psnm WE DRIVE NEW MOBILITY!

POLITECHNIKA POZNAŃSKA



Zrównoważone paliwa w lotnictwie

Krok w stronę neutralności klimatycznej

WYDAWCA
Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności (PSNM)
psnm.org

REDAKCJA

Remigiusz Jasiński
Instytut Napędów i Lotnictwa Politechniki Poznańskiej

Paula Kurzawska-Pietrowicz
Instytut Napędów i Lotnictwa Politechniki Poznańskiej

Aleksander Rajch
Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności

Maciej Gis
Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności

WERYFIKACJA MERYTORYCZNA RAPORTU
Politechnika Poznańska
Instytut Napędów i Lotnictwa

WSPÓŁPRACA
Politechnika Poznańska

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

PROJEKT GRAFICZNY I SKŁAD
Natalia Minksztym

Wszelkie prawa zastrzeżone
Warszawa, 2026

Spis treści

Słowo wstępu 05

Streszczenie 10

1. Wprowadzenie – kontekst globalny i europejski 11

2. Czym jest SAF – definicja i rodzaje 15

Generacje biopaliw 17

Certyfikowane procesy produkcji SAF 18

3. Aktualny stan rozwoju technologii SAF 21

Firmy i projekty zajmujące się produkcją SAF 23

4. Potencjał producyjny SAF - dostępność surowców w Polsce i Europie 26

Surowce i potencjał w Unii Europejskiej 28

Surowce i potencjał w Polsce 29

5. Wpływ SAF na redukcję emisji i jakość powietrza 31

Emisja cząstek stałych i tlenków azotu 35

Wpływ wykorzystania SAF na powstawanie smug kondensacyjnych i efekty radiacyjne 37

6. Aspekty ekonomiczne SAF 38

Aktualne ceny SAF vs Jet A-1 39

Prognozy kosztów produkcji SAF 40

Mechanizmy wsparcia wdrażania SAF 41

Podsumowanie 42

7. Wdrażanie SAF w transporcie lotniczym 43

Umowy długoterminowe (ang. offtake agreements) i inicjatywy portów lotniczych 45

Studium przypadków linii lotniczych – KLM i Lufthansa 46

8. Regulacje i strategie polityczne 49

Regulamin Aviation 51

Program Corsia 53

Wybrane strategie krajowe 54

9. Wyzwania i bariery rozwoju SAF 55

Koszty inwestycji 56

Ograniczenia surowcowe 57

Problemy logistyczne i certyfikacja paliwa 57

10. Możliwości dla Polskiego sektora transportowego i przemysłowego 60

Potencjalne lokalizacje produkcji SAF w Polsce 61

Porty lotnicze i Port Polska – integracja logistyki SAF 64

11. Rekomendacje dla branży i decydentów 65

Krótkoterminowe (do 2027 r.) 66

Średnioterminowe (2027-2035) 66

Długoterminowe (2035-2050) 67

12. Podsumowanie – SAF jako element transformacji transportu lotniczego 68

Kluczowe wnioski 70

Słowo wstępu



dr hab. inż.
Remigiusz Jasiński
Instytut Napędów
i Lotnictwa Politechniki
Poznańskiej

Szanowni Państwo,

lotnictwo cywilne znajduje się dziś w jednym z najtrudniejszych, ale i najbardziej przełomowych momentów swojej historii. Z jednej strony stanowi niezbędny element globalnej mobilności, gospodarki i łączności między ludźmi, z drugiej – stoi wobec bezprecedensowej presji redukcji emisji gazów cieplarnianych i zanieczyszczeń lokalnych. Wyzwanie to ma charakter zarówno technologiczny, jak i systemowy – wymaga współdziałania przemysłu, nauki, administracji i społeczeństwa w dążeniu do dekarbonizacji przy zachowaniu konkurencyjności sektora.

Celem niniejszego raportu jest przedstawienie aktualnego stanu wiedzy, barier oraz potencjału rozwoju zrównoważonych paliw lotniczych – rozwiązania, które już dziś może znacząco ograniczyć wpływ transportu lotniczego na klimat. W odróżnieniu od koncepcji wymagających daleko idących zmian w konstrukcji statków powietrznych, zrównoważone paliwa lotnicze stanowią ścieżkę realną i natychmiast dostępną: paliwa te mogą być stosowane w istniejącej infrastrukturze i flocie, redukując emisje w całym cyklu życia nawet o 80–90%.

Raport powstał z przekonania, że Polska – dzięki zasobom biomasy, punktowym źródłom CO_2, zapleczu badawczo-rozwojowemu i rosnącej świadomości środowiskowej – ma realną szansę stać się aktywnym uczestnikiem rynku zrównoważonych paliw lotniczych. Naszym zadaniem nie jest więc jedynie obserwacja globalnych trendów, ale świadome budowanie krajowych kompetencji, infrastruktury i łańcuchów wartości.

Zebrane w raporcie dane, analizy i rekomendacje mają na celu wsparcie decyzji inwestycyjnych, regulacyjnych i strategicznych. Mają także służyć budowie wspólnej narracji – o przyszłości lotnictwa, które pozostaje symbolem postępu, ale jednocześnie potrafi przyjąć odpowiedzialność za swój ślad środowiskowy.

Mam nadzieję, że raport ten stanie się punktem odniesienia dla dalszej współpracy między sektorem akademickim, przemysłowym i publicznym – współpracy opartej na wiedzy, ambicji i wspólnej trosce o przyszłość mobilności lotniczej.



Aleksander Rajch
Członek Zarządu
PSNM

Szanowni Państwo,

stoimy u progu jednej z największych transformacji w historii lotnictwa cywilnego. Sektor lotniczy, odpowiedzialny za około 2–3% globalnych emisji CO_2, znalazł się w centrum debaty klimatycznej, a jednocześnie musi sprostać rosnącemu zapotrzebowaniu na transport powietrzny. Prognozy rynkowe wskazują, że liczba pasażerów korzystających z transportu lotniczego podwoi się w ciągu najbliższych dwóch dekad, co stawia przed nami fundamentalne pytanie: jak pogodzić rozwój branży z imperatywem ochrony klimatu?

Odpowiedź na to wyzwanie jest wielowymiarowe, a paliwa typu SAF stanowią dziś najdojrzalszą i najbardziej realną ścieżkę dekarbonizacji lotnictwa w średnim horyzoncie czasowym. W przeciwieństwie do napędów elektrycznych czy wodorowych, które wymagają nowego podejścia do konstrukcji samolotów i infrastruktury lotniskowej (pomijając kwestię dodatkowej masy i stabilności napędu), paliwa zrównoważone można wprowadzać już teraz, wykorzystując istniejącą flotę i systemy dystrybucji.

Droga przed nami jest jednak wymagająca. Produkcja SAF stanowi dziś zaledwie procenty globalnego zużycia paliw lotniczych. Koszty wytwarzania pozostają wielokrotnie wyższe niż kerozeny, a dostępność surowców oraz technologie produkcyjne wymagają radykalnego skalowania. Stoimy przed koniecznością zbudowania całkowicie nowej infrastruktury przemysłowej i łańcuchów wartości, przy jednoczesnym zapewnieniu, że proces ten będzie rzeczywiście zrównoważony w całym cyklu życia produktu.

To wyzwanie nie jest tylko techniczne – to także kwestia koordynacji między regulatorami, producentami, liniami lotniczymi i dostawcami surowców. Wymaga odważnych decyzji inwestycyjnych, długoterminowego zaangażowania i akceptacji okresu przejściowego, w którym koszty będą wysokie, a marże niepewne.

Niniejszy raport ma za zadanie przybliżyć złożoność tematu paliw SAF – od technologii produkcji, przez wyzwania łańcucha dostaw, po ramy regulacyjne i modele biznesowe. Pokazujemy zarówno ogromny potencjał, jak i realne bariery, które musimy wspólnie przezwyciężyć. Jako Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności wierzymy, że tylko poprzez rzetelną analizę i otwarty dialog możemy stworzyć warunki dla skutecznej transformacji sektora lotniczego. Tym samy, jako organizacja branżowa kontynuujemy pracę, którą od dekady wkładamy w dekarbonizacji transportu drogowego. Wierzymy bowiem, że od decyzji podjętych dziś, zależy nasze jutro. Z tą myślą, zachęcamy Państwa do lektury przygotowanego przez nas wraz z Politechniką Poznańską raportu.



Dr inż. Maciej Gis
Dyrektor Komunikacji
i PS PSNM

Szanowni Państwo,

europejskie lotnictwo wkracza w erę transformacji regulacyjnej. Rozporządzenie ReFuelEU Aviation wyznacza ścieżkę, która nie pozostawia miejsca na wątpliwości: 2% udziału zrównoważonych paliw lotniczych w 2025 r., 6% w 2030, by osiągnąć 70% w 2050 r. To nie są cele aspiracyjne – to prawnie wiążące mandaty z systemem kar za niedostosowanie. Równocześnie rozszerzony system EU ETS nakłada na sektor lotniczy coraz wyższe koszty emisji CO_2. Stawka jest jasna: linie lotnicze, które nie zapewnią dostępu do SAF, będą ponosić rosnące koszty operacyjne, tracąc konkurencyjność wobec tych, którzy zainwestowali w transformację.

Dla Polski ten moment ma wymiar strategiczny, wykraczający poza samą dekarbonizację. Stoimy przed fundamentalnym wyborem gospodarczym: czy zbudujemy krajowe zdolności produkcyjne SAF, stając się eksporterem technologii i produktu, czy zostaniemy importerem, płacąc podwójną cenę – za paliwo i za utratę szansy rozwojowej. Różnica między tymi scenariuszami to nie tylko kwestia kosztów dla przewoźników, ale przede wszystkim miejsc pracy, transferu technologii i pozycjonowania Polski w nowym łańcuchu wartości europejskiego lotnictwa.

Raport, który Państwo trzymają w rękach, dowodzi, że potencjał istnieje. Polska dysponuje znaczącymi zasobami biomasy – od odpadów leśnych i słomy, przez używane oleje, po perspektywiczne uprawy celowe na gruntach niskiej jakości. Posiadamy rozbudowaną infrastrukturę rafineryjną, która może stać się podstawą dla zakładów konwersji biomasy na SAF. Mamy też koncern o zdolnościach inwestycyjnych i technologicznych, który może odegrać kluczową rolę w budowie krajowego ekosystemu produkcyjnego. Wreszcie, projekt Centralnego Portu Komunikacyjnego tworzy unikalną szansę na stworzenie zintegrowanego hubu logistycznego dla dystrybucji SAF w regionie.

Jednakże potencjał sam się nie zrealizuje. Dzisiejsze ceny SAF są 2,5 do 3,5 raza wyższe od konwencjonalnego paliwa Jet A-1. Bez mechanizmów wsparcia kapitałowego dla pierwszych inwestycji, bez długoterminowych gwarancji odbioru produkcji i bez stabilnego otoczenia regulacyjnego, żaden prywatny inwestor nie podejmie ryzyka budowy zakładu za setki milionów euro. Europa Zachodnia to rozumie – Francja, Niemcy, Holandia już uruchomiły dedykowane programy wspierające przemysł SAF. Polska nie może sobie pozwolić na opóźnienie, jeśli chce zachować szansę konkurencyjnego uczestnictwa w tym rynku.

Niniejszy raport przedstawia Analizę dostępnych technologii produkcji – od najdojrzalszej HEFA, przez rozwojowe ATJ, po przyszłościowe e-paliwa oparte na zielonej energii elektrycznej. Pokazujemy konkretne case studies europejskich linii lotniczych, które już dziś budują długoterminowe kontrakty na

dostawy SAF. Wskazujemy bariery – logistyczne, certyfikacyjne, ekonomiczne – które trzeba systematycznie usuwać. Formułujemy rekomendacje dla trzech horyzontów czasowych: działań pilnych do 2027 r., strategicznych do 2035 r. i transformacyjnych do 2050 r.

Kluczowym przesłaniem tego raportu jest przekonanie, że czas na decyzje jest teraz. Okno możliwości dla Polski, aby stać się istotnym graczem w europejskiej produkcji SAF, nie będzie otwarte wiecznie. Pierwsze zakłady produkcyjne w Europie Zachodniej ruszyły już w 2024 r., kolejne będą uruchamiane w tempie przyspieszonym. Jeśli nie podejmiemy skoordynowanych działań w najbliższych 2-3 latach, rynek zostanie opanowany przez graczy z innych krajów, a polska gospodarka zostanie zepchnięta do roli płacącego odbiorcy cudzych technologii.

Transformacja energetyczna lotnictwa to fakt dokonany, niezależny od naszych preferencji. Pytanie brzmi jedynie: jaką rolę w niej odegramy – aktywną czy bierną, liderów czy naśladowców, beneficjentów czy płatników?

Streszczenie

Lotnictwo cywilne, mimo relatywnie niewielkiego udziału w globalnych emisjach CO_2, wywiera istotny wpływ na klimat i jakość powietrza ze względu na szybki przyrost liczby operacji i dodatkowe efekty radiacyjne. W obliczu zaostrzających się regulacji europejskich sektor stoi przed koniecznością głębokiej transformacji.

Kluczowym rozwiązaniem są zrównoważone paliwa lotnicze (SAF) – jedyna technologia możliwa do natychmiastowego wdrożenia w istniejącej flocie, zapewniająca ograniczenie emisji gazów cieplarnianych nawet o 80–90% oraz znaczące zmniejszenie emisji cząstek stałych. Rozwój rynku SAF w Europie i w Polsce wymaga jednak pokonania barier surowcowych, technologicznych i ekonomicznych. Realizacja tych zadań wymaga odpowiedniej strategii inwestycyjnej i integracji różnych środowisk gospodarczych.

Tab. 1. Najważniejsze wnioski

Regulacje	**od 2% w 2025 r. do 70% w 2050 r.**	ReFuelEU Aviation i ETS wyznaczają ambitną ścieżkę – od obowiązku 2% SAF w 2025 r. do 70% w 2050 r.
Technologie	**obecnie HEFA, przyszłościowo ATJ i PtL**	Obecnie najbardziej dojrzały jest proces HEFA (hydroprzetworzone estry i kwasy tłuszczowe), a w perspektywie średnio- i długoterminowej kluczowe znaczenie będą miały ATJ (ang. Alcohol-to-Jet) i e-paliwa (PtL – ang. Power-to-Liquid).
Producenci i rynek	**globalni liderzy, potencjał Orlenu**	Globalni liderzy (Neste, Total, World Energy, SkyNRG) inwestują w nową infrastrukturę, w Polsce potencjał związany jest z ORLENem i zasobami biomasy.
Środowisko	**GHG -90%, PM od -50% do -70%**	Analiza cyklu życia SAF wskazuje na redukcję emisji GHG (ang. Greenhouse Gases) nawet o 90%, ograniczenie emisji PM (ang. Particulate Matters) o 50-70% i mniejszą skłonność do powstawania smug kondensacyjnych.
Ekonomia	**ceny 2,5-3,5 razy wyższe**	Ceny SAF są obecnie 2,5–3,5 razy wyższe od paliwa Jet A-1 (standardowe paliwo lotnicze stosowane w silnikach turbinowych na całym świecie), ale mechanizmy rynkowe i skala produkcji mogą stopniowo zmniejszyć tę różnicę.

1. Wprowadzenie – kontekst globalny i europejski

Transport lotniczy odpowiada obecnie za około 2-3% globalnej emisji CO_2. Choć udział procentowy w skali światowej wydaje się niewielki, problemem pozostaje dynamika wzrostu – w latach 1990-2019 emisje z lotnictwa zwiększyły się o 146%, podczas gdy wiele innych sektorów transportu odnotowało spadki. Współcześnie lotnictwo oddziałuje na klimat 2-4 razy silniej, niż wynikałoby to jedynie z emisji CO_2.[1]

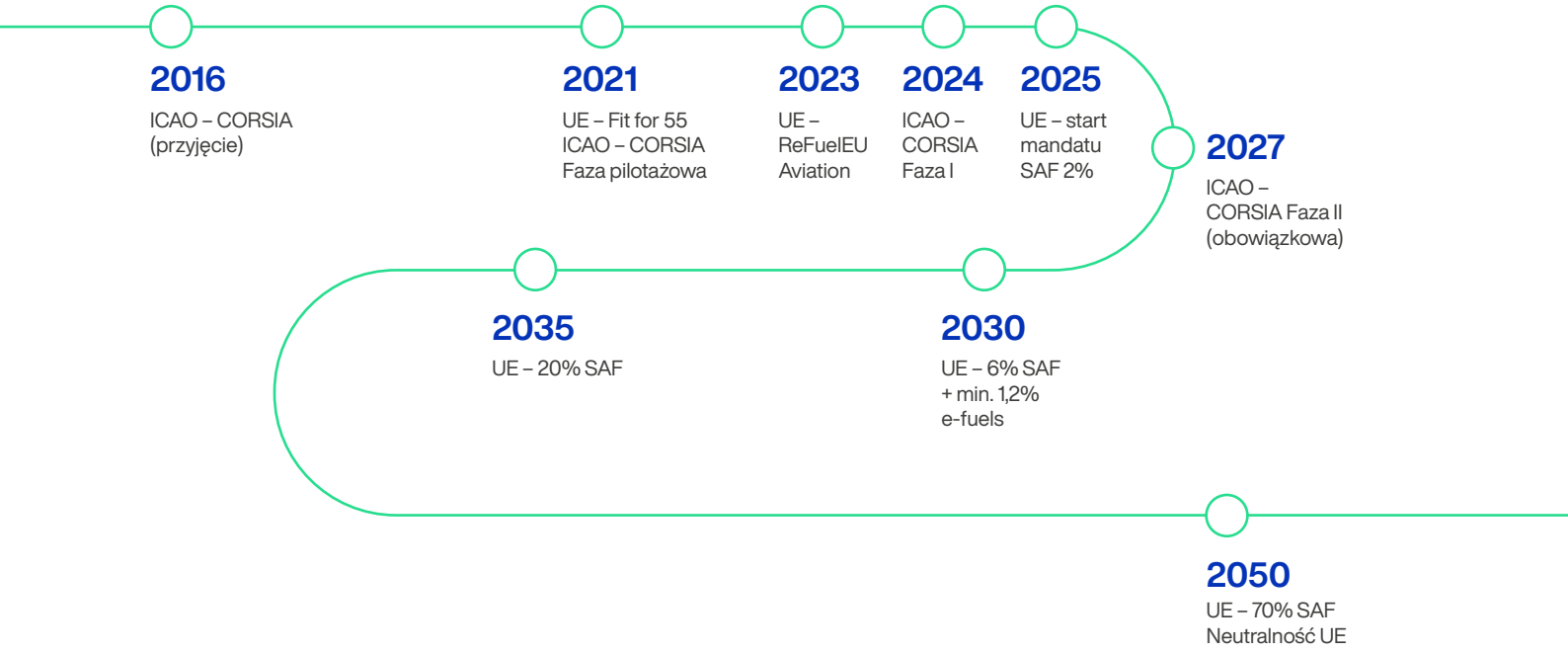
Lotnictwo pozostaje jednym z najtrudniejszych sektorów do dekarbonizacji, ponieważ technologie alternatywne (napęd elektryczny, wodorowy) są na razie ograniczone do niszowych zastosowań. W perspektywie najbliższych lat jedyną realną drogą do ograniczenia emisji pozostaje zwiększanie efektywności floty oraz zastępowanie paliwa Jet A-1 paliwami zrównoważonymi (ang. Sustainable Aviation Fuel, SAF). Prognozy ICAO wskazują, że bez dodatkowych działań emisje z lotnictwa mogą wzrosnąć 3-4-krotnie do 2050 r. względem roku 2018. W warunkach nasilającego się kryzysu klimatycznego i globalnych celów neutralności węglowej jest to scenariusz nieakceptowalny politycznie i społecznie.[2]

Presja regulacyjna na sektor lotniczy narasta równolegle w wymiarze globalnym (ICAO – ang. International Civil Aviation Organization) i europejskim (UE). Główne mechanizmy regulacji emisji z lotnictwa to mechanizm globalny CORSIA (ang. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation), pakiet regulacji UE z 2021 r. – Fit for 55, mający obniżyć emisje gazów cieplarnianych o 55% do 2030 r. względem 1990 r. Lotnictwo włączono do Europejskiego Systemu Handlu Emisjami (EU ETS), co oznacza, że linie lotnicze płacą za emisje CO_2 w europejskiej przestrzeni powietrznej. Jedną z ważniejszych regulacji jest rozporządzenie ReFuelEU Aviation (2023), wprowadzające obowiązkowy udział SAF w paliwie lotniczym tankowanym na lotniskach UE: 2% od 2025 r., 6% od 2030 r., aż do 70% w 2050 r.

1) Komisja Europejska. Sprawozdanie komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady, Sprawozdanie z postępu prac na temat działań UE w dziedzinie klimatu za 2023 r. 24.10.2023.

2) ICAO, Environmental Trends in Aviation to 2050, Aviation & Environmental Outlook

Rys. 1. Timeline regulacji klimatycznych w lotnictwie – UE i ICAO



Skutki emisji innych związków niż CO_2 odpowiadają za ok. 66% całkowitego wpływu lotnictwa na środowisko. Lot krajowy wiąże się z emisją kilkanaście do ponad dwudziestu razy większej ilości tlenków azotu i nawet kilka tysięcy razy większej liczby cząstek stałych w porównaniu z podróżą nowoczesnym samochodem spalinowym. Warto zauważyć, że wskaźniki dla auta oparte są na normie granicznej, podczas gdy w praktyce nowoczesne filtry cząstek stałych mogą jeszcze skuteczniej ograniczać emisję cząstek stałych. Z kolei w lotnictwie dane pochodzą z bazy ICAO i odnoszą się do poszczególnych faz lotu – przy czym faza wznoszenia (climb-out) należy do najbardziej emisyjnych i daje górne oszacowania dla całego rejsu.

Dotąd emisje inne niż CO_2 nie były monitorowane, ale obowiązek monitorowania od 2025 r. spoczywa na operatorach statków powietrznych w ramach EU ETS, a nie na państwach członkowskich. Do końca 2027 r., w oparciu o wyniki raportów, Komisja Europejska przedstawi sprawozdanie i projekt przepisów służących ograniczeniu skutków emisji innych związków szkodliwych niż CO_2 w sektorze lotnictwa.[3]

W efekcie nowych regulacji, linie lotnicze i operatorzy paliwowi muszą przygotować się do gwałtownego wzrostu kosztów i inwestycji, związanych zarówno z zakupem SAF, jak i z uczestnictwem w systemach handlu emisjami.

3) Komisja Europejska. Sprawozdanie komisji dla Parlamentu Europejskiego i Rady, Sprawozdanie z postępu prac na temat działań UE w dziedzinie klimatu za 2023 r. 24.10.2023.

Europa jest dziś liderem w polityce klimatycznej dla lotnictwa

1. UE jako pierwsza wprowadziła obowiązkowy udział SAF (ReFuelEU)
2. Europejskie linie lotnicze (Lufthansa, Air France-KLM, IAG) zawierają długoterminowe kontrakty na dostawy SAF
3. Wiele firm i projektów bazujących na produkcji SAF jest rozwijanych na terenie Europy
4. Polska, poprzez uczestnictwo w UE i ICAO, jest objęta tymi samymi mechanizmami. Dodatkowo ORLEN uruchomił już pierwsze dostawy SAF na lotniskach w Warszawie, Krakowie i Katowicach, a PLL LOT korzystają z systemu *book and claim* dla redukcji emisji.

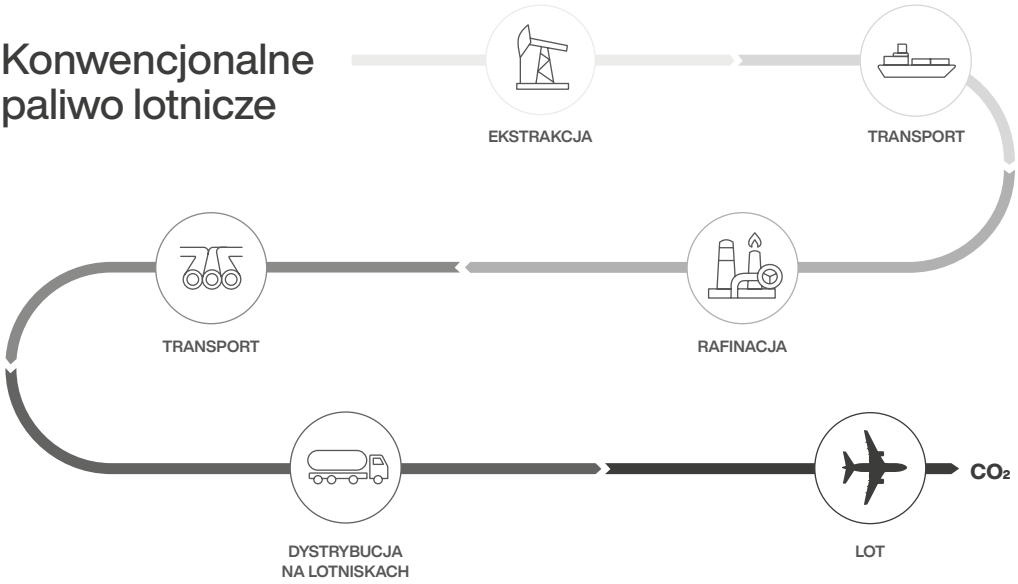
2. Czym jest SAF – definicja i rodzaje

Zrównoważone paliwa lotnicze to paliwa alternatywne stosowane w lotnictwie, które muszą spełniać kilka podstawowych wymagań:

1. zmniejszać emisję CO_2 w cyklu życia paliwa (w porównaniu do paliwa konwencjonalnego)
2. surowce do ich produkcji nie mogą konkurować o ziemię i wodę z roślinami żywieniowymi
3. uprawa surowców musi mieć małe zapotrzebowanie na wodę słodką
4. ich produkcja nie powinna przyczyniać się do wylesiania obszarów, a surowce stosowane do produkcji SAF nie mogą być uprawiane na obszarach o dużej bioróżnorodności lub bogatych w zasoby węgla

Zrównoważone paliwa lotnicze obejmują zarówno biopaliwa jak i paliwa produkowane z surowców nie-biologicznych, jednak często są błędnie określane tylko mianem „biopaliw". Biopaliwa odnoszą się tylko do paliw wytwarzanych z surowców biologicznych, np. roślin oleistych czy ogólnie pojętej biomasy, natomiast SAF odnoszą się także do paliw wytwarzanych z surowców nie-biologicznych, np. tworzyw sztucznych i odpadów oraz do organizmów modyfikowanych genetycznie.[4,5]

Rys. 2. Schemat procesowy powstawania i wykorzystania konwencjonalnych paliw lotniczych



4) Fueling the Future, Sustainable Aviation Fuel Guide, The Business Aviation Coalition for Sustainable Aviation Fuel, 2020.

5) Doliente, S.S.; Narayan, A.; Tapia, J.F.D.; Samsatli, N.J.; Zhao, Y.; Samsatli, S. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. Front. Energy Res. 2020, 8, 499009

Rys. 3. Schemat procesowy powstawania i wykorzystania zrównoważonych paliw lotniczych



Wynikiem jest całkowita redukcja dodatkowych gazów cieplarnianych wprowadzanych do biosfery

Generacje biopaliw

Biopaliwa dzielą się na generacje, w zależności od surowców wykorzystywanych do ich produkcji. Wyróżnia się 3 lub 4 generacje biopaliw[5]:

I GENERACJA

– to rośliny żywieniowe, takie jak kukurydza, buraki cukrowe, słonecznik. Surowce te są wykorzystywane do produkcji żywności dla ludzi lub zwierząt, przez co ta generacja nie spełnia wymagań stawianych lotniczym paliwom zrównoważonym. Surowce te konkurują z roślinami żywieniowymi o wodę i glebę.[6]

II GENERACJA

– obejmuje rośliny nie żywieniowe lub rośliny, które mogą rosnąć na mniej żyznych glebach i trudnych terenach, na których nie rosłyby inne rośliny. Są to np. jatrofa, lnicznik siewny (znany w lotnictwie jako camelina), halofity, rącznik pospolity (castor bean). Jatrofa i camelina to rośliny oleiste, trujące dla ludzi i zwierząt, które mogą być uprawiane na nieużytkach rolnych. Były szeroko stosowane w początkowym rozwoju biopaliw lotniczych i wiele lotów zostało wykonanych na paliwach wytworzonych z tych roślin. Inną grupą surowców, należących do II generacji biopaliw są różnego rodzaju odpady i pozostałości. Najbardziej popularne to stałe odpady komunalne (ang. Municipal Solid Wastes, MSW), zużyte oleje spożywcze

6) Doliente, S.S.; Narayan, A.; Tapia, J.F.D.; Samsatli, N.J.; Zhao, Y.; Samsatli, S. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. Front. Energy Res. 2020, 8, 499009

(ang. Used Cooking Oil, UCO), biomasa lignocelulozowa z odpadów leśnych i rolniczych oraz tworzywa sztuczne. Zużyte oleje spożywcze to jeden z częściej wykorzystywanych surowców do produkcji SAF w ostatnim czasie.[6,7]

III GENERACJA
– obejmuje paliwa produkowane z alg i glonów. Surowce te są wysokoenergetyczne i całkowicie odnawialne.[6]

IV GENERACJA
– obejmuje surowce nie-biologiczne i modyfikowane genetycznie (np. mikroalgi, sinice, drożdże), które mają zwiększone uzyski oleju lub cukru. Jako IV generację klasyfikuje się też tzw. e-paliwa, wytwarzane z np. odnawialnej energii elektrycznej lub CO_2. Generacja ta nie zawsze jest uznawana, ponieważ odnosi się również do paliw syntetycznych, które często są oddzielane od biopaliw.[8]

Certyfikowane procesy produkcji SAF

Lotnicze paliwa zrównoważone muszą być certyfikowane przez normę ASTM D7566. Norma ta podaje wszystkie procesy produkcji, które mogą być obecnie stosowane do produkcji SAF i wykorzystywane w silnikach lotniczych w określonym udziale procentowym. Obecnie, we wspomnianej normie, zatwierdzonych jest 8 procesów produkcji SAF, z czego 6 z nich ma limit mieszania z paliwem konwencjonalnym na poziomie 50%, dwa pozostałe na poziomie 10% objętości. Paliwa wytworzone w procesach certyfikowanych są paliwami typu *„drop in”*, co oznacza, że po zmieszaniu z paliwem konwencjonalnym nie wymagają żadnych zmian konstrukcyjnych w silnikach lotniczych i infrastrukturze paliwowej. Certyfikowane procesy wraz z przykładowymi surowcami przedstawiono w Tabeli poniżej. Kluczowymi procesami w obecnym czasie są HEFA-SPK (ang. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids), ATJ-SPK (ang. Alcohol-to-jet Synthetic Paraffinic Kerosene), FT-SPK (ang. Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene), natomiast najbardziej rozpowszechnionym procesem produkcji SAF jest proces HEFA-SPK – paliwo wyprodukowane w tej technologii zasila silniki samolotów w największej liczbie lotów komercyjnych. Proces ten charakteryzuje się szerokim zakresem wykorzystywanych surowców, który stale jest rozszerzany o nowe materiały. Niektóre surowce mogą być wykorzystywane w różnych ścieżkach produkcji SAF, np. biomasa lignocelulozowa czy surowce cukrowe. Obecnie trwają prace nad zwiększeniem limitów udziału SAF w mieszance paliwowej by do 2030 r. móc zasilać silniki w lotnicze 100% SAF.[9]

Oprócz dedykowanych ścieżek produkcji certyfikowanych w ramach normy ASTM D7566, istnieje dodatkowa metoda określona jako co-processing, opisana oddzielnie w normie ASTM D1655. Metoda ta umożliwia dodanie surowców odnawialnych bezpośrednio do istniejącej instalacji rafineryjnej nafty lotniczej, bez budowy dedykowanej instalacji SAF. Udział objętościowy surowca odnawialnego w mieszaninie z paliwem konwencjonalnym jest ograniczony do 5%. Obecnie certyfikowane są FOG (Fats, Oils and Greases) co-processing oraz FT co-processing.

7) Kurzawska-Pietrowicz, P.; Jasiński, R. A Review of Alternative Aviation Fuels. Energies 2024, 17, 3890. https:/doi.org/10.3390/en17163890

8) Doliente, S.S.; Narayan, A.; Tapia, J.F.D.; Samsatli, N.J.; Zhao, Y.; Samsatli, S. Bio-aviation Fuel: A Comprehensive Review and Analysis of the Supply Chain Components. Front. Energy Res. 2020, 8, 499009

9) EASA, Sprawozdanie środowiskowe w dziedzinie lotnictwa europejskiego 2025.

Tab. 2. Zatwierdzone ścieżki produkcji SAF w ramach normy ASTM D7566[10]

Annex	Proces	Surowiec	Rok zatwierdzenia	Limit mieszanki
A1	Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)	Biomasa (odpady drzewne, trawa, stałe odpady komunalne)	2009	do 50%
A2	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA-SPK)	Biomasa ropodajna, np. algi, jatrofa, lnicznik	2011	do 50%
A3	Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP)	Bakteryjna konwersja cukrów w węglowodory	2014	do 10%
A4	FT-SPK with aromatics (FT-SPK/A)	Biomasa odnawialna, tj. stałe odpady komunalne, odpady rolnicze i drzewne	2015	do 50%
A5	Alcohol-to-jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)	Odpady rolnicze (pędy kukurydzy, trawa, słoma), biomasa celulozowa	2016	do 50%
A6	Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene (CH-SK, or CHJ)	Tłuszcze, oleje i smary roślinne lub zwierzęce	2020	do 50%
A7	Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HHC-SPK or HC-HEFA-SPK)	Węglowodory pochodzenia biologicznego, estry kwasów tłuszczowych, wolne kwasy tłuszczowe, gatunek alg Botryococcus braunii	2020	do 10%
A8	Alcohol to Jet Synthetic Kerosene with Aromatics (ATJ-SKA)	Odpady rolnicze (pędy kukurydzy, trawa, słoma), biomasa celulozowa	2023	do 50%

Oprócz procesów wykorzystujących omówione surowce, coraz większe zainteresowanie zdobywają paliwa syntetyczne produkowane w technologii power-to-liquid (PtL). Do ich produkcji potrzebne są zielony wodór i dwutlenek węgla, który może być wychwycony z atmosfery lub pozyskany bezpośrednio w procesach przemysłowych lub energetycznych. Paliwo powstałe w ten sposób jest tzw. e-paliwem lub e-SAF, określanym również jako paliwo syntetyczne, które według obecnych regulacji będzie stanowić coraz większy udział w SAF, co stanie się wymogiem poczynając od 2030 r.

Dane EASA pochodzące z 2024 r. potwierdziły, że paliwa syntetyczne były całkowicie nieobecne na unijnym rynku z powodu wczesnego etapu komercjalizacji. Najbardziej prawdopodobnym scenariuszem na najbliższe lata jest dalsza dominacja paliw w technologii HEFA, wzrost udziału paliw bio-SAF, zwiększenie importu SAF i surowców spoza UE, a także opóźnienia we wdrażaniu produkcji i dostaw e-SAF. Dane z 2024 r. wskazują na wyprzedzanie rozwoju technologii przez regulacje, co z jednej strony zapewnia Europie pozycję światowego lidera w standaryzacji rynku, ale z drugiej powoduje utrudnione osiąganie celów neutralności klimatycznej lotnictwa do 2050 r.[11]

10) ASTM D7566

11) Technical EASA – ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2026 (www.europa.easa.eu)

Annex	Proces	Surowiec	Rok zatwierdzenia	Limit mieszanki
A1	Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)	Biomasa (odpady drzewne, trawa, stałe odpady komunalne)	2009	do 50%
A2	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA-SPK)	Biomasa ropodajna, np. algi, jatrofa, lnicznik	2011	do 50%
A3	Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP)	Bakteryjna konwersja cukrów w węglowodory	2014	do 10%
A4	FT-SPK with aromatics (FT-SPK/A)	Biomasa odnawialna, tj. stałe odpady komunalne, odpady rolnicze i drzewne	2015	do 50%
A5	Alcohol-to-jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)	Odpady rolnicze (pędy kukurydzy, trawa, słoma), biomasa celulozowa	2016	do 50%
A6	Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene (CH-SK, or CHJ)	Tłuszcze, oleje i smary roślinne lub zwierzęce	2020	do 50%
A7	Hydroprocessed Hydrocarbons, Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HHC-SPK or HC-HEFA-SPK)	Węglowodory pochodzenia biologicznego, estry kwasów tłuszczowych, wolne kwasy tłuszczowe, gatunek alg Botryococcus braunii	2020	do 10%
A8	Alcohol to Jet Synthetic Kerosene with Aromatics (ATJ-SKA)	Odpady rolnicze (pędy kukurydzy, trawa, słoma), biomasa celulozowa	2023	do 50%

3. Aktualny stan rozwoju technologii SAF

Dla paliw alternatywnych określa się poziomy gotowości technologicznej (TRL – ang. Technology Readiness Levels). TRL określa dojrzałość dostępnych ścieżek produkcji paliw alternatywnych z technologicznego punktu widzenia. Poziomy gotowości technologicznej przyjmują wartości od 1 do 9. Wartość TRL równa 1 określa się jako „pomysł podstawowy", a wartość równą 9 jako „rzeczywisty system sprawdzony w środowisku operacyjnym". Ze względu na to, że określenie gotowości paliwa pod względem komercyjnym wymaga innej oceny i wiąże się np. z problemami z certyfikacją lub kosztami, do oceny paliw alternatywnych używa się także poziomów gotowości paliwa (FRL – ang. Fuel Readiness Level), który również przyjmuje wartości od 1 („pomysł podstawowy") do 9 („ustalona zdolność produkcyjna").

Tab. 3. Wartości poziomów gotowości dla poszczególnych procesów produkcji SAF[12]

Proces produkcji SAF	TRL (Technology Readiness Level)	FRL (Fuel Readiness Level)
FT-SPK	7-8	9
FT-SPK/A	6-7	6-7
HEFA-SPK	9	9
HFS-SIP	7-8	6-7
ATJ-SPK	7-8	9
PtL	5-8	7-8

12) EASA, European Aviation Environmental Report 2019

Firmy i projekty zajmujące się produkcją SAF

Lotnicze paliwa zrównoważone są rozwijane na całym świecie, jednak większość firm i projektów koncentruje się w Europie i Ameryce Północnej. Poniżej wymieniono kluczowych producentów SAF i mniejsze firmy europejskie, które mają w planach produkcję SAF na szeroką skalę:

- Światowym liderem produkcji SAF jest obecnie fińska firma **Neste**, która prowadzi swoją działalność w Europie, Azji i Ameryce Północnej. Neste produkuje paliwo NESTE My Sustainable Aviation Fuel™ (Neste MY SAF), które powstaje w 100% z odnawialnych surowców odpadowych i resztek, takich jak zużyty olej kuchenny i tłuszcz zwierzęcy. Procesem produkcji wykorzystywanym przez Neste jest HEFA-SPK. Dzięki wytwarzaniu NESTE MY SAF z surowców II generacji, stosowanie tego paliwa pozwala zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych o nawet 80% w porównaniu z paliwem konwencjonalnym.[13] NESTE MY SAF jest obecnie używane przez takie linie lotnicze jak Lufthansa, Air France-KLM, IAG, Finnair, American Airlines, United Airlines, Emirates, Singapore Airlines, a także przez DHL Group jako przewoźnik cargo. Firma Neste posiada rafinerie w Finlandii, Niderlandach i Singapurze, a dzięki współpracy z Marathon Petroleum – także w Kalifornii.

- Głównym dostawcą SAF w Stanach Zjednoczonych jest firma **World Energy**, która była także pierwszym światowym producentem SAF na skalę komercyjną. Obecnie World Energy nie posiada funkcjonującej rafinerii - zlokalizowana w Paramount w Kalifornii została zamknięta i będzie przejęta przez firmę XCF Global, a budowa obiektu w Houston została wstrzymana. Firma skupia się obecnie na zarządzaniu rynkiem tzw. carbon insets – umożliwia klientom korporacyjnym cyfrowe finansowanie i przypisywanie sobie redukcji emisji z biopaliw lotniczych produkowanych przez zakłady partnerskie. Paliwo typu SAF produkowane jest z wykorzystaniem procesu HEFA-SPK. Jako surowiec firma wykorzystuje niejadalne odpady rolnicze, tłuszcze, oleje i smary.[14]

- Firma **TotalEnergies** jest zaangażowana w rozwój lotniczych paliw zrównoważonych od 2014 r., a w 2021 r. zaczęła również produkować SAF we Francji. Według ogłoszeń firmy, do 2028 będą zdolni do produkcji ponad pół miliona ton SAF rocznie, co pozwoli spełnić europejski obowiązek 6% udziału w rynku paliw lotniczych do 2030 r.[15]

- **SkyNRG** to holenderska firma skupiająca się na zrównoważonych paliwach lotniczych. Obecnie SkyNRG buduje w Europie (Delfzijl), zakład dedykowany produkcji SAF, który ma osiągnąć moce produkcyjne na poziomie 100 tys. ton SAF rocznie. Firma jest także w trakcie rozwijania zakładu produkcyjnego SAF w USA, w ramach projektu Wigeon, którego celem jest produkcja 150 tys. ton paliwa rocznie.[16]

- **Enilive** (Eni) w styczniu 2025 zaczęło produkować paliwo SAF z wykorzystaniem procesu HEFA-SPK. Rafineria znajduje się na Sycylii (Włochy) i ma zdolność produkcji określoną na 400 tys. ton rocznie, co odpowiada prawie jednej trzeciej oczekiwanego zapotrzebowania na SAF w Europie w 2025 r.[17]

13) NESTE Annual Report 2024
14) www.worldenergy.net
15) www.totalenergies.com
16) www.skynrg.com
17) www.eni.com

- **Repsol** od 2024 r. produkuje SAF w Cartagenie w Hiszpanii. Wykorzystywaną technologią produkcji również jest HEFA-SPK bazująca na odpadach i zużytym oleju kuchennym. Zdolność produkcyjna to 250 tys. ton rocznie.[18]

- **LanzaJet** to amerykańska spółka wydzielona z LanzaTech, która rozwija i komercjalizuje technologię ATJ-SPK, bazującą na etanolu. LanzaJet należy do projektu Freedom Pines Fuels, który ma na celu produkcję około 9 milionów galonów SAF rocznie (ok. 34 milionów litrów paliwa SAF). LanzaJet połączyła siły z LanzaTech przez co powstało CirculAir, które jest rozwiązaniem umożliwiającym przetwarzanie odpadów i energii odnawialnej w SAF. CirculAir wykorzystuje technologię fermentacji gazowej LanzaTech do przetwarzania prawie wszystkich możliwych odpadów (leśnych, MSW) w etanol, który następnie jest przetwarzany na SAF. Zrównoważone paliwo lotnicze wytworzone przez CirculAir może zmniejszyć emisję CO_2 w całym cyklu życia o 85% w porównaniu do paliwa konwencjonalnego.[19]

- **Moeve** to hiszpański koncern energetyczny produkujący SAF w Hiszpanii. Wykorzystywanym surowcem są głównie zużyte oleje kuchenne, a w 2024 firma dostarczyła około 14,4 tys. ton SAF do linii lotniczych. Moeve współpracuje np. z liniami lotniczymi Iberia, Vueling, Wizz Air, Air Nostrum, TUI. Firma jest w trakcie budowy nowej rafinerii dla biopaliw drugiej generacji, która ma mieć zdolność produkcyjną na poziomie 500 tys. ton rocznie (SAF i odnawialny diesel).[20]

- **NorSAF** to spółka rozwijana przez Avia Solutions Group w Łotwie. W planach jest produkcja paliwa SAF i e-SAF, którego dystrybucja na dużą skalę ma się rozpocząć w 2031 r. Docelowa zdolność produkcyjna SAF i e-SAF to około 100 tys. ton rocznie, z czego samego SAF ma być około 61 tys. ton na rok. Firma zamierza produkować SAF technologią ATJ-SKA na bazie bioetanolu oraz e-SAF z zielonego wodoru i wychwyconego ze spalin CO_2.[21]

- W Polsce od lipca 2025 dostępne jest SAF na lotnisku w Warszawie, Katowicach i Krakowie. Paliwo jest dystrybuowane przez **ORLEN**, który sprowadza paliwo z zagranicy. W Płocku uruchomiona została instalacja HVO (ang. Hydrogenated Vegetable Oil), która ma umożliwić produkcję SAF ze zużytego oleju kuchennego. Planowana produkcja HVO to 300 tys. ton rocznie. [22]

- Firma **Carbon Neutral Fuels** koncentruje się na produkcji e-SAF wytwarzanego z zielonego wodoru. Flagowy projekt ASAP-DAC w Workington zakłada produkcję około 25 tys. ton e-SAF rocznie, a uruchomienie produkcji jest planowane w 2031 r. Według deklaracji, wyprodukowany e-SAF ma zmniejszyć emisję CO_2 o około 90% w porównaniu do paliwa konwencjonalnego. [23]

- **Norsk e-Fuel** z siedzibą w Oslo zostało utworzone w 2019 r. w celu przyspieszenia zmian rynku i jego dekarbonizacji poprzez produkcję paliw syntetycznych. W 2022 r. akcjonariuszem firmy została spółka Lux-Airport (władze portu lotniczego w Luksemburgu), a w 2024 r. linie lotnicze Norwegian dołączyły jako inwestor. Firma opracowuje koncepcje typowego zakładu o zdolności produkcyjnej wynoszącej 100

18) www.repsol.com
19) www.lanzajet.com
20) www.safinvestor.com
21) www.norsaf.com
22) www.orlen.pl
23) www.carbonneutralfuels.com

mln litrów rocznie. Obecnie, na różnych etapach rozwoju, bada kilka różnych lokalizacji dla przyszłych obiektów: port Rauma w Finlandii, projekt Alby w miejscowości Ånge w Szwecji, projekt Mosjøen w gminie Vefsn w Norwegii i inne.[24]

Rys. 4. Mapa lokalizacji firm produkujących SAF



24) www.norsk-e-fuel.com

4. Potencjał produkcji SAF – dostępność surowców w Polsce i Europie

Produkcja zrównoważonych paliw lotniczych w dużej mierze zależy od dostępu do odpowiednich surowców. To właśnie ich wolumen, jakość oraz koszty pozyskania będą determinować tempo rozwoju tego rynku w najbliższych latach.

W odróżnieniu od tradycyjnych paliw kopalnych, które można pozyskiwać z globalnego rynku, SAF wymagają budowy lokalnych i regionalnych łańcuchów dostaw. Dlatego ocena potencjału surowcowego staje się kluczowa nie tylko z punktu widzenia producentów paliw, ale także linii lotniczych, regulatorów i całego sektora transportowego.

W Europie podstawą rozwoju SAF pozostają obecnie surowce odpadowe:



zużyte oleje posmażalnicze (UCO – Used Cooking Oil)



tłuszcze zwierzęce



biomasa lignocelulozowa

Równolegle rośnie znaczenie surowców dla e-SAF, czyli zielonego wodoru i dwutlenku węgla wychwytywanego z przemysłu lub powietrza. Każda z tych kategorii ma inne ograniczenia i bariery rozwojowe: od konkurencji z sektorem paszowym, przez wyzwania logistyczne i wysokie koszty technologii, aż po regulacje unijne dotyczące akceptowanych źródeł CO_2.

Dla Polski analiza potencjału surowcowego ma wymiar strategiczny. Z jednej strony, kraj dysponuje przeciętnymi zasobami w kategorii odpadów olejowych, co ogranicza możliwość skalowania produkcji HEFA. Z drugiej – posiada ponadprzeciętne nadwyżki biomasy

lignocelulozowej oraz znaczące, skoncentrowane źródła emisji CO_2, które mogą stać się bazą dla e-SAF. Zrozumienie tych zależności pozwala wskazać, które segmenty rynku paliw alternatywnych mogą rozwijać się w Polsce szybciej niż w innych krajach Unii Europejskiej.

Surowce i potencjał w Unii Europejskiej

W całej Unii Europejskiej kluczowym surowcem dla rozwoju technologii HEFA pozostają zużyte oleje posmażalnicze (81% udziału).



Roczny potencjał w Europie to 0,7–1,2 mln ton tego odpadu, głównie z sektora gastronomicznego, przy czym faktyczne zapotrzebowanie na rynku paliw przekracza 7 mln ton.[25,26] Europejskie rafinerie biodiesla i potencjalni producenci SAF są zmuszeni do importu surowca (85%), głównie z Chin (61%), Malezji (8%)j. Taka zależność stwarza ryzyko jakościowe i regulacyjne, np. w zakresie śledzenia łańcucha dostaw czy zjawiska tzw. *greenwashingu*. Efektem dostaw z dalekich rynków są dodatkowe emisje zanieczyszczeń powstałe przy transporcie i dystrybucji paliwa.

Kluczową dla produkcji SAF grupą surowców są tłuszcze zwierzęce – ich produkcja w Unii Europejskiej wynosi 3–4 mln ton rocznie. Część z nich (kategorie 1 i 2) może być stosowana wyłącznie w celach energetycznych (zgodnie z Rozporządzeniem (WE) 1069/2009), co teoretycznie ułatwia kierowanie ich do produkcji paliwa w technologii HEFA. W praktyce jednak konkurencja ze strony sektora paszowego i chemicznego ogranicza wolumen możliwy do zagospodarowania w sektorze paliwowym.[26]

Znaczącym i wciąż niedostatecznie wykorzystanym zasobem pozostaje biomasa lignocelulozowa – słoma, odpady leśne, resztki tartaczne i rolnicze. Szacuje się, że do 2030 r. dostępne będzie 82 mln ton biomasy lignocelulozowej.[27] To surowiec szczególnie perspektywiczny w kontekście rozwoju technologii bioetanolu (2G – drugiej generacji) i technologii ATJ. Główną barierą jest jednak wysoki koszt inwestycyjny i logistyka zbioru.

Odrębną kategorią są surowce do produkcji e-SAF: wodór i CO_2. Strategia wodorowa Unii Europejskiej zakłada budowę 40 GW mocy elektrolizerów do 2030 r.[28] W początkowej fazie źródłem CO_2 mogą być przemysły cementowy, nawozowy czy stalowy.[29] Pojawiają się głosy o tym, aby po 2035 r. akceptowany był wyłącznie CO_2 pochodzenia biogenicznego lub z technologii DAC (ang. Direct Air Capture), nie znajduje to jednak potwierdzenia w obowiązującej legislacji.

Rozwój produkcji SAF w Europie w największym stopniu zależy od dostępności surowców odpadowych i wtórnych. W chwili obecnej największe znaczenie mają zużyte oleje posmażalnicze oraz tłuszcze zwierzęce, natomiast biomasa lignocelulozowa i surowce do produkcji e-SAF (wodór i CO_2) będą odgrywać coraz większą rolę w średnim i długim okresie.

25) CE Delft, Used Cooking Oil (UCO) as biofuel feedstock in the EU,2020

26) T&E, UCO Imports: Unfair Competition with EU UCO Industry?, 2024

27) S2Biom, Vision for 1 billion dry tonnes lignocellulosic biomass as a contribution to biobased economy by 2030 in Europe, 2016

28) EC, A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, 2020

29) International Energy Agency, CO_2 Emissions in 2022, 2022

Surowce i potencjał w Polsce

Na tle pozostałych państw Unii Europejskiej sytuacja Polski przedstawia się w sposób zróżnicowany. W przypadku zużytych olejów posmażalniczych dostępne wolumeny są wciąż małe. Nie istnieje centralny system ewidencji i odbioru UCO, a zbiórka ogranicza się głównie do gastronomii. Szacunki wskazują, że przy wprowadzeniu systemu powszechnej zbiórki domowej możliwe byłoby odzyskanie 30–40 tys. ton UCO rocznie.[30] Obecnie niemal całość trafia do produkcji biodiesla.

Większy potencjał wiąże się z tłuszczami zwierzęcymi. Polska generuje około 2 mln ton ubocznych produktów zwierzęcych rocznie, w tym stabilne wolumeny tłuszczów kategorii 3. Polska w 2023 r. była największym producentem mięsa drobiowego w Unii Europejskiej – 2,7 mln ton, co stanowiło 20,6 % całkowitej unijnej produkcji.[31] Tłuszcze zwierzęce wytwarzane w Polsce mogą stanowić realne źródło surowca dla technologii HEFA, jednak ich dostępność jest ograniczana przez konkurencję ze strony sektora paszowego.

Największy potencjał Polski to biomasa lignocelulozowa – nadwyżki słomy szacuje się na 12,5 mln ton rocznie.[32] Dodatkowe źródła to odpady drzewne i leśne. W Jedliczu powstaje zakład produkcji bioetanolu 2G o zdolności 25 tys. ton rocznie, co będzie pierwszą tego typu instalacją w kraju.[33]

W przypadku produkcji paliw syntetycznych Polska charakteryzuje się znaczącym potencjałem w obszarze CO_2 i wodoru. Strategia Wodorowa RP zakłada instalację 2 GW elektrolizerów do 2030 r.[34] Choć to mniej niż unijne cele, skala może wystarczyć na projekty pilotażowe e-SAF. Obecnie działa instalacja Promet-Plast koło Wrocławia o mocy 5 MW do produkcji wodoru w technologii alkalicznej. W połowie 2027 r. planowane jest uruchomienei elektrolizera 5 MW w Rafinerii Gdańskiej, a projekty w początkowej fazie obejmują ESW-H2 (TAURON H2) w byłej Elektrowni Stalowa Wola oraz Polenergia na Górnym Śląsku. Jednocześnie Polska jest jednym z największych emiterów punktowych CO_2 w Unii Europejskiej – Elektrownia Bełchatów pozostaje największym pojedynczym źródłem emisji CO_2 w Europie. Otwiera to szansę na rozwój projektów CCU (ang. Carbon Capture and Utilization). Istotnym ograniczeniem jest jednak rodzaj źródła. CO_2 powstałe z wytwarzania energii elektrycznej kwalifikuje się do RFNBO (ang. Renewable Fuels of Non-Biological Origin - odnawialne paliwa pochodzenia niebiologicznego) tylko do końca 2035 r. Po tym czasie utraci status RFNBO.

W zestawieniu z potencjałem europejskim Polska dysponuje przeciętnymi zasobami w kategorii surowców odpadowych (UCO – ang. Used Cooking Oil, tłuszcze zwierzęce) i ponadprzeciętnym potencjałem biomasy lignocelulozowej oraz źródeł CO_2:

- **UCO:** w Unii Europejskiej odnotowano deficyt (popyt 7 mln ton wobec podaży 1,2 mln ton), Polska mogłaby znacząco zwiększyć zbiór, o ile rozwinie system domowej segregacji,
- **Tłuszcze zwierzęce:** Polska jako lider w produkcji drobiu, ma stabilne źródło tłuszczów kategorii 3, ale ich konkurencyjne zastosowania ograniczają dostępność,

30) GUS, Ochrona środowiska 2022

31) EUROSTAT, 2023

32) Gov.pl, Informacja w sprawie promowania wykorzystania biomasy pochodzenia rolniczego dla celów energetycznych oraz zmian powierzchni gruntów wykorzystywanych pod uprawy energetyczne w roku 2022

33) Sprawozdanie Zarządu z działalności Grupy ORLEN i ORLEN S.A. za 2024

34) Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040, 2021

- **Biomasa lignocelulozowa:** Polska posiada relatywnie duży nadwyżkowy potencjał słomy, co czyni ją dobrym kandydatem do inwestycji w technologie ATJ,
- **Wodór i CO_2:** planowana budowa elektrolizerów o mocy 2 GW jest proporcjonalna do planów Unii Europejskiej (Polska ma około 7–8% ludności UE i 6% udziału w zużyciu energii końcowej), dodatkowo w Polsce występuje duża koncentracja punktowych źródeł emisji CO_2, które mogą być wykorzystane w produkcji e-SAF.

Tab. 4. Kluczowe fakty – potencjał UE i Polski w zakresie surowców do produkcji SAF

Obszar / surowiec	Unia Europejska	Polska
Zużyte oleje spożywcze (UCO)	0,7–1,2 mln ton/rok; zapotrzebowanie ok. 7 mln ton/rok (deficyt pokrywany importem)	Możliwy odzysk 30–40 tys. ton/rok przy pełnym systemie zbiórki
Tłuszcze zwierzęce	3–4 mln ton/rok; kat. 1–2 tylko do celów energetycznych	2 mln ton ubocznych produktów zwierzęcych/rok; Polska największy producent drobiu w UE (2,7 mln ton mięsa)
Biomasa lignocelulozowa	dziesiątki mln ton suchej masy/rok	12,5 mln ton słomy/rok; projekt Jedlicze – 25 tys. Ton bioetanolu 2G/rok
Wodór (e-SAF)	40 GW elektrolizerów do 2030	2 GW elektrolizerów do 2030
CO_2 (e-SAF)	Źródła przemysłowe	Największy emiter w UE: Elektrownia Bełchatów; duże źródła w Puławach i Policach

5. Wpływ SAF na redukcję emisji i jakość powietrza

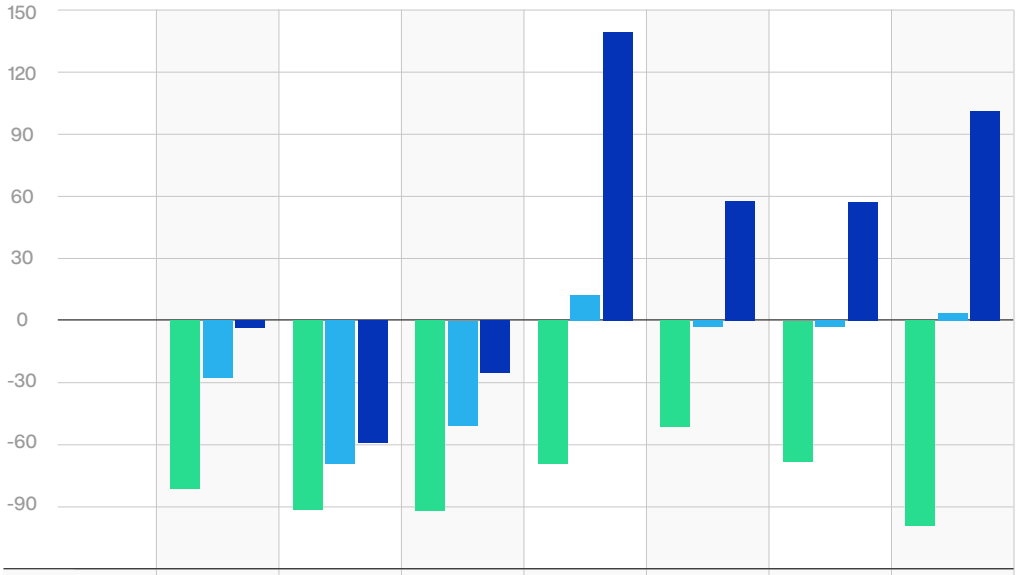
Lotnictwo jest odpowiedzialne za 2-3% globalnej emisji CO_2, przy czym cały sektor transportu był odpowiedzialny za 28,5% emisji w Unii Europejskiej w 2022 r. W sektorze transportu w UE najwięcej emisji pochodziło z transportu drogowego (20,5%), a lotnictwo odpowiadało za 3,8% emisji CO_2.[35] Jednak to lotnictwo cechuje się najszybszym wzrostem emisji CO_2 ze wszystkich sektorów transportu, a liczba pasażerów i lotów stale rośnie. Dlatego kluczowe jest podejmowanie działań krótko i długoterminowych, które pozwolą w znacznym stopniu ograniczyć emisję z sektora lotniczego w następnych latach.

Emisja CO_2 to nie jedyne zanieczyszczenie emitowane przez sektor lotniczy i drogowy. Samochody są głównym źródłem toksycznych związków szkodliwych wpływających bezpośrednio na zdrowie ludzi w środowisku miejskim. Główne związki emitowane przez silniki samochodowe to tlenek węgla (CO), lotne związki organiczne (VOC), tlenki azotu (NOX), niespalone węglowodory (UHC) oraz cząstki stałe (PM). Te same związki toksyczne są emitowane z silników lotniczych, które w największym stopniu wpływają na jakość powietrza w obrębie lotnisk, ale także mają oddziaływanie globalne – związki te przyczyniają się do powstawania smug kondensacyjnych i wpływają na efekt radiacyjny atmosfery, a co za tym idzie na zmiany klimatu. Pod tym względem, zanieczyszczenia z transportu drogowego mają w głównej mierze charakter lokalny, a z transportu lotniczego zarówno lokalny jak i globalny. W sektorze drogowym, na przestrzeni lat zostało wprowadzonych wiele ograniczeń dotyczących emisji, stosuje się systemy oczyszczenia spalin, które obejmują reaktory katalityczne do zmniejszania emisji gazowych związków toksycznych, oraz filtry cząstek stałych, które są w stanie wychwycić nawet 99% emitowanych cząstek stałych. Dzięki takim rozwiązaniom, stężenie związków toksycznych w spalinach silników samochodowych zostało znacznie ograniczone, a dzięki rosnącej popularności samochodów hybrydowych i elektrycznych, wpływ tego sektora na środowisko stale się zmniejsza. Niestety w sektorze lotniczym nie stosuje się żadnych systemów oczyszczania spalin, ponieważ nie pozwala na to konstrukcja silników lotniczych. W lotnictwie możliwe jest jedynie zmniejszanie zużycia paliwa poprzez różne rozwiązania konstrukcyjne silników

35) Parlament Europejski, Emisje z samolotów i statków: fakty i liczby, 2022.

i płatowców, dzięki czemu mniej związków szkodliwych jest emitowanych do atmosfery. Jednak oszczędności w redukcji emisji nie są tak znaczące jak w transporcie drogowym, więc sektor lotniczy musi szukać innych rozwiązań, które pozwolą w znacznym stopniu ograniczyć emisję również innych związków szkodliwych, nie tylko CO_2. Z tego względu, ograniczenie spalania paliw kopalnych w lotnictwie jest kluczowe, by zadbać o środowisko i zdrowie publiczne. Jednym z dostępnych rozwiązań są zrównoważone paliwa lotnicze, jednak na ten moment ich wykorzystanie jest zbyt małe, by w znaczący sposób zmniejszyć wpływ lotnictwa na środowisko.

Rys. 5. Zmiana emisji związków toksycznych w transporcie drogowym i lotnictwie (UE)



	CH_4	CO	NMVOC	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$	SO_2
TRANSPORT DROGOWY	-81.5	-91.5	-91.9	-69.1	-51.5	-68.1	-99.3
LOTNICTWO KRAJOWE	-27.9	-69.3	-50.7	12.1	-3.2	-2.9	3.5
LOTNICTWO MIĘDZYNARODOWE	-3.7	-59.3	-25.4	139.4	57.6	57.2	101.3

Stosowanie zrównoważonych paliw lotniczych daje wielowymiarowe korzyści środowiskowe, takie jak:

- znaczące zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia paliwa, zwłaszcza dla paliw wyprodukowanych z odpadów i pozostałości, których wskaźniki emisji w początkowych etapach cyklu życia paliwa są bardzo małe lub zerowe,
- wyraźna redukcja emisji cząstek stałych, które wpływają przede wszystkim na jakość powietrza w obrębie lotnisk,
- ograniczenie powstawania smug kondensacyjnych, np. przez zmniejszenie liczby jąder krystalizacji wody w smudze,
- ogólne zmniejszenie lokalnie i globalnie oddziaływania lotnictwa na środowisko.

Emisja CO_2 w cyklu życia paliw lotniczych

Ocena emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia (LCA – ang. Life Cycle Assessment) stanowi podstawowe narzędzie analizy wpływu paliw lotniczych na klimat. Obejmuje ona nie tylko spalanie w silniku samolotu, lecz także wszystkie wcześniejsze etapy – od pozyskania i transportu surowca, przez procesy przetwórcze, aż po dystrybucję paliwa do użytkownika końcowego. W przypadku konwencjonalnego paliwa Jet A-1 dominującym źródłem emisji pozostaje faza spalania, natomiast w zrównoważonych paliwach lotniczych (SAF) znaczący udział mogą mieć procesy produkcyjne oraz logistyka surowców. Porównanie emisji w pełnym cyklu życia pozwala obiektywnie ocenić potencjał redukcji GHG i wskazać technologie najbardziej perspektywiczne z punktu widzenia dekarbonizacji lotnictwa.

Dla konwencjonalnego paliwa lotniczego Jet A-1 przyjmuje się wartość bazową wskaźnika emisji w cyklu życia wynoszącą 89 g CO_2e/MJ. Szacowaniem wartości wskaźnika emisji w cyklu życia zajmuje się CORSIA (ang. Carbon Offsetting Reduction Scheme for International Aviation) – program kompensacji i redukcji emisji CO_2 w lotnictwie międzynarodowym. CORSIA zestawia ze sobą ścieżki produkcji SAF bazujące na różnych surowcach, co pozwala ocenić redukcję danego SAF względem Jet A-1.

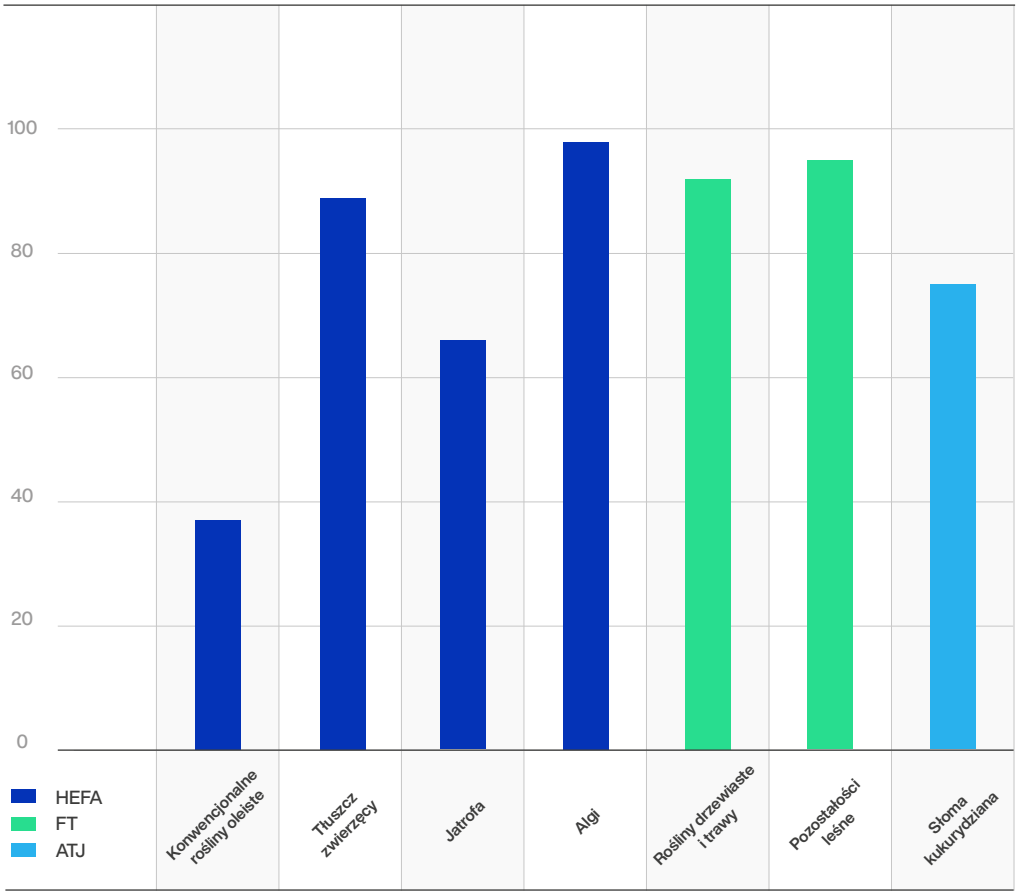
Tab. 5. Przykładowe wartości wskaźnika emisji w cyklu życia SAF[36]

Proces produkcji	Surowiec	Region uprawy	Wartość wskaźnika emisji w cyklu życia [gCO_2e/MJ]
Jet A-1	-	-	89
FT-SPK	Pozostałości rolnicze	globalnie	7,7
	Trawa miskantus	EU	-11,6
HEFA-SPK	Olej sojowy	USA	64,9
	Zużyty olej kuchenny	globalnie	13,9
	Olej z cameliny	Globalnie	28,6
ATJ-SPK	Pozostałości rolnicze	Globalnie	29,3
	Ziarna kukurydzy	USA	77,9
	Trawa miskantus	EU	12,4

W zależności od surowca zastosowanego do produkcji SAF, wskaźniki emisji w cyklu życia przyjmują różne wartości dla tej samej technologii produkcji, ale też różnią się w zależności od regionu pozyskiwania surowca. Największą redukcję emisji CO_2 uzyskują paliwa produkowane z pozostałości i odpadów, które mogą zmniejszyć emisję nawet o 90% względem wartości bazowej dla Jet A-1. W przypadku uprawy poszczególnych surowców (np. jatrofa czy cameliny) na wynik końcowy LCA będzie wpływać także sposób nawożenia surowców, transport plonów oraz zmiana sposobu użytkowania gruntów. Z tego względu te surowce mają zazwyczaj większe wartości wskaźnika emisji cyklu życia niż surowce odpadowe.

36) ICAO, CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels

Rys. 6. Zmniejszenie emisji CO_2 w porównaniu do paliwa Jet A-1.



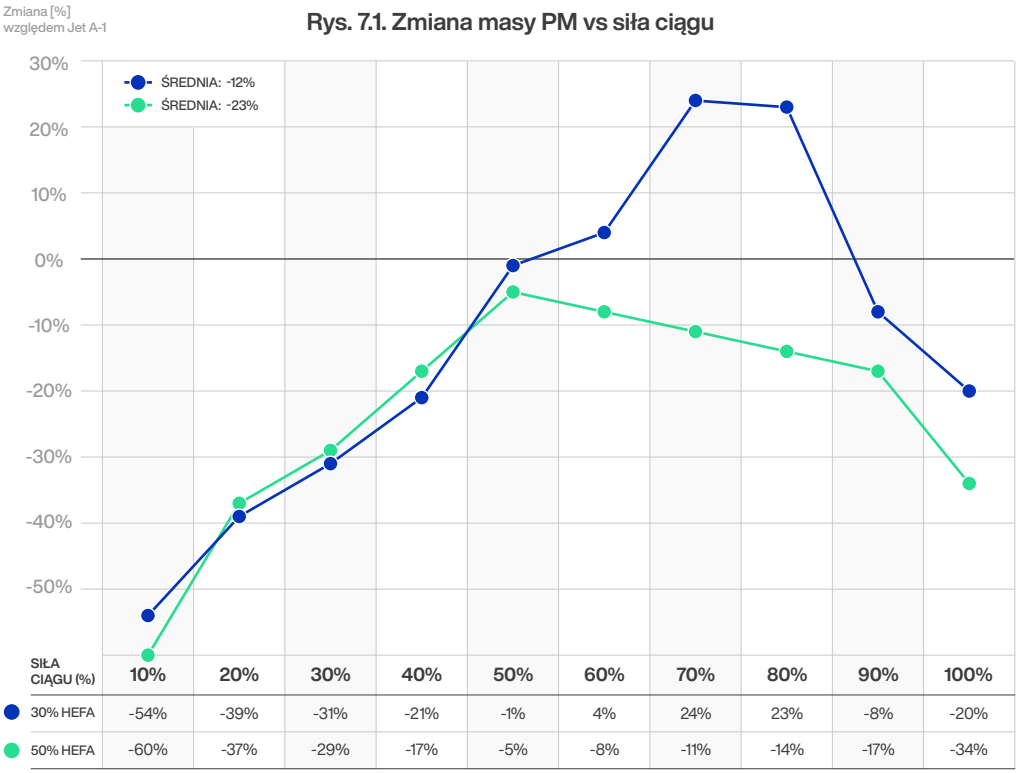
Emisja cząstek stałych i tlenków azotu

Zrównoważone paliwa lotnicze w znacznym stopniu ograniczają emisję cząstek stałych (PM) z silników lotniczych, ze względu na bardzo niską lub zerową zawartość aromatów w składzie chemicznym. Po zmieszaniu SAF z Jet A-1 zgodnie z wymogami normy ASTM D7566, aromaty występują, ale nadal redukcja PM względem Jet A-1 jest znacząca.

W licznych badaniach wykazano, że zastosowanie zrównoważonych paliw lotniczych typu SAF prowadzi do znaczącej redukcji emisji cząstek stałych w porównaniu z konwencjonalnym paliwem Jet A-1. Zarówno w przypadku paliw syntetycznych wytwarzanych metodą Fischera-Tropscha (FT-SPK), jak i biopaliw takich jak HEFA czy ATJ, obserwuje się wyraźne obniżenie liczby i masy emitowanych cząstek. Efekt ten jest widoczny zarówno przy stosowaniu czystych paliw alternatywnych, jak i ich mieszanin z Jet A-1, a skala redukcji rośnie wraz ze zwiększaniem udziału SAF w mieszance paliwowej. Wyniki te jednoznacznie potwierdzają, że wdrażanie zrównoważonych paliw lotniczych może istotnie ograniczyć oddziaływanie lotnictwa na jakość powietrza, przyczyniając się do zmniejszenia emisji szkodliwych cząstek w całym zakresie pracy silnika.

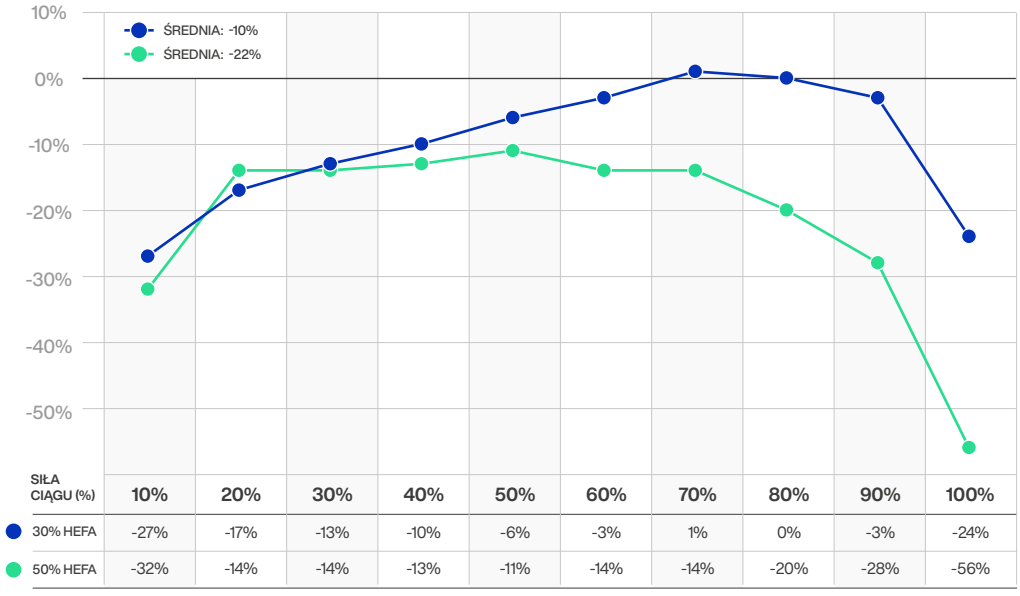
Rys. 7. Procentowa redukcja liczby i masy cząstek stałych mieszanki HEFA w stosunku do Jet A-1 jako wartości bazowej. Badania wykonane na silniku GTM 400

Rys. 7.1. Zmiana masy PM vs siła ciągu



SIŁA CIĄGU (%)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
30% HEFA	-54%	-39%	-31%	-21%	-1%	4%	24%	23%	-8%	-20%
50% HEFA	-60%	-37%	-29%	-17%	-5%	-8%	-11%	-14%	-17%	-34%

Rys. 7.2. Zmiana liczby PM vs siła ciągu



SIŁA CIĄGU (%)	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
30% HEFA	-27%	-17%	-13%	-10%	-6%	-3%	1%	0%	-3%	-24%
50% HEFA	-32%	-14%	-14%	-13%	-11%	-14%	-14%	-20%	-28%	-56%

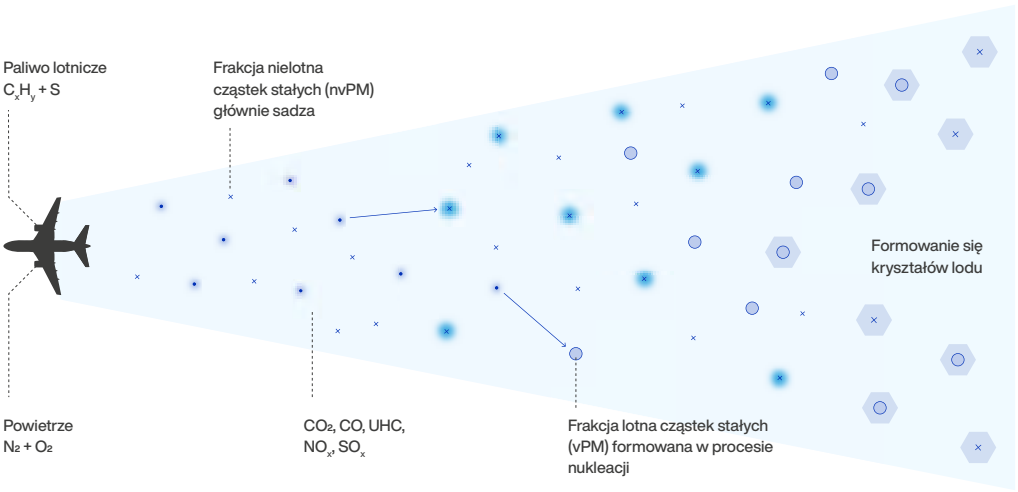
Emisje tlenków azotu (NO_x) praktycznie nie zależą od rodzaju paliwa, a od temperatury i warunków spalania paliwa w silniku. Na te parametry mają wpływ właściwości fizykochemiczne paliwa, jednak w przypadku badań nad zrównoważonymi paliwami lotniczymi w porównaniu do paliw konwencjonalnych, nie zauważono istotnych różnic dla wskaźników emisji tlenków azotu.[37]

37) Harlass, T., Dischl, R., Kaufmann, et al.: Measurement report: In-flight and ground-based measurements of nitrogen oxide emissions from latest-generation jet engines and 100 % sustainable aviation fuel, Atmos. Chem. Phys., 24, 11807–11822, https://doi.org/10.5194/acp-24-11807-2024, 2024.

Wpływ wykorzystania SAF na powstawanie smug kondensacyjnych i efekty radiacyjne

Wpływ lotnictwa na środowisko obejmuje nie tylko emisję bezpośrednią związków szkodliwych do atmosfery, ale także pośrednie oddziaływanie jak np. powstawanie smug kondensacyjnych. Smugi kondensacyjne (ang. *Contrails*) to liniowe chmury widoczne za samolotami. Powstają w wyniku reakcji gorących spalin z powietrzem otoczenia o bardzo niskiej temperaturze na dużych wysokościach lotu. W niskiej temperaturze otoczenia, gdy wilgotność powietrza stanie się wystarczająco duża, para wodna skrapla się na cząsteczkach spalin tworząc drobne kropelki wody, które następnie zamarzają tworząc kryształki lodu. Jeśli wilgotność powietrza jest mała, smugi kondensacyjne szybko zanikają (w ciągu kilku sekund do kilku minut), natomiast jeśli wilgotność powietrza jest duża – utrzymują się i powiększają (mogą się utrzymywać od kilku minut do ponad 24h). Obecność w spalinach cząstek stałych zwiększa formowanie się kryształków lodu w smugach kondensacyjnych. SAF ze względu na zmniejszoną emisję PM przyczynia się także do zmniejszenia powstawania jąder kondensacji w strudze spalin, co przekłada się na mniejszą liczbę kryształów lodu w smudze kondensacyjnej. Smugi kondensacyjne powstające za silnikami zasilanych SAF są cieńsze i krótsze oraz mniej trwałe niż w przypadku Jet A-1.[38,39] Powstające z nich chmury typu Cirrus, według szacunków mogą mieć porównywalny lub większy efekt radiacyjny (RF – ang. Radiative Forcing) niż CO_2 emitowane przez samoloty. Według badań efekt ten może być nawet trzykrotnie większy.[40] Dzięki stosowaniu SAF i zmniejszaniu smug kondensacyjnych, obniża się ich efekt radiacyjny. W modelowaniu globalnym oszacowano, że stosowanie 100% SAF może zmniejszyć RF smug o około 26%.[41]

Rys. 8. Schemat powstawania smug kondensacyjnych



38) Märkl, R. S., Voigt, C., Sauer, D., et al.: Powering aircraft with 100 % sustainable aviation fuel reduces ice crystals in contrails, Atmos. Chem. Phys., 24, 3813–3837, https://doi.org/10.5194/acp-24-3813-2024, 2024.

39) U.S. Environmental Protection Agency, Information on Contrails from Aircraft.

40) Teoh, R., Engberg, Z., Schumann, U., Voigt, C., Shapiro, M., Rohs, S., and Stettler, M. E. J.: Global aviation contrail climate effects from 2019 to 2021, Atmos. Chem. Phys., 24, 6071–6093, https://doi.org/10.5194/acp-24-6071-2024, 2024.

41) www.airbus.com

6. Aspekty ekonomiczne SAF

Jednym z kluczowych czynników warunkujących tempo wdrażania zrównoważonych paliw lotniczych pozostaje ich konkurencyjność kosztowa wobec paliw konwencjonalnych.

Cena paliwa lotniczego Jet A-1 jest od dekad głównym wyznacznikiem opłacalności operacyjnej w transporcie lotniczym, dlatego wszelkie różnice kosztowe mają bezpośrednie przełożenie na decyzje linii lotniczych. Zrozumienie obecnych i prognozowanych cen SAF jest niezbędne zarówno z perspektywy strategii biznesowych przewoźników, jak i projektowania mechanizmów wsparcia publicznego.

Aktualne ceny SAF vs Jet A-1

Cena zrównoważonych paliw lotniczych jest obecnie istotnie wyższa niż cena konwencjonalnego paliwa Jet A-1. W 2024 r. średnia cena Jet A-1 w Europie oscylowała w granicach 800-950 EUR/t, podczas gdy ceny SAF kształtowały się na poziomie 2300-3000 EUR/t (w zależności od surowca i technologii produkcji). Paliwa syntetyczne, w zależności od metody pozyskiwania dwutlenku węgla do produkcji, kosztowały w 2024 r. według przewidywań pomiędzy 7695 a 8470 EUR/t.[42] Prognozy z III kwartału 2026 r. zakładały ceny paliw w 2026 r. na poziomach:

1400-2200 USD/t dla HEFA
1800-2400 USD/t dla AtJ
800-900 USD/t dla nafty lotniczej[43]

W styczniu 2026 r. w regionie FARAG (Vlissingen, Antwerpia, Rotterdam, Amsterdam, Gandawa) było to odpowiednio 670-700 EUR/t oraz 2300-2350 EUR/t (dla paliwa HEFA-SPK).[44] Oznacza to, że SAF kosztuje dziś około 2,5-3,5 razy więcej niż paliwo konwencjonalne.

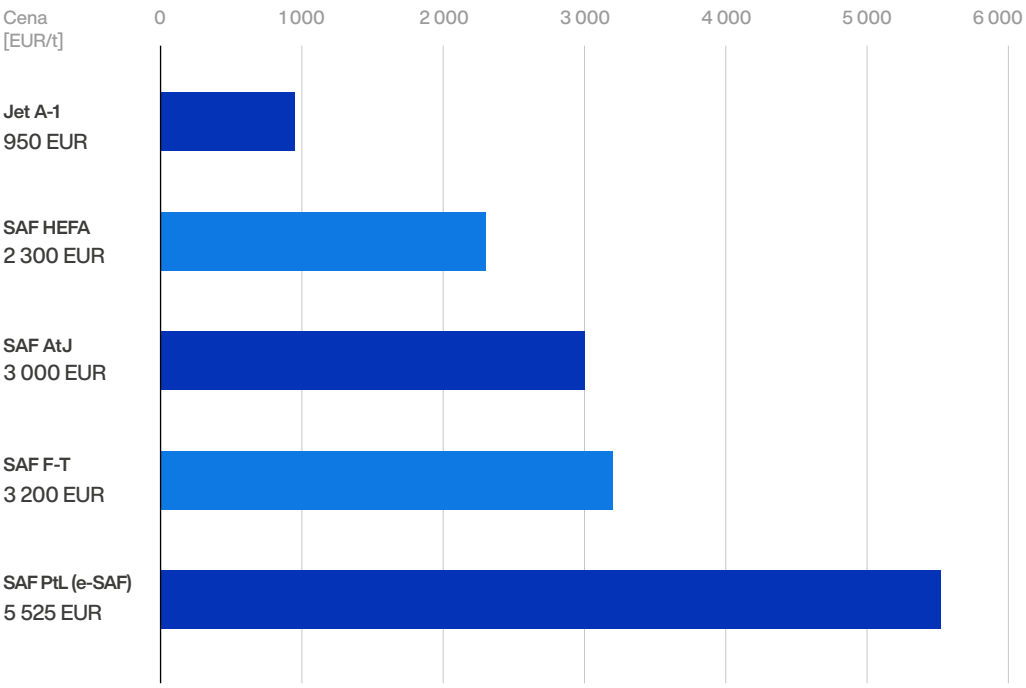
Różnica cenowa stanowi główną barierę w szerokiej komercjalizacji, dlatego przewoźnicy decydują się na zakup SAF głównie w ramach zobowiązań regulacyjnych (np. ReFuelEU Aviation), w programach dobrowolnych offsetów, bądź dzięki wsparciu finansowemu.

42) Technical EASA – ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2026 (www.europa.easa.eu)

43) Sustainable Aviation Fuel (SAF) 2026: HEFA vs Alcohol-to-Jet Economics. Energy Solutions Intelligence, 2025

44) Global Aviation Sustainability Outlook 2026. World Economic Forum, 2026

Rys. 9. Porównanie cen Jet A-1 i SAF według technologii (2024)[45]



Prognozy kosztów produkcji SAF

Koszt produkcji SAF zmniejsza się wraz ze zwiększaniem skali produkcji i doświadczeniem przemysłowym, co można opisać tzw. krzywą uczenia się (ang. Learning curve). Szacuje się, że zmniejszenie kosztów wynosi 10–20% na każde podwojenie skali produkcji.[46]

- **HEFA** – obecnie najtańsza technologia, koszty produkcji mogą zmniejszyć się do około 1 200–1 500 EUR/t do 2030 r.[47]
- **Alcohol-to-Jet (AtJ)** – dziś droga technologia (2 500–3 500 EUR/t), ale przewidywane zmniejszenie kosztów szacowane jest na 2 000 EUR/t do 2035 r. [48]
- **Power-to-Liquid (PtL/e-fuels)** – obecnie najdroższa technologia (ponad 5 000 EUR/t), dzięki rozwojowi technologii elektrolizy i zmniejszaniu kosztów OZE oczekuje się ceny rzędu 1 500–2 000 EUR/t w latach 2040–2050.[49]

45) ASA REPORT, State of the EU SAF market in 2023 Fuel reference prices, SAF capacity assessments, 2024

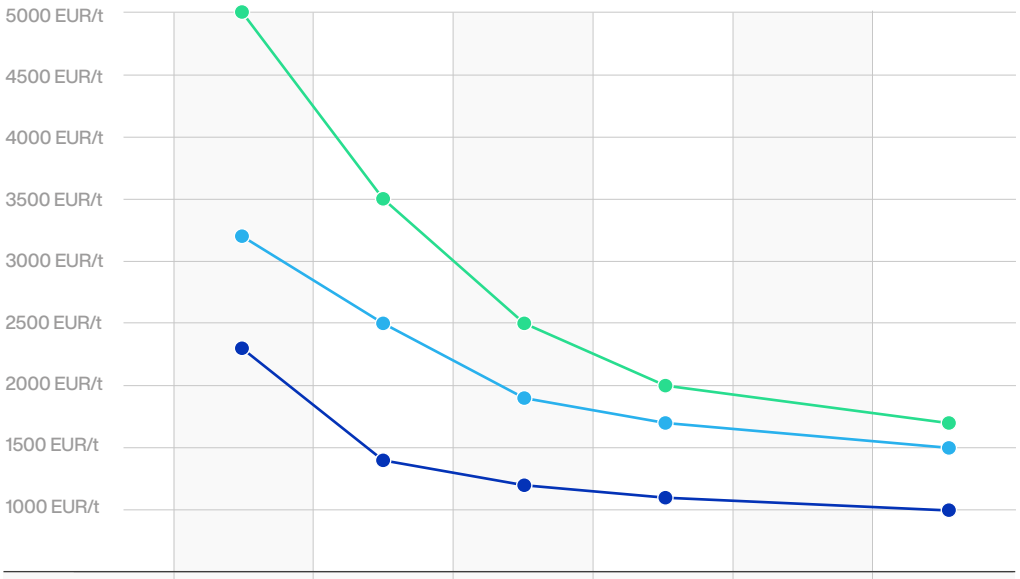
46) European Commission Joint Research Centre, Technology Learning Curves for Energy Policy Support, 2012

47) EASA, SAF Market, 2025

48) European Commission – Publications Office: Study supporting the impact assessment of the ReFuelEU Aviation initiative – Final report, 2021

49) ICCT, Current and future cost of e-kerosene in the United States and Europe, 2022

Rys. 10. Krzywe uczenia się kosztów SAF według technologii



	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PTL (E-FUELS)	5 000	3 500	2 500	2 000	-	1700
ATJ	3 200	2 500	1900	1700	-	1500
HEFA	2 300	1400	1200	1100	-	1000

Mechanizmy wsparcia wdrażania SAF

Aby zniwelować lukę cenową między Jet A-1 a SAF, stosuje się różne instrumenty polityczne i finansowe:

- **Subwencje i granty inwestycyjne** – np. wsparcie dla budowy nowych instalacji (USA, UE)[50]
- **Mechanizm wsparcia podatkowego** (*tax credit*) – amerykański *Inflation Reduction Act* (IRA) przewiduje dopłaty nawet do 1,25 USD/galon SAF spełniającego określone kryteria redukcji emisji gazów cieplarnianych,[51]
- **System EU ETS** – linie lotnicze korzystające z SAF mogą raportować mniejszą emisję CO_2, co przekłada się na mniejsze koszty zakupu uprawnień do emisji,[52]
- **Obowiązkowy udział SAF** (*blend mandate – ReFuelEU Aviation*) – wymogi udziału SAF w paliwach lotniczych (np. 2% w 2025 r., 6% w 2030 r., aż do 70% w 2050 r.) tworzą przewidywalny rynek i zachęcają inwestorów.[53]

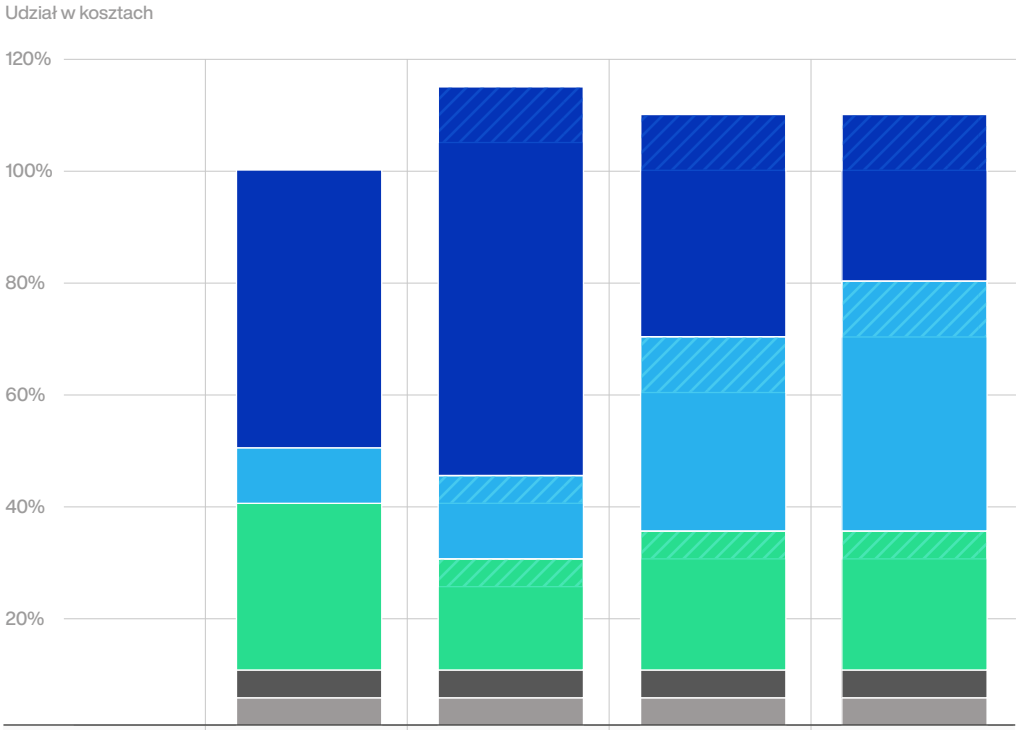
50) www.afdc.energy.gov – Sustainable Aviation Fuel (SAF) Grants
51) www.irs.gov – Sustainable aviation fuel credit
52) Official Journal of the European Union – commission implementing regulation (EU) 2018/2066
53) Regulation (eu) 2023/2405 of the European Parliament And Of The Council (ReFuelEU Aviation)

Podsumowanie

Obecna różnica cenowa między paliwami Jet A-1 a SAF jest główną barierą rynkową. Analizy ekonomiczne uwzględniające mechanizmy wsparcia wskazują na możliwość stopniowego obniżania kosztów produkcji i poprawę konkurencyjności SAF względem paliwa konwencjonalnego. Linie lotnicze mogą być realnie zachęcone do korzystania z SAF, jeśli:

- cena SAF zostanie obniżona dzięki efektowi skali i innowacjom technologicznym,
- regulacje zapewnią stabilny popyt,
- mechanizmy wsparcia zniwelują lukę kosztową.

Rys. 11. Struktura kosztów SAF i Jet A-1[54-58]



Technologia / paliwo	Jet A 1	SAF HEFA	SAF AtJ	SAF PtL (e fuels)
Feedstock	50%	60–70%	30–40%	20–30%
CAPEX*	10%	10–15%	25–35%	35–45%
OPEX**	30%	15–20%	20–25%	20–25%
Podatki / opłaty	5%	5%	5%	5%
Marża	5%	5%	5%	5%

*CAPEX (ang. *Capital Expenditures*) – koszty budowy lub zakupu instalacji, maszyn, urządzeń, infrastruktury
**OPEX (ang. *Operational Expenditures*) – wszystkie koszty bieżącej eksploatacji i utrzymania instalacji.

54) IATA – Sustainable Aviation Fuel Handbook 2023
55) ICCT – Cost assessment of sustainable aviation fuels in Europe 2021/2022
56) EASA – Study on the possible introduction of SAF in Europe 2023
57) World Economic Forum – Financing Sustainable Aviation Fuels 2020/2021
58) McKinsey – Clean Skies for Tomorrow 2020

7. Wdrażanie SAF w transporcie lotniczym

Wdrażanie zrównoważonych paliw lotniczych staje się jednym z kluczowych kierunków transformacji sektora lotniczego. Linie lotnicze, pod presją regulacyjną i rosnących oczekiwań społecznych, zaczynają łączyć różne strategie: od pilotażowych lotów i niewielkich domieszek SAF, przez długoterminowe kontrakty z producentami, aż po programy angażujące klientów korporacyjnych.

Proces ten nie przebiega równomiernie – pionierami są przewoźnicy z Europy Zachodniej i USA, którzy dzięki partnerstwom z rafineriami oraz lotniskami mogą stopniowo zwiększać udział SAF w zużywanym paliwie. Jak wynika z ustaleń EASA z 2025 r., rynek paliw zrównoważonych w Europie jest wyraźnie skoncentrowany wokół 33 portów lotniczych w 12 państwach członkowskich, a porty zlokalizowane w pięciu krajach (Niemczech, Francji, Hiszpanii, Niderlandach i Szwecji) są odbiorcami 99% podaży SAF.[59] Jednocześnie bariery kosztowe i ograniczona podaż sprawiają, że rozwój tego rynku wymaga silnych mechanizmów wsparcia publicznego oraz współpracy w całym łańcuchu wartości.

Wdrażanie zrównoważonych paliw lotniczych

Dlaczego SAF?

- Zmniejszenie emisji CO_2
- Spełnienie regulacji (ReFuelEU, CORSIA)
- Oczekiwania klientów
- Niższe koszty ETS

Jak wdrażają linie?

- Loty pilotażowe i demonstracyjne
- Stałe udziały SAF (0,5–1%)
- Programy korporacyjne (B2B)
- Umowy długoterminowe (offtake)
- Partnerstwa z lotniskami

Bariery

- Wysoka cena (2,5–6× Jet A-1)
- Ograniczona podaż (<1% rynku)
- Konkurencja o surowce
- Ryzyko greenwashingu

Przykłady

- KLM – pionier SAF, kontrakty SkyNRG, TotalEnergies
- Lufthansa – dopłaty pasażerów, projekty PtL

59) EASA – ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2026 (www.europa.easa.eu)

Umowy długoterminowe (ang. Offtake agreements) i inicjatywy portów lotniczych

Jednym z mechanizmów rozwoju rynku SAF są umowy długoterminowe zawierane pomiędzy liniami lotniczymi a producentami paliw. Zapewniają one przewoźnikom dostęp do stabilnych wolumenów SAF, a producentom – przewidywalny strumień przychodów, co umożliwia finansowanie i uruchamianie nowych instalacji. Przykładem jest współpraca Air France–KLM z TotalEnergies, w ramach której początkowo zakontraktowano dostawy 800 tys. ton SAF w ciągu dekady, a w 2024 r. wolumen ten zwiększono do 1,5 mln ton. Podobne kontrakty zawierają Lufthansa, United Airlines czy Delta, co wpisuje się w szerszy trend budowania projektów opartych na gwarancji odbioru paliwa przez duże linie lotnicze. Umowy tego typu często angażują także klientów korporacyjnych, którzy poprzez dopłaty finansują część kosztu SAF w ramach ograniczania emisji ze swoich podróży służbowych.

Tab. 6. Przykłady współpracy w zakresie dostaw długoterminowych[60-66]

Rok	Partnerzy	Wolumen	Region / Uwagi
2021–2024	Air France–KLM ↔ TotalEnergies	800 000 → 1,5 mln ton SAF w 10 lat	Europa; stałe dostawy dla AF-KLM
2022	Lufthansa ↔ Shell	do 1,8 mln ton SAF do 2030 r.	Europa; jeden z największych kontraktów
2022	Delta ↔ Gevo	75 mln gal SAF rocznie przez 7 lat	USA; długoterminowa gwarancja dostaw
2023	United Airlines ↔ Neste / World Energy / Gevo	ponad 5 mld litrów SAF zakontraktowanych do 2030 r.	USA; największy wolumen globalnie
2023	Southwest Airlines ↔ USA BioEnergy	do 2,57 mld litrów SAF w ramach 20-letniej umowy	opcja dodatkowych zakupów z kolejnych zakładów
2023	American Airlines ↔ Infinium	długoterminowy kontrakt na e-SAF (electro-SAF)	pierwsza taka umowa dla American Airlines
2025	American Airlines ↔ Valero Energy	dostawy do 10 mln galonów SAF na lotnisko Chicago O'Hare od czerwca 2025 r.	
2026	DHL Express ↔ SAF One	ok. 25 tys. ton SAF rocznie od 2028 r.	250 tys. ton w ciągu 10 lat

60) www. totalenergies.com
61) www.shell.com
62) www.pro.delta.com
63) www.united.com
64) www.southwestairlinesinvestorrelations.com
65) news.aa.com
66) group.dhl.com

Tab. 7. Inicjatywy portów lotniczych wspierające wdrażanie SAF

Rok	Port	Zakres	Region / Uwagi
2016	Oslo Gardermoen (Avinor)[67]	Udział SAF (0,5%) w systemie tankowania	Norwegia; pierwsze lotnisko z obowiązkowym udziałem SAF (od 2020 r)
2022-2024	Schiphol (NL)[68]	Dopłaty 500-1000 €/t dla linii tankujących SAF (aktualnie 300 €/t)	Holandia; współpraca z SkyNRG i DSL-01
2023	Heathrow (UK)[69]	Refundacja 50% premii SAF (460£/t)	Wielka Brytania; cel 2,5% udziału SAF
2023	Swedavia (Szwecja)[70]	Dotacje 3,5 mln € – dofinansowanie 50% kosztów SAF	Szwecja; obejmuje wiele lotnisk regionalnych
2023-2024	AENA, SEA Milano, Brussels,[71] Düsseldorf, Eindhoven, Luxembourg	Różne ulgi w opłatach lotniskowych, dopłaty do SAF	Europa; lokalne systemy wsparcia

Zarówno długoterminowe umowy, jak i inicjatywy portów lotniczych stanowią element budowy stabilnego i przewidywalnego rynku dla SAF. Linie lotnicze dzięki nim mogą włączać SAF do swojej strategii dekarbonizacji, a porty lotnicze wzmacniają swoją rolę jako katalizatory transformacji energetycznej w lotnictwie. Wspólne działania na tych dwóch poziomach sprawiają, że rozwój rynku SAF staje się nie tylko wymogiem regulacyjnym, ale także coraz częściej realną szansą inwestycyjną i narzędziem konkurowania na rynku transportu lotniczego.

Studium przypadków linii lotniczych – KLM i Lufthansa

KLM uchodzi za pioniera w dziedzinie zastosowania SAF w lotnictwie komercyjnym. Już w 2011 r. linia zrealizowała pierwszy na świecie rozkładowy rejs z wykorzystaniem paliwa wyprodukowanego w technologii HEFA (trasa Amsterdam–Paryż), udowadniając praktyczną możliwość wykorzystania alternatywnych paliw w operacjach pasażerskich.[72]

Kolejnym krokiem było uruchomienie w 2012 r. programu *Corporate SAF Programme*, który pozwolił klientom biznesowym współfinansować zakup SAF. Dzięki temu powstał stabilny model popytowy, w którym korporacje mogły wprost wspierać redukcję emisji związanych z podróżami służbowymi.[73]

67) www.icao.int – Aviation's Carbon Footprint Reduction Through Sustainable Alternative Fuel

68) ACI Europe, Sustainable Aviation Fuels Financial Support/Incentives Tracker of European Airports

69) www.heathrow.com

70) www.swedavia.com

71) www.brusselsairport.be

72) GreenAir, A new era for aviation as KLM becomes first airline to operate a commercial flight using biofuels

73) www.advancedbiofuelsusa.info

W 2021 r. KLM zrealizował pierwszy pasażerski lot z domieszką paliwa e-SAF wyprodukowanego przez Shell, otwierając drogę do wykorzystania paliw syntetycznych. Było to przełomowe wydarzenie na skalę europejską, potwierdzające technologiczną gotowość nowych ścieżek produkcji SAF.[74]

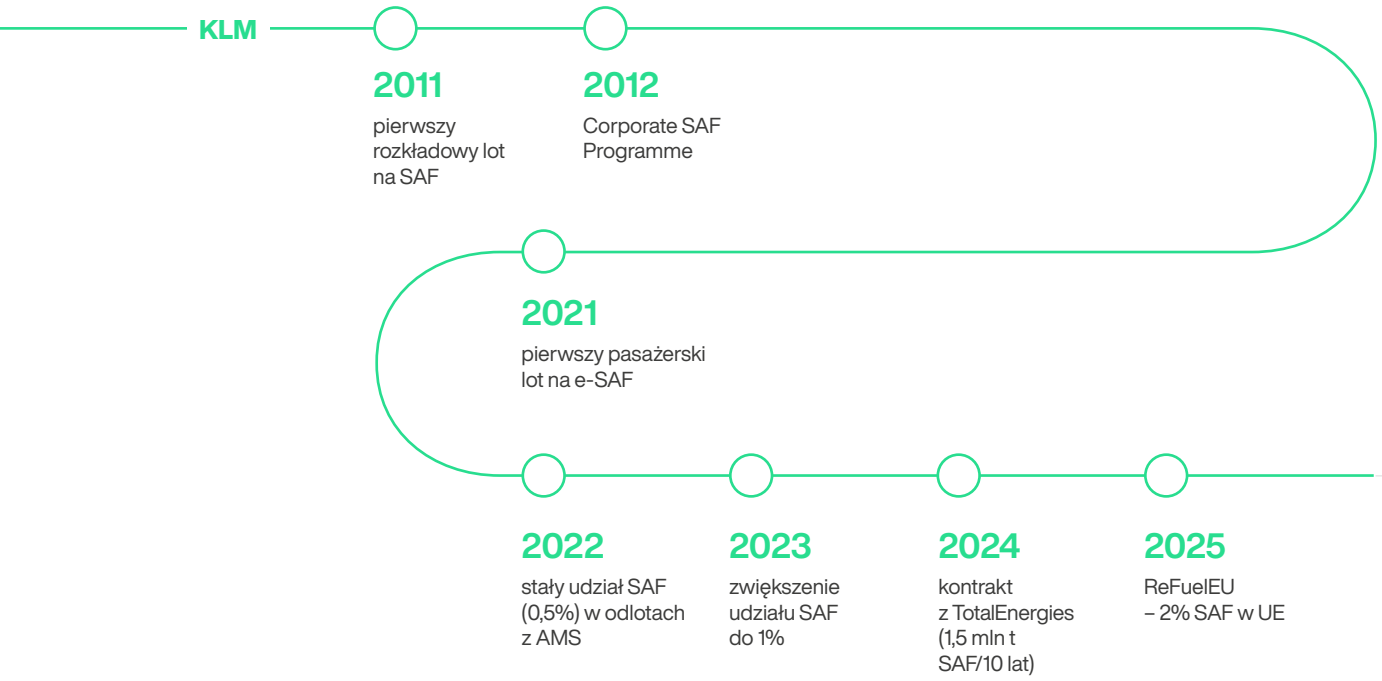
Od 2022 r. linia wprowadziła stałą domieszkę SAF (0,5%) we wszystkich odlotach z lotniska Schiphol w Amsterdamie. Rok później, w 2023 r., udział SAF został zwiększony do 1%. W praktyce oznaczało to, że każdy pasażer odlatujący z Amsterdamu korzystał choć w części ze zrównoważonego paliwa lotniczego.

Równolegle przewoźnik zabezpieczał długoterminowe dostawy poprzez umowy typu *offtake agreement*. W 2024 r. KLM podpisał kontrakt z TotalEnergies na dostawy nawet do 1,5 mln ton SAF w perspektywie dekady. Było to największe tego typu zobowiązanie w historii linii.[75]

8 czerwca 2026 r. przewoźnik wykonał pierwszy lot na trasie z Amsterdamu do Hamburga z wykorzystaniem mieszanki paliwowej zawierającej 5% e-SAF. Paliwo zostało wyprodukowane przez firmę INERATEC, zmieszane ze zwykłą naftą przez MB Energy i dostarczone do portu Amsterdam-Schiphol.[76]

Aktualnie KLM – podobnie jak inni przewoźnicy działający w Europie – jest zobowiązany do realizacji wymogu wynikającego z rozporządzenia ReFuelEU Aviation, nakładającego obowiązkowy udział 2% SAF w paliwie lotniczym. Wdrożenie regulacji zbiega się więc z wcześniejszymi inicjatywami przewoźnika, który już od ponad dekady testuje i rozwija rynek zrównoważonych paliw.

Rys. 12. KLM – oś czasu wdrożeń SAF (2011-2025, z wyłączeniem 2013-2020)



74) www.news.klm.com

75) www.totalenergies.com

76) https://news.klm.com/klm-operates-passenger-flight-to-germany-with-a-blend-of-synthetic-kerosene/

Lufthansa była jedną z pierwszych europejskich linii lotniczych, które rozpoczęły praktyczne testy wykorzystania zrównoważonych paliw. W 2011 r. przewoźnik przeprowadził sześciomiesięczny program lotów z wykorzystaniem SAF, wykazując, że mieszanki te mogą być stosowane bez konieczności modyfikacji samolotów lub infrastruktury naziemnej. Był to ważny krok dowodzący technicznej gotowości sektora do stosowania zrównoważonych paliw lotniczych.[77]

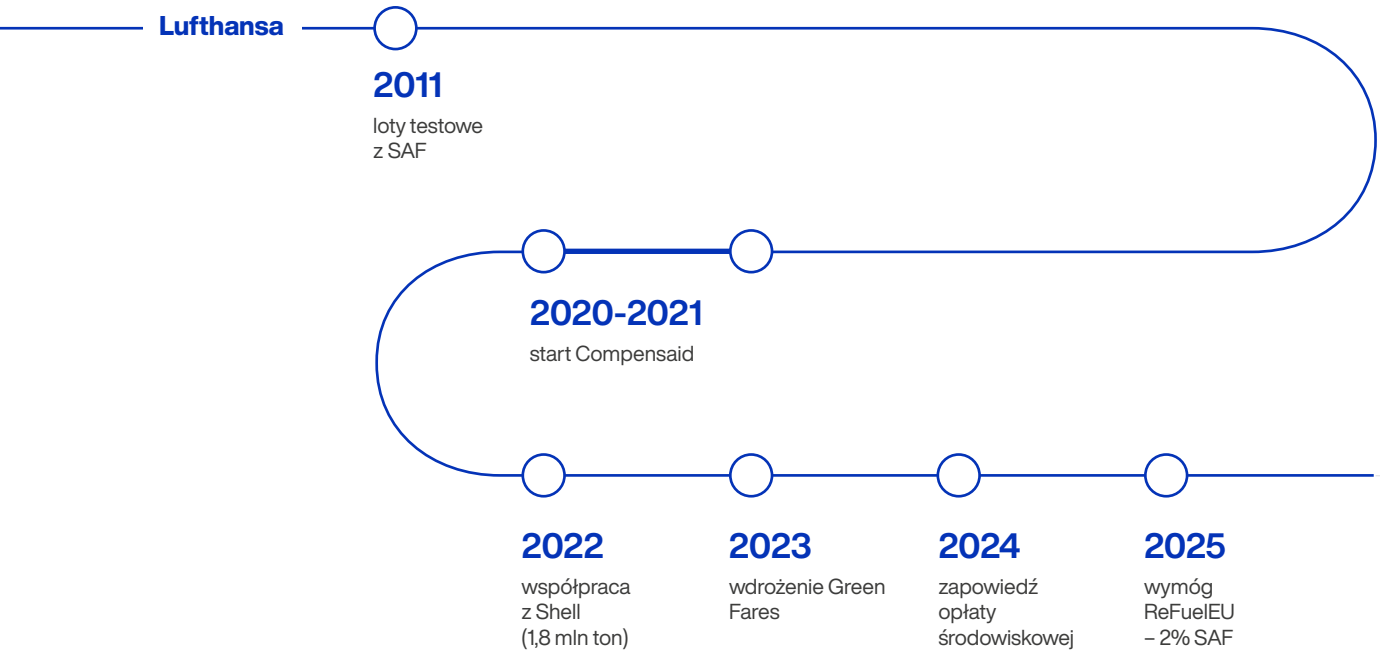
W 2020 r., Lufthansa Group uruchomiła platformę Compensaid. Narzędzie to dało pasażerom możliwość współfinansowania zakupu SAF przy rezerwacji biletów lub kompensacji emisji poprzez projekty offsetowe. Był to pionierski mechanizm rynkowy, który pozwolił klientom aktywnie uczestniczyć w procesie redukcji emisji.[78]

Skalowanie dostaw wymagało jednak długoterminowych umów. Dlatego w 2022 r. Lufthansa podpisała list intencyjny z firmą Shell, dotyczący zakupu do 1,8 mln ton SAF w ciągu kolejnych lat. Była to jedna z największych tego typu deklaracji w Europie, gwarantująca stabilne wolumeny paliwa.[79]

W 2023 r., Lufthansa dołączyła jako pierwsza europejska linia lotnicza do inicjatywy FMC (ang. First Movers Coalition), deklarując wykorzystanie SAF na poziomie co najmniej 5% zużywanego paliwa do 2030 r. Wzmocniło to pozycję przewoźnika jako lidera transformacji energetycznej w lotnictwie.

W 2024 r. linia rozszerzyła ofertę taryf Green Fares na loty długodystansowe. W ramach tej usługi część emisji jest kompensowana przez zakup SAF oraz certyfikowane projekty redukcji CO_2. W ten sposób przewoźnik integruje SAF bezpośrednio z ofertą handlową.

Rys. 13. Lufthansa – oś czasu wdrożeń SAF (2011-2025)



77) www.newsroom.lufthansagroup.com
78) www.lh-innovationhub.de
79) www.shell.com

8. Regulacje i strategie polityczne

Na konferencji ICAO CAAF/3 w 2023 r. uzgodniony został globalny cel redukcji emisji CO_2 z lotnictwa międzynarodowego o 5% do 2030 r. Cel ten ma zostać osiągnięty dzięki wykorzystaniu SAF, niskoemisyjnych paliw lotniczych i czystszych źródeł energii w lotnictwie.

Europejski System Handlu Emisjami (EU ETS) wpłynął na redukcję emisji CO_2 w sektorze lotniczym o 206 milionów ton w latach 2013-2023.[80] Do tej pory w programie funkcjonowały bezpłatne przydziały uprawnień do emisji dla operatorów lotniczych, jednak w latach 2024-2025 zaczęto je stopniowo wycofywać, by w 2026 zastąpić je pełnym systemem aukcyjnym.[81] To nakłada na operatorów obowiązek uzyskiwania potrzebnych uprawnień według następującego mechanizmu:



90%

z nich jest dystrybuowane według historycznych wielkości emisji z początku funkcjonowania systemu

10%

z nich jest dystrybuowane pomiędzy 16 państw członkowskich, z zachowaniem zasady solidarności

(Bułgaria, Czechy, Estonia, Grecja, Hiszpania, Chorwacja, Cypr, Łotwa, Litwa, Węgry, Malta, Polska, Portugalia, Rumunia, Słowenia i Słowacja)



28 państw

europejskich sprzedaje, wymienia i nabywa pozwolenia na Europejskiej Giełdzie Energii (EEX) z siedzibą w Lipsku[82]

80) EASA, Sprawozdanie środowiskowe w dziedzinie lotnictwa europejskiego 2025

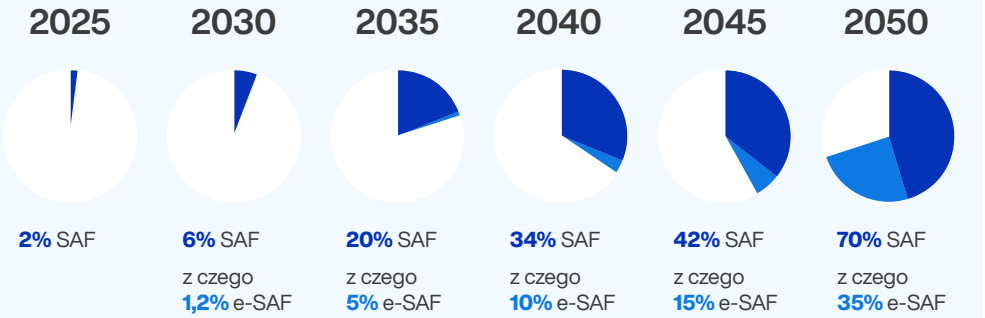
81) Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/958 z dnia 10 maja 2023 r. zmieniająca dyrektywę 2003/87/WE w odniesieniu do wkładu lotnictwa w unijny cel zmniejszenia emisji w całej gospodarce i odpowiedniego wdrożenia globalnego środka rynkowego

82) Auctioning of allowances. European Commission, 2026.

ReFuelEU Aviation

ReFuelEU Aviation to rozporządzenie Unii Europejskiej, przyjęte w ramach pakietu „Fit for 55", które weszło w życie w 2023 r. i zaczęło obowiązywać od 1 stycznia 2025 r. Głównym celem jest zwiększenie udziału SAF w paliwie lotniczym w Unii Europejskiej, by ograniczyć emisję z sektora lotniczego. 1 stycznia 2026 do programu dołączyła Szwajcaria, co nakłada wymóg zapewnienia paliwa SAF przez dostawców w portach lotniczych w Genewie i Zurychu, ale przede wszystkim rozwija zakres regulacji europejskiej w tej dziedzinie.[83]

Rys. 14. Minimalne udziały dostaw SAF i e-SAF w Europie, według rozporządzenia ReFuelEU Aviation[84]



Wymogi stosowania paliw SAF i e-SAF dotyczą portów lotniczych w Unii Europejskiej, które obsługują rocznie ponad 800 tys. pasażerów i wszystkich przewoźników lotniczych tankujących paliwo na tych lotniskach.

Rozporządzenie wyróżnia podkategorie paliw zrównoważonych:

- syntetyczne paliwa lotnicze pochodzenia niebiologicznego (RFNBOs – Renewable Fuels of Non-Biological Origin),
- zaawansowane biopaliwa lotnicze produkowane z surowców wymienionych w Części A Załącznika IX RED (Renewable Energy Directive),
- biopaliwa lotnicze produkowane z surowców wymienionych w Części B Załącznika IX RED,
- inne biopaliwa lotnicze produkowane z innych surowców, które nie zostały wymienione w Załączniku IX RED,
- paliwa produkowane drogą odzyskiwania węgla z gazów przemysłowych, dwutlenku węgla z powietrza lub odpadów kopalnych nieprzetwarzalnych w inny sposób (również zdefiniowane w RED).[85]

Zrównoważone paliwa lotnicze dostarczane w ramach obowiązku ReFuelEU Aviation muszą być zgodne z kryteriami zrównoważonego rozwoju i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, które są określone w RED (Renewable Energy Directive) – Dyrektywnie w sprawie odnawialnych źródeł energii. Stosowane SAF muszą być certyfikowane zgodnie z np. 30 dyrektywy RED II, a w przypadku biopaliw, muszą spełniać kryteria zrównoważonego rozwoju i kryteria ograniczenia emisji GHG zgodnie z np. 29 dyrektywy RED II.[86]

83) ReFuelEU aviation. European Commission, 2026.

84) EASA, Fit for 55 and ReFuelEU Aviation

85) EASA – ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2026 (www.europa.easa.eu)

86) Federal Ministry Republic of Austria. Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology. SAF-Roadmap, 2024.

W celu wsparcia osiągnięcia celów wyznaczonych przez ICAO i rozporządzenia europejskie, wprowadzono zachęty finansowe, programy badawcze, współpracę międzynarodową i utworzono Europejską Izbę Rozliczeniową.

Zapotrzebowanie na SAF w 2030 r. wynikające z ReFuelEU Aviation (6% udziału) będzie wynosiło około 2,8 miliona ton. Prognozy Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa Lotniczego (EASA) wskazują jednocześnie, że obecnie rozwijana zdolność produkcyjna może osiągnąć poziom około 3,2 miliona ton, co oznacza, że w perspektywie roku 2030 istnieje potencjał do pokrycia regulacyjnego zapotrzebowania. Po tej dacie, wraz z szybkim wzrostem wymaganego udziału SAF (20% w 2035 r. i kolejne cele), zdolności produkcyjne będą musiały znacząco wzrosnąć, aby sprostać ambitnym wymogom ReFuelEU.

Podmioty niestosujące zasad polityki ReFuelEU – operatorzy statków powietrznych poruszających się na terenie Unii Europejskiej – są w takim przypadku obciążane karami finansowymi. Oblicza się je na podstawie całkowitej ilości niezatankowego paliwa: różnicy pomiędzy rocznym zapotrzebowaniem na paliwo do wykonania lotów objętych RFEUA a rzeczywistą ilością paliwa zatankowanego przed wykonaniem lotów objętych RFEUA z portów w Unii. Kluczowym zapisem w artykule 5. RFEUA jest obowiązek tankowania takiej ilości paliwa w ciągu roku, by wynosiła co najmniej 90% rocznego zapotrzebowania przy założonej działalności lotniczej. Wymóg ma na celu zapobieganie zjawisku tankeringu, czyli zakupie paliwa w portach o niższych cenach i tankowaniu na zapas.[87]

Brak spełniania wymogów mandatów SAF skutkuje nakładaniem kar nie tylko na linie i porty lotnicze, ale też dostawców paliwa. W ich przypadku wysokość kwoty jest dwukrotnością różnicy w cenie pomiędzy konwencjonalną naftą lotniczą a SAF, pomnożoną przez ilość paliwa brakującą do spełnienia celów programu.[88] Państwa Unii aktywnie egzekwują opisywane kary za niewykonanie mandatu 2% dodatku SAF. Większość krajów zaproponowało utrzymywanie minimalnej wysokości kar (obliczanej w opisany wyżej sposób), które przy założeniu ceny 2000 euro za tonę SAF i 7700 euro za tonę eSAF z 2024 r. wyniosłyby kolejno 2700 oraz 14000 euro.[89] Niemcy w grudniu 2025 r. wdrożyły bardziej rygorystyczne zapisy o obciążaniu dostawców kosztami 4700 euro za każdą brakującą tonę metryczną SAF i (w przyszłości) 17000 euro za każdą brakującą tonę metryczną eSAF.[90]

Do zasad programu odniosła się IATA, która zaznaczyła, że wzrost produkcji SAF w 2026 r. zwolni, osiągając ostatecznie 2,4 miliona ton. Jako główny powód IATA podaje obowiązujące mandaty i procedury, które hamują rozwój dekarbonizacji lotnictwa. ReFuelEU Aviation doprowadziło do wzrostu kosztów w związku z ograniczoną zdolnością dostarczania SAF i oligopolu na rynku dostaw. Z powodu wysokich marż u dostawców linie lotnicze płacą do pięciu razy więcej niż cena konwencjonalnego paliwa lotniczego i podwajają cenę rynkową SAF. Poważne zarzuty stanowią również: brak gwarancji dostawy, rzeczywiste wyniki pierwszego roku funkcjonowania ReFuelEU oraz brak krajowej produkcji SAF w Polsce – polskie porty lotnicze i przewoźnicy są zmuszeni realizować obowiązki wynikające z programu poprzez sprowadzanie paliw.[91,92]

87) FAQ on ReFuelEU aviation. European Commission.

88) Implementing the EU's e-SAF mandate. Transport and Environment, 2024.

89) Alternative aviation fuel policy in the EU. Climate Catalyst, 2026.

90) Entwurf eines Zweiten Gesetzes zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote. Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2025.

91) SAF Production Growth Rate is Slowing Down, Essential to Correct Course Ahead of e-SAF Mandates. IATA, 2025.

92) EASA – ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2026 (www.europa.easa.eu)

Program CORSIA

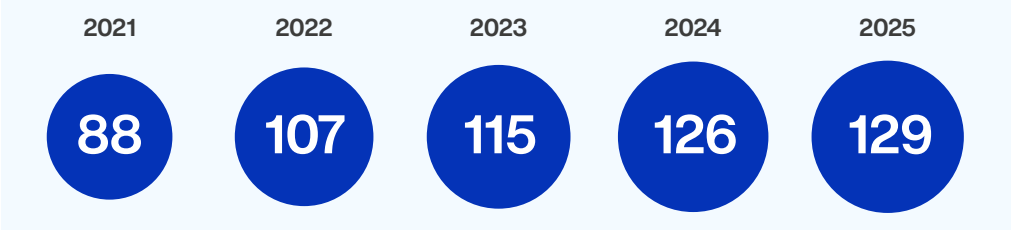
CORSIA (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation) to program kompensacji i redukcji emisji CO_2 w lotnictwie międzynarodowym. Jest to pierwszy globalny system rynkowy przyjęty przez ICAO, który ma zastosowanie do lotnictwa i uzupełnia inne działania mające na celu redukcję emisji z sektora lotniczego. CORSIA jest wdrażana w 3 fazach:[93]

0. Faza pilotażowa (2021-2023)
1. Pierwsza faza (2024-2026)
2. Druga faza (2027-2035)

W pierwszych dwóch fazach udział jest dobrowolny, a od 2027 r. udział w CORSIA będzie obowiązkowy z pewnymi wyjątkami: wyłączone będą np. kraje mniej rozwinięte, małe rozwijające się kraje wyspiarskie i kraje, które w 2018 r. odpowiadały za mniej niż 0.5% globalnego międzynarodowego RTK (Revenue Tonne Kilometers, dochód z jednego tonokilometra) ale mogą dobrowolnie dołączyć. Do 2025 r. do udziału w programie kompensacji CORSIA zgłosiło się dobrowolnie 129 ze 193 państw. Od 2019 r. w ramach CORSIA emisje CO_2 są monitorowane, raportowane i weryfikowane.

Według prognoz, w pierwszej fazie CORSIA (2024-2026) dla lotów rozpoczynających się w Europie zrekompensowanych zostanie łącznie 19 milionów ton CO_2. Do 2026 r. tylko loty między państwami uczestniczącymi w CORSIA podlegają wymogom kompensacji emisji. Od drugiej fazy CORSIA, wszystkie loty międzynarodowe będą podlegać wymogom kompensacji (z wyłączeniem lotów do i z krajów wspomnianych w wyjątkach). W ramach CORSIA, linie lotnicze są zobowiązane do kupowania jednostek redukcji emisji na rynkach węglowych, tzw. offsetów, by pokryć emisje powyżej poziomu bazowego (poziomu emisji z 2019 r.). Linie lotnicze mogą korzystać ze zrównoważonych paliw lotniczych by zredukować wymogi offsetowe, a konkretniej z paliw CORSIA, które są określane jako CORSIA Eligible Fuel (CEF). CEF jest również paliwem zrównoważonym, jednak musi spełniać 14 wymagań dotyczących środowiska, kwestii prawnych dotyczących wody i gruntów na terenie produkcji paliwa, poszanowania praw pracowniczych i innych. Paliwa określane jako CEF powinny bazować na surowcach z 4 grup: produkty podstawowe i uboczne, produkty wtórne, odpady i pozostałości.[94]

Rys. 15.1. Dobrowolny udział państw



93) www.icao.int/CORSIA
94) www.icao.int

Rys. 15.2 Dane z Centralnego Rejestru CORSIA (CCR)

2024	2024	2023
670 operatorów samolotów	**56** organów weryfikacyjnych	**530** mln ton emisji CO_2
ze **131** państw	akredytowanych w **34** państwach	raporty państwowe obejmują **99%** emisji CO_2 w 2023 r.

Wybrane strategie krajowe

Wielka Brytania: w Wielkiej Brytanii również przyjęto minimalny udział paliw SAF w mieszance paliwowej: 2% SAF w 2025r., 10% SAF z czego 0,5% e-SAF w 2030r., 22% SAF z czego 3,5% e-SAF w 2040 r.[95]

Austria: Austriackie ministerstwo transportu opracowało SAF-Roadmap w ramach strategii lotnictwa „Aviation Strategy 2040+", wspierając produkcję i import SAF, współpracę międzynarodową oraz sektor lotniczy w przygotowaniach do upowszechnienia paliw niskoemisyjnych.[96]

Francja: Uruchomiono cztery strategiczne projekty, które mają produkować 270 tys. ton SAF rocznie do 2030 r. – oszczędność CO_2 ok. 750 tys. ton rocznie. Francja wspiera zarówno tworzenie popytu, jak i rozwój oferty (projekty inwestycyjne) oraz szkolenia (ACT-SAF).[97,98]

USA: Powstał program SAF Grand Challenge, którego celem jest produkcja SAF do 3 mld galonów rocznie do 2030 r. i do 35 mld galonów rocznie do 2035 r. Produkcja ta przekroczyłaby 100% krajowego zapotrzebowania na paliwo lotnicze, przy czym produkowane SAF musi zapewniać co najmniej 50% redukcji emisji CO_2 względem paliwa konwencjonalnego. Rząd USA przewidział ulgę CFPC (Clean Fuel Production Credit) dla producentów czystych paliw transportowych w zależności od redukcji emisji gazów cieplarnianych (tzw. intensywności węglowej – CI). Maksymalna stawka dla SAF wynosi obecnie 1,75$/galon paliwa. Wspierane są też projekty pilotażowe prowadzone na terenie kraju.[99]

95) www.carbon-direct.com

96) Federal Ministry Republic of Austria. Climate Action, Environment, Energy, Mobility, Innovation and Technology. SAF-Roadmap, 2024.

97) www.hydrogentoday.info

98) ICAO, French Sustainable Aviation Fuel (SAF) Policy Development as an Example of CAAF Roadmap Implementation Enabler, 2025

99) www.apnews.com

9. Wyzwania i bariery rozwoju SAF

Rozwój i rozpowszechnienie zrównoważonych paliw lotniczych nie jest jedynie kwestią rozwoju technologicznego produkcji SAF, ale wiąże się także z barierami ekonomicznymi, surowcowymi, logistycznymi i regulacyjnymi, które wymagają wsparcia rządowego i współprac z przemysłem.

Przewidywania w produkcji SAF na 2024 r. były na poziomie 1,5 miliona ton paliwa, jednak w rzeczywistości wyprodukowano zaledwie 1 milion ton SAF. W 2025 r. oczekiwano produkcji SAF na poziomie 2,1 miliona ton lub 0,7% całkowitej produkcji paliwa konwencjonalnego, ale faktycznie wyniosła ona 1,9 mln ton.[100] W 2024 r. paliwa zrównoważonego stanowiły 0,6% (192,7 tysięcy ton) całkowitego rynku paliw lotniczych dostarczanych do portów w krajach Unii Europejskiej.[101] Produkcja SAF się zwiększa, jednak wolniej niż pierwotnie zakładano.

Koszty inwestycji

Produkcja zrównoważonych paliw lotniczych jest obecnie kilkukrotnie droższa niż paliwa Jet A-1. Uwzględniając programy wspierające SAF i ulgi podatkowe stosowane w USA, nadal cena SAF jest znacząco wyższa niż paliwa konwencjonalnego. Produkcja zrównoważonych paliw lotniczych wymaga znacznego doinwestowania, co czyni SAF dużo droższym niż Jet A-1. Żeby sprostać zapotrzebowaniu na SAF w przyszłości, według szacunków do 2050 r. przemysł paliwowy musi produkować około 450 mld litrów SAF rocznie. Obecnie Neste, największy producent SAF na świecie, produkuje około 1,875 mld litrów rocznie.[102,103] Produkcję zrównoważonych paliw lotniczych można zwiększyć poprzez zwiększenie inwestycji w inne certyfikowane technologie produkcji SAF. Jednym z rozwiązań są ulgi podatkowe dla producentów SAF, zatwierdzone np. w Stanach Zjednoczonych, lub stosowanie kontraktów różnic kursowych (ang. *Contract for Difference*, CFD), które mogą zmniejszyć ryzyko inwestorów i zachęcić do produkcji SAF. Innym rozwiązaniem, stosowanym np. w Finlandii i USA, mogą być zielone obligacje, czyli instrumenty przeznaczone do wspierania projektów związanych ze środowiskiem.

100) www.iata.org

101) https://www.spglobal.com/energy/en/news-research/latest-news/agriculture/102225-saf-accounted-for-06-of-eu-aviation-fuel-in-2024-easa

102) www.carbonclick.com

103) www.neste.com

Ograniczenia surowcowe

Zrównoważone paliwa lotnicze są oceniane pod względem cyklu życia, a nie tylko emisji z silników lotniczych. Z tego względu, rodzaj stosowanych surowców, ich produkcja, przetwarzanie i transport w znacznym stopniu wpływają na końcową ocenę paliwa zrównoważonego. Część surowców jest uprawiana na gruntach, które wcześniej były zasobne w pierwiastek węgla, lub na terenach o dużej bioróżnorodności, co nie spełnia wymogów CORSIA. Niektóre surowce, takie jak odpady i pozostałości z różnych sektorów gospodarki (odpady leśne, zużyte oleje kuchenne, stałe odpady komunalne) mają duży potencjał w redukcji emisji w cyklu życia paliw zrównoważonych, jednak ich dostępność jest ograniczona. Dla najbardziej rozpowszechnionych procesów produkcji SAF, problem z surowcami jest następujący:

- **HEFA-SPK** to obecnie główna ścieżka produkcji lotniczego paliwa zrównoważonego, nawet do 80% produkcji SAF. Surowcem stosowanym do produkcji paliwa w tej ścieżce są głównie zużyte oleje kuchenne, oleje roślinne, tłuszcze zwierzęce lub pozostałości rolnicze. Podaż tych surowców jest ograniczona i wiąże się z importem surowców z innych krajów lub regionów, co wiąże się ze wzrostem wskaźników emisji w cyklu życia paliwa.[104]
- **FT-SPK** bazuje na surowcach takich jak odpady rolnicze i leśne, czyli na biomasie lignocelulozowej, której zbiórka i przetwarzania na skalę przemysłową są obecnie wyzwaniem. Inne surowce również są ograniczone regionalnie, co rodzi problemy związane z pozyskiwaniem wystarczającej ilości surowca.[84]
- **ATJ-SPK** opiera się na produkcji SAF z alkoholu, głównie etanolu, który z kolei często jest pozyskiwany z roślin żywieniowych. Rośliny żywieniowe nie spełniają wymagań zrównoważonego rozwoju oraz mają ograniczoną podaż do produkcji tak dużych ilości paliwa lotniczego.

Jednym z rozwiązań dla produkcji SAF, jest nadanie priorytetu w stosowaniu surowców odpadowych i prace nad rozwojem szerszego zakresu surowców, które mogą być wykorzystywane w kilku ścieżkach produkcji SAF.

Problemy logistyczne i certyfikacja paliwa

Zrównoważone paliwa lotnicze obecnie są produkowane w niewielu rafineriach, które są rozproszone geograficznie. Transport SAF z miejsca produkcji do portów lotniczych lub hubów lotniczych wymaga odpowiedniej infrastruktury, która zapewni stały dostęp do paliw. Na ten moment, większość transportu odbywa się transportem ciężarowym, co również zwiększa wskaźniki emisji w cyklu życia paliwa. Brak odpowiedniej infrastruktury hamuje powszechną dostępność SAF w portach lotniczych. Ze względu na to, że transport SAF do portów lotniczych, które są znacznie oddalone od miejsca produkcji, nie zawsze jest opłacalny pod względem zrównoważonego podejścia, istnieje rozwiązanie w postaci Book&Claim, które polega na złożeniu przez firmę deklaracji zrównoważonego rozwoju w oparciu o towary, których fizycznie nie otrzymały. W praktyce oznacza to, że zakupione

104) www.iata.org

SAF nie jest fizycznie transportowane i dostarczane danej firmie, tylko jest dostarczane za pośrednictwem lokalnych łańcuchów dostaw do portu lotniczego w pobliżu produkcji SAF, zastępując w ten sposób równoważną ilość paliwa konwencjonalnego.[105]

Proces certyfikacji paliw zrównoważonych jest również dużym wyzwaniem. Certyfikacja SAF jest obecnie długotrwała i kosztowna, może trwać od około 4 do 6 lat, przy czym niektóre procesy są certyfikowane dłużej. Nadal trwają też badania nad certyfikacją 100% SAF do spalania w silnikach lotniczych, jednak aktualnie możliwe jest mieszanie SAF z Jet A-1 do 50% objętości. Sam proces certyfikacji wymaga współpracy między producentami paliwa, producentami silników lotniczych oraz organizacjami lotniczymi. Skutkuje to znacznym ograniczeniem tempa wdrażania nowych technologii produkcji SAF.

Rys. 16. Bariery produkcji SAF i możliwe rozwiązania

Koszty inwestycji
- Subsydia i ulgi podatkowe (np. IRA w USA, subsydia w UE)
- Kontrakty różnic kursowych (CFD) gwarantujące cenę SAF
- Zielone obligacje i finansowanie publiczno-prywatne

Ograniczenia surowcowe
- Priorytet dla surowców odpadowych (UCO, tłuszcze zwierzęce, MSW)
- Rozwój FT i ATJ z biomasy resztkowej i innych surowców
- Inwestycje w e-fuels i zielony wodór
- Badania nad nowymi surowcami

Logistyka
- Rozbudowa infrastruktury (rurociągi, terminale blendingowe)
- Standaryzacja *book-and-claim*
- Inwestycje w huby SAF przy dużych lotniskach

Certyfikacja
- Przyspieszenie procedur ASTM
- Finansowanie badań i testów silnikowych
- Współpraca międzynarodowa (ICAO, EASA, FAA) dla szybszej certyfikacji 100% SAF

Współpraca międzynarodowa (ICAO, EASA, FAA) dla szybszej certyfikacji 100% SAF

Na stabilność rynku paliw lotniczych znaczny wpływ miała rozpoczęta w czerwcu 2025 r. wojna izraelsko-irańska. Z powodu ograniczeń przewozu przez Cieśninę Ormuz w 2026 r. ceny konwencjonalnych paliw znacznie wzrosły. Te w Europie od początku konfliktu podwoiły się, a ceny paliwa lotniczego wyniosły 1800 dolarów za tonę metryczną w połowie marca. Wiele linii lotniczych zostało obarczone ryzykiem braku dostaw wystarczającej ilości paliwa, a KLM i SAS ograniczyły liczbę lotów w swoich siatkach połączeń. Oddziaływało to również na pozycję SAF, zwracając uwagę na jego znaczenie i realną alternatywę nie tylko w zmniejszaniu emisji CO_2 w całym cyklu życia, ale też w zasilaniu obecnych statków powietrznych w momencie kryzysu i strategicznej ochrony państw. Konflikt na Bliskim

105) www.skynrg.com

Wschodzie uświadomił inwestorom i decydentom sens i potrzebę rozwijania procesów produkcji SAF (w tym HEFA jako najpopularniejsza i jedyna w pełni skomercjalizowana metoda) w spojrzeniu na:

- zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego i odporności logistycznej poprzez tworzenie rozproszonych i mobilnych instalacji produkcyjnych,
- zmniejszenie zależności od ograniczonych surowców i importu poprzez badanie nowych i konkurencyjnych źródeł surowców do produkcji SAF,
- budowę krajowej i regionalnej samowystarczalności paliwowej poprzez wdrażanie technologii wykorzystujących zasoby OZE w kontekście minimalizacji wpływu zakłóceń na rynku ropy naftowej.[106,107]

106) https://cleantech.com/saf-was-always-interesting-it-just-took-an-international-crisis-to-make-it-feel-relevant-again/

107) https://enotrans.org/article/war-with-iran-posses-challenges-for-aviation-industry-and-jet-fuel-supplies/

10. Możliwości dla polskiego sektora transportowego i przemysłowego

Rozwój zrównoważonych paliw lotniczych otwiera przed Polską istotne możliwości zarówno w sektorze transportowym, jak i przemysłowym. Kraj dysponuje zasobami surowców, rozwiniętą infrastrukturą rafineryjną i chemiczną, a także dynamicznie rosnącym rynkiem lotniczym.

Włączenie Polski w europejski łańcuch wartości SAF może nie tylko zwiększyć bezpieczeństwo energetyczne i konkurencyjność krajowych przewoźników, ale także wesprzeć transformację przemysłową poprzez inwestycje w nowe technologie, wodór i wykorzystanie emitowanego CO_2. Kluczowe staje się wskazanie lokalizacji, w których produkcja SAF może być najbardziej efektywna, oraz powiązanie ich z logistyką i infrastrukturą transportową, w tym z planowanym Centralnym Portem Komunikacyjnym i regionalnymi hubami cargo.

Potencjalne lokalizacje produkcji SAF w Polsce

Wybór lokalizacji dla instalacji produkcyjnych SAF powinien uwzględniać kilka kluczowych kryteriów:

- dostępność surowców (oleje odpadowe, tłuszcze zwierzęce, biomasa lignocelulozowa, źródła CO_2),
- dostęp do wodoru i infrastruktury energetyki odnawialnej,
- bliskość rafinerii i zakładów petrochemicznych, które mogą być adaptowane do produkcji HEFA/AtJ/PtL,
- logistyka paliwowa (rurociągi, porty, węzły kolejowe, bliskość lotnisk hubowych).

Płock (PKN ORLEN, rafineria)[108,109]

W Płocku zlokalizowana jest największa rafineria w Polsce, która ma duży potencjał do rozwoju produkcji SAF w technologii HEFA poprzez adaptację części istniejących instalacji rafineryjnych. Lokalizacja ta dysponuje dobrze rozwiniętą infrastrukturą logistyczną – rurociągiem „Przyjaźń", terminalem kolejowym oraz bliskością warszawskiego lotniska Chopina, co stwarza warunki do sprawnej dystrybucji paliwa. Dodatkowym atutem jest możliwość integracji z planowanymi projektami ORLEN Hydrogen, zakładającymi produkcję zielonego wodoru, który w przyszłości może stanowić kluczowy komponent wytwarzania e-SAF.

Jedlicze (Podkarpacie, zakład bioetanolu 2G ORLEN)[110]

W Jedliczu powstaje nowoczesna instalacja do produkcji bioetanolu drugiej generacji o planowanej zdolności wytwórczej około 25 tys. ton rocznie, oparta na wykorzystaniu biomasy lignocelulozowej. Inwestycja ta stwarza naturalne możliwości dalszego rozwoju w kierunku technologii Alcohol-to-Jet, która pozwala na konwersję bioetanolu do zrównoważonego paliwa lotniczego. Dodatkowym atutem lokalizacji jest dogodne położenie komunikacyjne – obecność infrastruktury kolejowej oraz bliskość granicy Unii Europejskiej, co sprzyja logistyce surowców i dystrybucji produktów.

Gdańsk / Gdynia (Naftoport i rafineria LOTOS/ORLEN)[111]

Trójmiejski ośrodek paliwowy, obejmujący rafinerię w Gdańsku oraz Naftoport, stanowi kluczowy punkt na mapie potencjalnej produkcji i dystrybucji SAF w Polsce. Dzięki dostępowi do importowanych surowców, takich jak zużyte oleje spożywcze, oleje tropikalne czy tłuszcze zwierzęce, lokalizacja ta może pełnić rolę centrum zaopatrzenia dla technologii HEFA. Atutem jest rozwinięta infrastruktura paliwowa i morska – Naftoport obsługuje zarówno import, jak i eksport produktów ropopochodnych, co stwarza możliwość mieszania SAF i ich dystrybucji drogą morską na rynki europejskie. Dodatkowo bliskość portu lotniczego Gdańsk Rębiechowo zwiększa znaczenie tej lokalizacji jako potencjalnego hubu dla zaopatrywania sektora lotniczego w zrównoważone paliwa.

Police / Puławy (przemysł chemiczny i nawozowy)[112]

Ośrodki przemysłowe w Policach i Puławach stanowią jedne z największych punktowych źródeł emisji CO_2 w Polsce, co czyni je potencjalnie atrakcyjnymi lokalizacjami dla rozwoju produkcji e-SAF. Skala emisji generowana przez zakłady chemiczne i nawozowe daje realną możliwość wdrożenia procesów Carbon Capture and Utilisation (CCU), w których wychwycony dwutlenek węgla stanowi podstawowy surowiec do syntezy paliw. Atutem tych lokalizacji jest również korzystne położenie względem rozwijających się projektów odnawialnych źródeł energii – morskiej energetyki wiatrowej na Pomorzu oraz fotowoltaiki na Lubelszczyźnie – które mogą dostarczać niskoemisyjny wodór niezbędny w procesach PtL. Integracja lokalnych instalacji chemicznych z produkcją zielonego wodoru stwarza zatem możliwość budowy nowoczesnych hubów e-SAF, wpisujących się w unijną strategię dekarbonizacji przemysłu i transportu lotniczego.

108) www.ORLEN.pl
109) biofuels-news.com
110) www.orlenpoludnie.pl
111) www.fuelcellsworks.com
112) Polski Instytut Ekonomiczny, Czas na polski CCS? Szanse i wyzwania wychwytu i składowania CO_2 w polskim przemyśle

Bełchatów (kompleks energetyczny)[113]

Kompleks energetyczny w Bełchatowie to największy punktowy emiter CO_2 w Unii Europejskiej – w 2021 r. emisje sięgały około 33 mln ton rocznie. Tak duża koncentracja dwutlenku węgla tworzy unikalne warunki do wdrożenia technologii CCU, w której wychwycone emisje mogą stanowić kluczowy surowiec do produkcji paliw syntetycznych. Region objęty jest planem głębokiej transformacji energetycznej, zakładającym rozwój odnawialnych źródeł energii, instalacji wodorowych oraz magazynów energii, co dodatkowo zwiększa jego potencjał do stania się centrum innowacyjnych projektów niskoemisyjnych. Atutem Bełchatowa jest także korzystne położenie – w centralnej Polsce, z dobrą dostępnością transportową i infrastrukturą kolejową, co sprzyja logistyce zarówno surowców, jak i gotowego paliwa.

Śląsk (aglomeracja przemysłowa)[114]

Aglomeracja śląska, będąca największym w Polsce ośrodkiem przemysłu ciężkiego i hutniczego, charakteryzuje się bardzo dużą koncentracją emisyjnych źródeł CO_2. To stwarza naturalny potencjał do rozwoju projektów Power-to-Liquid, w których wychwycone emisje mogłyby zostać wykorzystane jako surowiec do produkcji e-SAF. W regionie zlokalizowane jest lotnisko Katowice-Pyrzowice, które stanowi jeden z głównych węzłów cargo w Polsce, co zwiększa zapotrzebowanie na zrównoważone paliwa w tym obszarze. Dodatkowym atutem jest dynamicznie rozwijający się sektor OZE i gospodarki wodorowej na Górnym Śląsku, który może zapewnić zielony wodór niezbędny do procesów syntezy paliw. W efekcie Śląsk to strategiczny obszar dla połączenia przemysłowej dekarbonizacji z rozwojem rynku SAF.

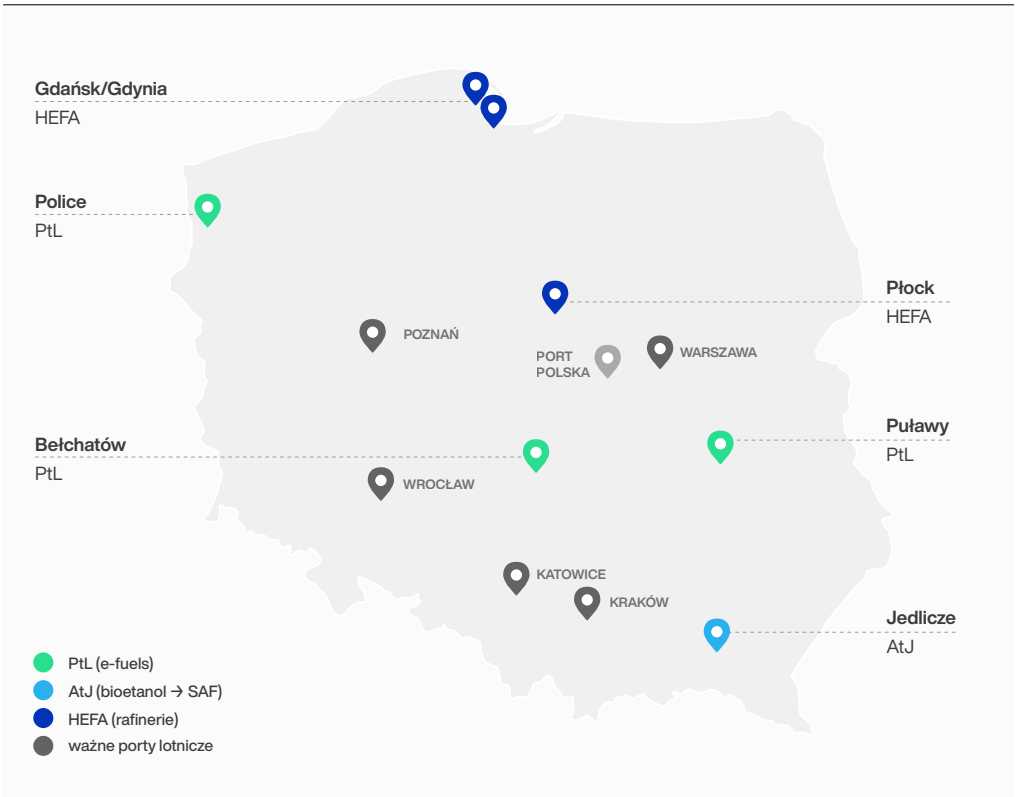
Tab. 8. Potencjał produkcji SAF w Polsce – możliwe lokalizacje

Lokalizacja	Technologia/potencjał	Potencjał surowcowy
Płock	HEFA	UCO, tłuszcze; wodór (ORLEN Hydrogen)
Jedlicze	AtJ (bioetanol 2G – SAF)	Bioetanol 2G (25 tys. t/rok); biomasa lignocelulozowa
Gdańsk / Gdynia	HEFA	UCO, oleje tropikalne, tłuszcze; import przez port
Police / Puławy	PtL (CO_2 i H_2)	CO_2: Puławy 3,4 mln t/rok, Police 1,5 mln t/rok; OZE
Bełchatów	PtL (CCU/CCS i H_2)	CO_2 33 mln t/rok; OZE, wodór
Śląsk	PtL (hutnictwo i H_2)	Źródła CO_2 (przemysł stalowy); wodór; OZE

113) Forum Energii, OZE w Bełchatowie Nowe perspektywy dla regionu

114) www.polenergia.pl

Rys. 17. Potencjał produkcji SAF w Polsce – możliwe lokalizacje



Porty lotnicze i Port Polska – integracja logistyki SAF

Porty lotnicze odgrywają kluczową rolę w budowie krajowego systemu dystrybucji zrównoważonych paliw lotniczych. Lotnisko Chopina w Warszawie, a w przyszłości Port Polska, mogą pełnić funkcję centralnych hubów blendowania i logistyki SAF w Polsce, obsługując zarówno ruch pasażerski, jak i cargo. Z kolei regionalne porty – Kraków-Balice, Katowice-Pyrzowice, Wrocław-Strachowice oraz Poznań-Ławica – mogą stać się pilotażowymi punktami wdrożeń SAF i testowania systemów ich dystrybucji.

Wdrożenie SAF w portach lotniczych wymaga integracji z istniejącą infrastrukturą paliwową, w tym z systemami hydrantowymi oraz terminalami cysternowymi, co umożliwi bezproblemowe włączanie paliwa do codziennych operacji lotniczych. Szczególne znaczenie ma tu Port Polska, który od początku projektowany jest z myślą o zgodności z przyszłymi wymogami dekarbonizacji lotnictwa i może pełnić funkcję krajowego hubu dystrybucyjnego SAF, wspierając rozwój całego rynku i obniżając koszty wdrożeń. Dzięki temu porty lotnicze staną się nie tylko miejscem konsumpcji paliwa, lecz także ważnym elementem łańcucha wartości SAF, łącząc produkcję, logistykę i końcowych użytkowników w sektorze lotniczym.

11. Rekomendacje dla branży i decydentów

Skuteczne rozwijanie rynku SAF w Polsce, wymaga działania w trzech horyzontach czasowych.

W krótkim okresie kluczowe są instrumenty finansowe i pilotaże na lotniskach, wspierane przez współpracę z nauką. W perspektywie średnioterminowej należy rozwijać infrastrukturę PtL i powiązać ją z OZE oraz logistyką lotniskową. W długim okresie celem powinno być skalowanie produkcji, pełna dekarbonizacja i budowa pozycji Polski jako regionalnego hubu SAF w Europie Środkowo-Wschodniej.

Krótkoterminowe (do 2027 r.)

- **Opracowanie zachęt finansowych** – ulgi podatkowe i dopłaty do produkcji SAF, na wzór mechanizmów projektu Clean Fuel Production Credit (USA).
- **Budowa systemu monitorowania surowców** – lepsza kontrola strumieni UCO, tłuszczów i biomasy, celem zabezpieczenia bazy surowców dla technologii HEFA i AtJ.
- **Wdrożenie pilotażowych projektów** mieszania komponentu SAF i Jet A-1 przy głównych lotniskach (Warszawa, Kraków, Katowice), z udziałem PLL LOT i przewoźników cargo.
- **Rozpoczęcie programów współpracy z nauką** – finansowanie prac w ramach konsorcjów przemysł–uczelnie wyższe w zakresie technologii AtJ, PtL i CCU.

Średnioterminowe (2027–2035)

- **Rozwój infrastruktury PtL** – inwestycje w zakłady produkujące e-SAF z CO_2 i zielonego wodoru w regionach o największych emisjach (Bełchatów, Puławy, Police, Śląsk).
- **Integracja z OZE i produkcją wodoru** – powiązanie instalacji SAF z farmami wiatrowymi (offshore Pomorze) i dużymi projektami PV (Lubelszczyzna, Wielkopolska).
- **Standaryzacja logistyki** – wdrożenie jednolitego systemu mieszania i raportowania SAF w portach lotniczych.
- **Budowa kompetencji kadrowych** – programy kształcenia inżynierów i techników w dziedzinie nowych paliw i wodoru – w szczególności z uczelniami wyższymi.

Długoterminowe (2035-2050)

- **Skalowanie produkcji** – osiągnięcie zdolności produkcyjnych pozwalających na zaspokojenie krajowego zapotrzebowania zgodnie z ReFuelEU (70% SAF w 2050 r.).
- **Pełna dekarbonizacja** – wykorzystanie wyłącznie CO_2 biogenicznego i DAC w produkcji e-SAF.
- **Eksport technologii i paliw** – rozwinięcie Polski jako regionalnego hubu w Europie Środkowo-Wschodniej.
- **Trwałe powiązania nauki i przemysłu** – wspólne centra badawczo-demonstracyjne dla nowych paliw lotniczych i technologii hybrydowych (SAF + wodór + elektryfikacja).

Tab. 9. Rekomendacje dla branży i decydentów w podziale na horyzonty czasowe

Horyzont czasowy	Priorytety dla branży	Priorytety dla decydentów	Rola nauki
Krótkoterminowe (do 2027)	Pilotaże SAF na lotniskach, zabezpieczenie surowców	Ulgi podatkowe, dopłaty	Konsorcja badawcze HEFA/AtJ
Średnioterminowe (2027-2035)	Infrastruktura PtL, integracja z OZE	Standardy mieszania, raportowanie	Badania nad DAC i CCU
Długoterminowe (2035-2050)	Skalowanie produkcji SAF	Regulacje dot. 70% SAF (ReFuelEU)	Centra demonstracyjne, nowe technologie

12. Podsumowanie – SAF jako element transformacji transportu lotniczego

Transformacja lotnictwa w kierunku neutralności klimatycznej jest jednym z największych wyzwań stojących przed sektorem transportu. Analizy pokazują, że jedynie szybkie wdrożenie zrównoważonych paliw lotniczych może znacząco ograniczyć wpływ branży na środowisko w perspektywie najbliższych dekad.

W publikowanych źródłach dotyczących wdrożenia mandatów SAF po raz pierwszy w 2025 r. wciąż brakuje informacji o egzekwowaniu dostarczania i stosowania tych paliw. Najnowsze oceny wskazują, że regulacja skutecznie stworzyła popyt na SAF i uruchomiła system monitorowania rynku, jednak ujawniła również istotne problemy strukturalne: ograniczoną podaż paliw, wysokie koszty produkcji, koncentrację rynku dostawców, zależność od importowanych surowców oraz brak komercyjnie dostępnych paliw syntetycznych (e-SAF). Z jednej strony raport techniczny EASA z 2025 r. informuje o realnej zdolności do tankowania 6% paliw zrównoważonych w 2030 r., z drugiej jednak w ubiegłym roku linie lotnicze zaczęły zgłaszać wątpliwości związane z dostępnością i niedoborami SAF na rynku z naciskiem na zbyt niewielką podaż. IATA wyraziła krytykę zbyt dalekosiężnych celów klimatycznych, podkreślając istotność integracji europejskiej i światowej w konsekwentnym wdrażaniu rozwiązań produkcji SAF. Obecne dane, pochodzące przede wszystkim z roku 2024 (nieobjętego jeszcze nowymi wymogami) i 2025, stanowią zatem punkt startowy do oceny skuteczności regulacji.[115-117]

115) Technical EASA – ReFuelEU Aviation Annual Technical Report 2026 (www.europa.easa.eu)

116) https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/iata-backs-call-by-european-airlines-soften-green-fuel-mandate-2025-03-27/

117) https://www.clecat.org/en/news/newsletters/easa-publishes-first-refueleu-aviation-annual-tech

Kluczowe wnioski

SAF to rozwiązanie dostępne tu i teraz – możliwe do stosowania w istniejącej flocie, pozwalające na zmniejszenie emisji w cyklu życia nawet o 80-90%.

Potrzeba rozwoju krajowej produkcji SAF w oparciu o współpracę przemysłu, nauki i administracji.

Koszty pozostają barierą – ceny SAF są dziś 2,5-3,5 razy wyższe od Jet A-1, co wymaga wsparcia mechanizmami rynkowymi i publicznymi.

Konieczność wspierania inwestycji i innowacji poprzez instrumenty finansowe.

Potencjał krajowy – Polska dysponuje znacznymi zasobami biomasy i punktowych źródeł CO_2, które mogą stać się podstawą dla krajowej produkcji SAF.

Budowanie świadomości społecznej i akceptacji to jeden z priorytetów – komunikowanie korzyści środowiskowych i gospodarczych płynących z wdrożenia SAF.

Skala wyzwań – porównanie emisji pokazuje, że samoloty emitują na pasażera wielokrotnie więcej NOX i cząstek stałych niż transport drogowy, co potwierdza pilną potrzebę zmian.


psnm
WE
DRIVE
NEW MOBILITY!
psnm.org