



Zbiór pszenżyta ozimego z poletek doświadczalnych IHAR-PIB w Radzikowie
z zastosowaniem kombajnu poletkowego Wintersteiger Quantum Plus

Fot. Monika Żurek

BIULETYN
INSTYTUTU HODOWLI
I AKLIMATYZACJI ROŚLIN
Nr 303/304 / 2025



Zbiór pszenżyta ozimego z poletek doświadczalnych IHAR-PIB w Radzikowie
z zastosowaniem kombajnu poletkowego Wintersteiger Quantum Plus
Fot. Monika Żurek

RADZIKÓW 2025
INSTYTUT HODOWLI I AKLIMATYZACJI ROŚLIN
— PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
RADZIKÓW, 05-870 BŁONIE pod WARSZAWĄ

INSTYTUT HODOWLI I AKLIMATYZACJI ROŚLIN
– PAŃSTWOWY INSTYTUT BADAWCZY
Dyrektor: dr Sławomir Sowa

Komitet Redakcyjny:
Editorial Team:

DARIUSZ R. MAŃKOWSKI (Redaktor Naczelny — Editor-in-Chief),
TOMASZ GÓRAL,
KRYSTYNA RYBKA,
KRZYSZTOF TREDER,
DOROTA SOŁTYS-KALINA (Sekretarz Redakcji — Editorial Secretary)

CZASOPISMO UKAZUJE SIĘ OD 1951 ROKU

Profesor dr hab. Mirosława Chrzanowska (1936-2025)



Wirusolog,

Kierownik Pracowni Badania Odporności na Wirusy Oddziału IHAR w Młochowie

Mirosława Chrzanowska, profesor doktor habilitowany nauk rolniczych, zmarła 19 stycznia 2025 roku w wieku 88 lat. Nieprzerwanie od 1959 roku pracowała przez 55 lat, najpierw w Oddziale IHAR w Żelaznej koło Skierniewic, a następnie w Oddziale IHAR w Młochowie. W latach 1967-1986 Oddział był w strukturze Instytutu Ziemiaka. Profesor była jedną z ostatnich żyjących osób, które w 1966 roku tworzyły obecny Oddział IHAR w Młochowie. Całe zawodowe życie Profesor Mirosławy Chrzanowskiej było związane z badaniami wirusów ziemniaka.

Mirosława Chrzanowska urodziła się w 25 sierpnia 1936 roku w Przemyśle. Studia na Wydziale Rolniczym Wyższej Szkoły Rolniczej w Poznaniu ukończyła w 1959 roku. Stopień doktora nauk rolniczych uzyskała w 1974 roku po obronie rozprawy pt. „Ocena odporności ziemniaka na wirus Y na podstawie sztucznego zakażenia roślin w szklarni”, której promotorem był profesor dr hab. Władysław Błaszczak na Wydziale Ogrodniczym Akademii Rolniczej w Poznaniu. Również na tym Wydziale w 1986 roku uzyskała stopień doktora habilitowanego nauk rolniczych na podstawie rozprawy pt. „Zmienność reakcji ziemniaka na wirus M”. Tytuł profesora nauk rolniczych uzyskała w 1995 roku na wniosek Rady Wydziału Ogrodniczego Akademii Rolniczej w Poznaniu.

Zawodową pasją Profesor Chrzanowskiej była identyfikacja wirusów atakujących ziemniak, poznanie ich biologii, zmienności, szczepów, czy charakteryzowanie reakcji roślin na porażenie wirusami. Wraz ze swoim Zespołem wypracowała urzędowy system oceny odporności odmian ziemniaka na ważne ekonomicznie wirusy ziemniaka, poprzez dobór metod oraz szczepów wirusów do tej oceny. Po raz pierwszy w Polsce Profesor znalazła i zidentyfikowała szczepy nekrotyczne wirusa Y ziemniaka (PVY), łagodny i ostry, wirusa nekrozy tytoniu (TRV), wirusa bukietowatości ziemniaka (TBRV) i wirusa mozaiki lucerny (AMV) na ziemniakach rosnących w polu. Ponadto, opisała objawy na ziemniaku wywołane przez wirusy, dla których ziemniak nie jest typowym gospodarzem, np. wirus mozaiki tytoniu (TMV) i wirus mozaiki ogórka (CMV). Scharakteryzowała reakcję całej kolekcji odmian ziemniaka na wirusy: wirus liściozwoju (PLRV), wirus Y ziemniaka (PVY), wirus X ziemniaka (PVX), wirus M ziemniaka (PVM) i wirus S ziemniaka (PVS) oraz na kwarantannowy wiroid wrzecionowatości bulw (PSTVd).

Profesor Mirosława Chrzanowska szereg prac poświęciła ocenie odporności roślin na choroby wirusowe. Była współtwórcą urzędowego systemu oceny odporności oraz reakcji na wirusy odmian ziemniaka dla celów ich rejestracji, nasiennictwa i hodowli. Cyklicznie prowadziła szkolenia w tym zakresie.

Przez Jej ręce przeszły setki ocenianych linii hodowlanych oraz odmian ziemniaka. Do celów szkoleniowych i badawczych współtworzyła kolekcję wirusów ziemniaka oraz gatunków roślin wskaźnikowych służących biologicznej identyfikacji wirusów i ich szczepów. Kolekcja ta od ponad 50 lat obsługuje potrzeby badań i hodowli ziemniaka. Profesor Chrzanowska była twórcą unikatowego pola szkoleniowego, na którym demonstrowano degenerację odmian ziemniaka pod wpływem porażenia wirusami.

Swoją wiedzę chętnie udostępniała młodszym pracownikom nauki, hodowcom, producentom. Czynnie brała udział w corocznie organizowanych szkoleniach hodowców i producentów ziemniaka oraz w dniach pola. Niestrudzenie propagowała konieczność podnoszenia odporności na wirusy w hodowlanych odmianach ziemniaka.

Wszyscy młodzi pracownicy rozpoczynający swój naukowy żywot w Oddziale w Młochowie przechodzili przez swoistą szkołę Profesor Chrzanowskiej — rozpoznawania objawów wirusów na ziemniakach i roślinach testowych. Do ostatnich dni pracy chętnie diagnozowała chore próbki ziemniaków i innych gatunków roślin przysyłane pocztą czy zwożone przez okolicznych producentów szukających pomocy.

Jej pionierskie badania nad wirusami ziemniaka, zwłaszcza nekrotycznymi szczepami wirusa Y ziemniaka (PVY^N), były zaczynem do dalszych badań genetycznych i molekularnych w ośrodkach badawczych w kraju i zagranicą. Profesor Mirosława Chrzanowska współpracowała z pokrewnymi zespołami naukowych placówek w kraju (Instytutu Biochemii i Biofizyki Polskiej Akademii Nauk, Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, Instytutu Uprawy i Nawożenia, Instytutu Ochrony Roślin) oraz zagranicą (Narodowego Instytutu Badań Rolniczych we Francji — INRA, Instytutu Ziemniaka w Gross Lüsewitz w Niemczech, Uniwersytetu Rolniczego w Keszthely na Węgrzech, Instytutu Przemysłu Roślinnego im. N. I. Wawilowa w Sankt Petersburgu, Rosja — WIR). W 1971 roku Profesor Chrzanowska odbyła 4-miesięczny staż naukowy w Instytucie Ochrony Roślin (IPO) w Wageningen w Holandii.

Profesor Mirosława Chrzanowska opublikowała ponad 100 oryginalnych prac naukowych i ponad 50 artykułów popularnonaukowych. Jest autorką rozdziału pt. „Symptomatologia chorób wirusowych” w podręczniku „Biologia ziemniaka”, wydanym pod redakcją Wojciecha Gabriela (PWN 1985). Jest współautorem patentu „Sposób otrzymywania roślin odpornych na wirus Y ziemniaka”, uzyskanego w 2004 roku przez IBB PAN w Warszawie. Profesor była promotorem trzech przewodów doktorskich. Przez wiele lat Profesor Mirosława Chrzanowska była członkiem Rady Naukowej Instytutu Ziemniaka w Boninie i Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Radzikowie, gdzie była wiceprzewodniczącą Rady oraz przewodniczącą Komisji Ekonomiczno-Organizacyjnej. Była przedstawicielem Polski w Grupie Ekspertów ds. Standaryzacji Sadzeniaków Ziemniaka przy EWG w Genewie, w której przez pięć lat pełniła funkcję wiceprzewodniczącej Grupy Sprawozdawców.

Polskie Towarzystwo Fitopatologiczne na XV Zwyczajnym Walnym Zgromadzeniu w dniu 9 września 2014 roku, w uznaniu zasług Profesor Mirosławy Chrzanowskiej nadało Jej Godność Członka Honorowego Polskiego Towarzystwa Fitopatologicznego. Za osiągnięcia w pracy zawodowej Profesor Mirosława Chrzanowska została uhonorowana Krzyżem Kawalerskim Orderu Odrodzenia Polski (2001), Złotym Krzyżem Zasługi (1986), Srebrnym Krzyżem Zasługi (1977), medalami 30-Lecia PRL (1974), Zasłużony dla Ziemi Koszalińskiej (1984) oraz odznaką Zasłużony Pracownik Rolnictwa (1985). Otrzymała nagrodę zespołową I stopnia Ministra Rolnictwa za pracę pt. „Ocena odporności na wirusy odmian i materiałów hodowlanych” (1981), Nagrodę Państwową II stopnia za pracę pt. „Opracowanie metod hodowli odpornościowej i uzyskanie ziemniaków odpornych na wirusy Y i liściozwoju” (1984), wyróżnienie Wydziału V Nauk Rolniczych, Leśnych i Weterynaryjnych Polskiej Akademii Nauk za współautorstwo cyklu wybitnych prac pt. „RNA genomy patogenów roślin użytkowych — struktury, funkcje, kontrola, rozprzestrzenianie” (1999).

Profesor Mirosława Chrzanowska prowadziła aktywną działalność społeczną. Miała naturę kronikarza oraz archiwisty, więc opracowała kronikę miejscowości Młochów, w oparciu o którą powstało kilka prac magisterskich (SGGW), dyplomowych i doktorskich. Nauka była Jej pasją, ale nie wyłączną. W 2022 roku wraz ze swoją córką, Profesor Renatą Lebecką, napisały i wydały pierwszą książkę — album o Młochowie, ukochanym przez Autorki, pt. „Stare dzieje Młochowa i historie ludzi z nim związanych”. Profesor Chrzanowska na temat historii Młochowa wygłosiła wiele prezentacji w szkołach na terenie gminy Nadarzyn i w Nadarzyńskim Ośrodku Kultury.

Profesor Mirosława Chrzanowska zebrała utwory napisane na temat ziemniaka w czterech tomach, o wspólnym tytule „Ziemniak w poezji i literaturze pięknej”. Zebrała również obfite zbiory ciekawostek o ziemniaku. Profesor pieczołowicie gromadziła kroniki z historii Oddziału IHAR w Młochowie z lat 1967-2005, w których królowały wierszyki okolicznościowe pisane unikatowym rymem częstochowskim. Kochała psy. Od wielu lat wspierała finansowo fundację „Labrador”, szkolącą psy przewodniki i psy asystujące oraz kampanię „Ratuj konie”. Do ostatnich dni zachowała jasność myślenia i ciekawość świata. Z uwagą śledziła wiadomości polityczne oraz, jako wierny kibic, mecze piłkarskie i wyścigi Formuły 1.

Swoją postawą życiową Profesor Mirosława Chrzanowska zdobyła nasze nieprzemijające uznanie i szacunek. Odeszła kolejna ważna osoba, która była filarem badań wirusologicznych Oddziału i żywą pamięcią historii Młochowskiej społeczności.

Profesor Mirosława Chrzanowska została pochowana na Cmentarzu Parafialnym w Młochowie. Pozostanie w naszej dobrej pamięci.

Młochów, 2025 r.

Ewa Zimnoch-Guzowska

From degradation to growth: intercropping insights

Od degradacji do wzrostu: spostrzeżenia dotyczące współrzędnych upraw

Beata Barszczowska¹ , Sherif Ibrahim Abdel-Wahab² , Tamer Ibrahim Abdel-Wahab³ , Eman Ibrahim Abdel-Wahab⁴ , Magda Barszczowska⁵ 

¹Katowice Business University, Katowice, Poland

²Crop Intensification Research Department, Field Crops Research Institute, Agricultural Research Center (ARC), 12619 Giza, Egypt

³Crop Intensification Research Department, Field Crops Research Institute, Agricultural Research Center (ARC), 12619 Giza, Egypt

⁴Food Legumes Research Department, Field Crops Research Institute, Agricultural Research Center (ARC), 12619 Giza, Egypt

⁵Polish Economic Society Branch Office in Katowice, Poland

✉ beata.barszczowska@akademiamagnoslaska.pl

Soil nutrients in areas degraded by mines may be depleted, which can negatively affect the health and growth of poultry and livestock. Intercropping offers greater benefits in soil quality in areas degraded by mines compared to sole cropping. Intercropping soybeans with corn can increase carbon (C) sequestration in the soil, soil oxygen (O₂) levels, magnesium (Mg) levels, silicon (Si) levels, and titanium (Ti) distribution, providing a sustainable option for farmers. It also increases potassium (K) levels in the soil, improves nutrient utilization, and alleviates aluminum (Al) toxicity for plant growth. Intercropping can reduce iron (Fe) accumulation in the soil, potentially supporting plant growth and nutrient uptake. Complementary nutrient uptake patterns by the two crops in the intercropping system contribute to these benefits. This method can increase yields and support plant health in mixed cropping systems.

Keywords: soil quality, corn, soybeans, crop coordination

Składniki odżywcze gleby na terenach zdegradowanych przez kopalnie mogą się wyczerpać, co może mieć negatywny wpływ na zdrowie i wzrost drobiu i zwierząt gospodarskich. Uprawa współrzędna oferuje większe korzyści w zakresie jakości gleby na terenach zdegradowanych przez kopalnie w porównaniu z uprawą wyłączną. Uprawa współrzędna soi z kukurydzą może zwiększyć sekwestrację węgla (C) w glebie, poziom tlenu w glebie (O₂), poziom magnezu (Mg), poziom krzemu (Si) i dystrybucję tytanu (Ti), zapewniając zrównoważoną opcję dla rolników. Zwiększa również poziom potasu (K) w glebie, poprawia wykorzystanie składników odżywczych i łagodzi toksyczność glinu (Al) dla wzrostu roślin. Uprawa współrzędna może zmniejszyć gromadzenie się żelaza (Fe) w glebie, potencjalnie wspierając wzrost roślin i wchłanianie składników odżywczych. Uzupełniające się wzorce pobierania składników odżywczych przez dwie uprawy w systemie uprawy współrzędnej przyczyniają się do tych zalet. Ta metoda może zwiększyć plony i wspierać zdrowie roślin w systemach upraw mieszanych.

Słowa kluczowe: jakość gleby, kukurydza, soja, współrzędne uprawy

Introduction

Following the introduction of a free market economy and liberalization of construction laws in Poland after 1990, urban development accelerated, particularly in suburban areas (McNeill and Winwarter, 2004, Pepliński, 2019). This expansion caused a 17.2% decrease in agricultural land. The urban sprawl and conversion of agricultural land for urban purposes near major cities led to a shift towards extensive agricultural production, resulting in reduced interest among farmers in agricultural production in Poland (Pepliński, 2019). The process that can potentially return the trends for agricultural production is the restructuring of industry and the liquidation of some industrial plants and mines (Chmiela et al. 2024, Ouda et al. 2007). However, it should be remembered that post-mining and post-industrial areas are usually contaminated by mining or industrial activities. Hard

coal mining in Poland emits about 26 million Mg of waste rock to the surface per year, of which about 7 million Mg per year is located on dumps (Magdziarczyk et al. 2024b). Several hundred years of mining have left thousands of hectares of dumps and areas that could be returned to society after reclamation. A form of reclamation could be their development for agricultural activities. Underground mining is associated with water hazards and even the oldest mines were provided with various solutions to reduce this hazard (Gawęda et al. 2025). Water flowing into the mine poses a threat to people working underground and to the existence of the mine (Magdziarczyk et al. 2024a). The mine pumping station system discharges over 200 million m³ of mine waters of varying mineralization to local watercourses annually (Chmiela et al. 2024). Part of the discharged mine waters directly from the pumping stations, and another part, after minor treatment, could irrigate agricultural

crops, especially those produced for industrial needs. Additionally, human activities such as fossil fuel combustion, aggressive industrialization, and deforestation are the main contributors to produce high levels of greenhouse gas emissions (GGE), particularly CO₂, which trap heat and cause the Earth's temperature to rise. More energy is absorbed by methane than by CO₂, making it the second most important GGE (Kataria, 2015).

By implementing proper soil management practices, degraded mine lands can be rejuvenated, replenishing essential nutrients for sustainable agriculture. Issayeva et al. (2024) demonstrated that post-mining land in areas where mineral extraction has taken place can account for a substantial portion of land utilized for different purposes. This land acts as a substrate for the formation of anthropogenic soils, which may have unfavorable physicochemical properties. Iron (Fe), along with aluminum (Al), is a common element that can hinder plant growth in acidic soils. According to Nazir et al. (2024), soil carbon (C) is a crucial component of the C cycle, playing a vital role in storing C and reducing GGE. Cuetos et al. (2017) showed that C aids poultry by supporting healthy digestion and reducing the likelihood of digestive issues. According to Zhou et al. (2021), increasing soil C can reduce methane emissions from ruminant livestock by providing a more stable environment for the microbes in their digestive systems, resulting in lower methane production. Moreover, higher soil C levels can enhance forage quality, which in turn can help decrease methane emissions from ruminants.

Regarding soil oxygen (O₂), Manghwar et al. (2024) demonstrated the importance of soil O₂ for the well-being of plant roots. Adequate soil O₂ is crucial for proper respiration and nutrient absorption in plants. Insufficient levels of soil O₂ can lead to stunted growth and make plants more vulnerable to diseases. For plants to grow and develop, soil magnesium (Mg) is a necessary ingredient that is crucial for photosynthesis and enzyme activity (Ahmed et al., 2023).

On the other hand, soil Al is recognized for its detrimental impact on plant growth, as it can impede root development and nutrient absorption (Ofuo et al., 2023). With respect to soil silicon (Si), it is a naturally occurring element that is essential for plant health and growth (Khan, 2025).

With respect to soil potassium (K), Hasanuz-zaman et al. (2018) highlighted its significance in enhancing water absorption and overall plant health. In 2019, Thor demonstrated the importance of soil calcium (Ca) for plant growth, as it plays a crucial role in cell wall structure and enzyme activation. A lack of Ca can result in stunted growth and inadequate yield development in plants.

Soil titanium (Ti) is recognized for its ability to improve soil structure and increase water retention, making it ideal for agricultural use (Lyu et al., 2017). According to Rai et al. (2020), Fe in the soil is essential for plant growth as it helps activate enzymes and synthesize chlorophyll. However, an excess of Fe in the soil can be toxic to plants, causing nutrient imbalances and stunted growth.

Polish researchers have uncovered a notable decrease in agricultural land, which is impacting feed production and animal populations (Busko and Szafranska, 2018). Poland's agricultural sector plays a crucial role in both European and international markets by supplying a wide range of agricultural, horticultural, and animal-based products. According to Niwińska et al. (2020) and Król-Badziak et al. (2024), approximately 50% of Poland's land area, totalling 15.4 million hectares, is dedicated to agriculture. Historically, the Polish economy has heavily relied on agriculture, with crops covering 14.413 million hectares, orchards spanning 265 thousand hectares, and meadows and pastures occupying around 4,048,500 hectares in 1989. The cultivation of grain maize (*Zea mays* L.) in Poland has seen significant growth, with the area planted increasing from 152,000 hectares in 2000 to 1,196,000 hectares in 2022. The average yield has also risen from 5.6 to 7.0 tons per hectare over the past 24 years. Soybeans (*Glycine max* L.) are grown primarily for their high protein (40%) and oil (20%) content, with the majority used in the feed industry to produce protein-rich soybean meal for livestock and poultry consumption. Poland's reliance on imported genetically modified soybean meal for cattle feed has increased, with 65% of protein needs for cattle feeding being met by imports in 2016 (Niwińska et al., 2020). Additionally, the production of cattle, milk, and slaughter animals contributes significantly to Poland's agricultural output, accounting for 26% of total production. In 2023, Poland, Spain, Germany, France, and Italy were the main poultry meat producers in the EU, with Italy experiencing a significant increase in production, accounting for 10.0% of total production (The Poultry site, 2024). To enhance crop diversity and maximize land use efficiency, intercropping soybeans with maize has become an advantageous practice in Poland. This approach not only helps maintain soil fertility but also promotes a more sustainable and profitable agricultural system, reducing the need for imported protein feed and enhancing the sector's self-sufficiency.

The aim of this paper is to present the results of several years of research conducted in Egypt on the impact of intercropping on soil quality and soybean and corn yields. Intercropping can be used anywhere, but the topic of its use in post-industrial areas may be of interest to Polish readers. Considering geographic, economic, and cli-

matic constraints, the research findings could be piloted in Poland. The following hypotheses are put forward in the article:

- H1. Soybeans and maize can be successfully grown together, increasing their yield.
- H2. Intercropping contributes to improved soil health, significantly increases the levels of key nutrients in the soil.
- H3. Intercropping reduces reliance on chemicals.

Materials and Methods

A two-year study was during the summer seasons of 2021 and 2022. The study aimed to investigate soil nutrient dynamics in different cropping systems to enhance agricultural productivity and sustainability in the region, with the goal of improving soil quality in mining lands. The research was carried out at the Agricultural Research Center, located at Latitude 30°00'30" N, Longitude 31°12'43" E, and an elevation of 26 meters above sea level. In order to achieve 100% plant density of soybean and maize under intercropping, two rows of soybean seeds were drilled in the center of the raised beds, while maize plants were grown on both sides of the raised beds (140 cm wide). Two rows of sole soybeans were planted in a 70 cm wide ridge, with two plants per hill spaced 20 cm apart. One plant of sole maize per hill, spaced 30 cm apart, was planted in a 70 cm wide ridge. The Water, Soil, and Environment Research Institute at ARC utilized techniques outlined by Chapman and Pratt (1961) and Jackson (1965) to analyze the chemical properties of the rhizosphere in all treatments at a depth of 0-30 cm. The SEM Model Quanta 250 FEG (Field Emission Gun) at the Egyptian Mineral Resources Authority Central Laboratories Sector was employed to examine the superficial soil structure. The soil texture was identified as clay loam, with wheat being the previous winter crop in both seasons. A total of 476 kg of calcium superphosphate (15.5% P₂O₅) per hectare was applied to the soil during both summer seasons. *Bradyrhizobium japonicum* was introduced into soybean seeds using Arabic gum were used as a binding agent. Soybean seeds of cultivar Giza 111 were planted on May 25th and 22nd in 2019 and 2020, respectively, while maize variety T.W.C. 321 was planted 15 days later. Mineral N fertilizer was applied to maize at a rate of 285.6 kg N per hectare as ammonium nitrate (33.5% N) in two equal doses before the first and second irrigation in both intercropping and sole plantings. For soybean, mineral N fertilizer was applied at a rate of 35.7 kg N per hectare as ammonium nitrate (33.5% N) before the first irrigation in both intercropping and sole plantings. At harvest, chemical analysis of a soil sample provides valuable information such as weight percentage, atomic percentage, k-ratio (which

indicates the proportion of different elements or compounds in the soil sample), atomic mass, and fluorescence intensity of various elements (Figs. 3-11). This data is essential for understanding soil composition, identifying pollutants, assessing fertility, and predicting plant growth potential. It helps in making informed decisions about agricultural practices and environmental management. At harvest, maize grain and soybean seed yields per hectare (kg) were determined from weight of each plot and converted to kg per hectare. LER defines the ratio of area needed under sole cropping to one of intercropping at the same management level to produce an equivalent yield (Mead and Willey, 1980). It is calculated as follows: $LER = (Yab / Yaa) + (Yba / Ybb)$, Where Yaa = Pure stand yield of crop a (maize), Ybb = Pure stand yield of crop b (soybean), Yab = Intercrop yield of crop a (maize) and Yba = Intercrop yield of crop b (soybean). An analysis of variance was conducted on the findings collected for each season. Following the completion of the error mean squares homogeneity test, a combined analysis of the two experimental seasons was performed. ANOVA was performed on the observed variables using the MSTAT-C statistical program (Freed, 1991). According to Gomez and Gomez (1984), mean comparisons were conducted at the 5% level of probability using the least significant differences (L.S.D.) technique.

Results and Discussion

Field tests were conducted during the summers of 2012, 2014, 2015, 2019, 2020, and 2024 at various agricultural research stations in Egypt (Abdel-Galil et al., 2014, Metwally et al., 2019a; 2019b, 2021; Abdel-Wahab and Abdel-Wahab, 2020 and Abdel-Wahab et al., 2019, 2024). The soybean yield ranged from 1110 kg·ha⁻¹ to 2720 kg·ha⁻¹, while the maize yield ranged from 4830 kg·ha⁻¹ to 8380 kg·ha⁻¹ under mixed intercropping (Fig. 1). Field tests have demonstrated the potential for increased yields through mixed intercropping practices at Egyptian agricultural research stations. The results indicate that soybean and maize can be successfully grown together to enhance productivity.

LER ranged from 1.25 to 1.68 in the mixed intercropping system, indicating a moderate to high level of LER (Fig. 2). This suggests that the combined yield of crops in the intercropping system exceeded the yield of crops grown separately. The successful implementation of the mixed intercropping system maximized land use efficiency and overall productivity. These results highlight the advantages of incorporating intercropping techniques in agricultural practices.

Intercropping not only boosts yields but also contributes to soil health improvement and reduces the reliance on chemical inputs, making it

a sustainable practice for Egyptian farmers (Figs. 3-11). In the rhizosphere of sole maize, soil C content was 78.49% higher compared to sole soybean, and 53.23% higher in intercrop-

ping. Sole maize had a higher atomic percentage of C in the soil by 67.95% compared to sole soybean, while intercropping showed a 48.16% increase (Fig. 3).

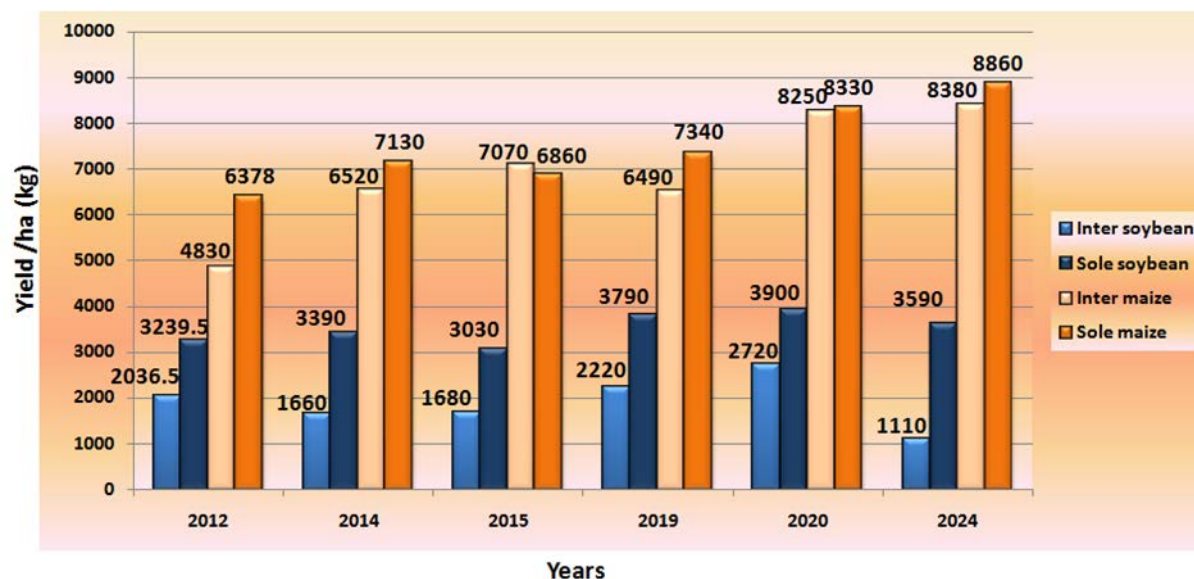


Fig. 1. Yield of soybean and maize under intercropping and sole cropping.

Rys. 1. Plon soi i kukurydzy w uprawie współrzędnej i wyłącznej.

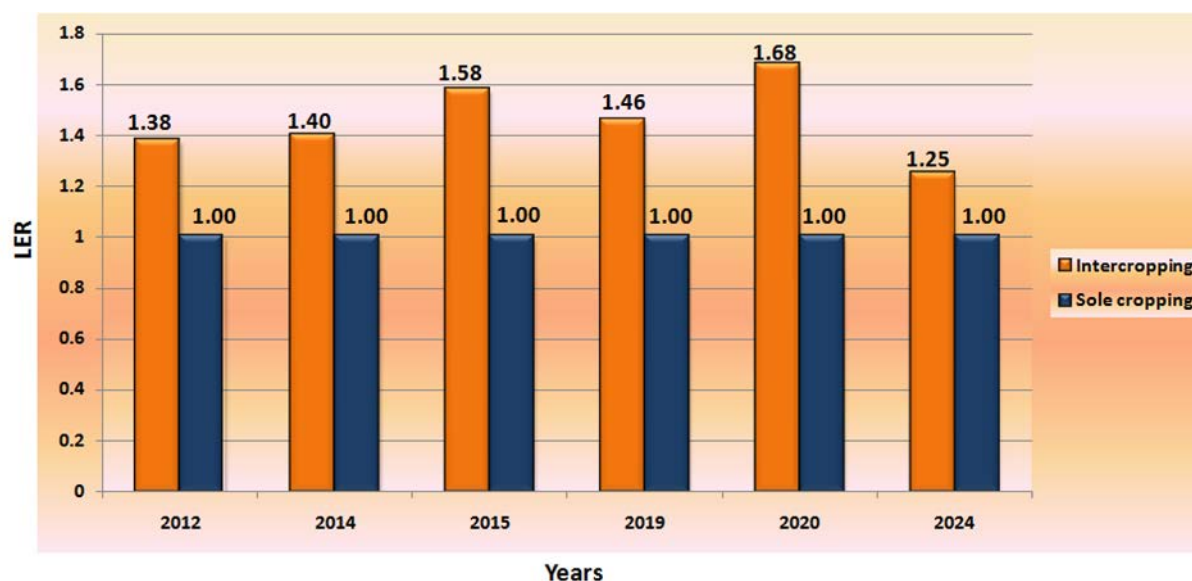


Fig. 2. LER of intercropping soybean with maize and sole cropping of both species.

Rys. 2. LER uprawy współrzędnej soi z kukurydzą i uprawy wyłącznej obu gatunków.

The proportion of C in the soil sample was significantly higher in sole maize (82.00%) compared to sole soybean (54.23%) and intercropping (54.23%). There were no significant differences between sole soybean and intercropping, but the atomic mass of C in the soil was 2.45% higher in the rhizosphere of sole maize compared to sole soybean and intercropping. Fluorescence intensity of C in the soil did not differ significantly between intercropping, sole maize, and sole soybean. The significance of plant-microbe interactions in soil C dynamics is underscored by these findings, potentially influenced by variations in microbial ac-

tivity and root exudates across different cropping systems. C is essential for maintaining soil health and fertility, making it a key factor in sustainable agriculture practices (Nazir et al., 2024). This suggests that growing maize could result in more soil C sequestration. Intercropping soybean with maize can enhance soil C levels compared to sole soybean, offering a more sustainable option for farmers to improve soil health and C sequestration. It is important to consider crop selection when implementing agricultural practices to improve soil sustainability and health.

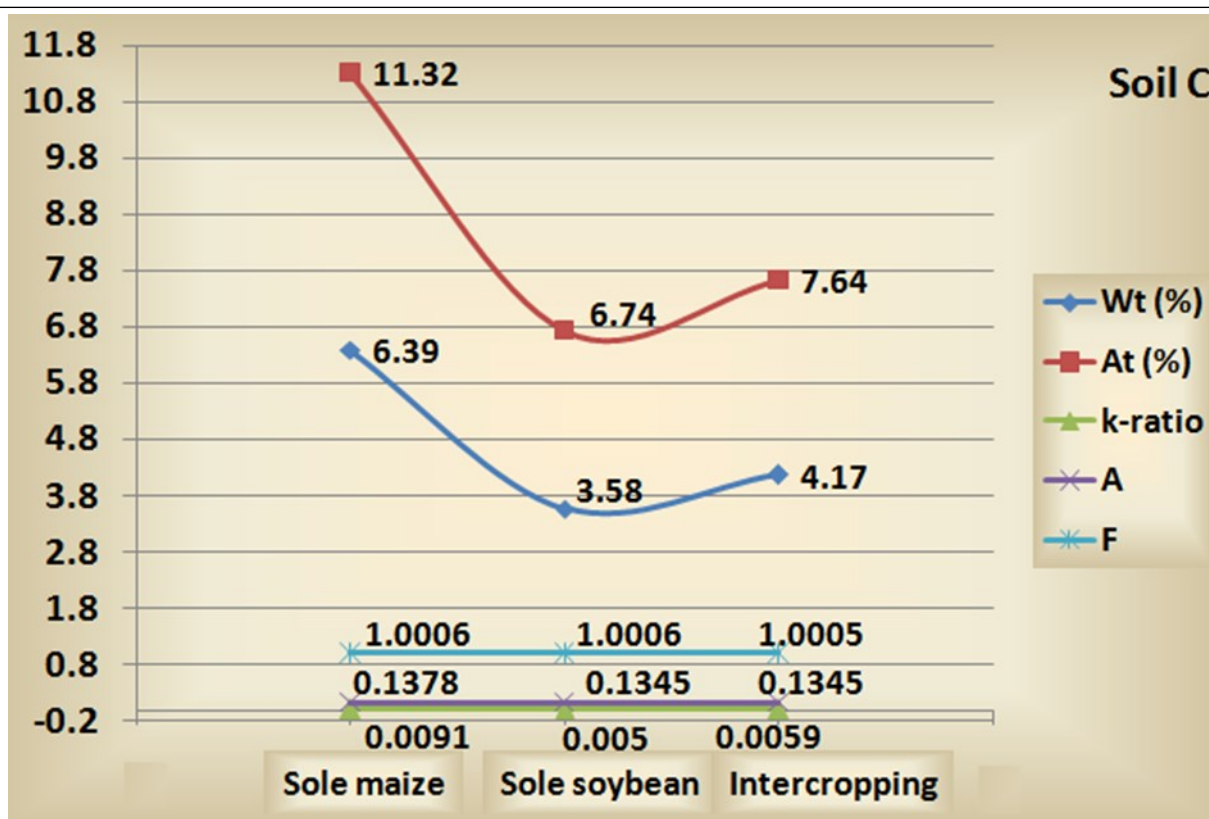


Fig. 3. Soil C in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.078), At (0.206), k-Ratio (0.0011), A (0.0026), F (ns).

Rys. 3. Zawartość C w glebie ryzosfery mieszanej uprawy międzyplonowej soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,078), At (0,206), K-Ratio (0,0011), A (0,0026), F (ns).

In the rhizosphere of sole maize, sole soybean, and intercropping, there were no significant differences in soil O_2 levels based on weight, atomic percentage, or fluorescence intensity (Fig. 4). The presence of different plant species did not have a notable effect on soil O_2 content, suggesting that other factors may be more influential. Root exudates or microbial activity could be contributing to maintaining consistent O_2 levels across plant species. Sole maize had a higher percentage of O_2 in the soil sample (12.76%) compared to sole soybeans, while intercropping had a higher percentage of 5.46%. Sole soybean had a slightly higher atomic percentage of O_2 compared to sole maize by 0.06% and intercropping by 0.04%. Sole maize had a higher atomic mass of O_2 compared to sole soybean by 3.66% and intercropping by 2.83%. These results could be attributed to variations in root morphology and exudation patterns between maize and soybean plants, potentially affecting soil O_2 levels. Adequate soil O_2 is crucial for proper respiration and nutrient absorption in plants (Manghwar et al. 2024). These findings suggest that intercropping can positively impact soil O_2 levels compared to sole maize or soybean.

There were no significant differences between sole maize and sole soybean, but intercropping soybean with maize resulted in higher soil Mg content in the rhizosphere compared to sole soybean (11.34% vs. 8.60%) (Fig. 5). The atomic per-

centage of Mg in the soil was also higher in the rhizosphere of intercropped soybean with maize compared to sole soybean (7.11%) and sole maize (15.31%). These results could be attributed to the synergistic nutrient uptake between maize and soybean in intercropping systems, resulting in a more effective utilization of soil nutrients. Furthermore, the root exudates from both crops may have played a role in the increased Mg content in the rhizosphere of intercropped soybean with maize. Additionally, the rhizosphere of sole soybean had a slightly higher atomic percentage of Mg compared to sole maize (0.06%) and intercropping (0.04%). On the other hand, the rhizosphere of sole maize had a higher atomic mass of Mg compared to sole soybean (5.96%) and intercropping (1.32%). Fluorescence intensity of Mg in the soil did not show significant differences between intercropping, sole maize, and sole soybean. These results could be attributed to variations in the root exudates released by different plant species, which can affect the availability and absorption of Mg in the rhizosphere. For the best plant health and yield, it's critical to periodically check the Mg levels in the soil and add more as necessary (Ahmed et al., 2023). Overall, these results suggest that intercropping can enhance soil Mg levels compared to sole cropping methods.

The weight, percentage, and fluorescence intensity of soil Al in the rhizosphere of sole maize

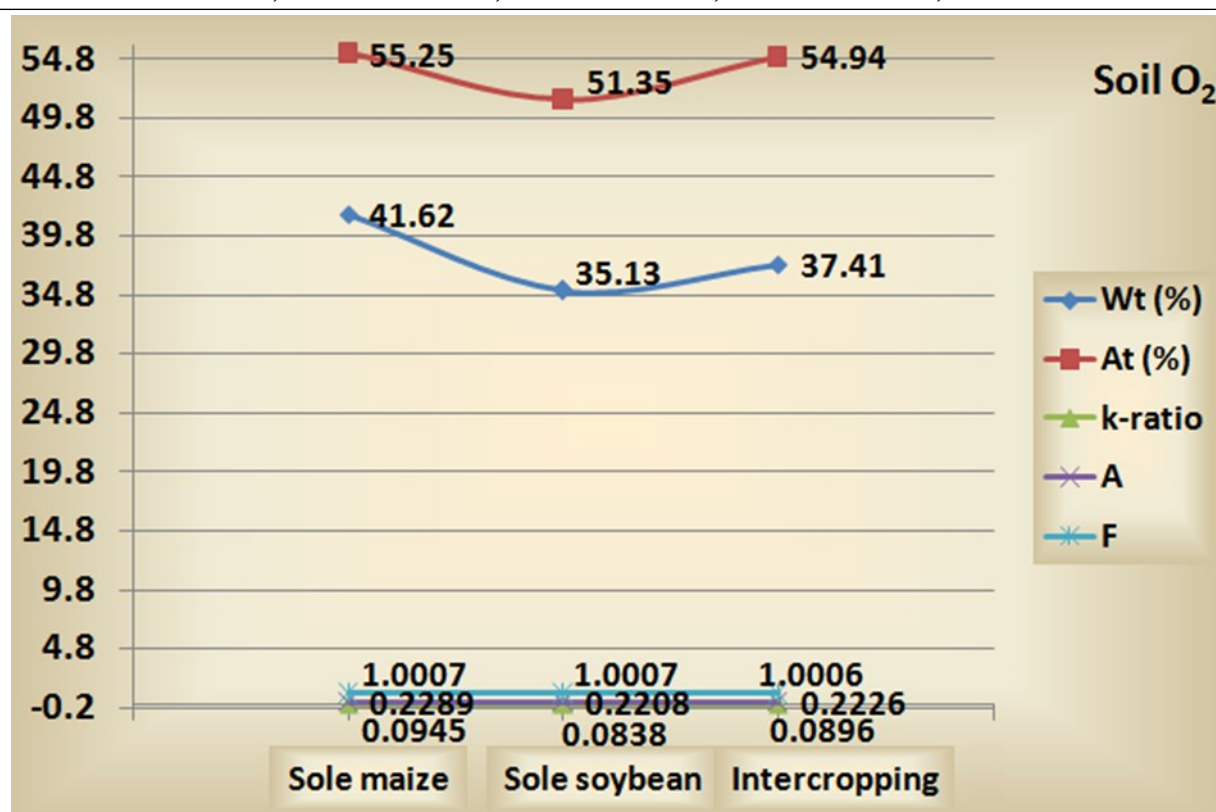


Fig. 4. Soil O₂ in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (ns), At (ns), k-Ratio (0.0098), A (0.0006), F (ns).

Rys. 4. Zawartość tlenu w glebie w ryzofosferze mieszanej uprawy soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (ns), At (ns), K-Ratio (0,0098), A (0,0006), F (ns).

were higher than those of intercropping and sole soybean (Fig. 6). Sole soybean had a greater atomic percentage of Al in the soil compared to sole maize and intercropping. Intercropping had a larger atomic mass of Al in the soil compared to sole soybean and sole maize. Maize roots secrete more Al into the soil compared to soybean roots. This is because maize roots release organic acids that can dissolve Al in the soil, making it more accessible for absorption. Schmitt et al. (2015) found that soil Al is known for its negative effects on plant growth. The varying root exudates between maize and soybeans can influence the levels of Al toxicity in different plant species. Intercropping soybeans with maize can potentially alleviate the adverse impacts of Al toxicity on plant growth. The soybean roots can aid in decreasing the Al content in the soil through their exudates. Furthermore, competitive interactions between maize and soybean in intercropping systems may also influence the distribution of Al in the soil. This practice can enhance crop yields and promote plant health in mixed cropping systems.

In the rhizosphere of intercropped plants, the Si content in the soil was higher compared to sole maize and sole soybean in terms of weight, atomic percentage, and proportion (Fig. 7). Sole maize had a greater atomic mass of Si in the soil compared to sole soybean and intercropping. Soil Si strengthens plant cell walls, enhances resistance to

pests and diseases, and improves nutrient absorption (Khan, 2025). There was no significant difference in the fluorescence intensity of Si in the soil between intercropping, sole maize, and sole soybean. These results may be attributed to the varying abilities of maize and soybean to absorb and store Si in their tissues, resulting in differences in Si distribution in the rhizosphere. The cropping system employed had an impact on the Si content in the soil. Intercropping can have a unique influence on the soil's nutritional composition, as evidenced by the observed variations in Si concentration. Compared to sole soybean and sole maize, the soil sample from the rhizosphere of intercropped plants showed higher levels of K in terms of weight, atomic percentage, and proportion (Fig. 8). Additionally, the rhizosphere of sole maize exhibited greater fluorescence intensity of K compared to sole soybean and intercropping. In contrast, the rhizosphere of sole soybean had a higher atomic mass of K compared to sole maize and intercropping. These results may be attributed to the complementary relationship between soybean and maize roots, which enhances nutrient uptake efficiency and improves soil nutrient availability. K is a crucial nutrient for plant growth as it plays a vital role in promoting photosynthesis, protein synthesis, and enzyme activation (Hasanuzzaman et al., 2018).

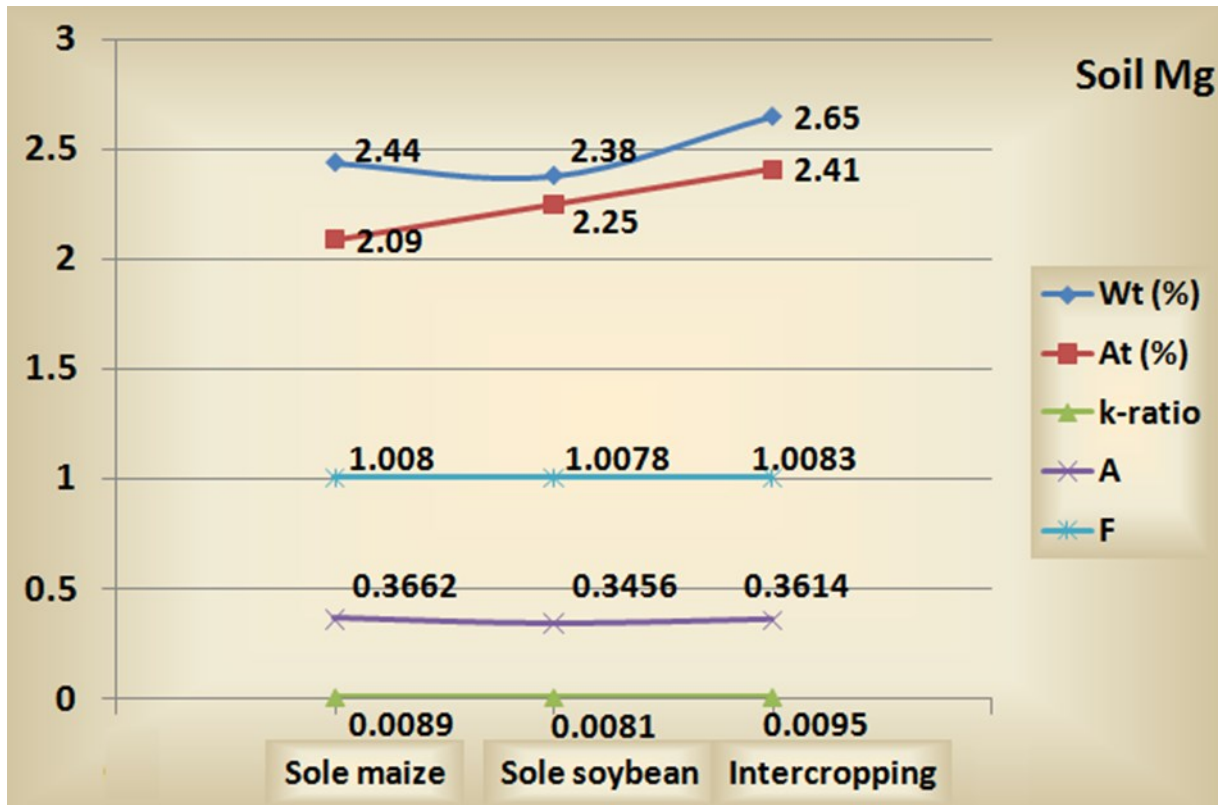


Fig. 5. Soil Mg in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.078), At (0.080), k-Ratio (0.0006), A (0.0007), F (ns).

Rys. 5. Zawartość magnezu w glebie w ryzosferze mieszanej uprawy soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,078), At (0,080), K-Ratio (0,0006), A (0,0007), F (ns).

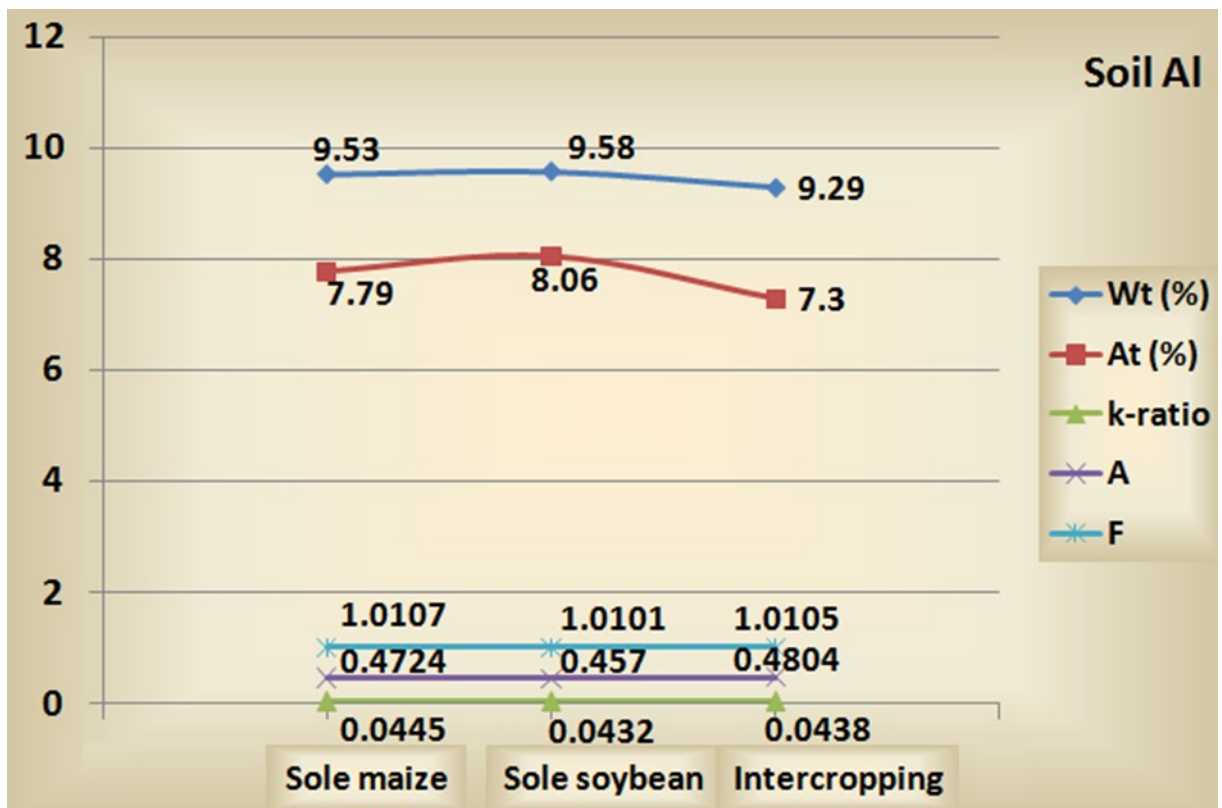


Fig. 6. Soil Al in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.053), At (0.097), k-Ratio (0.0009), A (0.0006), F (0.0005).

Rys. 6. Glebowy Al w ryzosferze mieszanej międzyplonu soi z kukurydzą i jedyną uprawą obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,053), At (0,097), K-Ratio (0,0009), A (0,0006), F (0,0005).

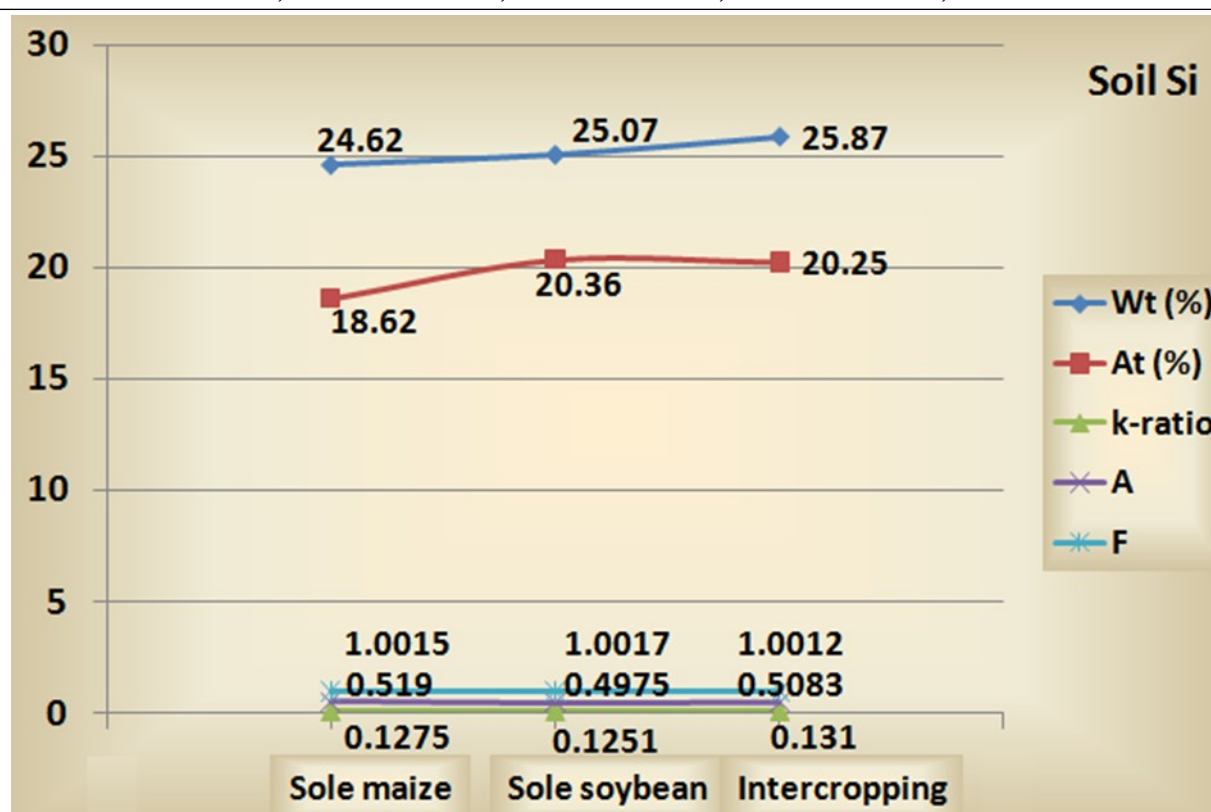


Fig. 7. Soil Si in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.081), At (0.119), k-Ratio (0.0009), A (0.001), F (ns).

Rys. 7. Zawartość krzemu w glebie w ryzosferze mieszanej uprawy soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,081), At (0,119), K-Ratio (0,0009), A (0,001), F (ns).

Overall, these results suggest that intercropping enhances soil K levels compared to sole cropping practices. The synergistic N uptake patterns of the two crops in an intercropping system can contribute to this improvement. Intercropping promotes efficient utilization of soil nutrients, resulting in increased K levels in the soil. This highlights the potential of intercropping as a sustainable agricultural approach to boost soil fertility and crop productivity.

In the rhizosphere of intercropped plants, the soil had higher Ca levels compared to sole soybean and sole maize, as evidenced by weight, atomic percentage, proportion, and fluorescence intensity of Ca (Fig. 9). Sole maize exhibited the highest Ca atomic mass in the soil. These results may be due to the complementary root systems of intercropped plants may improve nutrient uptake and cycling in the soil. Furthermore, the proximity of multiple plant species could stimulate microbial activity, resulting in increased Ca availability in the rhizosphere. A lack of Ca can result in stunted growth and inadequate yield development in plants (Thor, 2019). These results suggest that intercropping could enhance Ca availability in the soil, potentially promoting plant growth and development. Intercropping can also improve overall nutrient availability, leading to healthier and more productive plants. These findings underscore the

potential advantages of incorporating intercropping into sustainable agricultural practices.

The soil in the rhizosphere of intercropped plants had higher levels of Ti compared to sole maize and sole soybean, based on factors such as weight, atomic percentage, proportion, and fluorescence intensity (Fig. 10). The highest atomic mass of Ti was found in the soil of sole maize. These results may be due to the complementary nutrient uptake of the two plants in the intercropping system, leading to increased Ti accumulation in the rhizosphere. Ti provides essential nutrients and promotes root development, leading to enhanced plant growth (Lyu et al., 2017). These results suggest that intercropping can change the distribution of Ti in the soil compared to sole cropping methods. This change in Ti distribution may impact the availability and uptake of Ti by plants, potentially affecting plant growth and nutrient absorption. The soil in the sole maize rhizosphere contained higher amounts of Fe based on weight, atomic percentage, proportion, and fluorescence intensity compared to the soil in sole soybean and intercropped plants. However, the soil of intercropped plants had the highest atomic mass of Fe (Fig. 11). These differences could be attributed to variations in root exudates released by maize plants compared to soybean plants, influencing Fe availability and uptake in the rhizosphere.

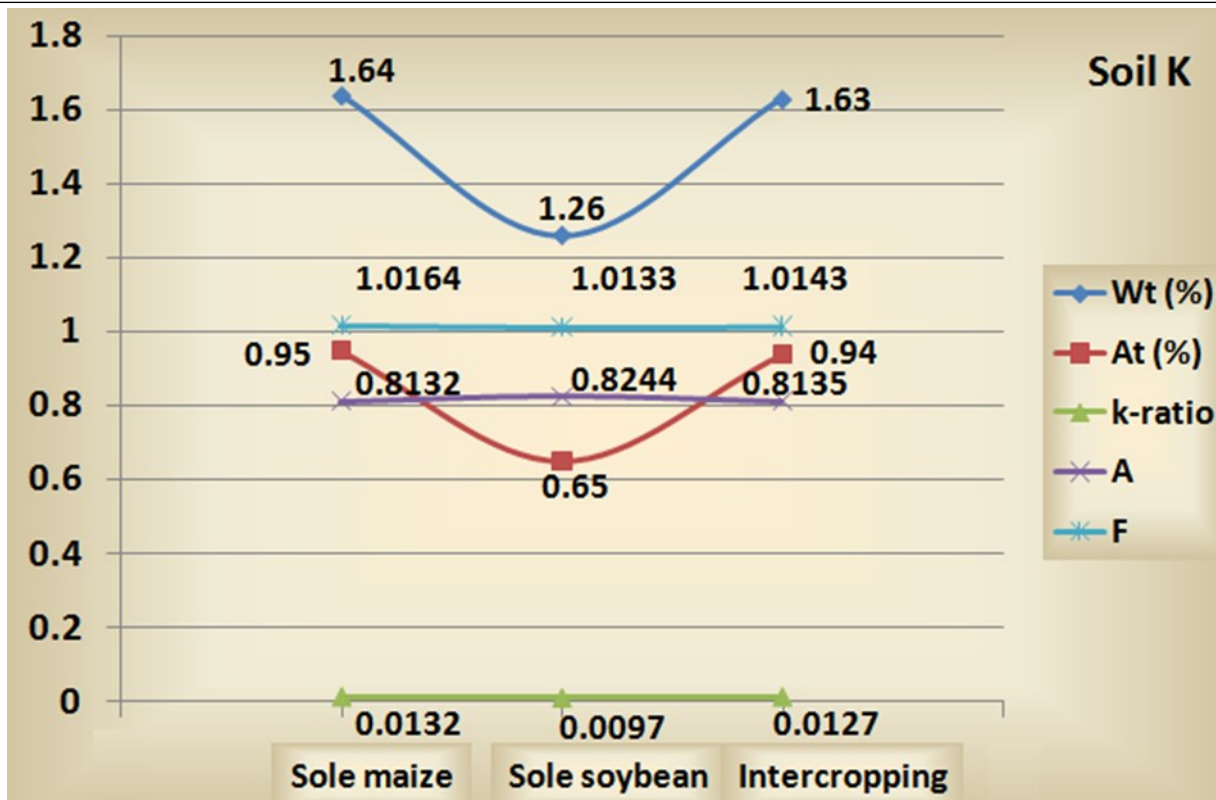


Fig. 8. Soil K in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.176), At (0.067), k-Ratio (0.0007), A (0.001), F (0.0008).

Rys. 8. Zawartość potasu w glebie w ryzosferze mieszanej uprawy soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,176), At (0,067), K-Ratio (0,0007), A (0,001), F (0,0008).

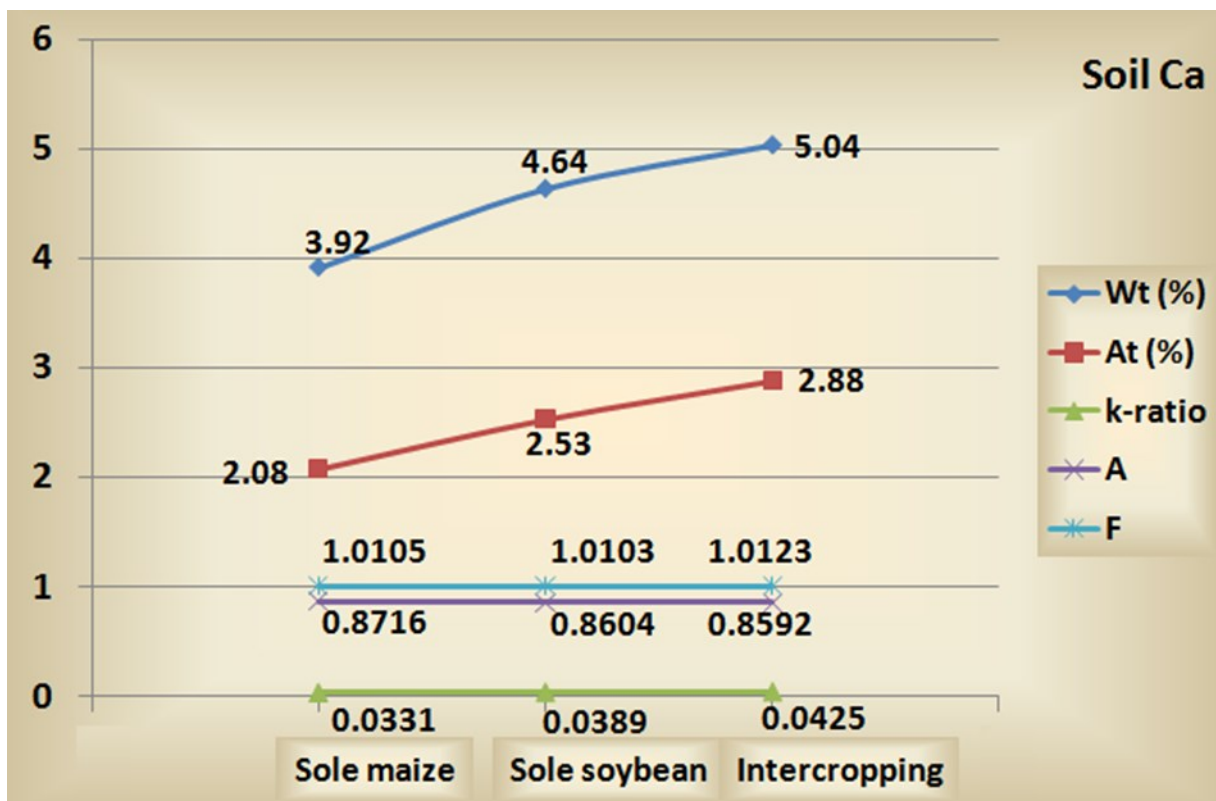


Fig. 9. Soil Ca in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.138), At (0.108), k-Ratio (0.001), A (0.0006), F (0.0006).

Rys. 9. Zawartość Ca w glebie w ryzosferze mieszanej uprawy soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,138), At (0,108), K-Ratio (0,001), A (0,0006), F (0,0006).

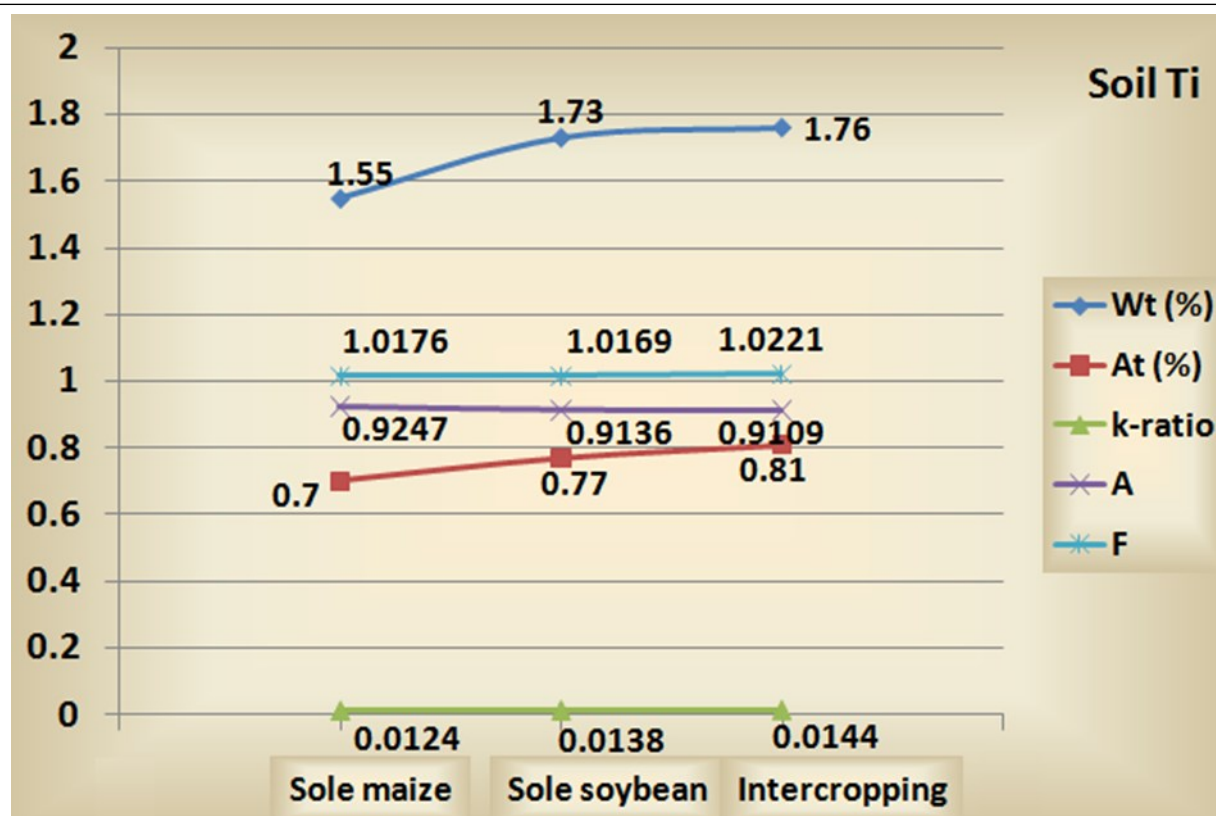


Fig. 10. Soil Ti in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.079), At (0.098), k-Ratio (0.001), A (0.0006), F (0.0008).

Rys. 10. Zawartość Ti w glebie w ryzosferze mieszanej uprawy soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,079), At (0,098), K-Ratio (0,001), A (0,0006), F (0,0008).

Additionally, differences in soil pH and microbial activity among the plant systems may also contribute to the observed variations in Fe content. Abdel-Wahab et al. (2024) reported that intercropping soybean with maize resulted in lower soil Fe compared to sole cropping of both crops. Sole maize plants may have a greater ability to mobilize and absorb Fe from the soil compared to soybeans, resulting in higher Fe content in the rhizosphere. These findings highlight the significant impact of plant species and their interactions on the availability and distribution of Fe in the soil.

Conclusion

Studies have shown that intercropping soybeans and maize has numerous benefits over sole cropping, both in terms of improving soil quality and increasing yields. Intercropping significantly increases levels of key soil nutrients, such as carbon, oxygen, magnesium, silicon, and titanium. These nutrients play a vital role in improving soil structure, increasing water retention capacity, and supporting microbial activity. Higher levels of these nutrients contribute to better plant growth and health. One key finding is that intercropping reduces aluminum toxicity and iron accumulation in the soil. Excess aluminum and iron can be harmful to plants, hindering their growth and nutrient uptake. Reducing these toxic elements supports healthy plant growth and improves their

ability to efficiently use available resources. Studies have also shown that intercropping increases soybean and maize yields. This is especially important in areas degraded by mining, where soils are often poor in nutrients and have low productivity. Intercropping allows for more efficient use of available resources and space, which translates into higher yields and greater profitability for farmers. In conclusion, intercropping soybeans with maize is an effective method for improving soil quality and increasing yields in areas degraded by mining. It is a sustainable and profitable agricultural practice that supports the health of soil and plants. These findings underscore the importance of implementing intercropping practices in agriculture, especially in regions affected by land degradation.

Studies have shown that intercropping soybeans and corn has numerous benefits over exclusive cultivation, both in terms of improving soil quality and increasing yields.

Intercropping significantly increases levels of key soil nutrients, such as carbon, oxygen, magnesium, silicon, and titanium. These nutrients play a vital role in improving soil structure, increasing water retention capacity, and supporting microbial activity. Higher levels of these nutrients contribute to better plant growth and health.

One key finding is that intercropping reduces aluminum toxicity and iron accumulation in the

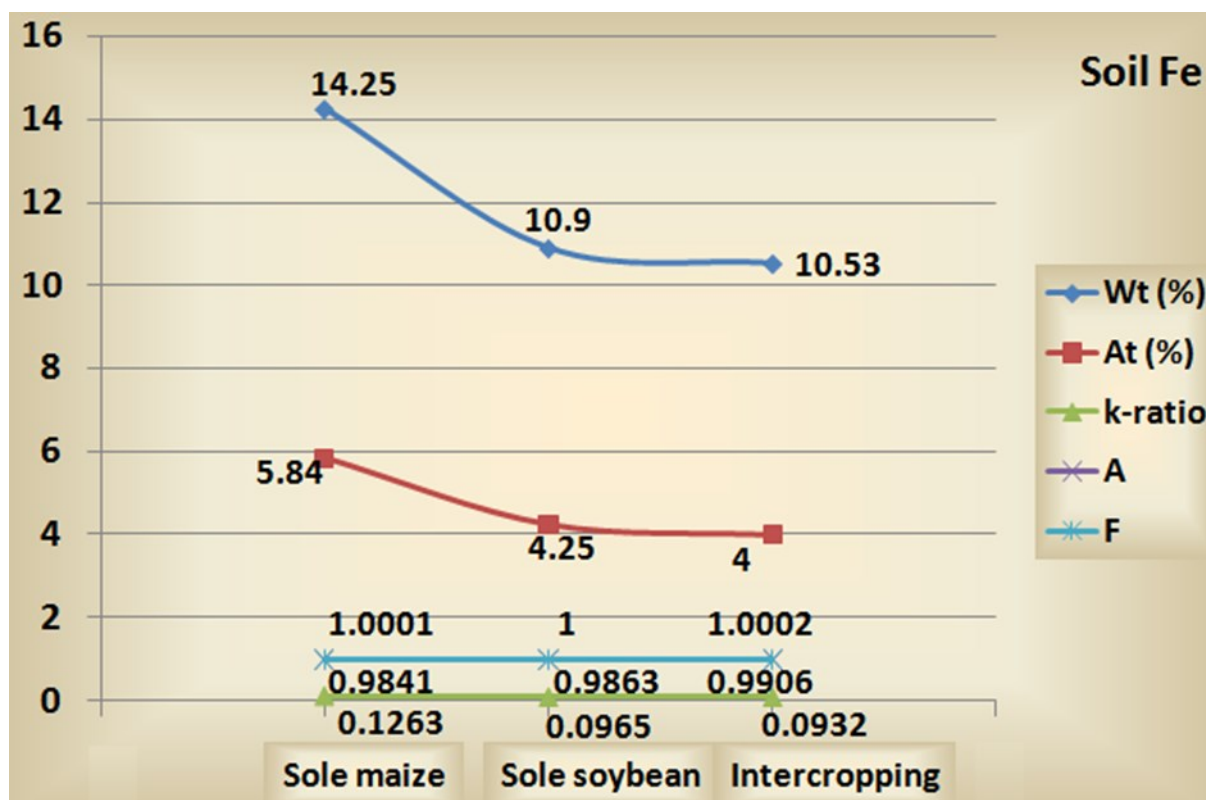


Fig. 11. Soil Fe in rhizosphere of mixed intercropping soybean with maize and sole cropping of both species. L.S.D. 0.05 Wt (0.133), At (0.147), k-Ratio (0.0009), A (0.0007), F (ns).

Rys. 11. Zawartość Fe w glebie ryzosfery mieszanej uprawy soi z kukurydzą i samodzielnej uprawy obu gatunków. L.S.D. 0,05 Wt (0,133), At (0,147), K-Ratio (0,0009), A (0,0007), F (ns).

soil. Excess aluminum and iron can be harmful to plants, hindering their growth and nutrient uptake. Reducing these toxic elements supports healthy plant growth and improves their ability to efficiently use available resources.

Studies have also shown that intercropping increases soybean and corn yields. This is especially important in areas degraded by mining, where soils are often poor in nutrients and have low productivity. Intercropping allows for more efficient use of available resources and space,

which translates into higher yields and greater profitability for farmers.

In conclusion, intercropping soybeans with corn is an effective method for improving soil quality and increasing yields in areas degraded by mining. It is a sustainable and profitable agricultural practice that supports the health of soil and plants. These findings underscore the importance of implementing intercropping practices in agriculture, especially in regions affected by land degradation.

References

- Abdel-Galil, A.M., Abdel-Wahab, T.I., Abdel-Wahab, Sh.I., 2014. Productivity of four soybean varieties as affected by intercropping and corn planting geometry. *Soybean Research*, 12 (1): 36–58.
- Abdel-Wahab, Sh.I., Abdel-Wahab, E.I., 2020. Competitive and facilitative effects of intercropping some soybean varieties with corn under different soybean plant densities. *Plant Archives*, 20 (2): 1631–1639.
- Abdel-Wahab, Sh.I., Abdel-Wahab, E.I., Taha, A.M., Saied, S.M., Naroz, M.H., 2019. Evaluation of intercropped soybean cultivars with corn for water consumption and soybean mosaic virus infection under different soybean plant densities. *Research on Crops*, 20 (Issue Suppl): S26–S46.
- Abdel-Wahab, T.I., Abdel-Wahab, Sh.I., Abdel-Wahab, E.I., 2024. Biological Engineering and Its Relationship to Nematode Resistance (Chapter 15, pp: 383 – 408). In: Chaudhary, K.K., Meghvansi, M.K. and Siddiqui, S., (Eds.), *Sustainable Management of Nematodes in Agriculture*, Vol. 2: Role of Microbes – Assisted Strategies, Sustainability in Plant and Crop Protection, Springer Nature, Switzerland.
- Ahmed, N., Zhang, B., Bozdar, B., Chachar, S., Rai, M., Li, J., Li, Y., Hayat, F., Chachar, Z., Tu, P., 2023. The power of magnesium: Unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1285512.

- Busko, M., Szafranska, B., 2018. Analysis of changes in land use patterns pursuant to the conversion of agricultural land to non-agricultural use in the context of the sustainable development of the Malopolska Region. *Sustainability*, 10: 136.
- Chapman, H.D., Pratt, P.E., 1961. *Methods of Analysis for Soil, Plant and Water*, Division Agric. Sci., California Univ., U.S.A.
- Chmiela, A., Wrona, P., Magdziarczyk, M., Liu, R., Zhang, L., Smolinski, A., 2024. Hydrogen Storage and Combustion for Blackout Protection of Mine Water Pumping Stations. *Energies* 17, 2357. <https://doi.org/10.3390/en17102357>
- Cuetos, M.J., Martinez, E.J., Moreno, R., Gonzalez, R., Otero, M., Gomez, X., 2017. Enhancing anaerobic digestion of poultry blood using activated carbon. *Journal of Advanced Research*, 8(3): 297–307.
- Freed, R.D., 1991. *MSTATC Microcomputer Statistical Program*. Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA.
- Gawęda, A., Chmiela, A., Magdziarczyk, M., Malcherczyk, E., Smoliński, A., 2025. Energy procurement management in innovative energy self-sufficiency projects on post-mining sites. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 20(1). <https://doi.org/10.1080/15567249.2025.2457434>
- Gomez, K.A., Gomez, A.A., 1984. *Statistical Procedures for Agricultural Research*. 2nd ed., John Wiley and Sons, Toronto, ON, Canada.
- Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M.H., Nahar, K., Hossain, M.S., Mahmud, J.A., Hossen, M.S., Masud, A.A., Fujita, M., 2018. Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. *Agronomy*, 8(3): 31.
- Issayeva, A., Spychalski, W., Kayzer, D., Pankiewicz, R., Antkowiak, W., Łeska, B., Alikhan, A., Tleukeeva, A., Rozwadowski, Z., 2024. Assessment of the influence of aluminum, iron, and manganese forms on the phytocenoses of post-mining lands in the Lengerskoye brown coal mine. *Sustainability*, 17(4): 1642.
- Jackson, M.L., 1965. *Soil Chemical Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Kataria, R.P., 2015. Use of feed additives for reducing greenhouse gas emissions from dairy farms. *Microbiology Research*, 6: 6120.
- Khan, A.L., 2025. Silicon: A valuable soil element for improving plant growth and CO2 sequestration. *Journal of Advanced Research*, 71: 43–54.
- Król-Badziak, A., Kozyra, J., Rozakis, S., 2024. Evaluation of Climate Suitability for Maize Production in Poland under Climate Change. *Sustainability*, 16: 6896.
- Lyu, S., Wei, X., Chen, J., Wang, C., Wang, X., Pan, D., 2017. Titanium as a beneficial element for crop production. *Frontiers in Plant Science*, 8: 237149.
- Magdziarczyk, M., Chmiela, A., Dychkovskiy, R., Smoliński, A., 2024a. The Cost Reduction Analysis of Green Hydrogen Production from Coal Mine Underground Water for Circular Economy. *Energies* 17, 2289. <https://doi.org/10.3390/en17102289>
- Magdziarczyk, M., Chmiela, A., Su, W., Smolinski, A., 2024b. Green Transformation of Mining towards Energy Self-Sufficiency in a Circular Economy—A Case Study. *Energies* 17, 3771. <https://doi.org/10.3390/en17153771>
- Manghwar, H., Hussain, A., Alam, I., Khoso, M. A., Ali, Q., Liu, F., 2024. Waterlogging stress in plants: Unraveling the mechanisms and impacts on growth, development, and productivity. *Environmental and Experimental Botany*, 224: 105824.
- McNeill, J.R., Winiwarter, V., 2004. Breaking the sod: humankind, history, and soil. *Science*, 304: 1627–1629.
- Mead, R., Willey, R.W., 1980. The concept of a "land equivalent ratio" and advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*, 16: 217–228.
- Metwally, A.A., Safina S.A., Abdel-Wahab E.I., Abdel-Wahab Sh.I., Abdel-Wahab T.I., 2021. Screening thirty soybean genotypes under solid and intercropping plantings in Egypt. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 24:203–220.
- Metwally, A.A., Safina, S.A., Abdel-Wahab, T.I., Abdel-Wahab, Sh.I., 2019b. Growing of twenty soybean genotypes in solid and intercropping systems with corn. *Research on Crops*, 20 (Issue Suppl): S47–S57.
- Metwally, A.A., Safina, S.A., Sherief, M.N., Abo-Hegazy, D.R.E., 2019a. Intercropping soybean with three corn varieties in Egypt. *Plant Archives*, 19 (2): 3431–3436.
- Nazir, M.J., Li, G., Nazir, M.M., Zulfqar, F., Siddique, K.H., Iqbal, B., Du, D., 2024. Harnessing soil carbon sequestration to address climate change challenges in agriculture. *Soil and Tillage Research*, 237: 105959.
- Niwińska, B., Witaszek, K., Niedbała, G., Pilarski, K., 2020. Seeds of n-GM soybean varieties cultivated in Poland and their processing products as high-protein feeds in cattle nutrition. *Agriculture*, 10: 174.
- Ofoe, R., Thomas, R.H., Asiedu, S.K., Wang-Pruski, G., Fofana, B., Abbey, L., 2023. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 13: 1085998.
- Ouda, S.A., El Mesiry, T., Abdallah, E.F., Gaballah, M.S., 2007. Effect of water stress on the yield of soybean and maize grown under different intercropping patterns. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1: 578–585.
- Pepliński, B., 2019. Location of Cows and Pigs in Suburban Areas of Polish Metropolitan Centers. *Sustainability*, 12 (7), 2619.
- Rai, S., Singh, P.K., Mankotia, S., Swain, J., Satbhai, S.B., 2020. Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*, 1: 100008.
- Schmitt, M., Watanabe, T., Jansen, S., 2015. The effects of aluminium on plant growth in a temperate and deciduous aluminium accumulating species. *AoB Plants*, 8.
- The Poultry Site. 2024. EU poultry production climbs in 2023. <https://www.thepoultrysite.com/news/2024/10/eu-poultry-production-climbs-in-2023>.
- Thor, K., 2019. Calcium-nutrient and messenger. *Frontiers in Plant Science*, 10: 449564.
- Zhou, W., Pian, R., Yang, F., Chen, X., Zhang, Q., 2021. The sustainable mitigation of ruminal methane and carbon dioxide emissions by co-ensiling corn stalk with *Neolamarkia cadamba* leaves for cleaner livestock production. *Journal of Cleaner Production*, 311: 127680.

Statistical analysis of seeds morphology and texture for interspecific similarity assessment across taxonomic levels

Analiza statystyczna morfologii i tekstury nasion w celu oceny podobieństwa międzygatunkowego na różnych poziomach taksonomicznych

Seweryn Lipiński 

Faculty of Technical Sciences, University of Warmia and Mazury in Olsztyn

[✉seweryn.lipinski@uwm.edu.pl](mailto:seweryn.lipinski@uwm.edu.pl)

Seed-based identification is important for both botanical research and agricultural practice, yet many recent approaches rely on opaque deep learning models. This study evaluates whether simple geometric and textural descriptors extracted from seed images can capture taxonomic patterns across species, genera and families. A dataset of 4,496 seed images representing 88 plant species was analysed using 13 interpretable shape- and texture-based features. Multivariate Analysis of Variance (MANOVA), canonical variate analysis and Mahalanobis distances were applied to quantify group separation, while hierarchical clustering and heatmaps served as complementary exploratory tools to visualize similarity structures. Across all taxonomic levels, MANOVA revealed highly significant multivariate differences, with most separation explained by a consistent subset of shape-related descriptors, particularly solidity, extent, convex area and major axis length. Texture features contributed only marginally. These findings indicate that fundamental, explainable seed morphology descriptors provide a robust and scalable basis for taxonomic differentiation, offering an interpretable alternative to black-box classification approaches and supporting automated plant identification.

Keywords: seed image analysis, plant species identification, botanical classification, geometric and textural features, hierarchical clustering

Identyfikacja na podstawie cech nasion jest ważna zarówno dla badań botanicznych, jak i praktyki rolniczej, jednak wiele współczesnych podejść opiera się na nieprzejrzystych modelach głębokiego uczenia. Niniejsze badanie ocenia, czy proste deskryptory geometryczne i teksturalne wyodrębnione z obrazów nasion mogą uchwycić wzorce taksonomiczne w obrębie gatunków, rodzajów i rodzin. Zbiór danych 4496 obrazów nasion reprezentujących 88 gatunków roślin został przeanalizowany z wykorzystaniem 13 interpretowalnych cech opartych na kształcie i teksturze. Wielowymiarowa analiza wariancji (MANOVA), analiza zmiennych kanonicznych oraz odległości Mahalanobisa zostały zastosowane do ilościowego określenia separacji grup, podczas gdy hierarchiczna analiza skupień i mapy cieplne (heatmaps) posłużyły jako uzupełniające narzędzia eksploracyjne do wizualizacji struktur podobieństwa. Na wszystkich poziomach taksonomicznych MANOVA ujawniła wysoce istotne różnice wielowymiarowe, przy czym większość separacji została wyjaśniona przez spójny podzbiór deskryptorów związanych z kształtem, w szczególności zwartość, powierzchnię, wypukłość i długość osi głównej. Cechy tekstury miały jedynie marginalny wpływ. Wyniki te wskazują, że podstawowe deskryptory morfologii nasion zapewniają solidną i skalowalną podstawę do różnicowania taksonomicznego, oferując interpretowalną alternatywę dla podejść klasyfikacyjnych typu „czarna skrzynka” i wspierając automatyczną identyfikację roślin.

Słowa kluczowe: analiza obrazu nasion, identyfikacja gatunków roślin, klasyfikacja botaniczna, cechy geometryczne i teksturalne, hierarchiczna analiza skupień

Introduction

In recent years, the field of seed recognition and classification has closely followed the broader trends observed in image analysis and pattern recognition. Deep learning approaches, particularly convolutional neural networks (CNNs), have become the dominant methodology (Chen et al., 2021; Taye, 2021; Zhao et al., 2024). These networks have been applied successfully to various seed-related tasks, such as classifying seeds of different species (Eryigit and Tugrul, 2021; Kumar et al., 2024; Loddo et al., 2021) and differentiating between varieties within a single species. Examples include maize variety recognition

(Wang and Wang, 2021), wheat cultivar classification (Yasar, 2024), rice seed analysis (Rajalakshmi, 2024), chickpea sorting (Taheri-Garavand et al., 2021), and the identification of cannabis seeds (Islam et al., 2024).

Despite the remarkable classification performance of neural networks, especially in large-scale applications, their use in scientific studies is not without drawbacks. One fundamental limitation is their dependency on the size, quality, and representativeness of the training datasets. In botanical contexts, where image data might be scarce or imbalanced across species, this can limit their generalizability. Another critical issue is the lack of interpretability – CNNs are often regarded as

"black-box" models, providing little or no insight into the specific features used for decision-making (Buhrmester et al., 2021, Szandała, 2023). As neural networks become deeper and more complex, they tend to rely on increasingly abstract representations that are difficult to relate to biological or morphological traits (Barbierato and Gatti, 2024; Krohn et al., 2019). This poses challenges for biological research, where transparency, reproducibility, and biological plausibility are essential.

Alongside deep learning, more interpretable approaches to seed image analysis remain active in literature. For example, methods involving handcrafted features have been successfully used to classify pepper seeds using colour filter array images (Djoule, 2024), assess grape seed morphology (Espinosa-Roldán et al., 2024), analyse pumpkin seed diversity (Ermiş et al., 2025), and detect broken soybean seeds (Chen et al., 2022). These approaches offer the advantage of using well-defined, explainable features, such as shape descriptors, colour statistics, and textural measures, which can be directly visualized, measured, and interpreted. They also allow us to identify and communicate which features are most relevant to classification decisions, supporting scientific understanding and practical implementation.

However, such methods often rely on highly customized descriptors tailored to specific tasks, limiting their general applicability. This raises the question of whether a consistent set of fundamental geometrical and textural features, extracted from binary or grayscale images of seeds, might be sufficient to differentiate species across taxonomic levels. If so, this would enable a transparent and accessible approach to seed classification, applicable in various biological and ecological contexts, without the need for extensive computational resources or large annotated datasets.

Motivated by this hypothesis, the present study explores the effectiveness of basic morphological and texture-based features in distinguishing seeds of different plant taxa. The proposed approach involves extracting a set of general-purpose descriptors from seed images and subjecting them to statistical analysis in order to quantify interspecific, intergeneric, and interfamilial similarities and differences. This enables both numerical comparisons and visual interpretations of patterns in seed morphology and texture.

The key aim of this article is to evaluate whether simple, quantifiable features can reveal meaningful biological patterns across species, genera, and families, and whether these patterns are consistent with established taxonomic relationships. By focusing on explainable descriptors and standard image analysis techniques, the study contributes a methodology that complements existing black-box approaches, while offering valuable

insights into seed morphology and its potential for species identification and classification.

Materials and Methods

Seed dataset

The seed images analysed in this study originate from a publicly available dataset (A dataset based on smartphone acquisition that can be used for seed identification using deep learning models, 2023), with a description presented in (Yuan et al., 2024).

The full dataset comprises 4,496 images representing seeds from 88 plant species. Each image has a fixed resolution of 192×272 pixels and depicts a single seed photographed under standardized conditions. Although the acquisition process was standardized, natural differences in seed size, surface properties, and lighting resulted in varying image quality. This variability was intentionally preserved, as it reflects realistic conditions that may occur in practical applications and ensures that the proposed approach is robust to such differences. Fig. 1 presents a selection of eight representative seed images from this dataset, along with their corresponding species names.

As previously mentioned, the dataset includes seeds from 88 plant species, with a strong representation from the legume (Leguminosae) and grass (Poaceae) families - these two families account for exactly half of the species in the dataset.

It should be noted that the actual content of the dataset does not fully match its description in the original article. This discrepancy explains the slight differences between the data presented in Fig. 2 and the information reported in the paper describing the dataset (Yuan et al., 2024). However, the dataset used in this study is the original version provided by the authors, without any modifications.

Used software

MATLAB software was utilized for both image and statistical analysis, as well as for results visualization, with particular emphasis on the Statistics and Image Processing Toolboxes (Cho and Martinez, 2014; Gonzalez et al., 2003; Reyes-Aldasoro, 2025). Fig. 3 presents the workflow of the experimental design and data analysis.

2.3. Geometric and textural characteristics

A variety of properties were determined for the seed images. For texture analysis, mean, standard deviation, and entropy were calculated from grayscale versions of the images, as these measures are based on the normalized gray-level histogram. These features were selected because they capture fundamental aspects of seed surface texture: mean reflects overall brightness, standard deviation indicates contrast and variability, and

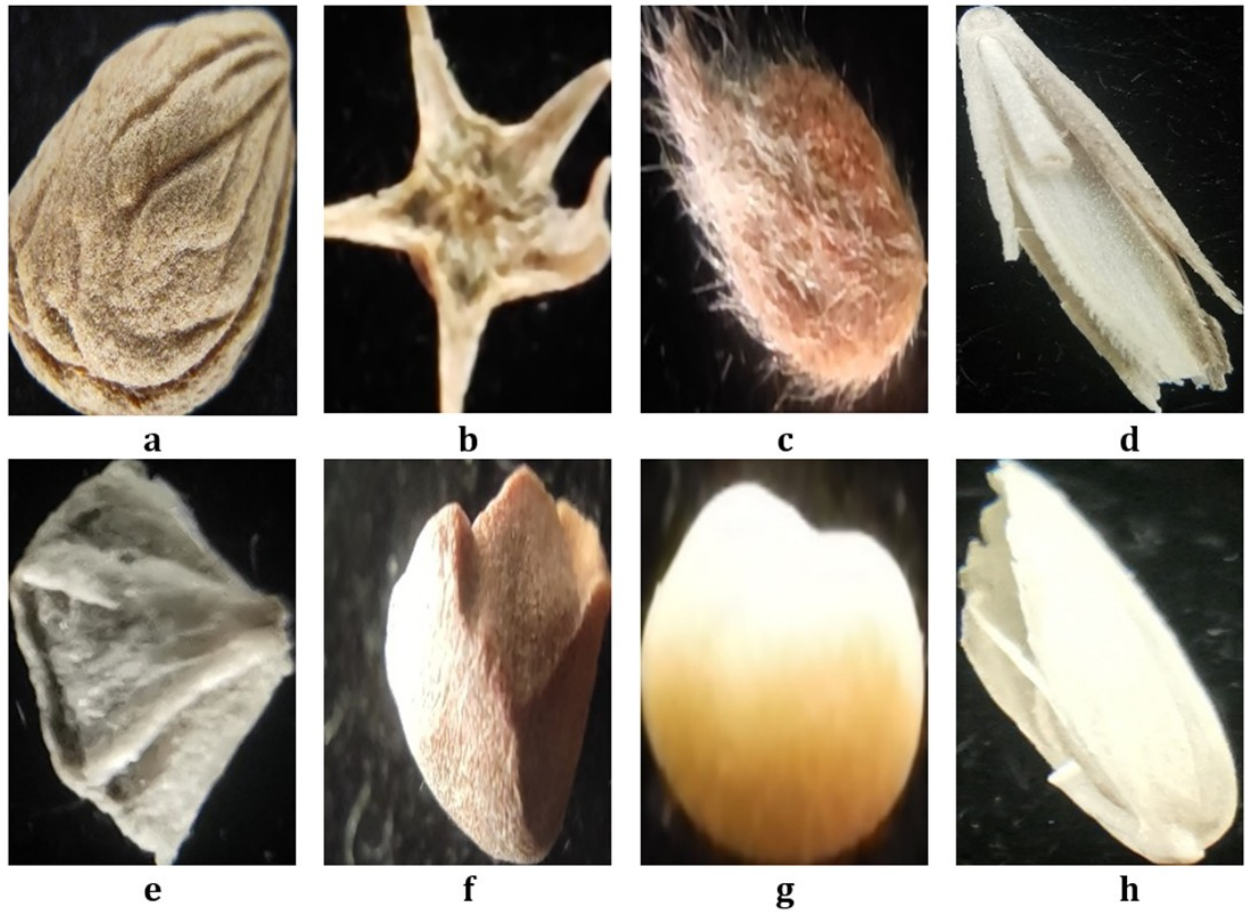


Fig. 1. Exemplary seed images from the used dataset: *Amygdalus mongolica* (a), *Bassia dasyphylla* (b), *Clematis fruticosa* (c), *Elymus sibiricus* (d), *Halostachys caspica* (e), *Iris lactea* (f), *Medicago sativa* (g), and *Poa annua* (h).

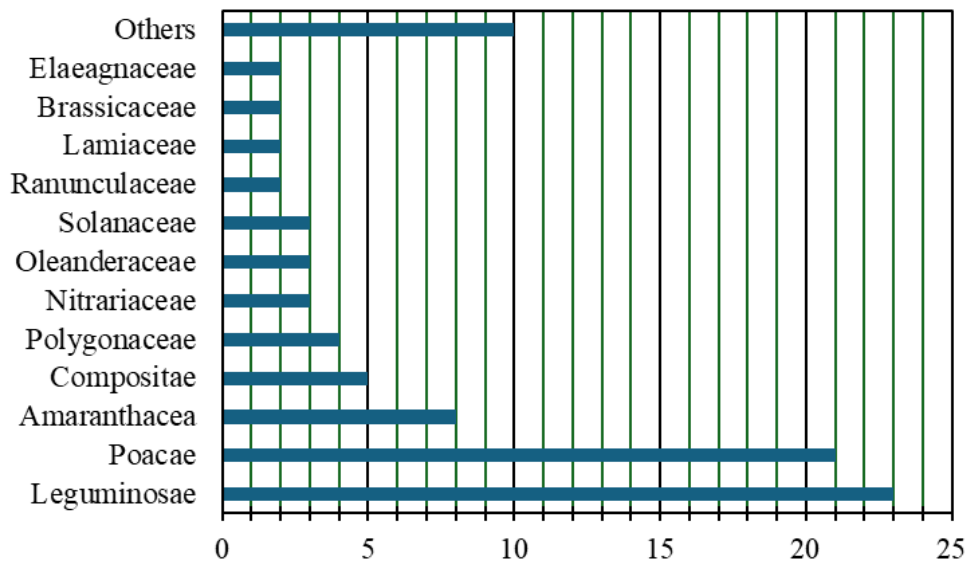


Fig. 2. Number of species in each plant family represented in the dataset used in this study.

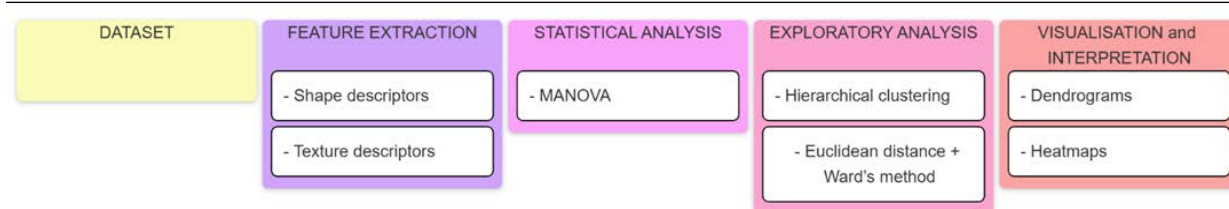


Fig. 3. Workflow of the analysis steps.

entropy measures complexity and irregularity of the surface.

For shape analysis, the following properties were calculated from binary images: Area, Euler number (equal to the number of holes inside a binarized seed image), Extent (the ratio of the area of the object to the area of its axis-aligned bounding box), Perimeter (the number of pixels in the boundary between a seed and the background), Convex area (the area of the convex hull of the seed; the convex hull is the smallest convex shape that can completely enclose the seed), Filled area (the number of pixels in the seed after filling any holes within its binarized image), Solidity (the proportion of the pixels in the convex hull that are also in the region), Eccentricity (calculated from the fitted ellipse derived from image moments; defined as the ratio of the distance between the foci of the ellipse and its major axis length, which reflects how elongated the seed shape is), Equivalent diameter (the diameter of a circle with the same area as the seed), and Major and Minor axis length (the lengths of the fitted ellipse axes based on image moments) (Gonzalez et al., 2003; Reyes-Aldasoro, 2025). It should be noted that the above parameters are independent of seed orientation. Therefore, the Major and Minor axis length parameters refer directly to the longer and shorter axes of the seed, rather than the x and y axes.

The binarization of colour images to calculate properties of binary images was performed using the Otsu automatic thresholding method (Otsu, 1979; Sezgin and Sankur, 2024). This method is one of the most frequently used and cited thresholding techniques (Kalicka and Lipiński, 2010; Lipiński and Lipiński, 2020). Its other advantages include ease of implementation and low computational demand.

After calculating the set of features for each seed, matrices were created where each row contained the features of a specific seed, labelled with its species. This formed the input data for statistical analysis.

Statistical analysis and results visualization

The experimental workflow combined confirmatory and exploratory approaches to address both statistical and biological questions. First, Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) was applied to test the hypothesis that predefined groups (species and families) differ significantly in multivariate space based on all extracted de-

scriptors. The null hypothesis assumed no differences among groups. MANOVA is an extension of the ANOVA test that assesses the impact of independent variables on multiple dependent variables simultaneously. This method is particularly useful in studies involving several related outcome variables that may be influenced by the same factors (e.g., seed characteristics) (Wiesnerova and Wiesner, 2008). Wilks' Lambda was used as the test statistic to assess group differences.

Following the analysis, hierarchical clustering and heatmaps were employed as complementary exploratory tools to visualize similarity patterns among species and families. Hierarchical clustering was performed using Euclidean distance as the dissimilarity measure and Ward's linkage method for cluster formation. A dendrogram is a tree-like diagram that illustrates the arrangement of clusters produced by hierarchical clustering. It represents relationships among species based on Euclidean distance and Ward's linkage method, grouping species according to similarity in descriptor space (Pavlopoulos et al., 2010). Each branch of the dendrogram corresponds to a cluster, and the length of the branches indicates the dissimilarity between clusters, which in this context reflects the degree of inter-species variation in the calculated feature vectors.

Heatmaps provide a visual representation of data patterns and relationships within a dataset. Each cell in the heatmap corresponds to a specific feature value, with colours indicating its magnitude (Engle et al., 2017; Wilkinson and Friendly, 2009). When combined with clustering techniques, heatmaps can highlight groups of species with similar characteristics. Rows and columns were reordered based on clustering results, making it easier to identify patterns and associations among features. Heatmaps simplify the interpretation of complex, high-dimensional data by providing an intuitive and immediate visual summary. In this study, heatmaps were used to analyse the distribution of seed descriptors across species and families, supporting the identification of biologically meaningful patterns such as trait similarities within families.

All feature values visualized in the heatmaps were z-score standardized prior to clustering and visualization. Consequently, the colour scale reflects standardized values rather than raw measurements, ensuring comparability across variables with different scales. The intensity of colours indi-

cates the relative magnitude of each standardized feature value for a given object; however, it does not represent the contribution or weight of individual descriptors to the clustering process. Hierarchical clustering relies on the joint multivariate structure of all descriptors, whereas the heatmap serves exclusively as a visualization of their distribution. Proximity in the dendrogram reflects statistical association among descriptors rather than direct biological or causal relationships.

It is also important to note that neither hierarchical clustering nor heatmaps constitute a method for feature selection. Assessing the relevance, redundancy, or contribution of variables requires dedicated analytical approaches, such as e.g. Principal Component Analysis. Furthermore, because many morphological descriptors may exhibit collinearity, removing features identified as highly similar should be approached with caution, as this may inadvertently suppress complementary information or distort the multivariate relationships. While some features may be correlated, their removal requires caution, as it could distort the overall representation of seed morphology, particularly for variables that may be more sensitive to variability in image quality.

Selection Criteria

For the analyses conducted at the genus and family levels, all available seed images belonging to a given genus or family were included without any additional labels or filtering. This approach ensured that the clustering was based solely on the visual characteristics of the seeds, without introducing external classification constraints.

In contrast, the species-level analysis was intended as a preliminary test to demonstrate the applicability of the proposed tool and to verify whether species belonging to the same family exhibit greater similarity to each other than to species from different families. For this purpose, a small set of species was selected in alphabetical order, without applying any biological or ecological criteria. This simplified selection allowed for an initial assessment of the clustering performance and the potential of the method for more detailed taxonomic studies.

Results and Discussion

The following subsections analyse exemplary and representative clustering results, considering species (3.1), genera (3.2), and families (3.3). This analysis demonstrates the potential for examining differences in seeds features at various levels.

Two example analyses of differences and similarities at species level

First example

This subsection presents interspecific seed differentiation using six representative species as examples. To maintain objectivity, the first six species from the collection were selected in alpha-

betical order. These include *Achnatherum inebrians*, *Achnatherum splendens*, *Agropyron cristatum*, *Agropyron elongatum*, *Agropyron mongolicum* (all belonging to the Poaceae family), and *Agriophyllum squarrosum* (from the Amaranthaceae family).

Fig. 4 shows a dendrogram generated based on the statistical analysis of seed feature vectors. For visual reference, this figure also includes representative seed images corresponding to each species in the dendrogram. As previously mentioned, the y-axis of a dendrogram reflects the degree of dissimilarity between clusters - the higher the value, the greater the dissimilarity.

According to the dendrogram, *Agropyron mongolicum* and *Agropyron elongatum* form a tight cluster, indicating a high degree of similarity in seed features. While *Agropyron cristatum* belongs to the same genus, it appears more distinct and forms its own cluster, suggesting greater differentiation. These relationships are visually supported by the accompanying seed images, which confirm the level of similarity described by the dendrogram (it is worth recalling here that the calculated parameters are independent of seeds orientation in the photos). This proves the effectiveness of the feature vector in accurately capturing both similarities and differences among the seeds.

The *Agropyron* cluster shows some similarity to the *Achnatherum* group but remains clearly separate. Notably, although *Achnatherum splendens* and *Achnatherum inebrians* form a single cluster, *Achnatherum splendens* appears to have an equal level of similarity to both *Achnatherum inebrians* and the *Agropyron* cluster. This can be explained by the seed images: while seeds from the *Achnatherum* genus share similar surface textures, the seed of *Achnatherum inebrians* is visibly less slender than that of *Achnatherum splendens*, more closely resembling the compact shape of *Agriophyllum squarrosum*.

Agriophyllum squarrosum is clearly the most distinct among the analysed species, forming a separate branch in the dendrogram, which suggests unique morphological traits. This distinction is easily justified by its taxonomic classification - it belongs to the Amaranthaceae family, whereas all other analysed species are members of the Poaceae family.

The multivariate analysis of variance (MANOVA) confirmed statistically significant differences among the studied species ($p < 0.001$). The canonical analysis revealed that the first three canonical variates, associated with eigenvalues 4.04, 1.42, and 0.46, accounted for the vast majority of multivariate separation, whereas the remaining variates contributed negligibly. Pairwise Mahalanobis distances between group centroids further demonstrated clear interspecific structure. The closest species pair was *Agropyron elongatum* and

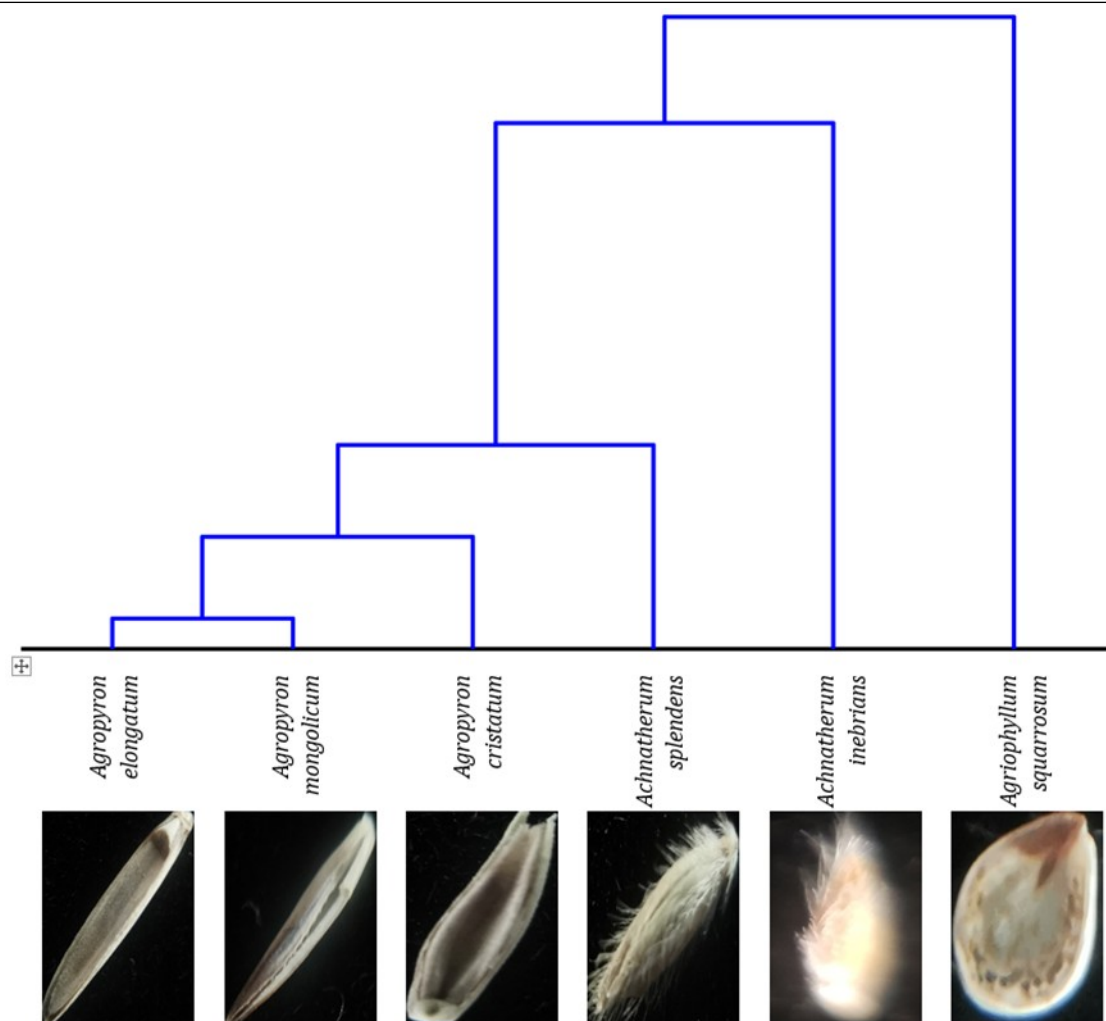


Fig. 4. Dendrogram obtained for six exemplary seeds species, and representative photos of seeds from the six chosen species.

Agropyron mongolicum ($d = 2.97$), followed by *A. cristatum*–*A. elongatum* ($d = 4.58$) and *A. cristatum*–*A. mongolicum* ($d = 4.77$), indicating a compact morphological cluster within the genus *Agropyron*. In contrast, *Agriophyllum squarrosum* was the most divergent taxon, exhibiting the largest distances to all remaining groups, particularly to *Achnatherum inebrians* ($d = 30.24$) and *A. splendens* ($d = 28.28$). These results demonstrate that most interspecific variation is captured by a small number of canonical dimensions and that the genus *Agropyron* forms a tightly cohesive multivariate group, while *A. squarrosum* remains clearly isolated.

The canonical variates were strongly associated with morphological descriptors related to seed shape and outline. CV1 was primarily driven by geometry-related features, including Major Axis Length, Solidity, Convex Area, Extent and Perimeter, indicating that overall shape proportions represented the dominant axis of interspecific separation. CV2 captured additional differences in convexity and elongation patterns, while CV3 was almost entirely determined by Major Axis Length, Solidity and Perimeter. In contrast, texture-based

descriptors such as entropy and grey-level statistics had negligible loadings across all canonical variates. These results show that morphological rather than textural traits are the principal sources of multivariate differentiation among the studied species.

Fig. 5 shows a heatmap, being the result of analysis of individual seeds features. It allows us to observe the clusters formed by the seed features, which, for example, could be useful when creating a classification algorithm - it can help us identify features that are very similar or even redundant. The colour scale (in this heatmap, as well as in every subsequent one) ranges from -3 to 3, with red indicating higher values, green indicating lower values, and black representing intermediate values.

Analysis of the heatmap reveals that the Area and Filled Area parameters are closely related, which aligns with intuitive expectations. In principle, this suggests that only one of these features may be sufficient for classification. Less intuitively, a similar proximity is observed between Convex Area and Minor Axis Length.

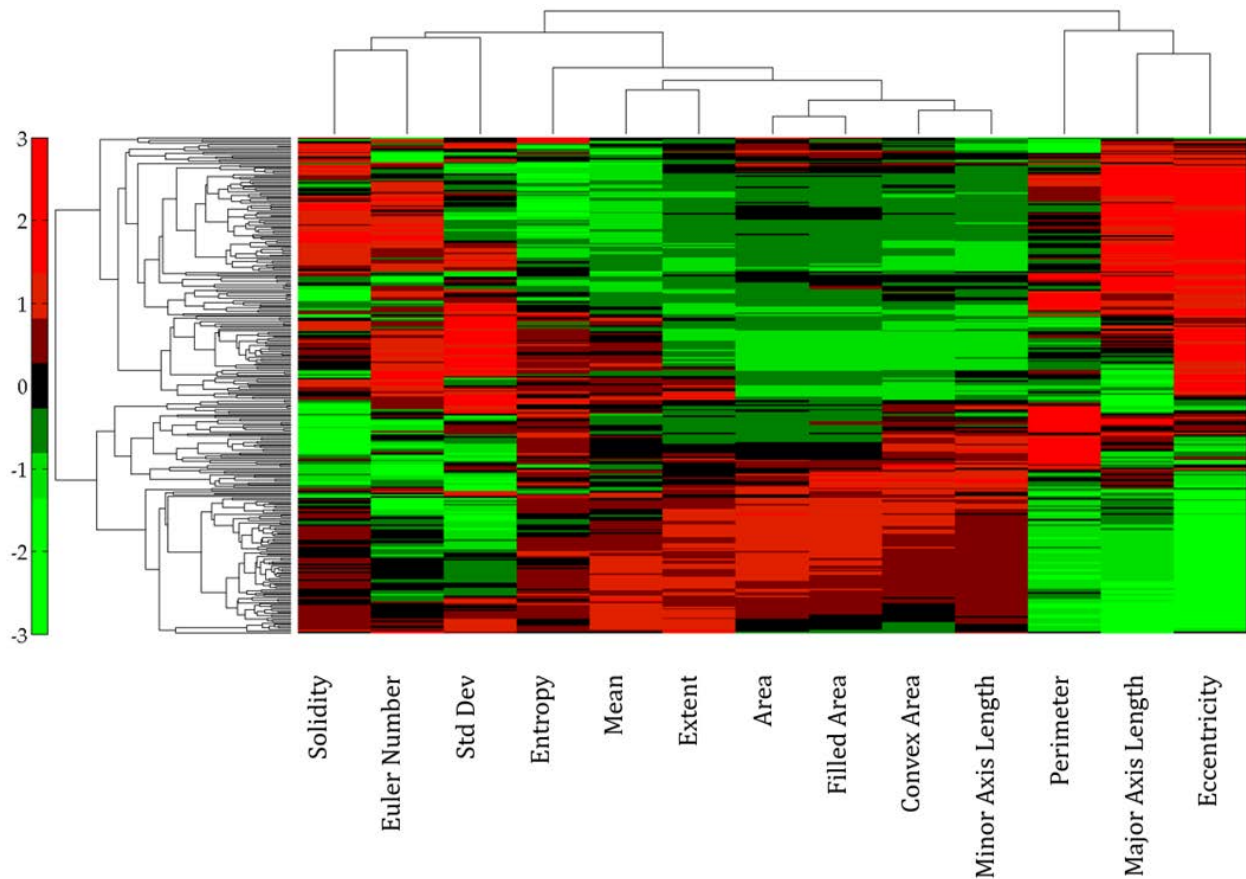


Fig. 5. Hierarchical clustering heatmap of seed features for six exemplary seeds species.

However, this proximity reflects similarity in the standardized feature values rather than their predictive relevance. Heatmaps and hierarchical clustering visualize similarity structures but do not evaluate feature importance.

For this reason, decisions regarding feature retention should be based on the performance of supervised classification models rather than on the exploratory visualizations. In these models, features such as Solidity, Euler Number, Standard Deviation, Perimeter, Major Axis Length, and Eccentricity contributed measurably to predictive accuracy and therefore cannot be removed without compromising performance.

Nonetheless, it is important to note that in specific cases - where different species share similar values for most features - subtle variations in brightness may render the distinction between Area and Filled Area critical for accurate classification. Therefore, feature reduction should be approached cautiously. This is particularly relevant considering that binary image-based features are computationally inexpensive, meaning that the potential benefits of reducing the feature count may not outweigh the risk of degrading classification accuracy.

Second example

To evaluate whether the proposed approach enables similarly intuitive interpretation for species from different families, an additional analysis

was conducted using six species selected from the end part of the dataset.

The analyzed species included *Trifolium repens*, *Vicia sativa*, and *Vicia villosa* (all from the Leguminosae family), *Saposhnikovia divaricata* (Apiaceae), *Triticale* (Poaceae), and *Zygophyllum xanthoxylon* (Zygophyllaceae). Notably, this group represents greater taxonomic diversity than the previous set, making it a suitable basis for comparison.

Fig. 6 presents the dendrogram generated based on statistical analysis of seed morphological and textural feature vectors for this set of species. As in the case of Fig. 4, for visual reference, this figure includes representative seed images corresponding to each species in the dendrogram as well.

The dendrogram shows the hierarchical similarity structure among the analysed species based on their standardized seed descriptors. The first cluster to form is the pair *Triticale* and *Zygophyllum xanthoxylon*, which merge at the lowest dissimilarity level, indicating that these two species share the most similar descriptor profiles within the dataset. This cluster is subsequently joined by *Saposhnikovia divaricata*, forming a distinct group separate from the remaining species.

On the opposite branch, containing, as it turned out, members of the Leguminosae family, *Vicia sativa* and *Vicia villosa* form the closest pair,

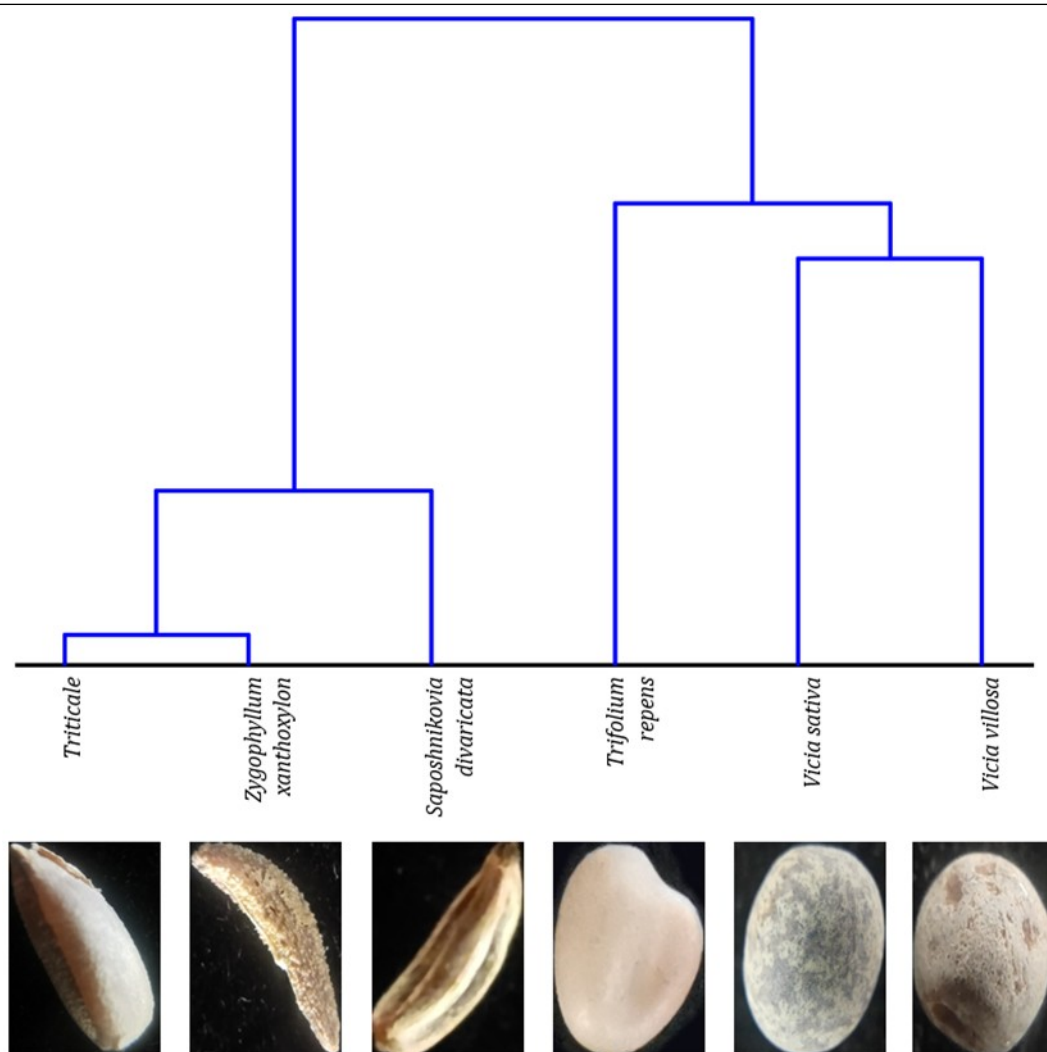


Fig. 6. Dendrogram obtained for another six exemplary seeds species, and representative photos of seeds from these six species.

reflecting strong similarity in their seed characteristics. *Trifolium repens* joins this cluster at a higher dissimilarity threshold, suggesting partial similarity to the *Vicia* species while maintaining clear species-specific differences. At the highest level of the hierarchy, the left and right clusters merge, indicating that the inter-group dissimilarity is greater than the variation within either group.

MANOVA confirmed highly significant multivariate differences among the six species. Canonical variate analysis showed that interspecific separation was governed primarily by shape-related descriptors. CV1 was dominated by Solidity, Extent and Convex Area, indicating that differences in seed convexity and geometric outline represented the main axis of discrimination. CV2 further captured variation in convexity and proportionality, while CV3 was associated mainly with Major Axis Length and Extent. Texture-based descriptors contributed minimally to all canonical variates.

Pairwise Mahalanobis distances revealed distinct grouping patterns. The closest species pair was *Triticale* and *Zygophyllum xanthoxylon* ($d = 10.80$), followed by partial similarity between *Vicia sativa* and *Vicia villosa* ($d = 14.26$).

In contrast, *Vicia villosa* was the most divergent taxon, showing the largest separation from *Saposhnikovia divaricata* ($d = 35.72$).

Fig. 7 presents a heatmap, illustrating the analysis of individual seed features for the second example.

Comparison of this heatmap with the one presented in Fig. 5 leads to several observations. As in the previous case, the features Filled Area and Area appear closely related. However, other pairs of features do not exhibit such clear proximity. Overall, the feature dendrogram in this heatmap differs noticeably from the previous one, indicating that increasing taxonomic diversity alters the similarity structure among descriptors. This reflects changes in how features co-vary across the broader set of species, rather than shifts in their discriminative influence. Nevertheless, when examining the individual columns (representing species), a degree of similarity can still be observed. This indicates that while the discriminative power of features may vary, their behaviour across clusters remains relatively consistent.

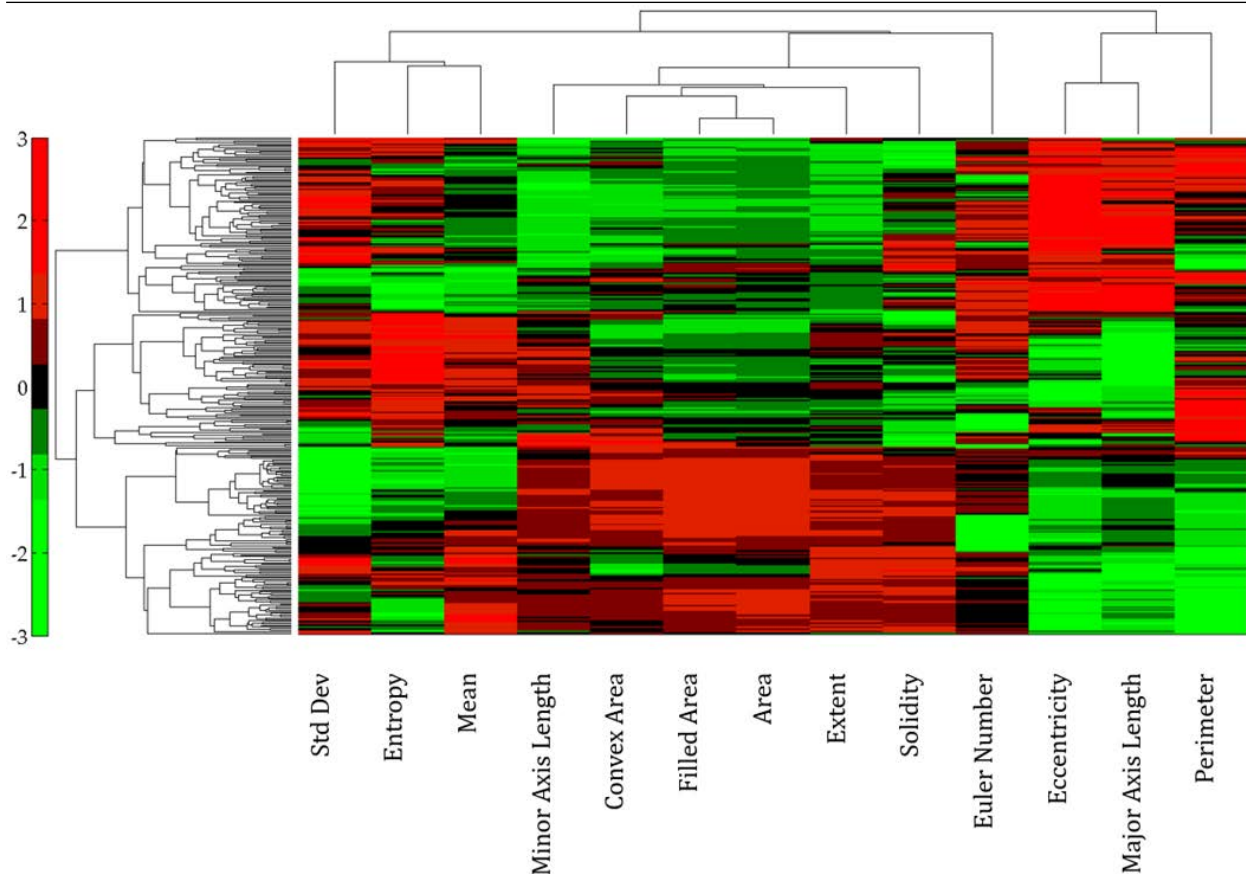


Fig. 7. Hierarchical clustering heatmap of seed features for six exemplary seeds species.

Analysis of differences and similarities at genus level

To present the results of the analysis at the genus level, we included only genera represented by at least two distinct species in our dataset. This criterion ensured sufficient intra-genus variation for meaningful analysis. Applying this rule resulted in the selection of fifteen genera (family indicated in parentheses):

Achnatherum, *Agropyron*, *Elymus*, *Puccinellia* (Poaceae), *Apocynum* (Oleanderaceae), *Artemisia* (Compositae), *Astragalus*, *Caragana*, *Corethroedendron*, *Lespedeza*, *Medicago*, *Vicia* (Leguminosae), *Lycium* (Solanaceae), *Nitraria* (Nitrariaceae), and *Rumex* (Polygonaceae).

The dendrogram generated for these genera is shown in Fig. 8.

This image offers several noteworthy insights. Most strikingly, two clearly separated branches correspond to the genera *Nitraria* and *Rumex*, indicating that these groups possess distinctive sets of traits and are unlikely to be confused with seeds from the other analysed genera. Further examination reveals that *Puccinellia* and *Vicia* also form relatively distinct clusters, suggesting they, too, are set apart by their geometric and textural features.

Two larger clusters are visible: one comprising *Artemisia*, *Medicago*, *Lycium*, and *Lespedeza*, and another containing *Astragalus*, *Corethroedendron*,

and *Caragana*. The y-axis values indicate that the differences among genera in the first group are smaller than those in the second. Notably, the first cluster includes genera from three families (Compositae, Leguminosae, and Solanaceae), whereas all genera in the second group belong to the Leguminosae family.

Interestingly, genera like *Elymus* (Poaceae) and *Apocynum* (Oleanderaceae), despite their taxonomic separation, appear closely grouped. Such similarities in nature may reflect convergent adaptations to similar ecological niches or dispersal strategies; however, exploring these aspects lies beyond the scope of this article.

MANOVA revealed highly significant multivariate differences among the 15 genera. Canonical variate analysis demonstrated that interspecific separation was driven primarily by geometric and convexity-related descriptors. CV1 was dominated by Solidity, Extent and Major Axis Length, indicating that seed compactness and elongation represent the main axes of morphological differentiation. CV2 captured additional differences in convexity and outline regularity, whereas CV3 reflected variation in elongation and proportionality. Texture-related features had only marginal contributions across all canonical variates.

Mahalanobis distances showed strong taxonomic structuring. The closest genera were *Agropyron* and *Elymus* ($d = 1.74$), with *Achnatherum*

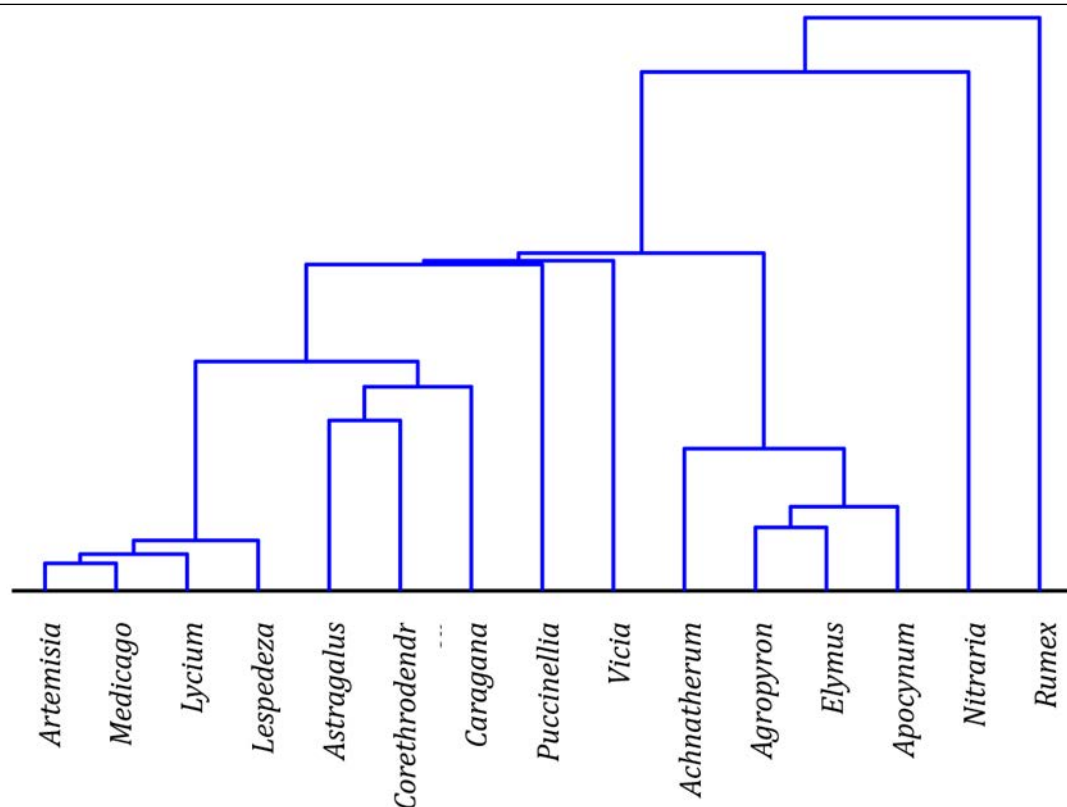


Fig. 8. Hierarchical clustering of plant genera based on seed morphological and textural features.

also clustering closely with them, forming a cohesive Poaceae group. Fabaceae members (*Astragalus*, *Corethrodrondron*, *Vicia*) also showed moderate similarity. In contrast, *Rumex* was the most distinct genus, exhibiting the largest distances to all others (up to $d = 22.31$).

The heatmap shown in Fig. 9 provides a visualization of variation in morphological and textural seed traits across all analysed samples.

In this heatmap, clear clustering patterns are observed both among features and observations. Size-related features such as Area, Filled Area, and Convex Area cluster tightly, reflecting their strong similarity and shared measurement characteristics. Textural descriptors (Entropy, Mean, and Std Dev) also form a coherent cluster, indicating that these variables exhibit similar patterns across samples and behave consistently as a group within the dataset.

Analysis of differences and similarities at family level

Fig. 10 shows a dendrogram constructed based on the statistical analysis of feature vectors of seeds grouped by families. 68 species were analyzed, i.e. only those families that were represented by at least two species were selected.

The clustering reveals several notable patterns. Leguminosae, Lamiaceae, and Amaranthaceae form a closely associated group, indicating a high degree of similarity in seed features such as shape, surface texture, and compactness. Similarly, Poaceae, Brassicaceae, and Solanaceae are grouped

together, suggesting shared morphological traits, possibly related to their more regular or elongated seed forms.

At the other end of the dendrogram, Polygonaceae and Nitrariaceae are positioned as the most distinct families. Their separation from all other groups at a higher linkage distance suggests a unique combination of features, which may include greater variance in seed eccentricity, perimeter, or textural complexity.

Interestingly, Elaeagnaceae and Oleanderaceae also form a discrete cluster that joins the rest of the dendrogram only at a higher level, implying partial but limited similarity with other families, particularly those in the intermediate group such as Ranunculaceae and Compositae.

MANOVA confirmed highly significant multivariate differences among the 12 plant families. Canonical variate analysis demonstrated that the primary axes of discrimination were governed by shape-related descriptors. CV1 was dominated by Solidity, ConvexArea and MajorAxisLength, indicating that differences in seed compactness and elongation represent the principal source of family-level separation. CV2 and CV3 reflected additional variation in convexity and proportionality of the seeds. Texture-based descriptors contributed minimally to the canonical structure.

Mahalanobis distances revealed several coherent morphological clusters. The closest families were Leguminosae–Lamiaceae ($d = 1.19$), Leguminosae–Solanaceae ($d = 1.65$) and Poaceae–

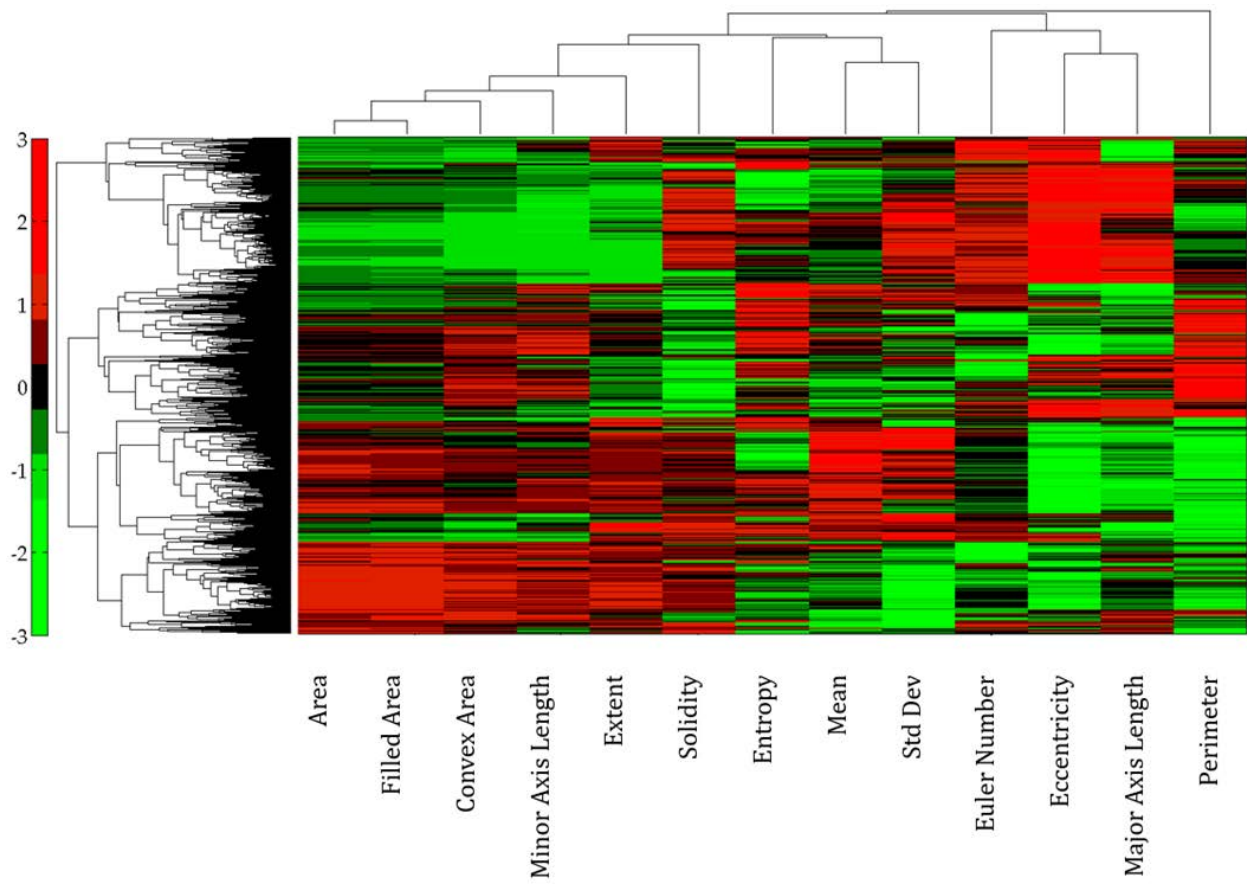


Fig. 9. Hierarchical clustering heatmap of seed features for fifteen seeds genera.

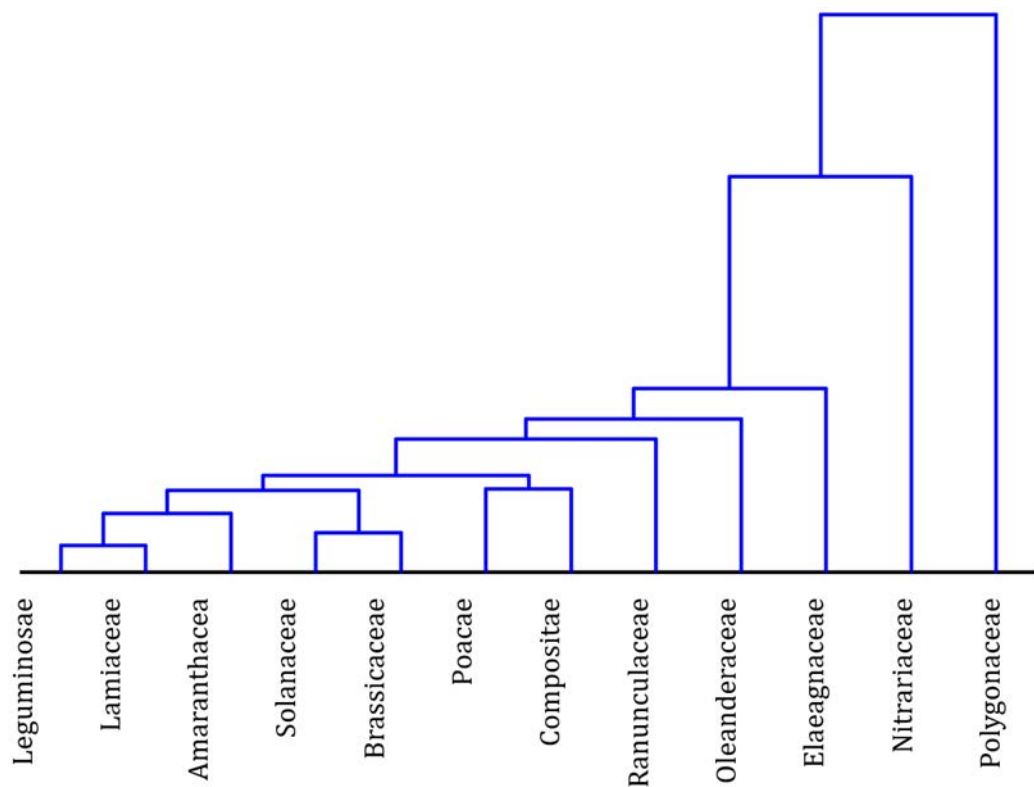


Fig. 10. Hierarchical clustering of seeds features in plant families.

Compositae ($d = 1.67$). In contrast, Polygonaceae exhibited the greatest divergence, with distances exceeding 16 to several other families, followed by Oleanderaceae and Nitrariaceae.

The heatmap shown in Fig. 11 provides a visualization of variation in morphological and textural seed traits across all analyzed samples for families clustering.

Features dendrogram for heatmap in Fig. 11 exhibits similarities to the one in Fig. 9, suggesting that analogous features are fundamental to the analysis at both the family and genus levels.

To compare how feature similarity patterns vary across taxonomic levels, Fig. 12 presents dendrograms of seed descriptors generated at the species, genus, and family levels, based on the heatmaps shown in Figs. 5, 7, 9, and 11.

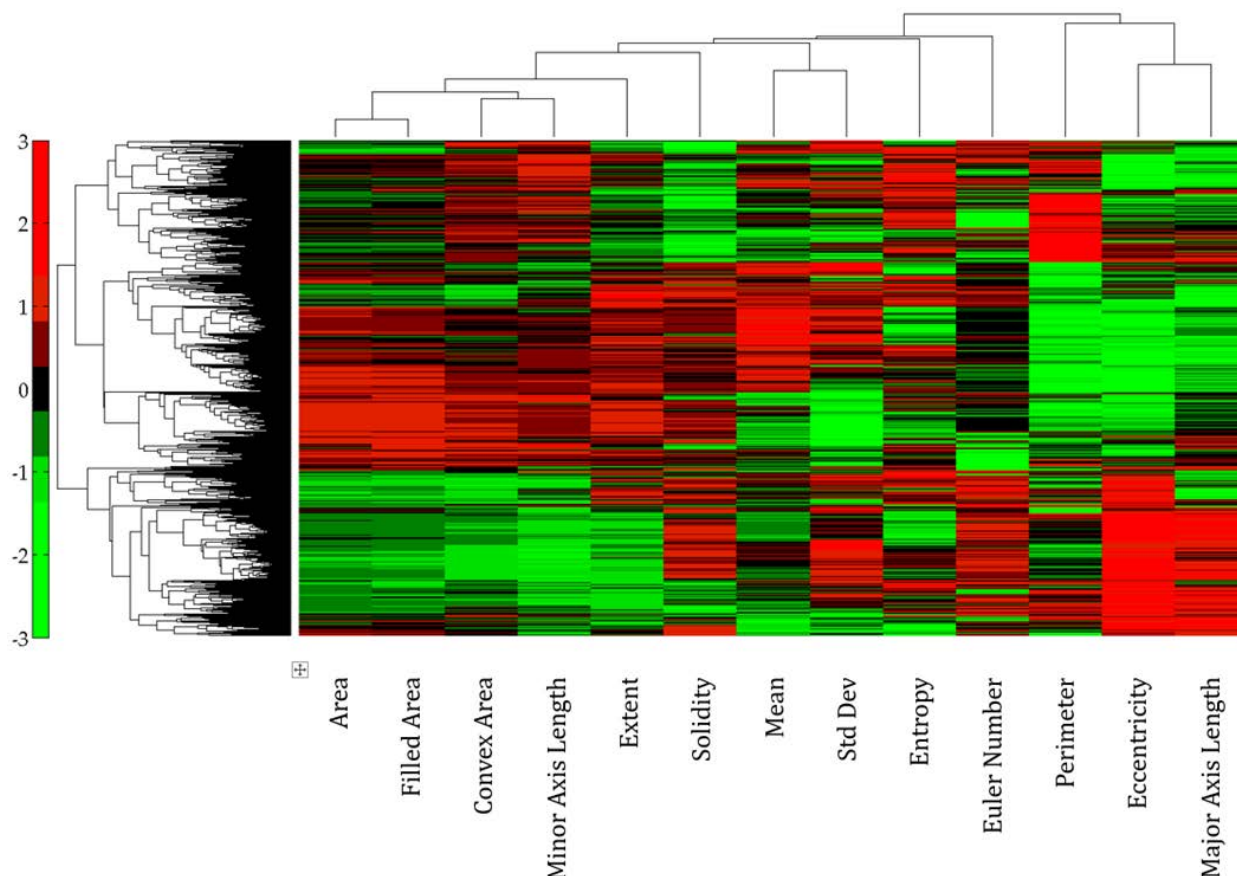


Fig. 11. Heatmap obtained for features of seeds grouped by families.

Across all taxonomic levels, some consistent groupings of features can be observed - for instance, Area and Filled Area remain closely clustered, which reflects their intrinsic relationship. Likewise, Major Axis Length, Perimeter, and Eccentricity frequently form a group, suggesting that these features jointly characterize shape elongation and contour complexity.

At the species level, the dendrograms show a higher degree of variability among feature groupings, likely due to the distinct morphological characteristics specific to individual species. This observation is confirmed by the fact that the dendrograms for two different species sets show noticeable differences.

At the genus level, clustering becomes more consistent, with a more balanced distribution of groups. The proximity of Convex Area and Minor Axis Length suggests they capture related aspects

of seed morphology within genera, though this relationship appears more variable at the species level.

This may indicate that certain features become less variable or display more generalized patterns as the taxonomic resolution decreases, with broad morphological trends dominating at the family level.

Generally, the comparison suggests that while certain morphological features remain robust indicators across taxonomic levels, others show varying degrees of influence depending on the biological diversity being considered. This emphasizes the need for careful feature selection tailored to the intended comparison level.

Across all taxonomic levels analysed (species, genera and families), multivariate separation was consistently governed by the same subset of shape-related descriptors, primarily Solidity, Extent,

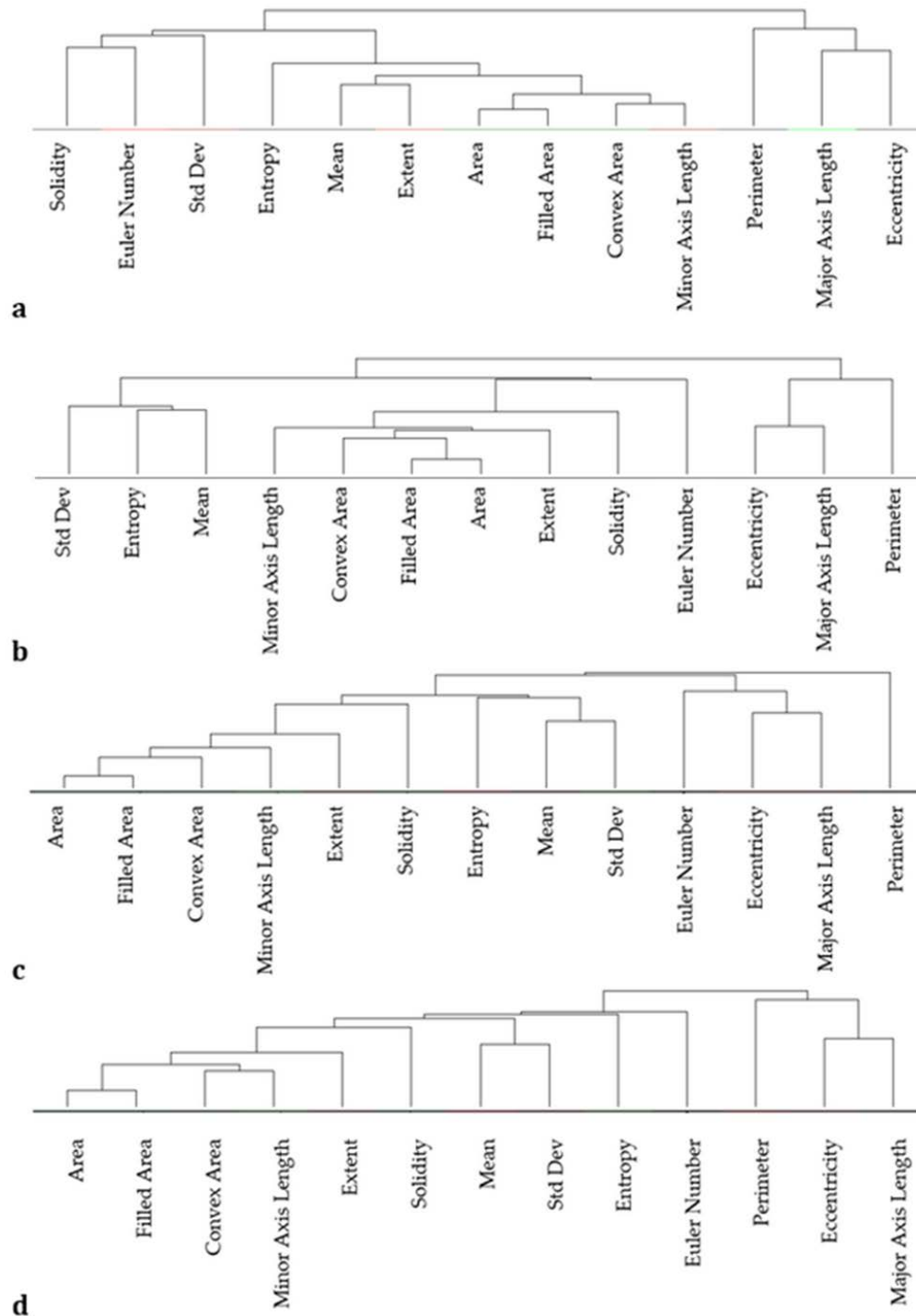


Fig. 12. Comparison of dendrograms of seeds features obtained at species (a and b, for the first and second example, respectively), genus (c) and family (d) levels.

ConvexArea and MajorAxisLength. Texture-based features played only a minor role irrespective of the taxonomic rank. This suggests that seed outline geometry provides a robust and scale-independent source of taxonomic signal, whereas texture contributes only marginally to interspecific and higher-level differentiation.

In comparison with previous studies that analysed seed morphology and texture for species classification (e.g., Djoulde, 2024; Espinosa-Roldán et al., 2024; Ermiş et al., 2025), the present

study adopts a unified set of fundamental geometric and textural features across multiple taxonomic levels (species, genus, and family). While prior work often focused on individual species or task-specific descriptors, our approach enables both intra- and inter-taxon comparisons, revealing which features consistently discriminate among taxa. Notably, the analyses show that some descriptors, such as Area, Filled Area, Major Axis Length, and Eccentricity, maintain high discriminative power across taxonomic scales, whereas

others vary in influence depending on the level of taxonomic resolution. This demonstrates the potential of simple, explainable features to provide biologically meaningful insights, support automated classification, and complement more complex, black-box approaches. Overall, these findings extend previous knowledge by identifying robust descriptors applicable across multiple levels and highlighting patterns of seed morphology that were not previously characterized in a comparative framework.

Conclusions

This study demonstrates that fundamental geometric and textural descriptors extracted from seed images can effectively capture biologically meaningful patterns and reflect taxonomic relationships at the species, genus and family levels. The combined use of MANOVA, canonical variate analysis and Mahalanobis distances confirmed highly significant multivariate differences across all taxonomic ranks, with most separation governed by a consistent subset of shape-related features. Texture-based descriptors played only a minor role, indicating that seed outline geometry provides a robust and scale-independent source of taxonomic signal.

Hierarchical clustering and heatmaps further revealed coherent similarity structures among taxa and among descriptors, supporting intuitive groupings and highlighting redundancies between some shape measures. Although exploratory in nature, these visualizations complemented the inferential

analyses by aiding interpretation of multivariate patterns and illustrating consistent feature behaviour across taxonomic levels.

Overall, the results indicate that simple, interpretable descriptors offer a reliable basis for distinguishing plant taxa and have strong potential for integration into automated identification systems. By relying on explainable image-derived metrics rather than black-box models, the proposed approach supports transparent taxonomic inference and provides a practical framework for biodiversity research and applied seed recognition.

Limitations

One important limitation of this study concerns the quality of some seed images used for analysis. Acquisition artifacts such as blurring, overexposure, or uneven lighting can influence the calculated shape and texture descriptors, potentially introducing noise into the clustering results. Consequently, interpretations based on individual images should be made with caution, and firm conclusions should not rely on examples affected by acquisition artifacts.

However, the analysis was based on a set of 13 descriptors, which reduces the impact of noise in individual features. In cases where certain descriptors are affected by image quality, their influence is mitigated by the remaining unaffected features, allowing the clustering algorithm to rely on the overall descriptor set rather than isolated values. This design ensures that the method remains robust even when minor imperfections occur in the input data.

References

- Barbierato, E., & Gatti, A. (2024). The challenges of machine learning: A critical review. *Electronics*, 13(2), 416.
- Buhrmester, V., Münch, D., & Arens, M. (2021). Analysis of explainers of black box deep neural networks for computer vision: A survey. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 3(4), 966–989.
- Chen, L., Li, S., Bai, Q., Yang, J., Jiang, S., & Miao, Y. (2021). Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 13(22), 4712.
- Chen, Z., Fan, W., Luo, Z., & Guo, B. (2022). Soybean seed counting and broken seed recognition based on image sequence of falling seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106870.
- Cho, M., & Martinez, W. L. (2014). *Statistics in MATLAB: A Primer*. CRC Press: Boca Raton, USA.
- Djoulde, K., Ousman, B., Hamadjam, A., Bitjoka, L., & Tchiegang, C. (2024). Classification of pepper seeds by machine learning using color filter array images. *Journal of Imaging*, 10(2), 41.
- Engle, S., Whalen, S., Joshi, A., & Pollard, K. S. (2017). Unboxing cluster heatmaps. *BMC Bioinformatics*, 18, 1–15.
- Ermiş, S., Ercan, U., Kabaş, A., Kabaş, Ö., & Moiceanu, G. (2025). Machine learning-based morphological classification and diversity analysis of ornamental pumpkin seeds. *Foods*, 14(9), 1498.
- Eryigit, R., & Tugrul, B. (2021). Performance of various deep learning networks in the seed classification problem. *Symmetry*, 13(10), 1892.
- Espinosa-Roldán, F. E., Rodríguez-Lorenzo, J. L., Martín-Gómez, J. J., Tocino, Á., Ruiz Martínez, V., Remón Elola, A., Cabello Sáenz de Santamaría, F., Martínez de Toda, F., Cervantes, E., & Muñoz-Organero, G. (2024). Morphometric analysis of grape seeds: Looking for the origin of Spanish cultivars. *Seeds*, 3(3), 286–310.
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., & Eddins, S. L. (2003). *Digital Image Processing Using MATLAB*. Prentice Hall: New Jersey, USA.
- Islam, T., Sarker, T. T., Ahmed, K. R., & Lakhssassi, N. (2024). Detection and classification of cannabis seeds using RetinaNet and Faster R-CNN. *Seeds*, 3(3), 456–478.
- Kalicka, R., & Lipiński, S. (2010). A fast method of separation of the noisy background from the head-cross section in the sequence of MRI scans. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 30(2), 15–27.
- Krohn, J., Beyleveld, G., & Bassens, A. (2019). *Deep Learning Illustrated: A Visual, Interactive Guide to Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Professional: Boston, USA.
- Kumar, V., Ayday, P. S. S., & Minz, S. (2024). Crop Seeds Classification Using Traditional Machine Learning and Deep Learning Techniques: A Comprehensive Survey. *SN Computer Science*, 5(8), 1031.

- Lipiński, A. J., & Lipiński, S. (2020). Binarizing water sensitive papers—how to assess the coverage area properly?. *Crop Protection*, 127, 104949.
- Loddo, A., Loddo, M., & Di Ruberto, C. (2021). A novel deep learning based approach for seed image classification and retrieval. *Computers and Electronics in Agriculture*, 187, 106269.
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66.
- Pavlopoulos, G. A., Soldatos, T. G., Barbosa-Silva, A., & Schneider, R. (2010). A reference guide for tree analysis and visualization. *BioData Mining*, 3, 1–24.
- Rajalakshmi, R., Faizal, S., Sivasankaran, S., & Geetha, R. (2024). RiceSeedNet: Rice seed variety identification using deep neural network. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101062.
- Reyes-Aldasoro, C. C. (2015). *Biomedical Image Analysis Recipes in MATLAB: For Life Scientists and Engineers*. John Wiley & Sons: Oxford, UK.
- Sezgin, M., & Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), 146–165.
- Szandała, T. (2023). Unlocking the black box of CNNs: Visualising the decision-making process with PRISM. *Information Sciences*, 642, 119162.
- Taheri-Garavand, A., Nasiri, A., Fanourakis, D., Fatahi, S., Omid, M., & Nikoloudakis, N. (2021). Automated in situ seed variety identification via deep learning: A case study in chickpea. *Plants*, 10(7), 1406.
- Taye, M. M. (2021). Theoretical understanding of convolutional neural network: Concepts, architectures, applications, future directions. *Computation*, 11(3), 52.
- Wang, L., & Wang, L. (2021). Variety identification model for maize seeds using hyperspectral pixel-level information combined with convolutional neural network. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(11), 2234–2244.
- Wiesnerova, D & Wiesner, Ivo (2008). Computer image analysis of seed shape and seed color for flax cultivar description. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61 (2), 126–135.
- Wilkinson, L., & Friendly, M. (2009). The history of the cluster heat map. *The American Statistician*, 63(2), 179–184.
- Yasar, A. (2024). Analysis of selected deep features with CNN-SVM-based for bread wheat seed classification. *European Food Research and Technology*, 250(6), 1551–1561.
- Yuan, M., Lv, N., Dong, Y., Hu, X., Lu, F., Zhan, K., ... Xie, Y. (2024). A dataset for fine-grained seed recognition. *Scientific Data*, 11(1), 344.
- Zhao, X., Wang, L., Zhang, Y., Han, X., Deveci, M., & Parmar, M. (2024). A review of convolutional neural networks in computer vision. *Artificial Intelligence Review*, 57(4), 99.

Plonowanie i jakość ziarna pszenicy ozimej uprawianej w warunkach zróżnicowanego nawożenia azotem i siarką

The yield and grain quality of winter wheat grown under conditions of differentiated nitrogen and sulfur fertilization

Tomasz Knapowski[✉], Wojciech Kozera

Katedra Biogeochemii, Gleboznawstwa i Melioracji Wodnych, Wydział Rolnictwa i Biotechnologii, Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, ul. Bernardyńska 6, 85-029 Bydgoszcz

✉knap@pbs.edu.pl

Ziarno pszenicy cechuje się wysoką wartością technologiczną, co stwarza możliwości jego wykorzystania w celach spożywczych, w tym jako surowiec do produkcji mąki i chleba. Jakość wypiekowa surowca powinna charakteryzować się optymalnymi wartościami wskaźników ją opisującymi. Mogą one być weryfikowane, m. in. poprzez nawożenie mineralne, w tym azotem i siarką. Przeprowadzono 2-czynnikowe badania polowe, założone metodą losowanych podbloków, w których materiał doświadczalny stanowiło ziarno pszenicy ozimej odmiany Skagen. Czynniki badawczy mi było zróżnicowane nawożenie azotem ($n = 4$: 80, 120, 160 kg N·ha⁻¹, kontrola) i siarką ($n = 3$: 20, 40 kg S·ha⁻¹, kontrola). Eksperyment miał na celu ustalenie wpływu czynników doświadczenia oraz ich współdziałania na plonowanie pszenicy oraz wartości wybranych cech technologicznych ziarna i uzyskanej z niego mąki (liczby opadania, białka ogólnego, glutenu mokrego, wskaźnika sedimentacji, objętości pieczywa). Stwierdzono, że każdorazowe zwiększanie dawek nawożenia azotem i siarką determinowało istotny wzrost plonu ziarna pszenicy ozimej. Najwyższe, istotne wartości liczby opadania odnotowano po wysiewie 80 kg N·ha⁻¹, a dla pozostałych analizowanych parametrów jakościowych po zastosowaniu 120 kg N·ha⁻¹. Z kolei aplikacja siarki w dawce 40 kg S·ha⁻¹ determinowała uzyskanie najkorzystniejszych wartości badanych wskaźników technologicznych w porównaniu do ich wartości z obiektów, gdzie stosowano 20 kg S·ha⁻¹ i obiektu kontrolnego. Przy czym udowodniono to statystycznie w stosunku do wartości liczby opadania, zawartości białka ogólnego i objętości pieczywa.

Słowa kluczowe: nawożenie azotem, nawożenie siarką, plon ziarna, pszenica ozima, wartość technologiczna ziarna

Wheat grain is characterized by high technological value, which creates opportunities for its use in food production, including as a raw material for flour and bread production. The baking value of the raw material should be characterized by optimal values of the indicators describing it. These can be verified, among other things, through mineral fertilization, including nitrogen and sulfur. In this regard, a 2-factor field study was conducted, using a randomized block method, where the experimental material was winter wheat grain of the 'Skagen' variety. The research factors were differentiated nitrogen fertilization ($n = 4$: 80, 120, 160 kg N·ha⁻¹, control) and sulfur fertilization ($n = 3$: 20, 40 kg S·ha⁻¹, control). The experiment aimed to determine the effect of the factors above and their interaction on wheat yield and the values of technological traits of the grain and the flour obtained from it (falling number, total protein, wet gluten, sedimentation index, bread volume). It was found that increasing doses of nitrogen and sulfur fertilization significantly increased the yield of winter wheat grain. The highest, significant values of the analyzed quality parameters of winter wheat (total protein, wet gluten, sedimentation index, bread volume) were recorded after applying 120 kg N·ha⁻¹, and for falling number after sowing 80 kg N·ha⁻¹. In contrast, sulfur application at a dose of 40 kg S·ha⁻¹ determined the achievement of the most favorable values of the tested technological indicators in comparison to their values from the objects where 20 kg S·ha⁻¹ was applied and the control object. This was statistically proven concerning the falling number values, total protein content, and bread volume.

Keywords: nitrogen fertilization, sulfur fertilization, grain yield, winter wheat, technological value,

Wstęp

Pszenica (*Triticum aestivum* L.) jest jednym z najczęściej uprawianych zbóż na świecie jak i w Polsce. Powierzchnia jej zasiewów w naszym kraju w 2023 roku wynosiła 7,188 mln ha i w stosunku do 2020 roku była niższa o 3,7%. Natomiast zbiory ziarna tego zboża (2023 r.) wynosiły 13,178 mln ton, co stanowiło około 37% całkowitej ilości zebranych zbóż (GUS 2024). Celem nowoczesnej uprawy pszenicy jest osiągnięcie, przy zastosowaniu jak najmniejszych nakładów, możli-

wie najwyższego efektu plonotwórczego, ale bardzo ważnym aspektem jest również jakość uzyskanego surowca. Zebrane ziarno, w zależności od kierunku jego użytkowania, powinno charakteryzować się optymalnymi wartościami cech technologicznych. Jedną z możliwości wykorzystania plonu pszenicy jest jego przeznaczenie na cele spożywcze, zwłaszcza do wypieku pieczywa. Aby osiągnąć założony cel uprawy, gatunek tego zboża wymaga starannych zabiegów agrotechnicznych, wśród których duże znaczenia ma nawożenie, w tym azotem i siarką. Azot jest jednym z najważ-

niejszych składników pokarmowych dla roślin. To kluczowy czynnik plonotwórczy zwiększający krzewienie produkcyjne i jednocześnie pełniący istotną rolę w kształtowaniu jakości kompleksu białkowego w ziarnie, co przekłada się na cechy wypiekowe (Faizy i in. 2017). O jego korzystnym wpływie na plon ziarna pszenicy i wartości parametrów technologicznych informują badania wielu autorów (Litke i in. 2018, Klikocka i Cybulska 2020, Jańczak-Pieniążek i in. 2020, Tsvey i in. 2021). Z kolei potrzeba stosowania siarki w uprawach rolniczych ujawniła się w ostatnich dekadach, co jest konsekwencją zmniejszonej jej imisji (Stankowski i in. 2015). Coraz więcej jest doniesień naukowych, które wskazują na ważność niedoboru tego składnika pokarmowego (Klikocka i in. 2016, Tabak i in. 2019). Dołączenie siarki do podstawowego nawożenia zbóż azotem może pozytywnie wpływać na efekt plonotwórczy, ponieważ zwiększa wydajność jednostkową i poprawia jakość zebranego surowca – ziarna i wymielonej z niego mąki (Hoel 2011, Hřivná i in. 2015, Järvan i in. 2017, Stankowski i in. 2019, Klikocka i Cybulska 2020). Według Klikockiej i in. (2016), siarka, która jest bardzo ważną składową kompleksu białkowego ziarniaków pszenicy, korzystnie determinuje wartości wskaźników jakościowych mąki. Z kolei Pilbeam (2015) wskazuje, że właściwie zbilansowana aplikacja azotu i siarki jest istotna ze względu na interakcje podczas procesu pobierania i asymilacji tych składników w roślinie. Wysookie nawożenie azotem przy niedoborach siarki powoduje zakłócenie stosunku N:S, co skutkuje zmniejszeniem wykorzystania azotu przez rośliny,

a tym samym spadkiem plonowania i pogorszeniem wartości parametrów technologicznych zebranego ziarna (Stankowski i in. 2015).

Przeprowadzone wstępne badania (kontynuowane w sezonach 2023/24 i 2024/25) miały na celu ustalenie wpływu nawożenia azotem i siarką oraz ich współdziałania na plonowanie pszenicy ozimej oraz wartości wybranych cech jakościowych ziarna i uzyskanej z niego mąki, co może decydować o kierunku wykorzystania na cele wypiekowe. Hipoteza badawcza zakładała, że wyżej wymienione czynniki zwiększą efekt plonotwórczy testowanego zboża i jednocześnie korzystnie będą oddziaływać na cechy technologiczne zebranego surowca.

Material i Metody

Materiałem badawczym było ziarno pszenicy ozimej odmiany Skagen (hodowca Borries-Eckendorf) zebrane z poletek dwuczynnikowego doświadczenia polowego, założonego metodą losowanych podbloków (w 3. powtórzeniach) na glebie kompleksu żytznego bardzo dobrego (IIIa). Charakteryzowała się ona obojętnym odczynem, średnią lub wysoką zawartością przyswajalnych form P, K i Mg (Tab. 1). Badania wstępne przeprowadzono w sezonie wegetacyjnym 2022/2023 w RZD Politechniki Bydgoskiej w Minikowie (53°10'2" N, 17°44'22"E). Zboże uprawiano w warunkach zróżnicowanego nawożenia azotem i siarką na tle stałego, wysianego jesienią, nawożenia fosforowo-potasowego (30 kg P·ha⁻¹ – 57% KCl, 103 kg K·ha⁻¹ – 46% superfosfat potrójny).

Tabela 1.
Table 1.

Właściwości fizykochemiczne gleby
Physicochemical properties of soil

Kwasowość hydrolityczna / Hydrolytic acidity Hh	pH _{KCl}	Zawartość / Contents				
		N _{ogółem} / N _{total}	C _{organiczny} / C _{organic}	przyswajalnego / available		
				P	K	Mg
mmol (+)·kg ⁻¹		g·kg ⁻¹			mg·kg ⁻¹	
10,97	6,77	0,97	8,98	118,79	212,62	87,47

Pierwszym czynnikiem było zróżnicowane nawożenie azotem (34% saletra amonowa) (n=4):

- dawki 80 kg N·ha⁻¹ (N₈₀) zastosowano wiosną, jednorazowo na ruszenie wegetacji,
- dawki 120 kg N·ha⁻¹ (N₁₂₀) podzielono: 80 kg wiosną na ruszenie wegetacji i 40 kg w pełni strzelania w żdźbło (34-37 BBCH),
- dawki 160 kg N·ha⁻¹ (N₁₆₀) podzielono: 80 kg wiosną na ruszenie wegetacji, 40 kg w pełni strzelania w żdźbło (34-37 BBCH) i 40 kg na początku kłoszenia (50-51 BBCH),
- obiekt kontrolny bez azotu – N₀.

Drugim czynnikiem badawczym była aplikacja dolistna siarki (n=3), tj.: 20 kg S·ha⁻¹ (S₂₀), 40

kg S·ha⁻¹ (S₄₀) oraz obiekt kontrolny bez nawożenia siarką (S₀). Zastosowano ją w fazie pełni strzelania w żdźbło (faza 34-37 wg skali BBCH) w formie siarczanu sodu (Na₂SO₄).

Przedplonem dla pszenicy ozimej był rzepak ozimy. Wszystkie zabiegi uprawowe, siew materiałem siewnym C/1 w ilości 160 kg·ha⁻¹ ziarna (24.09.2022) oraz zbiór (5.08.2023 przy pomocy kombajnu poletkowego Wintersteiger w fazie pełnej dojrzałości ziarna) wykonano zgodnie z wymaganiami agrotechnicznymi optymalnymi dla badanego zboża.

W Tabeli 2 przedstawiono warunki meteorologiczne panujące w czasie wegetacji pszenicy ozi-

mej w sezonie 2022/23 oraz za wielolecie 2003-2023. Można zauważyć, że w trakcie badań całkowita suma opadów była mniejsza o 13,9 mm, a średnia temperatura wyższa o 0,5°C w stosunku do wartości odnotowanych dla wielolecia. Poszczególne miesiące charakteryzowały się zmiennymi sumami opadów i średnimi temperaturami powietrza. W kwietniu, a zwłaszcza maju 2023 r.

stwierdzono niskie opady (niższe w porównaniu do wielolecia odpowiednio o: 18,8% i 38,0%). Z kolei różnice w średnich miesięcznych temperaturach od marca do maja oraz w lipcu 2023 r. w stosunku do średniej z 20-lecia nie przekraczały 0,7°C, natomiast czerwiec i sierpień był cieplejszy odpowiednio: 1,0 i 1,5°C.

Tabela 2
Table 2

Warunki meteorologiczne w sezonie wegetacyjnym 2022/2023 oraz w wieloleciu 2003-2023
Meteorological conditions in the 2022/2023 growing season and in the 2003-2023 multi-year period

Lata / Years	Miesiąc /Month												Cały sezon / All season
	IX	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
Suma opadów / Total rainfall (mm)													
2022/23	54,1	28,3	19,8	31,1	21,6	30,3	61,6	21,2	20,5	57,9	69,5	96,8	512,7
2003-23	39,0	41,6	37,0	39,2	35,8	27,2	31,3	26,1	54,0	57,6	76,8	68,4	526,6
Średnia temperatura / Average temperature (°C)													
2022/23	12,1	10,3	3,6	0,7	2,7	1,2	3,7	7,8	12,9	18,3	18,7	20,6	9,4
2003-23	14,1	9,0	4,3	0,8	-1,3	-0,3	3,0	8,5	13,2	17,3	19,4	19,1	8,9

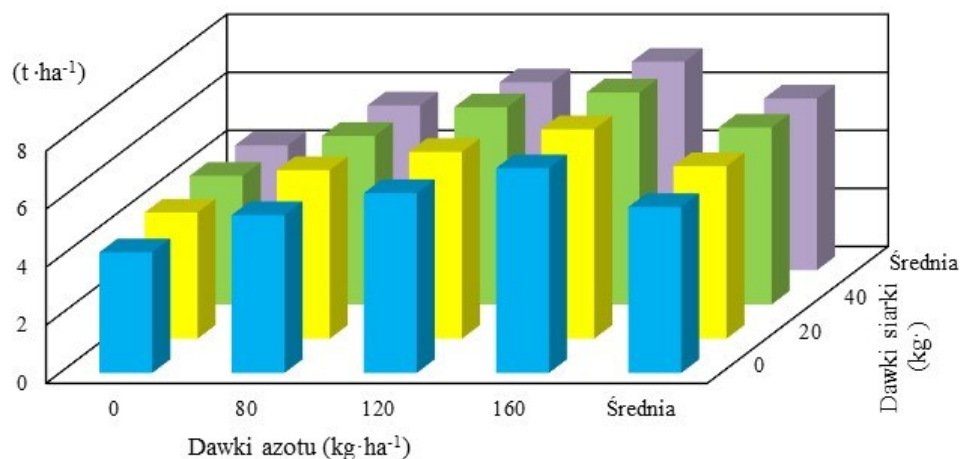
Plon ziarna (PLZ) zebrany z poletek doświadczalnych zważono i przeliczono na $t \cdot ha^{-1}$. Pobrano próbki ziarna do analiz chemicznych. Po ich oczyszczeniu i odpowiednim przygotowaniu oznaczono wartości parametrów technologicznych: gluten mokry (GL), białko ogólne (BO), wskaźnik sedymentacji (WS) (przy pomocy analizatora Infratec 1241), liczbę opadania (LO) (PN-ISO-3093:2010) oraz objętość pieczywa (OP) (PN-A-74108:1996).

Uzyskane wyniki badań poddano analizie wariancji w modelu właściwym dla sposobu założenia doświadczenia w polu. Do oceny różnic między średnimi obiektowymi stosowano wielokrotny test rozstępu Tukey'a z prawdopodobieństwem $p =$

0,05. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem pakietu programów statystycznych *Statistica 13 Pl*.

Wyniki i Dyskusja

Zbiory ziarna pszenicy w Polsce w 2023 roku, jak podaje GUS (2024), wynosiły 13,171 mln ton, co dało średnią z hektara na poziomie $5,38 t \cdot ha^{-1}$. W przeprowadzonym doświadczeniu badana odmiana, niezależnie od nawożenia azotem i siarką, charakteryzowała się wyższym PLZ, tj. $5,92 t \cdot ha^{-1}$ (Rys. 1), a zatem różnica wynosiła 10,0%. Wyższe plonowanie (od 7,0 do $11 t \cdot ha^{-1}$) odnotowano w pracach Murawskiej i in. (2014) oraz Buczka i Jańczak Pieniążek (2020).



Rys. 1 Plon ziarna pszenicy ozimej ($t \cdot ha^{-1}$) w zależności od poziomu nawożenia azotem i siarką.

Fig. 1 Grain yield of winter wheat ($t \cdot ha^{-1}$) depending on the level of nitrogen and sulfur fertilization.

Stwierdzono, że zróżnicowane nawożenie azotem i siarką oraz ich współdziałanie istotnie różnicowało PLZ testowanej pszenicy (Rys. 1). Wzrost poziomu nawożenia azotem w całym zakresie dawek powodował średnio zwiększanie efektu plonotwórczego. Najwyższą wartość tej cechy odnotowano po wysiewie 160 kg N·ha⁻¹ (7,19 t·ha⁻¹) i była ona wyższa w stosunku do plonów uzyskanych na obiektach N₀, N₈₀ i N₁₂₀ odpowiednio o: 66,8; 26,6 i 11,0%. Na korzystnie istotny wpływ wysokich dawek nawożenia azotem na plonowanie pszenicy ozimej wskazują badania Buczka i Jańczak-Pieniążek (2021). Odnotowali oni wyższy plon (o 0,61 t·ha⁻¹) po wysiewie 200 kg N·ha⁻¹ w porównaniu do obiektu, gdzie stosowano 150 kg N·ha⁻¹. Podobne zależności dotyczące wpływu wzrastających dawek azotu na zwiększanie PLZ w uprawie pszenic stwierdzono również w pracach innych autorów (Järvan i in. 2008, Murawska i in. 2014, Litke i in. 2018, Klikocka i Cybulska 2020, Tsvey i in. 2021).

Najkorzystniejszy, istotny statystycznie średni PLZ (6,10 t·ha⁻¹) badanego zboża po zastosowaniu siarki, uzyskano przy dawce 40 kg·ha⁻¹ (Rys. 1). Różnice w stosunku do obiektów S₀ i S₂₀ wynosiły 6,6 i 2,5%. Wzrost plonowania w zależności od nawożenia siarką w uprawie pszenicy ozimej odnotowano w doświadczeniach Stankowskiego i in. (2015) oraz Klikockiej i in. (2016).

Stwierdzono również statystycznie udowodniony wpływ interakcji badanych czynników na omawianą cechę. Najwyższą wartość (7,31 t·ha⁻¹) zauważono po wysiewie największych dawek N i S. Podobne zależności uzyskali Järvan i in. (2008, 2017) oraz Klikocka i Cybulska (2020).

Kompleks enzymatyczny ziarna charakteryzowany jest przez liczbę opadania. Zbyt niskie jej wartości informują, że takiego ziarna nie powinno przeznaczać się do wypieku chleba. Występuje wówczas zbyt wysoka aktywność α-amylazy, co może skutkować uzyskaniem produktu końcowego o złej jakości. Odnotowano, że średnia wartość LO dla odmiany Skagen wynosiła 497 s (Tab. 3).

Tabela 3.
Table 3.

Wartości cech technologicznych pszenicy ozimej
Values of technological features of winter wheat

Nawożenie S / S fertilization (2 czynnik / 2 nd factor) (kg·ha ⁻¹)	Nawożenie N / N fertilization (1 czynnik / 1 st factor) (kg·ha ⁻¹)				Średnia / average
	0	80	120	160	
Liczba opadania / Falling number (s)					
0	486	555	550	512	526a
20	484	517	494	490	496b
40	462	467	481	463	468c
Średnia / average	478b	513a	508a	488ab	497
Białko ogólne / Total protein (g·kg ⁻¹ s.m.)					
0	114	132	138	145	132b
20	118	126	133	146	131b
40	123	134	145	149	138a
Średnia / average	118d	132c	139b	146a	134
Gluten mokry / Wet gluten (%)					
0	28,2	32,0	35,2	36,0	32,9
20	29,1	31,0	34,7	34,6	32,4
40	26,9	31,7	36,9	35,9	35,5
średnia / average	28,1c	31,6b	35,6a	35,5a	32,7
Sedymentacja mąki / Sedimentation value (cm ³)*					
0	34,0	46,4	51,5	54,6	46,6
20	35,8	40,6	55,3	57,3	47,2
40	33,6	45,3	57,4	57,5	56,4
średnia / average	34,4c	44,1b	54,7a	6,4a	47,4
Objętość pieczywa / Bread volume (cm ³)					
0	472	495	507	516	498b
20	477	476	500	507	490b
40	488	505	512	529	509a
Średnia / average	479c	492b	507a	517a	499

* - istotne współdziałanie czynników / essential interaction of factors; a,b,c,d - różne litery za średnimi wartościami wskazują na istotne różnice (p < 0,05) / different letters behind the mean values indicate significant differences (p < 0.05)

Prace innych autorów wskazują na zróżnicowane średnie wartości tego parametru technologicznego ziarna pszennego, mieszczące się w przedziale od 224 do 463 s (Murawska i in. 2014, Knapowski i in. 2015, Litke i in. 2018, Klikocka i Cybulska 2020). Do przerobu na cele spożywcze, jak podają Makarewicz i in. (2012), najlepiej nadaje się ziarno pszeniczne o wartości LO mieszczącej się w przedziale od 250 do 400 s.

Litke i in. (2018) informują, że zróżnicowane nawożenie azotem powoduje istotne zmiany w wartości LO ziarna pszenicy. Stwierdzono to również w niniejszej pracy, przy czym statystycznie udowodniona w stosunku do wartości omawianej cechy okazała się dawka $80 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Natomiast dawki 120 i $160 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$ wpłynęły na stopniowe obniżanie wartości LO w porównaniu do obiektu N_{80} .

Nawożenie siarką, podobnie jak w badaniach Stankowskiego i in. (2015), wpłynęło istotnie na wartość LO w ziarnie testowanej pszenicy (Tab. 3). Zanotowano korzystne zmniejszanie wartości omawianego wskaźnika (o 5,7% przy dawce $20 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ oraz 11,0% przy dawce $40 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$) w porównaniu do obiektu bez aplikacji siarki.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zawartość BO w badanym ziarnie wynosiła średnio $134 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Tab. 3). Niższe wartości tej cechy (od 95 do $123 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) uzyskano w eksperymentach Murawskiej i in. (2014), Litke i in. (2018), Jańczak-Pieniążek i in. (2020) oraz Buczka i Jańczak-Pieniążek (2021). Z kolei w innych pracach ziarno pszenne cechowało się wyższymi zawartościami BO (od 136 do $155,4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Makarewicz i in. 2012, Klikocka i Cybulska 2020).

Kompleks białkowy ziarna pszenicy charakteryzowany zawartością BO był istotnie weryfikowany zróżnicowanym nawożeniem azotem (Tab. 3). Każdorazowe zwiększanie dawki tego składnika pokarmowego powodowało wzrost zawartości BO w ziarnie. Po zastosowaniu maksymalnego nawożenia azotem wartość tej cechy wynosiła $149 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i w stosunku do obiektów N_0 , N_{80} i N_{120} była wyższa, odpowiednio o: 21,1; 11,2 i 2,8%. Powyższe wyniki są zbieżne z danymi zawartymi w innych pracach (Klikocka i in. 2016, Litke i in. 2018, Buczek i Jańczak-Pieniążek 2021, Tsvey i in. 2021).

Aplikacja siarki przyczyniła się do zmiany ilości BO w ziarnie pszenicy. Najwyższą istotną wartość ($138 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) stwierdzono po zastosowaniu największej dawki tego składnika i wartość ta była wyższa od obiektu kontrolnego i S_{20} , odpowiednio o: 5,3 i 4,6%. Klikocka i in. (2016) informują, że nawożenie siarką pszenicy nie ma statystycznie istotnego znaczenia w stosunku do ilości BO w ziarnie. Natomiast korzystne oddziaływanie siarki na tą cechę udowodnili Järvan i in. (2008, 2017) oraz Stankowski i in. (2015).

Ilość i jakość glutenu mokrego to jedne z ważniejszych danych dotyczących wskaźników technologicznych pszenic przeznaczonych do celów wypiekowych. Gluten determinuje wzrost i rozwój ciasta w trakcie prowadzenia procesu wypieku, wpływając na odpowiednią strukturę i pulchność uzyskanego produktu. W przeprowadzonych badaniach średnia wydajność GL osiągnęła 32,7% (Tab. 2). Niższe wartości tego wskaźnika odnotowano w pracach Klikockiej i in. (2016), Järvana i in. (2017), Litke i in. (2018), natomiast wyższe w eksperymentach Makarewicz i in. (2012).

Wśród stosowanych czynników badawczych istotny wpływ na ilość GL w ziarnie testowanej pszenicy miało zróżnicowane nawożenie azotem. Najkorzystniejszą, w stosunku do wartości tej cechy (32,7%), okazała się dawka $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Podobne dodatnie zależności między nawożeniem azotem a wydajnością glutenu stwierdzono w pracach Klikockiej i in. (2016), Jańczak-Pieniążek i in. (2020) oraz Buczka i Jańczak-Pieniążek (2021).

Nawożenie siarką, niezależnie od dawki azotu, nie miało istotnego wpływu na wydajność GL w ziarnie badanej pszenicy. Należy jednak zaznaczyć, że najwyższą wartość omawianej cechy uzyskano po zastosowaniu $40 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$. Odmienne zależności odnotowali Stankowski i in. (2015) oraz Klikocka i in. (2016), wskazując na statystycznie udowodniony korzystny wpływ dawek 42 oraz $50 \text{ kg S} \cdot \text{ha}^{-1}$ (wzrost w porównaniu do kontroli o 4,80 oraz 0,93%).

Średnia wartość WS w mące pszennej odmiany Skagen osiągnęła poziom $47,4 \text{ cm}^3$ (Tab. 3) i była wyższa w stosunku do średniej podanej w pracach przez innych autorów (Murawska i in. 2014, Litke i in. 2018, Buczek i Jańczak-Pieniążek 2021).

Zastosowanie zróżnicowanego nawożenia azotem oraz jego interakcja z aplikacją siarki istotnie wpływały na wartość WS określającego jakość glutenu (Tab. 3). Aplikacja azotu, w całym zakresie stosowanych dawek, determinowała wzrost jego wartości, ale istotną statystycznie okazała się dawka $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$. Przy czym wartość tej cechy osiągnęła poziom $54,7 \text{ cm}^3$ i była wyższa w stosunku do niższych obiektów doświadczalnych o 59,0% (kontrola) i 24,0% (N_{80}). Powyższe wyniki korespondują z badaniami innych autorów potwierdzających istotny wpływ nawożenia azotem na wzrost wartości WS mąki pszennej (Litke i in. 2018, Buczek i Jańczak-Pieniążek 2021). Współdziałanie badanych składników nawozowych wpływało na wartość WS, a istotnie największy wolumin tej cechy ($57,5 \text{ cm}^3$) odnotowano po zastosowaniu najwyższych dawek azotu i siarki.

Na objętość chleba, bezpośredni istotny parametr jakościowy decydujący o wartości wypiekowej surowca, mają wszystkie wcześniej oznaczone cechy. Objętość chleba w niniejszych badaniach

wynosiła 499 cm³. Zróżnicowane wartości tego wskaźnika (432-520 cm³) stwierdzono w doświadczeniach Knapowskiego i in. (2015).

Nawożenie azotem i siarką miały istotny wpływ na OP (Tab. 3). Wzrost dawek azotu, w całym zakresie, wpłynął efektywnie na zwiększenie objętości chleba, przy czym istotną okazała się dawka 120 kg N·ha⁻¹. Stwierdzono również, podobnie jak w badaniach Järvana i in. (2008, 2017), statystycznie udowodnione różnice w OP pod wpływem aplikacji siarki w uprawie testowanej pszenicy, a najwyższą jej wartość (509 cm³) odnotowano po zastosowaniu 40 kg S·ha⁻¹. Była ona wyższa w porównaniu do obiektu kontrolnego i obiektu S₂₀ odpowiednio o: 2,2% i 3,9%.

Wnioski

1. Zastosowane nawożenie azotem i siarką, w całym zakresie dawek, determinowało istotny wzrost plonu ziarna pszenicy ozimej.
2. Każdorazowe zwiększanie dawki nawożenia azotem, niezależnie od aplikacji siarki, powodowało istotny wzrost zawartości białka ogólnego w ziarnie. Natomiast istotnie najwyższą wartość tej cechy odnotowano po aplikacji 40 kg S·ha⁻¹, w stosunku do zawartości białka

w ziarnie zebranym z obiektu, gdzie stosowano 20 kg S·ha⁻¹ i obiektu kontrolnego.

3. Istotnie najwyższe, średnie wartości analizowanych parametrów technologicznych pszenicy ozimej, tj. ilości glutenu mokrego w ziarnie, wartości wskaźnika sedymentacji mąki, objętości pieczywa ze 100 g mąki oraz wartości liczby opadania, stwierdzono po zastosowaniu nawożenia: 120 kg N·ha⁻¹ oraz 80 kg N·ha⁻¹.
4. Zwiększanie dawki siarki do 40 kg·ha⁻¹, niezależnie od dawki azotu, powodowało istotne zwiększanie aktywności amylolitycznej ziarna. Ilość glutenu mokrego, wartość wskaźnika sedymentacji i objętość chleba osiągnęły najwyższe wartości po aplikacji 40 kg S·ha⁻¹, przy czym statystyczną istotność stwierdzono w przypadku objętości pieczywa i to jedynie w porównaniu do kontroli.
5. Interakcja nawożenia azotem i aplikacji siarką miała istotny wpływ na plon ziarna i wartość wskaźnika sedymentacji mąki. Największe wartości tych cech odnotowano po zastosowaniu maksymalnych dawek azotu i siarki.

Literatura

- Buczek J., Jańczak-Pieniążek M. 2021. Reakcja pszenicy hybrydowej na wysokie dawki azotu i nawożenie dolistne. Biul. IHAR, 296, 17–24. DOI: <https://doi.org/10.37317/10.37317/biul-2021-0010>
- Faizy S.E.D., Mashali S.A., Youssef S.M., Elmahdy S.M., 2017. Study of wheat response to nitrogen fertilization, micronutrients and their effects on some soil available macronutrients. J. Sus. Agric. Sci. 43 (1), 55–64. DOI: <https://doi.org/10.21608/jsas.2017.3491>
- Główny Urząd Statystyczny (red. Rozkrut D.). 2024. Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2024. Zakł. Wyd. Stat., Warszawa. stat.gov.pl
- Hoel B.O. 2011. Effects of sulphur application on grain yield and quality, and assessment of sulphur status in winter wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Agr. Scand., Sect. B, Soil Plant Sci. 61, 499–507.
- Hřivná L., Kotková B., Burešová I. 2015. Effect of sulphur fertilization on yield and quality of wheat grain. Cereal Res Commun. 43:344–352. DOI: <https://doi.org/10.1556/CRC.2014.0033>
- Jańczak-Pieniążek M., Buczek J., Tobiasz-Salach R., Bobrecka-Jamro D. 2020. Wpływ intensywności uprawy na produktywność mieszańcowych i populacyjnych odmian pszenicy ozimej. Biul. IHAR, 288, 59–66. DOI: <https://doi.org/10.37317/biul-2020-0007>
- Järvan M., Edesi L., Adamson A., Lukme L., Akk A. 2008. The effect of sulphur fertilization on yield, quality of protein and baking properties of winter wheat. Agron. Res., 6(2), 459–469.
- Järvan M., Lukme L., Adamson A., Akk A. 2017. Responses of wheat yield, quality and bread-making properties on the sulphur fertilization. Acta Agr. Scand., Sec. B - Soil Plant Sci., 67, 5, 444–452. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2017.1293725>
- Klikocka H., Cybulska M. 2020. Wpływ nawożenia azotem i siarką na plon ziarna i cechy jakościowe pszenicy jarej. Agr. Sci., 75, 3, 117–129. DOI: <https://doi.org/10.24326/as.2020.3.9>
- Klikocka H., Cybulska M., Barczak B., Narolski B., Szostak B., Kobińska A., Nowak A., Wójcik E. 2016. The effect of sulphur and nitrogen fertilization on grain yield and technological quality of spring wheat. Plant Soil and Environ., 62, 5: 230–236.
- Knapowski T., Kozera W., Murawska B., Wszelaczyńska E., Pobereżny J., Mozolewski W., Keutgen A.J., 2015. Ocena parametrów technologicznych wybranych odmian pszenicy ozimej pod względem wypiekowym. Inż. Ap. Chem., 54(5), 255–256.
- Litke L., Gaile Z., Ruza A. 2018. Effect of nitrogen fertilization on winter wheat yield and yield quality. Agronomy Research, 16(2), 500–509. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.18.064>
- Makarewicz A., Gąsiorowska B., Cybulska A., 2012. Wpływ dolistnego nawożenia azotem na wybrane parametry jakościowe ziarna pszenicy ozimej. Fragm. Agron., 29 (1), 105–113.
- Murawska B., Spychaj-Fabisiak E., Keutgen A., Wszelaczyńska E., Pobereżny J. 2014. Cechy technologiczne badanych odmian ziarna pszenicy ozimej uprawianych w warunkach Polski i Wielkiej Brytanii, Inż. Ap. Chem., 53, 2, 96–98.
- Pilbeam D.J., 2015. Nitrogen. In: A.V. Barker, D.J. Pilbeam, Handbook of Plant Nutrition. Second Edition. CRC Press/Taylor & Francis Group Boca Raton, London–New York, 17–63.
- PN-ISO 3093:2010. Zboża – Oznaczanie liczby opadania metodą Hagberga-Pertena.
- PN-A-74108:1996. Pieczywo. Metody badań. Warszawa: PKN.

- Stankowski S., Hury G., Sobolewska M., Opatowicz N., Bas-hutska U. 2015. Wpływ nawożenia siarką na plonowanie i jakość ziarna pszenicy ozimej. Науковий вісник НЛТУ України, 25,6, 174–177.
- Stankowski S., Podolska G., Kaczmarek S., Jaroszevska A., Hury G., Sobolewska M., 2019. Influence of sulphur fertilization on yielding and chemical composition of grain of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in different habitat conditions. J. Elementol., 24(3), 1007–1023. DOI: <https://doi.org/10.5601/jelem.2018.23.4.1743>
- Tabak M., Lepiarczyk A., Filipek-Mazur B., Bachara P., 2019. Ammonium nitrate enriched with sulfur influences wheat yield and soil properties. Plant Soil Environ., 65, 211–217. DOI: <https://doi.org/10.17221/44/2019-PSE>
- Tsvey Y., Ivanina R., Ivanina V., Senchuk S. 2021. Yield and quality of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain in relation to nitrogen fertilization. Rev. Fac. Nac. Agron. Medellín, 74(1), 9413–9422. DOI: <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n1.88835>

Wirulencja izolatów *Puccinia triticina* wywołujących rdzę brunatną pszenicy w Polsce w 2023 roku

Virulence of *Puccinia triticina* isolates causing wheat brown rust in Poland in 2023

Magdalena Radecka-Janusik 

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, 05-870 Błonie

 m.radecka-janusik@ihar.edu.pl

W 2023 roku przetestowano 37 jednozarodnikowych izolatów *Puccinia triticina* wyizolowanych z liści pszenicy. Izolaty testowano na zestawie różnicującym składającym się z 41 obiektów, w skład których wchodziły blisko-izogeniczne linie odmiany Thatcher, odmiany z genami *Lr* oraz wzorzec podatności Thatcher. Na podstawie wyników testów fitopatologicznych określono procent wirulentnych izolatów zidentyfikowanych w 2023 roku na terenie Polski. Geny *Lr2a*, *Lr9*, *Lr19*, *Lr29*, *Lr52* i *Lr63* były wysoce efektywne na badane izolaty *P. triticina*. W pracy określono patotypy patogenu, stosując zestaw 16 linii blisko-izogenicznych.

Słowa kluczowe: geny odporności, pszenica, *Puccinia triticina*, rdza brunatna, wirulencja

In 2023, a total of 37 single-spore isolates of *Puccinia triticina*, collected from wheat leaves, were tested. The isolates were evaluated using a differential set consisting of 41 entries, including near-isogenic lines of the Thatcher cultivar, cultivars carrying *Lr* genes, and the susceptible standard Thatcher. Based on the phytopathological test results, the percentage of virulent isolates identified in Poland in 2023 was determined. The *Lr* genes *Lr2a*, *Lr9*, *Lr19*, *Lr29*, *Lr52*, and *Lr63* proved to be highly effective against the tested *P. triticina* isolates. The pathogen's pathotypes were identified using a set of 16 near-isogenic lines.

Key words: resistance genes, wheat, *Puccinia triticina*, brown rust, virulence

Wstęp

Pszenica zwyczajna (*Triticum aestivum* L.) jest jednym z najważniejszych gatunków zbóż na świecie. Straty w plonie ziarna są w znacznym stopniu spowodowane chorobami, wśród których do najważniejszych należy m.in. rdza brunatna.

Rdza brunatna pszenicy, wywoływana przez grzyba *Puccinia triticina* f. sp. *tritici*, jest poważną chorobą liści pszenicy (*T. aestivum* L.) występującą w wielu regionach geograficznych świata. Choroba negatywnie wpływa na plony i jakość ziarna (Bolton i in., 2008; Huerta-Espino i in., 2011). Ma duże znaczenie ekonomiczne, gdyż może powodować straty plonu na poziomie 15%, natomiast w latach epifitoz jest to nawet 30-60% (Roelfs i in., 1992; Witkowska i in. 2011). Występowanie rdzy brunatnej jest uzależnione od warunków pogodowych, czyli wysokiej wilgotności powietrza oraz umiarkowanych temperatur (Kryczyński i in., 2011).

W celu zapobiegania rozprzestrzenianiu się choroby można stosować fungicydy z grupy strobiluryn i triazoli, a także stosować zaprawianie ziarna (Kryczyński i in., 2011). Jednak najbardziej skuteczną i efektywną metodą zmniejszającą nasilenie rdzy brunatnej jest wykorzystanie genetycznej odporności, czyli hodowla odmian odpornych. Jest to najbardziej opłacalna i przyjazna dla środowiska strategia zapobiegająca stratom plonu. Odporność można sklasyfikować, jako odporność

w stadium siewki, która jest warunkowana genami głównymi oraz odporność roślin dorosłych ARP (Adult Plant Resistance), która jest zazwyczaj dziedziczona ilościowo (Bolton i in., 2008).

Obecnie jest zidentyfikowanych ponad 80 genów odporności *Lr* na rdzę brunatną (McIntosh, 2024). Większość z nich to geny główne, które mają największe znaczenie w ochronie roślin na etapie siewek, zwłaszcza w środowisku sprzyjającym rozwojowi chorób na początku sezonu (Huerta-Espino i in., 2011). Jednak wysoka zmienność *P. triticina*, powoduje przełamywanie odporności już po kilku latach od jej zidentyfikowania, na co wpływa wysoka zdolność adaptacyjna oraz możliwość migracji zarodników z prądami powietrza na duże odległości (Kolmer, 2005, Roelfs i in., 1992).

Bieżące monitorowanie struktury populacji *P. triticina* w Polsce oraz badanie frekwencji genów wirulentnych korespondujących z genami odporności na rdzę brunatną może mieć duże znaczenie dla hodowli odpornościowej (Mesterhazy i in., 2000), a tym samym w poszukiwaniu nowych źródeł odporności.

Materiały i metody

Do testów wirulencji rdzy brunatnej zbierano izolaty w 2023 roku z rodów hodowlanych i zarejestrowanych odmian pszenicy na terenie województw: mazowieckie (Radzików), wielkopolskie (Smolice), pomorskie (Dębina), zachodniopomor-

skie (Białogard, NAGRADOWICE), dolnośląskie (Kobierzyce), podkarpackie (Skołoszów).

Z liści zebranych na polu z pojedynczych uredniów *P. triticea* wyprowadzono 37 izolatów pszenicy, wykorzystując do tego celu wzorzec

podatności Thatcher. Następnie izolaty namnażano do uzyskania ilości wystarczającej do zakażenia zestawu różnicującego. Materiał roślinny, który posłużył do przetestowania wirulencji izolatów *P. triticea* został przedstawiony w Tabeli 1. Jest to

Tabela 1.
Wykaz odmian i linii blisko-izogenicznych odmiany Thatcher z genami *Lr*, wchodzących w skład zestawu różnicującego na *Puccinia triticea*

Table 1.
List of varieties and near-isogenic lines of the Thatcher cultivar with *Lr* genes included in the differential set for *Puccinia triticea*

Nr / No	Gen <i>Lr</i> / <i>Lr</i> gene	Pochodzenie / Pedigree	Numer identyfikacyjny / Identity number
1	<i>LrTc</i>	Thatcher (kontrola)	RL 6101
2	<i>Lr1</i>	Tc*6/Centenario	RL 6003
3	<i>Lr2a</i>	Tc*6/Webster	RL 6016
4	<i>Lr2b</i>	Tc*6/Carina	RL 6019
5	<i>Lr2c</i>	Tc*6/Loros	RL 6047
6	<i>Lr3a</i>	Tc*6/Democrat	RL 6002
7	<i>Lr3bg</i>	Tc* 6/Bage	RL 6042
8	<i>Lr3ka</i>	Tc*6/Klein Aniversario	RL 6007
9	<i>Lr9</i>	Transfer/Tc*6 <i>Aegilops.umbellulata</i>	RL 6010
10	<i>Lr10</i>	Tc*6/Exchange	RL 6004
11	<i>Lr11</i>	Tc*2/Hussar	RL 6053
12	<i>Lr13</i>	Tc*6/Fontana	RL 4031
13	<i>Lr14a</i>	Selkirk/Tc*6 (<i>T. turgidum</i>)	RL 6013
14	<i>Lr14b</i>	Tc*6/Mario Escobar	RL 6006
15	<i>Lr15</i>	Tc*6/W1483	RL 6052
16	<i>Lr16</i>	Tc*6/Exchange	RL 6005
17	<i>Lr17a</i>	Klein Lucero/Tc*6	RL 6008
18	<i>Lr17b</i>	Harrier	Harrier
19	<i>Lr18</i>	Tc*7/Afrika 43 (<i>T. timopheevii</i>)	RL 6009
20	<i>Lr19</i>	Tc*7 Transloc.4- <i>Agropyron elongatum</i>	RL 6040
21	<i>Lr20</i>	Tc*6/Jimmer	RL 6092
22	<i>Lr21</i>	Tc*6RL5406 <i>Ae. Squarrosa</i> v.mayeri	RL 6043
23	<i>Lr23</i>	Lee 310/Tc*6	RL 6012
24	<i>Lr24</i>	Tc*6/Agent (<i>Agropyron elongatum</i>)	RL 6064
25	<i>Lr25</i>	Tc*6/Transec (<i>Secale cereale</i>)	RL 6084
26	<i>Lr26</i>	Tc*6/St-1-25 (<i>Secale cereale</i>)	RL 6078
27	<i>Lr27+31</i>	Gatcher -Lr27+Lr31	Gatcher
28	<i>Lr28</i>	Tc*6/C-77-1 (<i>Aegilops speltoides</i>)	RL 6079
29	<i>Lr29</i>	Tc*6/CS7D-Ag + 11 (<i>Agropyron elongatum</i>)	RL 6080
30	<i>Lr30</i>	Tc*6/Terenzio	RL 6049
31	<i>Lr32</i>	Tc*6/3/ <i>Aegilops squarrosa</i>	RL 6086
32	<i>Lr33</i>	Tc*6/PI 58548-1	RL 6057
33	<i>Lr36</i>	ER 84018 (<i>Aegilops speltoides</i>)	ER 84018
34	<i>Lr37</i>	Tc*8/VPMI T.ventricosum	RL 6081
35	<i>Lr38</i>	Tc*6/T7 Kohn (<i>Thinopyrum intermedium</i>)	RL 6097
36	<i>Lr44</i>	Tc*6/ <i>T.spelta</i>	RL 6147
37	<i>Lr52</i>	Tc*6/V336	RL 6107
38	<i>Lr63</i>	Tc*6/TMR5-J14-12-24 (<i>T. monococcum</i>)	RL 6137
39	<i>Lr64</i>	Tc*6/8404 (<i>T. turgidum</i> ssp. <i>dicoccoides</i>)	RL 6149
40	<i>LrB(Carina)</i>	Tc*6/Carina	RL 6051
41	<i>LrB(PI268316)</i>	Tc*6/PI268316	RL 6061

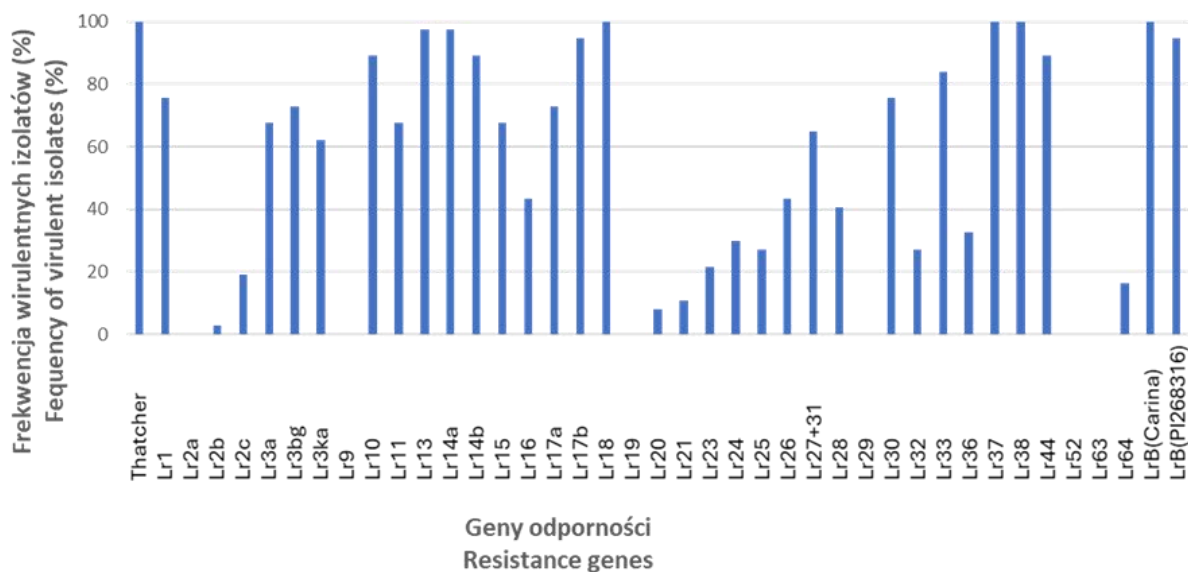
wzorzec podatności odmiana Thatcher, zestaw linii blisko-izogenicznych odmiany Thatcher (NIL - Near Isogenic Lines) zawierających pojedyncze geny odporności *Lr* oraz dodatkowe odmiany z genami *Lr*, co łącznie stanowi 41 obiektów.

Zestaw różnicujący z w pełni rozwiniętym pierwszym liściem (3-5 siewek) inokulowano zawieszoną zarodników, 20 mg zarodników zawieszono w 20 ml roztworu 3M (3M-NOVEC PŁYN HFE-7100) bądź w wodzie z dodatkiem 1-2 kropli środka powierzchniowo czynnego Tween. Siewki na 24 godz. umieszczano w ciemności przy 100% wilgotności w temperaturze 22°C. Po tym czasie siewki przeniesiono na światło (fotoperiod 16 h dzień/8 h noc), temperatura 22°C dzień i 19°C noc. Ocenę typów infekcyjnych (IT) wykonano po 10-12 dniach od inokulacji, wg skali Stakman'a od 0 do 4 (Stakman i in.; 1962, Long i Kolmer; 1989), gdzie ocena 0-3 oznacza reakcję odporności roślin/izolat awirulentny, natomiast oceny 3+ i 4 oznaczają reakcję podatności roślin/izolat wirulentny. Dokładny opis IT przedstawia się następująco: 0 – brak widocznych objawów, 0; – plamki

nadwrażliwości, 1 – małe uredinia z nekrozą, 2 – uredinia małe do średnich z nekrozą, 3 – uredinia średniej wielkości z chlorozą lub nekrozą, 3+ – uredinia średniej wielkości otoczone niewielką otoczką chlorotyczną lub jej brak, 4 – duże uredinia pozbawione chloroz/nekroz. Oznaczenie ras patogenu przypisano zgodnie z amerykańskim systemem nomenklatury (Long i Kolmer; 1989), zastosowano zestaw 16 linii blisko-izogenicznych, które pogrupowano na zestawy po 4 linie, pierwszy zestaw: *Lr1*, *Lr2a*, *Lr2c*, *Lr3*, drugi zestaw: *Lr9*, *Lr16*, *Lr24*, *Lr26*, trzeci zestaw: *Lr3ka*, *Lr11*, *Lr17*, *Lr30*, a także czwarty zestaw *LrB* (RL 6051), *Lr10*, *Lr14a*, *Lr18* (Huerta-Espino i in., 2011).

Wyniki

Na podstawie wyników testów fitopatologicznych określono procent wirulentnych izolatów zidentyfikowanych w 2023 roku na terenie Polski. Wyniki przedstawiono na Rys. 1, z którego wynika, że najniższy poziom wirulencji zaobserwowano w stosunku do genów: *Lr2a*, *Lr9*, *Lr19*, *Lr29*,



Rys. 1. Częstotliwość wirulencji 37 izolatów *Puccinia triticina* na liniach zestawu różnicującego z genami *Lr* w Polsce w 2023 roku.

Fig. 1. Frequency of virulence of 37 *Puccinia triticina* isolates on the differential set lines with *Lr* genes in Poland in 2023.

Lr52, *Lr63*, gdyż żaden z testowanych izolatów nie przełamał tej odporności. Natomiast wirulencję na poziomie 100% odnotowano nie tylko w przypadku wzorca podatności, ale również dla genów: *Lr18*, *Lr37*, *Lr38*, *LrB* (RL 6051). Wysoki poziom wirulencji (62–97%) wykazano w stosunku do 17 genów: *Lr1*, *Lr3a*, *Lr3bg*, *Lr3ka*, *Lr10*, *Lr11*, *Lr13*, *Lr14a*, *Lr14b*, *Lr15*, *Lr17a*, *Lr17b*, *Lr27+31*, *Lr30*, *Lr33*, *Lr44* i *LrB* (RL 6061). Wirulencję pomiędzy 30% a 45% wykazano w sto-

sunku do 5 genów *Lr* (*Lr16*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr28*, *Lr36*), natomiast poniżej 30 % w stosunku do 8 genów *Lr* (*Lr2b*, *Lr2c*, *Lr20*, *Lr21*, *Lr23*, *Lr25*, *Lr32*, *Lr64*).

Na podstawie zastosowanego algorytmu, z wykorzystaniem 16 linii NIL, określono patotypy *P. triticina*. Zidentyfikowano 31 różnych patotypów, wśród których cztery dominowały.

Podsumowanie

W 2023 roku na terenie Polski z odmian i rodów pszenicy wyizolowano 37 izolatów *P. tritici-na*, sprawcy rdzy brunatnej pszenicy. Izolaty pochodziły z różnych regionów kraju i zostały one przetestowane na zestawie różnicującym składającym się z 41 obiektów, dzięki czemu oznaczono poziom wirulencji badanego patogenu. Najwyższą skuteczność odporności na patogen wykazały geny: *Lr2a*, *Lr9*, *Lr19*, *Lr29*, *Lr52*, *Lr63*, wobec których nie stwierdzono przełamania odporności. Z kolei 100% wirulencję odnotowano m.in. dla genów *Lr18*, *Lr37*, *Lr38*, *LrB* (RL 6051). Poziom wirulencji wobec pozostałych genów był zróżnicowany – od niskiego (poniżej 30%) do wysokiego (powyżej 60%). Bazując na zestawie 16 linii NIL z genami: *Lr1*, *Lr2a*, *Lr2c*, *Lr3*, *Lr3ka*, *Lr9*, *Lr10*, *Lr11*, *Lr14a*, *Lr16*, *Lr17*, *Lr18*, *Lr24*, *Lr26*, *Lr30*, *LrB* (RL 6051) oznaczono 31 patotypów spośród izolatów pochodzących z pszenicy. Dominowały

patotypy: MHTT, MGTT, LBJT, MFPT. Pierwszy z patotypów występował u 8% populacji patogenu, natomiast pozostałe wykryto u 5,5% populacji.

Uzyskane dane stanowią istotny wkład w monitoring populacji *P. tritici-na* i mogą wspierać hodowlę odpornych odmian pszenicy. Ma to szczególne znaczenie na tle przepisów o integrowanej ochronie roślin (ang. Integrated Pest Management, IPM), do których przestrzegania Polska jest zobowiązana, zgodnie z przepisami wydanymi przez Unię Europejską (Dyrektywa Komisji 2009/128/WE i Dekret 1107/2009). Na tej podstawie Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi wydał rozporządzenie (z dnia 18 kwietnia 2013) „W sprawie wymagań integrowanej ochrony roślin (Dziennik Ustaw z dnia 26 kwietnia 2013), w którym §1 p.3 mówi o wykorzystaniu odmian odpornych jako części działań IPM. Autorka podkreśla konieczność kontynuacji badań w kolejnych latach dla pełnego zobrazowania dynamiki populacji patogenu w Polsce.

Literatura

- Bolton, M., Kolmer, J., Garvin, D. (2008). Wheat leaf rust caused by *Puccinia tritici-na*. Mol Plant Pathol 9:563–575. <https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2008.00487.x>
- Huerta-Espino, J., Singh, R.P., Germán, S., McCallum, B.D., Park, R.F., Chen, W.Q., Bhardwaj, S.C., Goyeau, H. (2011). Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia tritici-na*. Euphytica 179:143–160. <https://doi.org/10.1007/s10681-011-0361-x>
- Kolmer, J.A. (2005). Tracking wheat rust on a continental scale. Curr Opin Plant Biol 8: 441–449.
- Kryczyński, S., Weber, Z., Paduch-Cichal, E., Schollenberger, M., Wakuliński, W., Werner, M., Fiedorowicz, Z., Irzykowska, L., Karolewski, Z., Mirzwa-Mróz, E., Sala-Rejczak, K., Szyndel, M., Gołębiak, B., Jeżewska, M., Kosiada, T., Majewski, T. (2011). Fitopatologia. Tom 2. Choroby roślin uprawnych. Wyd. I. PWRiL, Poznań: 418–420.
- Long, D.L., Kolmer, J.A. (1989). A North American system of nomenclature for *Puccinia recondita* f. sp. *tritici*. Phytopathology 79: 525-529.
- McIntosh, R.A. (2024). Wheat gene catalogue. <https://wheat.pw.usda.gov/GG3/> Wheat_Gene_Catalog_Documents. Accessed 26 June 2024.
- Mesterhazy, A., Bartos, P., Goyeau, H., Niks, R.E., Csosz, M., Andersen, O., Casulli, F., Ittu, M., Jones, E., Manisterski, J., Manninger, K., Pasquini, M., Rubiales, D., Schachermayr, G., Strzembicka, A., Szunics, L., Todorova, M., Unger, O., Vanco, B., Vida, G., Walther, U. (2000). European virulence survey for leaf rust in wheat. Agronomie 20: 793–804.
- Roelfs, A.P., Singh, R.O., Saari, E.E. (1992). Rust Disease of wheat. Concepts and methods of disease management. CIMMYT Mexico: 81 pp.
- Stakman, E.C., Stewart, D.M., Loegering, W.Q. (1962). Identification of physiologic races of *Puccinia graminis* var. *tritici*. United States Department of Agriculture, ARS E617, 1962.
- Witkowska, K., Śmiałowski, T., Witkowski, E. (2011). Zależność plonu rodów pszenicy ozimej od stopnia porażenia przez *Stagonospora nodorum* i *Puccinia tritici-na* w zróżnicowanych warunkach polowych. Biul IHAR 262: 47–58.

Występowanie i sposoby ograniczania populacji mątwika ziemniaczanego

Occurrence and methods of reducing the population of yellow potato cyst nematode

Anna Podlewska-Przetakiewicz 

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, Radzików, 05-870 Błonie

[✉ a.przetakiewicz@ihar.edu.pl](mailto:a.przetakiewicz@ihar.edu.pl)

Mątwik ziemniaczany (*Globodera rostochiensis*) od lat stanowi zagrożenie upraw ziemniaka na świecie. W Polsce dominującym patotypem tego gatunku mątwika jest patotyp Ro1. Ze względu na obecność innych patotypów mątwika ziemniaczanego oraz patotypów mątwika agresywnego (*Globodera pallida*) w państwach europejskich istnieje potrzeba stałego monitoringu pojawów nieznanych gatunków i patotypów nicieni w celu zapobieganiu powstawania nowych ognisk choroby. Niniejszy artykuł przedstawia biologię, drogi rozprzestrzenienia się mątwika ziemniaczanego oraz metody pozwalające ograniczyć i wyeliminować populację agrofaga w miejscach uznanych za porażone.

Słowa kluczowe: kwarantanna, mątwik ziemniaczany, odporność, ograniczanie występowania

Quarantine pathogen such as yellow potato cyst nematode (*Globodera rostochiensis*) has been a threat to potato crops around the world for years. So far, in Poland, the only identified is the pathotype Ro1. Due to the presence of white potato cyst nematode (*Globodera pallida*) and other pathotypes of yellow potato cyst nematode in European countries, there is a need to constantly monitor the occurrence of unknown species and pathotypes of nematodes and prevent the emergence of new disease outbreaks. This article presents the biology and spread of yellow potato cyst nematode and methods of reducing and eliminating the population of this pest in places considered infected.

Keywords: quarantine, yellow potato cyst nematode, resistance, limitation of presence

Pochodzenie i występowanie *Globodera rostochiensis*

Mątwik ziemniaczany *Globodera rostochiensis* (Wollenweber, 1923; Behrens 1975) należy do gatunku kosmopolitycznego żyjącego zarówno w krajach klimatu umiarkowanego jak i w rejonach tropikalnych. Zakres roślin żywicielskich tego nicienia, dzięki którym gatunek ten przechodzi cykl życiowy ograniczony jest do roślin uprawnych z rodziny psiankowatych tj. pomidora, ziemniaka, bakłażana. Wśród chwastów cysty mątwika mogą się rozwijać na korzeniach psianki słodkogórz oraz na innych dziko żyjących gatunkach z rodzaju *Solanum* i *Lycopersicon* (EFSA, 2019).

Ojczyzną gatunku jest Ameryka Południowa, a w szczególności wyżynne rejony Peru wokół jeziora Titicaca, znajdujące się na wysokości 2900–3800 m.n.p.m, z których ziemniaki uprawiane przez tysiące lat zostały przewiezione do Europy wraz z wyprawami hiszpańskiej inkwizycji (Jones, 1970; Evans i Stone, 1977). Do połowy XIX wieku wszystkie odmiany ziemniaka uprawiane w Europie pochodziły z dwóch źródeł – hiszpańskiego z 1570 roku oraz brytyjskiego z ok. 1588 roku (Evans i in., 1975). Te dwie niezależne drogi rozprzestrzeniania dały początek odmianom ziemniaka na całym świecie (Brodie, 1984).

Pomimo pojawienia się ziemniaka w Europie z końcem XVI wieku, pierwsze zawleczenie mą-

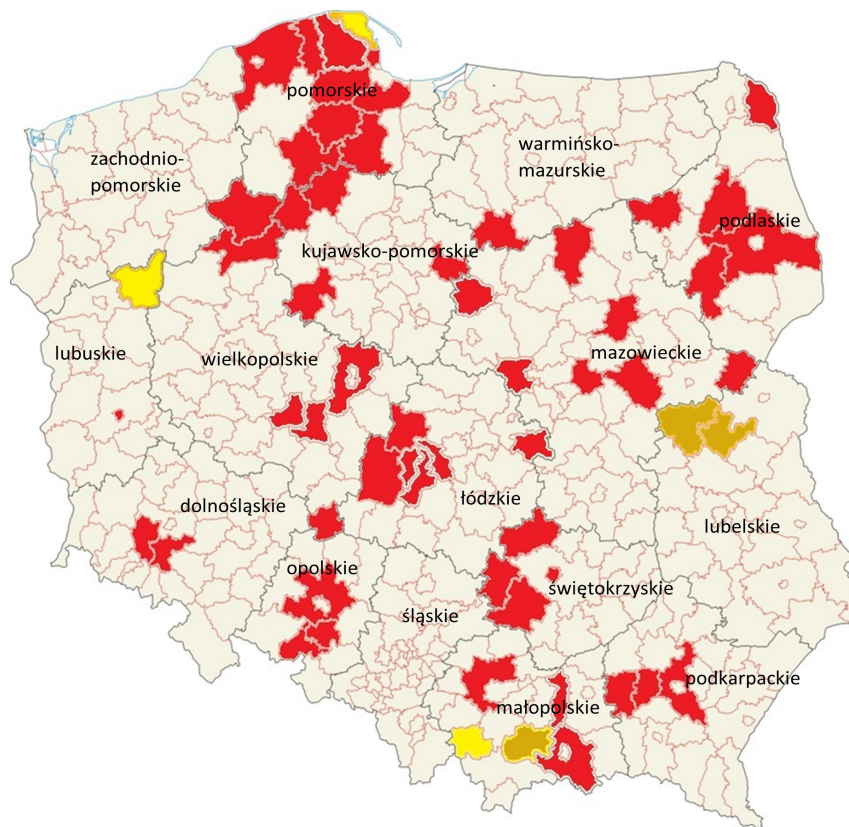
twika ziemniaczanego na kontynent odnotowano znacznie później (Evans i in., 1975). Gatunek ten dotarł na kontynent europejski wraz z ziemią przylegającą do bulw sadzeniaków ziemniaka przywiezionych z Ameryki Południowej w ramach badań prowadzonych w Europie nad epidemią zarazy ziemniaka w latach 1840-tych (Hockland i in., 2012). Na podstawie podobieństw w charakterystyce wirulencji populacji mątwików stwierdzono, że źródłem ich rozpowszechniania była niewielka liczba cyst mątwika przywieziona z Ameryki Południowej, natomiast Europa stała się kolejnym kontynentem dystrybucji agrofaga przenoszonych w inne części świata wraz z materiałem rozmnożeniowym (Plantard i in., 2008, Grenier i in., 2010).

W Europie po raz pierwszy występowanie mątwika ziemniaczanego odnotowywano z początku XX wieku w Anglii w 1905 roku (Minnis i in., 2002), następnie w 1913 roku w Niemczech (Zimmermann, 1914) oraz w 1920 roku w Szwecji (Manduric i Andersson, 2003), 1928 r. w Danii (Hansen, 1988), 1946 r. w Finlandii (Hekkila i Tilikkala, 1992), w 1951 na Wyspach Owczych (Jacobsen, 1973), 1953 na Islandii (Bendezu i in., 1998) oraz w 1955 w Norwegii (Øydvin, 1975; Holgado i Magnusson, 2012). Jednym z najpóźniej zasiedlonych przez mątwika ziemniaczanego regionów świata są obszary południowej Syberii (rok 1948), gdzie nicien jest obecnie największym problemem w uprawie ziemniaka (Efremenko, 1961).

W Polsce występowanie mątwika ziemniaczanego po raz pierwszy stwierdzono w 1946 roku w województwie szczecińskim (Jasińska, 1955) oraz w przydomowym ogrodzie na terenie Gdańska (Wiłski, 1955). Przypuszczalnie został on zawleczony z Niemiec i w późniejszych latach pojawił się w uprawie ziemniaka na terenie kraju. Prowadzony w latach 2008-2025 przez Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Radzikowie monitoring występowania gatunków i patotypów mą-

twików w Polsce wykazał występowanie na polach uprawnych ziemniaka w kraju głównie mątwika ziemniaczanego patotyp Ro1. Próby gleby do badań były pobierane przez inspektorów Państwowej Inspekcji Ochrony Roślin i Nasiennictwa (PIORiN), która współpracuje z IHAR-PIB w zakresie powyższego monitoringu.

W 2025 roku występowanie mątwika ziemniaczanego odnotowane zostało w 78 krajach świata (<https://gd.eppo.int>).



Rys. 1 Występowanie *Globodera rostochiensis* w Polsce w latach 2008-2025 (na podstawie badań własnych). Kolor czerwony - patotyp Ro1 *G. rostochiensis*; kolor żółty - patotyp Ro5 *G. rostochiensis*; kolor pomarańczowy - patotyp Ro1 i Ro5 *G. rostochiensis*.

Fig. 1. Occurrence of *Globodera rostochiensis* in Poland in the years 2008-2025 (based on own research). Red color - pathotype Ro1 *G. rostochiensis*; yellow color - pathotype Ro5 *G. rostochiensis*; orange color - pathotype Ro1 and Ro5 *G. rostochiensis*.

Biologia mątwika ziemniaczanego

Mątwik ziemniaczany rozmnaża się płciowo (Den Ouden, 1960) i jak wiele innych nicieni tworzących cysty, osobniki młodociane wykluwają się z jaj w wyniku stymulacji wydzielanymi uwalniającymi przez korzenie roślin psiankowatych (Kud i in., 2022). Osobniki młodociane drugiego stadium (J2) opuszczające jaja penetrują system korzeniowy rośliny żywiciela tuż za wierzchołkiem korzenia lub za korzeniem bocznym poprzez nakłucie ścian komórkowych korzenia tzw. sztyletem (Evans i Stone, 1977). Nicienie migrują w przestrzeniach międzykomórkowych do perycyklu, gdzie tworzą strukturę nazywaną syncytium dostarczającą substancji odżywczych dla rozwijających się nicieni (Lilley i in., 2005). Około 7 dni po

wniknięciu do rośliny osobniki J2 przekształcają się w osobniki J3 i J4. Płeć u nicieni jest identyfikowana już w trzecim stadium rozwoju (J3) i jest determinowana przez warunki środowiskowe, a przede wszystkim przez dostępność pokarmu. Przy ograniczonym rozroście syncytium i braku substancji odżywczych w cyklu życiowym nicieni powstaje więcej samców niż samic (Trudgill, 1967). Samce wydostają się z korzenia w celu zapłodnienia samic, których gonady w wyniku powiększania się rozrywają korę korzenia i ostatecznie wystają poza jego powierzchnię stając się widoczne na zewnątrz. Dalszy rozwój zarodków odbywa się w jajach, aż do powstania osobników młodocianych drugiego stadium (J2). Na tym etapie pozostają uśpione, dopóki nie otrzymają odpo-

wiedniego bodźca do wyklucia lub gdy warunki nie będą odpowiednie do aktywności. Dojrzałe samice przekształcają się w ochronną cystę zawierającą od 200 do 500 jaj i odpadają od korzenia rośliny. W zależności od sprzyjających wylęgowi czynników zewnętrznych, 1/3 larw inwazyjnych w cyście może być źródłem porażenia roślin jeszcze w tym samym sezonie wegetacyjnym. Cysty mogą przetrwać w glebie przez 15 lat lub dłużej (Perry, 1989).

Identyfikacja mątwika ziemniaczanego

Do określania gatunku mątwika wykorzystuje się zarówno badanie jego cech morfologicznych jak i metody molekularne oparte na analizie PCR na bazie DNA gatunku. Zgodnie z nowym rozporządzeniem wykonawczym Komisji Europejskiej 2022/1192 z dnia 11 lipca 2022 roku w odniesieniu do wykrywania i identyfikacji gatunku mątwika po izolacji cyst agrofaga z gleby, wykorzystuje się konwencjonalny test PCR opracowany przez

Bulmana i Marshalla (1997). W państwach członkowskich Unii Europejskiej stosuje się również metodę wykrywania i identyfikacji gatunków mątwików z wykorzystaniem techniki PCR w czasie rzeczywistym (Real Time-PCR) według Beniers'a i in. (2014), łączącej identyfikację gatunku mątwika z określeniem jego żywotności.

W obrębie gatunku mątwika ziemniaczanego wyróżnia się tzw. patotypy. Są to populacje/grupy mątwika charakteryzujące się wspólnymi genami wirulencji (lub awirulencji) i wyróżnione na podstawie zdolności (lub braku zdolności) namnażania się danej populacji na określonej roślinie żywicielskiej zwanej rośliną różnicującą. Na podstawie interakcji różnych populacji mątwika z różnicującymi genotypami ziemniaka wyodrębniono pięć patotypów mątwika ziemniaczanego – Ro1, Ro2, Ro3, Ro4 i Ro5 (Tab. 1).

Tabela 1
Table 1

Identyfikacja patotypów mątwika ziemniaczanego (Kort i in., 1977)
Identification of yellow potato cyst nematode pathotypes (Kort et al., 1977)

Genotyp ziemniaka / Potato genotype	<i>Globodera rostochiensis</i>				
	Ro1	Ro2	Ro3	Ro4	Ro5
Desiree	+	+	+	+	+
Maris Piper	-	+	+	-	+
<i>S. kurtzianum</i>	-	-	+	+	+
<i>S. vernei</i> 58.1642.4	-	-	-	+	+
<i>S. vernei</i> 62.33.3	-	-	-	-	+
<i>S. vernei</i> 65.346.19	-	-	-	-	-
<i>S. multidissectum</i>	+	+	+	+	+
Partner	-	-	-	-	-

+ oznacza podatność (namnażanie cyst mątwika na danym genotypie ziemniaka) / susceptibility;

– oznacza odporność (cysty mątwika nie namnażają się na danym genotypie ziemniaka) / resistance.

Czynniki wpływające na rozprzestrzenianie się mątwików

Jednym z głównych gospodarzy mątwika ziemniaczanego jest ziemniak, który uprawiany jest we wszystkich krajach Unii Europejskiej. Straty w plonie wywołane porażeniem mogą sięgać od 50% (Seenivasan, 2017) do 80% (Turner, 1996), a nawet więcej (Zawiślak i in. 1988 b). W przypadku roślin pomidora i bakłażana uprawianych głównie w szklarniach, nicienie nie stanowi tak dużego zagrożenia, a ponadto mogą one być łatwiej zwalczane niż w przypadku polowej uprawy ziemniaka. Formą przetrwalnikową mątwików są cysty zawierające od 200 do 500 jaj. Jaja zawierają roztwór trehalozy, który chroni inwazyjne stadium J2 mątwika w ekstremalnych warunkach otoczenia, co oznacza, że mątwiki mogą przetrwać zarówno mroźne zimy jak i długo-

trwałe susze. Cykl życiowy mątwika jest dopasowany do cyklu wegetacyjnego gospodarza. Wczesną wiosną, gdy temperatura gleby osiąga 8-10°C i rozpoczyna się kiełkowanie bulw ziemniaka, następuje wykluwanie się osobników młodocianych mątwika i inwazja systemu korzeniowego gospodarza. Krótki cykl życiowy nicienia wynoszący ok. 6 tygodni pozwala całej populacji mątwika wyprodukować potomstwo w okresie wegetacji ziemniaka. Mątwik ziemniaczany przechodzi jedno pokolenie w ciągu roku. W literaturze można znaleźć wyniki badań wykazujące, że w sprzyjających warunkach pogodowych mątwik może przejść dwa cykle życiowe w ciągu jednego sezonu wegetacyjnego ziemniaka (Evans i Stone, 1977; Greco i in., 1988; Jimenez-Perez i in., 2009).

W krajach Unii Europejskiej rozprzestrzenianie się cyst mątwika za pomocą naturalnych czyn-

ników środowiska, tj. wiatru, wody i zwierząt jest znikome, natomiast samoistne przemieszczanie się osobników młodocianych w glebie ograniczone jest do ok. 1 metra (<https://gd.eppo.int/taxon/HETDRO/datasheet>). Główną przyczyną rozprzestrzeniania się nicieni i powstawania jego nowych ognisk jest tzw. transport pasywny, w którym zanieczyszczona cystami gleba, przylegająca do sadzeniaków, cebulek lub innych roślin szkółkarskich przemieszczana jest na pola niezainfekowane, na których wcześniej nie stwierdzono obecności mątwika. W celu ograniczenia rozprzestrzeniania się cyst prowadzi się badania gleby na polach przeznaczonych pod uprawę sadzeniaków ziemniaka oraz innych roślin wymienionych w rozporządzeniu wykonawczym Komisji (UE) 2022/1192, załącznik I, a monitoringowo na plantacjach innych niż sadzeniaki (Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2022/1192 z dnia 11 lipca 2022 roku). Aby zminimalizować roznoszenie cyst w łańcuchu dostaw ziemniaka, można dodatkowo poddać badaniu glebę zebraną podczas sortowania i pakowania bulw ziemniaka.

Drugim bardzo istotnym „wektorem” dyspersji nicieni o średnim i dużym zasięgu są maszyny i narzędzia rolnicze używane w gospodarstwie, gdzie wraz z transportem, w resztkach gleby i na opakowaniach (np. workach), cysty mątwików mogą być zawleczone w miejsca nieporażone. Ze względu na znaczące ilości gleby przylegającej do maszyn i narzędzi rolniczych często używanych na oddalonych od siebie polach, dochodzi do rozprzestrzeniania się nicieni. Ważne jest zatem dokładne czyszczenie i mycie oraz odkażaniem narzędzi i maszyn rolniczych.

Kolejnym sposobem rozprzestrzeniania się mątwika jest ponowne wykorzystywanie w pracach polowych porażonej ziemi np. pochodzącej z miejsc, na których gromadzone są pozostałości gleby po zbiorze ziemniaków oraz stosowanie nawozów naturalnych pochodzących od zwierząt hodowlanych karmionych zainfekowanymi ziemniakami (prawdopodobne jest zachowanie żywej zawartości cyst po przejściu przez układ pokarmowy zwierząt). Są to jednak drugorzędowe drogi porażenia niewpływające w znaczący sposób na rozprzestrzenianie się cyst mątwika.

Metody agrotechniczne stosowane w celu zapobiegania rozprzestrzeniania się mątwika

Szczegółowe zasady dotyczące zwalczania i zapobiegania rozprzestrzenianiu się mątwika zostały określone w rozporządzeniu wykonawczym Komisji (UE) 2022/1992 (2022). Zasady te określają sposób przeprowadzenia urzędowych kontroli występowania nicieni oraz kontroli monitoringowych, sposobu pobierania próbek gleby i przeprowadzenia testów na potrzeby ww. kontroli, uznania punktów produkcji i określonych roślin

za porażone. W rozporządzeniu przedstawiono także środki stosowane do zwalczania nicieni. Dodatkowo w celu ograniczenia rozprzestrzeniania się mątwika, każde państwo członkowskie jest zobowiązane do udzielania informacji o potwierdzonym przełamaniu odporności danej odmiany ziemniaka przez określonego agrofaga oraz przedstawieniu wykazu wszystkich nowych i odpornych odmian ziemniaka dopuszczonych do obrotu. Poniżej opisane zostały inne niż uprawa odmian odpornych, metody ograniczania liczebności mątwików.

Płodozmian

Jedną z najczęściej stosowanych metod agrotechnicznych mających na celu zredukowanie liczebności cyst nicieni w glebie jest dobór właściwych gatunków roślin uprawianych na zamiatwionym polu. Mątwiki żerują głównie na roślinach ziemniaka, który uprawiany przez wiele lat w monokulturze lub w wysoce specjalistycznych płodozmianach ziemniaczanych (Zawiślak i in. 1988a), przyczynia się do znaczącego wzrostu zagęszczenia tego nicienia w glebie. Pomimo tego, że dzięki formie przetrwalnikowej mątwik przeżywa w glebie wiele lat, część nicieni wykluwa się samoistnie każdego roku, a pod nieobecność gospodarza część populacji obumiera (Den Ouden, 1960). Wskaźnik spadku zagęszczenia szkodnika może corocznie wynieść do 33% i jest zależny od typu gleby oraz roku ostatniej uprawy ziemniaka na danym polu (Turner, 1996). Większość autorów stwierdziło znaczący spadek zagęszczenia populacji mątwika w glebie rok po zbiorach ziemniaka, od ok. 65% (Schomaker i Been, 1999) do 80% (Andersson, 1988). W pracy przeglądowej Spychalla i De Jong (2024) opisywali zastosowanie typowego płodozmiannu, w którym w pierwszym roku kwarantanny uprawiane są podatne odmiany ziemniaka, a następnie przez 3 lata rośliny nieżywicielskie. Według autorów ten typ płodozmiannu jest stosowany w ograniczeniu populacji większości patogenów glebowych, niemniej jest zbyt krótkotrwały, aby spowodować znaczący spadek liczebności cyst mątwika ziemniaczanego w glebie. W systemie stosowanym z powodzeniem przez amerykańskich rolników, uzyskano wysoki spadek zagęszczenia mątwika poprzez dwuletnią uprawę odpornej odmiany ziemniaka, następnie rok uprawy rośliny nieżywicielskiej oraz w czwartym, ostatnim roku kwarantanny, uprawę podatnej odmiany ziemniaka. Wykorzystanie tego typu płodozmiannu umożliwiło redukcję nicienia na polu o 90% (Brodie i Mai, 1989).

Podstawową metodą agrotechniczną stosowaną w Polsce w celu zmniejszenia liczebności mątwika ziemniaczanego jest 4-5 letnia przerwa w uprawie ziemniaka na porażonym polu, głęboka orka przedzimowa oraz likwidacja samosiewów ziemniaka i innych roślin psiankowatych. W płodozmianie wykorzystane mogą być gatunki z ro-

dzaju kapustowatych, które przyczyniają się do redukcji populacji nicieni w glebie nawet do 50% (Zanbouri i Fatemy, 2014; Ngala i in., 2015; Fatemy i Sepideh, 2016). Istotne znaczenie mogą mieć również uprawy międzyplonów ścierniskowych (Nowakowski i Franke, 2013; Pastuszczyńska i in., 2013). Bardzo istotny w zabiegach agronomicznych jest również maksymalnie wydłużony cykl

zmianowania z wykorzystaniem bardzo wczesnych odmian ziemniaka, o krótkim okresie wegetacji. Kontrolowanie cyklu rozwojowego nicieni pozwala na usunięcie z pola roślin ziemniaka zanim na korzeniach wykształcą się dojrzałe cysty. Przykładowe płodozmiany z uprawą ziemniaka w rotacji 4-5letniej przedstawia Tabela 2.

Tabela 2
Table 2

Przykładowy płodozmian w rotacji 4-5 letniej (Zawiślak i in. 1989)
Example of crop rotation in a 4-5 year rotation (Zawiślak i in. 1989)

Lata kwarantanny / Years of quarantine	Typ zbożowy / (cereal type)	Typ wszechstronny / (universal type)
I rok kwarantanny	ziemniak odmiana odporna	ziemniak odmiana odporna
II rok kwarantanny	zboża ozime lub jare	mieszanka strączkowa
III rok kwarantanny	koniczyna lub mieszanka strączkowa	rzepak ozimy
IV rok kwarantanny	zboże ozime	zboże ozime
V rok kwarantanny	zboże jare	zboże jare
VI rok kwarantanny	ziemniak odmiana odporna	ziemniak odmiana odporna
	Typ pastewny (fodder type)	Typ pastewno-zbożowy / (fodder - cereal type)
I rok kwarantanny	ziemniak odmiana odporna	koniczyna perska
II rok kwarantanny	owies na kiszonkę	ziemniak odmiana odporna
III rok kwarantanny	koniczyna czerwona z trawami	pszenżyto ozime
IV rok kwarantanny	pszenica ozima	kukurydza
V rok kwarantanny	jęczmień jary	jęczmień jary
VI rok kwarantanny	ziemniak odmiana odporna	ziemniak odmiana odporna

Rośliny pułapkowe

Prostą metodą do ograniczenia zagęszczenia populacji mątwika w glebie są rośliny pułapkowe (Halford i in., 2008). Osobniki młodociane J2 nicienia wnikają do korzeni roślin pułapkowych, lecz nie mają wystarczająco dużo czasu do formowania jaj. *Solanum sisymbriifolium* – psianka stuliszolistna jest gospodarzem mątwika. Nie wytwarza bulw i ma krótszy od ziemniaka okres wegetacji, niemniej stymuluje wylęganie się osobników młodocianych z jaj. Zastosowanie psianki umożliwiło redukcję *G. pallida* o ok. 80% (Scholte i Vos, 2000; Szymczak-Nowak i in., 2007). Szeroko zakrojone badania nad efektywnością zastosowania psianki prowadzone w Holandii wykazały średni spadek zagęszczenia populacji mątwika w glebie wynoszący 52% (Hartsema i in., 2005). Warto dodać, że psianka stuliszolistna jest odporna na wszystkie patotypy mątwika ziemniaczanego *Globodera rostochiensis* oraz grupy wirulentne mątwika agresywnego *Globodera pallida* (Scholte, 2000).

Odmiany odporne

Dotychczas najefektywniejszą metodą zmniejszenia liczebności populacji mątwików w glebie jest uprawa odmian ziemniaka odpornych na dany patotyp mątwika. Dominującym w Europie jest patotyp Ro1 mątwika ziemniaczanego. Obecność genu *H1* pochodzącego z *Solanum tuberosum*

subsp. *andigena* stanowi źródło odporności odmian ziemniaka na ten patotyp, a zastosowanie ich w uprawie spowodowało obniżenie liczebności populacji patotypu Ro1 *G. rostochiensis* o ok. 90% (Brzeski i Rogala, 1984; Malec, 1985; Galek i in., 2011; Faggian i in., 2012; Schultz i in., 2012). Pod koniec 2018 roku w Krajowym Rejestrze Odmian znajdowało się zaledwie 6% odmian ziemniaka podatnych na dominujący w kraju patotyp Ro1 mątwika ziemniaczanego, niemniej jedynie 25% wszystkich odmian zostało przebadanych na pozostałe cztery patotypy tego gatunku mątwika (Franke i in., 2019). Ocenę odporności odmian ziemniaka na wszystkie patotypy mątwika ziemniaczanego prowadzi się zgodnie z rozporządzeniem wykonawczym Komisji (UE) 2022/1192, zał. V (2022). Skala oceny odporności jest 9-cio stopniowa (9 – skrajna odporność, 1 – skrajna podatność), a porażenie każdej bulwy porównywane jest do skrajnie podatnej, kontrolnej odmiany ziemniaka Desiree. Badania stopnia odporności odmian ziemniaka na poszczególne patotypy mątwika ziemniaczanego i agresywnego prowadzi od 2006 roku Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin w Radzikowie.

Metody chemiczne

W przeszłości do kontrolowania liczebności populacji nicieni w glebie stosowano fumiganty tj. izotiocyanian metylu, bromek metylu i 1,3-dichloropropen oraz inne nematocydy (np. Temik,

Carbofuran, Nema-Gard). Zaniechano jednak stosowania tych substancji ze względu na ich szkodliwy wpływ na środowisko, w szczególności na wody gruntowe oraz karcynogeny wpływ na zdrowie człowieka. Obecnie w celu chemicznego ograniczenia zagęszczenia populacji nicieni w glebie wykorzystuje się dostępne na rynku środki ochrony roślin. Wyróżnia się wśród nich nematocydy selektywne i nieselektywne w postaci fumigantów glebowych, których aktualna lista dostępna jest na stronie <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/rejestr-rodkow-ochrony-roslin> (Rejestr Środków Ochrony Roślin, 2024).

Metody biologiczne

Metoda biologiczna bazuje na antagonistycznych oddziaływaniach grzybów i bakterii występujących w glebie na larwy mątwików. W literaturze dostępne są wyniki badań nad nicieniobójczym działaniem grzybów z rodzaju *Pochonia* (Tobin i in., 2008) i *Trichoderma* (Contina i in., 2017) wykazujące ograniczenie populacji patogena przy wykorzystaniu ww. gatunków.

Zalewanie

Zgodnie z przepisami Unii Europejskiej pola przeznaczone pod uprawę sadzeniaków ziemniaka muszą być wolne od mątwika ziemniaczanego. Jedną z metod ograniczania rozprzestrzeniania się nicieni i eliminację cyst z pól przeznaczonych pod uprawę roślin cebulowych i bulwowych jest zalewanie. Eliminację cyst agrofaga przeprowadza się poprzez zalewanie wodą porażonej powierzchni pola na wysokość co najmniej 5 cm powyżej poziomu gruntu przez okres 12 tygodni i przy temperaturze wynoszącej co najmniej 16°C na głębokości 15 cm. W przypadku tej metody konieczne jest wykluczenie odpływu wody z zalewanego obszaru związane z ukształtowaniem terenu. Zalewanie jest niedozwolone w punktach produkcji, w których zidentyfikowano występowanie *Synchytrium endobioticum* – sprawcę raka ziemniaka. Roślin z gatunku *Solanum tuberosum* oraz *Solanum lyco-*

persicum nie można sadzić na polach uprawnych w pierwszym sezonie wegetacyjnym następującym po zalaniu jeżeli wykorzystuje się w tym celu wody powierzchniowe, w których nie można wykluczyć obecności bakterii kwarantannowej *Ralstonia solanacearum*.

Metoda eliminacji mątwika poprzez zalewanie jest szeroko stosowana w Holandii przy uprawie tulipanów, a wyniki badań prowadzonych nad przeżywalnością cyst *Globodera rostochiensis* po 16 tygodniach od zalania badanej powierzchni pola wykazały eliminację 99,9% sztucznie wprowadzonych do gleby cyst. W Polsce jak dotąd metoda ta nie ma zastosowania.

Metody ugorowania gleby i usuwanie roślin psiankowatych

W krajach o wysoko rozwiniętym rolnictwie, grunt ugorowany, czyli czasowo wyłączony z produkcji, jest poddawany odpowiednim zabiegom umożliwiającym utrzymanie go w stanie sprawności agrotechnicznej (Adamczewski i in., 1994). Metoda ugorowania pola jest jednocześnie sposobem na zmniejszenie liczebności populacji nicieni w okresie obowiązującej na tym polu 6-letniej kwarantanny przy jednoczesnej eliminacji roślin żywicielskich mątwika, w tym chwastów psiankowatych. Usuwanie samosiewów ziemniaka (w przypadku gruntów o małym areale), uprawa roślin zbożowych przez okres kwarantanny, dopuszczenie do uprawy odmian ziemniaka w 8 i 9 stopniu odporności na dany patotyp mątwika z przeznaczeniem na konsumpcję lub przerób przemysłowy, są metodami zapobiegania dalszemu rozprzestrzenianiu i namnażaniu nicienia na polach uprawnych.

Publikacja została sfinansowana z tematu badawczego Dotacji Celowej nr 5.3., Obszar 5. Ochrona Roślin, dotowanego przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

Literatura

- Adamczewski K., Rola J., Pochitonow Z. (1994) Postępowanie z terenami czasowo wyłączonymi z produkcji roślinnej w krajach europejskich. Materiały 34 Sesji Naukowej IOR, Część I, 44–51.
- Andersson S. (1988) Annual population decline of *Globodera rostochiensis* in the absence of host plants. E.S.N. XIXth International nematology symposium Uppsala, Sweden, Sveriges Lantbruksuniv, 7.
- Behrens, E. (1975) Taxonomically useful characters for the differentiation of Heterodera species. Probleme der Phytoneumatologie. Vorträge anlässlich der 10. Tagung über Probleme der Phytoneumatologie im Institut für Pflanzenzüchtung Gross-Lüsewitz der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin am 11. Juni 1971, 122–142.
- Bendezu I.F., Russell M.D., Evans K. (1998) Virulence of population of potato cyst nematodes (*Globodera* spp.) from Europe and Bolivia towards differential potato clones frequently used for pathotype classification. Nematologica 44(6), 667–681. <https://doi.org/10.1163/005725998X00078>
- Beniers J.E., Been T.H., Mendes O., van Gent-Pelzer M.P.E., van der Lee T.A.J. (2014) Quantification of viable eggs of the potato cyst nematodes (*Globodera* spp.) using either trehalose or RNA-specific Real-Time PCR. Nematology 16(10), 1219–1232. <https://doi.org/10.1163/15685411-00002848>
- Brodie B.B. (1984) Nematode parasites of potato. W: Nickle W.R. Marcel Dekker (red.), Plant and insect nematodes, New York, USA, 167–212.

- Brodie B.B., Mai W.F. (1989) Control of the golden nematode in the United States. Annual Review of Phytopathology, 27(1), 443–461. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.27.090189.002303>
- Brzeski M.W., Rogala Z. (1984) Removal of nematode cyst from potato tubers. Ochrona Roślin 28 (6), 12–13.
- Bulman S.R., Marshall J.W. (1997) Differentiation of Australasian potato cyst nematode (PCN) populations using the polymerase chain reaction (PCR). N.Z.J. Crop Hort. Sci. 25 (2), 123–129. <https://doi.org/10.1080/01140671.1997.9513998>
- Contina J.B., Dandurand L.M., Knudsen G.R. (2017) Use of GFP-tagged *Trichoderma harzianum* as a tool to study the biological control of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. App. Soil Ecol. 115, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.010>
- Den Ouden H. (1960) Periodicity in spontaneous hatching of *Heterodera rostochiensis* in the soil. Report of the Fifth International Symposium in Plant Nematology. Nematologica, Supplement II, 101–105.
- Efremenko T.S. (1961) Plant parasitic nematodes and its control in Lithuanian SSR. W: K.I. Skrjabin and E.S. Turlygina (red.), Voprosy phytogel'mintologii, Izd. Akademii Nauk SSSR, 51–57.
- EFSA (2019) den Nijs L, Camilleri M, Diakaki M, Schenk M & Vos S. Pest survey card on *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*. EFSA supporting publication EN-1566. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2019.EN-1566>
- European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO. (2025) EPPO Global Database. <https://gd.eppo.int>
- Evans K., Franco J., Descurrah M. M. (1975) Distribution of species of potato cyst nematodes in South America. Nematologica 21, 365–369. <https://doi.org/10.1163/187529275x00103>
- Evans K., Stone A.R. (1977) A review of the distribution and biology of the potato cyst-nematodes *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. Int. J. Pest Manag. 23, 178–189. <https://doi.org/10.1080/09670877709412426>
- Faggian R., Powell A., Slater A.T. (2012) Screening for resistance to potato cyst nematode in Australian potato cultivars and alternative solanaceous hosts. Australasian Plant Pathol. 41(5), 453–461. <https://doi.org/10.1007/s13313-011-0098-y>
- Fatemy S., Sepideh A. (2016) Adverse effects of brassica green manures on encysted eggs, infective second-stage juveniles and the reproduction of *Globodera rostochiensis*. J. Plant Dis. Prot. 123, 225–233. <https://doi.org/10.1007/s41348-016-0031-2>
- Franke K., Gryń G., Michałowska L., Nowakowski M. (2019) Metody badawcze stosowane w pracach dotyczących ograniczenia występowania populacji *Globodera rostochiensis* w glebie. Biuletyn IHAR 287, 15–18. <https://doi.org/10.37317/biul-2019-0097>
- Galek R., Rurek M., De Jong W.S., Pietkiewicz G., Augustyniak H., Sawicka-Sienkiewicz E. (2011) Application of DNA markers linked to potato H1 gene conferring resistance to pathotype Ro1 of *Globodera rostochiensis*. Journal of Applied Genetics 52(4), 407–411. <https://doi.org/10.1007/s13353-011-0056-y>
- Greco N., Inserra R.N., Brandonisio A., Tirro A., De Marinis G. (1988) Life-cycle of *Globodera rostochiensis* on potato in Italy. Nem. Medit. 16, 69–73.
- Grenier E., Fournet S., Petit E., Anthoine G. (2010) A cyst nematode 'species factory' called the Andes. Nematology 12(2), 163–169. <https://doi.org/10.1163/138855409x12573393054942>
- Halford P.D., Russell M.D., Evans K. (2008) Use of resistant and susceptible potato cultivars in the trap cropping of potato cyst nematodes, *Globodera pallida* and *Globodera rostochiensis*. Ann. App. Biol. 134, 321–327. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1999.tb05271.x>
- Hansen L. M. (1988) Use of stylet measurements to distinguish between two species of potato nematode *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. In: Växtskyddrapporter, Jordbruk, 53: S-750 77 Uppsala, Sweden, Sveriges Lantbruksuniversitet, 29–31. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19912306316>
- Hartsema O, van der Mheen H, van den Berg W, van Gastel W, Molendijk L and Hoek H (2005). Raketblad (*Solanum sisymbriifolium*): teeltaspecten en sanerende werking op aardappelpycysteaaltjes (*Globodera* sp.) 2001–2004. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Wageningen, the Netherlands. in Dutch. <https://edepot.wur.nl/39805>
- Hekkila J., Tilikkala K. (1992) *Globodera rostochiensis* (Woll.) Behrens (Tylenchida Heteroderidae): the only potato cyst nematode found in Finland. Agri. Sci. in Finland 1(5), 519–524. <https://doi.org/10.23986/afsci.72465>
- Hockland S., Niere B., Grenier E., Blok V., Phillips M., Den Nijs L., Anthoine G., Pickup G., Viaene N. (2012) An evaluation of the implications of virence in non-European population of *Globodera pallida* and *G. rostochiensis* for potato cultivation in Europe. Nematology 14 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1163/138855411X587112>
- Holgado R., Magnusson C. (2012) Half a century of potato cyst nematode (*Globodera* spp) management in Norway. International Symposium: Current trends in Plant Protection Proceedings. Belgrade, Serbia 28.08.2012. <https://www.yumpu.com/en/document/read/11613680/half-a-century-of-potato-cyst-nematode-globodera-spp-izbis>
- Jakobsen J. (1973) Identification of *Heterodera pallida* from the Fareoe Island. Manedsoversigt Over Plantesygdomme 473, 54–56. https://dcapub.au.dk/pub/Plantesygdomme_i_Danmark_1973.pdf
- Jasińska A. (1955) Mątwik ziemniaczany. Przegląd ogrodnicy 32, str. 15–16.
- Jones F.G.W. (1970) The control of the potato cyst-nematode. Journal of the Royal Society of Arts, 118(5164), 179–199. <https://www.jstor.org/stable/41370466>
- Jimenez-Perez N., Crozzoliand R., Greco N. (2009) Life-cycle and emergence of second stage juveniles from cysts of *Globodera rostochiensis* in Venezuela. Nematologia Mediterranea 37, 155–160 (PDF) Influence of soil temperature on *Globodera rostochiensis* and *Globodera pallida*.
- Kort J., Ross H., Rumpfenhorst H.J., Stone A.R. (1977) An international scheme for the identification of pathotypes of potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. Nematologica 23, 333–339. <https://doi.org/10.1163/187529277X00057>
- Kud J., Pillai S.S., Raber G., Caplan A., Kuhl J.C., Xiao F., Dandurand L.-M. (2022) Belowground chemical interactions: An insight into host-specific behavior of *Globodera* spp. hatched in root exudates from potato and its wild relative, *Solanum sisymbriifolium*. Fr. Plant Sci. 12, art. nr 802622. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.802622>
- Lilley C.J., Atkinson H.J., Urwin P.E. (2005) Molecular aspects of cyst nematodes. Mol. Plant Pathol. 6(6), 577–588. <https://doi.org/10.1111/j1364-3703.2005.00306.x>

- Manduric S., Andersson S. (2003) Potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis* and *G. pallida*) from Swedish potato cultivation – an AFLP study of their genetic diversity and relationships to other European population. *Nematology* 5(6), 851–858. <https://doi.org/10.1163/156854103773040754>
- Malec K. (1985) Mątwik ziemniaczany (*Globodera rostochiensis* Woll.) i mątwik agresywny (*Globodera pallida* Stone). Wydawnictwo Instytutu Ziemniaka, Bonin 32.
- Minnis S.T., Haydock P.P.J., Ibrahim S.K., Grove I.G., Evans K., Russell M.D. (2002) Potato cyst nematodes in England and Wales – occurrence and distribution. *Ann. Appl. Biol.* 140 (2), 187–195. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00172.x>
- Ngala M.B., Haydock P.P., Woods S., Back M.A. (2015) Biofumigation with *Brassica juncea*, *Raphanus sativus* and *Eruca sativa* for the management of field populations of the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Pest Manag. Sci.* 71(5), 759–769. <https://doi.org/10.1002/ps.3849>
- Nowakowski M., Franke K. (2013) Struktura plonu i oddziaływanie na populację mątwika ziemniaczanego (*Globodera rostochiensis*) wybranych odmian gorczyczy białej uprawianej w plonie głównym II. Plony biomasy nadziemnej i korzeni oraz zagęszczenie mątwika ziemniaczanego w glebie. *Rośliny Oleiste – Oilseed Crops* 34 (1), 85–94. <https://doi.org/10.5604/12338273.1083033>
- Øydvin J. (1975) Nematode resistance potato varieties. *Nordisk Jordbr. Forsk.* 57(2), 487–492.
- Pastuszewska T., Franke K., Nowakowski M. (2013) Badanie wpływu gorczyczy białej na zagęszczenie populacji mątwika ziemniaczanego (*Globodera rostochiensis*) w glebie. *Biuletyn IHAR* 269, 141–148. <https://doi.org/10.37317/biul-2013-0024>
- Perry R.N. (1989) Dormancy and hatching of nematode eggs. *Parasitol. Today* 5(12), 377–383. [https://doi.org/10.1016/0169-4758\(89\)90299-8](https://doi.org/10.1016/0169-4758(89)90299-8)
- Plantard O., Picard D., Valette S., Scurrah M., Grenier E., Mugniery D. (2008) Origin and genetic diversity of Western European populations of the potato cyst nematode (*Globodera pallida*) inferred from mitochondrial sequences and microsatellite loci. *Mol. Ecol.* 17, 2208–2218. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2008.03718.x>
- Rejestr Środków Ochrony Roślin. MRiRW, aktualizacja z dnia 24.07.2024, <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/rejestr-rodkow-ochrony-roslin>
- Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2022/1192 z dnia 11 lipca 2022 r. ustanawiające środki w celu zwalczania i zapobiegania rozprzestrzenianiu się *Globodera pallida* (Stone) Behrens i *Globodera rostochiensis* (Wollenweber) Behrens. [on-line], https://data.europa.eu/eli/reg_impl/2022/1192/oj, [dostęp: 20.08.2024].
- Scholte K., Vos J. (2000) Effect of potato used as a trap crop on potato cyst nematodes and other soil pathogens and on the growth of a subsequent main potato crop. *Ann. App. Biol.* 136, 229–238. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00047.x>
- Scholte K. (2000). Growth and development of plants with potential use as trap crops for potato cyst nematodes and their effects on the numbers of juveniles in cysts. *Ann. App. Biol.* 137, 31–42.
- Schomaker C.H., Been T.H. (1999) A model for infestation foci of potato cyst nematodes *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. *Phytopathol.* 89, 583–590. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1999.89.7.583>
- Schultz L., Cogan N.O.I., Mclean K., Dale M.F.B., Bryan G.J., Forster J.W., Slater A.T. (2012) Evaluation of a potential diagnostic molecular marker for H1-conferred potato cyst nematode resistance in potato (*Solanum tuberosum* L.). *Plant Breeding* 131(2), 315–321. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.2012.0949.x>
- Seenivasan N. (2017) Status of potato cyst nematodes, *Globodera* spp. infection on potato at Kodaikanal hills of Tamil Nadu, India and yield loss estimation. *J. Entomol. Zool. Studies* 5(5), 268–272. <https://www.entomoljournal.com/archives/2017/vol5issue5/PartD/5-4-102-943.pdf>
- Skantar A.M., Handoo Z.A., Carta L.K., Chitwood D.J. (2007) Morphological and molecular identification of *Globodera pallida* associated with potato in Idaho. *J. Nematol.* 39, 133–144. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2586493/>
- Spychalla P., De Jong. (2024) Breeding for potato cyst nematode resistance in *Solanum tuberosum*. *Crop Sci.* 64, 1167–1182. <https://doi.org/10.1002/csc2.21244>
- Szymczak-Nowak J., Malinowska E., Tyburski J., Rychcik B. (2007) Wpływ *Solanum sisymbriifolium* na ograniczanie populacji mątwika ziemniaczanego. *Progress Plant Prot.* 47 (4), 224–226. Identyfikator YADDA: bwmec-ta1.element.agro-article-22a4daa0-b3f3-47f8-9d2d-40bb5411785e
- Tobin J.D., Haydock P.P.J., Hare M.C., Woods S.R., Crump D.H. (2008) Effect of the fungus *Pochonia chlamydosporia* and fosthiazate on the multiplication rate of potato cyst nematodes (*Globodera pallida* and *G. rostochiensis*) in potato crops grown under UK field conditions. *Biological Control* 46, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2008.03.014>
- Trudgill D. L. (1967) The effect of environment on sex determination in *Heterodera rostochiensis*. *Nematologica*, 13 (2), 263–272. <https://doi.org/10.1163/187529267x00120>
- Turner S. (1996) Population decline of potato cyst nematodes (*Globodera rostochiensis*, *G. pallida*) in field soils in Northern Ireland. *Ann. App. Biol.* 129, 315–322. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1996.tb05754.x>
- Wilski A. (1955) Prace naukowo-badawcze przeprowadzone w Instytucie Ochrony Roślin nad mątwikiem ziemniaczanym (*Heterodera rostochiensis* Woll.) oraz obecny stan badań. *Postępy Nauk Rolniczych* 71, A-2, 337–341.
- Wollenweber H.W. (1923) Krankheit und Beschädigungen der Kartoffel. *Arbeiten des Forschungsinstitutes für Kartoffelbau*, 7, 52.
- Zanbouri B.P., Fatemy S. (2014) Two methods of evaluating bionematicide effects of *Mentha pulegium* and *Lepidium sativum* on hatching of *Globodera rostochiensis*. Conference paper. *Aspects App. Biol.* 126, 133–137.
- Zawiślak K., Rzeszutek I., Tyburski J. (1988a). The upper limit for the frequency of potatoes growing in rotations in northern Poland. International Conference on Effects of Crop Rotation on Potato Production in the Temperate Zones, August 14-19, 1988, Wageningen, The Netherlands, 65–76.
- Zawiślak K., Tyburski J. and Rychcik B. (1988b). Significance of crop rotation and cultivars resistant to potato cyst nematode on potato production. International Conference on Effects of Crop Rotation on Potato Production in the Temperate Zones, August 14-19, 1988, Wageningen, The Netherlands, 111–120.
- Zawiślak K., Rzeszutek I., Sowa S., Gronowicz Z., Tyburski J. (1989) Zwalczanie mątwika ziemniaczanego za pomocą płodozmianu i odpornych odmian ziemniaka. Wyd. II poprawione i uzupełnione. Wyd. ART. w Olsztynie, 52.
- Zimmerman H. (1914) Bericht der Hauptstelle für Pflanzenschutz in Mecklenburg-Schwerin und Mecklenburg-Strelitz für das Jahr 1913, Rostock, 73–75.

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, należąca 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, ryżyk 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 zależny jest 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

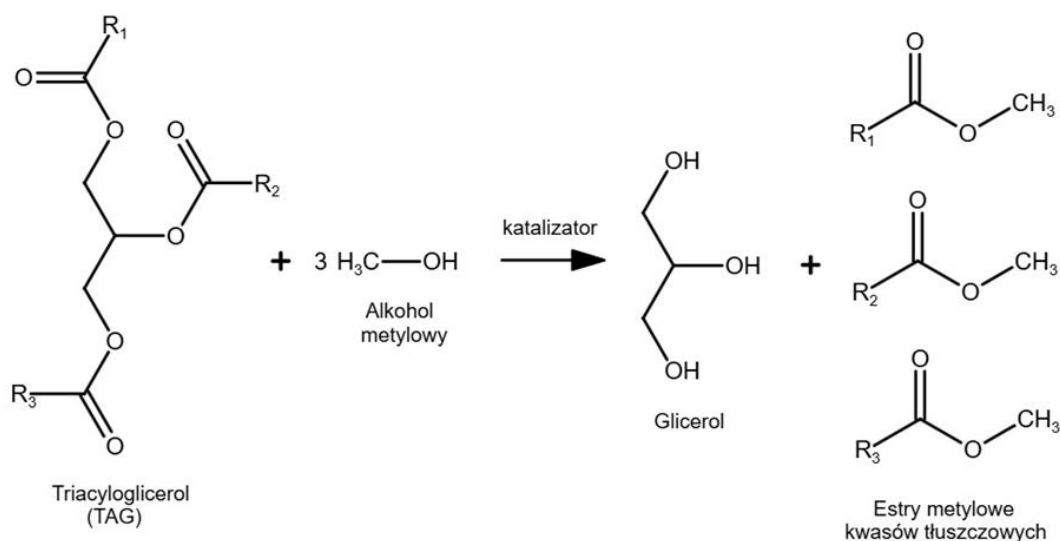
paliwem będą występowały problemy z uruchamianiem zimnego silnika. Olej rzepakowy oraz inne oleje roślinne nie nadają się bezpośrednio do zasilania silników z zapłonem samoczynnym, zarówno czyste jak i ich mieszanki z olejem napędowym. Wynika to z wyżej wymienionych problemów oraz różnic we właściwościach 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 wysokoprężnych 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 CO₂), dekarbonylacja (powstanie CO i H₂O), uwodornienie oraz hydroodtlenianie (powstanie H₂O). 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 [kg·m ⁻³]	775-785	885	835
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm ² ·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 [MJ·kg ⁻¹]	44	37,5	42,7
Wartość opałowa [MJ·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 [mg·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 hydorafinatów do poziomu poniżej 5 mg·kg⁻¹. Zauważono, że zawartość n-parafin w hydorafinacie 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 hydorafinatu z udziałem oleju lniankowego były około 1 °C wyższe niż dla hydorafinatu z udziałem oleju rzepakowego. Jest to najprawdopodobniej spowodowane większą zawartością cięższych kwasów tłuszczowych w oleju lniankowym. Dodatkowo stwierdzono większe zapotrzebowanie na wódór 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% (Malewska 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. Lnianka jest obiecującą rośliną o potencjałe 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 NOx, 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., Orliński 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>
- Urbaniak 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>

Sztuczna inteligencja w pracy naukowej w rolnictwie i ogrodnictwie: możliwości, ograniczenia, perspektywy

Krystyna Rybka 

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy

 k.rybka@ihar.edu.pl

Jeszcze kilka lat temu sztuczna inteligencja (AI) wydawała się narzędziem zarezerwowanym dla specjalistów IT, firm technologicznych czy przemysłu 4.0. Dziś coraz częściej pojawia się także w pracy naukowców, również w instytutach badawczych związanych z rolnictwem, ogrodnictwem i biotechnologią roślin. Narzędzia oparte na AI wspierają analizę danych, pisanie tekstów, przeszukiwanie literatury, planowanie eksperymentów i tworzenie materiałów dydaktycznych. Nie są one jednak wyrocznią – lecz nowym, elastycznym i niezwykle potężnym narzędziem warsztatu naukowca.

Ponieważ już wielokrotnie dzieliłam się z Czytelnikami Biuletynu IHAR najnowszą specjalistyczną wiedzą w postaci artykułów przeglądowych (Rybka i Nita 2014; Rybka 2018; Rybka 2023), pozwalam sobie na przekazanie doświadczeń i przemysłów dotyczących sztucznej inteligencji, by pokazać jej praktyczne zastosowania w pracy badawczej w dziedzinie nauk rolniczych oraz podzielić się refleksjami nad szansami i zagrożeniami związanymi z jej stosowaniem. Dzielę się tą wiedzą w formie listu do Redakcji, gdyż zdobyłam ją w ciągu ostatniego roku - dwóch, z ogólnodostępnych zasobów internetowych. Podnoszę problem w formie refleksji, gdyż im większa dostępność narzędzi AI, tym ważniejsze stają się pytania o sposób ich wykorzystania.

Na rynku dostępnych jest dziesiątki narzędzi opartych na AI, jednak tylko część z nich znajduje rzeczywiste zastosowanie w codziennej pracy badawczej. Wśród najczęściej używanych warto wymienić:

- **ChatGPT (OpenAI)** – wszechstronny model językowy, przydatny do pisania, streszczania, parafrazowania i planowania tekstów naukowych (przykładowy prompt: „Napisz wstęp do artykułu o... tym nad czym pracujemy”);
- **Gemini (Google)** – zintegrowany z wyszukiwarką Google i Google Docs, ułatwia generowanie treści i przeszukiwanie danych (np. „wyszukaj najnowsze publikacje o...”);

- **QuillBot i Grammarly** – narzędzia wspomagające poprawę stylu, parafrazowanie i korektę językową (np. „przepisz poniższy akapit w stylu naukowym, z zachowaniem sensu”). Grammarly sprawdza się doskonale jako inteligentny tezaurus, podpowiada lepsze słowa w kontekście zdania, nie tylko ich synonimy;
- **Scite.ai, Elicit, Semantic Scholar** – wyszukiwarki i asystenci do przeglądania literatury, oceny cytowań i generowania streszczeń (np. „what are recent findings on ...?”, „is this article cited supportively or critically?”);
- **Clarivate / Web of Science** – klasyczna platforma bibliometryczna wzbogacona o elementy AI do analizy cytowań i trendów publikacyjnych (np. „pokaż czasopisma z największym wpływem w dziedzinie fizjologii roślin”);
- **Perplexity AI** – szybki asystent do odpowiedzi opartych na źródłach (np. „czy oświetlenie czerwonym światłem wpływa na ekspresję genów plastydowych?”);
- **BenchSci, AlphaFold** – specjalistyczne narzędzia wspierające projektowanie eksperymentów biologicznych (np. „jakie przeciwciała najlepiej zastosować do wykrywania białka GLK1 w jęczmieniu?”).

W analizie i wizualizacji danych przydatne są również:

- **ChatGPT / Copilot (Excel)** – generowanie wykresów, zrozumiałych opisów statystyk (np. „zinterpretuj wyniki testu Tukeya dla trzech wariantów świetlnych”);
- **R / Python + AI Notebooks (np. w SciSpace)** – kod generowany automatycznie z opisem, np. do PCA, ANOVA, regresji (np. „przygotuj kod R do wykonania PCA na macierzy danych fenotypowych”);
- **Zotero + ZoteroGPT** – zarządzanie bibliografią wspomagane AI (np. „utwórz bibliografię w stylu APA na podstawie zgromadzonych źródeł dotyczących ...”).

Wymienione systemy działają na różnych zasadach – większość z nich, jak ChatGPT, operuje poprzez modelowanie języka naturalnego. Inne, jak **DeepSeek**, zostały zaprojektowane z odmienną architekturą poznawczą, opartą na konstruowaniu odpowiedzi na poziomie pojęciowym, a dopiero potem ich werbalizacji. Tego typu podejście może w przyszłości przybliżyć AI do sposobu rozumowania charakterystycznego dla ludzi. W pracy badawczej DeepSeek może być użyteczne m.in. w:

- formułowaniu hipotez koncepcyjnych bez językowego zawężenia (np. „zaproponuj koncepcyjne ujęcie wpływu stresu środowiskowego na epigenetykę roślin”);
- analizie złożonych zjawisk interdyscyplinarnych (np. „czy i jakie powiązania istnieją między zmianami klimatycznymi a regeneracją roślin w warunkach *in vitro*?”);
- generowaniu definicji i ram pojęciowych (np. „zdefiniuj pojęcie ‘morfogenezy indukowanej światłem’ w kontekście kultur komórkowych”);
- próbie tworzenia modeli myślowych, zanim zostaną one zapisane w języku naturalnym.

To narzędzie jest nadal rozwijane i rzadziej dostępne publicznie niż inne wspomniane systemy, ale stanowi interesujący kierunek przyszłych zastosowań.

Każdy z etapów pracy naukowej może być wspierany przez AI:

- 1) **Formułowanie pytań badawczych i przegląd literatury** AI może pomóc w identyfikacji luk badawczych, wygenerowaniu propozycji pytań badawczych oraz przeszukiwaniu literatury (Elicit, Scite.ai).
- 2) **Projektowanie eksperymentów i analiza danych** AI może zasugerować strukturę eksperymentu, wskazać potencjalne zmienne lub proponować metody statystyczne (ChatGPT, BenchSci). Może również wspierać interpretację wyników oraz ich wizualizację (Copilot, Python + AI).
- 3) **Pisanie i edycja manuskryptu** AI pozwala przyspieszyć proces pisania: generuje propozycje wstępów, podsumowań, wersji roboczych streszczeń (ChatGPT, Gemini), pomaga w parafrazowaniu (QuillBot) i korekcie językowej (Grammarly).

Przygotowanie publikacji i komunikacja naukowa AI może przekształcić tekst do formatu wy-

maganego przez czasopismo, opracować wersję popularnonaukową lub prezentację multimedialną (SciSpace, Copilot, Gemini).

Szanse i ograniczenia

AI może istotnie zwiększyć efektywność pracy naukowej, przyspieszyć przetwarzanie informacji, pomóc uporządkować tekst, wesprzeć analizę danych. Jej największym atutem jest dostępność, elastyczność i szybkość reakcji. Jednak korzystanie z AI wymaga krytycznego myślenia:

- AI nie zastępuje wiedzy eksperckiej ani nie ponosi odpowiedzialności za treść;
- może generować błędy (tzw. halucynacje);
- wymaga weryfikacji źródeł i faktów;
- nie zastępuje pracy twórczej, może ją inspirować i porządkować.

Podsumowanie

Sztuczna inteligencja nie rozwiąże za nas problemów badawczych, ale może stać się inteligentnym i wygodnym partnerem w pracy naukowej. Kluczowe jest nie tylko opanowanie technicznych aspektów korzystania z AI, ale również rozwój kompetencji refleksyjnych i etycznych, umiejętność zadawania właściwych pytań, oceny jakości generowanych treści oraz odpowiedzialnego wykorzystania technologii. Przyszłość nauki nie polega na zastąpieniu człowieka przez maszynę, lecz na świadomej współpracy – także w dziedzinie rolnictwa i ogrodnictwa.

Post scriptum

Na zakończenie mojej refleksji na temat AI, jeszcze raz podkreślam, że korzystając z AI musimy:

- samodzielnie weryfikować fakty i cytowania;
- jasno rozróżniać własny wkład intelektualny od wygenerowanego;
- pamiętać, że AI nie ponosi odpowiedzialności prawnej ani etycznej za treść, to obowiązek autora;
- stosować AI zgodnie z zasadami transparentności i dobrych praktyk w publikacjach naukowych.

Sztuczna inteligencja nie powinna zastępować procesu myślenia naukowego. Im większe możliwości dają nam narzędzia, tym większa odpowiedzialność spoczywa na nas, którzy z nich korzystają.

Artificial Intelligence in Agricultural and Horticultural Research: Opportunities, Limitations, and Perspectives

Krystyna Rybka 

Institute of Plant Breeding and Acclimatization – National Research Institute (IHAR-PIB)

 k.rybka@ihar.edu.pl

Just a few years ago, artificial intelligence (AI) seemed like a tool reserved for IT specialists, technology companies, or the Industry 4.0 sector. Today, it increasingly finds its way into the work of researchers, including those in agricultural, horticultural, and plant biotechnology institutes. AI-powered tools support data analysis, writing, literature searches, experimental design, and the creation of teaching materials. However, these tools are not oracles—they are a new, flexible, and extremely powerful component of the scientific toolkit.

Having previously shared the latest expert knowledge in the form of review articles in the Bulletin of IHAR (Rybka & Nita, 2014; Rybka, 2018; Rybka, 2023), I now offer insights and reflections on artificial intelligence to illustrate its practical applications in agricultural sciences and to consider the opportunities and risks of its implementation. I present these reflections in the form of a Letter to the Editor, based on my experience over the past one to two years, using open-access online resources. The more accessible AI tools become, the more important it is to reflect on how we use them.

There are dozens of AI-based tools available on the market, but only some prove useful in daily research work. Among the most commonly used are:

- **ChatGPT (OpenAI)** – a versatile language model useful for writing, summarizing, paraphrasing, and planning scientific texts (example prompt: “Write an introduction to an article on... our current research topic”);
- **Gemini (Google)** – integrated with Google Search and Google Docs, it facilitates content generation and information retrieval (e.g., “find the latest publications on...”);
- **QuillBot and Grammarly** – tools for improving style, paraphrasing, and language editing (e.g., “rewrite the following paragraph in a scientific tone, maintaining the meaning”). Grammarly also serves effectively as an intelligent thesaurus, suggesting bet-

ter word choices in context, not just synonyms;

- **Scite.ai, Elicit, Semantic Scholar** – search engines and assistants for literature review, citation analysis, and abstract generation (e.g., “What are recent findings on ...?”, “Is this article cited supportively or critically?”);
- **Clarivate / Web of Science** – a classic bibliometric platform enhanced with AI elements for citation and trend analysis (e.g., “show the most influential journals in plant physiology”);
- **Perplexity AI** – a fast assistant for source-based answers (e.g., “does red light influence plastid gene expression?”);
- **BenchSci, AlphaFold** – specialized tools for designing biological experiments (e.g., “Which antibody is best suited for detecting GLK1 protein in barley?”).

AI also supports data analysis and visualization:

- **ChatGPT / Copilot (Excel)** – generating charts and readable statistical summaries (e.g., “interpret Tukey’s test results for three light variants”);
- **R / Python + AI Notebooks (e.g., SciSpace)** – automatically generated code with explanations for PCA, ANOVA, regression (e.g., “prepare R code to perform PCA on a phenotypic data matrix”);
- **Zotero + ZoteroGPT** – AI-assisted reference management (e.g., “generate an APA-style bibliography from collected sources on...”).

These systems function on different principles. Most, like ChatGPT, rely on natural language modeling. Others, such as DeepSeek, are based on a different cognitive architecture that constructs responses at a conceptual level before verbalizing them. This approach may bring AI closer to human-like reasoning in the future. In scientific research, DeepSeek can be useful for:

- formulating conceptual hypotheses without linguistic bias (e.g., “propose a conceptual framework on how environmental stress affects plant epigenetics”);

- analyzing complex interdisciplinary phenomena (e.g., “what are the connections between climate change and in vitro plant regeneration?”);
- generating definitions and conceptual frameworks (e.g., “define ‘light-induced morphogenesis’ in the context of cell cultures”);
- drafting mental models before articulating them in natural language.

While DeepSeek is still under development and less publicly available than other systems, it offers a promising direction for future research support.

Each stage of scientific work can be supported by AI:

- 1) **Formulating research questions and reviewing literature** AI can help identify research gaps, generate questions, and search the literature (Elicit, Scite.ai).
- 2) **Designing experiments and analyzing data** AI can suggest experimental structures, highlight potential variables, and propose statistical methods (ChatGPT, BenchSci). It can also assist with result interpretation and visualization (Copilot, Python + AI).
- 3) **Writing and editing manuscripts** AI accelerates the writing process: it generates drafts, introductions, summaries, and abstracts (ChatGPT, Gemini), helps with paraphrasing (QuillBot), and improves language quality (Grammarly).
- 4) **Preparing publications and communicating science** AI can format text according to journal requirements, create outreach versions, or prepare multimedia presentations (SciSpace, Copilot, Gemini). Przygotowanie publikacji i komunikacja naukowa AI może przekształcić tekst do formatu wymaganego przez czasopismo, opracować wersję popularnonaukową lub prezentację multimedialną (SciSpace, Copilot, Gemini).

Opportunities and limitations

AI can significantly enhance research efficiency, accelerate information processing, organize text, and support data analysis. Its key strengths are accessibility, flexibility, and response speed. However, its use requires critical thinking:

- AI does not replace expert knowledge and carries no responsibility for content;
- it can generate errors (known as hallucinations);
- it requires verification of sources and facts;
- it does not replace creativity but can inspire and organize it.

Conclusion

Artificial intelligence will not solve research problems for us, but it can be an intelligent and convenient partner in scientific work. Mastering not only technical aspects but also reflective and ethical skills is crucial. Researchers must learn to ask the right questions, assess the quality of generated content, and use AI responsibly. The future of science lies not in replacing humans with machines, but in conscious cooperation—also in agriculture and horticulture.

Post scriptum

To conclude this reflection on AI, I would like to emphasize once more that when using AI we must:

- verify facts and citations ourselves;
- clearly distinguish our own intellectual contribution from AI-generated content;
- remember that AI bears no legal or ethical responsibility—the author does;
- use AI in line with transparency and good scientific practice.

Artificial intelligence should not replace the scientific thinking process. The more powerful our tools become, the greater our responsibility as users.



BIULETYN
INSTYTUTU HODOWLI I AKLIMATYZACJI ROŚLIN
BULLETIN
OF PLANT BREEDING AND ACCLIMATIZATION INSTITUTE

NR 303/304 / 2025

LISTA RECENZENTÓW — 2025
LIST OF REVIEWERS—2025

Imię i nazwisko Recenzenta Reviewer first and last name	Afiliacja Affiliation
Monika Janaszek-Mańkowska	Instytut Inżynierii Mechanicznej, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Marta Jańczak-Pieniążek	Uniwersytet Rzeszowski
Witold Karnkowski	Państwowa Inspekcja Ochrony Roślin i Nasiennictwa
Włodzimierz Kita	Uniwersytet Przyrodnicze we Wrocławiu
Jacek Krzyżak	Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych w Katowicach
Krzysztof Matkowski	Uniwersytet Przyrodnicze we Wrocławiu
Bartosz Tomaszewski	Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy w Radzikowie
Anna Tratwal	Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy w Poznaniu
Józef Tyburski	Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
Grzegorz Żurek	Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy w Radzikowie



SPIS TREŚCI
TABLE OF CONTENTS

Autor / Tytuł Author / Title	Strony / Pages	
	od / from	do / to
Wspomnienie - Prof. dr hab. Mirosława Chrzanowska In Memory of: Prof. Dr. Hab. Mirosława Chrzanowska EWA ZIMNOCH-GUZOWSKA	3	5
From degradation to growth: intercropping insights Od degradacji do wzrostu: spostrzeżenia dotyczące współrzędnych upraw BEATA BARSZCZOWSKA, SHERIF IBRAHIM ABDEL-WAHAB, TAMER IBRAHIM ABDEL-WAHAB, EMAN IBRAHIM ABDEL-WAHAB, MAGDA BARSZCZOWSKA	7	18
Statistical analysis of seeds morphology and texture for interspecific similarity assessment across taxonomic levels Analiza statystyczna morfologii i tekstury nasion w celu oceny podobieństwa międzygatunkowego na różnych poziomach taksonomicznych SEWERYN LIPIŃSKI	19	33
Plonowanie i jakość ziarna pszenicy ozimej uprawianej w warunkach zróżnicowanego nawożenia azotem i siarką The yield and grain quality of winter wheat grown under conditions of differentiated ni-trogen and sulfur fertilization TOMASZ KNAPOWSKI, WOJCIECH KOZERA	35	41
Wirulencja izolatów <i>Puccinia triticina</i> wywołujących rdzę brunatną pszenicy w Polsce w 2023 roku Virulence of <i>Puccinia triticina</i> isolates causing wheat brown rust in Poland in 2023 MAGDALENA RADECKA-JANUSIK	43	46
Występowanie i sposoby ograniczania populacji mą-twika ziemniaczanego Occurrence and methods of reducing the population of yellow potato cyst nematode ANNA PODLEWSKA-PRZETAKIEWICZ	47	54
Z pola do dystrybutora - lnianka siewna (<i>Camelina sativa</i>) jako przyszłość polskich biopaliw? From field to tank - <i>Camelina sativa</i> as the future of Polish biofuels? MARCIN WALTER, TYMOTEUSZ DEC, KAMIL BANACH	55	67
Sztuczna inteligencja w pracy naukowej w rolnictwie i ogrodnictwie: możliwości, ograniczenia, perspektywy Artificial Intelligence in Agricultural and Horticultural Research: Opportunities, Limitations, and Perspectives KRYSTYNA RYBKA	69	70
	71	72