

## OCENA PRZYDATNOŚCI NAWOZOWEJ DOLISTNEJ APLIKACJI PRZELEWU POŻYWKI Z UPRAWY HYDROPONICZNEJ W NAWOŻENIU PSZENICY OZIMEJ

KINGA NORAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Katedra Biometrii, Instytut Rolnictwa, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie,  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa*

**Synopsis.** Badania miały na celu ocenę przydatności nawozowej dolistnej aplikacji odcieku pożywki pochodzącego zuprawy truskawek w substracie kokosowym z perlitem w nawożeniu pszenicy ozimej. Doświadczenie polowe przeprowadzono, stosując cztery warianty: jednorazową aplikację odcieku w dawce 2000 l·ha<sup>-1</sup> (I), czterokrotną aplikację odcieku 4x2000 l·ha<sup>-1</sup> (II), kontrolę bez nawożenia dolistnego (III) oraz komercyjny nawóz dolistny (IV). Stwierdzono, że zastosowanie odcieku istotnie różnicowało plonowanie i jakość ziarna. Najwyższą masę ziarna uzyskano w wariacie I (611 g·m<sup>-2</sup>), co było wynikiem istotnie wyższym od obiektu kontrolnego (513 g·m<sup>-2</sup>) oraz wariantu IV (556 g·m<sup>-2</sup>). W wariacie II, przy intensywnej aplikacji odcieku, odnotowano najniższy plon (469 g·m<sup>-2</sup>) oraz istotnie niższą zawartość glutenu mokrego (22,5%) w porównaniu do pozostałych wariantów (24,7–25,3%). Wskaźnik sedymentacyjny Zeleny'ego był najwyższy w wariantach I i III (36,2), przewyższając istotnie wariant II (32,6). Pomiary teledetekcyjne wykazały, że najwyższe wartości wskaźnika NDVI (0,58) osiągały rośliny w wariacie IV i III w fazie intensywnego wzrostu (początek maja), podczas gdy w wariacie II wartość ta była istotnie niższa (0,49). Wyniki potwierdzają potencjał recyklingu odcieków hydroponicznych w rolnictwie zrównoważonym, ograniczając zużycie nawozów mineralnych oraz presję środowiskową, jednak jego praktyczne wdrożenie wymaga precyzyjnego dawkowania, standaryzacji składu i stałego monitoringu właściwości gleby.

**Słowa kluczowe:** pszenica ozima, recykling pożywki, substrat kokosowy, uprawa truskawek, nawożenie dolistne, NDVI, plon ziarna, jakość ziarna, rolnictwo zrównoważone

### WSTĘP

Nawożenie dolistne jest coraz częściej uznawane za kluczowy czynnik w nowoczesnym rolnictwie precyzyjnym, szczególnie w kontekście zwiększania plonów i jakości zbóż, takich jak pszenica i kukurydza [Bärdaš i in. 2024]. Metoda ta ma dla roślin znaczenie, ponieważ nie tylko dostarcza niezbędnych składników pokarmowych w okresach ich zwiększonego zapotrzebowania, ale również stymuluje je do intensywnego wzrostu, wspomaga rozwój systemu korzeniowego oraz aktywuje kluczowe procesy metaboliczne. Nawozy dolistne skutecznie uzupełniają niedobory makro- i mikroelementów, zapewniając optymalny wzrost i produktywność roślin [Bärdaš i in. 2024]. W kontekście dążenia do gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), innowacyjnym podejściem do kwestii nawożenia dolistnego jest wykorzystanie jako roztworów nawozowych produktów ubocznych z systemów hydroponicznych, takich jak odcieki pożywki np. z uprawy truskawek.

<sup>1</sup>Adres do korespondencji – *Corresponding address:* kinga\_noras@sggw.edu.pl

Dynamiczny rozwój nowoczesnych technologii ogrodnich, w szczególności systemów bezglebowych, prowadzi do generowania znacznych ilości odcieków (wastewater) bogatych w składniki mineralne oraz materię organiczną [Richa i in. 2020]. W przypadku braku właściwego zagospodarowania stanowią one istotne zagrożenie dla środowiska, przyczyniając się do eutrofizacji wód powierzchniowych oraz degradacji jakości wód gruntowych [Dyśko i in. 2013, Richa i in. 2020]. Jednocześnie wpisują się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym, w której recykling pożywek hydroponicznych staje się kluczowym elementem zrównoważonego zarządzania zasobami, umożliwiając ograniczenie zużycia wody słodkiej oraz nawozów syntetycznych, a także zwiększenie bezpieczeństwa żywnościowego [Vandecasteele i in. 2023, Valentine i in. 2025].

Intensyfikacja produkcji ogrodnich, w tym hydroponicznej uprawy truskawek w podłożach z włókna kokosowego z dodatkiem perlitu, prowadzi do powstawania spływów pożywkowych o wysokiej koncentracji makro- i mikroelementów, takich jak azot (N), fosfor (P), potas (K), wapń (Ca), magnez (Mg), bor (B), mangan (Mn), cynk (Zn), miedź (Cu) oraz żelazo (Fe) [Kopeć i in. 2020, Vandecasteele i in. 2023]. Mechanizm powstawania przelewów w podłożach inertnych (np. w substracie kokosowym) jest zbliżony dla różnych gatunków, jednak literatura wskazuje na znaczną zmienność składu chemicznego tych roztworów, która jest ściśle uzależniona od gatunku rośliny, fazy jej wzrostu oraz parametrów technicznych systemu fertygacyjnego [Richa i in. 2020]. Literatura wskazuje, że bezpośrednio odprowadzanie tych odcieków do środowiska może powodować poważne zaburzenia ekosystemów wodnych, natomiast ich ponowne wykorzystanie w rolnictwie stanowi efektywną strategię odzysku składników pokarmowych [Santos i in. 2021]. W badaniach wykazano, że recykling wody drenażowej może prowadzić do oszczędności na poziomie 35–54% czystych składników nawozowych [Richa i in. 2020], jednak istotnym ograniczeniem pozostaje duża zmienność składu chemicznego odcieków, uzależniona od gatunku rośliny, warunków uprawy oraz efektywności systemu fertygacyjnego, co utrudnia ich standaryzację jako nawozu [Santos i in. 2021, Valentine i in. 2025].

W kontekście upraw w gruncie ponowne wykorzystanie odcieków hydroponicznych wpisuje się w szersze podejście do recyklingu produktów ubocznych produkcji rolnej. Badania nad wykorzystaniem zużytych podłoży po uprawie grzybów czy innych materiałów organicznych potwierdzają zasadność zamykania obiegu składników odżywczych w agroekosystemach [Zeng i in. 2017, Vandecasteele i in. 2023]. Analogicznie, przelewy pożywek z produkcji truskawek, zawierające znaczne ilości N, P, K oraz kationów zasadowych, mogą stanowić wartościowe, komplementarne źródło składników pokarmowych dla roślin uprawnych, przyczyniając się do ograniczenia zależności od nawozów mineralnych [Kopeć i in. 2020, Valentine i in. 2025].

Szczególne znaczenie w tym kontekście ma pszenica ozima (*Triticum aestivum* L.), będąca jednym z najważniejszych gatunków rolniczych na świecie, o wysokich wymaganiach pokarmowych [Lazarov i in. 2019, Yang i in. 2025]. Plonowanie oraz jakość technologiczna ziarna, w tym zawartość białka i glutenu, są silnie uzależnione od precyzyjnego nawożenia, zwłaszcza azotowego. Wykazano, że optymalne dawki azotu w zakresie 145–175 kg·ha<sup>-1</sup> sprzyjają efektywnej produkcji biomasy oraz wysokiej wydajności fotosyntetycznej łąnu [Yang i in. 2025]. Jednocześnie niewłaściwe zarządzanie nawożeniem mineralnym prowadzi do strat składników pokarmowych, degradacji gleby oraz wzrostu emisji gazów cieplarnianych [Wójcik i in. 2014, Yang i in. 2025]. Z tego względu coraz większe znaczenie przypisuje się integrowaniu nawożenia organicznego i mineralnego, które wspiera aktywność mikrobiologiczną gleby i poprawia dostępność składników odżywczych, szczególnie w warunkach gleb lekkich [Káš i in. 2016, Buragienė i in. 2024].

Pomimo licznych korzyści, wykorzystanie odcieków hydroponicznych w nawożeniu upraw polowych wiąże się z istotnymi wyzwaniami agronomicznymi i środowiskowymi. Kluczowym problemem pozostaje złożona dynamika składników odżywczych, w tym występowanie antagonizmów kationowych (np. K–Ca–Mg), które mogą ograniczać ich pobieranie przez rośliny [Wójcik i in. 2014, Santos i in. 2021]. Dodatkowo istnieje ryzyko nadmiernego zasolenia gleby oraz akumulacji jonów potencjalnie toksycznych, co może negatywnie wpływać na wzrost roślin

i właściwości fizykochemiczne gleby [Kopeć i in. 2020, Santos i in. 2021]. W związku z tym efektywne wykorzystanie tego typu źródeł nawożenia wymaga wdrożenia zintegrowanych strategii zarządzania, obejmujących precyzyjne dawkowanie, fertygację – w tym systemy kropłowe – oraz ciągły monitoring parametrów gleby i roztworu glebowego [Wójcik i in. 2014, Richa i in. 2020, Bonelli i in. 2024].

W literaturze podkreśla się również znaczenie praktyk wspomagających efektywność wykorzystania składników odżywczych, takich jak stosowanie ściółki ze słomy czy dodatków węglowych (np. biowęgla), które poprawiają retencję wody i składników pokarmowych oraz stabilizują właściwości gleby [Vandecasteele i in. 2023, Yang i in. 2025]. Długoterminowe stosowanie pożywek (odcieków) z systemów hydroponicznych wymaga podejścia adaptacyjnego, uwzględniającego zmienność warunków środowiskowych oraz konieczność bieżącej kontroli zasobności gleby i poziomu zasolenia [Santos i in. 2021, Valentine i in. 2025].

Głównym celem badań było określenie wpływu zastosowania odcieku pożywki, generowanego podczas fertygacji truskawki uprawianej w systemach rynnowych pod osłonami (substrat kokosowy), na plonowanie oraz jakość technologiczną ziarna pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.). Badania miały na celu weryfikację przydatności tego produktu ubocznego jako alternatywnego źródła makro- i mikroelementów w porównaniu do obiektu kontrolnego (brak dodatkowego nawożenia dolistnego) oraz wariantu z zastosowaniem komercyjnego nawozu dolistnego. Istotnym elementem celu była również analiza dynamiki stanu fizjologicznego łanu z wykorzystaniem wskaźników wegetacyjnych (NDVI) wyznaczonych metodami teledetekcji satelitarnej i naziemnej analizy spektralnej. Doświadczenie służyło do oceny możliwości zagospodarowania odcieków hydroponicznych w kontekście wdrażania zasad gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) i redukcji zapotrzebowania na syntetyczne nawozy mineralne.

Główna hipoteza badawcza zakłada, że odciek pożywki z uprawy truskawek, bogaty w składniki mineralno-organiczne, może być skutecznie wykorzystany jako nawóz dolistny w uprawach polowych, nie wpływając negatywnie na wielkość i jakość plonu pszenicy ozimej.

## MATERIAŁ I METODY

Doświadczenie polowe przeprowadzono w sezonie wegetacyjnym w 2024 roku w gospodarstwie rolnym w miejscowości Jerwonice (województwo łódzkie), zlokalizowanym na Wysoczyźnie Łaskiej w centralnej Polsce. Teren badań charakteryzuje się lekko falistą rzeźbą oraz średnią wysokością około 200 m n.p.m., co sprzyja typowej dla regionu produkcji rolniczej. Warunki klimatyczne obszaru mają charakter umiarkowany przejściowy, z roczną sumą opadów wynoszącą 550–600 mm oraz średnią temperaturą roczną na poziomie 7–8°C. Gleby na terenie doświadczenia reprezentowane są głównie przez gleby brunatne wylugowane oraz czarne ziemie zdegradowane, występujące w mozaice kompleksów przydatności rolniczej 2, 4, 5 i 6.

Początek 2024 roku charakteryzował się łagodną zimą, podwyższonymi temperaturami oraz brakiem trwałej pokrywy śnieżnej, co sprzyjało wcześniejszemu rozpoczęciu wegetacji, ale zwiększało podatność roślin na późniejsze epizody chłodu. W marcu i kwietniu odnotowano wzrost temperatury (od ok. 6–8°C do 8–11°C) przy dużej zmienności dobowej i występowaniu przymrozków, stanowiących istotny czynnik stresu termicznego. Jednocześnie opady zmniejszyły się z ok. 40 mm w marcu do 32 mm w kwietniu, co sprzyjało pojawieniu się wczesnowiosennego stresu suszy. W maju i czerwcu temperatury wzrosły odpowiednio do 14–16°C i 18–21°C, przy okresowych upałach, natomiast niskie opady w maju pogłębiały deficyt wilgoci. W czerwcu wzrost opadów (60–80 mm) miał ograniczoną efektywność ze względu na ich nierównomierny, konwekcyjny charakter. Lipiec był najcieplejszy (20–23°C, epizody >30°C) i umiarkowanie wilgotny (70–100 mm), jednak burzowy charakter opadów powodował lokalne niedobory wody.

W efekcie w całym sezonie wegetacyjnym występowały okresy stresu termicznego i wodnego, szczególnie w fazach intensywnego wzrostu i dojrzewania roślin.

Jednoczynnikowe doświadczenie założono w układzie losowanych bloków z dwoma powtórzeniami z pszenicą ozimą odmiany Bataja, na których wyznaczono siatkę poletek badawczych na podstawie map glebowo-rolniczych oraz danych ortofotomapowych. Na każdym z pól założono doświadczenie w czterech wariantach nawożeniowych:

- Wariant I: aplikacja odcieku pożywki w dawce 2000 l·ha<sup>-1</sup>,
- Wariant II: aplikacja odcieku pożywki w czterech dawkach po 2000 l·ha<sup>-1</sup> (łącznie 8000 l·ha<sup>-1</sup>),
- Wariant III (kontrola): brak aplikacji odcieku pożywki (0 l·ha<sup>-1</sup>),
- Wariant IV: zastosowanie komercyjnego nawozu dolistnego PLONVIT® ZBOŻA zgodnie z zaleceniami producenta (1 l·ha<sup>-1</sup>).

Na wszystkich poletkach wykonano jednolite nawożenie przedsiewne saletrą amonową ZAKSAN (33,5% N) w łącznej dawce 300 kg·ha<sup>-1</sup>, aplikowaną w dwóch równych dawkach. Odciek pożywki, wykorzystywany w wariantach I i II, pochodził z systemu nawadniania truskawek prowadzonych w uprawie tunelowej w podłożu substratowym, gdzie stosowano zbilansowaną pożywkę bogatą w mikro- i makroelementy. Harmonogram aplikacji nawozów dolistnych w doświadczeniu został skorelowany z fazami rozwojowymi pszenicy ozimej według skali BBCH. Pierwszy zabieg, wykonany 20 kwietnia 2024 r. w wariantach I, II (pierwsza dawka) oraz IV (PLONVIT®), przypadał na fazę BBCH 30–31, czyli początek strzelania w źdźbło. Kolejne dawki w II wariantach stosowano co 14 dni, tj. drugi zabieg przeprowadzono 4 maja 2024 r., w fazie BBCH 32–37, obejmującej okres od drugiego kolanka do rozwoju liścia flagowego, trzeci zabieg wykonano 18 maja 2024 r. w fazie BBCH 39–49, obejmującej rozwój liścia flagowego do początku kłoszenia. Ostatni zabieg w wariantach I i II przeprowadzono 1 czerwca 2024 r., w fazie BBCH 51–59, czyli podczas kłoszenia.

W każdym wariantach zastosowano losowy dobór 20 punktów badawczych, w których prowadzono szczegółowe pomiary np. spektrometryczne z wykorzystaniem urządzenia ScanSpectrum v4, a także wykonano zbiór metrówki dla oceny plonu i cech jakościowych ziarna. Próby do badań pobierano wielokrotnie w trakcie sezonu wegetacyjnego zgodnie z metodyką pobierania próbek reprezentatywnych dla powierzchni badawczej. Wszystkie próbki gleby, pożywki nawozowej oraz odcieku przekazywano do akredytowanego laboratorium analitycznego w celu wykonania oznaczeń fizykochemicznych. W próbkach oznaczano pH, przewodność elektryczną (EC) oraz zawartość makro- i mikroelementów, w tym m.in. N-NO<sub>3</sub>, N-NH<sub>4</sub>, P, K, Ca, Mg, S-SO<sub>4</sub> oraz Fe, Mn, Zn, Cu i B. Równolegle w warunkach polowych wykonywano pomiary wilgotności gleby, pH oraz zasolenia podłoża.

Na wszystkich poletkach prowadzono wizualną ocenę roślin oraz pomiary teledetekcyjne z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych i przenośnego spektrofotometru ScanSpectrum v4, co umożliwiło ocenę kondycji fizjologicznej pszenicy. Wyniki tych pomiarów wykorzystywano do identyfikacji różnic pomiędzy wariantami nawożenia oraz określenia potencjalnych stresów środowiskowych.

Na końcu sezonu przeprowadzono ocenę plonowania poprzez ręczny zbiór prób z wyznaczonych poletek oraz oznaczenie masy i jakości ziarna. Uzyskane dane zestawiono z wynikami analiz chemicznych gleby, pożywki i odcieku, co pozwoliło na ocenę wpływu zastosowanych wariantów nawożenia na rozwój i plonowanie pszenicy ozimej.

Skład zastosowanego odcieku charakteryzował się m.in. odczynem pH 6,27, przewodnością elektryczną EC 1,17 mS·cm<sup>-1</sup>, oraz obecnością takich składników jak azot (89 mg·dm<sup>-3</sup> N-NO<sub>3</sub>), fosfor (24 mg·dm<sup>-3</sup> P), potas (95 mg·dm<sup>-3</sup> K), wapń (82 mg·dm<sup>-3</sup> Ca), magnez (17 mg·dm<sup>-3</sup> Mg), a także mikroelementy, w tym żelazo, mangan, cynk, miedź i bor. W przypadku wariantu IV zastosowano dolistny nawóz PLONVIT® ZBOŻA, zawierający azot całkowity (5,0%), tlenek magnezu (2,0%), tritlenek siarki (6,5%) oraz pełen zestaw mikroelementów w formach łatwo przyswajalnych przez rośliny. Technologia NUTRIBOOST™ zawarta w nawozie umożliwia skuteczne pobieranie składników przez liście i sprzyja intensyfikacji procesów metabolicznych w roślinie.

W celu porównania efektywności nawożenia pochodzącego z zastosowanego odcieku pożywki oraz komercyjnego środka dolistnego PLONVIT® ZBOŻA, dokonano przeliczenia ilości dostarczanych składników pokarmowych na jednostkę powierzchni ( $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) w odniesieniu do rzeczywistych dawek aplikacyjnych. Tabela 1 zawiera zestawienie masy poszczególnych składników dostarczanych w ww. dawkach.

Tabela 1. Skład makro i mikroelementów w zastosowanych dawkach nawożenia dolistnego  
Table 1. The composition of macro- and micronutrients in the foliar fertiliser doses used

Składnik Component	PLONVIT® 1 l·ha <sup>-1</sup> (g·ha <sup>-1</sup> )	Odciek/Drainage 2000 l·ha <sup>-1</sup> (g·ha <sup>-1</sup> )	Odciek/Drainage 8000 l·ha <sup>-1</sup> (g·ha <sup>-1</sup> )
Azot/Nitrogen (N)	67,5	183,3	733,2
Magnez/Magnesium (Mg)	16,28	34	136
Siarka/Sulphur (S)	35,2	36	144
Bor/Boron (B)	0,54	0,8	3,2
Miedź/Copper (Cu)	5,4	0,04	0,16
Żelazo/Iron (Fe)	23	1,52	6,08
Mangan/Manganese (Mn)	23	1	4
Cynk/Zinc (Zn)	17	0,5	2
Fosfor/Phosphorus (P)	—	48	192
Potas/Potassium (K)	—	190	760
Wapń/Calcium (Ca)	—	164	656

Oceny plonu oraz parametrów jakościowych ziarna pszenicy dokonano w Katedrze Agromonii Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, z wykorzystaniem analizatora całego ziarna Infratec™ 1241. Urządzenie to, oparte na technologii bliskiej podczerwieni (NIR), umożliwia jednocześnie i szybkie oznaczanie wielu cech jakościowych ziarna, w tym zawartości białka, wilgotności, skrobi oraz glutenu mokrego. System pomiarowy Infratec™ 1241 wykorzystuje globalne kalibracje opracowane na podstawie wieloletnich baz danych, co zapewnia wysoką powtarzalność i wiarygodność wyników. Dodatkowo analizator pozwala na ocenę cech fizycznych ziarna, takich jak gęstość w stanie zsypanym.

W ramach analiz laboratoryjnych i polowych oceniano wybrane cechy struktury plonu, w tym liczbę kłosów, masę ziarna z jednostki powierzchni ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ), masę tysiąca ziaren, a także parametry jakościowe ziarna: zawartość białka, wilgotność, zawartość skrobi, udział glutenu mokrego, wartość wskaźnika sedymentacyjnego Zeleny'ego oraz gęstość ziarna ( $\text{kg}\cdot\text{hl}^{-1}$ ).

Ocena stanu roślinności na poletkach doświadczalnych została przeprowadzona z wykorzystaniem wskaźnika NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), obliczanego na podstawie obrazowań satelitarnych Sentinel-2 w ramach programu Copernicus Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA). System Sentinel-2, obejmujący dwa satelity (Sentinel-2A i Sentinel-2B), umożliwia systematyczne monitorowanie powierzchni Ziemi, w tym kondycji roślinności, użytkowania gruntów, gleb oraz zasobów wodnych. Dane te charakteryzują się wysoką rozdzielczością przestrzenną do 10 m w wybranych pasmach spektralnych, co pozwala na szczegółową analizę zróżnicowania przestrzennego upraw.

Do analizy wykorzystano pasma spektralne obejmujące zakres widzialny oraz bliską podczerwień: B2 (niebieskie), B3 (zielone), B4 (czerwone) oraz B8 (NIR – bliska podczerwień), które stanowią podstawę do wyznaczania wskaźnika NDVI. Wskaźnik ten obliczano według zależności:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

gdzie NIR oznacza odbicie promieniowania w zakresie bliskiej podczerwieni, natomiast RED – w zakresie czerwieni światła widzialnego. Wartości NDVI mieszczą się w przedziale od -1 do 1 i stanowią miarę intensywności aktywności fotosyntetycznej roślin oraz stopnia pokrycia terenu biomasą zieloną.

Interpretacja wskaźnika wskazuje, że wartości w zakresie 0,2–0,5 odpowiadają roślinności słabej lub umiarkowanej, natomiast przedział 0,5–0,9 świadczy o bujnej i zdrowej roślinności. Wartości poniżej 0,2 odnoszą się do powierzchni pozbawionych roślinności lub gleby odsłoniętej. Analizy przeprowadzono dla wszystkich wariantów doświadczenia w kolejnych terminach wegetacyjnych, a wyniki przedstawiono w formie średnich wartości NDVI.

Porównania statystyczne średnich przeprowadzono z wykorzystaniem jednoczynnikowej analizy wariancji i porównań wielokrotnych procedurą Tukeya przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ . W analizie statystycznej zastosowano również metody korelacyjne oraz analizę głównych składowych (PCA) w celu określenia zależności pomiędzy wskaźnikiem NDVI, parametrami plonowania oraz cechami jakości ziarna pszenicy. Współczynniki korelacji Pearsona wykorzystano do oceny siły i kierunku zależności liniowych pomiędzy zmiennymi. Następnie PCA pozwoliła na redukcję wymiarowości danych oraz identyfikację głównych czynników różnicujących badane warianty doświadczenia. Obie metody zastosowano w celu kompleksowej oceny relacji pomiędzy stanem roślinności, a finalnymi cechami plonu. Analizę statystyczną wykonano przy pomocy pakietu statystycznego R z zastosowaniem bibliotek *agricolae* (procedura *aov* i *HSD.test*), *stats* (procedura *cor* i *prcomp*).

## WYNIKI BADAŃ

Uzyskane wyniki wskazują na zróżnicowanie badanych wariantów pod względem plonowania oraz jakości ziarna (tab. 2), jednak zakres tych różnic był zróżnicowany w zależności od analizowanej cechy i nie zawsze potwierdzony statystycznie ( $p \leq 0,05$ ).

W przypadku składowych plonu nie stwierdzono istotnych różnic w liczbie kłosów na jednostce powierzchni, mimo że najwyższą wartość odnotowano w wariantcie I (400 szt.·m<sup>-2</sup>), a najniższą w wariantcie II (324 szt.·m<sup>-2</sup>). Odmienną sytuację zaobserwowano dla masy ziarna, gdzie wykazano istotne zróżnicowanie pomiędzy wariantami. Najwyższą wartość uzyskano w wariantcie I (611 g·m<sup>-2</sup>), istotnie przewyższającą warianty III i IV (513–556 g·m<sup>-2</sup>) oraz wariant II (469 g·m<sup>-2</sup>). Najniższe wartości tych parametrów uzyskano w II wariantcie, co potwierdza jego słabszy potencjał plonotwórczy. Masa tysiąca ziaren była stosunkowo wyrównana pomiędzy wariantami (42,3–43,6 g) i nie wykazała istotnych różnic statystycznych, co świadczy o niewielkim wpływie zastosowanych czynników na tę cechę.

Pod względem cech jakościowych ziarna nie stwierdzono istotnych różnic w zawartości białka, wilgotności oraz skrobi. Najwyższą zawartość białka odnotowano w wariantcie kontrolnym (III – 11,7%), a najniższą w wariantcie II (10,8%). Zawartość skrobi była zbliżona we wszystkich obiektach i mieściła się w zakresie 68,1–69,2%, przy czym nieznacznie wyższy poziom stwierdzono również w wariantcie kontrolnym.

Istotne zróżnicowanie wykazano natomiast w przypadku zawartości glutenu mokrego. Najniższy poziom tej cechy odnotowano w wariantcie II (22,5%), który był istotnie niższy w porównaniu do wariantów I, III i IV (24,7–25,3%). Wskazuje to na pogorszenie właściwości technologicznych ziarna w tym obiekcie. Podobną zależność zaobserwowano dla wskaźnika se-

Tabela 2. Średnie dla plonu, składowych plonu i cech jakościowych ziarna  
Table 2. Averages for yield, yield components and grain quality characteristics

Obiekt Object	Liczba kłosów Number of ears (szt. $\cdot$ m <sup>-2</sup> /pcs $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	Masa ziarna Grain weight (g $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	Masa 1000 ziaren 1000-grain weight (g)	Białko Protein (%)	Wilgotność Moisture (%)	Skrobia Starch (%)	Gluten mokry Wet gluten (%)	Zeleny	Gęstość Density (kg $\cdot$ hl <sup>-1</sup> )
I wariant/ I variant	400 a	611 c	43,6 a	11,5 a	12,9 a	69,1 a	24,7 b	36,2 b	81,9 a
II wariant/ II variant	324 a	469 a	42,3 a	10,8 a	13,0 a	68,9 a	22,5 a	32,6 a	79,1 a
III wariant K/ III variant K	311 a	513 b	43,5 a	11,7 a	12,9 a	69,2 a	25,3 b	36,2 b	82,2 a
IV wariant/ IV variant	313 a	556 b	43,6 a	11,4 a	13,0 a	68,1 a	25,3 b	33,7 a	82,3 a

Poszczególne litery oznaczają jednorodną grupę średnich, wartości średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy  $\alpha = 0,05$ /  
Individual letters indicate homogeneous groups of means, mean values marked with the same letters do not differ significantly at  $\alpha = 0,05$

dymentacyjnego Zeleny'ego, gdzie warianty I i III (36,2) charakteryzowały się istotnie wyższymi wartościami niż warianty II i IV (32,6–33,7), co może świadczyć o korzystniejszych parametrach jakościowych białka w tych obiektach.

W przypadku gęstości ziarna nie wykazano istotnych różnic statystycznych pomiędzy wariantami, mimo że wartości mieściły się w stosunkowo szerokim zakresie od 79,1 do 82,3 kg·hl<sup>-1</sup>. Najniższą gęstość uzyskano w wariacie II, natomiast najwyższą w wariacie IV, co może wskazywać na lepsze wykształcenie i dorodność ziarna w tym ostatnim obiekcie.

Wariant I wyróżniał się najwyższym poziomem plonowania, co zostało potwierdzone statystycznie w przypadku masy ziarna, natomiast wariant II charakteryzował się najniższymi wartościami zarówno w zakresie plonu, jak i wybranych cech jakościowych. Wariant kontrolny (III) oraz wariant IV wykazywały korzystne parametry jakościowe, szczególnie w odniesieniu do zawartości glutenu oraz wskaźnika Zeleny'ego, co wskazuje na ich potencjalnie lepszą przydatność technologiczną.

Interpretacja wskaźnika NDVI wskazuje, że wartości w zakresie 0,2–0,5 odpowiadają roślinności słabej lub umiarkowanej, natomiast przedział 0,5–0,9 świadczy o bujnej i zdrowej roślinności. Wartości poniżej 0,2 odnoszą się do powierzchni pozbawionych roślinności lub gleby odsłoniętej. Analizy przeprowadzono dla wszystkich wariantów doświadczenia w kolejnych terminach wegetacyjnych, a wyniki przedstawiono w formie średnich wartości NDVI (tab. 3).

Tabela 3. Średnie wartości NDVI obliczonego na podstawie zdjęć satelitarnych z satelitów Sentinel-2 dla poszczególnych wariantów w poszczególnych terminach

Table 3. Average NDVI values calculated from Sentinel-2 satellite imagery for each variant on specific dates

Obiekt/Object	30.03.2024	29.04.2024	04.05.2024	14.05.2024	26.05.2024	15.06.2024
I wariant/I variant	0,39 a	0,56 a	0,53 ab	0,52 a	0,45 a	0,30 a
II wariant/II variant	0,40 a	0,55 a	0,49 a	0,51 a	0,44 a	0,29 a
III wariant K/III variant K	0,41 a	0,58 b	0,56 bc	0,56 b	0,49 b	0,32 a
IV wariant/IV variant	0,45 b	0,58 b	0,58 c	0,58 b	0,49 b	0,34 a

Poszczególne litery oznaczają jednorodną grupę średnich, wartości średnie oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie przy  $\alpha = 0,05$ /Individual letters indicate homogeneous groups of means, mean values marked with the same letters do not differ significantly at  $\alpha = 0,05$

Analiza wartości wskaźnika NDVI w kolejnych terminach pomiarowych wykazała istotne zróżnicowanie pomiędzy badanymi wariantami ( $p \leq 0,05$ ).

W początkowym terminie pomiarowym (30.03.2024) najwyższą wartość NDVI odnotowano w wariacie IV (0,45b), która była istotnie wyższa w porównaniu do pozostałych wariantów (I–III: 0,39–0,41a). W kolejnych pomiarach, przypadających na okres intensywnego wzrostu roślin (29.04–14.05.2024), utrzymywała się wyraźna przewaga wariantu IV oraz wariantu III. W dniu 29.04.2024 warianty III i IV (0,58b) osiągnęły wartości istotnie wyższe niż warianty I i II (0,55–0,56a). Podobną zależność stwierdzono 14.05.2024, gdzie warianty III i IV (0,56–0,58b) tworzyły jednorodną grupę o wyższych wartościach NDVI niż warianty I i II (0,51–0,52a).

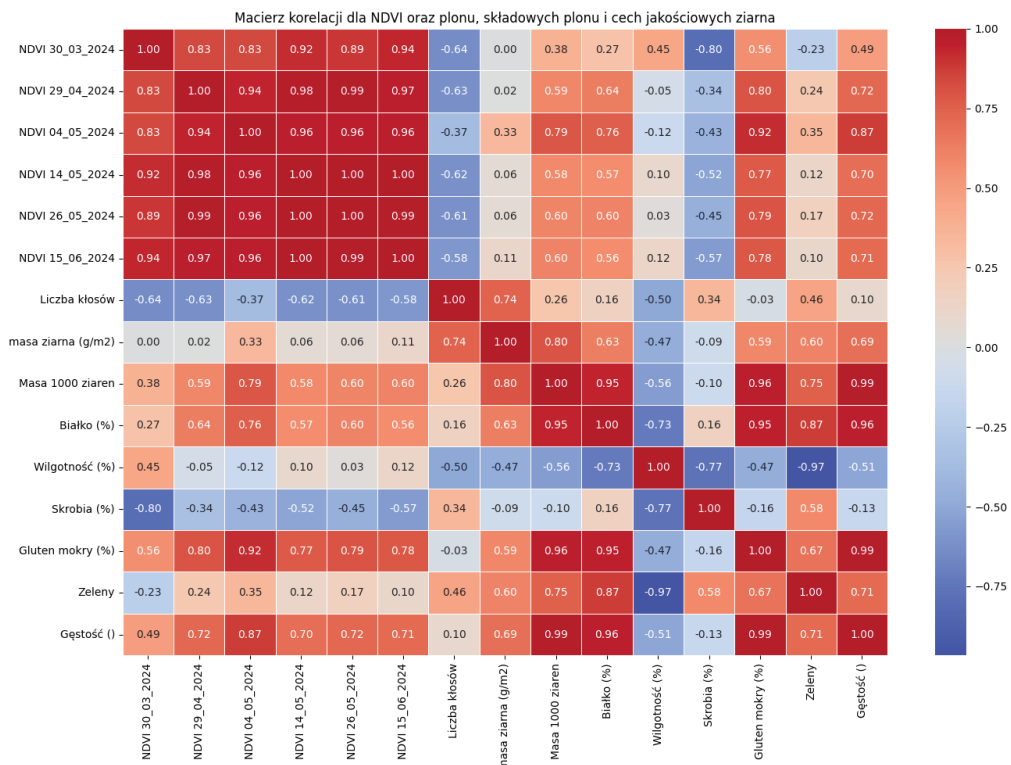
Największe zróżnicowanie pomiędzy wariantami zaobserwowano w dniu 04.05.2024. Wariant IV (0,58c) charakteryzował się istotnie najwyższą wartością NDVI, przewyższając zarówno wariant III (0,56bc), jak i wariant I (0,53ab) oraz II (0,49a). Wskazuje to na szczególnie korzystne warunki wzrostu i najwyższą aktywność fotosyntetyczną roślin w wariacie IV w tym okresie.

W późniejszym terminie (26.05.2024) wartości NDVI w wariantach III i IV (0,49b) pozostały istotnie wyższe niż w wariantach I i II (0,44–0,45a), co potwierdza utrzymującą się przewagę tych obiektów w zakresie kondycji roślin. Natomiast w ostatnim terminie pomiarowym

(15.06.2024) nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy wariantami, mimo że wartości NDVI były najniższe w całym okresie obserwacji (0,29–0,34). Spadek ten jest charakterystyczny dla końcowej fazy wegetacji pszenicy i związany jest z procesem senescencji, obejmującym degradację chlorofilu oraz ograniczenie aktywności fotosyntetycznej.

Najwyższe i najczęściej istotnie wyższe wartości NDVI w całym okresie wegetacji uzyskano w wariantach IV, co świadczy o najlepszym stanie fizjologicznym roślin w tym obiekcie. Wariant III również charakteryzował się wysokimi wartościami wskaźnika, szczególnie w fazie intensywnego wzrostu, tworząc często jednorodną grupę z wariantem IV. Z kolei warianty I i II wykazywały istotnie niższe wartości NDVI w większości terminów, co może wskazywać na słabszą kondycję łąki i potencjalnie niższy poziom plonowania. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność wskaźnika NDVI oraz danych satelitarnych Sentinel-2 w monitorowaniu stanu upraw i ocenie efektywności zastosowanych wariantów agrotechnicznych.

W przeprowadzonej analizie korelacji określono zależności pomiędzy wskaźnikiem wegetacji NDVI, wyznaczonym na podstawie zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 w sześciu terminach (od marca do czerwca 2024 r.), a wybranymi cechami plonu oraz jakością ziarna pszenicy. Analiza obejmowała cztery warianty doświadczenia i została wykonana z wykorzystaniem współczynnika korelacji Pearsona, który pozwolił określić siłę oraz kierunek zależności liniowych pomiędzy zmiennymi (rys. 1).



Rys. 1. Współczynniki korelacji przedstawiające zależności pomiędzy wskaźnikami NDVI (dla 6 terminów) a parametrami plonu i jakości ziarna pszenicy

Fig. 1. Correlation coefficients illustrating the relationships between NDVI indices (for 6 time points) and wheat yield and grain quality parameters

Uzyskane wyniki wskazują, że wartości NDVI z wczesnych terminów (30.03–14.05) charakteryzowały się wysoką spójnością wewnętrzną, z korelacjami na poziomie  $r = 0,89–1,00$ , co świadczy o stabilnym rozwoju roślin w początkowych fazach wegetacji. W tym samym okresie zaobserwowano wyraźne dodatnie zależności pomiędzy NDVI, a parametrami jakościowymi ziarna. Najsilniejsze korelacje dotyczyły zawartości glutenu mokrego ( $r = 0,78–0,92$ ), wskaźnika Zeleny'ego ( $r = 0,70–0,77$ ), gęstości ziarna ( $r = 0,70–0,87$ ) oraz zawartości białka ( $r = 0,64–0,66$ ). Oznacza to, że wartości NDVI z faz intensywnego wzrostu i kłoszenia mogą być dobrym wskaźnikiem predykcyjnym jakości technologicznej ziarna.

W przypadku NDVI z późniejszych terminów (26.05 i 15.06) zależności z cechami jakościowymi nadal były obecne, jednak ich siła była nieco niższa. Mimo to utrzymywały się wysokie korelacje z glutenem mokrym ( $r = 0,87–0,96$ ) oraz gęstością ziarna ( $r = 0,70–0,71$ ), co może wskazywać na wpływ późniejszych warunków siedliskowych i stresowych na końcową jakość plonu.

Analiza wykazała również ujemne korelacje pomiędzy NDVI, a liczbą kłosów ( $r$  od  $-0,37$  do  $-0,64$ ), co może sugerować zjawisko kompensacji plonowania, polegające na większej biomase pojedynczych organów przy mniejszej obsadzie kłosów. Z kolei masa ziarna z jednostki powierzchni wykazywała jedynie umiarkowaną korelację z NDVI ( $r = 0,00–0,33$ ), przy czym najwyższą wartość odnotowano dla terminu 04.05.2024 ( $r = 0,33$ ), co wskazuje na ograniczoną, lecz istniejącą możliwość prognozowania plonu na podstawie NDVI.

Najsilniejsze zależności stwierdzono dla masy tysiąca ziaren, która była wyraźnie dodatnio skorelowana z NDVI, szczególnie w okresie 29.04–14.05 ( $r = 0,58–0,95$ ). Wskazuje to, że wskaźnik NDVI w tym okresie może być szczególnie użyteczny do oceny stopnia wypełnienia ziarna i jego dorodności.

Dodatkowo analiza cech jakościowych potwierdziła bardzo silne wzajemne powiązania pomiędzy zawartością białka, glutenu mokrego, wskaźnikiem Zeleny'ego, gęstością oraz masą tysiąca ziaren ( $r > 0,95$ ), co jest zgodne z biologicznymi zależnościami jakości ziarna pszenicy. Jednocześnie zawartość skrobi wykazywała silną korelację ujemną z białkiem i glutenem ( $r = -0,70$  do  $-0,80$ ), co potwierdza typową relację pomiędzy komponentami jakościowymi ziarna.

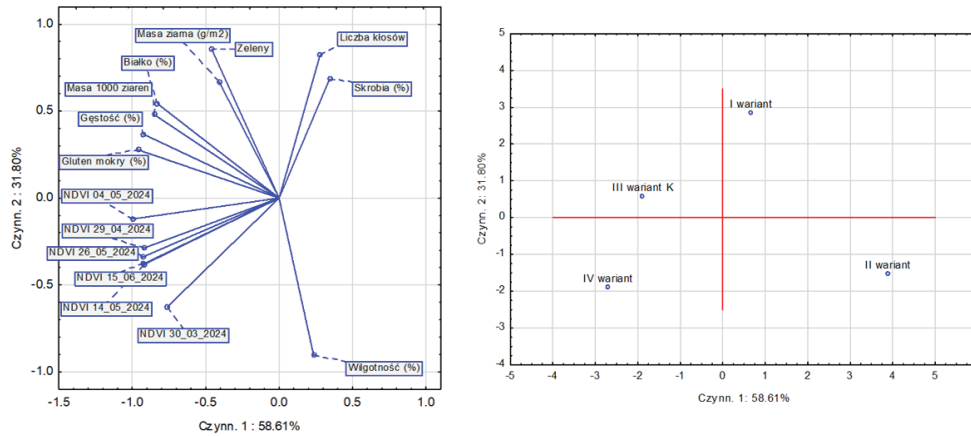
Podsumowując, najbardziej wartościowe prognostycznie okazały się wartości NDVI z przełomu kwietnia i maja, które najlepiej odzwierciedlały zarówno przyszłą jakość ziarna, jak i wybrane elementy struktury plonu. Wyniki wskazują, że NDVI może stanowić użyteczne narzędzie wspomagające ocenę potencjału plonotwórczego pszenicy, szczególnie w kluczowych fazach rozwojowych.

Analiza PCA (Principal Component Analysis) została zastosowana w celu redukcji wymiarowości danych obejmujących wskaźniki NDVI z różnych terminów oraz cechy plonowania i jakości ziarna pszenicy. Metoda ta umożliwiła identyfikację głównych kierunków zmienności w danych oraz ocenę, które zmienne w największym stopniu różnicują badane warianty doświadczenia (rys. 2).

Wyniki analizy wskazują, że pierwsza składowa główna (Czynn. 1 = PC1) jest silnie związana ze zmiennymi NDVI z poszczególnych terminów obserwacji i wykazuje z nimi ujemną korelację. Oznacza to, że PC1 można interpretować jako ogólny wskaźnik wigoru i intensywności wegetacji roślin w całym sezonie. Wyższe wartości NDVI odpowiadają niższym wartościom PC1, co potwierdza, że ta oś różnicuje obiekty głównie pod względem kondycji roślinności.

Druga składowa główna (Czynn. 2 = PC2) odpowiada przede wszystkim za zróżnicowanie cech plonotwórczych i jakościowych ziarna. Największy dodatni wpływ na PC2 miały liczba kłosów (0,82) oraz wskaźnik Zeleny'ego (0,86), natomiast silny wpływ ujemny wykazywała wilgotność ziarna ( $-0,90$ ). Oznacza to, że PC2 odzwierciedla przede wszystkim różnice w strukturze plonu oraz wybranych parametrach jakościowych.

Analiza rozmieszczenia wariantów na płaszczyźnie PC1–PC2 wykazała wyraźne zróżnicowanie obiektów. I wariant charakteryzował się wysoką wartością PC2 (2,84), co wskazuje na korzystne cechy jakościowe oraz dużą liczbę kłosów, przy jednocześnie umiarkowanych wartościach PC1, związanych z NDVI. II wariant osiągnął najwyższą wartość PC1 (3,90), co wskazuje



Rys. 2. Wykresy przedstawiające wyniki PCA, tj. powiązania między badanymi cechami oraz wielocechowe zróżnicowanie obiektów w układzie dwóch pierwszych składowych głównych  
 Fig. 2. Graphs illustrating the results of PCA, i.e. the relationships between the analysed features and the multi-feature variation of the objects in the first two principal component system

na najwyższą ogólną intensywność wegetacji i wysokie wartości NDVI, jednak jego niska wartość PC2 (-1,52) sugeruje słabsze parametry jakościowe ziarna. III wariant kontrolny charakteryzował się niską wartością PC1 (-1,88), co wskazuje na relatywnie słabszy rozwój wegetacyjny, przy jednoczesnym umiarkowanym poziomie PC2 (0,58), świadczącym o przeciętnych parametrach jakościowych. Natomiast IV wariant uzyskał najniższe wartości zarówno PC1 (-2,69), jak i PC2 (-1,90), co wskazuje na najslabszą kondycję roślin oraz najniższe parametry jakościowe ziarna spośród wszystkich analizowanych obiektów.

Podsumowując, analiza PCA wykazała wyraźne rozdzielenie zmiennych związanych z wigorem roślin (NDVI) oraz cechami jakościowo-plonotwórczymi, co potwierdza złożony charakter zależności pomiędzy kondycją łąnu, a finalnymi parametrami plonu. Wskazuje to również, że poszczególne warianty doświadczenia różnią się nie tylko poziomem wegetacji, ale także strukturą i jakością uzyskanego plonu.

## DYSKUSJA

Przeprowadzone badania wpisują się w aktualny nurt poszukiwania rozwiązań zgodnych z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym, w której szczególną rolę odgrywa ponowne wykorzystanie produktów ubocznych intensywnej produkcji ogrodniczej w celu odzysku biogenów i ochrony zasobów wodnych [Richa i in. 2020, Vandecasteele i in. 2023, Valentine i in. 2025]. Uzyskane wyniki pozwalają na pozytywną weryfikację przyjętej hipotezy badawczej, zakładającej możliwość efektywnego wykorzystania odcieku pożywki jako nawozu dolistnego bez negatywnego wpływu na plonowanie i jakość ziarna pszenicy ozimej. Literatura przedmiotu wskazuje, że dokarmianie dolistne jest skutecznym sposobem dostarczania składników pokarmowych w krytycznych fazach rozwoju, stymulującym procesy asymilacji CO<sub>2</sub> oraz poprawiającym parametry jakościowe ziarna, takie jak zawartość białka i glutenu [Wójcik i in. 2014, Bärdaş i in. 2024].

W kontekście celu badań, jakim była ocena wpływu odcieków na plon i jakość ziarna, wyniki wskazują, że zastosowanie tego typu nawożenia prowadziło do wyraźnego zróżnicowania anali-

zowanych parametrów. Zaobserwowany wzrost wigoru roślin, wyrażony wyższymi wartościami wskaźnika NDVI, potwierdza bezpośredni związek między intensywnością wegetacji, a potencjałem plonotwórczym pszenicy [Bonelli i in. 2024, Yang i in. 2025]. Wykorzystanie danych satelitarnych Sentinel-2 pozwoliło na precyzyjne uchwycenie momentu maksymalnej akumulacji biomasy, co jest zgodne z badaniami wskazującymi na fazę strzelania w źdźbło jako kluczową dla prognozowania finalnego plonu [Yang i in. 2025].

W kontekście uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że hipoteza badawcza została częściowo potwierdzona. Zastosowanie odcieku nie prowadziło do jednoznacznego pogorszenia parametrów jakościowych ziarna, jednak nie we wszystkich przypadkach zapewniało efektywność plonotwórczą porównywalną z najlepszymi wariantami doświadczenia. W szczególności niższe wartości plonu i jakości w II wariacie mogą wskazywać, że duża zmienność składu chemicznego odcieków, podkreślana w literaturze, stanowi istotne ograniczenie ich praktycznego zastosowania [Kopeć i in. 2020, Santos i in. 2021, Valentine i in. 2025]. Skład drenazu z upraw bezglebowych zależy od gatunku rośliny, fazy wzrostu oraz warunków klimatycznych, co utrudnia precyzyjne standaryzowanie go jako samodzielnego nawozu [Richa i in. 2020, Kopeć i in. 2020].

Zróżnicowanie liczby kłosów oraz masy ziarna pomiędzy wariantami potwierdza, że efektywność wykorzystania składników pokarmowych z odcieków jest silnie uzależniona od ich dostępności i proporcji. Literatura wskazuje, że odcieki z upraw truskawek w podłożach kokosowych zawierają znaczne ilości makro- i mikroelementów, takich jak N, P, K, Ca, Mg [Kopeć i in. 2020, Vandecasteele i in. 2023]. Jednak ich forma chemiczna oraz wzajemne relacje jonowe, w tym silne antagonizmy kationowe (np. K–Ca–Mg), mogą ograniczać ich pobieranie przez rośliny, co znajduje odzwierciedlenie w uzyskanych wynikach [Wójcik i in. 2014, Kopeć i in. 2020]. Może to tłumaczyć obserwowaną niższą efektywność niektórych wariantów, mimo potencjalnie wysokiej zawartości składników odżywczych w zastosowanym roztworze.

Jednocześnie brak istotnych różnic w masie tysiąca ziaren (MTZ) wskazuje, że zastosowanie odcieków nie wpływało negatywnie na proces nalewania ziarna, co jest istotne z punktu widzenia jakości plonu. Wynik ten jest zgodny z doniesieniami, że MTZ jest cechą o wysokiej stabilności genetycznej i jest relatywnie mniej podatna na zmienność czynników środowiskowych i nawozowych w porównaniu do liczby kłosów czy liczby ziaren w kłosie [Yang i in. 2025, Bärdaş i in. 2024]. Stabilność tego parametru potwierdza, że recykling odcieków z upraw bezglebowych truskawek może stanowić wartościowe, komplementarne źródło składników w technologii uprawy pszenicy ozimej, pod warunkiem wdrożenia zintegrowanych systemów monitoringu zasobności gleby [Kowalczyk i in. 2014, Santos i in. 2021].

Analiza parametrów jakościowych ziarna, takich jak zawartość białka, glutenu oraz wskaźnik Zeleny'ego, wskazuje, że odcieki hydroponiczne mogą stanowić skuteczne, uzupełniające źródło składników pokarmowych, wpisując się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym i odzysku biogenów [Richa i in. 2020, Valentine i in. 2025]. Jednakże uzyskane wyniki sugerują, że nie zawsze zapewniają one optymalne warunki dla syntezy białek zapasowych w porównaniu do precyzyjnego nawożenia mineralnego. Najwyższe wartości tych parametrów w wariacie kontrolnym lub innych wariantach nawozowych sugerują, że dostępność azotu – kluczowego dla jakości technologicznej pszenicy – mogła być w przypadku odcieków niewystarczająca lub niezbalansowana [Yang i in. 2025]. Literatura potwierdza, że o ile nawożenie azotowe silnie stymuluje zawartość białka i glutenu, o tyle efektywność tego procesu zależy od precyzyjnego dawkowania i momentu aplikacji, co w przypadku zmiennego składu odcieków jest trudne do osiągnięcia [Bärdaş i in. 2024, Yang i in. 2025].

Z drugiej strony, brak wyraźnego pogorszenia jakości ziarna w wariantach z odciekiem jest wynikiem obiecującym. Potwierdza on, że zastosowanie drenazu z upraw truskawek, mimo wysokiej koncentracji soli, nie wywołało w krótkim okresie efektów negatywnych, takich jak fitotoksyczność jonowa czy drastyczne zasolenie, o których ostrzegają badacze [Kopeć i in. 2020, Santos i in. 2021]. Wskazuje to na bezpieczeństwo stosowania tego typu nawożenia jako kom-

ponentu fertygacji, choć należy pamiętać, że długotrwałe nawadnianie odciekami bez kontroli może prowadzić do akumulacji sodu i chlorków w profilu glebowym, co wymaga stałego monitoringu przewodnictwa elektrycznego (EC) gleby [Kopeć i in. 2020, Santos i in. 2021].

Istotnym elementem badań była analiza wskaźnika NDVI oraz wskaźników SPAD jako narzędzi monitorowania stanu fizjologicznego roślin. Uzyskane wyniki wskazują, że wartości NDVI dobrze odzwierciedlały kondycję ładu oraz były skorelowane z wybranymi parametrami jakościowymi, co potwierdza doniesienia o wysokiej przydatności teledetekcji w rolnictwie precyzyjnym [Bonelli i in. 2024, Yang i in. 2025]. Szczególnie silne korelacje NDVI z zawartością glutenu, białka i wskaźnikiem Zeleny'ego znajdują potwierdzenie w analizach ścieżkowych (Path analysis), które wskazują, że wigor roślin (odzwierciedlany przez SPAD i NDVI) jest kluczowym czynnikiem determinującym zarówno plon, jak i cechy technologiczne ziarna [Yang i in. 2025, Bärdaş i in. 2022]. Wykorzystanie danych satelitarnych Sentinel-2 do wyznaczania NDVI pozwala na identyfikację faz krytycznych, takich jak strzelanie w źdźbło, w których rośliny wykazują największe zapotrzebowanie na biogeny zawarte w odciekach [Yang i in. 2025].

Jednocześnie ograniczona korelacja NDVI z plonem całkowitym potwierdza, że wskaźniki wegetacyjne nie zawsze są wystarczające do prognozowania plonu, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami wskazującymi na wieloczynnikowy charakter plonowania [Tan i in. 2024, Yang i in. 2025]. Choć NDVI jest czułym wskaźnikiem stanu zdrowotnego i wigoru roślin, literatura sugeruje, że symulacje parametrów bezwzględnych, takich jak LAI (indeks powierzchni liści) czy AGB (nadziemna biomasa), dostarczają dokładniejszych danych o stanie uprawy niż sam wskaźnik NDVI [Tan i in. 2024]. Ograniczona przydatność prognostyczna NDVI w fazie dojrzałości może wynikać z wpływu czynników stresowych w późniejszych fazach rozwoju, takich jak wysokie temperatury powietrza powyżej 32°C, które powodują zamykanie aparatów szparkowych i spadek asymilacji CO<sub>2</sub> mimo utrzymującej się wysokiej aktywności fotosyntetycznej w fazach wcześniejszych [Bärdaş i in. 2024].

Wyniki analizy PCA dodatkowo podkreślają złożoność zależności pomiędzy wigorem roślin a jakością plonu. Wyraźne rozdzielanie zmiennych związanych z NDVI oraz cechami jakościowymi (takimi jak zawartość cukrów czy kwasowość) wskazuje, że intensywność wegetacji nie zawsze przekłada się na wysoką jakość ziarna, co potwierdzają badania nad strukturą komponentów głównych w uprawach roślin ogrodniczych [Tang i in. 2024]. Jest to szczególnie istotne w kontekście wykorzystania odcieków, które – będąc bogate w azot – mogą stymulować silny wzrost wegetatywny i biomasę, lecz niekoniecznie sprzyjać efektywnemu wykorzystaniu azotu w syntezie białek zapasowych i glutenu, jeśli ich podaż nie jest precyzyjnie zbilansowana z innymi składnikami [Yang i in. 2025]. Nadmierne nawożenie azotowe, obecne często w drenażu, może wręcz prowadzić do spadku gęstości ziarna w stanie zsypanym, co obniża jego wartość technologiczną [Yang i in. 2025].

W odniesieniu do koncepcji gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), uzyskane wyniki potwierdzają, że odcieki pożywek hydroponicznych mogą stanowić wartościowy element recyklingu składników odżywczych, umożliwiając oszczędności biogenów na poziomie nawet 35–54% [Richa i in. 2020, Vandecasteele i in. 2023, Valentine i in. 2025]. Ich zastosowanie wpisuje się w strategię ograniczania zużycia nawozów mineralnych oraz minimalizacji presji środowiskowej na wody gruntowe i powierzchniowe [Dyško i in. 2013, Valentine i in. 2025]. Jednakże, aby w pełni wykorzystać ich potencjał, konieczne jest opracowanie systemów standaryzacji składu oraz precyzyjnego dawkowania, ponieważ duża zmienność chemiczna odcieków (zależna od fazy wzrostu rośliny macierzystej i warunków klimatycznych) pozostaje główną barierą w ich bezpiecznym wdrażaniu [Santos i in. 2021, Valentine i in. 2025].

Podsumowując, przeprowadzone badania wskazują, że odcieki pożywek hydroponicznych mogą być stosowane jako komplementarne źródło składników pokarmowych w uprawie pszenicy ozimej, wspomagając bezpieczeństwo żywnościowe i zrównoważone zarządzanie zasobami wody słodkiej [Valentine i in. 2025]. Ich efektywność zależy jednak od odpowiedniego zarządzania i integracji z nawożeniem konwencjonalnym, przy jednoczesnym monitorowaniu ryzyka

zasolenia gleby oraz zachowania równowagi jonowej [Kopeć i in. 2020, Santos i in. 2021]. Wyniki te są spójne z literaturą i potwierdzają zasadność dalszych badań nad optymalizacją wykorzystania produktów ubocznych produkcji podosłonowej w rolnictwie polowym [Richa i in. 2020, Kopeć i in. 2020].

## WNIOSKI

1. Wyniki badań wskazują, że odcieki z systemów fertygacji truskawek mogą być skutecznie wykorzystywane jako źródło składników pokarmowych w uprawie pszenicy ozimej. Ich zastosowanie wpływa na zróżnicowanie kondycji roślin oraz parametrów plonowania i jakości ziarna.
2. Wskaźnik NDVI okazał się użytecznym narzędziem do oceny stanu łanu i prognozowania wybranych cech jakościowych ziarna, szczególnie w fazie intensywnego wzrostu roślin. Największą wartość diagnostyczną NDVI stwierdzono w okresie przełomu kwietnia i maja.
3. Analizy korelacyjne oraz PCA potwierdziły złożony charakter zależności pomiędzy vegetacją roślin a plonem i jego jakością. Uzyskane wyniki wskazują na możliwość integracji danych teledetekcyjnych i analiz laboratoryjnych w ocenie efektywności systemów nawożenia.
4. Recykling pożywki wspiera realizację założeń gospodarki o obiegu zamkniętym oraz przyczynia się do ochrony ekosystemów wodnych poprzez ograniczenie wpływów biogenów.

## PIŚMIENNICTWO

- Bărdaş M., Rusu T., Şimon A., Cheţan F., Popa A., Vătcă S. 2022. Effect of the tillage systems and foliar fertilizations on assimilation, production and quality of wheat in the Transylvanian Plain conditions. *AgroLife Sci. J.* 11(2): 18–29.
- Bărdaş M., Rusu T., Popa A., Russu F., Şimon A., Cheţan F., Racu I., Popescu S., Topan C. 2024. Effect of foliar fertilization on the physiological parameters, yield and quality indices of the winter wheat. *Agronomy* 14(1), art. no. 73. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010073>.
- Bonelli L., Montesano F.F., D'Imperio M., Gonnella M., Boari A., Leoni B., Serio F. 2024. Sensor-Based fertigation management enhances resource utilization and crop performance in soilless strawberry cultivation. *Agronomy* 14(3), art. no. 465. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030465>.
- Buragienė S., Lekavičienė K., Adamavičienė A., Vaiciukevičius E., Šarauskis E. 2024. The influence of an innovative bioproduct on soil and substrate characteristics during strawberry cultivation. *Agriculture* 14(4), art. no. 537. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040537>.
- Dyśko J., Kaniszewski S., Kowalczyk W. 2013. Wpływ bezglebowych upraw szklarniowych na zanieczyszczenie płytkich wód gruntowych odciekami nawozowymi. *Infrastr. Ekol. Teren. Wiejs.* 2(I): 127–135.
- Káš M., Mühlbachová G., Kusá H., Pechová M. 2016. Soil phosphorus and potassium availability in long-term field experiments with organic and mineral fertilization. *Plant Soil Environ.* 62 (12): 558–565.
- Kopeć M., Mierzwa-Hersztek M., Gonddek K., Zaleski T., Bogdał S., Bieniasz M., Błaszczak J., Kaczmarczyk E., Knaga J., Łapczyńska-Kordon B., Nawrocki J., Pniak M. 2020. Recovery of leachate from everbearing strawberry cultivation as an element of retardation. *J. Ecol. Eng.* 21(7): 197–203.
- Kowalczyk W., Dyśko J., Felczyńska A. 2014. Monitorowanie składu mineralnego wody w ujęciach zlokalizowanych na terenach produkcji warzyw szklarniowych w latach 2010-2014. *Zesz. Nauk. Inst. Ogród.* 22: 51–62.
- Lazarov T.K., Dzanagov S.Kh., Gazdanov A.V., Basiev A.E., Kanukov Z.T., Tsutsiev R.A., Khadikov A.Yu., Kaloev B.S. 2019. Fertility of leached chernozem and productivity of winter wheat depending on fertilizers in a forest-steppe zone. *KnE Life Sci.* 4(14): 403–414. <https://doi.org/10.18502/ kls.v4i14.5627>.

- Richa A., Touil S., Fizir M., Martinez V. 2020. Recent advances and perspectives in the treatment of hydroponic wastewater: a review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 19: 945–966.
- Santos M.G., Moreira G.S., Pereira R., Carvalho S.M.P. 2021. Assessing the potential use of drainage from open soilless production systems: a case study from an agronomic and ecotoxicological perspective. *SSRN Manuscript*. 3980085: 1–39.
- Tan Y., Cheng E., Feng X., Zhao B., Chen J., Xie Q., Peng H., Li C., Lu C., Li Y., Zhang B., Peng D. 2024. Application of APSIM model in winter wheat growth monitoring. *Front. Plant Sci.* 15, art. no. 1500103. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1500103>.
- Tang X., Li Y., Fang M., Li W., Hong Y., Li Y. 2024. Effects of different water storage and fertilizer retention substrates on growth, yield and quality of strawberry. *Agronomy* 14(1), art. no. 205. <https://doi.org/10.3390/agronomy14010205>.
- Valentine E.O., Oluoch B., Musazura W., Mandizvo T., Odindo A. 2025. Domestic wastewater reuse in hydroponic systems: A systematic review of adoption, nutrient variability, challenges, and future directions. *Agric. Water Manag.* 322, art. no. 109990. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109990>.
- Vandecasteele B., Hofkens M., De Zaeytijd J., Visser R., Melis P. 2023. Towards environmentally sustainable growing media for strawberry cultivation: Effect of biochar and fertigation on circular use of nutrients. *Agric. Water Manag.* 284, art. no. 108361. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108361>.
- Wójcik P., Dyśko J., Kaniszewski S., Kowalczyk W., Nowak J. 2014. Zrównoważone nawożenie roślin ogrodniczych. Monografia Instytutu Ogrodnictwa. Skierniewice: 1–64.
- Yang Q., Zhang L., Zhang Y., Li L., Wang Y. 2025. Optimized application of nitrogen, phosphorus, and potassium enhances yield and quality by improving nutrient uptake dynamics in winter wheat with straw return. *J. Plant Growth Regul.* 44: 5028–5047. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11731-6>.
- Zeng X., Han F., Ye J., Zhong Y. 2017. Recycling spent *Pleurotus eryngii* substrate supplemented with *Tenebrio molitor* feces for cultivation of *Agroclybe chaxingu*. *Int. J. Recycl. Org. Waste Agricult.* 6(4): 275–280. <https://doi.org/10.1007/s40093-017-0171-9>.

K. NORAS

**ASSESSMENT OF THE FERTILIZATION SUITABILITY OF FOLIAR APPLICATION OF NUTRIENT SOLUTION DRAINAGE FROM HYDROPONIC CULTIVATION IN WINTER WHEAT FERTILIZATION**

**Summary**

The aim of the study was to evaluate the fertilizing suitability of nutrient solution drainage derived from strawberry cultivation in coconut substrate for winter wheat fertilization, and to determine its effect on yield, grain technological quality, and the physiological status of plants. The study specifically focused on foliar fertilization as a method of nutrient application. The research was conducted under field conditions in central Poland in 2024, using four fertilization treatments: a single application of the drainage, four applications of the drainage, a control treatment without foliar fertilization, and a treatment with a commercial foliar fertilizer. The assessed parameters included yield structure components, grain quality traits, and the NDVI index determined on the basis of Sentinel-2 satellite imagery and ground-based measurements. It was found that the nutrient solution drainage contained significant amounts of macro- and micronutrients, indicating that it may serve as a complementary source of nutrients in winter wheat cultivation. The highest number of ears and the greatest grain mass were obtained in the treatment with a single drainage application, whereas the lowest values of these parameters were recorded under the fourfold application of the solution. Thousand grain weight remained relatively stable across all treatments, indicating that the use of the drainage did not impair the grain filling process. Grain quality parameters varied depending on the fertilization treatment; however, no clearly negative effect of the drainage on the technological quality of grain was observed. The results also confirmed the high usefulness of the NDVI index for monitoring crop condition and predicting selected grain quality traits, particularly during the period of intensive plant growth. Correlation analysis and PCA revealed complex relationships among plant vigor, yield formation,

and grain quality. The obtained results indicate that the recycling of hydroponic drainage may represent a valuable component of sustainable agriculture, reducing the use of mineral fertilizers and environmental pressure; however, its practical implementation requires precise dosing, composition standardization, and continuous monitoring of soil properties.

**Key words:** winter wheat, nutrient solution recycling, coconut substrate, strawberry cultivation, foliar fertilization, NDVI, grain yield, grain quality, sustainable agriculture

Zaakceptowano do druku – *Accepted for print*: 19.12.2025

Do cytowania – For citation:

Noras K. 2025. Ocena przydatności nawozowej dolistnej aplikacji przelewu pożywki z uprawy hydroponicznej w nawożeniu pszenicy ozimej. *Fragm. Agron.* 42(2): 53–68.