

A REVIEW OF FLOW CONTROL TECHNIQUES AROUND SUBSONIC FLIGHT VEHICLES: PASSIVE–ACTIVE CLASSIFICATION AND MODERN APPLICATION TRENDS

Pham Van Khiem*, Dinh Hoang Quan

Le Quy Don Technical University

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	29/11/2025	Flow control is a key aerodynamic tool for reducing drag, saving fuel, and extending the flight envelope of subsonic flight vehicles. This paper reviews recent developments in flow control around subsonic configurations, structured into passive and active techniques. The passive part covers low- and micro-profile vortex generators, bio-inspired leading-edge tubercles, micro-structured surfaces such as riblets and dimples, and passive morphing trailing-edge devices. The active part includes synthetic and micro jets, co-flow jets, steady blowing and suction, dielectric-barrier-discharge plasma actuators, and actively morphing lifting surfaces based on smart materials, together with modern closed-loop schemes using reduced-order models, cluster-based control, and deep reinforcement learning. Results from numerical simulations and wind-tunnel experiments are synthesized to compare these approaches in terms of aerodynamic effectiveness, energetic cost, system complexity, and integration potential. The paper concludes that hybrid passive–active concepts combined with data-driven control are a promising route toward “aerodynamically intelligent” subsonic flight vehicles.
Revised:	03/02/2026	
Published:	08/02/2026	
KEYWORDS		
Passive flow control		
Active flow control		
Aircraft		
Computational fluid dynamics		
Machine learning		

TỔNG QUAN VỀ ĐIỀU KHIỂN DÒNG CHẢY QUANH VẬT THỂ TẠI VẬN TỐC DƯỚI ÂM: THỤ ĐỘNG-CHỦ ĐỘNG VÀ XU HƯỚNG ỨNG DỤNG HIỆN NAY

Phạm Văn Khiêm*, Đinh Hoàng Quân

Học viện Kỹ thuật Quân sự

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	29/11/2025	Điều khiển dòng chảy là phương pháp quan trọng để giảm lực cản, tiết kiệm nhiên liệu và mở rộng điều kiện làm việc của các thiết bị bay dưới âm. Bài báo này trình bày tổng quan các phát triển gần đây về kỹ thuật điều khiển dòng chảy quanh cấu hình thiết bị bay dưới âm, được phân loại thành hai nhóm chính: thụ động và chủ động. Nhóm thụ động bao gồm thiết bị tạo xoáy VG dạng thấp và micro-VG, u lồi mép trước lấy cảm hứng từ tự nhiên, bề mặt vi cấu trúc như gân, hốc lõm, cùng các cấu hình biến hình thụ động ở mép sau. Nhóm chủ động gồm luồng phụt, thổi/hút lớp biên, bề mặt nâng biến hình chủ động và các kỹ thuật điều khiển vòng kín hiện đại dựa trên mô hình giảm bậc, điều khiển phân cụm và học tăng cường sâu. Trên cơ sở tổng hợp kết quả mô phỏng và thí nghiệm, bài báo cho rằng các cấu hình lai thụ động-chủ động kết hợp điều khiển dựa trên dữ liệu là hướng hứa hẹn cho thế hệ thiết bị bay dưới âm về mặt khí động.
Ngày hoàn thiện:	03/02/2026	
Ngày đăng:	08/02/2026	
TỪ KHÓA		
Điều khiển thụ động		
Điều khiển chủ động		
Máy bay		
Tính toán khí động lực học		
Học máy		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.14113>

* Corresponding author. Email: pvkhiem@lqdtu.edu.vn

1. Giới thiệu

Điều khiển dòng chảy quanh thiết bị bay dưới âm (máy bay chở khách, UAV, trực thăng, cánh quạt quay chậm, v.v.) là một trong những biện pháp quan trọng để tăng lực nâng, giảm lực cản, mở rộng đường bao bay, giảm rung động kết cấu và tiếng ồn mà không cần thay đổi triệt để cấu hình khí động cơ bản [1] – [4]. Các tổng quan cổ điển về điều khiển dòng chảy đã hình thành khung phân loại mục tiêu điều khiển như trì hoãn chuyển tiếp, hạn chế tách lớp biên, giảm lực cản ma sát, giảm tiếng ồn và tăng cường trộn, đồng thời nhấn mạnh vai trò của các cơ chế thụ động và chủ động trong việc đạt được các mục tiêu này [1] – [3], [5], [6].

Ở góc nhìn phương pháp, điều khiển thụ động dựa trên thay đổi hình học hoặc tính chất bề mặt (các dạng thiết bị tạo xoáy, gân, đuôi vát, v.v.) đã chứng minh hiệu quả cao trong các cấu hình có vị trí tách dòng lớp biên gần như cố định, với ưu điểm là đơn giản, tin cậy và không tốn năng lượng bổ sung [1], [5]. Điều khiển chủ động sử dụng các cơ cấu chấp hành cung cấp động lượng, mô men hoặc xoáy có điều tiết (thổi/hút tuần hoàn, luồng tổng hợp, plasma, cơ cấu biến hình, cánh tà điều khiển độc lập, v.v.) cho phép điều chỉnh theo điều kiện bay, nhưng đối mặt với các ràng buộc về năng lượng, độ bền, tích hợp kết cấu và độ phức tạp của hệ thống điều khiển [3], [4], [6] – [8].

Trong hai thập kỷ gần đây, các nghiên cứu tổng quan về điều khiển dòng chảy đã chỉ rõ khoảng cách giữa kết quả thí nghiệm/mô phỏng với ứng dụng thực tế trên máy bay vận tải và UAV, cũng như nhu cầu xây dựng chuỗi mô hình giảm bậc, thiết kế điều khiển và kiểm chứng mô phỏng số CFD/thí nghiệm một cách nhất quán [4], [7] – [10]. Sự phát triển của các cơ cấu chấp hành có khả năng tích hợp trên cánh, cánh tà, cánh quạt và rotor, đặc biệt là các hệ plasma và luồng điều chế tần số, đã mở ra khả năng điều khiển dòng chảy gắn liền với yêu cầu về biên dạng lực và mô men của thiết bị bay [7] – [11]. Song song, các nghiên cứu tổng quan gần đây về điều khiển vòng kín trong chảy rối và điều khiển dòng chảy cho UAV, vai trò của mô hình dữ liệu, học máy và tối ưu hóa trong thiết kế bộ điều khiển thực thi được trên cấu hình khí động phức tạp ngày càng được nhấn mạnh, từ đó tạo nền tảng cho các nghiên cứu tập trung vào thiết bị bay dưới âm từ 2000 đến nay [9], [10], [12], [13].

Mặc dù trên thế giới đã có các bài tổng quan kinh điển về điều khiển dòng chảy [1], [2], [5], tuy nhiên đa số các công trình này thường phân tách riêng rẽ giữa các biện pháp thụ động và chủ động, hoặc tập trung sâu vào cơ chế vật lý cơ bản mà chưa cập nhật đầy đủ xu hướng giao thoa với các kỹ thuật trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy hiện đại. Đặc biệt, trong bối cảnh phát triển mạnh mẽ của các phương tiện bay không người lái tại Việt Nam, hiện vẫn thiếu một tài liệu tổng hợp có tính hệ thống nhằm đánh giá tính khả thi khi tích hợp các công nghệ phức tạp lên các nền tảng bay cỡ nhỏ bị giới hạn về năng lượng. Bài báo này được thực hiện nhằm lấp đầy khoảng trống nghiên cứu đó, thông qua việc phân loại hệ thống, so sánh định lượng hiệu quả giữa các phương pháp và chỉ ra tiềm năng của cấu hình lai kết hợp với điều khiển dữ liệu cho thế hệ thiết bị bay dưới âm tại Việt Nam trong tương lai.

2. Phương pháp nghiên cứu

Điều khiển dòng chảy quanh thiết bị bay dưới âm là một lĩnh vực còn tương đối mới, đặc biệt tại Việt Nam. Các kết quả trên thế giới rất đa dạng, trải rộng từ lý thuyết, mô phỏng số đến thí nghiệm và ứng dụng trên cấu hình thực. Do đó, trong bài báo tổng quan này, chúng tôi sử dụng chủ yếu các phương pháp nghiên cứu sau:

Phân tích tài liệu: tiến hành thu thập và đánh giá có hệ thống các công trình đã công bố trên các cơ sở dữ liệu quốc tế (Scopus, Web of Science, các tạp chí thuộc SCI/SCIE) và một số nguồn trong nước. Phương pháp này giúp nhận diện bức tranh chung về mức độ phát triển của các phương pháp điều khiển dòng chảy thụ động và chủ động cho thiết bị bay dưới âm.

Phạm vi khảo sát: Tập trung vào khoảng 50 công trình tiêu biểu được công bố chủ yếu trong giai đoạn từ năm 2000 đến 2025 để đảm bảo tính thời sự. Các lý thuyết nền tảng (trước năm 2000) được chọn lọc để giải thích cơ chế vật lý.

Tiêu chí lựa chọn: Các nghiên cứu được chọn phải thỏa mãn điều kiện áp dụng cho vận tốc dưới âm ($M < 0,8$) và số Reynolds trung bình-thấp (trong khoảng 10^4 - 10^6), phù hợp với các thiết bị bay không

người lái cỡ nhỏ và vừa. Các nghiên cứu về vận tốc lớn hoặc dòng chảy trong ống dẫn công nghiệp bị loại trừ để đảm bảo tính tập trung của bài tổng quan.

Phân tích nội dung: các tài liệu sau khi sàng lọc được xem xét sâu hơn theo các tiêu chí: loại phương pháp điều khiển (thụ động/chủ động, vòng hở/vòng kín), cấu hình ứng dụng (cánh, đuôi, UAV, cánh quạt...), công cụ nghiên cứu (thí nghiệm, phương pháp mô phỏng số, mô hình dữ liệu) và các chỉ tiêu đánh giá hiệu quả. Qua đó xác định các hướng tiếp cận chính và những xu thế nổi bật.

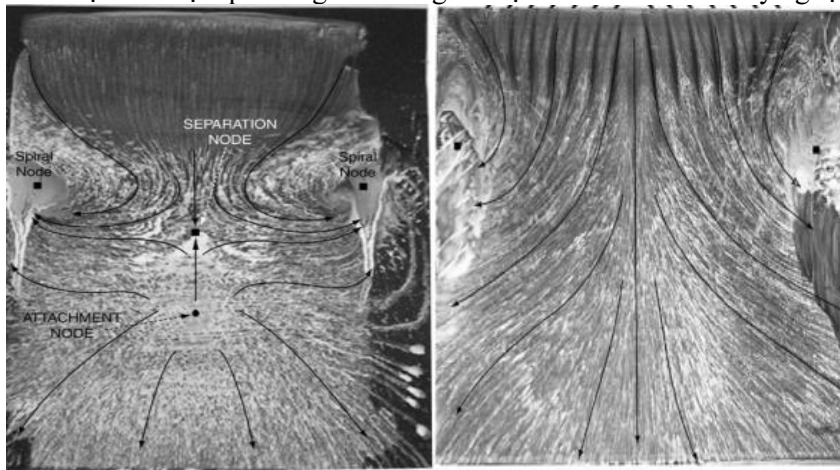
Phân tích, tổng hợp hệ thống: kết quả phân tích được tổng hợp lại theo các nhóm phương pháp, làm rõ mối liên hệ giữa cơ sở vật lý, công nghệ chấp hành, chiến lược điều khiển và khả năng ứng dụng thực tế. Cách tiếp cận này cho phép xây dựng một cái nhìn toàn diện về lĩnh vực điều khiển dòng chảy quanh thiết bị bay dưới âm, đồng thời chỉ ra khoảng trống nghiên cứu và các hướng phát triển tiềm năng.

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Điều khiển dòng chảy thụ động

3.1.1. Thiết bị tạo xoáy (Vortex generators -VGs) và vi thiết bị tạo xoáy (micro-VGs)

Thiết bị tạo xoáy VG là thiết bị điều khiển thụ động dòng chảy cổ điển, nó tạo ra các xoáy dọc dòng đưa động lượng từ vùng ngoài lớp biên vào gần bề mặt vật thể, giúp hạn chế hiện tượng tách dòng lớp biên trong điều kiện gradient áp suất bất lợi. Tổng quan của Lin [5] về các thiết bị tạo xoáy độ cao nhỏ chỉ ra rằng loại VG cao 0,1-0,5 bề dày lớp biên có thể tái gắn dòng chảy hiệu quả với tổn thất về lực cản nhớt rất nhỏ, giúp cho thiết bị này phù hợp với ứng dụng thực tế trên cánh và cánh tà. Hình 1 minh họa vai trò của các thiết bị tạo xoáy trong việc điều khiển đặc trưng dòng chảy. Ở đây, các tác giả so sánh trực quan cấu trúc dòng chảy bề mặt trong hai trường hợp. Ở hình bên trái (không có VG), vùng tách dòng xuất hiện quy mô lớn lớn (mảng tối) với các cấu trúc dòng phức tạp gồm điểm tách và các tiêu điểm xoáy ốc, biểu thị trạng thái mất năng lượng và thất tốc cục bộ. Ngược lại, ở hình bên phải (có VG), các đường dòng trở có hình dáng mượt hơn, đồng hướng và tái gắn hoàn toàn vào bề mặt. Điều này chứng minh cơ chế cấp năng lượng của VG đã triệt tiêu hiệu quả vùng tách dòng và loại bỏ các cấu trúc xoáy ngược bất lợi [5].



Hình 1. Dòng chảy bề mặt khi không có VG và có VG, (ghi chú: Separation Node: điểm tách dòng; Attachment Node: điểm tái gắn dòng; Spiral Node: điểm xoáy ốc) [5]

Trong các ứng dụng của thiết bị bay hiện đại tại vận tốc dưới âm, VGs xuất hiện dày đặc trên cánh máy bay thương mại, UAV, cánh quạt. Akhter và cộng sự [12] đã nghiên cứu tổng quan các thiết bị điều khiển trên cánh quạt, nhóm tác giả đã chỉ ra rằng VG truyền thống, micro-VG thụ động đều được dùng để trì hoãn hiện tượng thất tốc, giảm tải động và mở rộng dải vận tốc gió làm việc.

Kết quả chính và xu hướng phát triển, VG truyền thống có dạng cánh nhỏ dạng delta/V trên cánh tà hoặc vùng gốc cánh giúp tăng hệ số lực nâng tối đa $C_{L,max}$ thêm 10-30% tùy cấu hình, đổi lại hệ số lực nâng C_D tăng ít, do đó VG đặc biệt thích hợp cho trường hợp cất và hạ cánh [5], [12]. Ngoài ra micro-VGs với chiều cao nhỏ hơn nhiều so với độ dày lớp biên tỏ ra hiệu quả đặc biệt trong ở số Reynolds

thấp, nơi hiện tượng bong bóng tách dòng tăng dễ xuất hiện; từ đó ở chế độ hành trình của thiết bị bay thì lực cản bị giảm đáng kể [5].

3.1.2. Thiết kế phỏng sinh học dạng u lồi tại mép trước

U lồi dạng “gợn sóng” trên mép trước lấy cảm hứng từ vây cá voi lưng gù, được chứng minh có thể làm mượt đường cong lực nâng và trì hoãn thất tốc ở góc tấn lớn. Một loạt nghiên cứu gần đây đánh giá cao hiệu quả của u lồi trên biên dạng của lá cánh cánh quạt và cánh thiết bị bay ở số Reynolds trong khoảng 10^5 – 10^6 , cho thấy sự phù hợp của thiết kế này đối với thiết bị bay dưới âm cỡ nhỏ và vừa.

Wang và cộng sự [14] nghiên cứu u lồi dạng cầu trên mép trước biên dạng cánh và thấy rằng biên dạng này có thể trì hoãn thất tốc và giảm độ dốc lực nâng sau thất tốc, đồng thời giúp cải thiện độ ổn định lực nâng trong điều kiện gió giật. Zadorozhna và cộng sự [15] thực hiện khảo sát tham số của cấu hình sắp xếp u lồi như chiều cao và bước của u lồi, đã chỉ ra rằng tồn tại vùng tham số tối ưu nơi hệ số lực nâng tối đa tăng lên nhưng hệ số lực cản không tăng đáng kể so với góc tấn hành trình. Nghiên cứu mô phỏng số của Sathyabhama và cộng sự [16] bằng mô phỏng xoáy lớn cho thấy cơ chế của hiện tượng này chính là sự phân mảnh vùng tách dòng lớp biên và tạo các ống dòng bám dọc mép trước.

Trong thiết bị bay dưới âm, u lồi có thể cho phép bay ở góc tấn lớn hơn, giảm hiện tượng thất tốc bất chợt, do đó điều này giúp UAV phù hợp cho nhiệm vụ trinh sát tốc độ thấp. Trên cánh quạt, u lồi giúp giảm dao động tải theo chu kỳ gió góp phần giảm mỏi kết cấu [14], [15].

3.1.3. Bề mặt cấu trúc dạng gân, hốc lõm và vi cấu trúc

Gân là các rãnh nhỏ song song với chiều dòng chảy và dạng cấu trúc này đã được biết tới từ lâu trong việc giảm lực cản nhớt. García-Mayoral và Jiménez [17] cho thấy các gân có thể giảm lực cản nhớt tới 8-10% nếu kích thước gân được chọn phù hợp với kích thước đặc trưng tại vùng gần bề mặt. Ngoài ra, hốc lõm kiểu bề mặt bóng golf được nghiên cứu để điều chỉnh cấu trúc lớp biên trên bề mặt vật thể. Ali và cộng sự [18] cho thấy việc tối ưu phân bố hốc lõm trên thân thiết bị bay dạng cánh liền thân có thể giảm lực cản ma sát tổng thể của thiết bị bay. Cơ chế điều khiển dòng chảy của các hốc lõm là nó tạo các xoáy nhỏ giúp phá vỡ bong bóng tách dòng tầng và thúc đẩy hiện tượng chuyển tiếp giữa chảy tầng và chảy rối một cách có kiểm soát nhằm tránh hiện tượng thất tốc sớm.

Tổng quan trên cánh quạt của Akhter cho thấy các giải pháp tạo vi cấu trúc trên bề mặt như tạo gân, hốc lõm, các vùng gồ ghề được xem là các biện pháp hỗ trợ cho các phương pháp mạnh hơn như sử dụng thiết bị tạo xoáy VG hoặc cánh tà, nhất là khi bị giới hạn bởi chi phí và bảo trì [12], [17], [18].

3.1.4. Cánh biến hình thụ động và các thiết bị trên mép trước của cánh thiết bị bay

Cánh biến hình thụ động sử dụng cấu trúc đàn hồi, cho phép cánh hoặc mép sau cánh tự biến dạng dưới tải khí động. Sofla và cộng sự [19] đã nghiên cứu tổng quan các ý tưởng cánh biến hình và đã cho thấy rằng kỹ thuật biến hình thụ động phù hợp nhất với bài toán tối ưu hiệu suất quanh một điểm làm việc vì hình dạng được tự điều chỉnh thụ động theo tải. Barbarino và cộng sự [20] nhấn mạnh rằng nhiều thiết kế cánh biến hình dùng vật liệu composite, cấu trúc sandwich, cho phép phân bố độ cứng theo bề mặt cánh, làm cho mép sau mềm hơn mép trước. Đối với thiết bị bay dưới âm, đặc biệt cánh quạt và UAV cỡ nhỏ thì cánh biến hình thụ động ở mép sau giúp giảm tải cực đại trong gió giật bằng cách tự xòe mép sau của cánh quạt. Daynes và Weaver [13] nghiên cứu tổng quan về biến hình mép sau của cánh quạt, cho thấy các cấu hình cánh tà mềm có thể giảm giá trị tải cực đại và kéo dài tuổi thọ cấu trúc mà không cần cơ cấu chấp hành phức tạp.

Nhìn chung, phương pháp thụ động có ưu điểm là đơn giản, tin cậy, không cần nguồn năng lượng, dễ chấp nhận trên thiết bị bay thương mại. Tuy nhiên, chúng khó điều chỉnh theo chế độ bay và thường tối ưu cho một vùng nhỏ trong chế độ làm việc [1], [3] – [5], [12].

3.2. Điều khiển dòng chảy chủ động (AFC–Active Flow Control)

3.2.1. Luồng phụt tổng hợp và vi luồng phụt

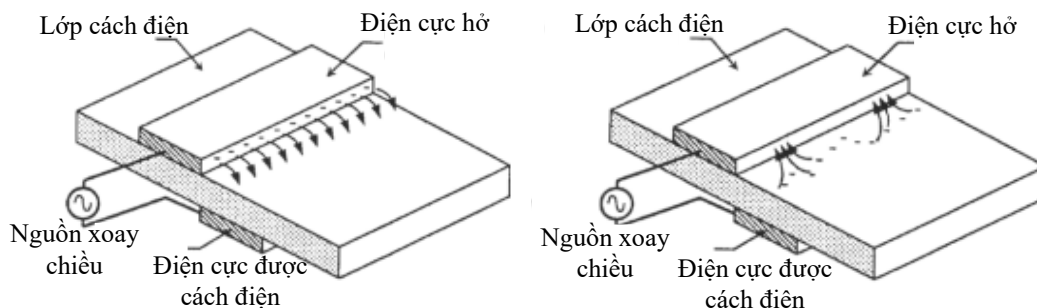
Luồng phụt tổng hợp là dạng luồng không có lưu lượng trung bình cố định, được tạo bởi dao động màng/pít tông trong khoang kín, hút thổi tuần hoàn qua một khe [21], [22]. Glezer và Amitay [21] cho thấy luồng tổng hợp có thể tạo xung đủ mạnh để không chế tách dòng lớp biên, làm lệch dòng mà không cần hệ thống đường ống khí nén. Smith và Glezer [22] mô tả chi tiết cơ chế hình thành xoáy đôi và tiêu tán, cung cấp cơ sở thiết kế tần số và biên độ điều khiển. Amitay và cộng sự [23] đã áp dụng luồng tổng hợp lên các biên dạng cánh kiểu mới và chứng minh có thể tăng lực nâng đáng kể ở giai đoạn sau thất tốc, đồng thời giúp điều chỉnh mô men chúc ngóc. Zaman [24] khảo sát ảnh hưởng của luồng tổng hợp trong dòng chéo, đưa ra các đại lượng không thứ nguyên như chiều dài stroke, thông lượng mô men, rất hữu ích cho việc mở rộng từ mô hình phòng thí nghiệm lên thiết bị bay. Trong giai đoạn sau 2010, Ho và cộng sự tổng hợp một lượng lớn kết quả về luồng tổng hợp bao gồm các ứng dụng trên mini-UAV, cánh quạt, cánh tà tăng lực nâng và chỉ ra rằng tần số điều khiển tối ưu thường liên quan tới tần số đặc trưng của bong bóng tách dòng vortex shedding. Luồng tổng hợp hoạt động hiệu quả đặc biệt ở số Reynolds trung bình 10^5 - 10^6 , phù hợp thiết bị bay dưới âm cỡ vừa [25], [26].

Ưu điểm lớn của luồng tổng hợp là không cần nguồn khí ngoài, dễ tích hợp vào cánh hoặc cánh tà [21], [25] và có thể hoạt động ở tần số cao, phù hợp điều khiển dòng không dừng. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi cơ cấu chấp hành tần số cao, bền, nhẹ; Cattafesta và Sheplak [7] cho thấy vấn đề độ bền, hiệu suất điện-khí là rào cản lớn khi chuyển từ phiên bản demo sang ứng dụng bay thực tế.

3.2.2. Cơ cấu chấp hành plasma điện môi (Plasma actuator Dielectric barrier discharge–DBD)

Cơ cấu chấp hành plasma điện môi (DBD) tạo ra lực điện gần bề mặt, có thể coi như là một dòng phụt với tốc độ vài m/s và trở nên đặc biệt hữu ích ở số Reynolds trung bình-thấp [8], [27]. Nghiên cứu tổng quan của Moreau cho thấy DBD có thể khởi phát hiện tượng chuyển tiếp chảy tầng sang chảy rối, làm suy yếu hoặc trì hoãn tách dòng, đồng thời có lợi thế là không có phần chuyển động [27]. Corke và cộng sự [8] phân tích chi tiết thiết kế điện cực, tần số kích hoạt, điện áp, và hiệu suất năng lượng. Hình 2 minh họa sơ đồ lắp đặt bộ truyền động plasma để điều khiển dòng chảy. Khi cấp nguồn xoay chiều điện áp cao, không khí tại mép điện cực hở bị ion hóa, sinh ra lực thể tích điện-thủy động lực học. Lực này tạo ra luồng ion thổi tiếp tuyến dọc bề mặt, giúp bổ sung động lượng cho lớp biên và trì hoãn hiện tượng tách dòng lớp biên một cách hiệu quả [27].

Gần đây, các nghiên cứu đã chuyển trọng tâm sang ứng dụng thực tế hơn, Ricoy-Zárate và cộng sự [28] dùng DBD trên cánh quạt để giảm dao động tải và ồn khí động, mô phỏng và thí nghiệm chỉ ra khả năng áp dụng cho cánh quạt thực tế nếu giải quyết được vấn đề cấp điện, làm mát và độ bền bề mặt. Ưu điểm của phương pháp này là không có phần cơ khí chuyển động, trọng lượng nhỏ, phản ứng nhanh. Tuy nhiên nhược điểm là hiệu quả lực tác dụng còn hạn chế, nhạy với điều kiện môi trường và về lâu dài phải giải quyết vấn đề suy giảm chất lượng vật liệu điện môi [8], [27], [28].



Hình 2. Sơ đồ lắp đặt bộ truyền động plasma [27]

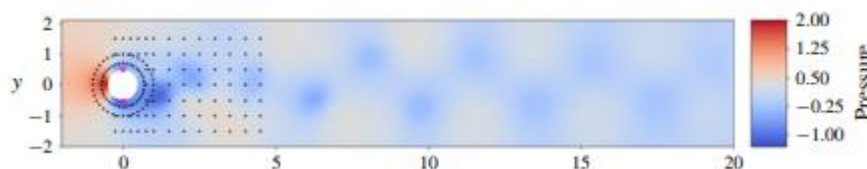
3.2.3. Biến hình chủ động và các thiết bị biến hình

Biến hình chủ động sử dụng vật liệu thông minh như gốm áp điện (piezoceramic) và kiến trúc composite để tạo ra biên dạng hình học có điều khiển. Sofla và cộng sự [19], Barbarino và cộng sự [20] đã nghiên cứu tổng quan về các phương pháp biến hình như thay đổi độ cong, góc vắn, sai cánh và dây cung biên dạng cánh, các tác giả này nhấn mạnh hiệu quả đặc biệt cho thiết bị bay dưới âm nơi yêu cầu về góc tấn và tải thay đổi rộng giữa các giai đoạn cất/hạ cánh, hành trình và cơ động. Trên cánh quạt, kỹ thuật biến hình chủ động mép sau của cánh cho phép giảm giá trị tải cực đại trong điều kiện thời tiết khắc nghiệt như gió bão, giới hạn mỏi của kết cấu [13]. Trong lĩnh vực hàng không, Khalil và cộng sự [29] phân tích các thiết bị điều khiển chủ động để giảm tải trọng cánh, bao gồm cánh tà biến hình và các cơ cấu chấp hành chủ động khác, kết quả cho thấy có thể giảm đáng kể tải cực đại nhờ điều khiển theo gió giật. Nhìn chung, biến hình chủ động được xem là giải pháp kết hợp giữa khí động, cấu trúc và điều khiển, phù hợp cho thiết bị bay dưới âm hiện đại, nhưng cần giải quyết độ bền cấu trúc, hiệu quả trong thực tế, và chi phí bảo dưỡng [13], [19], [20], [29].

3.2.4. Điều khiển vòng kín, điều khiển phân cụm và học tăng cường sâu (Deep Reinforcement Learning - DRL)

Khi bước sang thế hệ thiết bị bay mới, trọng tâm không chỉ là cơ cấu chấp hành mà còn là phương pháp điều khiển. Brunton và Noack [9] nghiên cứu tổng quan sự phát triển của điều khiển vòng kín trong dòng chảy rối, nhấn mạnh nhu cầu ứng dụng mô hình giảm bậc (ROM), cảm biến thông minh, và các phương pháp điều khiển phi tuyến trong điều khiển dòng chảy hiện đại.

Một hướng nổi bật là điều khiển phân cụm (cluster-based control), Nair và cộng sự [30] xây dựng chiến lược phân cụm trạng thái dòng chảy qua biên dạng cánh sau thất tốc và xây dựng luật điều khiển dựa trên xác suất chuyển trạng thái. Kaiser và cộng sự [31] mở rộng phương pháp này cho dòng tách trên bề mặt dốc và chỉ ra rằng mô hình Markov trên không gian cụm có thể được sử dụng hiệu quả để tối ưu hóa điều khiển. Wang và cộng sự [32] áp dụng điều khiển phân cụm để giảm lực cản cấu hình cụm trụ tròn tam giác bằng nhiều cơ cấu chấp hành, chứng minh khả năng mở rộng sang hệ đa chấp hành. Từ năm 2018 trở lại đây, học tăng cường sâu (DRL) trở thành công cụ nổi bật cho điều khiển dòng chảy, Rabault và cộng sự [33] chứng minh rằng mạng nơ-ron được huấn luyện bằng DRL có thể học chiến lược điều khiển quay xi lanh nhằm giảm lực cản mà không cần mô hình rõ ràng. Xu và cộng sự [34] áp dụng DRL để xoay xi lanh trong dòng chảy nhằm giúp giảm lực cản và ổn định dòng chảy sau đuôi vật. Kim và cộng sự [35] nghiên cứu tổng quan về ứng dụng DRL trong cơ học chất lỏng, đã chỉ ra các ứng dụng từ điều khiển dòng sau vật, đối lưu Rayleigh-Bénard tới tối ưu hình dạng. Rabault và cộng sự [33] cung cấp một tổng quan chuyên sâu về ứng dụng của DRL cho điều khiển dòng chảy, chỉ ra các vấn đề về ổn định, chi phí tính toán và chuyển giao từ mô phỏng sang thí nghiệm. Hình 3 mô tả cách thiết lập các cảm biến để lưu dữ liệu phục vụ quá trình huấn luyện học sâu, các điểm đen bố trí sau vật thể đại diện cho mạng lưới cảm biến có nhiệm vụ thu thập dữ liệu trường áp suất hoặc vận tốc dòng chảy làm đầu vào cho thuật toán. Dựa trên dữ liệu này, tác nhân thông minh sẽ điều khiển hai cơ cấu chấp hành (vị trí màu hồng trên trụ) để thay đổi trường áp suất (thang màu bên phải), nhằm triệt tiêu hiện tượng tách dòng xoáy và giảm thiểu lực cản [33].



Hình 3. Thiết lập môi trường mô phỏng phục vụ cho học sâu, Pressure là thang đo áp suất không thứ nguyên. Màu đỏ thể hiện vùng áp suất cao, màu xanh là áp suất thấp [33]

Wang và cộng sự [36], Vignon và cộng sự [37] đã áp dụng DRL để giảm lực cản vật thể tù, điều khiển dòng chảy quanh trụ với dữ liệu đo áp suất hạn chế, tối ưu hình dạng trực tiếp, cho thấy tiềm năng tích hợp của phương pháp này trên thiết bị bay trong tương lai. Đối với các thiết bị bay dưới âm, các

biện pháp này mới đang ở mức ý tưởng như điều khiển cánh tà của UAV, giảm lực cản cho cấu trúc đơn giản. Nhưng xu thế rõ ràng là kết hợp điều khiển chủ động, cảm biến và học tăng cường sâu, điều khiển phân cụm để tạo ra các hệ điều khiển dòng chảy vòng kín, tự thích nghi [9], [30], [31], [33], [34], [37].

3.3. Ứng dụng thực tế trên thiết bị bay dưới âm

3.3.1. Đuôi đứng và bề mặt điều khiển máy bay vận tải

Một chương trình áp dụng điều khiển chủ động quy mô lớn là với đuôi đứng của máy bay vận tải. Lin và cộng sự [5] tổng kết chương trình phát triển hệ thống điều khiển chủ động cho đuôi đứng, với mục tiêu giảm diện tích đuôi mà vẫn đảm bảo khả năng điều khiển hướng trong trường hợp mất động cơ. Hệ thống sử dụng luồng và luồng tổng hợp bố trí dọc mép trước, kết hợp thiết kế lại hình học đuôi. Trong các thử nghiệm quy mô thực tế, Whalen và cộng sự [38] cho thấy điều khiển chủ động có thể nâng cao hiệu quả đuôi đứng, cho phép giảm diện tích từ đó giảm lực cản hành trình. Kết quả chỉ ra rằng đối với một số cấu hình có thể giảm tới 17–20% diện tích đuôi với AFC mà vẫn đảm bảo yêu cầu điều khiển trong các trường hợp bất lợi. AFC thể hiện vai trò hoạt động khi góc lệch cánh lái đứng có giá trị lớn, nơi dòng dễ bị tách khỏi lớp biên. Điều này mở ra khả năng thiết kế đuôi nhỏ hơn nhưng hiệu quả hơn trên máy bay vận tải dưới âm trong tương lai [29].

3.3.2. UAV và Micro-UAV

Đối với UAV và MAV dưới âm, số Reynolds thường có giá trị thấp (10^4 – 10^6), dòng dễ gặp hiện tượng tách dòng lớp biên tầng, thất tốc sớm. Các phương pháp phù hợp với dải số Reynolds này bao gồm máy tạo xoáy nhỏ micro-VGs, hốc lõm do các cơ cấu này giúp hạn chế hiện tượng bong bóng tách dòng tầng và giảm độ nhạy với các nhiễu tác động từ bên ngoài [5], [12], [18]. Ngoài ra, các luồng tổng hợp có thể được áp dụng trên cánh như đã được đề cập đến trong công trình của Amitay và cộng sự [23] đã chứng minh khả năng tăng lực nâng và nâng cao độ ổn định cho máy bay cỡ nhỏ. DBD plasma có kích thước nhỏ và yêu cầu lực điều khiển không quá lớn nên rất phù hợp cho MAV mặc dù cần giải quyết vấn đề cấp điện cho các cơ cấu chấp hành kiểu này [8], [27]. Kết quả chung cho thấy kết hợp điều khiển dòng chảy thụ động và chủ động là chiến lược hợp lý khi chúng ta có thể sử dụng VG/bề mặt gân/hốc lõm tạo nên, còn cơ cấu plasma và luồng tổng hợp giúp xử lý các hiện tượng khí động phức tạp hơn liên quan đến góc tấn lớn và gió giật.

3.4. Điều khiển dòng chảy quanh vật thể bay tại Việt Nam

Như đã phân tích ở các phần trên, xu hướng thế giới đang chuyển dịch mạnh mẽ sang các hệ thống điều khiển chủ động thông minh và tích hợp đa vật lý. Tuy nhiên, tại Việt Nam, do các hạn chế về công nghệ chế tạo bộ chấp hành tần số cao và thiết bị đo đạc thực nghiệm đắt tiền, hướng tiếp cận của các nhà nghiên cứu trong nước có những đặc thù riêng, chủ yếu tập trung khai thác tối đa hiệu quả của các giải pháp thụ động hoặc đi sâu vào mô phỏng số để đón đầu xu hướng lý thuyết. Điển hình cho hướng nghiên cứu thụ động là chuỗi công trình về điều khiển dòng chảy sau thân đối xứng trục. Các nghiên cứu nền tảng [39] – [42] đã thiết lập cơ sở lý thuyết vững chắc về ảnh hưởng của góc vát đến cấu trúc xoáy ba chiều và đặc trưng dao động không gian-thời gian của dòng rối, sử dụng phương pháp mô phỏng số. Trên cơ sở tối ưu hóa hình học, nghiên cứu [41] đã đề xuất cấu hình đuôi vát có rãnh dọc, minh chứng khả năng giảm lực cản tới 24% nhờ cơ chế làm chậm tách dòng và tăng áp suất đáy mà không cần tiêu tốn năng lượng phụ trợ. Song song với phương pháp hình học, cách tiếp cận dựa trên dữ liệu và mô hình hóa động lực học cũng bước đầu được triển khai. Bài báo [43] đã cung cấp cái nhìn sâu sắc về cấu trúc phi tuyến và đa thang thời gian của hệ thống dòng chảy, tạo tiền đề quan trọng để xây dựng các mô hình giảm bậc cho bài toán điều khiển trong tương lai. Ngoài ra, các khảo sát về nhiễu biên và tương tác dòng chảy trong các nghiên cứu [44] – [47], tuy thực hiện ở dải vận tốc cao, vẫn đóng góp khung phân tích hữu ích cho việc thiết kế các bộ điều khiển bền vững.

Tổng hợp lại, bức tranh nghiên cứu trong nước hiện nay vẫn thiên về điều khiển thụ động thông qua biến đổi hình học. Các kỹ thuật điều khiển chủ động hoặc vòng kín sử dụng cảm biến trên thiết bị bay thực tế vẫn là một khoảng trống lớn. Đây chính là cơ hội tiềm năng để kết hợp thế mạnh mô phỏng hiện có với các thuật

toán học máy nhằm phát triển các cấu hình điều khiển khí động hiệu quả hơn cho thế hệ UAV và thiết bị bay dưới âm tiếp theo.

3.5. So sánh phương pháp và định hướng nghiên cứu

3.5.1. So sánh phương pháp thụ động và chủ động theo tiêu chí kỹ thuật

Bảng 1 cung cấp cái nhìn tổng quan về sự đánh đổi giữa hiệu quả khí động và chi phí kỹ thuật của các phương pháp. Phân tích cho thấy có sự tương quan nghịch biến rõ rệt giữa mức độ linh hoạt điều khiển và mức độ sẵn sàng công nghệ (TRL). Cụ thể, nhóm phương pháp thụ động (VG, gân, hốc lõm v.v.) tuy có hiệu quả khí động bị giới hạn bởi hình học cố định và chỉ tối ưu tại một điểm thiết kế, nhưng lại đạt mức TRL cao nhất (7–9). Điều này lý giải vì sao VG vẫn xuất hiện phổ biến trên các máy bay thương mại hiện đại, sự đơn giản và độ tin cậy chiếm ưu thế trước các lợi ích khí động học của các phương pháp phức tạp khác.

Ngược lại, nhóm phương pháp chủ động hiện đại như truyền động plasma hay luồng tổng hợp cho phép can thiệp vào cấu trúc dòng chảy tức thời và mở rộng đường bao bay đáng kể, nhưng hiện mới chỉ dừng lại ở mức TRL 4–6. Rào cản lớn nhất ngăn cản việc thương mại hóa các phương pháp này không chỉ nằm ở bài toán năng lượng tiêu thụ mà còn ở độ bền vật liệu và độ phức tạp khi tích hợp hệ thống nguồn nuôi lên cánh máy bay.

Bên cạnh đó, kỹ thuật thổi/hút lớp biên đóng một vai trò quan trọng. Khác với kỹ thuật sử dụng plasma hay luồng tổng hợp, phương pháp này đã đạt độ chín muồi công nghệ và chứng minh được khả năng ngăn chặn tách dòng diện rộng vượt trội trên các máy bay quân sự. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của nó là 'cồng kềnh', hệ thống đường ống dẫn khí, van và máy nén làm tăng đáng kể trọng lượng rỗng của thiết bị bay, khiến nó trở nên kém hấp dẫn đối với các dòng UAV cỡ nhỏ vốn bị hạn chế về tải trọng cất cánh.

Bảng 1. Tổng hợp so sánh các phương pháp điều khiển dòng chảy theo tiêu chí kỹ thuật và mức độ sẵn sàng công nghệ (TRL)

Phương pháp	Loại hình	Cơ chế vật lý	Hiệu quả khí động	Độ phức tạp hệ thống	TRL	Tài liệu tham khảo
Thiết bị tạo xoáy (VG)	Thụ động	Trộn lớp biên bằng xoáy dọc	Trung bình (Tăng lực nâng, giảm lực cản hành trình)	Thấp (Cố định)	9	[5], [12]
Bề mặt vi cấu trúc (gân/hốc lõm,...)	Thụ động	Giảm ứng suất cắt tầng, kiểm soát chảy rối	Thấp (Giảm lực cản ma sát)	Trung bình (Yêu cầu gia công)	7-8	[17], [18]
Thổi/hút lớp biên	Chủ động	Bổ sung động lượng, loại bỏ lớp biên chậm	Rất cao (Ngăn tách dòng diện rộng)	Cao (Đường ống, van dẫn)	8	[1], [22]
Luồng tổng hợp	Chủ động	Tạo cặp xoáy, dòng không khối lượng	Cao (Điều khiển linh hoạt tần số)	Rất cao (Cơ cấu rung động, mạch điều khiển)	5-6	[21], [26]
Truyền động plasma	Chủ động	Lực điện từ, gió ion	Trung bình (Hiệu quả thấp ở vận tốc lớn)	Cao (Nguồn cao áp, cách điện)	4-5	[8], [27], [28]
Biến hình chủ động	Chủ động	Thay đổi hình học cánh theo pha bay	Tối ưu hóa đa điểm	Rất cao (Vật liệu, kết cấu)	3-5	[13], [20]
Học máy	Chủ động	Học chiến lược tối ưu dựa trên dữ liệu cảm biến	Rất cao (thích ứng trong thời gian thực)	Rất cao (Cảm biến và vi xử lý mạnh)	2-3	[33], [37]
Cấu hình lai	Kết hợp	Tối ưu hóa tổng thể	Tối ưu theo thời gian thực	Rất cao (Tích hợp đa hệ thống)	3-4	[29], [48]

Điểm đột phá trong bảng so sánh nằm ở nhóm điều khiển thông minh tích hợp các kỹ thuật học máy như học tăng cường sâu DRL. Mặc dù hiện mới dừng ở mức TRL 2–3 khi nó được tiến hành chủ yếu kiểm chứng trên mô phỏng số, nhưng đây được xem là một phương pháp triển vọng trong việc giải quyết bài toán năng lượng cho các thiết bị chủ động. Khả năng tự học và thích ứng thời gian thực của AI cho phép điều khiển chính xác thời điểm và tần số kích hoạt của các bộ chấp hành, chuyển đổi hệ thống

từ trạng thái 'tiêu tốn năng lượng liên tục' sang trạng thái 'chỉ kích hoạt khi cần thiết', điều mà các bộ điều khiển vòng hở truyền thống không làm được.

Ngoài ra, các nghiên cứu gần đây [29], [48] đang tập trung nâng cao TRL cho các cấu hình lai. Chiến lược này sử dụng thiết bị thụ động làm nền tảng để đảm bảo an toàn bay cơ bản, và chỉ kích hoạt thiết bị chủ động (như tạo dòng plasma hoặc thổi khí cục bộ) trong các pha nguy hiểm như cất/hạ cánh hoặc gió giật. Cách tiếp cận này giúp cân bằng bài toán năng lượng và được dự báo là lộ trình khả thi nhất để đưa công nghệ điều khiển dòng chảy thông minh vào thực tiễn trong thập kỷ tới.

3.5.2. Một số hướng nghiên cứu hứa hẹn cho thiết bị bay dưới âm

Từ các phân tích tổng quan, bài báo đề xuất hai hướng nghiên cứu trọng tâm để thu hẹp khoảng cách giữa lý thuyết và ứng dụng thực tế.

Thứ nhất, phát triển các cấu hình lai nhằm tối ưu năng lượng. Đây là hướng đi thực tế nhất cho các thiết bị bay có năng lượng giới hạn. Chiến lược là sử dụng các phương pháp thụ động như sử dụng đuôi vát, VG để duy trì hiệu suất nền tảng ở chế độ bay hành trình, kết hợp với các thiết bị chủ động như truyền động plasma, hút/thổi khí chỉ kích hoạt ngắt quãng trong các pha bay rủi ro cao khi cất/hạ cánh hoặc có gió giật. Sự kết hợp này giúp giải quyết mâu thuẫn giữa nhu cầu điều khiển linh hoạt và bài toán tiết kiệm năng lượng.

Thứ hai, chuyển dịch sang tư duy thiết kế tích hợp đa vật lý. Thay vì áp dụng các thiết bị điều khiển dòng chảy như một giải pháp đắp thêm lên các thiết kế cánh có sẵn, cần tích hợp chúng ngay từ giai đoạn thiết kế khí động ban đầu. Đặc biệt là hướng kết hợp vật liệu biến hình thông minh với các bộ chấp hành khí động cục bộ, giúp tối ưu hóa đồng thời cả kết cấu và hiệu suất bay.

Thứ ba, hiện thực hóa điều khiển thông minh trên phần cứng nhúng bằng cách tập trung phát triển các thuật toán học tăng cường sâu có khả năng vận hành thời gian thực với dữ liệu cảm biến thưa. Mục tiêu là chuyển giao các mô hình điều khiển từ môi trường mô phỏng số sang các vi xử lý trên bo mạch UAV, giúp hệ thống tự động thích nghi với các nhiễu động khí quyển bất ngờ mà vẫn đảm bảo ràng buộc về tiêu thụ năng lượng.

4. Kết luận

Bài báo đã cung cấp một cái nhìn toàn diện về sự phát triển của các kỹ thuật điều khiển dòng chảy quanh thiết bị bay dưới âm, từ các nguyên lý cơ bản đến các xu hướng hiện đại tích hợp trí tuệ nhân tạo. Các kết luận chính được rút ra bao gồm:

Về mức độ sẵn sàng công nghệ (TRL), các phương pháp thụ động như sử dụng VG, bề mặt vi cấu trúc đã đạt độ chín muồi cao, đảm bảo tính tin cậy và an toàn cho hàng không dân dụng. Trong khi đó, các phương pháp chủ động như sử dụng truyền động plasma, luồng tổng hợp, hút thổi khí tuy chứng minh được khả năng mở rộng đường bao bay vượt trội nhưng vẫn đang đối mặt với rào cản lớn về độ bền vật liệu và bài toán tiêu thụ năng lượng.

Về xu hướng công nghệ, sự chuyển dịch từ điều khiển vòng hở sang điều khiển vòng kín đang trở thành xu thế tất yếu. Việc ứng dụng các thuật toán dựa trên dữ liệu như học tăng cường sâu đóng vai trò then chốt trong việc tìm ra chiến lược điều khiển tối ưu, giúp giảm thiểu năng lượng kích hoạt mà vẫn duy trì hiệu quả khí động cao.

Về định hướng tương lai, cấu hình lai kết hợp phương pháp thụ động với khả năng phản ứng linh hoạt của thiết bị chủ động được xác định là hướng đi triển vọng nhất cho thế hệ UAV và thiết bị bay tiếp theo. Việc làm chủ công nghệ thiết kế đồng thời khí động, kết cấu và điều khiển sẽ là chìa khóa để đưa các khái niệm này từ phòng thí nghiệm vào ứng dụng thực tiễn tại Việt Nam.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia Việt Nam (NAFOSTED) theo mã số đề tài 107.03-2025.42.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] M. Gad-el-Hak, *Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [2] M. Gad-el-Hak and D. M. Bushnell, "Separation Control: Review," *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 113, no. 1, pp. 5–30, 1991, doi: 10.1115/1.2926497.
- [3] F. Ren, H. B. Hu, and H. Tang, "Active flow control using machine learning: A brief review," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 32, no. 2, pp. 247–253, 2020.
- [4] S. S. Collis, R. D. Joslin, A. Seifert, and V. Theofilis, "Issues in active flow control: theory, control, simulation, and experiment," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 40, no. 4–5, pp. 237–289, 2004.
- [5] J. C. Lin, "Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, no. 4–5, pp. 389–420, 2002.
- [6] D. Greenblatt and I. J. Wygnanski, "The control of flow separation by periodic excitation," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 36, no. 7, pp. 487–545, October 2000, doi: 10.1016/S0376-0421(00)00008-7.
- [7] L. N. Cattafesta and M. Sheplak, "Actuators for active flow control," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 43, pp. 247–272, 2011.
- [8] T. C. Corke, C. L. Enloe, and S. P. Wilkinson, "Dielectric barrier discharge plasma actuators for flow control," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 42, pp. 505–529, 2010.
- [9] S. L. Brunton and B. R. Noack, "Closed-loop turbulence control: Progress and challenges," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 67, no. 5, Sep. 2015, doi: 10.1115/1.4031175.
- [10] D. Greenblatt and D. R. Williams, "Flow Control for Unmanned Air Vehicles," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 54, 2021, doi: 10.1146/annurev-fluid-032221-105053.
- [11] B. Jayaraman, Y. Lian, and W. Shyy, "Low-reynolds number flow control using dielectric barrier discharge actuators," in *Collection of Technical Papers - 37th AIAA Fluid Dynamics Conference*, 2007, doi: 10.2514/6.2007-3974.
- [12] M. P. Akhter *et al.*, "A review of flow-control devices for wind-turbine performance enhancement," *Energies (Basel)*, vol. 14, p. 1268, 2021.
- [13] S. Daynes and P. M. Weaver, "Review of morphing trailing edge devices for wind turbines," *Wind Energy*, vol. 16, pp. 283–302, 2013.
- [14] Y. Wang *et al.*, "Impact of leading-edge tubercles on airfoil aerodynamic characteristics," *Energies (Basel)*, vol. 17, p. 5518, 2024.
- [15] D. B. Zadorozhna, O. Benavides, J. S. Grajeda, S. F. Ramirez, and L. de la Cruz May, "A parametric study of the effect of leading edge spherical tubercle amplitudes on the aerodynamic performance of a 2D wind turbine airfoil at low Reynolds numbers using computational fluid dynamics," *Energy Reports*, vol. 7, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.093.
- [16] A. Sathyabhama *et al.*, "Numerical investigation on the effect of leading-edge tubercles on airfoil aerodynamic performance," *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 15, pp. 767–780, 2022.
- [17] R. García-Mayoral and J. Jiménez, "Drag reduction by riblets," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 369, pp. 1412–1427, 2011.
- [18] H. Ali, M. R. Rasani, Z. Harun, and M. A. Shahid, "Passive flow-field control using dimples for improved aerodynamic flow over a wing," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-63638-z.
- [19] A. Y. N. Sofla, S. A. Meguid, K. T. Tan, and W. K. Yeo, "Shape morphing of aircraft wing: status and challenges," *Mater. Des.*, vol. 31, pp. 128–155, 2010.
- [20] S. Barbarino, O. Bilgen, R. M. Ajaj, M. I. Friswell, and D. J. Inman, "A review of morphing aircraft," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 22, pp. 823–877, 2011.
- [21] A. Glezer and M. Amitay, "Synthetic jets," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 34, pp. 503–529, 2002.
- [22] B. L. Smith and A. Glezer, "The formation and evolution of synthetic jets," *Physics of Fluids*, vol. 10, no. 9, pp. 2281–2297, 1998.
- [23] M. Amitay, D. R. Smith, V. Kibens, D. E. Parekh, and A. Glezer, "Aerodynamic flow control over an unconventional airfoil using synthetic jet actuators," *AIAA Journal*, vol. 39, no. 3, pp. 361–370, 2001, doi: 10.2514/2.1323.
- [24] K. Zaman and M. Ivana, "Synthetic Jets in Cross-Flow. Part I: Round Jet," in *33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, 2003, p. 3714.
- [25] S. Ho, H. Nassef, N. Pornsinsirak, Y. C. Tai, and C. M. Ho, "Unsteady aerodynamics and flow control for flapping wing flyers," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 39, no. 8, pp. 635–681, 2003.
- [26] C. M. Ho *et al.*, "Synthetic jet actuators for active flow control: a review," *Fluids*, vol. 9, no. 1, 2024, doi: 10.3390/fluids9120290.

- [27] E. Moreau, "Airflow control by non-thermal plasma actuators," *J. Phys. D Appl. Phys.*, vol. 40, no. 3, pp. 605–636, 2007.
- [28] A. Ricoy-Zárate *et al.*, "On the use of DBD plasma actuators for active flow control of wind turbine blades," *Sensors*, vol. 25, no. 3, p. 1103, 2025.
- [29] K. Khalil, S. Asaro, and A. Bauknecht, "Active flow control devices for wing load alleviation," *J. Aircr.*, vol. 59, no. 2, pp. 458–473, 2022.
- [30] A. G. Nair *et al.*, "Cluster-based feedback control of turbulent post-stall separated flows over an airfoil," *J. Fluid Mech.*, vol. 875, pp. 345–375, 2019.
- [31] E. Kaiser *et al.*, "Cluster-based control of a separating flow over a smoothly contoured ramp," *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, vol. 31, pp. 67–91, 2017.
- [32] X. Wang, N. Deng, G. Y. Cornejo Maceda, and B. R. Noack, "Cluster-based control for net drag reduction of the fluidic pinball," *Physics of Fluids*, vol. 35, no. 2, 2023, doi: 10.1063/5.0136499.
- [33] J. Rabault *et al.*, "Artificial neural networks trained through deep reinforcement learning discover control strategies for active flow control," *J. Fluid Mech.*, vol. 865, pp. 281–302, 2019.
- [34] H. Xu, W. Zhang, J. Deng, and J. Rabault, "Active flow control with rotating cylinders by an artificial neural network trained by deep reinforcement learning," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 32, pp. 254–258, 2020.
- [35] I. Kim *et al.*, "Deep reinforcement learning for fluid mechanics: control, optimization, and automation," *Fluids*, vol. 9, no. 9, p. 216, 2024.
- [36] W. Jia and H. Xu, "Deep reinforcement learning-based active flow control of an elliptical cylinder: Transitioning from an elliptical cylinder to a circular cylinder and a flat plate," *Physics of Fluids*, vol. 36, p. 074117, 2024.
- [37] C. Vignon, J. Rabault, and R. Vinuesa, "Recent advances in applying deep reinforcement learning for flow control: perspectives and future directions," *Physics of Fluids*, vol. 35, no. 3, p. 31301, 2023.
- [38] E. A. Whalen *et al.*, "Flight test of an active flow control enhanced vertical tail," in *AIAA Journal*, 2018, doi: 10.2514/1.J056959.
- [39] K. Van Pham, H. T. Tran, D. T. Nguyen, A. D. Le, Q. D. Nguyen, and D. T. Pham, "Delayed detached eddy simulation for wake flow analysis of axisymmetric boattail models under low-speed conditions," *Physics of Fluids*, vol. 36, no. 3, 2024, doi: 10.1063/5.0188363.
- [40] H. T. Tran, K. Van Pham, A. D. Le, and C. T. Dinh, "Frequency characteristics of axisymmetric conical boattail models with different slant angles," *Physics of Fluids*, vol. 35, no. 9, 2023, doi: 10.1063/5.0160053.
- [41] D. Q. Nguyen, T. H. Tran, D. A. Le, N. T. Hieu, V. K. Pham, and T. S. Ha, "Drag reduction for axisymmetric boattail model by longitudinal groove cavity under low-speed conditions," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, no. 8, 2024, doi: 10.1007/s12206-024-04.
- [42] T. H. Tran, "The Effect of Boattail Angles on the Near-Wake Structure of Axisymmetric Afterbody Models at Low-Speed Condition," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/7580174.
- [43] K. V. Pham, H. T. Tran, A. D. Le, and T. V. T. Do, "A data-driven analysis of near-wake flow dynamics for a blunt-based axisymmetric body under low-speed conditions," *Physics of Fluids*, vol. 37, no. 6, Jun. 2025, doi: 10.1063/5.0267112.
- [44] I. I. Lipatov and V. K. Fam, "Nonlinear Effects During Perturbation Propagation in Strong Supersonic Interaction," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 61, no. 3, 2020, doi: 10.1134/S0021894420030153.
- [45] I. I. Lipatov and V. K. Fam, "Methods of Controlling Flows under the Strong Hypersonic Interaction Conditions," *Fluid Dynamics*, vol. 55, no. 2, 2020, doi: 10.1134/S0015462820020093.
- [46] I. I. Lipatov and V. K. Pham, "Control of a Flow in a Supersonic Boundary Layer," *Technical Physics Letters*, vol. 46, no. 6, 2020, doi: 10.1134/S1063785020060061.
- [47] I. I. Lipatov and V. K. Pham, "Propagation of Perturbations in a Boundary Layer under Strong Hypersonic Interaction," *Doklady Physics*, vol. 65, no. 2, 2020, doi: 10.1134/S1028335820020068.
- [48] G. C. Zha *et al.*, "High-performance airfoil using coflow jet flow control," *AIAA Journal*, vol. 45, no. 8, pp. 2087–2090, 2007.