

Alicja Szymańska\*, Mariusz Ślachciński, Grzegorz M. Szymański  
Politechnika Poznańska

## Zastosowanie paliw alternatywnych w lotnictwie



DOI: 10.15199/62.2026.3.2

**Słowa kluczowe:** ochrona środowiska, paliwa alternatywne, lotnictwo, SAF

W sektorze lotniczym najwięcej zanieczyszczeń powstaje w wyniku spalania paliw kopalnych, dlatego ważne jest przeanalizowanie, w jaki sposób paliwa alternatywne (wytwarzane m.in. z odpowiednio wyselekcjonowanych i przetworzonych odpadów, a także na bazie ditlenku węgla – paliwa syntetyczne) mogą zastąpić tradycyjne paliwa stosowane w lotnictwie.

Paliwa alternatywne to substancje energetyczne wytwarzane z surowców odnawialnych lub odpadowych, które mogą zastępować paliwa kopalne pochodzące z takich surowców, jak ropa naftowa i gaz ziemny. W transporcie lotniczym najczęściej stosowanym paliwem alternatywnym jest SAF (*sustainable aviation fuel*), produkowane m.in. z olejów roślinnych, odpadów komunalnych i mikroalg. Paliwa te mają właściwości fizykochemiczne umożliwiające ich bezpieczne mieszanie z konwencjonalnym paliwem Jet A-1, często w formie *dropin*, co pozwala na stosowanie ich bez modyfikacji istniejącej floty i infrastruktury. Wprowadzenie SAF do sektora lotniczego stanowi istotny element strategii ograniczania emisji gazów cieplarnianych i osiągnięcia dekarbonizacji całego cyklu życia paliwa. Produkcja paliw alternatywnych przyczynia się do zmniejszenia emisji CO<sub>2</sub>, ponieważ rośliny i mikroalgi, które są wykorzystywane jako surowce pochłaniają ditlenek węgla podczas wzrostu. Jednocześnie należy uwzględnić potencjalne skutki uboczne, takie jak konkurencja o ziemię uprawną i wodę

pitną oraz możliwe wylesianie. Pomimo wyższych kosztów produkcji w porównaniu z tradycyjnym paliwem lotniczym, rozwój technologii SAF zyskuje na znaczeniu dzięki rosnącej świadomości ekologicznej i presji regulacyjnej. Oceniając potencjał paliw alternatywnych w lotnictwie, istotne jest uwzględnienie zarówno aspektów technicznych, ekonomicznych, jak i środowiskowych<sup>1</sup>.

### Wpływ lotnictwa na środowisko

W styczniu 2025 r. z usług linii lotniczej LOT skorzystało prawie 770 tys. pasażerów i był to wynik o 10,2% wyższy niż przed rokiem, co podkreśla potrzebę ochrony środowiska przed negatywnymi skutkami korzystania z tego środka transportu. Na rysunku przedstawiono liczbę pasażerów, którzy skorzystali z usług linii lotniczych LOT w latach 2013–2025. W latach 2013–2019 obserwowany był wzrost liczby pasażerów korzystających z transportu samolotowego. W 2019 r. nastąpił spadek związany prawdopodobnie z wybuchem pandemii Covid-19, a w latach 2022–2025 obserwowano już stały wzrost<sup>2</sup>.

Badania Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) wykazały związek między narażeniem na hałas a zaburzeniami uczenia się u dzieci. Uczniowie mieszkający w pobliżu lotnisk uzyskiwali gorsze wyniki w testach niż uczniowie mieszkający na obszarach poza ich zasięgiem. Dalsze badania ujawniły związek między narażeniem na hałas samolotów a stosowaniem leków na zaburzenia lękowe, co wskazuje na wpływ narażenia na emisję hałasu z lotnisk na zdrowie psychiczne<sup>3,4</sup>.

Powszechnie wiadomo, że największym źródłem zanieczyszczenia powietrza powodowanego przez transport lotniczy są operacje lotnicze<sup>5</sup>. Procesy produkcji

paliw stanowią bardzo istotną kwestię, ponieważ dzięki wprowadzeniu paliw alternatywnych emisje powstające podczas ich wytwarzania mogą osiągać wartości ujemne. Potencjał ten odkryto w produkcji paliw z mikroalg, których plantacje pochłaniają ditlenek węgla<sup>6</sup>. Najwięcej zanieczyszczeń powstaje podczas spalania paliw kopalnych, co wiąże się z powstawaniem gazów cieplarnianych, ditlenku węgla, pary wodnej, tlenków azotu, pyłu zawieszonego, lotnych związków organicznych, ditlenku siarki, tlenku węgla i niespalonego wodoru. Ditlenek węgla jest produktem spalania węgla z łańcuchów węglowodorowych paliwa, a podczas niepełnego spalania powstaje również tlenek węgla<sup>7</sup>. Tlenki azotu, występujące w lotnictwie głównie w postaci tlenku azotu i ditlenku azotu, są w większości produktem spalania w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury w komorze spalania, najczęściej podczas startu. Mają negatywny wpływ na zdrowie człowieka, ponieważ osłabiają układ odpornościowy i funkcjonowanie układu oddechowego<sup>8</sup>. Pod wpływem promieniowania słonecznego reagują z lotnymi związkami organicznymi, niespalonym wodorem i tlenkiem węgla, tworząc smog i ozon w warstwie przyziemnej. Podczas ich utleniania powstają związki, które przyczyniają się do powstawania pyłów zawieszonych<sup>9</sup>. Składniki emisji lotniczych, takie jak ditlenek węgla i ozon, powstające jako pośredni efekt spalania paliwa w silnikach lotniczych, przyczyniają się do efektu cieplarnianego i globalnego ocieplenia. Niebezpieczne są również emisje lotnicze powstające w wyższych warstwach atmosfery. Do oceny wpływu przemysłu lotniczego na klimat stosuje się koncepcję wymuszania radiacyjnego (tzw. RF<sup>10</sup>). Jest to miara braku równowagi w bilansie radiacyjnym Ziemi. Oznacza to, że ilość energii docierającej do powierzchni

**\* Adres do korespondencji:**

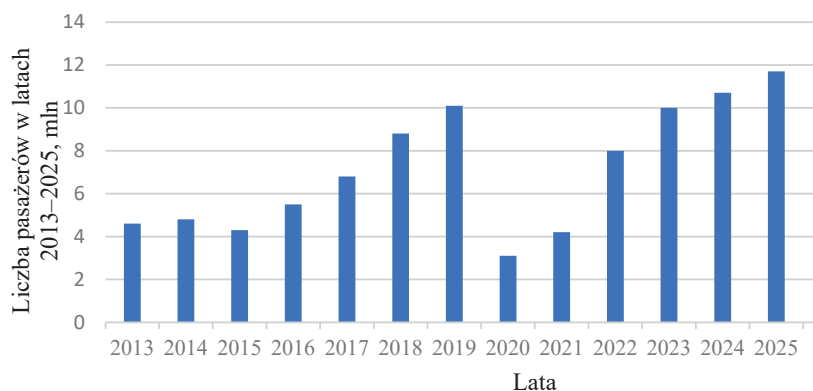
Instytut Chemii i Elektrochemii Technicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska, tel.: (61) 665-22-67, e-mail: alicja.szymanska.1@student.put.poznan.pl

planety z promieniowania słonecznego nie jest równa energii przez nią emitowanej. Jest to spowodowane zmianami stężenia gazów cieplarnianych, aerozoli i chmur w atmosferze<sup>11)</sup>.

## Paliwa alternatywne

Paliwa alternatywne to źródła energii stosowane zamiast tradycyjnych paliw kopalnych (węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego), których celem jest ograniczenie emisji zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych, dywersyfikacja źródeł energii oraz zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego. Zrównoważone paliwa lotnicze stanowią alternatywę dla konwencjonalnych paliw lotniczych, spełniającą kryteria zrównoważonego rozwoju, takie jak zmniejszenie emisji w całym cyklu życia paliwa, ograniczone zapotrzebowanie na wodę słodką, brak potrzeby wylesienia obszarów oraz brak konkurencji z roślinnością żywieniową i jej produkcją<sup>12)</sup>. Tego rodzaju paliwa mogą być produkowane z różnych surowców, np. z przetworzonych olejów i tłuszczów, biodegradowalnych odpadów komunalnych, upraw nienadających się do spożycia, alg oraz węgla w postaci CO<sub>2</sub> pobieranego bezpośrednio z powietrza<sup>13)</sup>. Coraz częściej wymieniany jako najlepsza alternatywa dla konwencjonalnych źródeł energii jest wodór. Głównie ze względu na jego bardzo wysoką wartość opałową<sup>14)</sup>.

SAF to ogólny termin określający paliwo lotnicze produkowane bez użycia paliw kopalnych, takich jak ropa naftowa i gaz ziemny. Jednak aby SAF stało się rozwiązaniem w zakresie paliwa lotniczego, konieczne jest spełnienie wymogów technicznych i certyfikacyjnych. Główną zaletą SAF jest możliwość znaczącego zmniejszenia emisji ditlenku węgla w całym cyklu życia paliwa, które w zależności od zastosowanej technologii i rodzaju surowca może sięgać nawet kilkudziesięciu procent w porównaniu z paliwem konwencjonalnym. Dodatkowo paliwa te charakteryzują się mniejszą zawartością siarki i związków aromatycznych, co prowadzi do zmniejszenia emisji cząstek stałych oraz poprawy jakości spalania w silnikach odrzutowych. Istotnym atutem jest również możliwość produkcji SAF z odpadów oraz surowców odnawialnych, co zwiększa bezpieczeń-



Rysunek. Liczba pasażerów linii lotniczej LOT w latach 2013–2025<sup>9)</sup>

stwo energetyczne sektora lotniczego i zmniejsza zależność od ropy naftowej. Jednocześnie zastosowanie SAF wiąże się z istotnymi ograniczeniami. Przede wszystkim koszty produkcji tego paliwa są wciąż wyższe niż w przypadku tradycyjnej ropy naftowej, co wpływa na opłacalność jego szerokiego wdrażania. Problemem pozostaje także ograniczona dostępność odpowiednich surowców, takich jak oleje odpadowe i biomasa, a w większości technologii konieczne jest mieszanie SAF z paliwem kopalnym w określonych proporcjach. Dodatkowym wyzwaniem jest nadal niewystarczająca globalna skala produkcji, która nie pokrywa zapotrzebowania dynamicznie rozwijającego się sektora lotniczego. W konsekwencji SAF stanowi obecnie kluczowe narzędzie zmniejszania emisji w lotnictwie w perspektywie krótko- i średnioterminowej, jednak jego pełne upowszechnienie ograniczają przede wszystkim czynniki ekonomiczne oraz dostępność surowców.

Międzynarodowe Zrzeszenie Przewoźników Powietrznych IATA (International Air Transport Association) bada poziom produkcji SAF. W 2024 r. wytworzono 1 Tg (1,3 mld L) SAF, czyli o 0,5 Tg mniej niż szacowano. Należy zauważyć, że wyniki za 2024 r. są wyższe od tych z roku poprzedniego, kiedy to produkcja SAF wyniosła 0,5 Tg (600 mln L). Paliwa alternatywne stanowiły wtedy 0,3% globalnej produkcji paliwa lotniczego i 11% globalnej produkcji paliw odnawialnych<sup>12)</sup>.

Główne procesy technologiczne stosowane w produkcji SAF różnią się stosowanymi surowcami, złożonością procesową, dojrzałością rynkową oraz właściwościami otrzymywanych paliw.

## Technologia HEFA-SPK

HEFA (*hydroprocessed esters and -synthetic paraffinic kerosene*) polega na hydrowy rafinacji olejów roślinnych, tłuszczów zwierzęcych lub zużytych olejów spożywczych, obejmującej reakcje hydrodeoksygenacji, hydrokrakingu i izomeryzacji, prowadzące do węglowodorów parafinowych o właściwościach zbliżonych do paliwa Jet A-1. Otrzymywane paliwo HEFA-SPK charakteryzuje się bardzo małą zawartością siarki i węglowodorów aromatycznych oraz wysoką stabilnością spalania, jednak ze względu na niedobór aromatów wymaga mieszania z paliwem konwencjonalnym w określonym udziale objętościowym. Do głównych zalet tej technologii należy wysoka dojrzałość technologiczna, kompatybilność z istniejącą infrastrukturą rafineryjną oraz relatywnie wysoka efektywność konwersji, natomiast ograniczeniem pozostaje dostępność surowców lipidowych oraz ich konkurencja z sektorem spożywczym. Spośród wszystkich ścieżek produkcji SAF HEFA jest obecnie najbardziej rozwiniętą i dominującą technologią komercyjną<sup>15)</sup>.

## FT-SPK

Proces FT-SPK (*Fischer-Tropsch synthetic paraffinic kerosene*) opiera się na zgazowaniu biomasy lub odpadów do gazu syntezowego (CO i H<sub>2</sub>), a następnie jego katalitycznej konwersji w procesie Fischera i Tropscha do syntetycznych węglowodorów, które po dalszym uszlachetnianiu tworzą frakcję paliwa lotniczego. Otrzymywane paliwo zawiera głównie *n*-alkany i izoalkany o bardzo wysokiej czystości oraz małej zawartości zanieczyszczeń, co przekłada się na

korzystne właściwości spalania i zmniejszenie emisji. Zaletą technologii jest szeroka elastyczność surowcowa (biomasa lignocelulozowa, odpady komunalne), natomiast wadami są wysoka złożoność technologiczna, wieloetapowość procesu (zgazowanie-synteza-rafinacja) oraz wysokie nakłady inwestycyjne. Technologia ta została dopuszczona do stosowania w lotnictwie, jednak jej komercjalizacja jest mniej rozwinięta niż w przypadku HEFA<sup>16</sup>.

## Technologia ATJ

Technologia ATJ (*alcohol-to-jet*) polega na konwersji alkoholi (np. etanolu lub izobutanolu) otrzymywanych z biomasy poprzez odwodnienie, oligomeryzację, a następnie uwodornienie do parafinowych węglowodorów lotniczych. Uzyskane paliwo ATJ-SPK cechuje się właściwościami fizykochemicznymi zbliżonymi do konwencjonalnej kerozyny, jednak, podobnie jak w przypadku HEFA, charakteryzuje się małą zawartością aromatów i wymaga mieszania z paliwem kopalnym. Zaletą tej ścieżki jest możliwość wykorzystania różnorodnych surowców fermentacyjnych (cukry, odpady rolnicze), natomiast ograniczeniami są wieloetapowość procesu, straty energetyczne podczas konwersji alkoholu oraz relatywnie wysokie koszty produkcji. Technologia ATJ znajduje się na etapie rosnącej komercjalizacji, lecz jej udział rynkowy pozostaje niższy niż HEFA<sup>17</sup>.

## Technologia SIP

Technologia SIP (*synthetic iso-paraffins from sugars*) opiera się na fermentacyjnej konwersji cukrów (powstałych m.in. z trzciny cukrowej, buraków cukrowych, melasy, syropów skrobiowych z kukurydzy i pszenicy) do izoparafinowych węglowodorów, które po dalszej obróbce hydrochemicznej mogą być stosowane jako komponent paliwa lotniczego. Otrzymywane paliwo cechuje się wysoką zawartością izoparafin oraz dobrą stabilnością oksydacyjną, jednak jego mniejsza gęstość energetyczna ogranicza dopuszczalny udział w mieszankach paliwowych. Zaletą tej metody jest wykorzystanie surowców cukrowych i biotechnologicznych procesów konwersji, natomiast wadami są mała dojrzałość technologiczna, ograniczona skala przemysłowa oraz wyższe

koszty produkcji w porównaniu z HEFA. W konsekwencji technologia SIP pozostaje rozwiązaniem niszowym o ograniczonej komercjalizacji<sup>18</sup>.

## Technologia CHJ

Proces CHJ (*catalytic hydrothermolysis jet fuel*) polega na hydrotermicznej konwersji tłuszczów i olejów w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia w obecności katalizatorów oraz wodoru, co prowadzi do powstania mieszaniny parafin, cykloalkanów i ograniczonej ilości związków aromatycznych. Otrzymywane paliwo charakteryzuje się lepszą kompatybilnością materiałową w porównaniu z czystym HEFA dzięki obecności składników cyklicznych (w paliwach lotniczych zalicza się do nich m.in. cykloalkany, np. cykloheksan i aromaty, takie jak benzen, toluen, ksyleny), które poprawiają właściwości uszczelniające i smarne. Do zalet technologii zalicza się możliwość wykorzystania podobnych surowców jak w HEFA oraz uzyskanie paliwa o bardziej zrównoważonym składzie chemicznym, natomiast ograniczeniami pozostają: mniejsza liczba instalacji przemysłowych, wyższa złożoność technologiczna oraz wczesny etap wdrożeń komercyjnych<sup>19</sup>.

## PtL/e-SAF

Technologia PtL (*power-to-liquid*) polega na syntezie paliw ciekłych z wykorzystaniem zielonego wodoru (uzyskiwanego w procesie elektrolizy) oraz wychwyconego ditlenku węgla, które przekształca się w gaz syntezowy, a następnie w węglowodory metodą Fischera i Tropscha lub pokrewnymi procesami katalitycznymi. Otrzymywane paliwo cechuje się bardzo wysoką czystością chemiczną, możliwością pełnej kompatybilności z silnikami lotniczymi oraz potencjalnie niemal zerowym bilansem emisji CO<sub>2</sub> w cyklu życia (w zależności od źródła energii elektrycznej). Do głównych zalet należy bardzo wysoki potencjał zmniejszenia emisji oraz brak zależności od biomasy, natomiast zasadniczymi wadami są bardzo wysokie koszty energii elektrycznej, niska sprawność całkowita łańcucha konwersji oraz wczesny etap rozwoju przemysłowego. Obecnie technologia PtL znajduje się głównie w fazie demonstracyjnej i pilotażowej<sup>20</sup>.

## Porównanie technologii

Analiza porównawcza wskazuje, że technologie produkcji SAF różnią się przede wszystkim rodzajem wykorzystwanego surowca, stopniem złożoności procesu oraz dojrzałością technologiczną. HEFA pozostaje najbardziej skomercjalizowaną i najczęściej stosowaną ścieżką produkcji paliw lotniczych ze względu na względnie prostą konwersję surowców lipidowych i kompatybilność z istniejącą infrastrukturą rafineryjną. Procesy FT oraz ATJ oferują większą elastyczność surowcową, umożliwiając wykorzystanie biomasy lignocelulozowej i alkoholi fermentacyjnych, jednak wymagają bardziej złożonych instalacji technologicznych i wyższych nakładów inwestycyjnych. Technologie SIP i CHJ pozostają rozwiązaniami niszowymi o ograniczonej skali przemysłowej, natomiast ścieżka PtL uznawana jest za najbardziej perspektywiczną długoterminowo ze względu na potencjał niemal pełnej neutralności klimatycznej, pomimo obecnie bardzo wysokich kosztów produkcji. Przedstawione różnice technologiczne przekładają się bezpośrednio na właściwości otrzymywanych paliw, ich gęstość energetyczną, zawartość aromatów, kompatybilność materiałową oraz dopuszczalne udziały w mieszankach z paliwem konwencjonalnym, co stanowi kluczowy aspekt oceny możliwości ich szerokiego wdrożenia w sektorze lotniczym.

Niestety obecnie produkcja SAF pozostaje niewielka w porównaniu z zapotrzebowaniem na paliwa lotnicze, co oznacza konieczność znacznego zwiększenia ich wytwarzania do 2050 r., aby osiągnąć cele neutralności węglowej. Wprowadzanie paliw alternatywnych do sektora lotniczego napotyka na bariery ekonomiczne związane z kosztami produkcji, dostępnością surowców oraz konkurencyjnością cenową. W Polsce w produkcję SAF zaangażował się Orlen, który w lipcu 2022 r. podpisał porozumienie z PLL LOT. Prowadzenie badań nad metodami produkcji, które łączą opłacalność ekonomiczną z korzystnym wpływem na środowisko jest kluczowe, aby alternatywne paliwa mogły skutecznie konkurować z tradycyjnymi paliwami lotniczymi<sup>21</sup>. Zastąpienie paliw konwencjonalnych wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na energię, ponieważ produkcja paliw alternatywnych wymaga znaczących nakładów energe-

tycznych. W zależności od rodzaju stosowanych paliw i ich udziału w różnych typach statków powietrznych możliwe jest ograniczenie tego wzrostu, jednak należy pamiętać, że stosowanie SAF jako jedyne- go paliwa nie pozwoli w pełni zaspokoić potrzeb rynku w horyzoncie czasowym potrzebnym do osiągnięcia neutralności węglowej. W celu osiągnięcia sukcesu w tej dziedzinie konieczne jest również wykorzystanie potencjału innych napędów alternatywnych, np. wykorzystujących ciekły wodór lub ogniwa paliwowe i napęd elektryczny oparty na akumulatorach<sup>22)</sup>.

## Podsumowanie

Zrównoważone paliwa lotnicze odgrywają kluczową rolę w osiągnięciu całkowitej dekarbonizacji sektora lotniczego. Oczekuje się, że w nadchodzących latach w największym stopniu przyczynią się do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla<sup>23)</sup>. Obecnie opracowano wiele nowych rozwiązań mających na celu zmniejszenie emisji w całym cyklu życia paliwa, wykorzystując materiały takie, jak zużyty olej roślinny, odpady komunalne i mikroalgi, które pochłaniają dwutlenek węgla z powietrza. Zwrócono także uwagę na wykorzystanie gleby, konkurencję o wodę pitną i inne aspekty, które europejski program

inwestycyjny CEF (*Connecting Europe Facility*) rozszerza, dodając kolejne wymogi. Niestety, produkcja paliwa SAF jest obecnie droższa niż produkcja tradycyjnego paliwa lotniczego. Pomimo faktu, że paliwo to jest wytwarzane z odnawialnych źródeł, niektórzy krytycy twierdzą, że produkcja tych surowców może mieć negatywny wpływ na środowisko, obejmujący m.in. wylesianie i konkurowanie z uprawami roślin spożywczych<sup>24)</sup>.

Otrzymano: 12-02-2026

Zrecenzowano: 19-02-2026

Zaakceptowano: 26-02-2026

Opublikowano: 17-03-2026

## LITERATURA

- [1] W. Klimczyk, R. Jasiński, J. Niklas, M. Siedlecki, A. Ziółkowski, *Energies* 2025, **18**, 3705
- [2] <https://www.rynek-lotniczy.pl/wiadomosci/pll-lot-rekordowy-2025-rok-i-117-mln-pasazerow-26709.html>, dostęp 20.02.2026 r.
- [3] S. Benz, J. Kuhlmann, S. Jeram, [w:] *Aviation noise impact management* (red. L. Leylekian, A. Covrig, A. Maximova), Springer, Cham 2022.
- [4] M. Basner, C. Clark, A. Hansell, *Annu. Rev. Public Health* 2017, **38**, 305.
- [5] Airbus, Sustainable Aviation Fuel: A Recipe for Cleaner Flight, 2021, [https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/4f5369d-711f3576e733328b89d63d86c\\_EN-A350-SAF-study-launch.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/4f5369d-711f3576e733328b89d63d86c_EN-A350-SAF-study-launch.pdf?utm_source=chatgpt.com).
- [6] C. Even, D. Hadroug, Y. Boumlaik, G. Simon, *Energy Nexus* 2022, **7**, 100.
- [7] I. Larki, A. Zahedi, M. Asadi, M.M. Foroortan, M. Farajollahi, A. Ahmadi, *Sci. Total Environ.* 2023, **903**, 166108.
- [8] U. Bardi, P. Bierwirth, K.-W. Huang, J. McIntyre, *Environ. Sci. Adv.* 2025, **4**, 1364.
- [9] Y. Cai, Q. Xue, R. Zhang, *npj Clim. Atmos. Sci.* 2022, **5**, 95.
- [10] P. Rao, S.D. Eastham, D.W. Keith, S.R.H. Barrett, *Commun. Earth Environ.* 2024, **5**, 558.
- [11] E. Terrenoire, D.A. Hauglustaine, Y. Cohen, A. Cozic, R. Valorso, F. Lefèvre, *Atmos. Chem. Phys.* 2022, **22**, 11987.
- [12] <https://www.rynek-lotniczy.pl/wiadomosci/iata-powolny-wzrost-produkcji-saf-w-polsce-tylko-orken-22830.html>, dostęp 20.02.2026 r.
- [13] G.M. Szymański, B. Wyrwas, K. Struczarek, M. Klekowicki, M. Nowak, A. Ludwiczak, A. Szymańska, *Energies* 2025, **18**, 3604.
- [14] M.M.H. Bhuiyan, Z. Siddique, *Int. J. Hydrogen Energy* 2025, **102**, 1026.
- [15] A. de Jong, R. Hoefnagels, M. Faaij, R. Slade, R. Mawhood, M. Junginger, *Appl. Energy* 2015, **161**, 628.
- [16] M. Mawhood, R. Slade, A. Taylor, R. Gross, *Appl. Energy* 2016, **162**, 821.
- [17] R.A. Brown, R. Martinez-Botas, A.F. Ghoniem, *Prog. Energy Combust. Sci.* 2020, **81**, 100878.
- [18] C. Chuck, C. Donnelly, *Appl. Energy* 2014, **118**, 83.
- [19] J.M. Holladay, J. Hu, D.L. King, Y. Wang, *Catal. Today* 2009, **139**, nr 4, 244.
- [20] M. Fasihi, O. Efimova, C. Breyer, *J. Cleaner Prod.* 2019, **224**, 957.
- [21] <https://www.congress.gov/crs-product/IF12847>, dostęp 20.02.2026 r.
- [22] V. Undavalli, O. Olatunde, R. Boyle, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2023, **136**, 100876.
- [23] J. Domone, *Alternative fuels for sustainable aviation: energy and infrastructure*, Elsevier, 2023.
- [24] European Union Aviation Safety Agency (EASA), *European Aviation Environmental Report 2022*, Cologne 2022.

czasopismo naukowo-techniczne science technical journal

# CHEMIK

4 • 2025

nauka • technika • rynek science • technique • market

**ODKRYWAJ PUBLIKUJ INSPIRUJ**

Chemia stosowana: badania stosowane, technika, technologia przemysłowa, kontrola procesów, zarządzanie: jakością, środowiskiem i bezpieczeństwem oraz zagadnienia organizacyjno-prawne.

nauka      technika      rynek

SITP Chem      Politechnika Wrocławska

"CHEMIK" Czasopismo Naukowo-Techniczne założone w 1948 roku. Wydawane od 2022 r. przez Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego i Politechnikę Wrocławską