

INVESTIGATION OF HYPERSONIC FLOW AROUND A BOATTAIL OF AN AXISYMMETRIC BODY BY NUMERICAL METHODS

Dao Cong Truong^{1*}, Nguyen Trang Minh¹, Tran The Hung²

¹Academy of Military Science and Technology

²Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	28/7/2022	This study deals with numerical investigation on hypersonic flow around a boattail of an axisymmetric body. The research models are axisymmetric boattail bodies with standard conical and square non-axisymmetric boattail shapes. Boattail geometries with different lengths and angles were investigated. Authors used Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) equations with turbulent model $k-\omega$ SST by ANSYS Fluent and conducted the experimental validation with a previous research. The flow and shock waves around the axisymmetric body were simulated visually. Numerical results show that boattail geometry strongly affected the drag of the model. The optimal angles were approximately $7^\circ \div 9^\circ$ for the conical boattail and closed to 9° for the square boattail. When the boattail length increased, the drag had a tendency to decrease at the boattail angle of 7° . The research results also show the ability to use the pressure distribution of a longer-length boattail to describe the pressure distribution of the shorter one.
Revised:	26/8/2022	
Published:	26/8/2022	
KEYWORDS		
Drag reduction		
Base drag		
Boattail		
Boattail length		
Pressure distribution		

NGHIÊN CỨU DÒNG CHẢY TRÊN ÂM QUANH ĐUÔI VÁT CỦA VẬT THỂ BAY DẠNG TRÒN XOAY BẰNG PHƯƠNG PHÁP SỐ

Đào Công Trường^{1*}, Nguyễn Trang Minh¹, Trần Thế Hùng²

¹Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

²Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	28/7/2022	Nghiên cứu khảo sát dòng trên âm xung quanh đuôi vát của vật thể bay dạng tròn xoay bằng phương pháp mô phỏng số. Mô hình nghiên cứu có dạng tròn xoay với đuôi vát có cấu hình dạng hình côn và dạng bất đối xứng có đáy hình vuông. Đuôi vát với các chiều dài và góc vát khác nhau được khảo sát. Nhóm tác giả sử dụng phương pháp trung bình theo Reynolds (RANS) với mô hình chảy rối $k-\omega$ SST bằng phần mềm ANSYS Fluent và kiểm chứng với kết quả thực nghiệm của nghiên cứu trước đó. Thông qua mô phỏng, dòng chảy quanh đuôi vát và sóng xung kích xuất hiện quanh vật thể dạng tròn xoay được mô phỏng trực quan. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, mô hình đuôi ảnh hưởng rất lớn tới lực cản của vật. Góc vát tối ưu nằm trong khoảng 7° đến 9° cho đuôi vát hình côn và xấp xỉ 9° cho đuôi vát hình vuông. Khi tăng chiều dài đuôi vát, lực cản khí động có xu hướng giảm ở góc vát 7° . Kết quả chỉ ra khả năng sử dụng kết quả phân bố áp suất trên đuôi vát có chiều dài lớn cho đuôi vát có chiều dài nhỏ hơn.
Ngày hoàn thiện:	26/8/2022	
Ngày đăng:	26/8/2022	
TỪ KHÓA		
Giảm lực cản		
Lực cản đáy		
Đuôi vát		
Chiều dài đuôi		
Phân bố áp suất		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6298>

* Corresponding author. Email: truongdaocong@gmail.com

1. Giới thiệu

Giảm lực cản và tăng sự ổn định là yêu cầu cần thiết cho nhiều phương tiện có đáy tù, như: Tên lửa, đạn pháo, xe chở bồn... Do sự thay đổi đột ngột tiết diện dòng chảy tại mép đáy dẫn đến sự tách dòng, sinh ra lực cản đáy lớn. Ví dụ như, lực cản đáy có thể chiếm đến 50% tổng lực cản của tên lửa khi không có luồng phụt [1]. Ngoài ra, sự tách dòng tại mép đáy có thể gây ra nhiều vấn đề như rung lắc, tiếng ồn và gây mất ổn định chuyển động của phương tiện. Để giải quyết vấn đề này, có thể sử dụng nhiều phương pháp chủ động và thụ động khác nhau. Các phương pháp chủ động được thực hiện bằng cách bổ sung luồng khí phụt phía sau hoặc xung quanh đuôi. Các phương pháp này yêu cầu cần sử dụng các nguồn năng lượng thứ cấp, dẫn đến nhiều yêu cầu cao về thiết kế và kinh phí. Trong khi đó, các phương pháp thụ động thông qua thay đổi kết cấu phần đuôi của phương tiện như: Làm vát đuôi, tạo hốc lõm, rãnh hay sử dụng đáy nhiều tầng..., có nhiều ưu điểm rõ rệt khi so sánh với các phương pháp chủ động [2] – [6]. Các phương pháp thụ động có thiết kế đơn giản, dễ chế tạo và đạt hiệu quả cao trong giảm lực cản đáy, nhất là phương pháp làm vát đuôi có thể giúp giảm lực cản tới 50% cho tốc độ dưới âm và 12% cho tốc độ trên âm [7]. Thiết kế đuôi vát giúp thay đổi cấu trúc của xoáy sau vật và trong hầu hết các trường hợp các dòng xoáy có xu hướng nhỏ lại dẫn đến sự giảm lực cản. Mức độ giảm lực cản phụ thuộc nhiều vào kích thước hình học của đuôi vát và trạng thái của dòng chảy quanh vật. Điều này mở ra nhiều vấn đề nghiên cứu về cấu trúc hình học của đuôi vát nhằm đưa ra giải pháp tối ưu trong thiết kế, giúp giảm lực cản đáy của vật thể bay có đáy tù.

Các nghiên cứu về sử dụng đuôi vát trong giảm lực cản đáy của vật thể dạng tròn xoay đã được thực hiện nhiều trước đây cho dòng trên âm [6] – [10] cũng như dòng dưới âm [11] – [15]. Đuôi vát có thể được chia làm hai loại khác nhau, bao gồm: Đuôi vát đối xứng hình côn và đuôi vát dạng bất đối xứng có đáy hình tam giác, hình vuông hay kết hợp. Bằng kết quả thực nghiệm, Platou [8] đã phát hiện đuôi vát bất đối xứng đem lại kết quả tốt hơn, bao gồm: Giảm lực cản, giảm sự mất ổn định của mô-mem chúc góc và lực Magnus, dẫn đến nâng cao tính ổn định trong quá trình bay của đạn pháo, nhất là dạng đuôi vát có đáy hình tam giác có lực cản đáy nhỏ nhất. Nghiên cứu của Kayser và Sturek [9], Elawwad và cộng sự [10] đã khẳng định đuôi vát bất đối xứng có hiệu quả tốt trong giảm lực cản, cũng như nâng cao tính ổn định của đạn pháo. Tuy nhiên, hiện tượng dòng chảy quanh đuôi vát, phân bố trường vận tốc, áp suất chưa được phân tích cụ thể cho các trường hợp góc vát khác nhau. Do vậy, nhiều vấn đề về cấu trúc của đuôi vát cần được tiếp tục nghiên cứu nhằm đưa ra cái nhìn tổng quan về vấn đề này.

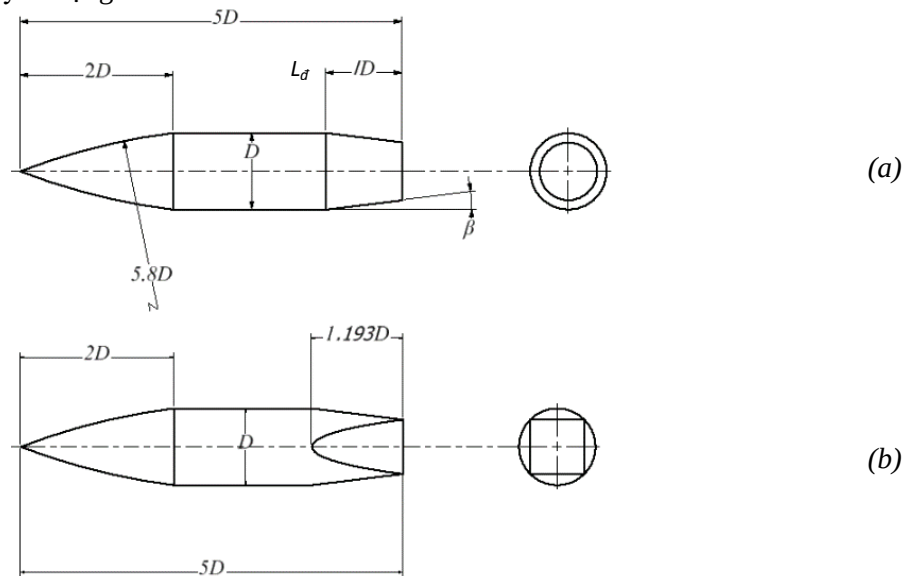
Trên cơ sở phân tích các nghiên cứu trước đây, nhóm tác giả tiến hành nghiên cứu về dòng chảy trên âm xung quanh đuôi vát của vật thể bay dạng tròn xoay bằng phương pháp mô phỏng số nhằm đưa ra cách nhìn toàn diện về hiệu quả của đuôi vát tới đặc tính khí động của mô hình. Nghiên cứu tập trung vào hai dạng hình học: Đuôi vát hình côn và đuôi vát có đáy hình vuông. Bên cạnh mô phỏng dòng chảy trên âm xung quanh vật thể bay dạng tròn xoay, nghiên cứu tập trung khảo sát sự tác động của góc vát lên lực cản khí động. Qua đó, kết quả nghiên cứu đã chỉ ra góc vát tối ưu cho đuôi vát hình côn nằm trong khoảng từ 7° đến 9° và xấp xỉ 9° cho đuôi vát có đáy hình vuông. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đó cho một số loại đạn pháo. Ngoài ra, nghiên cứu tập trung khảo sát sự ảnh hưởng của chiều dài đuôi vát và sự hình thành sóng xung kích tới dòng chảy xung quanh vật thể bay dạng tròn xoay có sử dụng đuôi vát. Qua đó đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo về sự ảnh hưởng của cấu trúc hình học đuôi vát tới dòng chảy quanh vật, làm cơ sở cho tối ưu hóa thiết kế đuôi vát sau này.

2. Phương pháp mô phỏng số

2.1. Mô hình nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng mô hình vật thể dạng tròn xoay sử dụng đuôi vát hình côn và đuôi vát có đáy hình vuông (Hình 1). Mô hình có đường kính $D = 57$ mm và chiều dài cố định $5D$. Mô hình có đuôi vát hình côn có chiều dài đuôi thay đổi $= 1D, 1,2D$ và $1,4D$. Góc vát của đuôi

vát hình côn được khảo sát tại $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 18^\circ$. Mô hình sử dụng đáy vát hình vuông có độ dài đuôi vát có đỉnh xấp xỉ $1,2 D$ và góc vát đuôi $\beta = 0^\circ, 4^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 14^\circ, 18^\circ$. Các mô hình được khảo sát tại vận tốc trên âm $M = 2$. Các điều kiện biên phù hợp với nghiên cứu trước đó của Platou [8]. Mô hình bài toán không tính đến chuyển động quay quanh trục chính trong quá trình chuyển động.



Hình 1. Mô hình nghiên cứu sử dụng cho (a): đuôi vát hình côn, (b): đuôi vát có đáy hình vuông

2.2. Mô hình rối và phương pháp giải

Trong nghiên cứu này, phương trình RANS với mô hình rối $k-\omega$ SST được áp dụng cho mô phỏng số. Mặc dù phương pháp RANS có giới hạn nhất định với tính chính xác của kết quả tính toán, phương pháp này vẫn được sử dụng trong các nghiên cứu gần đây [16] – [19]. Nhìn chung RANS cho kết quả tương đối chính xác với thời gian tính toán hợp lý. Để có được các phương trình RANS, các bộ lọc trung bình được áp dụng cho các phương trình Navier- Stokes, bao gồm: Phương trình liên tục, ba phương trình động lượng và phương trình năng lượng. Các phương trình đã được trình bày chi tiết trong nghiên cứu trước [15], [20]. Mô hình rối $k-\omega$ SST chứa hai phương trình rối bổ sung $k-\varepsilon$ và $k-\omega$ để mô phỏng các đặc tính rối [21], cho phép thu được kết quả chính xác cao về dòng chảy gần bề mặt vật thể và giảm thời gian tính toán trong mô phỏng số. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng phần mềm thương mại ANSYS Fluent bản quyền để mô phỏng. Thuật toán Couple đã được chọn với điều kiện hội tụ với sai số kép là 10^{-5} .

2.3. Chia lưới vùng thể tích tính toán

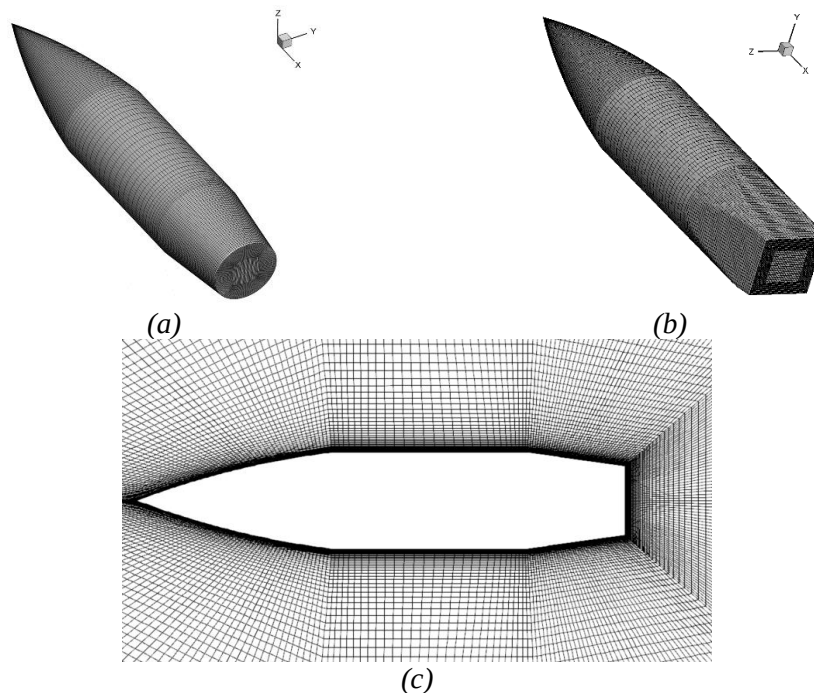
Vùng thể tích tính toán được chia lưới cấu trúc (structured mesh). Hình ảnh lưới trên bề mặt mô hình nghiên cứu được thể hiện trên Hình 2. Để phù hợp với mô hình rối $k-\omega$ SST ($y^+ < 1$), chiều dày lớp lưới đầu tiên từ bề mặt mô hình có độ cao 2×10^{-7} m với tỷ lệ tăng cho các lớp tiếp theo là 1,05.

Bảng 1. Ảnh hưởng của số lượng ô lưới tới hệ số lực cản

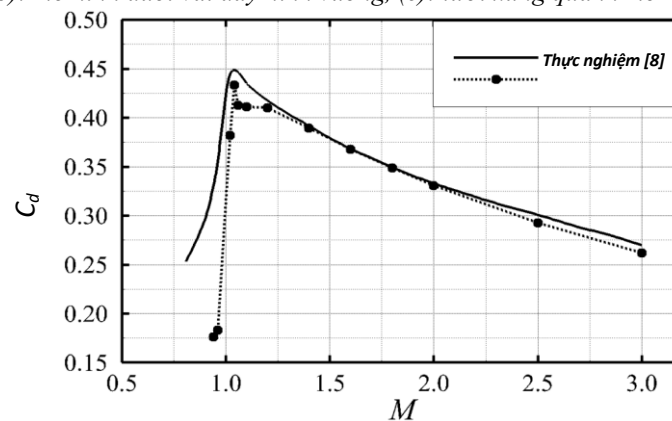
Số lượng ô lưới phần tử (triệu ô)	1,45	2,35	3,16	3,88	4,37
C_d (Đuôi vát hình côn)	0,3234	0,3200	0,3183	0,3183	0,3183
C_d (Đuôi vát đáy hình vuông)	0,3353	0,3325	0,3310	0,3311	0,3312

Nhóm nghiên cứu thực hiện kiểm tra lưới thông qua từng bước tăng số lượng ô lưới phần tử 1,44 triệu đến 4,40 triệu. Kết quả cho thấy giá trị C_d gần như không thay đổi khi số lượng ô lưới

đạt 3,16 triệu ô (Bảng 1). Do đó, lưới 3,16 triệu ô được lựa chọn nhằm bảo đảm tốt kết quả tính toán, và tiết kiệm thời gian tính toán. Kết quả mô phỏng số được kiểm nghiệm thông qua so sánh kết quả tính toán thực nghiệm hệ số lực cản C_d của mô hình có đuôi vát hình côn với góc vát 7° của Platou [8], mô hình tính toán cho kết quả tốt với sai số $\leq 3\%$ ở dải vận tốc trên âm (Hình 3). Tại dải vận tốc $M = 1,4 \div 2$, sai số gần như không đáng kể (Hình 3). Kết quả trên cho thấy mô hình tính toán có độ chính xác cao, bảo đảm cho việc thực hiện các tính toán cho các mô hình góc vát khác.



Hình 2. Lưới trên bề mặt mô hình nghiên cứu cho (a): mô hình đuôi vát hình côn, (b): mô hình đuôi vát đáy hình vuông, (c): lưới xung quanh mô hình

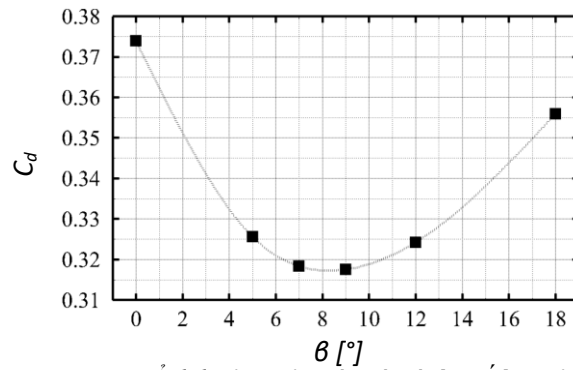


Hình 3. So sánh kết quả hệ số lực cản của mô phỏng số và thực nghiệm [8]

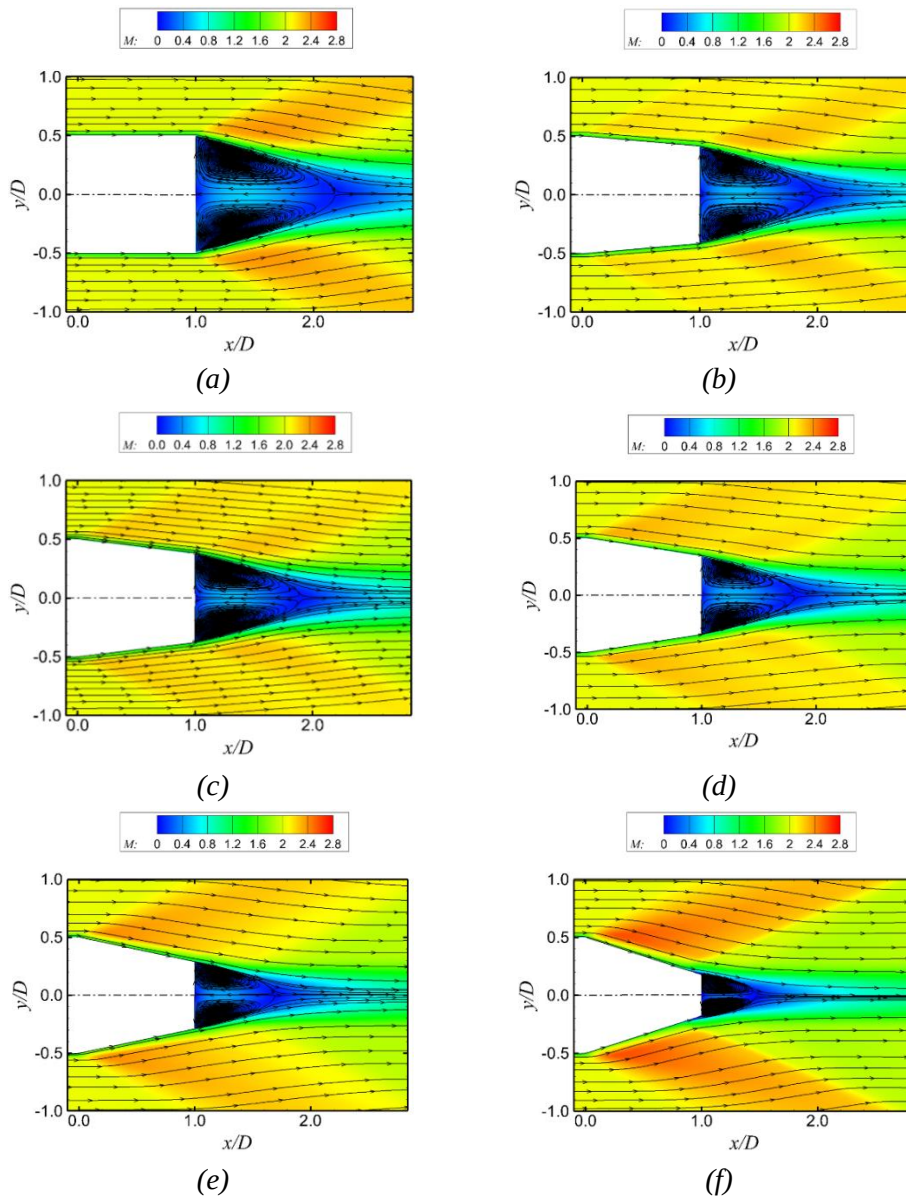
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Lực cản và dòng chảy quanh đuôi vát hình côn

Hình 4 đưa ra giá trị hệ số lực cản tại các góc vát khác nhau của mô hình sử dụng đuôi vát hình côn tại $M = 2$. Trong đó, góc vát tối ưu của đuôi vát hình côn nằm trong khoảng $7^\circ \div 9^\circ$. Kết quả mô phỏng phù hợp với kết quả của các nghiên cứu khác trên đạn pháo ở dải vận tốc trên âm [22].



Hình 4. Ảnh hưởng của góc vát tới hệ số lực cản

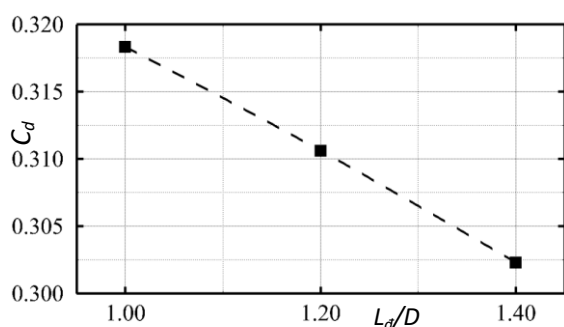


Hình 5. Đặc trưng dòng chảy quanh đuôi vát cho (a): $\beta = 0^\circ$, (b): $\beta = 5^\circ$, (c): $\beta = 7^\circ$, (d): $\beta = 9^\circ$, (e): $\beta = 12^\circ$, (f): $\beta = 18^\circ$

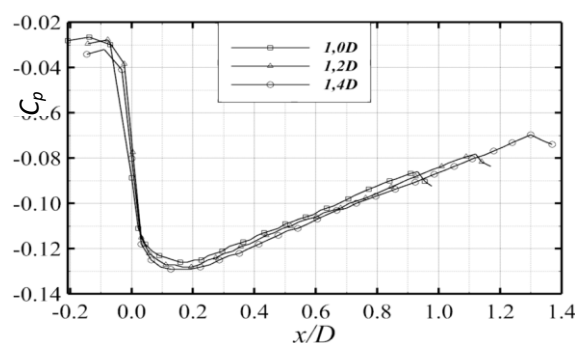
Phân bố dòng chảy quanh đuôi vát hình côn cho các trường hợp góc đuôi khác nhau tại $M = 2$ được trình bày tại Hình 5. Bởi vì phần mũi và thân của mô hình tương tự nhau, nghiên cứu tập trung vào dòng chảy xung quanh đuôi vát nhằm tìm hiểu đặc tính của dòng chảy tại các góc vát khác nhau. Có thể thấy rõ ràng, hai vùng xoáy đối xứng sau vật trở nên nhỏ dần khi góc vát tăng từ $0^\circ \div 18^\circ$, tương ứng với diện tích vùng đáy giảm dần. Tại góc vát 18° , vùng xoáy chụm lên trên bề mặt đuôi vát. Trong điều kiện trên âm, khu vực có tốc độ cao $M > 2$ xuất hiện từ đỉnh đuôi vát có xu hướng hẹp dần khi góc vát tăng. Hiện tượng xuất hiện “oblique shock” trong trường hợp góc vát $\beta > 9^\circ$, thay vì “expansion fan” trong các trường hợp góc vát nhỏ, khẳng định sự xuất hiện các vùng xoáy nhỏ trên bề mặt đuôi vát trong trường hợp góc vát lớn. Khi các vùng xoáy này càng lớn, lực cản sẽ càng tăng, đồng hành với sự xuất hiện khu vực sóng xung kích phía sau mép đáy có cường độ mạnh lên.

3.2. Ảnh hưởng của chiều dài đuôi vát tới lực cản

Để đánh giá ảnh hưởng của chiều dài đuôi vát, nhóm nghiên cứu thực hiện trường hợp góc vát $\beta = 7^\circ$. Các mô hình đuôi vát hình côn với chiều dài đuôi $L_d = 1D, 1,2D$ và $1,4D$ được đưa vào tính toán. Trong đó, tổng chiều dài và chiều dài phần mũi của mô hình không thay đổi. Kết quả cho thấy rằng, tại $\beta = 7^\circ$, khi tăng chiều dài phần đuôi vát, lực cản tác động lên vật thể bay giảm (Hình 6). Để hiểu rõ hơn, việc phân tích trường áp suất trên bề mặt đuôi trong 3 trường hợp được thực hiện.



Hình 6. Ảnh hưởng chiều dài đuôi vát đến hệ số khí động



Hình 7. Phân bố áp suất theo chiều dài đuôi vát

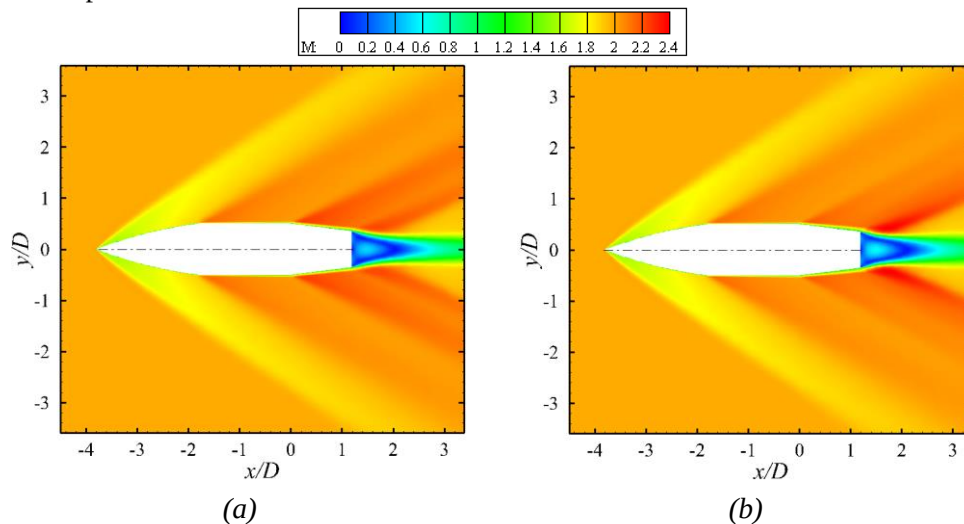
Hình 7 thể hiện sự phân bố áp suất trên đuôi vát hình côn với những chiều dài khác nhau. Có thể thấy rõ trong cả 3 trường hợp, sự giảm áp suất đột ngột tại điểm liên kết giữa thân và đuôi vát của vật thể bay. Giá trị hệ số áp suất ở phần sát mép đuôi vát rất nhỏ, trong khi diện tích đáy giảm khi tăng chiều dài đuôi là lý do giải thích sự giảm lực cản khi tăng chiều dài đuôi vát. Bên cạnh đó, có thể thấy rằng, khi chiều dài đuôi thay đổi, xu thế phân bố áp suất trên bề mặt đuôi vát không thay đổi. Hơn nữa, giá trị hệ số áp suất tại một vị trí trong cả 3 trường hợp đều gần bằng nhau. Do đó, ta có thể sử dụng kết quả phân bố áp suất của mô hình có chiều dài đuôi hình côn lớn để phân tích cho mô hình có chiều dài đuôi hình côn nhỏ. Kết quả nghiên cứu phù hợp với nhận định trước đó của Mair [4].

3.3. Phân bố sóng xung kích quanh mô hình

Nghiên cứu thực hiện so sánh sự hình thành sóng xung kích giữa đuôi vát hình côn và đuôi vát có đáy hình vuông. Trong cả hai trường hợp, độ dài đuôi L_d đều xấp xỉ bằng $1,2D$. Đối với đuôi vát có đáy hình vuông, sóng xung kích xuất hiện ngay cả trên bề mặt không có sự thay đổi về góc vát. Tại mặt phẳng vuông góc với bề mặt đáy, độ dài đường vát của đuôi vát đáy hình vuông tương đương với đuôi vát hình côn, sóng xung kích hình thành xung quanh mô hình nghiên cứu được thể hiện trên Hình 8 ở vận tốc trên âm $M = 2$.

Có thể thấy rằng, vị trí xuất hiện và góc độ sóng xung kích trong hai trường hợp đuôi vát hình côn và đuôi vát đáy hình vuông là giống nhau. Tuy nhiên, cường độ sóng xung kích xuất hiện

xung quanh đuôi vát trong 2 trường hợp khác nhau rõ rệt. Đối với đuôi vát đáy hình vuông, sóng xung kích xuất hiện ngay sau mép đáy của đuôi vát có cường độ mạnh hơn so với sóng xung kích tại cùng vị trí của đuôi vát hình côn. Điều này có thể phần nào giải thích cho hiện tượng tăng lực cản của đuôi vát đáy hình vuông ($C_d = 0,3310$) so với đuôi vát hình côn ($C_d = 0,3106$) có cùng chiều dài đuôi. Tuy nhiên, để làm rõ hơn vấn đề này, cần mở rộng trên các góc vát khác trong các nghiên cứu tiếp theo.



Hình 8. Sóng xung kích xung quanh mô hình nghiên cứu với $L_d = 1.2D$, $\beta = 7^\circ$, $M = 2$ cho (a): đuôi vát hình côn, (b): đuôi vát đáy hình vuông

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, dòng chảy trên âm xung quanh đuôi vát của vật thể dạng tròn xoay được khảo sát bằng phương pháp mô phỏng số. Thông qua xây dựng lưới cấu trúc cho thể tích tính toán kết hợp với sử dụng mô hình rối $k-\omega$ SST, mô hình nghiên cứu cho ra kết quả sát với kết quả thực nghiệm. Trên cơ sở đó, nhóm tác giả mở rộng nghiên cứu vào đuôi vát dạng hình côn và dạng bất đối xứng có đáy hình vuông với các góc vát khác nhau. Góc vát tối ưu được xác định trong khoảng $7^\circ \div 9^\circ$. Ngoài ra, nghiên cứu khảo sát sự ảnh hưởng của chiều dài đuôi tới lực cản của mô hình dạng tròn xoay. Kết quả bước đầu cho thấy khi tăng chiều dài đuôi, lực cản giảm đáng kể cho đuôi vát dạng hình côn có góc vát $\beta = 7^\circ$. Thêm vào đó, nghiên cứu chỉ ra khả năng sử dụng kết quả phân bố áp suất của mô hình có chiều dài lớn để phân tích cho mô hình có chiều dài đuôi nhỏ hơn. Cuối cùng, nghiên cứu thực hiện so sánh sự hình thành sóng xung kích xung quanh vật thể bay có đuôi vát hình côn và đuôi vát đáy hình vuông. Đối với đuôi vát có đáy hình vuông, sự gia tăng cường độ của sóng xung kích xuất hiện sau mép của đuôi vát có thể là nguyên nhân gây ra sự tăng lực cản của đuôi vát đáy hình vuông so với đuôi vát hình côn có cùng chiều dài đuôi. Các kết quả của nghiên cứu giúp định hướng mở rộng cho quá trình tối ưu thiết kế của đuôi vát của vật thể dạng tròn xoay giúp giảm lực cản và tăng tính ổn định khi chuyển động./.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] R. J. Krieger and S. R. Vukelich, "Tactical missile drag, tactical missile aerodynamics," *Prog. Astronautics Aeronautics*, AIAA, vol. 104, pp. 383-420, 1986.
- [2] P. R. Viswanath, "Flow management techniques for base and afterbody drag reduction," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 32, pp. 79-129, 1996.
- [3] K. S. Jagtap, K. Sundarraj, N. Kumar, S. Rajnarasimha, and P. S. Kulkarni, "Numerical Study of Base Drag Reduction Using Locked Vortex Flow Management Technique for Lower Subsonic Regime," *Int. J. Mech. Mechatronics Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 188-191, 2018.

- [4] W. A. Mair, "Drag reduction techniques for axisymmetric bluff bodies," in *Aerodynamic Drag Mechanisms of bluff and road vehicles*, Plenum Press, New York, 1978, pp. 161-178.
- [5] T. H. Tran, T. Ambo, T. Lee, L. Chen, T. Nonomura, and K. Asai, "Effect of boattail angles on the flow pattern on an axisymmetric afterbody surface at low speed," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 99, pp. 324-335, 2018.
- [6] M. Tanner, "Reduction of base drag," *Prog. Aerospace Sci.*, vol. 16, no. 4, pp. 369-384, 1975.
- [7] M. A. Suliman, O. K. Mahmoud, M. A. Al-Sanabawy, and O. E. Abdel-Hamid, "Computational investigation of base drag reduction for projectile at different flight regimes," *13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT-13*, Cairo, Egypt, May 26 – 28, 2009.
- [8] A. S. Platou, "Improved Projectile Boattail," *J. Spacecraft and Rockets*, vol. 12, no. 12, pp. 727-732, 1975.
- [9] E. Elawwad, A. Ibrahim, A. Elshabkaa, and A. Riad, "Flow computations past a triangular boattailed projectile," *Defence Technology*, vol. 16, no. 3, pp. 712-719, 2020.
- [10] L. D. Kayser and W. B. Sturek, "Aerodynamic Performance of Projectiles with Axisymmetric and Non-axisymmetric Boattails," ARBRL-MR-03022, US Army Ballistic Research Laboratory, 1980.
- [11] T. H. Tran, T. Ambo, T. Lee, Y. Ozawa, L. Chen, T. Nonomura, and K. Asai, "Effect of Reynolds number on flow behavior and pressure drag of axisymmetric conical boattails at low speeds," *Exp. Fluids*, vol. 60, no. 3, 2019, doi: 10.1007/s00348-019-2680-y.
- [12] T. H. Tran, "The Effect of Boattail Angles on the Near-Wake Structure of Axisymmetric Afterbody Models at Low-Speed Condition," *Int. J. Aerosp. Eng.*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/7580174.
- [13] T. H. Tran, T. Ambo, L. Chen, T. Nonomura, and K. Asai, "Effect of boattail angle on pressure distribution and drag of axisymmetric afterbodies under low-speed conditions," *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Space Sci.*, vol. 62, no. 4, pp. 219–226, 2019, doi: 10.2322/tjsass.62.219.
- [14] T. H. Tran, D. A. Le, T. M. Nguyen, C. T. Dao, and V. Q. Duong, "Comparison of Numerical and Experimental Methods in Determining Boundary Layer of Axisymmetric Model," in *International Conference on Advanced Mechanical Engineering, Automation and Sustainable Development*, Springer, Singapore, 2022, pp. 297–302.
- [15] T. H. Tran, C. T. Dao, D. A. Le, and T. M. Nguyen, "Numerical study for flow behavior and drag of axisymmetric boattail models at different Mach number," in *Regional Conference in Mechanical Manufacturing Engineering*, Springer, Singapore, 2022, pp. 729–741.
- [16] A. D. Le, T. H. Phan, and T. H. Tran, "Assessment of a Homogeneous Model for Simulating a Cavitating Flow in Water Under a Wide Range of Temperatures," *J. Fluids Eng.*, vol. 143, no. 10, p. 101204, 2021, doi: 10.1115/1.4051078.
- [17] A. D. Le and T. H. Tran, "Improvement of Mass Transfer Rate Modeling for Prediction of Cavitating Flow," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 15, no. 2, pp. 551–561, 2022.
- [18] A. D. Le, M. D. Binh, V. T. Hoang, and T. H. Tran, "Modified Savonius Wind Turbine for Wind Energy Harvesting in Urban Environments," *J. Fluids Eng.*, vol. 144, no. 8, 2022, doi: 10.1115/1.4053619.
- [19] V. M. Do, T. H. Tran, X. S. Bui, and D. A. Le, "Influence of Spike-Nosed Length on Aerodynamic Drag of a Wing-Projectile Model," *Adv. Mil. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 33–45, 2022.
- [20] T. H. Tran, H. Q. Dinh, H. Q. Chu, V. Q. Duong, C. Pham, and V. M. Do, "Effect of boattail angle on near-wake flow and drag of axisymmetric models: a numerical approach," *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 2, pp. 563–573, Feb. 2021, doi: 10.1007/s12206-021-0115-1.
- [21] F. R. Menter, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605, 1994.
- [22] R. M. Cummings, H. T. Yang and Y. H. Oh, "Supersonic, turbulent flow computation and drag optimization for axisymmetric afterbodies," *Computers and Fluids*, vol. 24, no. 4, pp. 487-507, 1994.