

Z pola do dystrybutora - Inianka siewna (*Camelina sativa*) jako przyszłość polskich biopaliw?

From field to tank - *Camelina sativa* as the future of Polish biofuels?

Marcin Walter¹✉, Tymoteusz Dec², Kamil Banach¹

¹Biuro Badań i Rozwoju Petrochemii i Rafinerii Przyszłości, Centrum Badawczo-Rozwojowe ORLEN S.A., ul. Łukasiewicza 35, 09-400 Płock

²Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

✉marcin.walter@orlen.pl

Polska jest jednym z kluczowych producentów rzepaku w Europie – uprawiamy go już na ponad milionie hektarów, co stanowi 97% upraw wszystkich roślin oleistych w kraju. Aktualnie ponad 2/3 oleju rzepakowego przeznaczone jest do produkcji biopaliw. Problem stanowi monokultura rzepakowa, bowiem wykorzystanie gruntów rolnych pod uprawę rzepaku do celów energetycznych konkuruje z produkcją żywności, a zdolności produkcyjne rzepaku limitowane są przez powierzchnię upraw i warunki klimatyczne. Inianka siewna (*Camelina sativa*) stanowi obiecującą alternatywę dla oleju rzepakowego, a jej atrakcyjność związana jest z wyższą odpornością na niekorzystne warunki glebowe i klimatyczne w porównaniu do rzepaku. W niniejszej pracy skupiono się na wykorzystaniu niejadalnych odmian Inianki siewnej, mających predyspozycje do zastosowania jako surowiec przemysłowy. Uprawa Inianki stwarza możliwość wykorzystania gleb słabej klasy, nieprzydatnych do uprawy większości roślin rolniczych, co daje szansę na zagospodarowanie terenów dotychczas niewykorzystywanych rolniczo. Oleju z Inianki nie można wprost wlać do baku, lecz po odpowiedniej przeróbce można uzyskać z niego estry metylowe (FAME) lub etylowe (FAEE) wyższych kwasów tłuszczowych, stosowane jako domieszki do biodiesla. Alternatywnym sposobem konwersji oleju z Inianki jest jego uwodornienie, co pozwala uzyskać hydrowodniony olej roślinny (HVO). Po wytlóczeniu oleju z Inianki zostaje biomasa bogata w lignocelulozę, która może służyć do produkcji bioetanolu drugiej generacji, biodegradowalnych poliuretanów, biokompozytów i wielu innych biomateriałów. Inianka siewna, należąc do najstarszych roślin oleistych na terenie Europy, wydaje się być jednocześnie rośliną przyszłości.

Słowa kluczowe: biopaliwa, *Camelina sativa*, FAME, HVO, Inianka siewna

Poland is one of the key rapeseed producers in Europe, with over one million hectares of rapeseed cultivated, accounting for 97% of all oilseed crops in the country. Two-thirds of rapeseed oil is intended for biofuel production. Rapeseed monoculture is a problem, as the use of agricultural land for rapeseed cultivation for energy purposes competes with food production, and rapeseed production capacity is limited by the area under cultivation and climatic conditions. *Camelina sativa* is a promising alternative to rapeseed oil, and its attractiveness stems from its greater resistance to unfavorable soil and climatic conditions compared to rapeseed. This article focuses on the use of inedible varieties of camelina that are suitable for use as an industrial raw material. Cultivation of camelina creates the opportunity to utilize poor-quality soils, unsuitable for most agricultural crops, thus providing opportunities for developing areas previously unused for agriculture. Although camelina oil cannot be poured directly into the tank, after appropriate processing it can be used to obtain methyl esters (FAME) or ethyl esters (FAEE) of higher fatty acids, which are used as additives to biodiesel. An alternative method of converting camelina oil is hydrogenation, which produces hydrotreated vegetable oil (HVO). After pressing the camelina oil, the resulting biomass is rich in lignocellulose, which can be used to produce second-generation bioethanol, biodegradable polyurethanes, biocomposites, and many other biomaterials. Camelina, one of the oldest oilseed crops in Europe, appears to be a plant of the future.

Keywords: biofuels, *Camelina sativa*, HVO, FAME

Zapomniany skarb rolnictwa

W obliczu zachodzących zmian klimatycznych oraz ograniczania konkurencji stosowania surowców jadalnych do produkcji biopaliw konieczne jest poszukiwanie alternatywnych dla oleju rzepakowego roślin oleistych, mających potencjał do wykorzystania w produkcji biopaliw (Chowdhury i in. 2025).

Zgodnie z informacjami zawartymi w Uchwale nr 3/2024 Komisji Zarządzającej Funduszu Promocji Roślin Oleistych z dnia 12 lipca 2024 r. w sprawie przyjęcia strategii promocji dla branży roślin oleistych na rok 2025 (FPRO 2024), rzepak (*Brassica napus* L.) stanowi ok. 97% wszystkich

uprawianych roślin oleistych. Obecnie rzepak uprawiany jest w Polsce już na ponad 1 mln ha. Powierzchnia zasiewów rzepaku w sezonie 2022/2023 była najwyższa w naszym kraju w całej historii uprawy tego gatunku i wyniosła blisko 1,1 mln ha (wzrost o 40 tys. ha rok do roku).

Aktualnie ponad 2/3 oleju rzepakowego w Polsce przeznacza się do produkcji biopaliw tj. estrów metylowych wyższych kwasów tłuszczowych. Stanowią one biokomponent stosowany w oleju napędowym, ale także samoistne paliwo B100. Na najbliższe lata spodziewane jest utrzymanie popytu na olej rzepakowy ze strony branży biopaliw, co wynika z regulacji w obszarze Naro-

dowego Celu Wskaźnikowego obowiązujących do 2025 roku oraz projektowanych, zakładających utrzymanie popytu na polski biodiesel na wysokim poziomie w perspektywie do 2030 roku. Wysoka podaż surowca w kraju i dobra sytuacja popytowa na rynku oleju rzepakowego wzmogły aktywność lokalnych producentów, dzięki czemu przemysł olejarski staje się jedną z wiodących specjalizacji polskiego przetwórstwa rolnospożywczego (FPRO 2024).

Monokultura rzepakowa jako główne źródło surowca do biopaliw niesie ze sobą znaczące wyzwania: konkurencję o tereny uprawne (wykorzystanie gruntów rolnych pod uprawę rzepaku do celów energetycznych konkuruje z produkcją żywności, co może wpływać na ceny artykułów spożywczych), oraz ograniczoną dostępność, bowiem zdolności produkcyjne rzepaku limitowane są przez powierzchnię upraw i warunki klimatyczne. Zasadne jest zatem poszukiwanie alternatyw dla oleju rzepakowego w produkcji biopaliw (Bełdycka-Bórawska 2023).

Obiecującą alternatywę dla rzepaku stanowi lnianka siewna (*Camelina sativa* (L.) Crantz). Należy do najstarszych roślin oleistych na terenie Europy, a w Polsce w latach 50-tych ubiegłego stulecia jej uprawy zajmowały rozległy obszar ponad 26 tysięcy hektarów, jednak z czasem została wyparta przez bardziej wydajny rzepak ozimy, co spowodowało niemal całkowite zaprzestanie jej uprawy (Kurasiak-Popowska 2019).

Lnianka siewna jest jednoroczną rośliną oleistą, nazywaną również: lennica, lnicznik, ryżek lub rydz. Lnianka znana jest od starożytności. Początkowo występowała i rozprzestrzeniała się jako chwast, natomiast od epoki brązu do średniowiecza stanowiła składnik diety człowieka. Historia jej uprawy na ziemiach polskich sięga czasów kultury łużyckiej (ok. 1400-300 r p.n.e.) (Brock i in., 2022, Krawczyk i in., 2020). Wykorzystywano ją do tłoczenia oleju, który był tańszy i łatwiejszy w produkcji niż olej lniany czy rzepakowy. Był również tańszą alternatywą dla tłuszczów zwierzęcych. Popularne polskie przysłowie „Lepszy rydz niż nic” nie odnosi się do grzyba

rydza, jak się to wszystkim kojarzy, lecz do rośliny rydza - lnianki. Wiąże się to z wieloletnią wiedzą rolników, że roślina ta może być wysiana wszędzie tam, gdzie nic innego nie opłaca się już uprawiać (Wojtkowiak i in., 2009a).

Olej z lnianki siewnej może być wykorzystywany zarówno jako olej spożywczy, jak i surowiec przemysłowy, np. do produkcji biopaliw – w zależności od uprawianej odmiany. Kluczowym wyznacznikiem przeznaczenia oleju z lnianki jest profil kwasów tłuszczowych, np. dla oleju spożywczego wymagana jest wysoka zawartość wielonienasyconych kwasów tłuszczowych. Duża zawartość kwasu erukowego (>5%) wyklucza spożywcze przeznaczenie oleju lniankowego (Arshad i in., 2022). Jadalny olej z lnianki siewnej tłoczony jest głównie z odmian jarych i charakteryzuje się wyrazistym profilem organoleptycznym. Ma złocisto-zielony lub rdzawy kolor, wynikający z obecności naturalnych barwników, głównie karotenoidów. W smaku jest delikatnie korzenny, z wyczuwalnymi nutami cebuli i orzechów, a czasem także z lekkim posmakiem gorczycy. Jego zapach jest intensywny, przypominający aromat cebuli lub przypraw korzennych, co nadaje mu unikalny charakter. Konsystencja oleju jest płynna i oleista, dzięki czemu doskonale komponuje się z potrawami takimi jak sałatki, kasze, pieczywo czy twarogi. Ze względu na niską temperaturę spalania i podatność na utlenianie, olej ten cechuje się krótką trwałością, przeznaczony jest wyłącznie do stosowania na zimno i nie nadaje się do smażenia (Sagan i in., 2021).

Mimo swojej prostoty w uprawie i długiej historii, lnianka została niemal całkowicie wyparta w XX wieku przez inną roślinę oleistą – rzepak ozimy. Stało się tak głównie dlatego, że rzepak daje wyższe plony z hektara oraz posiada większą zawartość tłuszczu w nasionach (Tab. 1), przez co wydaje się być rośliną bardziej opłacalną w uprawie. W rezultacie olej rzepakowy zdominował polski rynek, spychając tradycyjny olej rydzowy do roli regionalnej ciekawostki. Obecnie trwają prace mające na celu przywrócenie uprawy lnianki siewnej. Są one odpowiedzią na rosnące

Tabela 1
Table 1

Charakterystyka produktywności upraw rzepaku ozimego, rzepaku jarego i lnianki siewnej
Characteristics of the productivity of winter turnip rape, spring turnip rape and camelina crops¹

	Zawartość lipidów w nasionach [%]	Plon nasion [kg·ha ⁻¹]	Plon oleju [kg·ha ⁻¹]
Rzepak ozimy	35,8-38,1	3770-4630	1138-1389
Rzepak jary	35,8-36,4	2400-3240	737-998
Lnianka siewna	40,9-45,1	2394-4124	989-1860

Źródło: opracowanie własne na podstawie Blume i in. (2020, s. 303-306).
Source: own study, based on Blume et al. (2020, pp. 303-306).

zapotrzebowanie na oleje roślinne, zarówno do przemysłu spożywczego, paszowego, kosmetycznego jak i petrochemicznego. Nie bez znaczenia jest również jej odporność na ekstremalne warunki atmosferyczne oraz na znaczną ilość chorób i szkodników (Sobczak-Malitka i Sobczak 2023, Zanetti i in., 2021).

Atrakcyjność Lnianki siewnej związana jest także z jej większą odpornością na niekorzystne warunki glebowe i klimatyczne w porównaniu do rzepaku. Uprawa Lnianki stwarza możliwość wykorzystania gleb słabej klasy, nieprzydatnych do innych upraw, a tym samym umożliwia pozyskiwanie oleju roślinnego przydatnego do produkcji biopaliw bez uszczuplania produkcji żywności. Daje też realną szansę na rozwój obszarów rolniczych poprzez zagospodarowanie terenów dotychczas niewykorzystywanych rolniczo. Lnianka jest znacznie bardziej odporna na suszę i inne niekorzystne warunki atmosferyczne niż rzepak, co czyni ją bardziej przewidywalną w uprawie (Kurasiak-Popowska i in. 2020).

Portret rośliny przyszłości

Charakterystyka botaniczna Lnianki siewnej

Lnianka siewna, należąca do rodziny kapustowatych (*Brassicaceae*) i rodzaju lnicznik (*Camelina*), występuje w dwóch formach: ozimej i jarej. Forma ozima jest bardziej wydajna – plonuje o około 30-40% wyżej niż forma jara. Okres wegetacji Lnianki jarej wynosi od 100 do 120 dni, natomiast ozimej – od 280 do 300 dni. Rośliny Lnianki osiągają wysokość od 50 do 90 cm (formy jare) lub od 80 do 120 cm (formy ozime). Posiadają palowy korzeń ze słabo rozwiniętymi korzeniami bocznymi, sięgający od 40 do 60 cm. Ich łodyga jest cienka, a w górnej części rozgałęziona. Liście mają kształt lancetowaty, krótkie ogonki i brzegi gładkie lub delikatnie ząbkowane. Owocem Lnianki jest drobna łuszczyńska, w której znajduje się od 8 do 15 bardzo drobnych nasion – masa tysiąca nasion (MTN) wynosi od 0,8 do 1,8 g.

Nasiona mają kształt owalnie-wydłużony i spłaszczony, a ich barwa jest żółta z charakterystycznym rdzawym odcieniem. Są bogate w tłuszcz (około 35-40%) i białko (około 25%) (Krawczyk i in. 2020, Jęczmionek 2010).

Wymagania uprawowe

Lnianka siewna ma stosunkowo niskie wymagania glebowe, dlatego można ją uprawiać nawet na glebach IV klasy i słabszych. Warto jednak pamiętać, że najlepsze plony daje na glebach wyższej klasy. Lnianka dobrze znosi umiarkowane zakwaszenie gleby, a najwyżej plonuje tam, gdzie podłoże jest zasobne w wapń. Najlepsze wyniki osiąga się na glebach średniozwięzłych, natomiast na glebach podmokłych, gliniastych i ilastych plony są zazwyczaj słabsze. Dobrymi przedplonami dla Lnianki są rośliny, które zostawiają glebę w dobrej kulturze, takie jak ziemniaki czy rośliny

bobowate. Można ją również uprawiać po zbożach oraz kukurydzy (Karlsson Potter i in., 2023). Warto jednak unikać siewu Lnianki po roślinach kapustowatych lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie, ponieważ mogą sprzyjać chorobom i szkodnikom wspólnym dla tej grupy roślin. Lnianki nie powinno się też uprawiać po sobie rok po roku.

Lnianka siewna wyróżnia się najmniejszymi wymaganiami wodnymi spośród roślin oleistych, dzięki czemu doskonale nadaje się do uprawy w rejonach i w latach o ograniczonych opadach. Okresowe susze zazwyczaj tylko w niewielkim stopniu wpływają na zawartość tłuszczu w nasionach. Warto jednak pamiętać, że susza występująca w fazie kwitnienia i dojrzewania może obniżyć wielkość plonu (Krawczyk i in., 2020, Jęczmionek 2010).

Cykl wegetacyjny

Minimalna temperatura kiełkowania nasion Lnianki wynosi około 1°C, natomiast optymalna temperatura do wschodów mieści się w przedziale 10-12°C. W takich warunkach wschody pojawiają się zwykle po 8-10 dniach. Lnianka ozima charakteryzuje się większą odpornością na mróz niż rzepak ozimy. Podczas ostrych zim, gdy temperatura w styczniu spada poniżej -23°C (przy braku pokrywy śnieżnej), a w lutym sięga nawet -29°C (przy warstwie śniegu o grubości 10 cm), Lnianka – w przeciwieństwie do rzepaku – nie wymarza. Z kolei Lnianka jara wykazuje dobrą odporność na wiosenne przymrozki (Jęczmionek 2010).

Formy ozime Lnianki wysiewa się zazwyczaj 2-3 tygodnie później niż rzepak ozimy, czyli najczęściej w terminie od 10 do 20 września. Lniankę jarą sieje się wczesną wiosną, w tym samym terminie co zboża jare. Opóźnienie siewu może znacząco obniżyć plon, głównie z powodu słabszych wschodów spowodowanych przesuszeniem wierzchniej warstwy gleby. Dodatkowo późny siew ogranicza rozwój cech morfologicznych rośliny, zwłaszcza zmniejsza powierzchnię asymilacyjną liści, co przekłada się na gorsze wykorzystanie światła i składników pokarmowych (Krawczyk i in., 2020).

Zapotrzebowanie na składniki mineralne

Lnianka siewna wykazuje mniejsze potrzeby nawozowe w porównaniu z rzepakiem ozimym (Tab. 2). Szacuje się, że na wytworzenie jednej tony nasion wraz ze słomą Lnianka potrzebuje średnio około 35 kg azotu, 8 kg fosforu, 12 kg potasu i 4 kg magnezu, natomiast rzepak ozimy zużywa na każdą tonę plonu wraz ze słomą około 50-60 kg azotu, 20-25 kg fosforu, 40-50 kg potasu i 7-10 kg magnezu. Przeliczając na hektar: dla plonu 2-2,5 t·ha⁻¹ Lnianka zwykle wymaga około 80-120 kg azotu, 20-40 kg fosforu (P₂O₅) i 40-60 kg potasu (K₂O). Rzekpak ozimy, przy plonie 3-4 t·ha⁻¹, potrzebuje znacznie więcej – średnio 150-10 kg azotu, 70-100 kg fosforu (P₂O₅) i 150-200 kg potasu (K₂O) na hektar. Te różnice pokazu-

ją, że lnianka nie tylko lepiej radzi sobie na glebach średnich i słabszych, ale również wymaga znacznie mniejszych nakładów na nawożenie, co czyni ją ciekawą alternatywą w czasach rosnących cen nawozów mineralnych (Krawczyk i in., 2020, Podleśna 2014). Azot jest jednym z najważniejszych składników odżywczych w produkcji roślin oleistych (Urbaniak i in., 2008). Na glebach ubogich w azot lnianka siewna wytwarza małe, zie-

lonkawożółte liście, dojrzewa wcześniej i wytwarza mniej krzemionek oraz mniejsze nasiona niż rośliny zaopatrywane w optymalną ilość azotu. Optymalna dawka azotu w produkcji lnianki zależy od żyzności gleby, poziomu resztkowych składników odżywczych oraz warunków pogodowych (Jankowski i in., 2019, Jiang i in., 2013).

Tabela 2
Table 2

Porównanie zapotrzebowania na składniki mineralne lnianki i rzepaku
Comparison of the mineral requirements of camelina and winter turnip rape

Składnik	Jednostka	Lnianka siewna	Rzepak ozimy
Azot (N)	[kg·ha ⁻¹]	100	180
	[kg·t ⁻¹ nasion]	35	55
Potas (K ₂ O)	[kg·ha ⁻¹]	50	140
	[kg·t ⁻¹ nasion]	12	45
Fosfor (P ₂ O ₅)	[kg·ha ⁻¹]	30	85
	[kg·t ⁻¹ nasion]	8	22

Źródło: opracowanie własne na podstawie Krawczyk, Strażyński, Mrówczyński 2020.
Source: own study, based on Krawczyk, Strażyński, Mrówczyński 2020.

Zrównoważone aspekty uprawy lnianki siewnej

Odporność i łatwość uprawy

Lnianka siewna ma duży potencjał uprawowy dzięki swoim wyjątkowym cechom. Przede wszystkim lnianka wykazuje wysoką zdolność adaptacji do szerokiego zakresu warunków środowiskowych, wyróżnia się wysoką odpornością na ekstremalne warunki – dobrze znosi zarówno silne mrozy zimą, jak i susze latem. Taka tolerancja zapewnia stabilniejszy plon, co jest dziś szczególnie pożądane. Niskie wymagania glebowe pozwalają uprawiać lniankę na gruntach marginalnych, na których rzepak czy zboża nie dawałyby satysfakcjonujących plonów. Dzięki temu można lepiej wykorzystać dostępne zasoby gruntowe, zwiększając wydajność gospodarstwa. Dodatkowym atutem jest duża odporność na choroby i szkodniki, co zmniejsza ryzyko strat oraz pozwala ograniczyć ilość stosowanych środków ochrony roślin i pracochłonność uprawy. Powyższe cechy sprawiają, że lnianka klasyfikowana jest jako roślina przystosowana do uprawiania na obszarach o niekorzystnych warunkach rolniczych. Lnianka była z powodzeniem uprawiana w różnych warunkach środowiskowych na całym świecie również na gruntach marginalnych, osiągając plony od 400 do 3300 kg·ha⁻¹ (Matteo i in., 2020, Berti i in., 2016).

Efektywność ekonomiczna

Właściwości lnianki sprzyjają większej opłacalności produkcji. Możliwość uprawy na glebach

niższej klasy pozwala maksymalizować wykorzystanie gruntów i podnosić ich wartość rolniczą. Forma jara lnianki ma krótki okres wegetacji (100–120 dni), co ułatwia jej dopasowanie do warunków klimatycznych i umożliwia uprawę jako międzyplon. Odmiana ozima lnianki, mimo podobnego okresu wegetacji co rzepak ozimy, lepiej znosi mrozy. Zmniejsza to ryzyko wymarzenia plantacji. Dodatkowo, lnianka ma mniejsze zapotrzebowanie na nawozy mineralne w przeliczeniu na tonę plonu wraz ze słomą. Niższe zużycie nawozów to bezpośrednia oszczędność i większa efektywność produkcji (Załuski i in., 2020). Lnianka charakteryzuje się różnorodnością zastosowań, ze względu na specyficzny skład nasion o wysokiej zawartości oleju (od 30 do 40%), w tym wielonienasyconych kwasów tłuszczowych (PUFA, powyżej 50%) i jednonienasyconych kwasów tłuszczowych (MUFA, około 30%). Nasiona lnianki są również bogate w białko – mączka z nasion lnianki zawiera do 40% białka surowego po ekstrakcji oleju (Leclère i in., 2021, Belayneh i in., 2015). W związku z powyższym, nasiona lnianki siewnej, olej oraz śruta lub makuchy z nasion są szczególnie interesujące dla różnych gałęzi przemysłu, w tym dla energetyki (produkcja biopaliw i biodiesla) oraz przemysłu spożywczego (składniki żywności funkcjonalnej). Mają one również potencjał do innych zastosowań, np. jako oleochemikalia w przemyśle niespożywczym, m.in. jako kosmetyki, bio-smary, surfaktanty i środki czyszczące, w poszukiwaniu bardziej ekologicznych alternatyw, które mogłyby być wykorzystane jako

surowiec lub zastąpić olej ropopochodny w celu kompensacji emisji gazów cieplarnianych (Lopez i in., 2024, Clavijo-Bernal i in., 2024). Efektywność ekonomiczna uprawy lnianki wynika z jej szerokiego wachlarza zastosowań – około 80% oleju znajduje odbiorców w sektorze spożywczym i zdrowotnym, a kolejne 14% w przemyśle, m. in. w produkcji kosmetyków, detergentów, smarów czy tworzyw sztucznych. Szczególnie istotne jest rosnące zapotrzebowanie na bio-oleje i biopaliwa, co czyni lniankę coraz bardziej opłacalną rośliną w nowoczesnym rolnictwie i gospodarce o obiegu zamkniętym (Mahious i in., 2024).

Korzyści środowiskowe

Uprawa lnianki może przynieść również wymierne korzyści dla środowiska. Rozszerzenie arealu tej rośliny jako alternatywy dla rzepaku może pozytywnie wpłynąć na bioróżnorodność. Wysoka odporność na choroby i szkodniki pozwala ograniczyć stosowanie pestycydów, co jest korzystne dla gleb i wód oraz zgodne z trendami rolnictwa zrównoważonego. Niższe zapotrzebowanie na nawozy w przeliczeniu na powierzchnię uprawy zmniejsza presję na środowisko, co ogranicza ryzyko nadmiernego wypłukiwania składników pokarmowych i obniża ślad węglowy produkcji (Karlsson Potter i in., 2023).

Lnianka siewna uprawiana jako międzyplon pełni wiele funkcji środowiskowych. Jej głęboki system korzeniowy poprawia strukturę gleby, zwiększa infiltrację wody oraz ogranicza spływ składników pokarmowych i erozję, zwłaszcza w okresie wczesnowiosennym. Choć wytwarza mniej biomasy niż inne rośliny, jej resztki sprzyjają retencji wody w glebach suchych. Stanowi również cenne źródło pyłku i nektaru dla zapylaczy, a w uprawie wraz z koniczyną perską może redukować zawartość metali ciężkich w glebie. Podobnie jak inne gatunki z rodziny kapustowatych, lnianka sprzyja sekwestracji węgla w glebie, obiegowi azotu i węgla w glebie, ogranicza rozwój chwastów, patogenów i nicieni, a tym samym poprawia ogólną jakość środowiska glebowego (Neupane i in., 2022).

Uprawa lnianki jako międzyplonu lub przedplonu przynosi szereg korzyści środowiskowych. Jej zastosowanie sprzyja poprawie jakości gleby poprzez zwiększenie zawartości materii organicznej i węgla, wzbogacenie mikrobiomu oraz rozwój pożytecznych mikroorganizmów, takich jak grzyby mikoryzowe. Lnianka działa także jak naturalny biofumigant – związki powstające z rozkładu glukozynolatów ograniczają rozwój patogenów glebowych i nicieni, w tym groźnego dla soi nicienia SCN. Dodatkowo jej szybki wzrost i właściwości allelopatyczne skutecznie ograniczają presję chwastów, w tym gatunków inwazyjnych, jak ambrozja bylicolistna. Dzięki tym cechom wprowadzenie lnianki do płodozmianu poprawia zdrowotność upraw, zmniejsza ryzyko erozji i chorób,

a także wspiera stabilność plonów w dłuższej perspektywie (Ghidoli i in., 2023).

Przykładem zastosowania lnianki w praktyce jest system uprawy pośredniej, w którym wysiewa się kolejną roślinę jeszcze przed zbiorem lnianki (Karlsson Potter i in., 2023). Choć może obniżyć to plon rośliny następczej (w tym przypadku grochu) o około 25%, to w całym płodozmianie rozwiązanie to okazuje się korzystniejsze niż tradycyjne podwójne siewy, ponieważ powoduje wzrost uzysku oleju, a także pozwala lepiej wykorzystać czas i zasoby. Badania wskazują, że lniankę można włączać do sześciolletnich rotacji upraw podobnie jak rzepak, co czyni ją cennym elementem zrównoważonych systemów rolniczych.

Jakość oleju

Skład oleju lniankowego

Olej lniankowy charakteryzuje się unikalnym składem kwasów tłuszczowych w trójglicerydach (Tab. 3). W porównaniu do innych olejów roślinnych wyróżnia się dużą zawartością nienasyconych kwasów tłuszczowych, w szczególności kwasu linolenowego $C_{18:3}$, posiadającego trzy wiązania podwójne w cząsteczce oraz kwasów: eikozenowego $C_{20:1}$ i erukowego $C_{22:1}$, posiadających po jednym wiązaniu podwójnym w łańcuchu. Należy również zwrócić uwagę na dużą zawartość kwasów tłuszczowych zawierających 20 atomów węgla w cząsteczce (Gómez i in., 2025; Jęczmionek 2010). Profil kwasów tłuszczowych weryfikuje użyteczność oleju z lnianki pod kątem spożywczym lub przemysłowym i zależy od wielu czynników, m.in. uprawianej odmiany, warunków atmosferycznych w danym roku wegetacyjnym, warunków glebowych oraz modyfikacji nasion (Haslam i in., 2025).

Olej lniankowy cechuje się podobną zawartością wody co olej rzepakowy, jednak zawiera więcej wolnych kwasów tłuszczowych, co znajduje odzwierciedlenie w wyższej liczbie kwasowej (Tab. 4). W obu olejach dominują triglicerydy, przy czym olej lniankowy charakteryzuje się nieco wyższą zawartością diglicerydów. Ze względu na wysoką zawartość związków nienasyconych, olej lniankowy osiąga wysoką wartość liczby jodowej, co może sugerować jego podatność na utlenianie podczas przechowywania. Jednak dzięki dużej zawartości naturalnych antyoksydantów, takich jak tokoferole (witamina E), olej lniankowy jest bardziej odporny na procesy utleniania niż olej rzepakowy (Mierina i in., 2017, Mosio-Mosiewski i in., 2015, Kołodziejczyk i in., 2012, Przybylski 2011).

Potencjał paliwowy

Nieprzetworzone oleje roślinne nie nadają się do bezpośredniego zastąpienia czy mieszania z olejem napędowym. Do tej pory badania prowadzono głównie na oleju rzepakowym, jednakże sprawdzają się one również dla olei roślinnych

Tabela 3
Table 3

Profil kwasów tłuszczowych oleju lniankowego oraz oleju rzepakowego. W oznaczeniu $C_{m:n}$ - m oznacza liczbę atomów węgla w cząsteczce, natomiast n – liczbę wiązań podwójnych
Fatty acid profile of camelina oil and rapeseed oil. In the $C_{m:n}$ symbol, m denotes the number of carbon atoms in the molecule, while n denotes the number of double bonds

Zawartość kwasu [%]	Olej lniankowy	Olej rzepakowy
$C_{14:0}$	0,06	0,11
$C_{16:0}$	4,89	4,19
$C_{16:nien.}$	0,18	0,39
$C_{17:0}$	-	0,09
$C_{18:0}$	2,20	1,77
$C_{18:1}$	12,98	59,41
$C_{18:2}$	15,26	19,22
$C_{18:3}$	36,54	8,71
$\Sigma C_{18:nien.}$	64,78	87,34
$C_{20:0}$	1,54	0,67
$C_{20:nien.}$	18,37	1,72
$C_{22:0}$	0,39	0,37
$C_{22:nien.}$	3,92	0,51
$C_{24:0}$	0,22	0,16
$C_{24:nien.}$	0,80	0,16

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kołodziejczyk i in. (2012, s. 51)
 Source: own study, based on Kołodziejczyk et al. (2012, p. 51)

Tabela 4
Table 4

Skład chemiczny oleju lniankowego oraz oleju rzepakowego
Chemical composition of camelina oil and rapeseed oil

Parametr	Olej lniankowy	Olej rzepakowy
Woda [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$]	72	67
Liczba kwasowa [$\text{mg KOH} \cdot \text{g}^{-1}$]	2,93	0,19
Liczba jodowa [$\text{g I}_2 \cdot (100 \text{ g})^{-1}$]	156	100-126
Gliceryna [%]	0,00	0,00
Monoglicerydy [%]	0,00	0,00
Diglicerydy [%]	3,32	1,68
Triglicerydy [%]	94,28	96,87
Niezidentyfikowane [%]	0,61	0,84
Σ estrów met. [%]	0,00	0,00
WKT [%]	1,79	0,61

innego pochodzenia. Główne problemy oleju rzepakowego polegają na zbyt wysokiej lepkości, która utrudnia rozpylanie, powoduje gorsze opory tłoczenia, gorsze odparowanie i niepełne spalanie. Może on również blokować filtry dokładnego oczyszczania. Podczas stosowania takiego oleju, na ściankach komory spalania i pierścieniach tłokowych mogą tworzyć się węgliste osady. Może on też powodować zaburzenia pracy zaworów i rozpylaczy. W przypadku dostania się nieprze-

tworzonego oleju roślinnego do oleju silnikowego nastąpi jego rozcieńczenie, co może przyczynić się do powstawania polimerów oraz zmywania filmu olejowego z tulei cylindrów, powodując ich szybsze zużycie. Olej rzepakowy nie nadaje się do stosowania jako paliwo w niższych temperaturach z powodu bardzo wysokiej temperatury zablokowania zimnego filtra (CFPP). Z uwagi na fakt, że liczba cetanowa jest uzależniona od temperatury, podczas eksploatacji pojazdu zasilanego takim

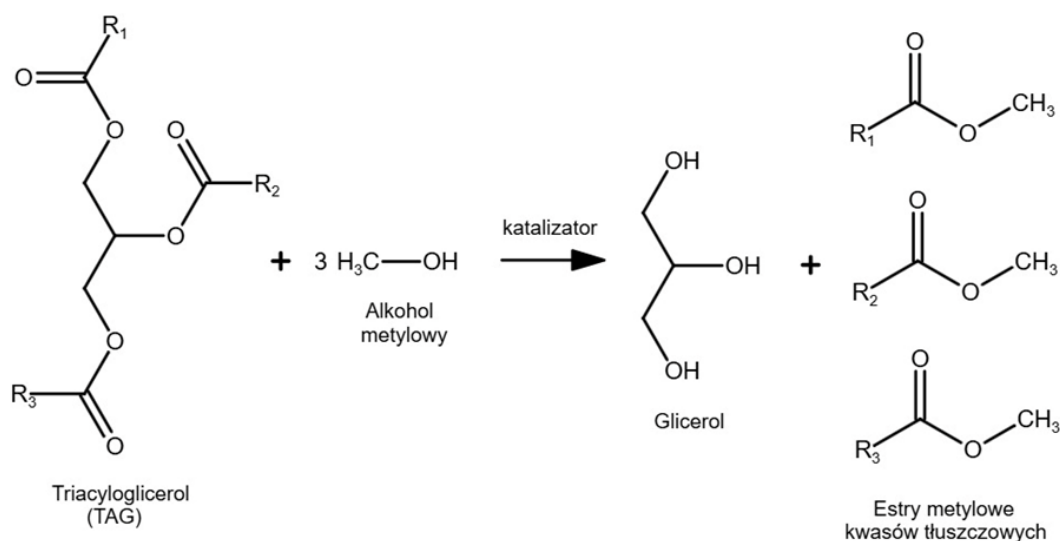
paliwem będą występowały problemy z uruchamianiem zimnego silnika. Olej rzepakowy oraz inne oleje roślinne nie nadają się bezpośrednio do zasilania silników z zapłonem samoczynnym, zarówno czyste jak i ich mieszanki z olejem napędowym. Wynika to z wyżej wymienionych problemów oraz różnic we właściwościach fizycznych i chemicznych względem tradycyjnego oleju napędowego (Markov i in., 2021, Che Mat i in., 2018, Wojtkowiak i in., 2009b).

Aby wykorzystać potencjał paliwowy olejów roślinnych, poddaje się je przeróbce na estry metylowe (FAME) lub estry etylowe (FAEE) wyższych kwasów tłuszczowych. Alternatywnym sposobem konwersji olejów roślinnych jest ich uwodornie-

nie. Proces ten można prowadzić na czystych olejach roślinnych i uzyskać hydorafinowany olej roślinny (HVO) lub domieszkować je do frakcji naftowej (Karlsson Potter i in., 2023, Jęczmionek 2010).

Estryfikacja

Proces estryfikacji jest prowadzony w obecności alkoholu metylowego lub etylowego z udziałem katalizatora, którym najczęściej jest wodorotlenek sodu lub potasu (Rys. 1). Podczas reakcji z jednej cząsteczki trójglicerydu powstają trzy cząsteczki monoestru oraz gliceryna, która jest produktem ubocznym reakcji (CONCAWE 2009).



Rys. 1. Reakcja chemiczna powstawania estrów metylowych kwasów tłuszczowych.
Fig. 1. Chemical reaction of fatty acid methyl ester formation.

Głównym efektem procesu estryfikacji jest istotne zmniejszenie drobin paliwa oraz znaczne obniżenie lepkości. Proces ten pozwala na wyeliminowanie powstawania niepożądanych osadów w komorze spalania poprzez usunięcie trójglicerydów. Finalnie w procesie estryfikacji obniżona zostaje temperatura mętnienia i krzepnięcia oraz polepszona zostaje lotność produktu w porównaniu do pierwotnego surowca. Obecność grupy estrowej, która upodobnia chemicznie estry do właściwości niektórych lakierów oraz tworzyw sztucznych, powoduje skłonność tego paliwa do rozpuszczania pewnych lakierów i gumowych uszczelnień. Występujące w niewielkiej ilości kwasy tłuszczowe mogą być przyczyną korozji elementów silnika i niekorzystnie oddziaływać na system paliwowy. Warto dodać, że wymienione niekorzystne cechy FAME mogą być zniwelowane lub całkowicie wyeliminowane poprzez dodawanie do paliwa różnych dodatków uszlachetniających, takich samych jak dodaje się do oleju napędowego. Można zatem stwierdzić, że estry metylowe oleju rzepakowego i oleju lniankowego mogą

być użyte jako samoistne paliwo lub jako biokomponent dodawany do oleju napędowego i stosowane w silnikach z zapłonem samoczynnym, bez ich przebudowywania (Tab. 5) (Leung i in., 2014, Wojtkowiak i in., 2009b).

Estry metylowe oleju lniankowego i rzepakowego spełniają normy PN-EN 14214 w zakresie kluczowych parametrów, takich jak suma estrów metylowych, liczba kwasowa, zawartość nieprze-reagowanych glicerydów oraz wolnego glicerolu. Pełne spełnienie wszystkich formalnych wymogów tej normy przez czyste estry metylowe oleju lniankowego jako paliwa do silników wysokopiętnych jest jednak niemożliwe, ze względu na specyficzne właściwości wynikające ze składu surowca tłuszczowego. Dotyczy to szczególnie dopuszczalnej wartości liczby jodowej, zawartości estrów metylowych kwasu linolenowego (C_{18:3}) oraz, w mniejszym stopniu, temperatury zimnego filtra (Kołodziejczyk i in., 2012).

Badacze z zespołu Camelii Ciubota-Rosie (2013) charakteryzowali biodiesel na bazie oleju z lnianki siewnej, i poza wieloma pozytywnymi

Tabela 5
Table 5Właściwości estrów metylowych otrzymanych z oleju lniankowego oraz oleju rzepakowego
Properties of methyl esters obtained from camelina oil and rapeseed oil

Parametr	Estry metylowe oleju lniankowego	Estry metylowe oleju rzepakowego	Wymagania wg normy PN-EN 14214	
			min.	max.
Woda [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	200	290	-	500
Liczba kwasowa [$\text{mg KOH}\cdot\text{g}^{-1}$]	0,15	0,22	-	0,50
Wolny glicerol [%]	0,00	0,02	-	0,02
Monoglicerydy [%]	0,10	ślad.	-	0,80
Diglicerydy [%]	0,03	ślad.	-	0,20
Triglicerydy [%]	0,00	0,00	-	0,20
Σ Estrów metylowych [%]	99,21	98,27	96,5	-
Estry metylowe kwasu $\text{C}_{18:3}$ [%]	36,5	8,7	-	12
Liczba jodowa [$\text{g I}_2\cdot(100\text{ g})^{-1}$]	156,0	111,0	-	120
Temperatura blokady zimnego filtra [$^{\circ}\text{C}$]	-5,0	-10,0	w zależności od strefy klimatycznej	w zależności od strefy klimatycznej

aspektami otrzymanego paliwa, wskazują również na jego wady wynikające z dużej zawartości związków nienasyconych. Obliczona wartość liczby cetanowej, która jest kluczowym parametrem determinującym jakość oleju napędowego, wynosiła 42,76 i została policzona zgonie z normą EN 15195. Wynik ten nie spełnia wymagań normowych według których wartość ta powinna być nie niższa niż 47 (ASTM D6751-09) lub 51 (UNE-EN 14214:2010). Liczba cetanowa zależy od długości łańcucha oraz od ilości wiązań podwójnych w taki sposób, że wzrasta wraz ze wzrostem długości łańcucha oraz ze spadającą ilością wiązań podwójnych. Kolejnym parametrem którego nie spełnia paliwo wytworzone z oleju lniankowego jest odporność na utlenianie. Otrzymany wynik pomiaru, wykonywanego zgodnie z normą EN 14112, wynosił 1,3 godziny, natomiast powinien on wynosić nie mniej niż 3 lub 6 godzin zgodnie z normami, odpowiednio ASTM D6751-09 oraz UNE-EN 14214:2010. Autorzy zwrócili również uwagę na krzywą destylacji estrów metylowych otrzymanych z oleju lniankowego. Zakres temperatur wrzenia estrów metylowych jest mniejszy niż w przypadku oleju napędowego ze względu na wyższą temperaturę początku wrzenia estrów, w porównaniu z konwencjonalnym paliwem. Zgodnie z normą ASTM D6751, maksymalna temperatura odparowania 90% surowca powinna wynosić 360°C . Parametr ten nie jest regulowany europejską normą EN 14214, natomiast jest on ważny pod względem pracy silnika oraz emisji zanieczyszczeń. Rozcieńczanie oleju smarowego silnika może prowadzić do jego poważnych uszkodzeń, dodatkowo wysoka temperatura wrze-

nia estrów jest związana z obecnością niedopalonego paliwa w spalinach, szczególnie przy pracy silnika na biegu jałowym (Ciubota-Rosie i in., 2013).

Wydajność procesu transestryfikacji oleju lniankowego prezentuje się obiecująco. Otrzymane wyniki wynoszą 89,65% (Wojtkowiak i in., 2009b), a nawet 97,5% (Ciubota-Rosie i in., 2013). Wysoka wydajność procesu oraz spełnienie większości wymagań stawianych bio-paliwom czyni lniankę obiecującym surowcem. Obecnie jednak niemożliwe jest stosowanie czystych estrów oleju lniankowego jako paliwa do silników z zapłonem samoczynnym, natomiast można ich używać jako domieszek do konwencjonalnego oleju napędowego. Poprzez zmieszanie estrów oleju lniankowego z estrami oleju rzepakowego oraz dodanie odpowiednich dodatków uszlachetniających możliwe jest otrzymanie oleju napędowego spełniającego wymagane normy. Obiecującym kierunkiem polepszenia właściwości paliwa otrzymanego z lnianki jest modyfikacja genetyczna rośliny, tak aby zmniejszyć udział związków nienasyconych w oleju. Zaowocuje to zmniejszeniem wartości liczby jodowej, poprawieniem stabilności oksydacyjnej oraz zwiększeniem liczby cetanowej, czyli poprawi największe wady nowego paliwa (Berti i in., 2016, Ciubota-Rosie i in., 2013, Kołodziejczyk i in., 2012).

Uwodornienie

Proces uwodornienia oleju (HVO) polega na przeprowadzeniu reakcji tłuszczów z wodorem w obecności katalizatora. Głównymi produktami takiej obróbki są nasycone, nierozgałęzione węglowodory posiadające najczęściej od 15 do 18

atomów węgla w cząsteczce oraz propan. Otrzymany propan może być używany jako źródło energii cieplnej oraz elektrycznej dla rafinerii. Dodatkowo w procesie powstają produkty uboczne, którymi są: tlenek węgla (II), tlenek węgla (IV) oraz woda. Podczas procesu zachodzą różne reakcje, takie jak dekarboksylacja (powstanie CO_2), dekarbonylacja (powstanie CO i H_2O), uwodornienie oraz hydroodtlenianie (powstanie H_2O). Powstające w procesie ciekłe węglowodory posiadają wysoką wartość liczby cetanowej i mieszczą się w przedziale od 80 do 99 (Mussa i in., 2024, Aatola i in., 2008). Dodatkowo uwodorniony olej posiada znaczące zalety względem FAME (Tab. 6), ponieważ może on być mieszany w dowolnych ilo-

ściach z olejem napędowym, a nawet wykorzystywany sam, jako czyste paliwo do silników o zapłonie samoczynnym bez konieczności ich przebudowy. HVO ma również mniejsze skłonności do zapychania filtra paliwowego oraz poprawia smarność po zmieszaniu z olejem napędowym. FAME cechuje się większą skłonnością do absorbowania wilgoci oraz gorszą stabilnością podczas długoterminowego składowania. Warto również zwrócić uwagę na fakt, iż jakość otrzymanego HVO w bardzo małym stopniu zależy od surowca, z którego się go otrzymuje, natomiast jakość FAME zależy od kompozycji kwasów tłuszczowych zawartych w oleju z którego jest produkowane (Mussa i in., 2024, Sikora i in., 2022, Aatola i in., 2008).

Tabela 6

Table 6

Porównanie typowych właściwości HVO i FAME z oleju rzepakowego oraz oleju napędowego klasy letniej (EN 590:2004)
Comparison of typical properties of HVO and FAME from rapeseed oil and summer grade diesel fuel EN 590:2004)

Parametr	HVO	FAME	ON
Gęstość w 15 °C [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	775-785	885	835
Lepkość kinematyczna w 40°C [$\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	2,5-3,5	4,5	3,5
Liczba cetanowa	80-99	51	53
Zakres destylacji [°C]	180-320	350-370	180-360
Punkt mętnienia [°C]	-25 - -5	-5	-5
Wartość opałowa [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	44	37,5	42,7
Wartość opałowa [$\text{MJ}\cdot\text{dm}^{-3}$]	34,4	33,2	35,7
Zawartość aromatów [%]	0	0	30
Zawartość wielopierścieniowych aromatów [%]	0	0	4
Zawartość tlenu [%]	0	11	0
Zawartość siarki [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$]	<10	<10	<10
Smarność HFRR w 60 °C [μm]	<460 ¹	<460	<460 ¹
Stabilność magazynowania	Dobra	Niezadowalająca	Dobra

Źródło: opracowanie własne na podstawie Aatola, Larmi, Sarjovaara (2008, s. 2)
Source: own study, based on Aatola, Larmi, Sarjovaara (2008, p. 2)

Innym zastosowaniem HVO jest produkcja paliw lotniczych. Nasycone węglowodory otrzymane po uwodornieniu można poddać procesowi hydrokrakingu lub katalitycznego krakingu, a następnie izomeryzacji. W wyniku takiej obróbki otrzymuje się rozgałęzione węglowodory aromatyczne oraz łańcuchowe o mniejszych masach cząsteczkowych. Berti wraz z zespołem (2016) przebadali paliwo lotnicze otrzymane z oleju z lnianki siewnej, które cechuje się dużo większą stabilnością oksydacyjną niż tradycyjne paliwo JP-8. Dodatkowo po przeprowadzeniu testów silnikowych nie wykazano żadnych nieprawidłowości w działa-

niu silnika, natomiast odnotowano zmniejszoną emisję sadzy oraz tlenku węgla (II) w porównaniu z paliwem JP-8. Testy kompatybilności materiałowej wykazały, że paliwo z lnianki ma zdolność do pęcznienia elastomerów w pierścieniach uszczelniających z nitrilu, jednakże pęcznienie elastomerów było znacznie mniejsze niż w przypadku paliwa JP-8.

Odmienne podejście badaczy dotyczy stosowania mieszanek biopaliw z tradycyjnymi paliwami, np. zespół Jęczmionek (2010) przedstawił proces współuwodornienia oleju lniankowego z frakcją naftową z rafinerii i porównali to do takiej sa-

mej próby z wykorzystaniem oleju rzepakowego. Proces był przeprowadzony z zawartością oleju roślinnego na poziomie 20% (v/v), stosunkiem wodoru do surowca (H_2 /surowiec) wynoszącym 300:1, zastosowano dwa poziomy ciśnienia 3,0 i 6,0 MPa, a temperatura procesu za każdym razem wynosiła 320°C. Otrzymane rafinaty były klarownymi, przezroczystymi, bezbarwnymi cieczami. We wszystkich próbkach stwierdzono całkowite przereagowanie trójglicerydów z tłuszczów oraz odsiarczenie hydrrafinatów do poziomu poniżej 5 mg·kg⁻¹. Zauważono, że zawartość n-parafin w hydrrafinacie z oleju lniankowego jest o 3% wyższa gdy proces prowadzi się pod ciśnieniem 6 MPa w porównaniu do przebiegu procesu w niższym ciśnieniu. Temperatura mętnienia produktu otrzymanego w procesie prowadzonym pod niższym ciśnieniem (3 MPa) była niższa niż ta dla procesu prowadzonego pod wyższym ciśnieniem (6 MPa), jednakże różnica nie przekracza 1,4 °C. Temperatury mętnienia hydrrafinatu z udziałem oleju lniankowego były około 1 °C wyższe niż dla hydrrafinatu z udziałem oleju rzepakowego. Jest to najprawdopodobniej spowodowane większą zawartością cięższych kwasów tłuszczowych w oleju lniankowym. Dodatkowo stwierdzono większe zapotrzebowanie na wodor dla oleju lniankowego podczas hydrokonwersji o około 20% w porównaniu do oleju rzepakowego. Jest to spowodowane większą liczbą wiązań podwójnych przypadających na cząsteczkę triglicerydu w oleju lniankowym w porównaniu do oleju rzepakowego. Może to również skutkować powstawaniem wyższych temperatur w reaktorze hydrokonwersji podczas prowadzenia procesu z użyciem oleju lniankowego, gdyż reakcja uwodornienia wiązań podwójnych jest silnie egzotermiczna. Wang ze współpracownikami (2020) wykazali zaś, że paliwo pochodzące z oleju lniankowego może być stosowane jako składnik mieszanki z JP-8, zachowując wysoką wydajność spalania, a jednocześnie zapewniając bardzo niską emisję CO i NOx oraz pomagając w redukcji emisji CO₂.

HVO, w przeciwieństwie do estrów metylowych, charakteryzuje się wysoką liczbą cetanową, znakomitą stabilnością oksydacyjną, korzystniejszą krzywą destylacyjną – niższą temperaturą odparowania 90% surowca oraz możliwością stosowania w dowolnych proporcjach z olejem napędowym. Odznacza się mniejszą skłonnością do absorpcji wody, lepszymi właściwościami filtracyjnymi i dłuższą trwałością przechowywania. Olej z lnianki siewnej jest obiecującym surowcem do produkcji HVO, które może znaleźć zastosowanie zarówno w transporcie drogowym jak i w lotnictwie (Hunicz i in. 2021).

Pozapaliwowe zastosowanie lnianki siewnej w przemyśle

Lnianka siewna, jako źródło lignocelulozy, może być z powodzeniem wykorzystywana do

produkcji bioetanolu drugiej generacji, lecz jej potencjał nie ogranicza się tylko do produkcji biopaliw, ale również jako składnik biokompozytów lub surowiec do produkcji tworzyw sztucznych. Jednymi z bardziej znanych polimerów, w których wykorzystuje się lniankę siewną, są poliuretany. Lignoceluloza zawiera wolne grupy hydroksylowe, dzięki czemu może reagować z diizocyanianami, wbudowywać się w strukturę poliuretanu i bezpośrednio wpływać na parametry fizyko-mechaniczne tego polimeru (Arshad i in. 2022). Bartczak i in. (2024) w swojej publikacji przedstawili wykorzystanie słomy i wyłoków lnianki siewnej jako wypełniacza w integralnej piance poliuretanowej i wykazali poprawę takich parametrów pianki jak: wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie przy zerwaniu, współczynnik kompresji oraz wytrzymałość na rozdarcie.

Bogata w kwasy tłuszczowe lnianka siewna jest również wskazywana jako alternatywny surowiec do produkcji biopoliole wykorzystywanych w segmencie poliuretanów. W myśl zasad zielonej chemii są one coraz częściej i chętniej wykorzystywane w sektorze poliuretanów jako substytuty poliole ropopochodnych (Omonov, Kharraz, Curtis 2017). Olej z lnianki został zidentyfikowany jako odnawialny i niejadalny surowiec do syntezy biopochodnych pianek poliuretanowych dzięki zastosowaniu modyfikacji chemicznej poprzez transestryfikację trietanolaminą w celu uzyskania pochodnych hydroksylowanych (biopoliole). W wyniku tej modyfikacji chemicznej otrzymano trzy biopoliole, charakteryzujące się średnią masą molową ~500 g mol⁻¹, liczbą hydroksylową ~320 mg KOH·g⁻¹, funkcjonalnością ~2,8 i lepkością < 200 mPa·s. Biopoliole zostały następnie wykorzystane do wytworzenia materiałów piankowych o właściwościach lepkosprężystych. Otrzymane pianki miały gęstość pozorną około 70 kg·m⁻³, twardość poniżej 2,5 kPa, współczynnik podparcia (obliczony jako stosunek naprężenia ściskającego przy odkształceniu 65% do naprężenia przy odkształceniu 25%) powyżej 2 i sprężystość mniejszą niż 10% (Małewska i in. 2025).

Olej lniankowy jako źródło nienasyconych kwasów tłuszczowych znalazł również swoje zastosowanie w materiałach powłokowych i żywicznych. Wspomniane zastosowanie opisali Li, Wang i Sun (2018), którzy zmodyfikowali olej na drodze epoksydacji, uzyskując epoksydowany olej lniankowy i potwierdzili możliwość jego zastosowania jako przezroczyste powłoki ochronne utwardzane promieniowaniem UV nakładane na drewno. Z kolei Nosal ze współpracownikami (2016) wykorzystali epoksydowany olej lniankowy jako surowiec do wytworzenia żywic alkidowych, które swoje zastosowanie posiadają w branży materiałów powłokowych. Użycie oleju lniankowego jako biosurowca w wymienionych wyżej przypadkach ma swoje bezpośrednie przełożenie na final-

ne właściwości materiału, a zwłaszcza takie parametry jak: czas schnięcia powłok, elastyczność oraz twardość Persoza. Wykorzystanie bardziej przyjaznych dla środowiska materiałów polimerowych opartych na surowcach odnawialnych to w dzisiejszym świecie fundament zrównoważonego rozwoju.

Podsumowanie

W związku z rosnącym zainteresowaniem wykorzystywania niejadalnych olejów roślinnych w przemyśle, popularność zyskuje uprawa Inianki siewnej, która ma ograniczone zastosowanie jako olej spożywczy i jest szeroko badana jako surowiec do różnych zastosowań przemysłowych zarówno w Europie, jak i na świecie. Opisany materiał wskazuje na zastosowanie oleju i biomasy z Inianki w kierunkach takich jak między innymi: biopaliwa, kleje i powłoki, biopolimery i biokompozyty. Inianka jest obiecującą rośliną o potencjale przemysłowym, cechującą się szeregiem korzyści, takich jak niskie wymagania glebowe i nawozowe, odporność na niekorzystne warunki klimatyczne, w tym na niskie temperatury i suszę. Po ekstrakcji oleju, wytloki nasienne mogą być wykorzystywane jako bogata w składniki odżywcze pasza dla zwierząt, a resztki lignocelulozowe można potraktować jako surowiec do produkcji biopaliw z biomasy lub źródło wyżej wartościowych biochemikaliów.

Różne odmiany Inianki nie są jednak wolne od pewnych ograniczeń, które muszą zostać zweryfikowane. Kluczowym czynnikiem ograniczającym konkurencyjność Inianki siewnej względem rzepaku jest relatywnie niższy uzysk oleju z jednostki uprawy, co w przeszłości decydowało o jej stop-

niowym wypieraniu przez bardziej wydajne odmiany rzepaku w strukturze zasiewów roślin oleistych. Pomimo licznych korzystnych cech, Inianka siewna charakteryzuje się obecnie ograniczonym znaczeniem gospodarczym, co związane jest z niedostatecznym doświadczeniem w zakresie współczesnych technologii oraz doświadczenia w jej uprawie oraz niewystarczająco rozwiniętą infrastrukturą przetwórczą. Innym aspektem ograniczającym uprawy Inianki w Polsce jest fakt, że po dziesięcioleciach nieuprawiania, dostępność odpowiednich odmian i materiału siewnego może stanowić wyzwanie, szczególnie w pierwszych latach propagowania upraw wśród rolników.

Powyższym ograniczeniom powinno się przeciwdziałać w sposób systemowy, zarówno na poziomie regulacyjnym i politycznym – poprzez wspieranie rolników, wprowadzając dopłaty do upraw Inianki, szczególnie na gruntach słabszej klasy; na poziomie naukowym i badawczym – przez selekcję odmian dostosowanych do lokalnych warunków klimatycznych, modyfikację genetyczną dla poprawy właściwości paliwowych, a także poprzez optymalizację agrotechniki, z określeniem najlepszych praktyk uprawy Inianki i badania nad pełnym wykorzystaniem biomasy tej rośliny; na poziomie przemysłowym – dzięki rozwojowi łańcucha wartości, modernizację i adaptację tłoczni olejów, zintegrowane biorafinerie, rozwój technologii HVO. Kluczowa jest również edukacja i promocja społeczna dotycząca upraw Inianki siewnej. Sukces wymaga skoordynowanych działań na wielu poziomach oraz długoterminowego zaangażowania różnych interesariuszy.

Bibliografia

- Aatola H., Larmi M., Sarjovaara T. (2008). Hydrotreated vegetable oil (HVO) as a renewable diesel fuel: Trade-off between NO_x, particulate emission, and fuel consumption of a heavy duty engine. *SAE International Journal of Engines*, 1(1). DOI: <https://doi.org/10.4271/2008-01-2500>
- Arshad M., Mohanty A.K., Van Acker R., Riddle R., Todd J., Khalil H., Misra M. (2022). Valorization of camelina oil to biobased materials and biofuels for new industrial uses: a review. *RSC Advances* 42(12), 27230-27245. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2RA03253H>
- ASTM D6751-19 - Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock Middle Distillate Fuels
- Bartczak P., Ejm W., Bacik O., Przybylska-Balcerek A., Borysiak S. (2024). Camelina sativa (L.) Crantz straw and pomace as a green filler for integral skin polyurethane foam. *Industrial Crops and Products*, 222(4), 119931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119931>
- Belayneh, H.D., Wehling, R.L., Cahoon, E., Ciftci, O.N. (2015). Extraction of omega-3-rich oil from Camelina sativa seed using supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 104, 153-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2015.06.002>
- Beldycka-Bórawska A. (2023). Changes in the production of rapeseed in Poland after accession to the European Union. *Annals PAAAE*, XXV(4), 11-25. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9443>
- Berti M., Gesch R., Eynck C., Anderson J.V., Cermak S.C. (2016). Camelina uses, genetics, genomics, production, and management. *Industrial Crops and Products*, 94(8), 690-710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.09.034>
- Blume R.Y., Lantukh G.V., Levchuk I.V., Lukashevych K.M., Rakhmetov D.B., Blume Y.B. (2020). Evaluation of potential biodiesel feedstocks: Camelina, turnip rape, oil radish and tyfon. *The Open Agriculture Journal*, 14:299. DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/1874331502014010299>
- Brock J.R., Ritchey M.M., Olsen K.M. (2022). Molecular and archaeological evidence on the geographical origin of domestication for Camelina sativa. *American Journal of Botany*, 109(7), 1177-1190. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajb2.16027>
- Che Mat S., Idroas M.Y., Hamid M.F., Zainal Z.A. (2018). Performance and emissions of straight vegetable oils and its blends as a fuel in diesel engine: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(1), 808-823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.080>

- Chowdhury P., Mahi N.A., Yeassin R., Chowdhury N.U.R., Farrok O. (2025). Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges. *Energy Conversion and Management: X*, 25, 100889. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100889>
- Ciubota-Rosie C., Ruiz J.R., Ramos M.J., Perez A. (2013). Biodiesel from *Camelina sativa*: A comprehensive characterization. *Fuel*, 105, 572-577. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.062>
- Clavijo-Bernal E.J., Martínez-Force E., Garcés R., Salas J.J., Venegas-Calderón M. (2024). Biotechnological camelina platform for green sustainable oleochemicals production. *OCL - Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, 31, 11. DOI: <https://doi.org/10.1051/ocl/2024007>
- CONCAWE report no. 9/09 (2009) — Guidelines for handling and blending FAME, https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/rpt_09-9-2009-05088-01-e.pdf (dostęp: 12.08.2025).
- EN 15195 - Liquid petroleum products - Determination of ignition delay and derived cetane number (DCN) of middle distillate fuels by combustion in a constant volume chamber
- EN 590:2004 - Automotive fuels - Diesel - Requirements and test methods
- FPRO [Fundusz Promocji Roślin Oleistych] (2024) Uchwała Nr 3/2024 Komisji Zarządzającej Funduszu Promocji Roślin Oleistych z dnia 12 lipca 2024 r. w sprawie przyjęcia strategii promocji dla branży roślin oleistych na 2025 rok. <https://www.gov.pl/attachment/4aed41f1-6518-4e5b-aa38-aaf707ac19e1> (dostęp: 17.07.2025).
- Ghidoli M., Pesenti M., Colombo F., Nocito F.F., Pili R., Araniti F. (2023). *Camelina sativa* (L.) Crantz as a promising cover crop species with allelopathic potential. *Agronomy*, 13(8), 2187. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13082187>
- Gómez E., Hueros G., Mostaza-Colado D., Capuano A., Uscola M., Mauri P.V. (2025) Comparative analysis of the expression of genes involved in fatty acid synthesis across *Camelina* varieties. *Agriculture*, 15(12), 1305. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15121305>
- Haslam R.P., Michaelson L.V., Eastmond P.J., Napier J.A. (2025) Born of frustration: the emergence of *Camelina sativa* as a platform for lipid biotechnology. *Plant Physiology*, 197(2), k1af009. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/k1af009>
- Hunicz J., Krzaczek P., Gęca M., Rybak A., Mikulski M. (2021). Comparative study of combustion and emissions of diesel engine fuelled with FAME and HVO. *Combustion Engines*, 60(1), 72-78. DOI: <http://dx.doi.org/10.19206/CE-135066>
- Jankowski K., Sokółski M., Kordan B. (2019). *Camelina*: Yield and quality response to nitrogen and sulfur fertilization in Poland. *Industrial Crops and Products*, 141, 111776. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111776>
- Jęczmionek Ł. (2010). Olej z *lnianki siewnej* (*Camelina sativa*) – szansa rozwoju biopaliw II generacji? *Nafta-Gaz*, 9, 841-848.
- Jiang Y., Caldwell C.D., Falk K.C., Lada R.R., MacDonald D. (2013). *Camelina* yield and quality response to combined nitrogen and sulfur. *Agronomy Journal*, 105, 1847-1852. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0240>
- 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), 12574. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151612574>
- 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. *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów*, (s. 49-61). Warszawa: Politechnika Warszawska.
- Krawczyk R., Strażyński P., Mrówczyński M. (red.) (2020) *Metodyka integrowanej ochrony lnianki siewnej dla doradców*. Poznań: Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy. https://www.ior.poznan.pl/plik_3996.metodyka-integrowanej-ochrony-lnianki-siewnej-dla-doradcow-2020-pdf.pdf (dostęp: 19.08.2025).
- Kurasiak-Popowska D. (2019). *Lnianka siewna – roślina historyczna czy perspektywiczna? Fragmenta Agronomica*, 36(2), 42–54. DOI: <https://doi.org/10.26374/fa.2019.36.15>
- 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 Chemistry* 330, 127265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127265>
- Leclère M., Lorent A.-R., Jeuffroy M.-H., Butier A., Chatain C., Loyce C. (2021). Diagnosis of *camelina* seed yield and quality across an on-farm experimental network. *European Journal of Agronomy*, 122, 126190. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126190>
- Leung, D.Y.C., Wu X., Leung M.K.KH. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083-1095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Li Y., Wang D., Sun X.S. (2018). Epoxidized and acrylated epoxidized *camelina* oils for ultraviolet – curable wood coatings. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 95, 1307-1318. DOI: <https://doi.org/10.1002/aocs.12123>
- Lopez C., Rabesona H., Beaumal V., Sotin H., Novales B., Anton M. (2024). Exploring the biodiversity of plant proteins for sustainable foods: Composition and emulsifying properties of the proteins recovered by aqueous extraction from *camelina* (*Camelina sativa* L.) seeds. *Current Research in Food Science*, 9, 100922. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100922>
- Mahious R., Halvacı E., Aygun A., Sen F. (2024). The golden discovery of *Camelina sativa*: a pivotal study of its unique components and its multiple uses in various applications in science and industry. *Journal of Scientific Reports - A*, 59, 105-118. DOI: <http://dx.doi.org/10.59313/jsr-a.1512490>
- Malewska E., Kurasiak-Popowska D., Rzyńska-Szczupak K., Sz wajkowska-Michałek L., Polaczek K., Recupido F., Kurańska M., Stuper-Szablewska K. (2025). *Brassica carinata* and *Camelina sativa* oils as renewable raw materials for producing viscoelastic polyurethane foams. *RSC Advances*, 15(37), 30804-30816. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5ra04620c>
- Markov V., Kamaltdinov V., Devyanin S., Sa B., Zherdev A., Furman V. (2021). Investigation of the influence of different vegetable oils as a component of blended biofuel on performance and emission characteristics of a diesel engine for agricultural machinery and commercial vehicles. *Resources*, 10(8), 74. DOI: <https://doi.org/10.3390/resources10080074>
- Matteo R., D'Avino L., Ramirez-Cando L.J. et al. (2020). *Camelina* (*Camelina sativa* L. Crantz) under low-input management systems in northern Italy: Yields, chemical characterization and environmental sustainability. *Italian Journal of Agronomy*, 15(2), 1519. DOI: <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1519>

- Mierīņa I., Adere L., Krasauska K., Zoltnere E., Skrastiņa D.Z., Jure M. (2017). Antioxidant properties of *Camelina sativa* oil and press-cakes. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, 71(6), 515-521. DOI: <https://doi.org/10.1515/prolas-2017-0089>
- Mosio-Mosiewski J., Łuczkiwicz T., Warzała M., Nawracała J., Nosal H., Kurasiak-Popowska D. (2015). Badania nad zagospodarowaniem Inianki siewnej do wytwarzania biodiesla. *Przemysł Chemiczny* 94(3), 369-373. DOI: <https://doi.org/10.15199/62.2015.3.22>
- Mussa N.-S., Toshtay K., Capron M. (2024). Catalytic applications in the production of hydrotreated vegetable oil (HVO) as a renewable fuel: A review. *Catalysts*, 14(7), 452. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal14070452>
- 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), 772. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11060772>
- Nosal H., Nowicki J., Warzała M., Semeniuk I., Sabura E. (2016). Synthesis and characterization of alkyd resins based on *Camelina sativa* oil, glycerol and selected epoxidized vegetable oils as functional modifiers. *Progress in Organic Coatings*, 101, 553-568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.10.003>
- Omonov T.S., Kharraz E., Curtis J.M. (2017). *Camelina (Camelina Sativa)* oil polyols as an alternative to Castor oil. *Industrial Crops and Products*, 107, 378-385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.041>
- PN-EN 14214 (+A2:2019-05) - Ciekłe przetwory naftowe -- Estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) do użytku w silnikach samochodowych o zapłonie samoczynnym (Diesla) i zastosowań grzewczych - Wymagania i metody badań.
- Podleśna A. (2014). Potrzeby pokarmowe i nawożenie rzepaku ozimego. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 37(11), 111-125. DOI: <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2014.37.09>
- Przybylski R. (2011). Canola/rapeseed oil. [W:] F.D. Gunstone (red.) *Vegetable Oils in Food Technology*. Blackwell Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444339925.ch4>
- Sagan A., Krajewska M., Osmólska E., Starek-Wójcicka A. (2021) Wybrane właściwości chemiczne oleju z Inianki siewnej (*Camelina sativa* L.) suplementowanego naturalnymi dodatkami przeciwutleniającymi. *Przemysł Chemiczny*, 100(10), 935-938. DOI: <https://dx.doi.org/10.15199/62.2021.10.5>
- Sikora M., Orlński P., Matej J. (2022). Hydrorafinowany olej roślinny jako potencjalne biopaliwo do zasilania silników o zapłonie samoczynnym. *Transport samochodowy*, 65(1), 14-20. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0015.8709>
- Sobczak-Malitka W., Sobczak E. (2023). Changes in the vegetable oil market, with particular emphasis on market instability in relation to the war in Ukraine. *Problems of World Agriculture*, 23(1), 46-57. DOI: <https://doi.org/10.22630/PRS.2023.23.1.4>
- Urbanik S.D., Caldwell C.D., Zheljazkov V.D., Lada R., Luan L. (2008). The effect of cultivar and applied nitrogen on the performance of *Camelina sativa* L. in the Maritime Provinces of Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 88(1), 111-119. DOI: <https://doi.org/10.4141/CJPS07115>
- Wang Z., Feser J.S., Lei T., Gupta A.K. (2020). Performance and emissions of camelina oil derived jet fuel blends under distributed combustion condition. *Fuel*, 271, 117685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117685>
- Wojtkowiak R., Frąckowiak P., Glazar K., Zembrowski K. (2009a). Koszty produkcji nową metodą estrów metylowych z oleju Inianki siewnej (*Camelina sativa* L.) do zasilania tłokowych silników spalinowych z zapłonem samoczynnym (ZS). *Journal of Research and Application in Agriculture Engineering*, 54(4), 164-170.
- Wojtkowiak R., Frąckowiak P., Kaczyński P. (2009b). Nowa metoda otrzymywania z oleju Inianki siewnej (*Camelina sativa* L.) estrów metylowych do zasilania tłokowych silników spalinowych z zapłonem samoczynnym (ZS). *Journal of Research and Application in Agriculture Engineering*, 54(4), 171-178.
- Zaluski D., Tworowski J., Krzyżaniak M., Stolarski M.J., Kwiatkowski J. (2020). The characterization of 10 spring *Camelina* genotypes grown in environmental conditions in North-Eastern Poland. *Agronomy*, 10(1), 64. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010064>
- Zanetti F., Alberghini B., Marjanović Jeromela A. et al. (2021). *Camelina*, an ancient oilseed crop actively contributing to the rural renaissance in Europe: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 2. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00663-y>