

PERSPEKTYWY DYWERSYFIKACJI KRAJOWEJ BAZY SUROWCÓW DLA SEKTORA BIOPALIW ZAAWANSOWANYCH ORAZ ZRÓWNOWAŻONYCH PALIW LOTNICZYCH (SAF)

ZUZANNA SAWINSKA¹, MARTYNA KOTECKA¹, PATRYK BARTECZKA¹,
DANUTA KURASIAK-POPOWSKA², TOMASZ PIECHOTA¹

¹Katedra Agronomii, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Dojazd 11, 60-632 Poznań

²Katedra Genetyki i Hodowli Roślin, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu,
ul. Dojazd 11, 60-632 Poznań

Synopsis. W obliczu zaostrzających się regulacji unijnego pakietu „Fit for 55” (w tym dyrektywy RED III oraz rozporządzenia ReFuelEU Aviation) europejski i krajowy sektor rafineryjny stoi przed koniecznością gwałtownego zwiększenia produkcji biopaliw zaawansowanych oraz zrównoważonych paliw lotniczych (SAF) [ReFuelEU Aviation]. Dotychczasowy lider rynku rzepak, jako surowiec pierwszej generacji, napotyka bariery natury regulacyjnej (konkurencja o grunty z produkcją żywności) oraz klimatycznej (powtarzające się susze). Niniejszy artykuł stanowi kompleksowy przegląd literaturowy oceniający potencjał agrotechniczny, fizykochemiczny i rynkowy alternatywnych roślin oleistych: lnianki siewnej (*Camelina sativa*), gorczycy białej (*Sinapis alba*) oraz lnu zwyczajnego (*Linum usitatissimum*), w bezpośrednim porównaniu do rzepaku (*Brassica napus*). W pracy przeanalizowano profile kwasów tłuszczowych badanych olejów pod kątem ich przydatności do procesów HVO (hydrotrefinacji) i HEFA (syntezy SAF). Szczególną uwagę poświęcono zrównoważonemu modelowi uprawy lnianki siewnej i gorczycy białej jako roślin energetycznych o niskim śladzie węglowym, co wpisuje się w ramy certyfikacji ISCC. Synteza dostępnych danych wskazuje, że dalszy rozwój rynku biopaliw w Polsce będzie wymagał odejścia od dominacji rzepaku na rzecz bardziej zróżnicowanej struktury upraw. Wdrożenie niszowych roślin oleistych do krajowej struktury zasiewów, wsparte kontraktacją ze strony koncernów paliwowych, stanowi klucz do dekarbonizacji transportu przy jednoczesnym zachowaniu bezpieczeństwa żywnościowego.

Słowa kluczowe: biopaliwa zaawansowane, SAF, lnianka siewna, rzepak, gorczyca biała, len zwyczajny, RED III

WSTĘP

Sektor lotniczy od dwóch dekad należy do najszybciej rozwijających się gałęzi globalnej gospodarki. Rosnąca mobilność społeczeństw, intensyfikacja handlu międzynarodowego oraz zwiększająca się dostępność transportu lotniczego powodują systematyczny wzrost liczby pasażerów i wolumenu przewozów powietrznych [Champecharoensuk i in. 2024]. Jednocześnie lotnictwo odpowiada za znaczącą część antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych, co stanowi istotne wyzwanie w kontekście nasilających się skutków zmiany klimatu [Richie 2024]. Ekstremalne zjawiska pogodowe, susze, utrata bioróżnorodności oraz wzrost poziomu mórz wzmacniają presję na dekarbonizację sektora, a literatura wskazuje, że działania redukcyjne muszą obejmować zarówno technologie, jak i systemy energetyczne [Bag i in. 2025].

W odpowiedzi na te wyzwania Unia Europejska przyjęła pakiet legislacyjny „Fit for 55” [Regulation (EU) 2023/2405], w którym kluczową rolę odgrywają Dyrektywa UE 2023/2413

¹Adres do korespondencji – *Corresponding address*: martysia99231@wp.pl

RED III (*Renewable Energy Directive*) oraz Rozporządzenie UE 2023/2405 ReFuelEU Aviation. RED III zaostrza kryteria zrównoważonego rozwoju surowców oraz podnosi minimalny udział energii odnawialnej w transporcie, natomiast ReFuelEU Aviation wprowadza obowiązek stopniowego zwiększania udziału zrównoważonych paliw lotniczych (SAF – *Sustainable Aviation Fuel*) w paliwach stosowanych w lotnictwie cywilnym. Zrównoważone paliwa lotnicze (SAF) to paliwa o obniżonej intensywności węglowej, produkowane z biomasy, odpadów lub surowców syntetycznych, stanowiące kluczowy element dekarbonizacji lotnictwa. Zgodnie z rozporządzeniem udział SAF w 2025 roku wynosił 2%, natomiast w kolejnych latach ma wynosić 6% w 2030 roku, 20% w 2035 roku, 34% w 2040 roku, 42% w 2045 roku oraz 70% w 2050 roku. Jest to najbardziej ambitny program wdrażania paliw niskoemisyjnych w historii europejskiej polityki transportowej.

W Polsce równolegle funkcjonują krajowe regulacje dotyczące biokomponentów i biopaliw ciekłych, określone w ustawie z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych [Dz.U.2025.901]. Ustawa ta, koncentrująca się na biopaliwach stosowanych w transporcie drogowym, przez lata wspierała rozwój krajowej produkcji biopaliw pierwszej generacji, utrwalając pozycję rzepaku jako dominującego surowca oleistego w sektorze paliwowym. Wprowadzenie regulacji RED III i ReFuelEU Aviation wskazuje jednak na konieczność rozszerzenia krajowych ram prawnych oraz dywersyfikacji bazy surowcowej, ponieważ dotychczasowe instrumenty krajowe nie obejmują zrównoważonych paliw lotniczych i nie odpowiadają na rosnące zapotrzebowanie na surowce o niskiej intensywności węglowej.

Literatura naukowa podkreśla, że obecne moce produkcyjne SAF są niewystarczające, aby sprostać wymaganiom regulacyjnym. Analizy wskazują, że nawet przy pełnym wykorzystaniu dostępnych technologii, takich jak HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), FT (*Fischer-Tropsch synthesis*), lignin-to-jet czy power-to-liquid, Europa nie dysponuje odpowiednią bazą surowcową do zapewnienia ciągłości dostaw paliwa lotniczego [Lau i in. 2024, Lv i in. 2025]. Wysokie koszty produkcji oraz zależność wdrożeń od poziomu rozwoju gospodarczego i stabilności systemu energetycznego stanowią dodatkowe bariery [Xu i in. 2025, Wan i in. 2025]. Badania dotyczące odporności systemów energetycznych wskazują, że dywersyfikacja bazy surowcowej jest kluczowa dla redukcji ryzyka związanego z wstrząsami zewnętrznymi, takimi jak pandemia COVID-19 czy kryzysy geopolityczne [Shafiei i in. 2025].

Dekarbonizacja lotnictwa nie może opierać się wyłącznie na poprawie efektywności samolotów czy zmianach operacyjnych, ponieważ potencjał dalszych redukcji emisji w tych obszarach jest ograniczony [Kirmizi i in. 2024]. Z tego względu kluczową rolę odgrywa rozwój paliw alternatywnych, w tym SAF produkowanych z biomasy, odpadów oraz surowców rolniczych. Wybór surowców o niskiej intensywności węglowej jest jednym z najważniejszych czynników determinujących środowiskową i ekonomiczną opłacalność paliw lotniczych [Lau i in. 2024, Lv i in. 2025].

Na tym tle szczególnego znaczenia nabiera dyskusja o roli roślin oleistych w krajowych systemach produkcji biopaliw. Rzepak (*Brassica napus*) od lat pozostaje jednym z najważniejszych surowców oleistych w Europie, jednak jego dalsza ekspansja napotyka bariery związane z polityką „żywność vs. paliwo”, ograniczeniami glebowymi oraz rosnącą zmiennością plonowania w warunkach nasilających się zjawisk ekstremalnych [Okunevičiūtė Neverauskienė i in. 2025]. Historyczne analizy wskazywały, że rzepak ozimy był jedynym surowcem zdolnym pokryć krajowe zapotrzebowanie na biokomponenty paliwowe, co utrwaliło jego dominację w strukturze upraw [Budzyński i Bielski 2004]. W literaturze coraz częściej wskazuje się, że przyszłość rynku biopaliw i SAF będzie zależeć od włączenia do płodozmianu roślin oleistych o niższych wymaganiach glebowych, krótszej wegetacji oraz korzystnym profilu oleju dla procesów hydroprzetwarzania, takich jak lniańka siewna (*Camelina sativa*), gorczyca biała (*Sinapis alba*) czy len (*Linum usitatissimum*) [Lau i in. 2024, Lv i in. 2025].

Celem niniejszej pracy jest krytyczny przegląd literatury dotyczącej roślin oleistych jako surowców dla biopaliw zaawansowanych i zrównoważonych paliw lotniczych, ze szczególnym uwzględnieniem ich potencjału agrotechnicznego, właściwości fizykochemicznych olejów, przydatności do procesów HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*) i HEFA oraz zgodności z kryteriami zrównoważonego rozwoju. Analiza opiera się na aktualnych badaniach dotyczących potencjału agrotechnicznego roślin oleistych, ich zdolności adaptacyjnych do zmiennych warunków środowiskowych oraz możliwości włączenia ich do płodozmianów jako surowców dla biopaliw zaawansowanych i zrównoważonych paliw lotniczych [Cui i Jia 2024, Lau i in. 2024, Wan i in. 2025]. Praca stanowi próbę odpowiedzi na pytanie, w jaki sposób dywersyfikacja krajowej bazy surowców oleistych może zwiększyć bezpieczeństwo surowcowe sektora biopaliw oraz przyczynić się do realizacji celów klimatycznych w transporcie, w szczególności w lotnictwie.

RAMY PRAWNO-EKONOMICZNE RYNKU BIOPALIW

Europejski rynek biopaliw wchodzi w okres głębokiej transformacji, której kierunek wyznaczają regulacje klimatyczne Unii Europejskiej oraz globalne zobowiązania dotyczące redukcji emisji gazów cieplarnianych. W ostatnich latach przyjęto szereg aktów prawnych, które w sposób bezprecedensowy zastrzegają wymagania wobec sektora paliwowego, zarówno w transporcie drogowym, jak i lotniczym. Centralne znaczenie mają tu dyrektywa RED III oraz rozporządzenie ReFuelEU Aviation, które wspólnie tworzą ramy prawne wymuszające rozwój biopaliw zaawansowanych oraz zrównoważonych paliw lotniczych [Ovaere i Proost 2022]. Kierunek tych zmian jest spójny z analizami dotyczącymi roli odnawialnych źródeł energii w gospodarce UE [Okunevičiūtė Neverauskienė i in. 2025].

RED III podnosi cel udziału energii odnawialnej w transporcie do poziomu 29% w 2030 r. i wprowadza bardziej restrykcyjne kryteria zrównoważonego rozwoju surowców, obejmujące m.in. ograniczenie emisji GHG w całym cyklu życia, ochronę gleb oraz zakaz pozyskiwania surowców z terenów o wysokiej bioróżnorodności [Directive (EU) 2023/2413]. Dyrektywa jednoznacznie wskazuje, że rozwój biopaliw pierwszej generacji, w tym estrów metylowych kwasów tłuszczowych z rzepaku, nie może stanowić głównego kierunku transformacji energetycznej, ponieważ surowce te konkurują z produkcją żywności i charakteryzują się wyższą intensywnością węglową. W pierwszej dekadzie XXI wieku polityka biopaliwowa UE [Directive 2003/30/EC] koncentrowała się na rzepaku jako podstawowym surowcu energetycznym, co potwierdzają Budzyński i Bielski [2004]. Dopiero regulacje RED II/RED III przesunęły akcent na surowce o niższej intensywności węglowej.

Badania dowodzą, że rośliny oleiste II generacji mogą osiągać znacznie niższy ślad węglowy niż rzepak, co czyni je atrakcyjnymi dla sektora paliwowego [Searle i Malins 2016]. W literaturze podkreśla się, że przejście na surowce o niskiej intensywności węglowej jest kluczowym warunkiem osiągnięcia celów klimatycznych UE [Lau i in. 2024, Lv i in. 2025].

Jeszcze większe znaczenie dla rynku paliw ma rozporządzenie ReFuelEU Aviation, które ustanawia obowiązkowe poziomy udziału SAF w paliwach stosowanych przez przewoźników lotniczych: % w 2030 r., 20% w 2035 r. i 70% w 2050 r. Badania naukowe podkreślają, że jest to najbardziej ambitny cel redukcji emisji w historii europejskiego lotnictwa [Aksoy i in. 2025, Bardon i in. 2025]. Aby osiągnąć te cele, europejski sektor paliw lotniczych musi zwiększyć produkcję SAF ponad trzydziestokrotnie w ciągu najbliższej dekady, co wymaga zarówno rozbudowy infrastruktury produkcyjnej, jak i zabezpieczenia dostaw surowców o niskiej intensywności węglowej [Lau i in. 2024, Lv i in. 2025]. Obecna produkcja SAF pokrywa jedynie ułamek zapotrzebowania sektora lotniczego, a dostępność surowców stanowi główne ograniczenie rozwoju rynku biopaliw [Igielski 2023, Watson i in. 2024].

Wymogi redukcji emisji oraz rosnące zapotrzebowanie na surowce o niskiej intensywności węglowej powodują, że koncerny paliwowe intensyfikują działania w zakresie pozyskiwania surowców rolniczych do produkcji biopaliw. Dostępność olejów odpadowych i pozostałości jest ograniczona, a ich ceny rosną wraz z globalnym popytem na biopaliwa, co potwierdzają analizy rynku SAF [EASA 2025, Watson i in. 2024]. W efekcie koncerny takie jak BP, TotalEnergies, Shell czy ORLEN rozwijają programy kontraktacji rolniczej, np. obejmujące wsparcie agrotechniczne.

Przykładem jest strategiczne partnerstwo BP z firmą Bayer, którego celem jest rozwój odmian roślin oleistych dedykowanych do produkcji biopaliw oraz współpraca Orlenu z Uniwersytetem Przyrodniczym w Poznaniu dotyczący uprawy lnianki siewnej jako surowca do produkcji HVO. Badania wskazują, że inwestycje w rolnictwo stanowią dla koncernów paliwowych sposób na zabezpieczenie dostaw surowców, obniżenie ryzyka cenowego oraz spełnienie wymogów regulacyjnych dotyczących redukcji emisji [Wei i in. 2025, Zubi i in. 2025]. W literaturze podkreśla się, że feedstock security staje się kluczowym elementem strategii koncernów paliwowych, które traktują surowce rolnicze jako strategiczny zasób, podobnie jak gaz czy ropę [Bag i in. 2025, Wan i in. 2025, Watson i in. 2024].

Istotnym elementem ram prawno-ekonomicznym rynku biopaliw jest system certyfikacji zrównoważonego rozwoju, w tym przede wszystkim ISCC (*International Sustainability and Carbon Certification*). Certyfikacja ISCC wymaga spełnienia rygorystycznych kryteriów środowiskowych, obejmujących m.in. ograniczenie emisji gazów cieplarnianych w całym cyklu życia, ochronę gleb i zasobów wodnych oraz zakaz pozyskiwania surowców z terenów o wysokiej bioróżnorodności. System ten wymaga także pełnej identyfikowalności surowca, od pola do rafinerii, co jest kluczowe dla wdrożenia ReFuelEU Aviation [Lau i in. 2024].

Rośliny takie jak lnianka siewna czy gorczyca biała, wykorzystywane zarówno w uprawie głównej, jak i w systemach regeneracyjnych np. jako poplony lub międzyplony poprawiające strukturę gleby często charakteryzują się bardzo niską intensywnością węglową. W przypadku upraw poplonowych dotyczy to produkcji biomasy, nie nasion, jednak efekt środowiskowy pozostaje kluczowy. Dzięki temu gatunki te spełniają najbardziej restrykcyjne kryteria ISCC i uzyskują wysokie współczynniki redukcji emisji [Bazienė i Gargasas 2023, Searle i Malins 2016]. W literaturze podkreśla się, że certyfikacja zrównoważonego rozwoju staje się nie tylko wymogiem prawnym, lecz także narzędziem budowania przewagi konkurencyjnej na rynku paliw, ponieważ umożliwia koncernom wykazanie zgodności z regulacjami oraz minimalizację ryzyka reputacyjnego [Watson i in. 2024].

CHARAKTERYSTYKA PORÓWNAWCZA SUROWCÓW

W warunkach rosnącego zapotrzebowania na surowce do produkcji biopaliw zaawansowanych oraz paliw lotniczych SAF coraz większego znaczenia nabiera dywersyfikacja krajowej bazy roślin oleistych. W literaturze naukowej podkreśla się, że skuteczna transformacja energetyczna nie może opierać się na uprawie wyłącznie jednego gatunku, lecz wymaga mozaiki roślin o zróżnicowanych wymaganiach glebowych, odmiennym profilu plonowania i niższej intensywności węglowej. [Bełdycka-Bórawska i in. 2021, Watson i in. 2024]. Wskazuje się, że przyszłość krajowej produkcji biopaliw zależeć będzie od umiejętnego łączenia gatunków wysoko plonujących z roślinami pełniącymi funkcje regeneracyjne, fitosanitarne i środowiskowe, co jest zgodne z kierunkiem wyznaczanym przez regulacje RED III i ReFuelEU Aviation [Lau i in. 2024, Lv i in. 2025].

Rzepak ozimy pozostaje dominującym surowcem oleistym w Polsce i jednym z filarów europejskiego rynku biopaliw. Jego znaczenie wynika z wysokiej produkcji oleju oraz rozwiniętej

Tabela 1. Porównanie właściwości agronomicznych i technologicznych wybranych roślin oleistych w kontekście produkcji biopaliw zaawansowanych (HEFA/FAME)

Table 1. Comparative agronomic and technological characteristics of selected oilseed crops for advanced biofuel production (HEFA/FAME)

Cecha Feature	Rzepak Rapeseed (<i>Brassica napus</i>)	Lnianka Camelina (<i>Camelina sativa</i>)	Gorczyca biała White mustard (<i>Sinapis alba</i>)	Len/Flax (<i>Linum usitatissimum</i>)
Wymagania glebowe Soil requirements	Wysokie High	Niskie Low	Niskie Low	Średnie Medium
Wymagania wodne Water requirements	Wysokie High	Bardzo niskie Very low	Niskie Low	Średnie Medium
Odporność na suszę Drought tolerance	Niska Low	Bardzo wysoka Very high	Wysoka High	Średnia Medium
Okres wegetacji Vegetation period	Długi Long	Krótki Short	Krótki Short	Średni Medium
Plon nasion/Seed yield (t·ha ⁻¹)	3,0–4,5	1,0–2,0	1,5–2,5	1,5–2,5
Zawartość oleju w nasionach Oil content in seeds (%)	40–45	38–47	28–32	35–40
Profil kwasów tłuszczowych Fatty acid profile	Wysoki oleinowy High oleic	Wysoki linolenowy High linolenic	Umiarkowany oleinowy Moderate oleic	Bardzo wysoki linolenowy Very high linolenic
Stabilność plonowania Yield stability	Wysoka w dobrych warunkach High under good conditions	Średnia Medium	Wysoka High	Średnia Medium
Główna zaleta Main advantage	Ogromny, stabilny rynek Large, stable market	Niski ślad węglowy, słabe gleby, odporność na suszę / Low carbon footprint, poor soils, drought tolerance	Odporność na okresowe susze Tolerance to periodic droughts	Podwójne zastosowanie (włókno/olej) Dual use (fiber/oil)
Główna wada Main disadvantage	Wrażliwość na suszę / Sensitivity to drought	Niższy plon Lower yield	Niższa wydajność olejowa Lower oil yield	Wyższy koszt surowca / Higher raw material cost
Potencjał dla/Potential for SAF (HEFA)	Średni Medium	Bardzo wysoki Very high	Wysoki High	Niski/średni Low/medium
Zgodność z praktykami regeneracyjnymi Compatibility with regenerative practices	Średnia Medium	Bardzo wysoka Very high	Wysoka High	Średnia Medium
Możliwość uprawy na glebach zdegradowanych/ Suitability for cultivation on degraded soils	Niska Low	Wysoka High	Wysoka High	Średnia Medium
Ryzyko konkurencji z żywnością/Risk of competition with food	Wysokie High	Bardzo niskie Very low	Niskie Low	Niskie Low

Źródło: opracowanie własne na podstawie/Source: own elaboration based on: Berti i in. [2016], Blume i in. [2020], Kowalska i in. [2026], Nowakowski i in. [2014], Tańska M. i in. [2013], Truszkowska i Waszkowiak [2023]

infrastruktury przetwórczej, co potwierdzają Kowalska i in. [2026], wskazując, że Polska jest jednym z topowych producentów oleju rzepakowego w UE. Jednocześnie rzepak jest gatunkiem o bardzo wysokich wymaganiach glebowych i klimatycznych. Preferuje stanowiska żyzne, o dobrej strukturze i wysokiej pojemności wodnej, a jego plonowanie jest silnie uzależnione od przebiegu pogody. Susze jesienne i wiosenne, długotrwałe mrozy bez okrywy śnieżnej oraz presja agrofagów znacząco ograniczają stabilność produkcji [Kowalska i in. 2026, Mrówczyński i in. 2009]. Wysokie wymagania pokarmowe i wrażliwość na błędy agrotechniczne sprawiają, że rzepak jest rośliną kosztowną w prowadzeniu, a jego ślad środowiskowy jest wyższy niż w przypadku gatunków alternatywnych. Choć olej rzepakowy jest szeroko wykorzystywany w produkcji FAME (*Fatty Acid Methyl Esters*), jego znaczenie w kontekście paliw lotniczych SAF jest ograniczone ze względu na konkurencję z sektorem spożywczym oraz wysoką intensywność węglową uprawy [Watson i in. 2024].

Na tle rzepaku szczególnie wyróżnia się Lnianka siewna, która w ostatnich latach została uznana za jeden z najbardziej perspektywicznych surowców dla biopaliw zaawansowanych. Walter i in. [2025] wskazują, że Lnianka stanowi obiecującą alternatywę dla oleju rzepakowego, przede wszystkim dzięki znacznie wyższej odporności na niekorzystne warunki glebowe i klimatyczne. Lnianka siewna może być uprawiana na glebach słabszych, marginalnych i niekonkurujących z produkcją żywności, co jest kluczowe w świetle wymogów RED III. Wyróżnia się bardzo niskimi wymaganiami wodnymi [Jęczmionek 2010]. Olej z nasion Lnianki siewnej charakteryzuje się korzystnym profilem kwasów tłuszczowych, wysoką liczbą jodową i dobrą odpornością na utlenianie [Kołodziejczyk i in. 2012], co czyni go doskonałym surowcem do produkcji FAME, FAEE (*Fatty Acid Ethyl Esters*) oraz paliw HVO i HEFA-SAF. Lnianka siewna pełni również funkcje regeneracyjne – poprawia strukturę gleby, ogranicza patogeny dzięki biofumigacji [Neupane i in. 2022] i zwiększa bioróżnorodność płodozmianu. W świetle kryteriów RED III i ISCC jest obecnie jednym z najbardziej obiecujących gatunków oleistych dla polskiego sektora biopaliw. W literaturze podkreśla się również, że Lnianka siewna posiada znaczący potencjał nie tylko jako roślina energetyczna, lecz także jako gatunek o rosnącym znaczeniu gospodarczym. Kurasiak-Popowska [2019] zwraca uwagę, że Lnianka siewna, mimo historycznego charakteru uprawy, ponownie zyskuje na znaczeniu dzięki wysokiej odporności na stresy środowiskowe oraz możliwościom wykorzystania jej w nowoczesnych systemach rolnictwa niskoemisyjnego. Autorka wskazuje, że zarówno forma jara, jak i ozima mogą być efektywnie włączane do płodozmianów, szczególnie w stanowiskach o ograniczonej żyzności, co wzmacnia argumenty dotyczące jej przydatności w produkcji surowców dla biopaliw zaawansowanych. Istotny wkład w ocenę wartości technologicznej Lnianki siewnej wnosi także praca Kurasiak-Popowskiej i in. [2020], w której wykazano, że nasiona formy ozimej mogą stanowić surowiec do produkcji oleju prawie całkowicie pozbawiony kwasu erukowego. Wynik ten ma szczególne znaczenie dla przemysłu biopaliwowego, ponieważ oleje o niskiej zawartości kwasów o długich łańcuchach węglowych charakteryzują się lepszą stabilnością oksydacyjną oraz wyższą jakością w procesach hydrotorafinacji prowadzących do paliw HVO i HEFA-SAF. Badania te potwierdzają, że Lnianka siewna, zwłaszcza w formie ozimej, może być traktowana jako pełnowartościowy, nowoczesny surowiec oleisty o szerokim spektrum zastosowań energetycznych i przemysłowych.

Gorczyca biała stanowi kolejny gatunek o wysokiej odporności środowiskowej i dużym potencjale wdrożeniowym. W przeciwieństwie do rzepaku, którego plonowanie silnie zależy od jakości stanowiska, gorczyca dobrze rośnie na glebach słabszych i wykazuje wysoką tolerancję na okresowe niedobory wody. Badania Nowakowskiego i in. [2014] wykazały, że gorczyca biała w uprawie międzyplonowej generuje wysoką produkcję biomasy, a w uprawie głównej charakteryzuje się stabilnym plonowaniem nasion, nawet na stanowiskach o słabszej jakości gleb. Olej gorzycowy charakteryzuje się wysoką stabilnością oksydacyjną i korzystnym

profilem kwasów tłuszczowych, co sprzyja jego wykorzystaniu w procesach HEFA/HVO oraz produkcji paliw lotniczych SAF [Tańska i in. 2013]. Gorczyca biała pełni również funkcje fitosanitarne; jej szybki wzrost zagłusza chwasty, a związki allelopatyczne ograniczają rozwój patogenów glebowych. W płodozmianach poprawia strukturę gleby i zwiększa zawartość materii organicznej, co czyni ją rośliną szczególnie wartościową w systemach rolnictwa regeneracyjnego [Nowakowski i in. 2014].

Len zwyczajny, choć tradycyjnie kojarzony z przemysłem włókienniczym, posiada istotny potencjał w kontekście biopaliw dzięki możliwości kaskadowego wykorzystania biomasy. Jak podkreślają Popis i in. [2015], len zwyczajny jest jedną z najstarszych roślin uprawnych, a jego współczesna wartość wynika z możliwości pozyskiwania oleju lnianego o wysokiej zawartości nienasyconych kwasów tłuszczowych oraz biomasy przydatnej w konwersji na paliwa ciekłe. Forma oleista charakteryzuje się niższymi wymaganiami glebowymi niż forma włóknista [Truszkowska i Waszkowiak 2023], co umożliwia jej uprawę w stanowiskach średnich i słabszych. Olej lniany, dzięki wysokiej zawartości kwasu α -linolenowego, jest podatny na konwersję do FAME i FAEE, a w procesach hydorafinacji stanowi wartościowy surowiec do paliw HVO. Wytloki lniane, bogate w lignocelulozę, białko i błonnik [Heller 2012], mogą być wykorzystywane do produkcji bioetanolu drugiej generacji, biopolimerów i biokompozytów [Petraru i Amariei 2020]. Len wpisuje się w model gospodarki o obiegu zamkniętym, umożliwiając pełne zagospodarowanie biomasy – od oleju, przez makuch, po słomę.

Analiza czterech gatunków wskazuje jednoznacznie, że przyszłość krajowej produkcji biopaliw nie może opierać się na jednym gatunku. Wysokie wymagania glebowe rzepaku, wrażliwość na suszę i rosnąca presja agrofagów ograniczają jego stabilność plonowania, zwłaszcza w stanowiskach słabszych. Lnianka siewna wyróżnia się najwyższą odpornością na stresy środowiskowe, najniższą intensywnością węglową i największą zgodnością z wymogami RED III, co czyni ją najbardziej perspektywnym surowcem dla paliw HVO i SAF. Gorczyca biała zapewnia wyjątkową odporność na suszę i wysoką efektywność energetyczną, a jej właściwości fitosanitarne wzmacniają zdrowotność płodozmianów. Len zwyczajny umożliwia kaskadowe wykorzystanie biomasy, co zwiększa jego znaczenie w lokalnych systemach bioenergetycznych. Zróżnicowana mozaika upraw roślin oleistych, obejmująca rzepak, lniankę siewną, gorczycę białą i len zwyczajny, stanowi konieczny kierunek rozwoju krajowej bazy surowcowej, zapewniając odporność na zmiany klimatu, stabilność dostaw i zgodność z europejskimi regulacjami dotyczącymi biopaliw zaawansowanych.

PERPSEKTYWY I WYZWANIA WDROŻENIOWE

Wdrażanie nowych surowców oleistych do produkcji biopaliw zaawansowanych oraz paliw lotniczych SAF odbywa się w warunkach głębokiej przebudowy europejskiego systemu energetycznego, w którym rośnie znaczenie bezpieczeństwa dostaw, odporności klimatycznej oraz zgodności z regulacjami UE. W literaturze podkreśla się, że proces ten wymaga nie tylko zmian technologicznych, lecz przede wszystkim dostosowania infrastruktury, modeli kontraktacji oraz struktur instytucjonalnych, które przez lata były projektowane niemal wyłącznie pod rzepak, dominujący w strukturze upraw od dwóch dekad [Ovaere i Proost 2022, Sgouridis i in. 2022]. Wyzwania wdrożeniowe obejmują przede wszystkim logistykę i organizację łańcucha dostaw, opłacalność produkcji rolnej oraz odporność surowców na postępujące zmiany klimatyczne, które w coraz większym stopniu determinują stabilność produkcji roślin oleistych w Europie Środkowej.

Największym wyzwaniem jest logistyka i organizacja łańcucha dostaw. Cała infrastruktura skupu, magazynowania i transportu surowców oleistych została zaprojektowana pod rzepak, którego właściwości fizyczne, gęstość nasypowa i stabilność przechowywania są dobrze znane i od lat stanowią podstawę projektowania linii technologicznych [Bełdycka-Bórawska i in. 2021]. W analizach dotyczących wdrażania paliw lotniczych SAF podkreśla się, że brak kompatybilnej infrastruktury jest jedną z głównych barier rozwoju nowych surowców, podobnie jak w przypadku wdrażania paliw alternatywnych w lotnictwie, gdzie ograniczenia logistyczne wpływają na tempo dekarbonizacji sektora [Aksoy i in. 2025, Bardon i in. 2025]. Z tego powodu koncerny paliwowe intensyfikują działania w zakresie kontraktacji rolniczej, traktując surowce rolnicze jako strategiczny element bezpieczeństwa dostaw, analogicznie do mechanizmów stosowanych w sektorze lotniczym w ramach ReFuelEU Aviation [EASA 2025, Watson i in. 2024].

Drugim kluczowym wyzwaniem jest opłacalność produkcji rolnej. Rzepak pozostaje rośliną o wysokiej wartości rynkowej, co czyni go atrakcyjnym ekonomicznie i stabilnym elementem płodozmianu. Wprowadzenie lnianki siewnej czy gorczycy białej wymaga stworzenia mechanizmów finansowych, które zrekompensują rolnikom niższy plon nasion w porównaniu z rzepakiem. W literaturze dotyczącej wdrażania SAF wskazuje się, że skuteczność polityki zależy od struktury zachęt ekonomicznych, które muszą równoważyć wyższe koszty paliw alternatywnych oraz ryzyko związane z ich produkcją [Lau i in. 2024, Watson i in. 2024]. Analogicznie w rolnictwie, dopłaty koncernów paliwowych, kontrakty terminowe oraz premie za niską intensywność węglową stają się kluczowym narzędziem umożliwiającym przejście od uprawy wyłącznie rzepaku do zdyspersyfikowanej struktury upraw dostosowanej do wymogów zrównoważonego rozwoju. Badania wskazują, że inwestycje w rolnictwo stanowią dla koncernów sposób na zabezpieczenie dostaw surowców oraz spełnienie wymogów regulacyjnych dotyczących redukcji emisji, podobnie jak w przypadku inwestycji w technologie SAF [Wei i in. 2025, Zubi i in. 2025].

Wysoka cena SAF pozostaje jednym z głównych czynników ograniczających jego wdrożenie. W 2023 r. średnia cena konwencjonalnego paliwa lotniczego wynosiła około 816 euro za tonę, podczas gdy SAF produkowany z surowców wymienionych w załączniku IX części B dyrektywy RED osiągał średnio 2768 euro za tonę [EASA 2025]. Różnica ta dodatkowo zwiększa presję na rozwój mechanizmów wsparcia oraz dywersyfikację bazy surowcowej, co potwierdzają analizy dotyczące kosztów wdrożeń paliw alternatywnych w lotnictwie [Lau i in. 2024, Watson i in. 2024]. W literaturze podkreśla się, że koszty wdrożeń są jednym z najważniejszych czynników ograniczających tempo dekarbonizacji sektora, a ich struktura w dużej mierze determinuje wybór technologii oraz surowców [Bardon i in. 2025].

Najbardziej fundamentalnym wyzwaniem wdrożeniowym są jednak zmiany klimatyczne. W Europie Środkowej obserwuje się systematyczny spadek dostępności wody, skracanie okresów wilgotnych oraz wydłużanie okresów suszy, co bezpośrednio wpływa na stabilność plonowania roślin oleistych. Rzepak jest gatunkiem szczególnie wrażliwym na deficyt wody, co potwierdzają liczne analizy dotyczące rosnącej presji klimatycznej na produkcję rolną [Kowalska i in. 2026, Łabędzki i Kanecka-Geszke 2015, Mrówczyński i in. 2009]. W przeciwieństwie do niego lnianka wykazuje najwyższą odporność na stres wodny spośród analizowanych gatunków, co potwierdzają badania dotyczące jej niskich wymagań wodnych oraz zdolności wzrostu na glebach słabszych [Jęczmionek 2010, Karlsson Potter i in. 2023, Neupane i in. 2022]. Gorczyca biała, dzięki głębokiemu systemowi korzeniowemu, również dobrze radzi sobie w warunkach suszy, co potwierdzają doświadczenia polowe Nowakowskiego i in. [2014]. Len zwyczajny, choć umiarkowanie odporny na niedobory wody, nie dorównuje lniance pod względem stabilności plonowania w latach suchych, co potwierdzają analizy dotyczące jego użytkowania i właściwości przemysłowych [Truszkowska i Waszkowiak 2023]. W literaturze dotyczącej transformacji energetycznej podkreśla się, że odporność na stres klimatyczny staje się jednym z kluczowych

kryteriów wyboru surowców dla biopaliw, podobnie jak w przypadku oceny technologii SAF, gdzie stabilność produkcji surowców jest warunkiem bezpieczeństwa dostaw [Bardon i in. 2025, Wang i in. 2024].

PODSUMOWANIE

Analiza czterech gatunków roślin oleistych wskazuje jednoznacznie, że przyszłość krajowego i europejskiego rynku biopaliw nie może opierać się na wyłącznie na uprawie jednego gatunku. W świetle aktualnych badań agronomicznych, środowiskowych i technologicznych najbardziej perspektywicznym kierunkiem jest stopniowe przechodzenie od jednorodnych systemów upraw do zróżnicowanej mozaiki gatunków, które różnią się wymaganiami glebowymi, odpornością na stresy abiotyczne oraz przydatnością technologiczną w procesach HEFA i FAME. Rzepak pozostaje ważnym surowcem, jednak jego wrażliwość na suszę oraz wysokie wymagania siedliskowe ograniczają możliwości dalszej ekspansji w warunkach postępujących zmian klimatycznych.

W przeciwieństwie do rzepaku lnianka siewna oraz gorczyca biała wykazują wysoką odporność na deficyt wody, co czyni je szczególnie wartościowymi w regionach Europy Środkowej, gdzie narastają problemy z dostępnością wody i degradacją gleb. Lnianka siewna, dzięki krótkiemu okresowi wegetacji, możliwości uprawy w stanowiskach marginalnych oraz wyjątkowo niskiej intensywności węglowej, stanowi surowiec szczególnie istotny w kontekście wymogów ReFuelEU Aviation. Gorczyca biała, mimo umiarkowanej wydajności olejowej, wyróżnia się stabilnością plonowania w warunkach stresu wodnego oraz korzystnym profilem kwasów tłuszczowych dla procesów HEFA, co czyni ją wartościowym uzupełnieniem zróżnicowanej bazy surowcowej. Len zwyczajny, choć mniej odporny na suszę, pozostaje ważnym gatunkiem wspierającym dywersyfikację produkcji oraz rozwój krajowego rynku olejów roślinnych. Dalsze wykorzystanie potencjału lnianki siewnej, gorzycy białej i lnu zwyczajnego wymaga również intensyfikacji prac hodowlanych nad odmianami dedykowanymi produkcji biopaliw, ukierunkowanych na zwiększenie plonowania i zawartości oleju, poprawę tolerancji na stresy środowiskowe oraz eliminację cech ograniczających ich szersze wdrożenie w praktyce rolniczej i przemysłowej.

Wdrażanie nowych surowców wymaga jednak dostosowania infrastruktury logistycznej oraz stworzenia stabilnych modeli kontraktacji, które zapewnią rolnikom opłacalność upraw roślin o niższym plonie, takich jak lnianka siewna. Badania wskazują, że długoterminowe kontrakty, gwarancje odbioru surowca oraz dopłaty za praktyki regeneracyjne mogą skutecznie kompensować różnice ekonomiczne między rzepakiem a roślinami niszowymi. W efekcie rolnicy zyskują możliwość dywersyfikacji produkcji, co zwiększa odporność gospodarstw na zmienność klimatyczną i rynkową oraz wpisuje się w kierunek rozwoju europejskiego rynku biopaliw, który coraz wyraźniej odchodzi od uprawy jednego gatunku na rzecz wielogatunkowych, odpornych systemów upraw.

PIŚMIENNICTWO

- Aksoy H., Domene M.G., Loganathan P., Blakey S., Zea E., Vinuesa R., Otero E. 2025. Case study on SAF emissions from air travel considering emissions modeling impact. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* 29, art. no. 101341.
- Bag S., Routray S., Rahman M.S., Shrivastav S.K. 2025. Investigate the effect of green hydrogen supply chain integration on supply chain resilience: Organization information processing theory perspective. *Int. J. Prod. Econ.* 284, art. no. 109613.

- Bardon P., Massol O., Thomas A. 2025. Greening aviation with sustainable aviation fuels: Insights from decarbonization scenarios. *J. Environ. Manag.* 374, art. no. 123943.
- Bazienė K., Gargasas J. 2023. Sustainable innovative technology solutions for the energy sector. *Entrepreneursh. Sustain.* 11: 215–226.
- Będycka Bórawska A., Jankowski K.J., Rokicki T., Gostkowski M. 2021. Area under rapeseed cultivation as a factor differentiating the economic performance of biodiesel producers. *Energies* 14, art. no. 8568.
- Budzyński W., Bielski S. 2004. Surowce energetyczne pochodzenia rolniczego cz. I. Biokomponenty paliw płynnych. *Acta Sci. Pol., Agricultura* 3(2): 5–14.
- Champeecharoensuk A., Dhakal S., Chollacoop N., Phdungsilp A. 2024. Greenhouse gas emissions trends and drivers insights from the domestic aviation in Thailand. *Heliyon* 10, art. no. e24206.
- Cui Q., Jia Z., Li Y. 2024. Path analysis of using hydrogen energy to reduce greenhouse gas emissions in global aviation. *Cell Rep. Sustain.* 1, art. no. 100133.
- Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on the promotion of energy from renewable sources (RED III).
- Directive 2003/30/EC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport.
- EASA. 2025. SAF Market – Current and Future SAF Production Capacity. European Union Aviation Safety Agency. Dostęp: 15.08.2026, <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/downloads#download-summary-2025>
- Heller K. 2012. Metodyka integrowanej ochrony roślin dla uprawy lnu włóknistego. Wyd. IWNiRZ Poznań, ss. 87.
- Igielski M. 2023. Project management in the renewable energy sources industry in Poland – Identification of conditions and barriers. *Entrepreneursh. Sustain. Issues* 10: 135–151.
- Jęczmionek Ł. 2010. Olej z lniarki siewnej (*Camelina sativa*) – szansa rozwoju biopaliw II generacji? *NaftaGaz* 9: 841–848.
- Karlsson Potter H., Yacout D.M.M., Henryson K. 2023. Climate assessment of vegetable oil and biodiesel from camelina grown as an intermediate crop in cereal-based crop rotations in cold climate regions. *Sustainability* 15(16), art. no. 12574.
- Kirmizi M., Aygun H., Turan O. 2024. Energetic and exergetic metrics of a cargo aircraft turboprop propulsion system by using regression method for dynamic flight. *Energy* 296, art. no. 131153.
- Kołodziejczyk K., Kruczyński S., Mosio Mosiewski J., Nosal H., Orliński P., Owczuk M. 2012. Ocena zastosowania estrów metylowych różnego pochodzenia w silnikach o zapłonie samoczynnym. *Zesz. Nauk. Inst. Pojazdów* 2 (88): 49–61.
- Kowalska J., Antkowiak M., Krzysińska J. 2026. Uprawa rzepaku ozimego (*Brassica napus* L.) ze szczególnym uwzględnieniem ochrony w systemie ekologicznym. *Zag. Doradztwa Rol.* 2(124): 91–106.
- Kurasiak-Popowska D. 2019. Lniarka siewna – roślina historyczna czy perspektywiczna? *Fragm. Agron.* 36(2): 42–54.
- Kurasiak-Popowska D., Graczyk M., Stuper-Szablewska K. 2020. Winter camelina seeds as a raw material for the production of erucic acid free oil. *Food Chem.* 330, art. no. 127265.
- Lau J.I.C., Wang Y.S., Ang T., Seo J.C.F., Khadaroo S.N.B.A., Chew J.J., Lup A.N.K., Sunarso J. 2024. Emerging technologies, policies and challenges toward implementing sustainable aviation fuel (SAF). *Biomass Bioenergy* 186, art. no. 107277.
- Lv X., Zhao C., Yan N., Ma X., Feng S., Shuai L. 2025. Sustainable aviation fuel (SAF) from lignin: Pathways, catalysts, and challenges. *Bioresour. Technol.* 419, art. no. 132039.
- Łabędzki L., Kanecka Gieszke E. 2015. Sprawdzalność prognozy niedoborów wody roślin uprawnych określanych przy użyciu wskaźnika suszy rolniczej CDI. *Inż. Ekol.* 45: 163–168.
- Mrówczyński M., Walczak F., Korbas M., Paradowski A., Roth M. 2009. Zmiany klimatyczne a zagrożenia roślin rolniczych przez agrofagi. *Studia Raporty IUNG PIB* 17: 139–148.
- Neupane D., Lohaus R.H., Solomon J.K.Q., Cushman J.C. 2022. Realizing the potential of *Camelina sativa* as a bioenergy crop for a changing global climate. *Plants* 11(6), art. no. 772.
- Nowakowski M., Skonieczek P., Żurek M., Matyka Ł., Wąsacz E., Piętka T. 2014. Plonowanie wybranych odmian i odmian gorczycy białej uprawianych w międzyplonie ścierniskowym na dwu typach gleb. *Rośl. Oleiste/Oilseed Crops* 35(1): 37–47.

- Okunevičiūtė Neverauskienė L., Dirma V., Tvarenavičienė M., Danilevičienė I. 2025. Assessing the role of renewable energy in the sustainable economic growth of the European Union. *Energies* 18, art. no. 760.
- Ovaere M., Proost S. 2022. Cost-effective reduction of fossil energy use in the European transport sector: An assessment of the Fit for 55 Package. *Energy Policy* 168, art. no. 113085.
- Petraru A., Amariei S. 2020. Oil press cakes valorization through circular economy approaches. *Appl. Sci.* 10(21), art. no. 7432.
- Popis E., Ratusz K., Przybysz M., Krygier K., Sakowska A., Konarska M. 2015. Światowa oraz polska produkcja lnu oleistego i oleju lnianego. *Zesz. Nauk. SGGW, Probl. Rol. Światowego* 15(2): 106–116.
- Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation).
- Richie H. 2024. What share of global CO₂ emissions come from aviation? *Our World in Data*.
- Searle S., Malins C. 2016. Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States. *Biomass Bioenergy* 89: 2–10. <https://doi.org/10/gmhq5b>.
- Sgouridis S., Kimmich C., Solé J., Černý M., Ehlers M.H., Kerschner C. 2022. Visions before models: The ethos of energy modeling in an era of transition. *Energy Res. Soc. Sci.* 88: art. no. 102497.
- Shafiei K., Seifi A., Hagh M.T. 2025. A novel multi-objective optimization approach for resilience enhancement considering integrated energy systems with renewable energy, energy storage, energy sharing, and demand-side management. *J. Energy Storage* 115, art. no. 115966.
- Tańska M., Rotkiewicz D., Ambrosewicz-Walacik M. 2013. Wpływ warunków ogrzewania nasion rzepaku i gorczycy białej na cechy olejów do produkcji biodiesla. *Rośl. Oleiste/Oilseed Crops* 34(1): 103–114.
- Truszkowska M., Waszkowiak K. 2023. Uprawa, właściwości użytkowe i przemysłowe wykorzystanie lnu zwyczajnego. *Zagadn. Doradztwa Rol.* 4(114): 55–66.
- Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych. *Dziennik Ustaw, Dz.U.* 2025 poz. 901 (tekst jednolity obowiązujący od 21 maja 2026 r. do 31 grudnia 2026 r.)
- Walter M., Dec T., Banach K. 2025. Z pola do dystrybutora – lnianka siewna (*Camelina sativa*) jako przyszłość polskich biopaliw? *Biul. IHAR* 303/304: 55–67.
- Wan K., Fan Y., Liu B.-Y. 2025. Energy supply resilience under low-carbon transition: Long-term multi-national assessment. *Energy* 326, art. no. 136311.
- Wang B., Ting Z.J., Zhao M. 2024. Sustainable aviation fuels: Key opportunities and challenges in lowering carbon emissions for aviation industry. *Carbon Capture Sci. Technol.* 13, art. no. 100263.
- Watson M.J., Machado P.G., da Silva A.V., Saltar Y., Ribeiro C.O., Nascimento C.A.O., Dowling A.W. 2024. Sustainable aviation fuel technologies, costs, emissions, policies, and markets: A critical review. *J. Clean. Prod.* 449, art. no. 141472.
- Wei M., Jiang Z., Pandey P., Liu M., Li R., O'Neill Z., Dong B., Hamdy M. 2025. Energy resilience in the built environment: A comprehensive review of concepts, metrics, and strategies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 210, art. no. 115258.
- Xu Y., Zhang Y., Deng X., Lee S.Y., Wang K., Li L. 2025. Bibliometric analysis and literature review on sustainable aviation fuel (SAF): Economic and management perspective. *Transp. Policy* 162: 296–312.
- Zubi G., Kuhn M., Makridis S., Coutinho S., Dorasamy S. 2025. Aviation sector decarbonization within the hydrogen economy – A UAE case study. *Energy Policy* 198, art. no. 114520.

Z. SAWINSKA, M. KOTECKA, P. BARTECZKA, D. KURASIAK-POPOWSKA, T. PIECHOTA
**PERSPECTIVES FOR DIVERSIFYING THE NATIONAL FEEDSTOCK BASE FOR ADVANCED
 BIOFUELS AND SUSTAINABLE AVIATION FUELS (SAF)**

Summary

Under the stringent regulatory pressure of the EU “Fit for 55” package (including the RED III directive and ReFuelEU Aviation regulation), the European and domestic refining sectors are forced to rapidly scale up the production of advanced biofuels and Sustainable Aviation Fuel (SAF) [ReFuelEU Aviation]. Rapeseed, the long-standing market leader, faces regulatory constraints as a first-generation biofuel due to food-versus-fuel land competition, alongside climate-driven yield instability caused by intensifying droughts.

This paper provides a comprehensive review evaluating the agronomic, physicochemical, and market potential of alternative and niche oilseed crops: camelina (*Camelina sativa*), white mustard (*Sinapis alba*), and flax (*Linum usitatissimum*), in direct comparison to rapeseed (*Brassica napus*). The fatty acid profiles of these oils are analyzed regarding their suitability for hydrotreated vegetable oil (HVO) and HEFA (SAF synthesis) processing. Special attention is dedicated to the sustainable cultivation of camelina and mustard as low-carbon intensity, aligned with ISCC certification requirements. The synthesized data demonstrates that the future of the biofuel market depends on shifting from rapeseed monoculture towards a diversified crop mosaic. Integrating niche oilseeds into domestic crop rotations, backed by energy sector contract farming, offers a viable pathway to decarbonize transport while preserving food security.

Key words: advanced biofuels, SAF, camelina, rapeseed, white mustard, flax, RED III

Zaakceptowano do druku – *Accepted for print*: 9.09.2026

Do cytowania – *For citation*:

Sawinska Z., Kotecka M., Barteczka P., Kurasiak-Popowska D., Piechota T. 2026. Perspektywy dywersyfikacji krajowej bazy surowców dla sektora biopaliw zaawansowanych oraz zrównoważonych paliw lotniczych (SAF). *Fragm. Agron.* 43(2): 21–32.