

ĐÁNH GIÁ TỔNG QUAN VỀ NHIÊN LIỆU HÀNG KHÔNG: TỪ NHIÊN LIỆU TRUYỀN THỐNG ĐẾN CÁC GIẢI PHÁP BỀN VỮNG VÀ PHI CARBON TRONG TƯƠNG LAI

A COMPREHENSIVE REVIEW OF AVIATION FUELS: FROM TRADITIONAL
KEROSENE TO FUTURE SUSTAINABLE AND CARBON-FREE SOLUTIONS

Tạ Quang Thái, Lương Đình Thi*, Lê Tiến Dương

Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

*Email: thiluongdinh@gmail.com

TÓM TẮT

Nhiên liệu hàng không hiện tại bao gồm các loại nhiên liệu dân dụng và quân sự. Nhiên liệu cho hoạt động của động cơ được phân loại thành nhiên liệu cho tuabin khí hoặc động cơ phản lực (JET FUEL) và cho động cơ piston (AVGAS). Việc chuyển đổi từ nhiên liệu hàng không truyền thống sang các loại nhiên liệu thay thế ít phát thải là rất cần thiết. Bài báo phân tích các ưu nhược điểm của các loại nhiên liệu hàng không, tiềm năng của các loại nhiên liệu mới như Hydro, Amoniac, Metane và nhiên liệu hàng không bền vững (SAF), từ đó đưa ra nhận định: Để đạt mục tiêu giảm phát thải, SAF là giải pháp quan trọng nhất trong 10-20 năm tới; CH_4 , nhiên liệu sinh học và các loại nhiên liệu phi carbon NH_3 , H_2 có tiềm năng lớn cần được ưu tiên thúc đẩy nghiên cứu, đầu tư phát triển cho tương lai.

Từ khóa: Nhiên liệu hàng không; Hydro; Ammonia; SAF; Metan.

ABSTRACT

Current aviation fuels encompass various applications, including civilian and military, with production sources varying depending on the type of engine used. Fuels for engine operation are categorized into jet fuels for gas turbines or jet engines and aviation gasoline (AVGAS) for piston engines. The transition from traditional aviation fuels to lower-emission alternative fuels is a crucial step toward a sustainable future for the aviation industry. This paper analyzes and evaluates the advantages, barriers, and challenges of various aviation fuels, the potential of new fuels such as hydrogen, ammonia, methane, and sustainable aviation fuel (SAF). From this, it concludes that in the future, to achieve emission reduction targets, SAF will be the most important bridging solution in the next 10-20 years. Low-emission fuels such as CH_4 , biofuels, and carbon-free fuels like NH_3 and H_2 are potential fuels that should be prioritized for research and development in the future.

Keywords: Aviation fuel; Hydrogen; Ammonia; SAF; Metan.

1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, nhu cầu sử dụng nhiên liệu tăng nhanh gây nguy cơ cạn kiệt nhanh nguồn nhiên liệu truyền thống và làm giá dầu mỏ tăng lên, ảnh hưởng trực tiếp đến nền kinh tế toàn cầu. Giá nhiên liệu ngày càng tăng, có nguy cơ gián đoạn nguồn cung cấp gây áp lực lớn cho ngành hàng không. Bên cạnh đó, nhiên liệu phản lực truyền thống góp phần đáng kể vào lượng khí thải nhà kính và biến đổi khí hậu [1]. Việc chuyển đổi từ nhiên liệu hàng không truyền thống sang các loại nhiên liệu thay thế ít phát thải là một bước quan trọng hướng tới một tương lai bền vững cho ngành hàng không. Do tính chất hoạt động ở môi trường khắc nghiệt và sự phụ thuộc trực tiếp vào động cơ để đảm bảo an toàn, nhiên liệu hàng không phải đáp ứng những yêu cầu kỹ thuật và an toàn nghiêm ngặt hơn bất kỳ loại nhiên liệu nào khác về an toàn, hiệu suất và độ tin cậy.

Nhiên liệu hàng không truyền thống được chia thành hai loại chính:

1) Nhiên liệu cho động cơ phản lực (Jet Fuel - JetGas): Đây là loại nhiên liệu phổ biến nhất hiện nay, dùng cho các máy bay phản lực (động cơ tuabin), bao gồm: JET-A1, JET A, JET B, JP, TC-1, RT, T6, T8B... [2].

2) Xăng máy bay (AvGas - Aviation Gasoline): Sử dụng cho các máy bay có động cơ piston, bao gồm: Avgas 100, Avgas 100LL, B59, B70... [2].

Các nguồn năng lượng tái tạo đang ngày càng được chú trọng khi nhiên liệu dầu mỏ cạn kiệt, đòi hỏi phải có các lựa chọn thay thế. Ngành hàng không đang đứng trước nhu cầu ngày càng tăng đối với cả nhiên liệu thông

thường và nhiên liệu thay thế như một giải pháp sạch hơn cho nhiên liệu máy bay truyền thống. SAF, NH_3 , H_2 và CH_4 là những lựa chọn thay thế đầy hứa hẹn trong tương lai. Nghiên cứu này cung cấp những hiểu biết có giá trị về tiềm năng của các nhiên liệu thay thế và sự cần thiết phải tiếp tục nghiên cứu sâu hơn về quá trình cháy, đặc tính kỹ thuật, khả năng tương thích với động cơ và tác động của chúng đối với môi trường khi sử dụng cho lĩnh vực hàng không.

2. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ VỀ NHIÊN LIỆU HÀNG KHÔNG

2.1. Nhiên liệu truyền thống

Jet A-1 là loại nhiên liệu phản lực tuabin (Jet Fuel) được sử dụng phổ biến nhất trên thế giới cho cả máy bay thương mại và quân sự. Đây là loại nhiên liệu tiêu chuẩn toàn cầu, được sản xuất và kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt theo các tiêu chuẩn quốc tế như ASTM D1655 (Mỹ), DEF STAN 91-091 (Anh) và các yêu cầu của JIG (Joint Inspection Group) [2].

Nhiên liệu TC-1 (hay TS-1) là một loại nhiên liệu phản lực tuabin, chủ yếu được sử dụng cho các máy bay có nguồn gốc từ Liên Xô/Nga và các quốc gia thuộc khối Đông Âu cũ, tuân thủ tiêu chuẩn kỹ thuật GOST 10227 [2].

Jet A-1 và TC-1 là loại dầu hỏa (kerosene) tinh chế, có thành phần chủ yếu là các hydrocarbon. Nó được thiết kế đặc biệt để đáp ứng các yêu cầu khắt khe của động cơ tuabin khí về hiệu suất, an toàn và hoạt động ở nhiệt độ cao/thấp. Rào cản lớn nhất là vấn đề môi trường và an ninh năng lượng (trữ lượng, phát thải CO_2 và các khí nhà kính khác).



Bảng 1. So sánh các đặc tính cơ bản của TC-1 và Jet A-1 [2].

Đặc tính	TC-1 GOST 10227	Jet A-1 ASTM D1655	Ý nghĩa kỹ thuật
Điểm đóng băng	$\leq -50^{\circ}\text{C}$	$\leq -47^{\circ}\text{C}$	Độ tin cậy cao ở nhiệt độ cực thấp. TC-1 có khả năng chịu lạnh tốt hơn, phù hợp cho các chuyến bay ở vĩ độ cao hoặc vùng khí hậu cực lạnh.
Điểm chớp cháy	$\geq 28^{\circ}\text{C}$	$\geq 38^{\circ}\text{C}$	An toàn khi xử lý mặt đất. Điểm chớp cháy thấp hơn của TC-1 làm tăng nguy cơ bắt lửa trong quá trình bảo quản và tiếp nhiên liệu so với Jet A-1, đòi hỏi quy trình an toàn nghiêm ngặt hơn.
Nhiệt trị	$\geq 42,95 \text{ MJ/kg}$	$\geq 42,80 \text{ MJ/kg}$	Nhiệt trị theo khối lượng của 2 loại đều cao và tương đương nhau.
Hàm lượng hợp chất thơm	$\leq 22\%$	$\leq 25\%$	Cháy sạch. Hàm lượng chất thơm thấp hơn của TC-1 giúp nhiên liệu cháy sạch hơn, giảm tạo muội than (khói) và bảo vệ động cơ tốt hơn.
Khối lượng riêng	$\leq 780 \text{ kg/m}^3$ (ở 20°C)	$775\text{-}840 \text{ kg/m}^3$ (ở 15°C)	Quan trọng cho việc tính toán tải trọng và cân bằng máy bay (phải nằm trong khoảng quy định) và nhiệt trị theo thể tích.
Độ nhớt động học	$\leq 8,00 \text{ mm}^2/\text{s}$ (ở -20°C)	$\leq 8,00 \text{ mm}^2/\text{s}$ (ở -20°C)	Độ nhớt quá cao sẽ ngăn cản quá trình phun sương và bay hơi nhiên liệu, ảnh hưởng đến quá trình khởi động động cơ phụ ở nhiệt độ thấp.
Điểm khói	$\geq 25 \text{ mm}$	$\geq 25 \text{ mm}$	Chỉ tiêu về khả năng cháy sạch. Điểm khói cao cho thấy nhiên liệu ít tạo bồ hóng (muội than) và khói, giúp bảo vệ động cơ.

2.2. Nhiên liệu hàng không bền vững (SAF)

Trước sức ép giảm phát thải khí nhà kính (ngành hàng không gây ra khoảng 2,4% tổng lượng CO_2 do con người gây ra [1]), SAF là giải pháp then chốt được ưu tiên hàng đầu. SAF là loại nhiên liệu được sản xuất từ nguyên liệu tái tạo, không có nguồn gốc từ dầu mỏ. SAF tương thích trực tiếp với động cơ hàng không hiện tại, không cần thay đổi cơ sở hạ tầng. Nghiên cứu gần đây đã chỉ ra SAF là một giải pháp thay thế tốt cho nhiên liệu phản lực hóa thạch [3].

2.2.1. Ưu điểm

1) Sản phẩm cháy của SAF có lượng khí thải carbon thấp hơn tới 80% so với nhiên liệu hàng không thông thường [4], đáp ứng các yêu cầu tiêu chuẩn nhiên liệu hàng không quốc tế. Quá trình cháy của SAF sạch hơn, giảm phát thải PM (chất thải dạng hạt) và SOx .

2) Nguồn nguyên liệu đầu vào đa dạng (bảng 2).

3) Công nghệ sản xuất đã có đáp ứng các yêu cầu đề ra (bảng 2).

Bảng 2. Các quy trình công nghệ sản xuất SAF [5].

TT	Quy trình sản xuất	Nguyên liệu đầu vào	Năng suất
1.	Dầu hỏa paraffin tổng hợp được xử lý bằng phương pháp Fischer-Tropsch (FT-SPK)	Chất thải rắn đô thị, chất thải lâm nghiệp	15-21%
2.	Dầu hỏa paraffin tổng hợp từ este và axit béo được xử lý bằng phương pháp hydro hóa (HEFA-SPK)	Dầu thải, mỡ động vật, dầu thực vật	42%
3.	Isoparaffin tổng hợp từ đường lên men được xử lý bằng phương pháp thủy phân (HFS-SIP)	Mía, củ cải đường	13,6%
4.	Dầu hỏa tổng hợp có chứa các hợp chất thơm thu được bằng phản ứng ankyl hóa các hợp chất thơm nhẹ (FT-SPK/A)	Sinh khối	25-40%
5.	Dầu hỏa paraffin tổng hợp chuyển hóa từ cồn sang nhiên liệu phản lực (ATJ-SPK)	Chất thải lignocellulose	14%
6.	Dầu hỏa được tổng hợp bằng phương pháp thủy phân nhiệt xúc tác (CHJ-SKA)	Triglyceride và axit béo	7-12%
7.	Hydrocarbon, este và dầu hỏa paraffin tổng hợp axit béo (HC-HEFA)	Hydrocarbon có nguồn gốc sinh học	50,1%

Năng suất của các quy trình sản xuất SAF thể hiện tỷ lệ % khối lượng SAF được tạo ra so với tổng nguồn nhiên liệu đầu vào thực tế.

4) Tính năng “Drop-in”: Phần lớn SAF được phát triển dưới dạng “drop-in fuel”, nghĩa là chúng hoàn toàn tương thích với động cơ máy bay và cơ sở hạ tầng tiếp liệu hiện có mà không cần sửa đổi. Hiện tại, SAF thường được sử dụng dưới dạng pha trộn với nhiên liệu phản lực truyền thống (tỷ lệ pha trộn tối đa có thể lên đến 50%, đang hướng tới 100% SAF) [6].

2.2.2. Thách thức

1) Chi phí cao, nguồn cung hạn chế: Sản xuất SAF còn sơ khai, quy mô nhỏ, khiến giá cao gấp nhiều lần nhiên liệu hóa thạch, tạo áp lực lớn lên chi phí vận hành [7].

2) Hạ tầng và công nghệ: Thiếu nhà máy sản xuất SAF quy mô thương mại. Hệ thống lọc hóa dầu hiện tại chưa sẵn sàng, cần đầu tư nâng

cấp lớn. Công nghệ sản xuất tiên tiến và chứng nhận quốc tế chủ yếu tập trung ở các nước phát triển, gây phụ thuộc cho các nước khác.

3) Nguồn nguyên liệu: Nguồn cung dầu ăn đã qua sử dụng có giới hạn và cạnh tranh gay gắt với các ngành khác. Nguy cơ cạnh tranh đất đai với cây lương thực và vấn đề phá rừng, mất đa dạng sinh học nếu sử dụng sinh khối từ thực vật không bền vững.

4) Chính sách và pháp lý: Thiếu cơ chế thị trường ổn định, tín hiệu giá cả rõ ràng và các chính sách hỗ trợ đầu tư dài hạn. Các quy định quốc tế áp đặt tỷ lệ sử dụng cao, tạo áp lực lớn lên các hãng bay, đặc biệt là các hãng ở các nước đang phát triển.

5) Kỹ thuật và vận hành: Hiện tại chỉ được phép pha trộn tối đa 50% SAF [7]. Khả năng phối trộn và tiếp nhiên liệu tại sân bay chưa đồng đều.



2.3. Nhiên liệu Hydro

Năm 2021, Hiệp hội Vận tải hàng không quốc tế (IATA) đã đưa ra mục tiêu đạt phát thải ròng carbon bằng 0 trong ngành hàng không vào năm 2050. Sau đó, 130 quốc gia đã thiết lập hoặc đang xem xét các mục tiêu tương tự [8]. Hydro được xác định là giải pháp hiệu quả nhất để đạt được mục tiêu đó [9]. Tổ chức Hàng không dân dụng quốc tế (ICAO) cũng đã nhấn mạnh vai trò tiềm năng của hydro trong các chiến lược khử carbon trong tương lai [10]. Tuy nhiên, hydro cũng đang tồn tại rào cản lớn khi thay thế cho các nguồn năng lượng hóa thạch.

2.3.1. Ưu điểm

1) Nhiên liệu Hydro không phát thải Carbon: Hydro cháy chỉ tạo ra hơi nước (H_2O), loại bỏ hoàn toàn khí nhà kính (CO_2) và các chất ô nhiễm khác (trừ một lượng nhỏ NO_x).

2) Nhiệt trị theo khối lượng cao: Hydro có nhiệt trị theo khối lượng cao gấp khoảng 3 lần so với nhiên liệu truyền thống (120 MJ/kg, so với 43 MJ/kg) [11]. Điều này có nghĩa là cùng một khối lượng nhiên liệu, Hydro cung cấp năng lượng lớn hơn, giúp máy bay bay xa hơn.

3) Năng lượng đánh lửa thấp (0,02 mJ), thấp hơn khoảng 14 lần so metan giúp hệ thống đánh lửa hoạt động hiệu quả hơn [12].

4) Tốc độ lan truyền ngọn lửa của Hydro (3,36 m/s) cao giúp nâng cao hiệu suất của động cơ [12].

5) Hydro có giới hạn bắt lửa với nồng độ từ 4-75%, các động cơ nhiệt có thể vận hành ổn định với hỗn hợp hydro/không khí loãng [12].

6) Công nghệ sản xuất hydro đa dạng, hiệu quả: chuyển hóa hydrocarbon bằng nhiệt; điện phân nước; sinh học... Phương pháp sản xuất hydro bền vững nhất là điện phân nước bằng năng lượng điện có nguồn gốc từ các nguồn tái tạo như mặt trời, gió hoặc thủy điện.

7) Nguồn nguyên liệu sản xuất hydro chủ yếu là nước, có thể có nguồn gốc từ nước biển, nó phải trải qua quá trình khử muối trước khi điện phân [13].

2.3.2. Thách thức

Mặc dù có lợi ích về môi trường và năng lượng, việc ứng dụng Hydro lỏng (LH_2) trong lĩnh vực hàng không phải đối mặt với nhiều rào cản kỹ thuật và kinh tế:

1) Lưu trữ nhiên liệu (kỹ thuật đông lạnh) nhiệt độ cực thấp: Hydro phải được hóa lỏng ở nhiệt độ cực thấp $-253^\circ C$ [14] để có thể lưu trữ và sử dụng. Bồn chứa hydro lỏng cần đảm bảo an toàn ở nhiệt độ cực thấp và tính dễ cháy của hydro [14]. Các bồn chứa và hệ thống nhiên liệu đòi hỏi hệ thống cách nhiệt tiên tiến, cần các hệ thống thông hơi được lắp đặt chính xác để giảm thiểu việc hình thành hơi nhiên liệu dễ cháy [15].

2) Do LH_2 có mật độ năng lượng theo thể tích rất thấp, chỉ bằng khoảng 1/4 so với Jet Fuel ($8,48 MJ/m^3$, so với $33,7 MJ/m^3$) [14], do đó các bình chứa cần thiết để lưu trữ cùng một lượng năng lượng sẽ có thể tích gấp khoảng bốn lần [16]. Điều này đòi hỏi phải thay đổi hoàn toàn thiết kế thân máy bay.

3) Công nghệ động cơ và hệ thống tiếp nhiên liệu phức tạp: Các bộ phận phải có khả năng hoạt động ổn định trong môi trường nhiệt độ cực thấp và áp suất cao. Yêu cầu về an toàn khi thiết kế hệ thống nhiên liệu hai pha: dạng

lỏng trong bình chứa, dạng khí trong các bộ phận tiêu thụ. Do đó, có sự thay đổi pha phức tạp diễn ra trong hệ thống [17].

4) Hydro có thể cháy được ở khoảng nồng độ từ 4-75% và gây nổ ở khoảng nồng độ 15-59% [12]. Hydro rất nhạy cảm với các nguồn nhiệt do năng lượng đánh lửa thấp. Tốc độ lan truyền ngọn lửa và giải phóng nhiệt của hydro rất cao làm tăng nguy cơ cháy nổ và bất lửa ngược nên cần điều chỉnh/thiết kế lại buồng đốt và vòi phun. Nhiệt độ ngọn lửa cao làm tăng hiệu quả cháy, nhưng có thể dẫn đến lượng NO_x cao, có thể làm quá nhiệt các chi tiết.

5) Chi phí sản xuất, lưu trữ và phân phối cao: Để Hydro thực sự sạch, nó phải là Hydro xanh, được sản xuất bằng năng lượng tái tạo. Chi phí sản xuất Hydro xanh hiện vẫn còn rất cao. Cần phải đầu tư lớn vào cơ sở hạ tầng lưu trữ và hệ thống tiếp nhiên liệu LH_2 hoàn toàn mới.

2.4. Nhiên liệu Amoniac (NH_3)

Amoniac (NH_3) đang được nghiên cứu như một loại nhiên liệu không carbon tiềm năng cho ngành hàng không, tương tự như Hydro. Hiện tại, Amoniac được ưu tiên phát triển mạnh mẽ hơn trong ngành hàng hải nhưng cũng có triển vọng lớn cho hàng không.

2.4.1. Ưu điểm

1) Lưu trữ dễ dàng hơn: NH_3 hóa lỏng ở nhiệt độ -33°C và áp suất 1 bar hoặc áp suất 8-10 bar và nhiệt độ phòng [18], giúp giảm đáng kể chi phí so với LH_2 .

2) Mật độ năng lượng thể tích cao hơn: Amoniac lỏng có mật độ năng lượng theo thể tích cao hơn so với LH_2 [18], giúp giảm kích thước bồn chứa so với LH_2 .

3) Hiệu quả về chi phí: NH_3 nổi lên như một giải pháp thay thế tiết kiệm chi phí với giá nhiên liệu thấp hơn đáng kể và lợi thế bổ sung là tận dụng cơ sở hạ tầng hiện có.

4) Vận chuyển và lưu trữ đã được thiết lập: NH_3 được hưởng lợi từ các công nghệ vận chuyển và lưu trữ đã được thiết lập sẵn.

5) Sản xuất từ năng lượng tái tạo: Có thể áp dụng nhiều nguồn năng lượng tái tạo như mặt trời, gió, thủy điện,... để sản xuất NH_3 .

2.4.2. Thách thức

Mặc dù có lợi thế về lưu trữ, NH_3 vẫn đối mặt với nhiều rào cản kỹ thuật và an toàn nghiêm trọng, đặc biệt trong ứng dụng hàng không:

1) Độc tính và an toàn độc hại: Amoniac là một chất độc, hít phải có thể gây kích ứng mạnh và tử vong ở nồng độ cao. Trong hàng không, nguy cơ rò rỉ khí độc ra môi trường là mối quan tâm an toàn hàng đầu và cần các hệ thống xử lý khẩn cấp nghiêm ngặt.

2) Đốt cháy kém và phát thải chất ô nhiễm: NH_3 có tốc độ cháy chậm và nhiệt độ tự bốc cháy cao, dẫn đến hiệu suất động cơ thấp nếu dùng (NH_3) tinh khiết. Ngoài ra, quá trình cháy NH_3 tạo ra NO_x và NH_3 dư, đây là các chất gây ô nhiễm không khí [19].

3) Mật độ năng lượng (khối lượng) thấp: Mặc dù mật độ năng lượng theo thể tích tốt hơn LH_2 nhưng mật độ năng lượng theo khối lượng của NH_3 chỉ bằng khoảng một nửa của nhiên liệu phản lực thông thường. Máy bay cần phải mang khối lượng NH_3 lớn hơn đáng kể để đạt được cùng một quãng đường bay, làm giảm tải trọng hàng hóa hoặc hành khách.



4) Công nghệ động cơ NH_3 có khả năng sẽ được sử dụng trong hệ thống nhiên liệu kép (dual-fuel), nơi nó được pha trộn với nhiên liệu dễ cháy (như Hydro) để cải thiện quá trình cháy.

2.5. Nhiên liệu metan (CH_4)

Để đạt mục tiêu giảm phát thải, việc đưa khí thiên nhiên hóa lỏng (LNG) hoặc metan lỏng (LCH_4) làm nhiên liệu hàng không là một giải pháp đã được thực hiện. NASA đã đánh giá việc sử dụng metan và thiết kế máy bay với các bồn chứa lạnh khác nhau vào cuối những năm 1970 [20]. Sosounov và Orlov [21] đã công bố một báo cáo về kết quả chứng minh hoạt động thành công của động cơ với LH_2 và LNG trên máy bay TU-155. Đây là máy bay thử nghiệm duy nhất đã bay với động cơ tuabin khí lớn chạy bằng nhiên liệu hydro và LNG.

2.5.1. Ưu điểm

1) CH_4 là hydrocarbon đơn giản nhất. Nhiệt trị khối lượng cao: LCH_4 có mật độ năng lượng theo khối lượng khoảng 50 MJ/kg [19], cao hơn nhiệt trị của Jet A-1 với 43 MJ/kg.

2) Nhiệt độ tự bốc cháy của metan cao (630°C) nên an toàn hơn. Chỉ số octan 110-120 nên ít gây kích nổ, giảm thiểu tiếng ồn từ động cơ [19].

3) Metan cháy sạch hơn Jet A-1 và các hydrocarbon khác. Nó tạo ra ít CO_2 hơn trên mỗi đơn vị năng lượng giải phóng và hầu như không thải ra muội than và SO_x .

4) Metan lỏng là thành phần chính của LNG, là một mặt hàng có sẵn trên toàn cầu. Ngoài ra, quá trình tổng hợp metan từ sinh khối và điện ít phức tạp hơn quá trình tổng hợp SAF.

5) Nguồn gốc bền vững: Metan có nguồn gốc từ khí thiên nhiên và có thể được sản xuất từ các nguồn tái tạo. Synthetic Methane (e-Methane) được tổng hợp từ CO_2 và Hydro xanh (quy trình Power-to-Gas), biến nó thành một loại SAF.

2.5.2. Thách thức

1) Giống như hydro, Metan cũng phải được hóa lỏng và là nhiên liệu đông lạnh, đòi hỏi những thay đổi lớn đối với cơ sở hạ tầng sân bay. Để sử dụng trong hàng không, nó phải được hóa lỏng để tăng mật độ năng lượng và tiết kiệm không gian. Metan cần được làm lạnh sâu đến khoảng -162°C [19] để duy trì ở trạng thái lỏng. Điều này đặt ra các yêu cầu khắt khe về lưu trữ: bồn chứa áp suất cao, siêu cách nhiệt và nặng hơn bồn chứa nhiên liệu truyền thống.

2) Mật độ thể tích thấp: Dù có nhiệt trị khối lượng cao, mật độ năng lượng theo thể tích của LCH_4 vẫn thấp hơn Jet A-1. Điều này yêu cầu bồn chứa nhiên liệu lớn hơn, ảnh hưởng đến thiết kế máy bay và không gian chở hàng/khách.

3) Động cơ tua bin khí cần được thiết kế lại hoặc cải tiến để sử dụng nhiên liệu khí nén hoặc khí hóa lỏng thay vì nhiên liệu lỏng truyền thống.

4) Rò rỉ Metan: Nếu Metan chưa cháy hết rò rỉ vào khí quyển, nó sẽ là một vấn đề nghiêm trọng vì Metan là một khí nhà kính mạnh.

3. KẾT LUẬN

Nhiên liệu phản lực truyền thống Jet A-1 và TC-1 có tính ổn định cao, được sử dụng trong 100% đội bay phản lực thương mại hiện tại; có chuỗi cung ứng, kho lưu trữ và hệ thống

tiếp liệu được thiết lập đầy đủ trên toàn thế giới. Rào cản lớn nhất là vấn đề môi trường và trữ lượng hóa thạch.

SAF hiện có sẵn về mặt kỹ thuật và được chứng nhận an toàn để pha trộn với Jet A-1, nhưng nguồn cung toàn cầu hiện nay chỉ đáp ứng dưới 1% tổng nhu cầu nhiên liệu; có tính tương thích tốt, không cần thay đổi kết cấu động cơ hay cơ sở hạ tầng sân bay hiện có, tuy nhiên, chi phí sản xuất cao và nguồn nguyên liệu thô bị hạn chế.

Hydro lỏng là một trong những giải pháp tiềm năng và hứa hẹn nhất để đạt mục tiêu hàng không không phát thải carbon, tuy nhiên, cần thay đổi công nghệ trong thiết kế máy bay, thiết kế động cơ và xây dựng cơ sở hạ tầng sản xuất/lưu trữ/tiếp liệu (LH_2) tại sân bay.

Amoniac là nhiên liệu phi carbon tiềm năng cho ngành hàng không. Tuy nhiên, do tính tốc độ lan truyền ngọn lửa thấp, thời gian trễ đánh lửa dài, ranh giới cháy hạn chế, bức xạ và nhiệt độ ngọn lửa vừa phải,... cần tiếp tục nghiên cứu để nâng cao hiệu quả quá trình cháy. Cần bảo đảm an toàn trong hàng không do nguy cơ rò rỉ khí độc NH_3 ra môi trường.

Metan lỏng (LCH_4) có lợi thế một mặt hàng có sẵn và quá trình tổng hợp metan từ sinh khối và điện ít phức tạp. Giống như hydro, nó cũng phải được hóa lỏng và đông lạnh, đòi hỏi những thay đổi to lớn đối với thiết kế động cơ, máy bay, cơ sở hạ tầng sân bay.

Với mục tiêu giảm phát thải, SAF là giải pháp hiệu quả trong 10-20 năm tới. Nhiên liệu ít phát thải như CH_4 và các loại nhiên liệu phi carbon NH_3 , H_2 là các nhiên liệu tiềm năng cần được ưu tiên thúc đẩy nghiên cứu, đầu tư phát triển cho tương lai. ❖

Ngày nhận bài: 10/3/2026

Ngày phản biện: 24/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lea R., Eleonore P., Karen S.R., Nils T., Chizoba O., Alexis L., 2023, “*Environmental impacts in the civil aviation sector: Current state and guidance*”. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 119, 103717, June 2023.
- [2]. “*World Jet Fuel Specifications with Avgas Supplement*”, 2008, Retrieved 05/2025.
- [3]. Bofan W., Zhao J.T., Ming Z., 2024, “*Sustainable aviation fuels: key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry*”. Carbon Capture Sci. Technol., 13 (2024), Article 100263.
- [4]. Erno M., 2024, “*The Economic and Environmental Impact of ReFuelEU Aviation Regulation to Domestic Air Traffic in Finland*”, (2024), Pages 11.
- [5]. Farrukh I.A., Muddasser I., Timo L., Elmeri P., Tyko V., Pouya S., Alexander R., Juha L., Mika J., 2025, “*Fast pyrolysis pathway for production of sustainable aviation fuel (SAF) from demolition wood: Experimental and process simulation approach*”. Biomass and Bioenergy, Volume 206, March 2026, 108603.
- [6]. Can R., Liang Y., Xingcai L., 2025, “*Towards drop-in sustainable aviation fuels in aero engine combustors: Fuel effects on combustion performance*”. Progress in Aerospace Sciences, Volume 153, 1 February 2025, 101054.
- [7]. Kok S.N., Danial F., Aidong Y., 2021, “*Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production*”. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 150, October 2021, 111502.
- [8]. IATA, 2025, “*Hydrogen for aviation*”. Retrieved September 8, 2025, from: <https://www.iata.org/globalassets/iata/publications/sustainability/h2-for-aviation-facts.pdf>
- [9]. Bhavesh K., Jaten K., Arjmand Q.A., Love K., Claudio S., 2025, “*Sustainable aviation*”

- finance: integration of environmental impact mitigation and green investment strategies*". Research in Transportation Business & Management, Volume 61, August 2025, 101410.
- [10]. Tareq A.A., Buthaynah M., Alrubayan E., Pontika P.P., 2025, "Transition to hydrogen aviation: A 2030-2050 scenario performance analysis for an airline". Clean Energy Sustain. 2025, 3(3), 10011; DOI: 10.70322/ces.2025.10011.
- [11]. Alireza E., Andrew R., Soheil J., Jon H.A., 2025, "A review on liquid hydrogen fuel systems in aircraft applications for gas turbine engines". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 207, Pages 114995, 2025.
- [12]. Ram B.G., 2008, "Hydrogen fuel Production Transport". Pages 5-12.
- [13]. Julian H., Daniel S., Thomas Z., Boris B., Richard H.R., 2022, "Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure - Review and research gaps". International Journal of Hydrogen Energy, Volume 47, 15 January 2022, Pages 3108-3130.
- [14]. Jac C., Wulf D., Jennifer W., Zhaoxin R., 2023, "Cryogenic hydrogen jet and flame for clean energy applications: progress and challenges". Energies 2023, 16(11), 4411; <https://doi.org/10.3390/en16114411>.
- [15]. James E.F., Adam S., 2021, "Overview of the new LH₂ sphere at NASA Kennedy space center", <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210020920>, (2021), Accessed 17th Oct 2023.
- [16]. Bhupendra K., Adam K., Paulas R.S., Vishal S., Riti S., 2013, "Hydrogen powered aircraft: the future of air transport". Prog Aero Sci, 60 (2013), Pages 45-59.
- [17]. Hamidreza A., Carlos X., Isak J., Tomas G., Andrew R., 2022, "Preliminary analysis of compression system integrated heat management concepts using LH₂-based parametric gas turbine model". Aerospace 2022, 9(4), 216; <https://doi.org/10.3390/aerospace9040216>.
- [18]. Qiang C., Akram M., Ossi K., Zeeshan A., Larmi M., 2024, "Ammonia as a sustainable fuel: Review and novel strategies". International Journal of Hydrogen Energy, vol. 91, 2024, Pages 88-105.
- [19]. Hideaki K., Akihiro H., Kapuruge D.K.A.S., Ekenechukwu C.O., 2019, "Science and technology of ammonia combustion". Proceedings of the Combustion Institute, Volume 37, Issue 1, 2019, Pages 109-133.
- [20]. Richard J.W., 1970, "Research in U. S. A. on LNG as an airplane fuel". Technical paper proposed for presentation at Second, International Conference on Liquefied Gas sponsored by the International Gas Union, the International Institute of Refrigeration, and the International Institute of Gas Technology Paris, France, October 19-23, 1970.
- [21]. Sosounov V., Orlov V., 1990, "Experimental turbofan using liquid hydrogen and liquid natural gas as fuel". 26th joint propulsion conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics (1990), 10.2514/6.1990-2421.