sử dụng để đánh giá việc xây dựng mô hình mô phỏng số của nhóm nghiên cứu. Kim và cộng sự đã sử dụng camera tốc độ cao lên đến 124.000 khung hình/giây kết hợp với các phương pháp đo vận tốc ảnh hạt SPIV và thu được bộ dữ liệu cho 5 trường hợp số Mach đối lưu $M_C = 0,185, 0,381, 0,546, 0,69$ và 0,883. Nghiên cứu này tập trung vào trường hợp $M_C = 0,185$ nhằm đánh giá tính chính xác của mô hình tính.

Sử dụng lưới kiểu cấu trúc cho mô hình 2D và lưới không cấu trúc cho mô hình 3D. Mật độ lưới cao ở khu vực sát thành vách ngăn theo phương đứng (Hình 2). Các thông số đầu vào bao gồm $U_1 = 156$ m/s, $U_2 = 30$ m/s, $M_1 = 0,463$, $M_2 = 0,089$, $M_C = 0,185$, $T_1 = 296^{\circ}$ K, $T_2 = 292^{\circ}$ K, $r = U_2/U_1 = 0,194$, $s = \rho_2/\rho_1 = 0,972$ [6].



2.3. Tính độc lập của lưới tính toán và lựa chọn

Nhóm nghiên cứu thực hiện khảo sát tính độc lập của lưới cho mô hình 2D bằng phương pháp trung bình thời gian Reynolds (RANS). Cụ thể, các tác giả đã sử dụng mô hình dòng chảy rối k- ε standard dựa trên pressure-based với mô hình hàm tường standard, bộ giải COUPLED cho lưu chất là khí lý tưởng tuân theo mô hình nhớt Sutherland. Bốn trường hợp kích thước lưới được liệt kê trong bảng 1.

Ta có tỉ lệ độ mịn của lưới:
$$r_{10} = \sqrt{\frac{N_1}{N_0}} = 1,5; r_{21} = \sqrt{\frac{N_2}{N_1}} = 1,5; r_{32} = \sqrt{\frac{N_3}{N_2}} = 1,5$$

Theo khuyến cáo, tỉ lệ độ mịn của lưới phải lớn hơn 1,3.

Tên trường họp	Kích thước lưới	Số lượng phần tử (N _i)
H_0	400×100	40000
H_1	600 × 150	90000
H_2	900×225	202500
H_3	1215×375	455625

Bảng 1. Thông số lưới của miền tính

Sử dụng tốc độ phát triển độ rộng vùng tương tác theo phương Ox và phân bố vận tốc tại vị trí cách vách ngăn x = 150 mm theo hướng xuôi dòng để đánh giá mức độ độc lập của lưới cho 4 trường hợp. Độ rộng vùng tương tác *b* [6] là tham số thay đổi theo phương dòng chảy và được xác định theo công thức:

$$b = y_1 - y_2 \tag{1}$$

trong đó: $U(x, y_1) = U_1 - 0, 1 \cdot \Delta U; U(x, y_2) = U_2 + 0, 1 \cdot \Delta U; \Delta U = U_1 - U_2.$

Tốc độ phát triển độ rộng vùng tương tác theo phương hướng dòng chính là đạo hàm theo x của b, nên ta có công thức xác định:

$$\theta = \frac{db}{dx} \tag{2}$$

Kết quả xử lý dữ liệu từ bốn trường hợp được tổng hợp ở bảng 2, ở đó e_{ij} là sai số tốc độ phát triển vùng tương tác giữa các trường hợp.

Thông số	Giá trị
$N_0; N_1; N_2; N_3$	40000; 90000; 202500; 455625
$ heta_0$	0,09324
$ heta_1$	0,09337
$ heta_2$	0,09295
$ heta_3$	0,09195
$e_{10} = 100 \cdot \left \theta_1 - \theta_0\right / \theta_0$	0,14%
$e_{21} = 100 \cdot \left \theta_2 - \theta_1 \right / \theta_1$	0,45%
$e_{32} = 100 \cdot \left \theta_3 - \theta_2 \right / \theta_2$	1,07%

Bảng 2. Kết quả xử lý dữ liệu mô phỏng RANS

Phân bố trường vận tốc tại vị trí cách mép vách ngăn một khoảng x = 150 mm cho cả bốn trường hợp được chỉ ra trên hình 3. Có thể thấy rằng, trường vận tốc trung bình trong cả bốn trường hợp gần như trùng nhau hoàn toàn. Do vậy, các trường hợp cho kết quả của trường vận tốc độc lập với lưới.

Hình 4 cho thấy tham số $3 < y^+ < 15$ và khi tăng độ phân giải của lưới thì y^+ giảm xuống. Theo [17, 18] khuyến nghị, với mô hình rối *k*- ε standard cần sử dụng hàm tường khi $30 < y^+ < 200$. Vậy với tham số y^+ thu được trong nghiên cứu này thì mô hình hàm tường standard đã được sử dụng cho cả bốn trường hợp. Việc sử dụng hàm tường có thể làm giảm độ chính xác của kết quả mô phỏng, tuy nhiên cần lưu ý rằng khu vực quan tâm nghiên cứu chủ yếu nằm phía sau vách ngăn đã cho kết quả phân bố vận tốc độc lập với lưới (Hình 3). Kết quả mô phỏng với RANS trong nghiên cứu này được cho rằng chấp nhận được. Với phân tích như vậy, lựa chọn trường hợp lưới H_1 có kích thước 600×150 với số lượng 90000 phần tử được chọn cho mô phỏng DES ở phần tiếp theo.





2.4. Xây dựng mô hình tính toán cho DES

Mô phỏng DES cho mô hình DES-2D được tiến hành trên lưới với kích thước 600×150 đã chọn từ mục 2.3 với các thông số vận tốc $U_1 = 156$ m/s, $U_2 = 30$ m/s. Mô hình *k*- ε được sử dụng để giải khu vực lưới gần tường. Sử dụng giải thuật PISO với tùy chọn pressure-base. Lựa chọn khí lý tưởng (*ideal gas*) tuân theo mô hình nhớt Sutherland. Lấy kết quả mô phỏng RANS (*k*- ε standard) là điều kiện đầu vào cho mô phỏng DES. Với bước thời gian tiến hành $\Delta t = 2 \times 10^{-6}$ s, mô phỏng thực hiện trong 15000 bước, thu được dữ liệu trường vận tốc tại 3000 thời điểm tương ứng với tổng thời gian mô phỏng là T = 0,03 s.

Mô hình DES-3D sử dụng lưới tính toán lên tới khoảng 1,6 triệu phần tử. Mô hình tính, bộ giải, điều kiện biên giống như trường hợp DES-2D. Với bước thời gian $\Delta t = 10^{-6}$ s, mô phỏng thực hiện được 20000 bước, thu được dữ liệu trường vận tốc tại 2000 thời điểm, ứng với tổng thời gian mô phỏng là T = 0,02 s. Các kết quả từ phần mềm Fluent và dữ liệu thực nghiệm thô được xử lý bằng các thuật toán và mã nguồn Matlab do nhóm tự phát triển.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Trường vận tốc trung bình

Hình 5 đưa ra các kết quả về trường vận tốc trung bình theo phương x dựa vào thực nghiệm (Hình 5a), mô phỏng 2D (Hình 5b) và mô phỏng 3D (Hình 5c). So sánh kết quả thực nghiệm và mô phỏng cho thấy có sự tương đồng cao về độ lớn và hình ảnh trực quan vùng tương tác. Tuy nhiên, ranh giới phân chia các mảng màu ở kết quả mô phỏng DES chưa thực sự như các dải quạt tuyến tính như ở kết quả thực nghiệm.



a) Dữ liệu thực nghiệm của Kim, 2019 [6]





c) Dữ liệu mô phỏng 3D Hình 5. So sánh vận tốc trung bình trên vùng tương tác.

Hình 5c về dữ liệu mô phỏng 3D cho thấy đoạn 200 mm đầu của vùng tương tác khá hẹp, nghĩa là sự tương tác giữa hai luồng chưa phù hợp với thực nghiệm. Nguyên nhân có thể do trong mô hình 3D các tương tác có xu hướng 3 chiều nên tương tác theo phương Ox bị hạn chế. Đặc điểm các cuộn xoáy 3 chiều đã được đề cập ở các nghiên cứu trước đó [2, 3, 6] về dòng chảy rối vùng tương tác. Ngoài ra, tác giả phát triển phương pháp DES là Spalart [14] cũng thừa nhận tồn tại vấn đề tiến triển theo mô phỏng xoáy lớn LES diễn ra chậm là do sự ổn định của RANS ở khu vực gần tường vách ngăn. Sự ổn định này đồng nghĩa với giảm độ nhạy trong chuyển đổi sang mô hình xoáy lớn LES.

3.2. Độ rộng vùng tương tác theo phương dòng chảy

Hình 6 cho thấy theo phương dòng chảy càng xa vách ngăn thì cả phương pháp RANS, DES-2D và DES-3D đều cho kết quả có sự khác biệt với dữ liệu thực nghiệm. Cụ thể, DES-2D cho kết quả tốt nhất khi sai lệch so với thực nghiệm ít nhất, trong khi RANS và DES-3D cho kết quả chưa sát với thực nghiệm. Các kết quả của DES-3D có thể do độ rộng và bề ngang của vùng tính toán chưa đủ lớn, hoặc thời gian mô phỏng chưa đủ lâu. Trong điều kiện hạn chế về tài nguyên tính toán, nhóm tác giả cần duy trì thời gian tính toán lâu hơn trong các nghiên cứu tiếp theo để cải thiện độ chính xác của kết quả.



Hình 6. So sánh độ rộng vùng tương tác (Dữ liệu thực nghiệm từ Kim, 2019 [6]).

3.3. Phân bố vận tốc theo phương dòng chảy trong vùng đồng dạng

Sử dụng hệ tọa độ với các trục là các đại lượng không thứ nguyên để khảo sát phân bố của trường vận tốc phương hướng dòng, ở đó trục hoành là đại lượng $(U-U_2)/\Delta U$ và trục tung là đại lượng $\eta = (y - y_0)/b$ với y_0 là đường trung tâm vùng tương tác [6]. Khảo sát tại các khoảng cách *x* cách mép vách ngăn khác nhau theo phương dòng chảy. Khi khoảng cách đủ xa sẽ thu được các đường phân bố vận tốc trùng nhau, đây chính là tính chất tự đồng dạng của dòng chảy rối trên vùng tương tác (Hình 7).



Hình 7. Sự thay đổi vận tốc theo phương dòng chảy.

Kết quả thực nghiệm của Kim và kết quả mô phỏng DES đều cho thấy khoảng cách x = 300 mm cách mép vách ngăn đã thuộc vùng đồng dạng. Để đánh giá độ chính xác của mô hình mô phỏng, chúng ta tiến hành so sánh trường vận tốc đặc trưng cho vùng tự đồng dạng của thực nghiệm và mô phỏng tại vị trí x = 300 mm. Hình 8 cho thấy kết quả phân bố vận tốc theo phương dòng chảy giữa thực nghiệm và mô phỏng DES trùng nhau. Đồng thời, phân bố của trường vận tốc trong trường hợp 3D bám sát theo kết quả thực nghiệm. Do vậy, mô phỏng DES cho kết quả có độ chính xác tương đối cao về đặc tính của dòng trung bình theo thời gian.



Hình 8. So sánh phân bố trường vận tốc Dữ liệu thực nghiệm từ Kim, 2019 [6].



Hình 9. So sánh trường TKE Dữ liệu thực nghiệm từ Kim, 2019 [6].

3.4. Động năng rối trên vùng đồng dạng

Hình 9 đưa ra kết quả so sánh động năng chảy rối (TKE) giữa mô phỏng và thực nghiệm. Ở đây trục hoành là tọa độ không thứ nguyên η như trường hợp với vận tốc trên hình 8. Kết quả mô phỏng DES-2D so với thực nghiệm có sự sai số lớn, trong khi DES-3D có độ chính xác cao hơn, và đáng ngạc nhiên là kết quả RANS lại là tốt nhất. Động năng rối là đại lượng liên quan tới các thành phần vận tốc dao động theo thời gian. Như vậy, mô hình RANS sử dụng mô hình rối *k-* ε cho kết quả về động năng rối sát với thực nghiệm hơn DES. Tuy nhiên, kết quả của RANS không có tính biến đổi theo thời gian của các tham số dòng chảy, DES vẫn là lựa chọn hợp lý khi có biện pháp nâng cao độ chính xác về động năng rối cho DES. Về mặt thuật toán trong vùng không có tường DES chính là mô phỏng xoáy lớn LES. Việc nâng cao chất lượng DES có thể liên quan trực tiếp tới mật độ lưới tính toán.

3.5. Phân tích POD trực quan hóa dòng chảy rối

Phép phân tích trực giao (POD) lần đầu được Lumley [19] dùng để phân tách một trường vecto biểu thị dòng chất lưu chảy rối thành tập hợp các hàm xác định; mỗi hàm này được gọi là một dạng trực giao của trường vecto ban đầu. Trong phương pháp này, thành phần dao động của vận tốc được sắp xếp lại thành một ma trận với mỗi cột là giá trị vận tốc dao động của tất cả các điểm trong không gian tại một thời điểm *t*. Sau đó, phép phân tách đơn trị (SVD) được thực hiện ($U = L \sum R^T$) và thành phân các dạng trực giao của trường vận tốc có thể được xây dựng lại. Các bước tiến hành phân tích POD trên mã nguồn Matlab được tham khảo từ công bố của Weiss Julien [20]. Đặc trưng của POD là các dạng trực giao được bố trí theo mức năng lượng giảm dần, do vậy các dạng trực giao đầu tiên thể hiện đặc trưng chính của dòng chảy được phân tích.

Trong nghiên cứu này, với trường dữ liệu vận tốc thu được sau mô phỏng DES-2D, ta tiến hành thiết lập ma trận vận tốc dao động *U*, sau đó sử dụng Matlab thực hiện phân tích POD trên cơ sở phân tách đơn trị SVD. Hình 10 biểu diễn 5 dạng trực giao đầu tiên thu được sau xử lý dữ liệu. Quan sát hình 10 ta có thể thấy các dạng xoáy lớn phát triển theo phương dòng chảy có kích thước lớn dần ở các dạng 1 và dạng 3. Hiện tượng phân tách xoáy cũng thể hiện ở các dạng 4 và dạng 5. Các xoáy này được bố trí thành các cặp có chiều đối lập nhau. Đây là đặc trưng riêng của xoáy trên vùng tương tác, được chỉ ra cụ thể trong nghiên cứu này. Kết quả phân tích trực giao POD cho thấy, các cấu trúc có kích thước lớn trên vùng tương tác có thể được hiển thị trên vùng tương tác.



Hình 10. Các dạng trực giao POD đầu tiên của trường hợp DES-2D.

3.6. Trực quan hóa dòng chảy rối với Q-criterion

Trong phần này, nhóm tác giả thực hiện trực quan hóa dòng chảy với mô hình DES-3D để làm nổi bật cấu trúc liền mạch kích thước lớn bằng Q-criterion. Q-criterion xây dựng trực tiếp trên bất biến thứ 2 của ten-xơ gradient vận tốc. Về mặt định nghĩa, Q-criterion biểu thị sự cân bằng cục bộ giữa tốc độ biến dạng cắt và độ lớn của xoáy. 38

Q-criterion xác định các xoáy là khu vực có độ lớn độ xoáy lớn hơn độ lớn tốc độ biến dạng, tức là Q > 0. Các tính toán và biểu thức về Q-criterion được mô tả trong [21]. Hình 11 thể hiện các cuộn rối ứng với mặt đẳng vị Q-criterion Q = 0,1 và được tô màu theo giá trị trường vận tốc. Cấu trúc cho thấy sự phù hợp với sơ đồ chồng cuộn sóng trên TML do McMullan đề xuất [22]. So với kết quả mô phỏng bằng phương pháp trực tiếp DNS của Zhang và cộng sự năm 2019 [11] thì kết quả mô phỏng DES-3D có sự trùng hợp nhất định khi thể hiện được cấu trúc xoáy hình chữ U (*U-shape vortex*). Tuy nhiên, do chiều sâu theo phương z của trường hợp DES-3D còn nhỏ nên chưa thể hiện tốt như mô phỏng DNS. Các kết quả của Q-criterion cũng cho thấy cấu trúc xoáy dạng chữ U là đặc trưng điển hình trong không gian của dòng chảy trên vùng tương tác. Đồng thời, độ rộng của xoáy chữ U thu hẹp và chiều dài tăng lên khi đi xa gờ trước.



b) Hình ảnh nhìn từ phía trước Hình 11. Mặt đẳng vị của Q-criterion tiêu chuẩn hóa tại Q = 0,1.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày việc nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng số sử dụng DES cho dòng chảy trên vùng tương tác. Với lựa chọn lưới và các tham số tính toán phù hợp được chỉ ra trong bài, phương pháp DES cho phép giảm đáng kể thời gian tính toán mà vẫn đảm bảo độ chính xác phù hợp của kết quả. Chương trình xử lý dữ liệu kết hợp giữa Fluent và Matlab được xây dựng trong đánh giá các đặc tính không dừng của dòng chảy. Một số đóng góp cụ thể của nghiên cứu này như sau:

- Mô hình 3D cho các kết quả dự đoán về vận tốc và động năng chảy rối sát so với thực nghiệm. Phương pháp RANS cho kết quả tốt trong một số trường hợp nhất định. Tuy nhiên, chỉ có các tham số trung bình của dòng chảy thu được từ phương pháp này.

- Khi tham số được lựa chọn phù hợp, phương pháp mô phỏng DES trong không gian ba chiều có sự phù hợp nhất định và triển vọng là phương pháp chính trong khi nghiên cứu về dòng chảy rối trên vùng tương tác.

- Phân tích trực giao POD cho thấy cặp xoáy ngược nhau chiếm ưu thế với mức năng lượng lớn trong mặt phẳng của dòng chảy trên vùng tương tác. Các kết quả của Q-criterion chỉ ra rằng cấu trúc xoáy dạng chữ U là đặc trưng điển hình trong không gian của dòng chảy trên vùng tương tác. Kết quả cũng chỉ ra rằng độ rộng của xoáy chữ U thu hẹp và chiều dài tăng lên khi đi xa gờ trước.

- Kết quả nghiên cứu làm cơ sở để ứng dụng DES trong nghiên cứu dòng chảy trên vùng tương tác tại các số Mach đối lưu khác nhau. Đồng thời, mô hình cụ thể như động cơ tên lửa sẽ được khảo sát trong các nghiên cứu sau này.

Tài liệu tham khảo

- [1] H. W. Liepmann and J. Laufer, "Investigation of Free Turbulent Mixing", NACA No. 1257, 1947.
- [2] G. L. Brown and A. Roshko, "On density effects and large structure in turbulent mixing layers", J Fluid Mech, Vol. 64, No. 4, pp. 775-816, 1974. DOI: 10.1017/S002211207400190X
- [3] M. M. Rogers and R. D. Moser, "The three-dimensional evolution of a plane mixing layer: the Kelvin-Helmholtz rollup", *J Fluid Mech*, Vol. 243, pp. 183-226, 1992. DOI: 10.1017/S0022112092002696
- [4] D. Cao et al., "LES study on flow features of the supersonic mixing layer affected by shock waves," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 85, pp. 114-123, Jul. 2017. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.04.019
- [5] S. G. Goebel and J. C. Dutton, "Experimental study of compressible turbulent mixing layers", *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 538-546, Apr. 1991. DOI: 10.2514/3.10617
- [6] K. U. Kim, G. S. Elliott, and J. C. Dutton, "Three-dimensional experimental study of compressibility effects on turbulent free shear layers", *AIAA Journal*, Vol. 58, No. 1, pp. 133-147, 2019. DOI: 10.2514/1.J058556
- [7] P. Dupont, S. Piponniau, and J. P. Dussauge, "Compressible mixing layer in shock-induced separation", *J Fluid Mech*, Vol. 863, pp. 620-643, 2019. DOI: 10.1017/jfm.2018.987
- [8] W. A. Mcmullan, S. Gao, and C. M. Coats, "Investigation of Coherent Structures in Turbulent Mixing Layers using Large Eddy Simulation", 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 - 7 January 2010, Orlando, Florida. DOI: 10.2514/6.2010-1291
- [9] T. W. Mattner, "Large-eddy simulations of turbulent mixing layers using the stretchedvortex model", J Fluid Mech, Vol. 671, pp. 507-534, Mar. 2011. DOI: 10.1017/S002211201000580X

- [10] F. Shi, Z. Gao, C. Jiang, and C. H. Lee, "Numerical investigation of shock-turbulent mixing layer interaction and shock-associated noise", *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 2, Feb. 2021. DOI: 10.1063/5.0034346
- [11] D. Zhang, J. Tan, and X. Yao, "Direct numerical simulation of spatially developing highly compressible mixing layer: Structural evolution and turbulent statistics", *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 3, Mar. 2019. DOI: 10.1063/1.5087540
- [12] D. Chong, Y. Bai, Q. Zhao, W. Chen, J. Yan, and Y. Hong, "Direct numerical simulation of vortex structures during the late stage of the transition process in a compressible mixing layer", *Physics of Fluids*, Vol. 33, No. 5, May 2021, 054108. DOI: 10.1063/5.0048584
- [13] P. Spalart, W. H. Jou, M. Strelets, and S. Allmaras, Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES Approach, Jan. 1997.
- [14] P. Spalart, "Detached-Eddy Simulation", Annu Rev Fluid Mech, Vol. 41, pp. 181-202, Jan. 2009. DOI: 10.1146/annurev.fluid.010908.165130
- [15] C. S. Martha, G. A. Blaisdell, and A. S. Lyrintzis, "Large eddy simulations of 2-D and 3-D spatially developing mixing layers", *Aerosp Sci Technol*, Vol. 31, No. 1, pp. 59-72, 2013. DOI: 10.1016/j.ast.2013.09.007
- K. Arora, K. Chakravarthy, and D. Chakraborty, "Large eddy simulation of supersonic, compressible, turbulent mixing layers", *Aerosp Sci Technol*, Vol. 86, pp. 592-598, Mar. 2019. DOI: 10.1016/j.ast.2019.01.034
- [17] Ansys Fluent, "ANSYS Fluent Theory Guide," ANSYS Inc., Vol. R2, 2021.
- [18] F. R. Menter and R. Sechner, "Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD", ANSYS Inc., 2021.
- [19] G. Berkooz, P. J. Holmes, and J. Lumley, "The Proper Orthogonal Decomposition in the Analysis of Turbulent Flows", *Annu Rev Fluid Mech*, Vol. 25, pp. 539-575, Nov. 2003. DOI: 10.1146/annurev.fl.25.010193.002543
- [20] J. Weiss, "A Tutorial on the Proper Orthogonal Decomposition", in AIAA Aviation 2019 Forum, 2019. DOI: 10.2514/6.2019-3333
- [21] J. Zhan, Y. Li, W. O. Wai, and W. Hu, "Comparison between the Q criterion and Rortex in the application of an in-stream structure", *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 12, Dec. 2019, 121701. DOI: 10.1063/1.5124245
- [22] W. A. McMullan, S. Gao, and C. M. Coats, "Organised large structure in the post-transition mixing layer. Part 2. Large-eddy simulation", *J Fluid Mech*, Vol. 762, pp. 302-343, 2015. DOI: 10.1017/jfm.2014.660

DETACHED EDDY SIMULATIONS IN THE STUDY OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE TURBULENT MIXING LAYER

Abstract: The turbulent mixing layer is a phenomenon that occurs and has many applications in aeronautical engineering. The study of mixing layer turbulence by the numerical method is suitable under domestic conditions. Two numerical simulation methods are used in most studies including, direct numerical simulation DNS and large eddy simulation LES, while there are very few studies using detached eddy simulation DES. In this article, the authors use numerical simulation methods evolving Reynolds average Navier-Stokes simulation RANS and detached eddy simulation DES to propose a numerical simulation model that allows to study of the aerodynamic characteristics of the turbulent flow interaction. RANS is used to evaluate grid independence. With the selected mesh, two models counting the DES-2D model and the DES-3D model are conducted. Processing velocity field data with Matlab code, the results show that the average flow behavior has closely followed the experimental results, while the turbulent kinetic energy still has a large error. POD and Q-criterion analysis has shown some large coherent structures in the interaction region.

Keywords: Mixing layer; detached eddy simulation; aerodynamic characteristics; data analysis.

Nhận bài: 29/09/2023; Hoàn thiện sau phản biện: 31/01/2024; Chấp nhận đăng: 05/04/2024