



Uniwersytet Przyrodniczy  
w Poznaniu



**Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu**  
**Wydział Rolnictwa, Ogrodnictwa i Bioinżynierii**  
**Katedra Agronomii**  
Dziedzina: **nauki rolnicze**  
Dyscyplina naukowa: **rolnictwo i ogrodnictwo**

**mgr inż. Krzysztof Krzyżaniak**

**Jakość i straty ziarna pszenicy ozimej w zależności od  
zastosowanego rodzaju zespołu młócająco-wydzielającego w  
kombajnie do zbioru zbóż**

Quality and losses of winter wheat grain depending on the type of the  
threshing and separating unit applied in a combine harvester

**Rozprawa doktorska**

Doctoral dissertation

Praca wykonana pod kierunkiem:  
prof. UPP dra hab. inż. Ireneusza Kowalika

Poznań 2023

*Składam najserdeczniejsze podziękowania*

*Promotorowi mojej pracy, za życzliwość, poświęcony czas,  
przekazaną wiedzę, cenne uwagi oraz wkład w mój rozwój naukowy*

*Pracownikom firmy AGCO Sp. z o.o., za udostępnienie maszyn  
do przeprowadzenia badań oraz pomoc w ich realizacji*

*Moim Rodzicom, za trud włożony w wychowanie,  
możliwość nauki oraz wsparcie przez wszystkie lata*

*Mojej ukochanej Marcie, za nieustanne motywowanie,  
pomoc, cenne porady oraz ogromne wsparcie*

## Spis treści

1. Wstęp.....	9
2. Przegląd literatury .....	11
2.1. Uprawa pszenicy w Polsce.....	11
2.2. Aspekty ekonomiczne produkcji zbóż .....	15
2.3. Rozwój technologii zbioru zbóż.....	17
2.4. Budowa i zasada działania kombajnu do zbioru zbóż .....	23
2.5. Nowoczesne rozwiązania techniczne stosowane w kombajnach zbożowych..	29
2.6. Straty ilościowe i jakościowe podczas kombajnowego zbioru zbóż .....	32
2.6.1. Straty ilościowe .....	35
2.6.2. Mechaniczne uszkodzenia ziarna .....	37
3. Problem naukowy .....	39
4. Cel i zakres pracy .....	41
5. Materiał i metody badawcze.....	43
5.1. Miejsce i czas wykonania badań .....	43
5.2. Charakterystyka warunków pracy i zbieranego materiału .....	43
5.3. Charakterystyka techniczno-eksploatacyjna .....	47
5.4. Charakterystyka jakości zbioru .....	49
5.4.1. Pomiar rzeczywistej szerokości roboczej.....	49
5.4.2. Określenie przepustowości kombajnu.....	50
5.4.3. Obliczenie wydajności efektywnej i eksploatacyjnej.....	50
5.4.4. Określenie czystości i makrouszkodzeń omłóconego ziarna .....	54
5.4.5. Określenie mikrouszkodzeń omłóconego ziarna.....	56
5.4.6. Określenie strat ziarna .....	56
5.4.7. Energia i zdolność kiełkowania.....	58
5.5. Koszty eksploatacji .....	58
5.6. Analiza statystyczna wyników .....	60

6.	Wyniki .....	61
6.1.	Rozkład uszkodzeń ziarna i strat ilościowych .....	61
6.2.	Zróźnicowanie w poziomie przepustowości, charakterystyce jakościowej i stratach ziarna między poszczególnymi typami kombajnów i wariantami ustawień .	64
6.3.	Przewidywanie poziomu całkowitych strat kombajnu na podstawie masy ziaren, stosunku masy ziarna do słomy, przepustowości i wariantu ustawień .....	73
6.4.	Zróźnicowanie w energii kiełkowania, zdolności kiełkowania, siewkach nienormalnych i nasionach martwych między poszczególnymi typami kombajnów i wariantami ustawień parametrów roboczych .....	76
6.5.	Zróźnicowanie w zużyciu paliwa i w kosztach eksploatacji kombajnów .....	77
6.6.	Zależność pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny .....	78
7.	Dyskusja .....	83
8.	Wnioski.....	94
9.	Spis literatury.....	96
10.	Spis rycin .....	112
11.	Spis tabel.....	114

## Streszczenie

Pszenica jest jednym z najpopularniejszych zbóż uprawianym w Polsce do celów konsumpcyjnych jak i z przeznaczeniem na paszę. Całkowita powierzchnia jej zasiewów przekracza 30% powierzchni zasiewów wszystkich zbóż. Głównym celem prac hodowlanych nad odmianami pszenicy jest zwiększenie potencjału plonotwórczego oraz poprawa parametrów jakościowych. W związku z tym rosną wymagania agrotechniczne stawiane maszynom do zbioru zbóż. Obecnie najpopularniejszą formą jest zbiór jednoetapowy za pomocą samobieżnych kombajnów. Mimo to zbiór zbóż jest najbardziej kosztochłonnym i energochłonnym zabiegiem w całym procesie produkcji tych roślin. Kombajn zbożowy jest najbardziej zaawansowaną pod względem konstrukcji, liczby zespołów roboczych oraz uniwersalności (zbiór zbóż, rzepaku, kukurydzy, roślin strączkowych itp.) maszyną użytą w produkcji rolnej. Zmniejszenie kosztów zbioru jak i pozostałych nakładów jest możliwe między innymi poprzez stosowanie nowoczesnych rozwiązań w kombajnach zbożowych oraz poprzez umiejętne wykorzystanie ich w procesie technologicznym zbioru.

W pracy dokonano oceny wpływu trzech typów zespołów młócająco-wydzielających w kombajnie zbożowym oraz różnych parametrów roboczych na straty ziarna, parametry jakościowe i eksploatacyjne podczas zbioru pszenicy ozimej odmiany Arkadia. Badania polowo-laboratoryjne były realizowane w latach 2019-2021. Zbiór odbywał się w wielkotowarowej spółdzielni rolniczej oraz w trzech gospodarstwach indywidualnych położonych w województwie wielkopolskim. Do badań użyto trzech różnych typów kombajnów do zbioru zbóż, głównym kryterium wyboru maszyn był rodzaj zespołu młócająco-wydzielającego. Wybrano trzy różne rodzaje: kombajn z konwencjonalnym zespołem młócającym, kombajn z konwencjonalnym zespołem młócającym i separatorem rotacyjnym oraz kombajn z rotorowym systemem młócająco-wydzielającym. Przed przystąpieniem do badań dokonano charakterystyki łanu wyznaczonych odcinków pomiarowych oraz charakterystyki technicznej wybranych obiektów badawczych. Głównymi badanymi parametrami były: przepustowość, straty ziarna, uszkodzenia i czystość omłóconego ziarna, energia i zdolność kielkowania, wskaźniki i współczynniki eksploatacyjne oraz koszty eksploatacji.

Na podstawie wykonanych badań i analizy statystycznej wyników określono zależność pomiędzy rodzajem zespołu młócająco-wydzielającego w kombajnie do zbioru zbóż oraz parametrami roboczymi a parametrami jakościowymi pszenicy ozimej po

zbiorniczym. Wykazano istotny wpływ typu kombajnu oraz zastosowanych parametrów roboczych na straty ziarna, uszkodzenia i zanieczyszczenia. Najmniejszym udziałem mikrouszkodzeń, uszkodzonego i połamanego ziarna oraz najwyższym stopniem czystości ziarna charakteryzowało się ziarno zebrane kombajnem rotorowym. Ponadto kombajn z osiowym przepływem masy osiągnął najwyższą średnią przepustowość. Uzyskane wyniki za pomocą analizy kowariancji posłużyły do stworzenia równania prognozy całkowitych strat badanych typów kombajnów z uwzględnieniem wariantów parametrów roboczych oraz przepustowości, masy tysiąca ziaren i stosunku masy ziarna do masy słomy. Dodatkowo dokonano oceny ekonomicznej procesu zbioru dla badanych typów kombajnów. Wynika z niej, że dobór odpowiedniego typu kombajnu do zbioru zbóż oraz właściwe wykorzystanie roczne wpływa na optymalizację kosztów zbioru pszenicy ozimej. Wykonane analizy mają znaczenie poznawcze i mogą przynieść wymierne efekty ekonomiczne i gospodarcze w wyniku optymalizacji zbioru, ograniczenia uszkodzeń ziarna, jak również uzyskania wyższych plonów przez zmniejszenie strat. Uzyskane wyniki mogą być pomocne podczas podejmowania decyzji o wyborze odpowiedniego typu kombajnu do potrzeb danego gospodarstwa oraz w ocenie ekonomicznej procesu zbioru pszenicy.

## Summary

Wheat is one of the most common types of grain grown in Poland both for consumption purposes and for fodder. The area sown with wheat constitutes over 30% of the total area of all types of cereals sown. The main purpose of farming works on wheat varieties is to increase yield potential and to improve quality parameters of wheat. Therefore, agrotechnical requirements towards grain harvesting machinery have been growing. Nowadays, the most popular form of harvesting is a single-stage process with the use of self-propelled combines. Even so, harvesting continues to be the most cost- and energy-consuming activity within the entire production process of this species. Combine harvester is an agricultural machine that is the most advanced in terms of its design, number of operation units and versatility (harvesting grain, rape, maize, legumes etc.). Reducing the cost of harvesting as well as other expenses is possible by applying modern solutions in combine harvesters and by their efficient use in the technological process of harvesting.

The thesis comprises the assessment of the impact that three types of threshing and separating units in a combine harvester and various operating parameters have on grain loss as well as on grain quality and operational features during winter wheat 'Arkadia' harvesting. Field and laboratory research was performed in 2019-2021. The harvesting process was conducted in a large-scale agricultural cooperative and in three different individual farms located in Wielkopolskie Voivodship. In the research, three different types of grain harvesters were used, chosen by the type of threshing and separating unit as the main criterium. The selected types were as follows: a harvester with a conventional threshing unit, a harvester with a conventional threshing unit and rotary separator and the last type was a harvester with a rotary threshing and separating system. Before starting the trials, characteristics of the field of the designated measurement sections and technical characteristics of the chosen research objects were performed. The trials assumed the following key parameters: throughput, grain loss, damage and purity of the threshed grain, energy and germination capacity, operation indicators and coefficients, and operating costs.

Based on the trials performed and the statistical analysis of the results, it was possible to determine the correlation between the type of the threshing and separation unit in a combine harvester and the operating parameters on one side and quality parameters of winter wheat after harvest on the other. It was demonstrated that the type of combine

harvester and the operating parameters used have a significant impact on grain losses, damage and contamination of grain. The smallest share of micro-damages, amount of damaged and broken grain, and the highest degree of grain cleanliness was found in grain harvested with a rotor harvester. Moreover, the harvester with axial mass flow achieved the highest average throughput. Results obtained using analysis of covariance were used to create total loss prediction equation for the tested types of harvesters, taking into account variants of operating parameters and throughput, thousand grain weight and grain to straw weight ratio. Additionally, an economic assessment of the harvesting process was made for the tested types of harvesters. It shows that the choice of the appropriate type of harvester and its proper use throughout the year influences the optimization of winter wheat harvesting costs. The performed analysis have an informative significance and can bring measurable economic and financial results in consequence of optimization of harvesting, reducing grain damage, as well as obtaining higher yields by reducing losses. The obtained results may be useful while choosing the right type of a harvester suitable for the particular farm, as well as in the economic assessment of the wheat harvesting process



## 1. Wstęp

W Polsce zboża uprawiane są w 88,3% gospodarstw i stanowią 68,4% w strukturze upraw (GUS 2022a). Wraz z wprowadzaniem nowych odmian zwiększa się potencjał plonotwórczy tych roślin (Drażkiewicz *i in.* 2022). Zbiór zbóż, rzepaku, kukurydzy i roślin strączkowych stanowi największy problem pod względem poniesionych kosztów, nakładów robocizny, ściśle określonych terminów agrotechnicznych oraz zapotrzebowania energetycznego. Zmniejszenie kosztów zbioru i pozostałych nakładów jest możliwe poprzez stosowanie nowoczesnych rozwiązań w kombajnach zbożowych oraz poprzez umiejętne wykorzystanie ich w procesie zbioru (Tanaś i Zagajski 2010a, Bieniek 2011).

W związku z zwiększającym się potencjałem plonotwórczym i krótkim agrotechnicznym okresem zbioru wynoszącym około 20 dni, rosną wymagania stawiane środkom technicznym wykorzystywanym do zbioru zbóż. Rozwój konstrukcji kombajnów zbożowych skierowany jest przede wszystkim na wzrost przepustowości, poprawę parametrów jakościowych zbieranego materiału, większą niezawodność oraz lepszą ergonomię pracy. Ma to na celu poprawę opłacalności ekonomicznej oraz zwiększenie wydajności i jakości zbioru (Feiffer *i in.* 2005, Hermann 2018, Etzbach *i in.* 2020). Do obecnych trendów w zmianach konstrukcji kombajnów możemy zaliczyć działania w kierunku:

- modernizacji przyrządów roboczych,
- nowych rozwiązań w zespołach młócaço-wydzielających oraz czyszczących,
- rozwiązań konstrukcyjnych dostosowujących kombajn do pracy na pochyłościach - systemy automatycznego poziomowania,
- systemów telematycznych oraz automatycznego prowadzenia z użyciem sygnału GPS,
- systemów automatycznego regulowania przepływu masy (Miu 2016, Krzyżaniak i Kowalik 2019).

W związku z rozwojem konstrukcji kombajnów do zbioru zbóż pojawiają się liczne problemy eksploatacyjno-techniczne. Większej przepustowości często towarzyszą zwiększone straty lub obniżenie jakości zebranego ziarna. Przy zastosowaniu kombajnów z rotorowym lub hybrydowym systemem omłotowo-separującym występuje znaczące zagęszczenie słomy, a co za tym idzie pojawiają się trudności przy jej zbiorze (Bieniek 2011). Podczas zbioru zbóż, ze względu na parametry zbieranego materiału, budowa

zespołu młócaço-wydzielającego kombajnu ma kluczowe znaczenie na powstawanie strat, uszkodzeń i zanieczyszczeń ziarna, a co za tym idzie, na spadek jakości plonu i trudności podczas późniejszego wykorzystania (Craessaerts *i in.* 2007, Tanaś *i in.* 2008, Szymanek i Dreszer 2011, Mirasi, Asoodar, *i in.* 2014, Masek *i in.* 2016, Bomoi *i in.* 2022). Bardzo dużym, ale często ignorowanym problemem jest destrukcyjne oddziaływanie maszyn na glebę. Problem ten nasila się ponieważ wraz z rozwojem konstrukcji oraz stosowaniem coraz większych zbiorników na ziarno zwiększa się masa kombajnów (Mazurek *i in.* 2015). Ważną kwestią jest również rozstrzygnięcie opłacalności zakupu nowego bądź używanego kombajnu do zbioru zbóż w stosunku do korzystania z usług agrotechnicznych (Szuk, Berbeka 2014).

W pracy przedstawiono wyniki badań polowo-laboratoryjnych trzech typów zespołów młócaço wydzielających podczas zbioru pszenicy ozimej. Przed przystąpieniem do badań sformułowano następujący problem naukowy: Czy na poziom strat i parametry jakościowe ziarna podczas kombajnowego zbioru pszenicy ozimej ma wpływ typ zespołu młócaço-wydzielającego oraz stosowane parametry eksploatacyjne? Aby odpowiedzieć na to pytanie dokonano oceny zależności parametrów jakościowych i strat ziarna pszenicy ozimej od zastosowanego rodzaju zespołu młócaço-wydzielającego oraz zastosowanych parametrów roboczych w kombajnie do zbioru zbóż. Badania prowadzono na następujących obiektach badawczych:

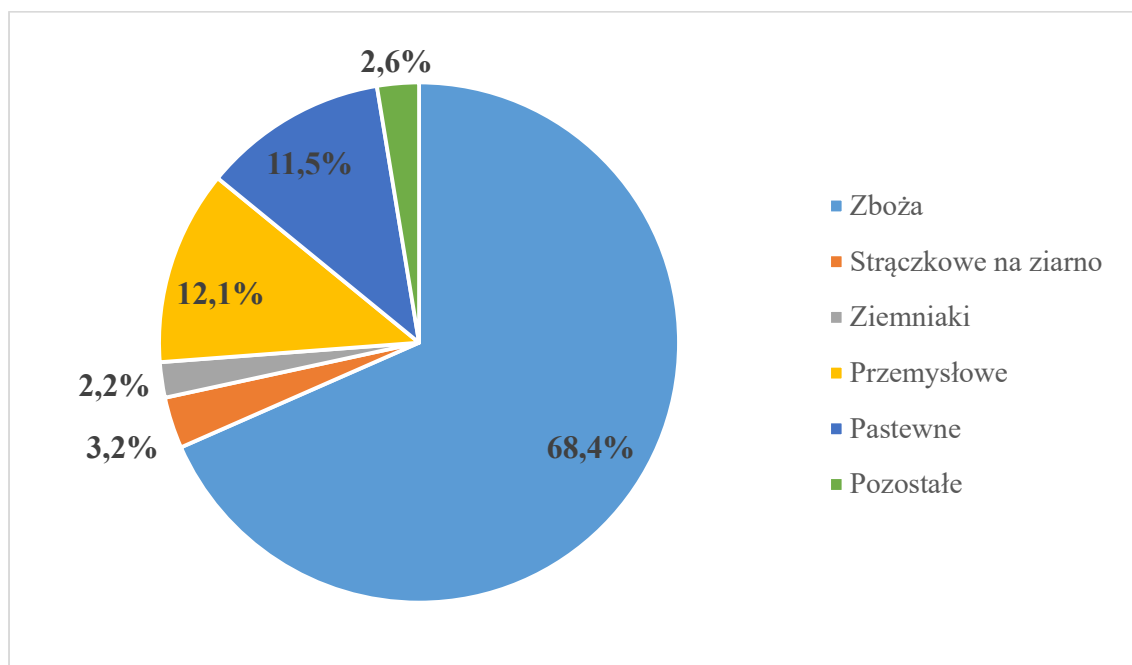
- Kombajn z konwencjonalnym systemem omłotu i 5 klawiszowym wytrząsaczem słomy.
- Kombajn z konwencjonalnym systemem omłotu, separatorem rotacyjnym i 6 klawiszowym wytrząsaczem słomy.
- Kombajn z osiowym przepływem masy (rotorowy system omłotu).

Głównymi badanymi parametrami były: pomiar przepustowości kombajnu, określenie czystości omłóconego ziarna, określenie strat ilościowych, uszkodzeń ziarna, energia i zdolność kiełkowania, wybrane wskaźniki i współczynniki eksploatacyjne oraz koszty eksploatacji.

## 2. Przegląd literatury

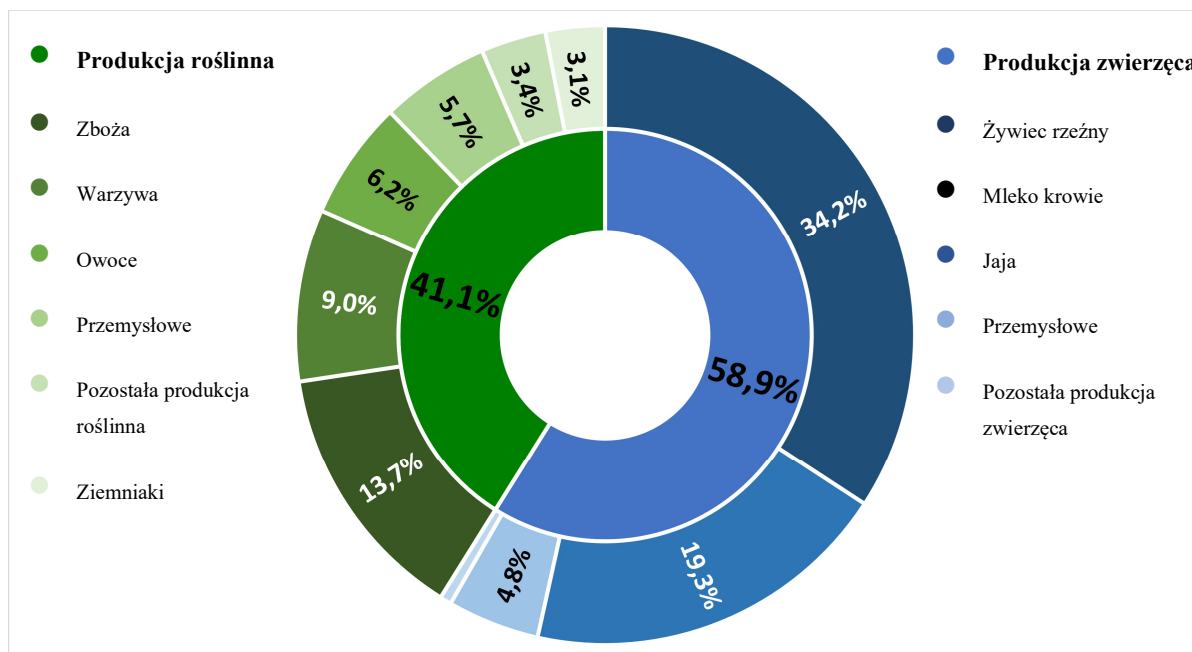
### 2.1. Uprawa pszenicy w Polsce

Powierzchnia zasiewów zbóż w Polsce w 2021 roku wyniosła  $7,451 \cdot 10^6$  ha (co stanowiło 68,4% w strukturze upraw – rycina 1), natomiast masa zebranego ziarna oscylowała na poziomie  $34,641 \cdot 10^6$  t. Powierzchnia ta była porównywalna z danymi z 2020 roku kiedy wyniosła  $7,411 \cdot 10^6$  ha, natomiast masa zebranego ziarna była niższa niż rok wcześniej o  $0,885 \cdot 10^6$  ha (GUS 2022a). Dla porównania wg danych FAO w 2020 roku w światowej strukturze upraw zboża stanowiły 51%, zebrano  $2,996 \cdot 10^9$  t, z czego masa zebranego ziarna w Europie wyniosła  $526,445 \cdot 10^6$  t (FAO 2022).



Ryc. 1. Struktura powierzchni zasiewów w 2021 r. (źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS 2022b)

W strukturze towarowej produkcji rolniczej w 2021 r. zboża stanowiły 13,7% całej produkcji rolniczej i w największym stopniu wpływały na opłacalność produkcji roślinnej (ryc. 2) (GUS 2022b).

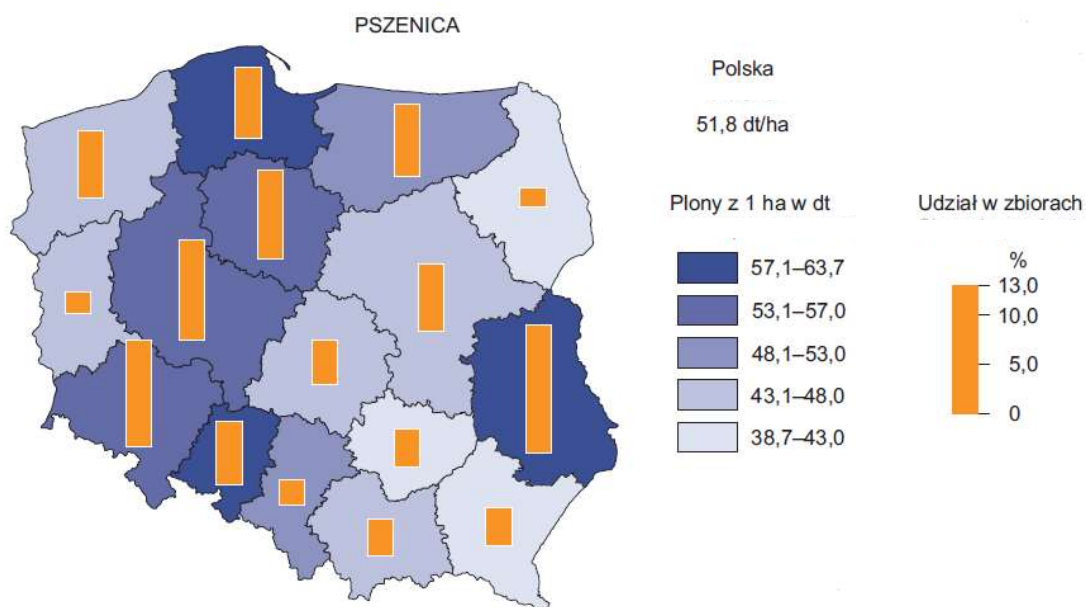


Ryc. 2. Struktura towarowej produkcji rolniczej w 2021 r. (źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS 2022b)

Pszenica zwyczajna jest podstawowym zbożem stosowanym w przemyśle młynarsko-piekarskim. Uprawiana jest również z przeznaczeniem paszowym. Pszenica ozima w porównaniu z formą jarą cechuje się wyższym plonowaniem, a także większą wydajnością mąki (Jagielski i Spychaj-Fabisiak 2011, Mańkowski *i in.* 2012, Kasprzak i Wirkijowska 2013, Knapowski *i in.* 2015, Jańczak-Pieniążek *i in.* 2020, Drążkiewicz *i in.* 2022). Wyróżnia się pięć grup wartości technologicznej odmian: E – elitarna chlebowa, A – jakościowa chlebowa, B – chlebowa, K – na ciastka i C – pastewna lub inna. Do wypieku chleba używa się odmiany z grup E, A, B (Jagielski i Spychaj-Fabisiak 2011, Szafrńska 2011). Rozwój odmian pszenicy jest ukierunkowany głównie na zwiększanie plonu oraz poprawę jakości (Dixon *i in.* 2006, Jańczak-Pieniążek *i in.* 2020). W roku 2022 zarejestrowano aż 20 nowych odmian pszenicy zwyczajnej ozimej, a w sumie w Krajowym rejestrze odmian roślin uprawnych COBORU znajdowało się 138 odmian pszenicy zwyczajnej ozimej, 46 odmian pszenicy zwyczajnej jarej, ponadto 4 odmiany pszenicy twardej ozimej oraz 5 odmian pszenicy orkisz ozimej (Drążkiewicz *i in.* 2022).

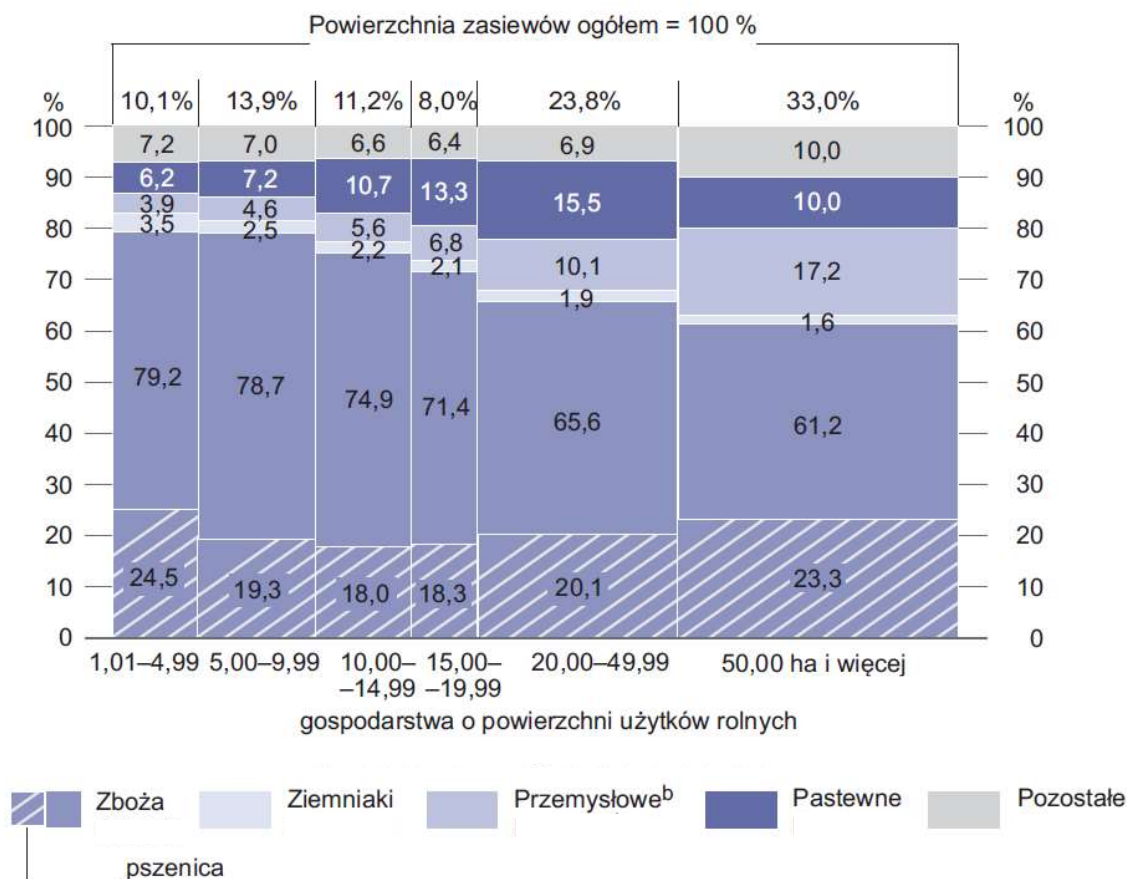
Według danych FAO światowa produkcja pszenicy w 2020 roku wyniosła  $760,926 \cdot 10^6$  t, a europejska  $255,019 \cdot 10^6$  t. W Polsce w 2021 roku pszenica stanowiła 32% powierzchni całkowitych zasiewów zbóż czyli  $2,391 \cdot 10^6$  ha, a masa zebranego ziarna wyniosła  $12,119 \cdot 10^6$  t. co stanowi 35% całej masy zebranego ziarna wszystkich zbóż w 2021 roku oraz 49% masy zbóż podstawowych (FAO 2022, GUS 2022a, b).

Średni plon pszenicy w 2021 r wyniósł 51,8 dt·ha<sup>-1</sup>. Na rycinie 3 przedstawiono rozkład średniego plonu pszenicy oraz procentowy udział w zbiorach dla poszczególnych województw. W porównaniu z rokiem 2010 powierzchnia zasiewów pszenicy wzrosła o 0,267·10<sup>6</sup> ha, natomiast średni plon o 7,5 dt·ha<sup>-1</sup> (GUS 2022b). Analizując te dane można stwierdzić, że potencjał plonotwórczy nie jest w pełni wykorzystany ponieważ w przypadku pszenicy ozimej może on przekraczać 85 dt·ha<sup>-1</sup> (Oleksiak 2016). W celu zwiększenia plonu bardzo ważny jest dobór odpowiedniej odmiany, stosowanie płodozmianu, dbanie o zasobność gleby, optymalne nawożenie i ochrona roślin (Jagielski i Spychaj-Fabisiak 2011, Kieloch i Kulon 2019).



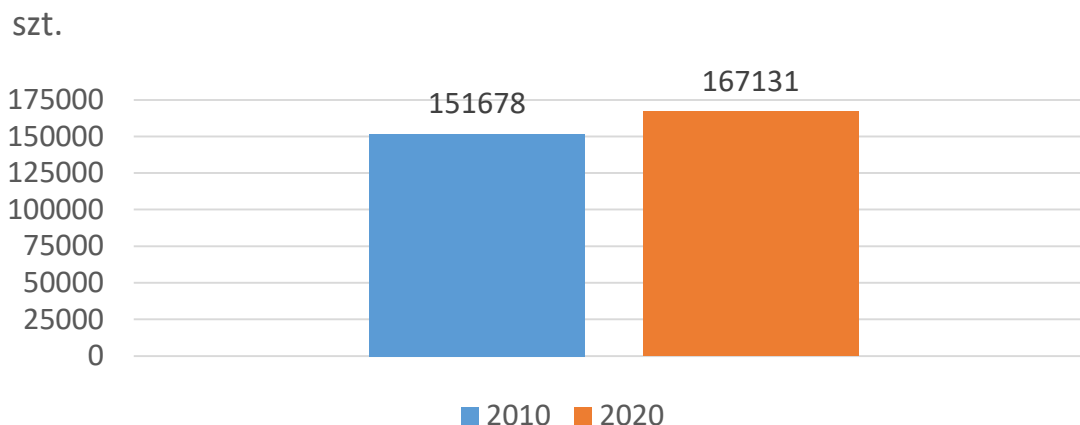
Ryc. 3. Zróżnicowanie plonów oraz udział województw w zbiorach pszenicy w 2021 r. (źródło: GUS 2022a)

Według danych GUS z Powszechnego Spisu Rolnego przeprowadzonego w 2020 roku wynika, że w gospodarstwach indywidualnych w 2020 roku powierzchnia zasiewów pszenicy stanowiła około 20% powierzchni zasiewów wszystkich roślin (ryc. 4) (GUS 2021a, b).



Ryc. 4. Struktura zasiewów w gospodarstwach indywidualnych o powierzchni powyżej 1 ha użytków rolnych w 2020 r. (źródło: GUS 2022a)

Również na podstawie tego samego spisu wykazano, że w gospodarstwach rolnych znajdowało się 167131 kombajnów do zbioru zbóż, co oznacza, że średnio na 100 ha użytków rolnych przypadało 1,1 kombajnu. W stosunku do wyników z roku 2010 liczba tych maszyn zwiększyła się o 10,2% (ryc. 5). Jest to głównie spowodowane utrzymującą się przewagą zbóż w strukturze zasiewów oraz wzrostem powierzchni uprawy rzepaku. Gospodarstwa rolne posiadające w swoim parku maszynowym kombajn do zbioru zbóż stanowiły ok 12,3% całkowitej liczby gospodarstw rolnych (GUS 2021b, 2022a, b).



Ryc. 5. Liczba kombajnów do zbioru zbóż w gospodarstwach rolnych według Powszechnego Spisu Rolnego (źródło: opracowanie własne na podstawie danych GUS 2021b)

## 2.2. Aspekty ekonomiczne produkcji zbóż

Głównym celem każdego producenta rolnego jest osiągnięcie maksymalnego zysku. W produkcji roślinnej na całkowity zysk wpływają całkowite koszty produkcji, wielkość plonu oraz efektywność zbioru (Muzalewski 2010, Eggerl 2017). W tym punkcie pod pojęciem efektywności zbioru należy rozumieć całkowite straty zespołów roboczych kombajnu, które oddziałują bezpośrednio na plon, ale też na jakość zbieranego materiału (Eggerl *i in.* 2013). Ten drugi parametr jest szczególnie ważny w produkcji odmian jakościowych, zarówno z przeznaczeniem konsumpcyjnym oraz nasiennym (Złobecki 1995a, Ziemińska *i in.* 2015).

W celu zwiększenia całkowitego zysku jednym z głównych działań jest zmniejszenie kosztów produkcji. Można to osiągnąć przez odpowiednie zarządzanie procesami produkcji, optymalizację zabiegów uprawowych, odpowiedni dobór agregatów maszynowych, dobrze zaplanowane przeglądy i szybkie naprawy (Izdebski 2001a, Grześ i Kowalik 2006, Kowalik i Grześ 2006, Ismail i Abdel-Mageed 2010, Komarnicki *i in.* 2012, Eggerl 2017, Grześ *i in.* 2017). W procesie zbioru bardzo istotny jest zarówno dobór kombajnu o odpowiednich parametrach eksploatacyjnych oraz współpracujących pojazdów, maszyn i urządzeń technicznych tj. ciągniki z przyczepami do odbioru ziarna, suszarnia, zaplecze magazynowe wraz z ładowarką teleskopową lub ciągnikiem z ładowaczem czołowym. Każdy przestój spowodowany zarówno złym doбором i organizacją środków transportowych oraz usterką techniczną wpływa istotnie na zwiększenie kosztów produkcji (Sęk *i in.* 1994, Grześ 2002, Muzalewski 2007, 2013,

Boyko i Dumenko 2011, Piwowar 2012, Calcante *i in.* 2013, Maciulewski i Pawlak 2014, Szuk i Berbeka 2014, Rachwał 2019).

Drugim czynnikiem pozwalającym uzyskać jak największy zysk jest zwiększenie plonu przy jednocześnie minimalnym poziomie strat. Bezpośredni wpływ na plon ma dobór odpowiednich odmian, prawidłowo ułożony płodozmian, optymalne nawożenie i ochrona roślin (Miłosz 1984, Markowski *i in.* 2005, Jagielski i Spychaj-Fabisiak 2011, Oleksiak 2016). Bardzo pomocne i coraz bardziej powszechne stają się użytkowanie systemów precyzyjnego rolnictwa. Wspomagają one zabiegi nawożenia oraz ochrony roślin przez dozowanie precyzyjnych dawek, również pomagają w zarządzaniu produkcją poprzez rejestrację i monitorowanie danych ze wszystkich zabiegów agrotechnicznych (Oksanen *i in.* 2016, Kamilaris *i in.* 2017, Czechłowski *i in.* 2018, Krzyżaniak i Kowalik 2022).

W związku z rosnącym potencjałem plonotwórczym zwiększają się też wymagania stawiane maszynom do zbioru zbóż. Do najważniejszych parametrów należą: wysoka przepustowość, niski poziom strat ziarna, mała ilość uszkodzeń i poziom zanieczyszczenia ziarniaków oraz dobra jakość słomy (Miłosz 1996, Złobecki 2005, Bieniek 2011, Etlbach *i in.* 2020). Minimalizacja strat i uszkodzeń wpływa bezpośrednio na wielkość plonu, a co za tym idzie na zysk. Natomiast pośrednio na zysk wpływa przepustowość i wydajność eksploatacyjna, która będąc na optymalnym poziomie wraz z możliwie niskim zużyciem paliwa daje niższe koszty eksploatacji (Izdebski 2001b, Špokas i Steponavičius 2011, Benes *i in.* 2014, Špokas *i in.* 2014, Masek, Novak, i Pavlicek 2015, Eggerl 2017, Olt *i in.* 2019, Savickas *i in.* 2020). W pewnym stopniu parametry robocze można polepszyć stosując poprawną i optymalną obsługę oraz wykorzystując potencjał obecnie oferowanych na rynku kombajnów do zbioru zbóż (Feiffer 2003a, Maertens i De Baerdemaeker 2003, Craessaerts *i in.* 2010, Mark Hanna 2010, Hassani *i in.* 2011, Osueke 2011, Zareei *i in.* 2012, Kroll i Kaszkowiak 2013, Copcea *i in.* 2017). Nadal nieprzerwanie do głównych celów badawczych i rozwojowych nowoczesnych maszyn do zbioru zbóż należą optymalizacja i poprawa funkcjonalności istniejących już kombajnów, projektowanie i rozwój nowych modeli oraz stworzenie nowej koncepcji zbioru. Ten ostatni cel opiera się w głównej mierze na wynalezieniu nowego typu zespołów roboczych (Feiffer 2003b, Kośmicki 2008, Czechłowski i Wojciechowski 2013, Eggerl *i in.* 2013, Bilde i Revsbeck 2017, Pantke *i in.* 2017, Hermann 2018, Yanke *i in.* 2019, Claes 2020, Flierl 2020). Trwają również prace

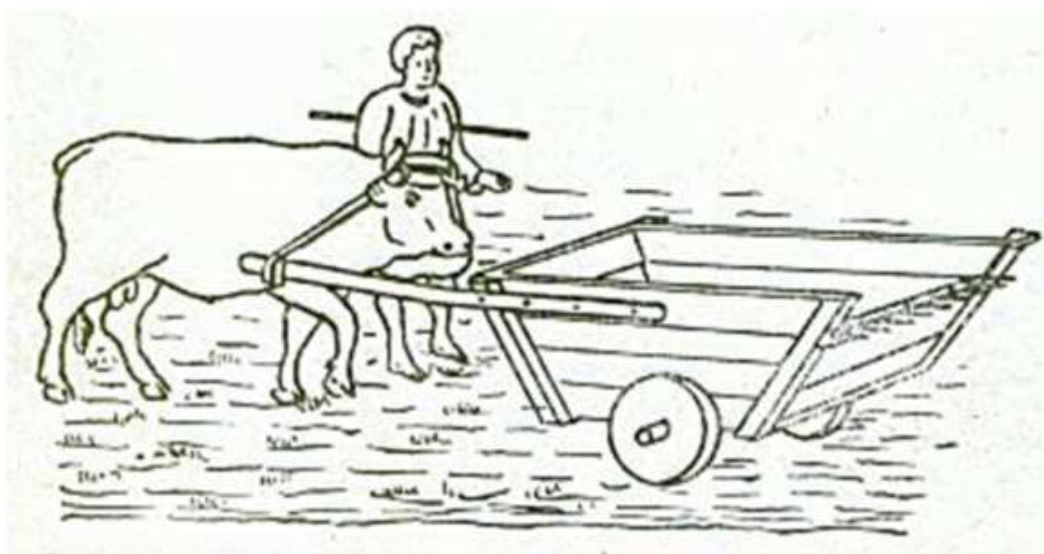


konceptyjne nad skonstruowaniem autonomicznego kombajnu (Miu 2016, Foster *i in.* 2017).

### 2.3. Rozwój technologii zbioru zbóż

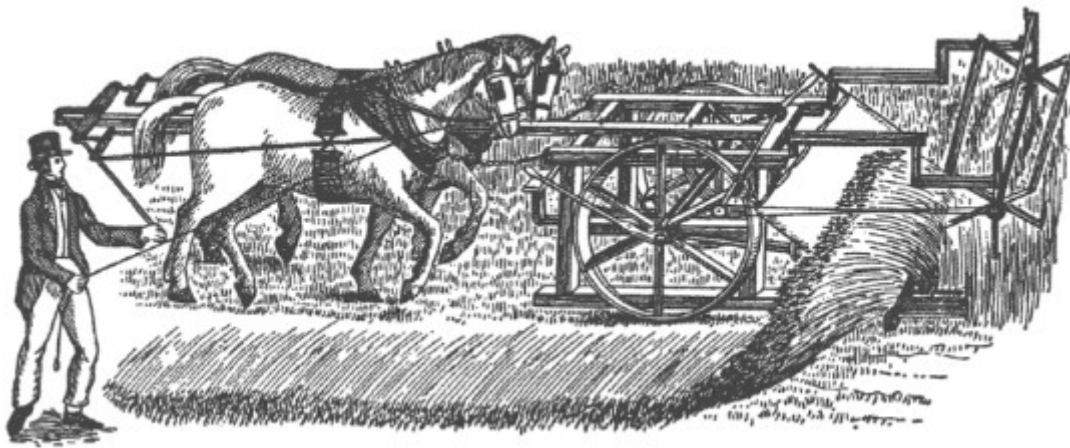
Na przestrzeni wieków rolnictwo uległo wielu przemianom. Pierwotnie do ścinania zbóż używano zaostroszanej krawędzi kamienia. Z biegiem czasu zastępowano go przez elementy wykonane z brązu i żelaza, aby ostatecznie wykorzystywać stalowy sierp. Z czasem sierp był stopniowo wypierany przez kosę, która pierwotnie była stosowana tylko do koszenia traw, ale ze względu na większą wydajność zaczęto używać jej również do cięcia zbóż. Były to podstawowe narzędzia aż do początku XX wieku (Raisbeck 1964, Kanafojski 1980).

Zwiększenie wydajności i chęć odciążenia rąk ludzkich od pracy spowodowało, że od bardzo dawna zaczęto myśleć o usprawnieniu procesu zbioru zbóż. Pierwsze prymitywne urządzenia do zbioru kłosów pszenicy i jęczmienia pojawiły się już pod koniec pierwszego wieku naszej ery. Była to prosta konstrukcja na bazie dwukołowego wozu z przymontowanym w przedniej części grzebieniem do obrywania kłosów, które spadały do wnętrza skrzyni (ryc. 6). Mimo, że urządzenie generowało olbrzymie straty oraz niszczyło słomę było w użyciu przez ponad 300 lat, aż do okresu średniowiecza kiedy to zaniechano koncepcji unowocześniania zbioru i używano głównie sierpów i kos (Kanafojski 1980, Miu 2016).



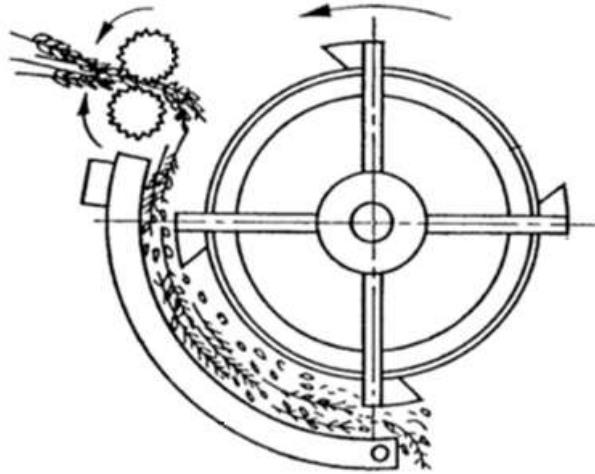
Ryc. 6. Urządzenie do zrywania kłosów (źródło: Kanafojski 1980)

Na przełomie XVIII i XIX wieku pojawiła się koncepcja wykorzystania mechanizmu tnącego działającego na zasadzie nożyc. W 1822 roku stworzono koncepcję połączenia tego mechanizmu tnącego z obrotowym nagarniaczem, która w 1826 roku pozwoliła stworzyć pierwszą praktyczną i sprawnie działającą maszynę żniwną Bella (ryc. 7) (Raisbeck 1964, Kanafojski 1980, Isern 1990). Żniwiarka była pchana przez konie, a napęd przekazywany był od kół jezdnych. Niestety słabą stroną tego rozwiązania było to, że ścięty materiał był częściowo niszczone przez konie (Miu 2016).



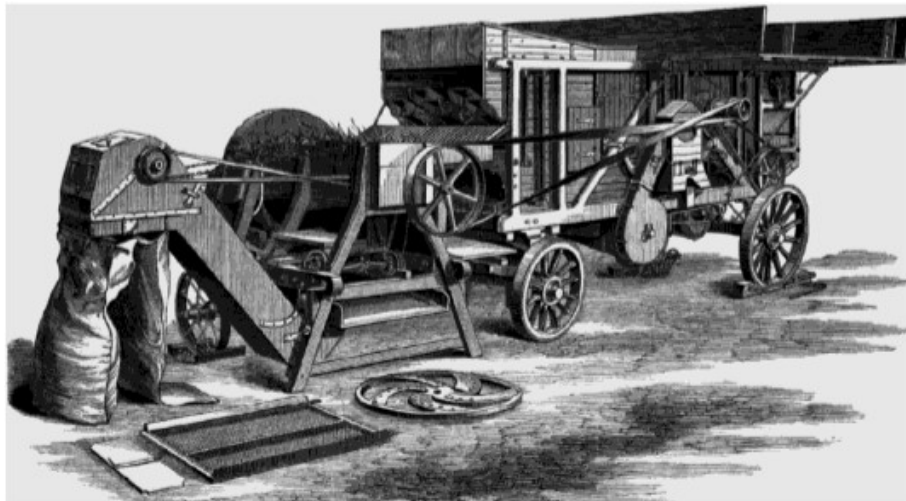
Ryc. 7. Pierwsza maszyna żniwna Bella z 1826 r. (źródło: Miu 2016)

W 1831 roku w USA zaprezentowano żniwiarkę McCormick, która miała podobną koncepcję do maszyny Bella z tą różnicą, że była ona z zaprzęgiem bocznym i ze stołem do odbierania ściętego zboża. Natomiast pierwszy kombajn, który ścinał, młócił i przesiewał ziarna zbóż został zbudowany i opatentowany przez Hiram Moore w 1835 roku. Maszyna miała długość 5,2 m oraz szerokość roboczą 4,57 m, a do napędu potrzebnych było 20 koni. Wykorzystano w niej zespół młócający z bębniem o średnicy 25 cm i czterema cepami skonstruowany przez Meikla w 1785 r., który był stosowany w młocarniach stacjonarnych (ryc. 8) (Isern 1990, Wiley 2010, Whitlam 2018).



Ryc. 8. Pierwszy zespół młócający skonstruowany przez Meikla (źródło: Bieniek 2011)

Stacjonarne młocarnie były używane od końca XVIII wieku. Początkowo były napędzane kieratem konnym, natomiast w 1841 roku skonstruowano pierwszą młocarnię napędzaną silnikiem parowym. Była to maszyna z własnym podwoziem, dzięki czemu można ją było łatwo przemieszczać z gospodarstwa do gospodarstwa. W drugiej połowie XIX wieku połączono młocarnie z wialnią tworząc młocarnie czyszczącą (ryc. 9). Usprawniło to w znacznym stopniu proces omłotu zbóż (Kanafojski 1980, Isern 1990, Hanna i Quick 2019).



Ryc. 9. Młocarnia stacjonarna firmy Clayton i Shuttleworth z 1879 r. (źródło: Miu 2016)

W USA International Harvester w 1925 roku wyprodukował pierwszy kombajn ciągnięty przez ciągnik. W rzeczywistości był to zaadaptowany, znany już wcześniej kombajn konny, w którym zwyczajnie zastąpiono zaprzęg konny. Pierwsze ciągnikowe

kombajny ze względu na duże zapotrzebowanie mocy posiadały własny silnik do napędu zespołów roboczych (Wiley 2010). W 1939 roku amerykańska firma Massey Harris stworzyła pierwszy samojezdny kombajn do zbioru zbóż nazwany Model 21. W porównaniu z kombajnami konnymi była to mała maszyna, ale posiadała przyrząd żniwny umieszczony centralnie z przodu i zbiornik na ziarno. Kombajn jak na swoje czasy był bardzo wydajny i potrafił zebrać około 12 ha dziennie. Był to olbrzymi kamień milowy w rozwoju kombajnów i technologii zbioru zbóż (Quick i Buchele 1978, Isern 1990, Whitlam 2018).

Przed wojną w Europie istniało przekonanie, że używanie kombajnów i jednoetapowego zbioru zbóż w klimacie wilgotnym i zmiennym jest niezasadne. W 1927 roku niemiecka firma Krupp stworzyła pierwszą snopowiązałkę z napędem od wałka odbioru mocy, a w 1940 roku ten sam sposób przekazywania napędu wykorzystwała firma CLAAS do skonstruowania swojego pierwszego przyczepianego kombajnu przedstawionego na rycinie 10 (Kanafojski 1980, Miu 2016, Whitlam 2018).



Ryc. 10. Pierwszy przyczepiany kombajn CLAAS z napędem przekazywanym od WOM ciągnika (źródło: Miu 2016)

Dynamiczny rozwój postępu technicznego w rolnictwie, w tym również w technologii zbioru zbóż nastąpił po wojnie. Firma CLAAS wyprodukowała mały, ciągnikowy kombajn o nazwie Super. Był dostosowany do potrzeb małych gospodarstw. Nie posiadał co prawda własnego zbiornika ziarna, ale został wyposażony w workownice,

które napełniały jednocześnie cztery worki. Dynamiczny, powojenny rozwój kombajnów doczepianych szybko przekształcił się w konstruowanie i produkcję maszyn samobieżnych (Kanafojski 1980, Whitlam 2018, Hanna i Quick 2019). Na europejskim rynku pierwszy kombajn samobieżny został wyprodukowany w 1951 roku przez firmę Fahr, następnie firma CLAAS zaprezentowała w 1953 roku model Herkules, który potrafił wymłócić 5 ton pszenicy na dzień. Były to kombajny z poprzecznie ustawionym bębniem młóczącym i klawiszowym układem separacji tzw. konwencjonalny system młócząco-separujący (Miu 2016).

W Polsce po wojnie rolnictwo było słabo zmechanizowane. Ciągniki i maszyny, które należały do Państwowych Nieruchomości Ziemskich (późniejszych Państwowych Gospodarstw Rolnych) były zbieraniną przedwojennego sprzętu pochodzącego z Niemiec, Związku Radzieckiego oraz Stanów Zjednoczonych (Bieniek 2011). Zbiór zbóż odbywał się przestarzałymi kosiarkami, żniwiarkami i snopowiązałkami. Pod koniec lat czterdziestych Polska otrzymała radzieckie kombajny ciągnikowe Rostelmasz Staliniec 6 oraz samobieżne kombajny S-4. Ten drugi kombajn doskonale sprawdzał się w polskich warunkach. Import kombajnu S-4 był zbyt mały do potrzeb krajowego rolnictwa, dlatego podjęto decyzję o zakupie licencji i rozpoczęciu produkcji w Płockiej Fabryce Maszyn Żniwnych. Pierwszy kombajn nazwany ZM-4 opuścił fabrykę w 1954 roku. Następnie w roku 1959 wprowadzono wiele znaczących zmian w budowie tego kombajnu i zmieniono jego nazwę na Vistula (ryc. 11). W polskim rolnictwie maszyna ta odegrała kluczową rolę i niewątpliwie zmechanizowała zbiór zbóż (Mazur 2006).



Ryc. 11. Pierwszy kombajn produkcji polskiej: Vistula (źródło: Mazur 2006)



Kombajn Vistula był powszechnie użytkowany na polskich polach do początku lat siedemdziesiątych po czym został zastąpiony nowym modelem kombajnu produkcji FMŻ o nazwie Bizon (ryc. 12). Na początku produkcji maszyny te były intensywnie modernizowane i posiadały szereg innowacyjnych rozwiązań. Najbardziej zaawansowanym technicznie modelem, przeznaczonym głównie dla PGR był kombajn Bizon Gigant (Liska 1985). Posiadał on m.in. hydrostatyczny napęd, szereg czujników monitorujących parametry pracy, regulowaną prędkość rozładunku ziarna oraz system regulacji prędkości w zależności od obciążenia. Niestety kryzys polityczny w latach osiemdziesiątych oraz późniejsze zmiany ustrojowe przyczyniły się do tego, że kombajny rodzimej produkcji przestały być odpowiednio modernizowane i przestały konkurować z zachodnimi markami (Bieniek 2011, Molendowski i Romański 2011, Molendowski *i in.* 2012).



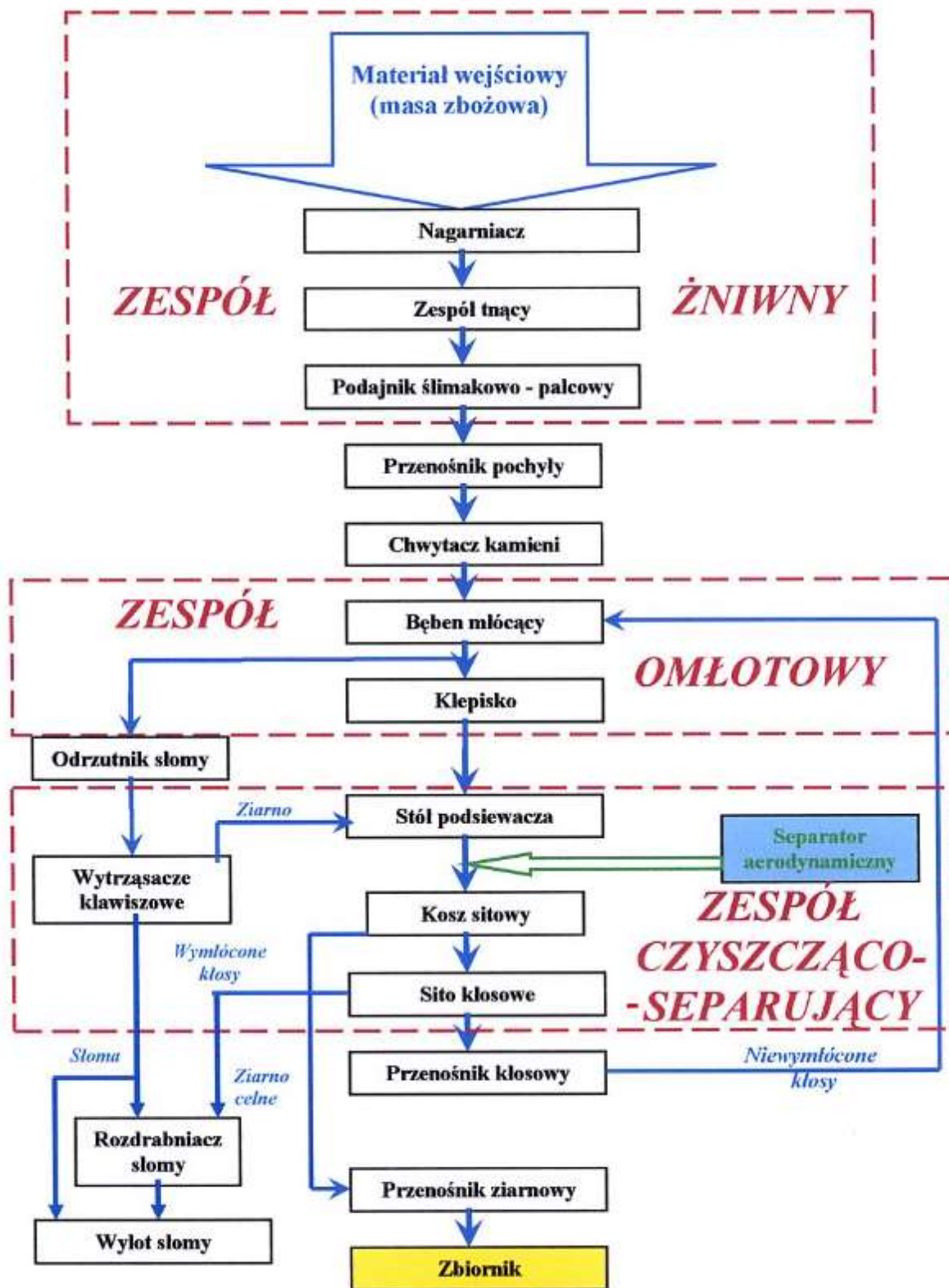
Ryc. 12. Kombajn polskiej produkcji: Bizon Z056 Super (źródło: opracowanie własne)

Wraz z wynalezieniem i powszechną produkcją maszyn samobieżnych rozwój kombajnów do zbioru zbóż ukierunkowany był na zwiększenie przepustowości, zmniejszenie strat i uszkodzeń ziarna oraz ergonomię pracy (Feiffer *i in.* 2005). W latach sześćdziesiątych zaczęto produkować pierwsze kombajny z poziomowaniem podwozia. W Europie pionierem tego systemu była włoska firma Laverda, natomiast w USA International Harvester, który w 1963 roku zaprezentował model 403 z automatycznym systemem poziomowania maszyny zarówno poprzecznie jak i wzdłużnie. Ta sama

amerykańska firma w 1977 roku zaprezentowała pierwszy kombajn o wzdłużnym przepływie masy tzw. axial-flow, który był wyposażony w jeden wzdłużny bęben młócaço-separujący. Był to kamień milowy w zakresie zwiększenia przepustowości zespołów roboczych kombajnu a tym samym zwiększenia wydajności zbioru zbóż (Miu 2016).

#### **2.4. Budowa i zasada działania kombajnu do zbioru zbóż**

Od momentu wynalezienia pierwszych kombajnów do zbioru zbóż jego konstrukcja przeszła szereg gruntownych modernizacji i zmian. Nowoczesne kombajny cechują się uniwersalnością i wysokimi parametrami pracy (Krzysiak *i in.* 1998, Bieniek *i in.* 2008a, 2017, Spokas i Steponavičius 2011, Böttinger 2013, Jagiełło 2013, Sikora 2013, Gaworski *i in.* 2015). Są to maszyny przeznaczone głównie do jednoetapowego zbioru zbóż i innych roślin zbieranych na ziarno lub nasiona. Podczas jednego przejazdu plon rozdzielany jest na dwie główne frakcje: ziarno i słomę. Głównymi zespołami roboczymi kombajnu do zbioru zbóż są: zespół żniwny, który ścina i transportuje masę zbożową, zespół młócający wraz z zespołem oddzielającym oraz zespół czyszcząco-separujący. Ponadto możemy wyróżnić układ przenośników ziarna wraz z zbiornikiem na ziarno i urządzeniem wyładowczym oraz zespół gospodarowania resztkami pożniwnymi (rozdrabniacz słomy i rozrzutnik plew) (Kutzbach i Quick 1999, Feiffer *i in.* 2005, Dreszer *i in.* 2015, Hanna i Quick 2019). W maszynie występują również układy napędowe tj. silnik i układ przeniesienia napędu, układ jezdny, układ hydrauliczny oraz elektroniczny układ kontrolno-sterujący (Jagiełło 2013, Mazurek *i in.* 2015, Miu 2016). Na rycinie 13 przedstawiono schemat przepływu masy zbożowej przez kombajn o klasycznej budowie.



Ryc. 13. Schemat blokowy przepływu masy zbożowej w klasycznym kombajnie do zbioru zbóż (źródło: Bieniek 2010)



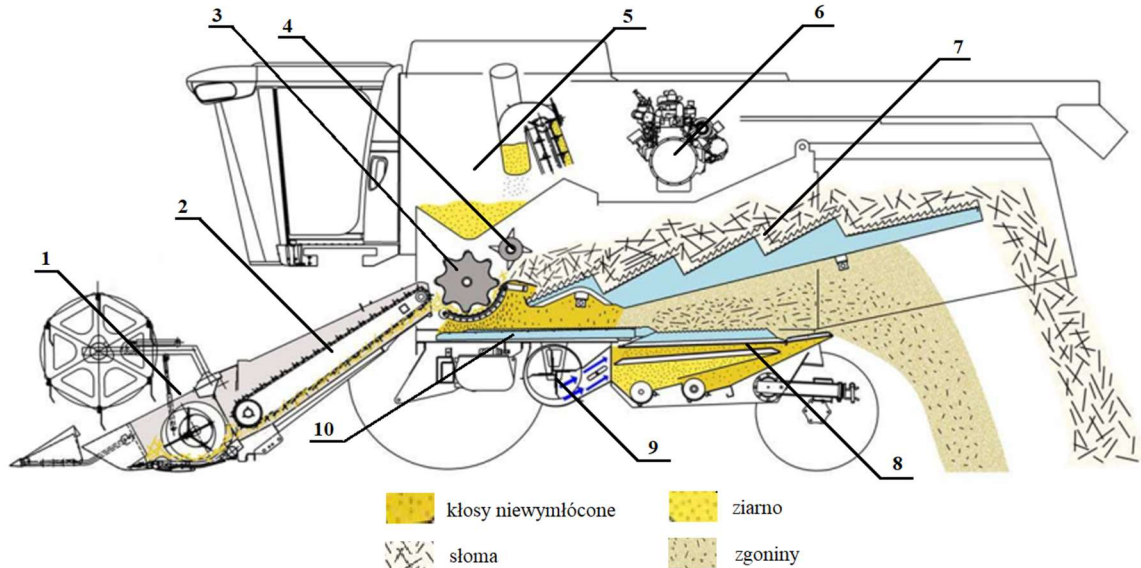
W klasyfikacji kombajnów można posłużyć się kilkoma kryteriami tj.: przepustowość zespołu omlotowego, rodzaj zespołów młócaço-wydzielających oraz rodzaj układu jezdnego (Kutzbach i Quick 1999, Sikora 2013). Pod względem konstrukcyjnym możemy wyróżnić trzy typy kombajnów:

- Kombajn typu I, w którym przepływ masy jest wzdłużny, zespół tnący umieszczony jest czołowo, a materiał po ścięciu przemieszczany jest prostoliniowo. W kombajnach tego typu szerokość robocza zespołu żniwnego jest równa szerokości zespołu omlotowego. Obecnie są to głównie kombajny poletkowe, stosowane w stacjach doświadczalnych.
- Kombajny typu L są to maszyny nabudowywane lub przyczepiane do ciągnika, z bocznym zespołem żniwnym. Ścięty materiał przemieszczając się z przyrządu tnącego do bębna młócacego zmienia kierunek pod kątem prostym. Ze względu na małą wydajność, słabą widoczność i szereg innych aspektów kombajny tego typu nie są obecnie produkowane przez żadnego producenta.
- Kombajny typu T są maszynami samobieżnymi, zespół żniwny umieszczony jest centralnie z przodu maszyny. Początkowo skoszony materiał przemieszczany jest poprzecznie, od boków do środka za pomocą podajnika ślimakowo-palcowego, a następnie wzdłużnie, przenośnikiem łańcuchowo listwowym do bębna młócacego. W kombajnach typu T stosunek szerokości listwy tnącej do szerokości bębna młócacego jest znacznie większy niż w pozostałych typach oraz może się zmieniać poprzez wymianę zespołu żniwnego (Kanafojski 1980, Sikora 2013).

Ze względu na rodzaj zespołu młócaço-oddzielającego możemy wyróżnić dwa główne typy kombajnów: konwencjonalny i rotorowy (axial-flow). Obydwa typy kombajnów według kryterium konstrukcyjnego zaliczają się do kombajnów typu T (Kutzbach i Quick 1999, Miu 2016, Masek *i in.* 2017, Li *i in.* 2020).

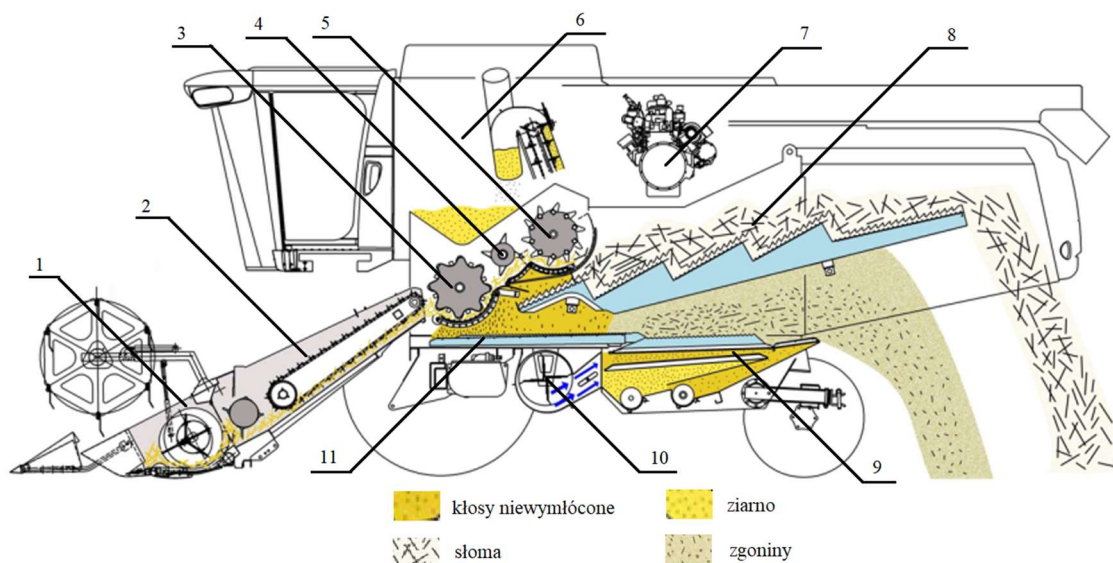
Konwencjonalny zespół młócaço-wydzielający składa się z poprzecznie zamontowanego bębna młócacego o stycznym zasilaniu masą zbożową, pod którym znajduje się klepisko, bębna przyspieszającego słomę tzw. odrzutnika słomy oraz wytrząsacza klawiszowego słomy. W zależności od producenta i modelu stosuje się różne szerokości bębna młócacego oraz różną liczbę klawiszy wytrząsacza. W celu zwiększenia przepustowości stosuje się większą powierzchnię separacji (Jagiełło 2013, Fu *i in.* 2018). Na rynku maszyn rolniczych można spotkać się z kombajnami 4, 5, 6 lub 8

klawiszowymi (Feiffer *i in.* 2005, Sikora 2013, Miu 2016, Fu *i in.* 2018). Na rycinie 14 przedstawiono schemat budowy kombajnu z konwencjonalnym systemem omłotowym.



Ryc. 14. Schemat technologiczny kombajnu do zbioru zbóż z konwencjonalnym systemem omłotu: 1 – nagarniacz, 2 – przenośnik pochyły 3 – zespół młócający, 4 – odrzutnik słomy, 5 – zbiornik na ziarno, 6 – silnik, 7 – wytrząsacz klawiszowy, 8 – zespół czyszczący, 9 – wentylator, 10 – stół podsiewacza (źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów AGCO 2013)

W celu zwiększenia wydajności i zmniejszenia strat zaczęto rozbudowywać konwencjonalny zespół młócaço-wydzielający i stosować układ wielobębnowy (ryc. 15). Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest aktywny separator bębnowy, zamontowany za odrzutnikiem słomy, pod którym znajduje się dodatkowe klepisko. Jego zadaniem jest aktywne oddzielenie ziarna od słomy w początkowej fazie separacji, co pozwala odciążyć wytrząsacz klawiszowy i osiągnąć wyższą przepustowość bez zwiększenia strat (Gieroba i Dreszer 1993a, Kutzbach i Quick 1999).

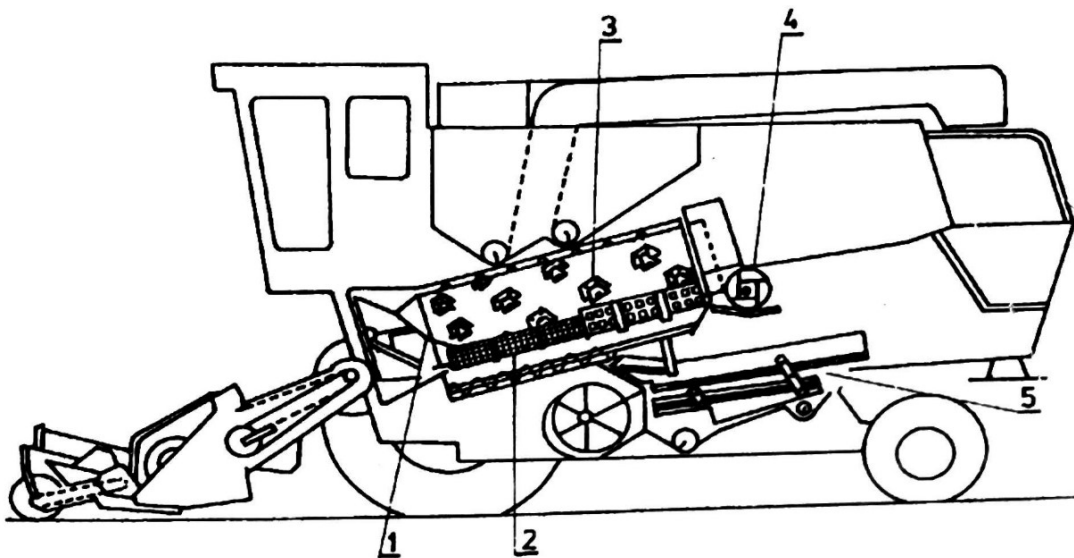


Ryc. 15. Schemat technologiczny kombajnu do zbioru zbóż z konwencjonalnym systemem omłotu i aktywnym bębniem separującym: 1 – nagarniacz, 2 – przenośnik pochyły 3 – zespół młócający, 4 – odrzutnik słomy, 5 – separator rotacyjny, 6 – zbiornik na ziarno, 7 – silnik, 8 – wytrząsacz klawiszowy, 9 – zespół czyszczący, 10 – wentylator, 11 – stół podsiewacza (źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów AGCO 2013)

Niektórzy producenci stosują dodatkowy bęben wstępnego omłotu przed bębniem młócającym. Jego zadaniem jest równomierne rozłożenie masy i wykonanie omłotu około 20% ziaren przed bębniem głównym. To rozwiązanie również ma za zadanie zwiększenie przepustowości przy równoczesnym zmniejszeniu poziomu strat. W porównaniu z aktywnym separatorem masa zbożowa jest traktowana bardziej agresywnie przez wstępny bęben młócający, przez co w niektórych warunkach można zaobserwować zwiększoną liczbę uszkodzeń ziarniaków (Fu *i in.* 2018, Koch i Zeuner 2020). W kombajnach z konwencjonalnym systemem omłotu konstruktorzy próbowali również zastąpić wytrząsacz klawiszowy poprzez wielobębnowy układ separujący. Niestety rozwiązanie to nie sprawdziło się najlepiej ze względu na generowanie zwiększonej ilości uszkodzeń. Ponadto w procesie separacji występowało znaczne rozdrobnienie słomy, szczególnie nasilające się w bardzo suchych warunkach co zwiększało stopień zanieczyszczeń i podnosiło energochłonność (Gieroba i Dreszer 1993a, Gieroba *i in.* 1993, Dreszer i Gieroba 1995). Obecnie żaden z producentów kombajnów do zbioru zbóż nie stosuje wielobębnowego układu separującego (Feiffer *i in.* 2005, Fu *i in.* 2018).

Kombajn o osiowym przepływie masy posiada jeden lub dwa wzdłużnie umiejscowione bębny młócająco-oddzielające (ryc. 16). Pod całą długością bębna znajdują

się klepiska. Oddzielanie ziarna od słomy w tym typie kombajnu jest intensywniejsze mimo mniejszej powierzchni separacji co wpływa na zwiększenie przepustowości przy jednoczesnym niskim poziomie strat. Również ziarno odznacza się małą ilością uszkodzeń dzięki osiowemu przepływowi masy (De Baerdemaeker i Saeys 2013, Fu *i in.* 2018).



Ryc. 16. Schemat rozmieszczenia zespołów roboczych w kombajnie do zbioru zbóż z rotorowym systemem młócająco-separującym: 1 – bęben (rotor), 2 – klepisko wydzielająco-separujące (ruszt), 3 – elementy młócające, 4 – odrzutnik przechwytyjący masę zbożową (źródło: Gieroba i Dreszer 1993a)

W wyniku intensywnych prac nad zwiększeniem przepustowości skonstruowano również wersję mieszaną (hybrydową) zespołu młócająco-wydzielającego. Kombajn tego typu wyposażony jest w tradycyjny, poprzeczny bęben młócający, natomiast wytrząsacz klawiszowy został zastąpiony przez wzdłużny separator rotorowy. Jest to połączenie zespołów roboczych kombajnu z konwencjonalnym systemem omłotu oraz o osiowym przepływie masy. Hybrydowy zespół młócająco-wydzielający charakteryzuje się wysoką przepustowością oraz stosunkowo niewielkimi stratami. W wyniku połączenia wielobębnowego zespołu omłotowego o stycznym zasilaniu z aktywnym separatorem słoma jest mocno rozdrabniana przez co wzrasta ilość zanieczyszczeń (Feiffer *i in.* 2005, Fu *i in.* 2018).

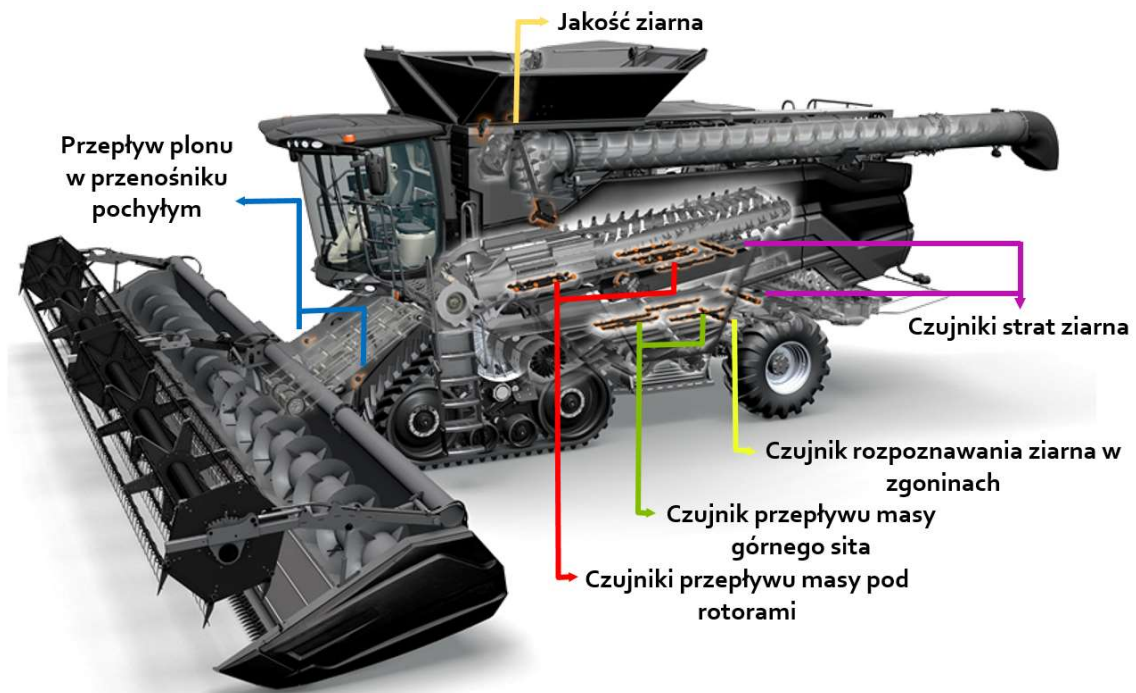
## 2.5. Nowoczesne rozwiązania techniczne stosowane w kombajnach zbożowych

Obecnie produkowane nowoczesne kombajny do zbioru zbóż mogą być wyposażone w szereg systemów kontrolno-sterujących wspomagających operatora podczas pracy. Głównym celem zastosowania takich rozwiązań jest zwiększenie wydajności, osiągnięcie wyższej jakości zbieranego ziarna, ograniczenie strat oraz poprawa ergonomii pracy (Chen *i in.* 2011, De Baerdemaeker i Saeys 2013, Broholm i Morrison 2017). Do najbardziej użytecznych i najczęściej stosowanych rozwiązań można zaliczyć: system poziomowania przyrządu żniwnego, system przepływu masy, kontroli strat i jakości ziarna, automatyczny system regulacji parametrów roboczych, system automatycznego prowadzenia, mapowanie plonu oraz system telematyczny (Krzyżaniak i Kowalik 2019). Zautomatyzowanie i komputeryzacja maszyn rolniczych sprawia, że istotne jest przeprowadzanie badań dotyczących procesów zachodzących w zespołach roboczych w warunkach eksploatacyjnych w celu oceny przydatności, optymalizacji pracy oraz modernizacji tych systemów (Tanaś i Zagajski 2010a, Hermann *i in.* 2017).

Poziomowanie zespołu żniwnego jest bardzo ważnym parametrem, szczególnie przy stosowaniu uprawy uproszczonej. Obecnie stosuje się coraz szersze przyrządy robocze, a szerokość największych przekracza 12 m. Takie konstrukcje mają na celu zredukowanie liczby przejazdów na polu i zwiększenie wydajności (Krzyżaniak i Kowalik 2019). W przypadku pól z nierównościami, występował problem utrzymania szerszej listwy tnącej równolegle do podłoża. System automatycznego poziomowania poprzecznego zapewnia równą wysokość ścierniska i kopiowanie nierówności na powierzchni pola (Jagiełło 2013). Zespół żniwny, który jest kompatybilny do pracy w trybie automatycznym różni się od standardowego jedynie tym, że wyposażony jest w kilka czujników ślizgowych umieszczonych pod spodem (De Baerdemaeker i Saeys 2013).

Wraz z wprowadzeniem na rynek kombajnów o wysokiej wydajności masowej, przekraczającej w największych maszynach 40 ton ziarna na godzinę, konieczne było wprowadzenie do standardowego wyposażenia systemów monitorujących straty ziarna. System po skalibrowaniu przez operatora pokazuje w czasie rzeczywistym ilość ziarna wypadającego poza kombajn z układu młócająco-oddzielającego i układu czyszczącego oraz ilość masy niedomłotów wracających z powrotem do układu młócającego. Dzięki temu rozwiązaniu operator może zoptymalizować ustawienia parametrów roboczych

maszyny aby dostosować je do aktualnie panujących warunków (Mostofi Sarkari 2010, Zhao *i in.* 2011, Liang *i in.* 2015, Dieckmeyer i Schröder 2022). Bardziej rozbudowany system wyposażony jest w szereg czujników rozmieszczonych wzdłuż wszystkich zespołów roboczych kombajnu (ryc. 17). Pozwala on na monitorowanie ilości masy zasilającej zespół młócający, rozkład masy w części młócającej i separującej oraz w zespole czyszczącym. Dzięki takiemu rozmieszczeniu zaawansowanych czujników możliwa jest automatyczna regulacja prędkości jazdy w celu dostosowania przepustowości do obciążenia silnika i poziomu strat. Może być też stosowana automatyczna regulacja parametrów roboczych w celu zoptymalizowania jakości pracy. Wykorzystywanie systemów automatycznych pozwala odciążyć operatora i osiągnąć optymalne rezultaty podczas zbioru (Tanaś i Zagajski 2010a, Hermann *i in.* 2017, Vöcking *i in.* 2017).



Ryc. 17. Rozmieszczenie zaawansowanych czujników przepływu masy i strat ziarna w kombajnie z systemem kontrolującym przepływ masy (źródło: Krzyżaniak i Kowalik 2019)

Podczas prowadzenia po polu kombajnu z przyrządem żniwnym o szerokości przekraczającej siedem metrów operator musi poświęcić dużo uwagi na utrzymanie prostego toru jazdy oraz kontrolowanie położenia listwy tnącej. Jest to ważne dla wykorzystania pełnej szerokości roboczej a tym samym pełnego potencjału wydajności kombajnu. Podczas zbioru słomy, dużo łatwiej jest ją wtedy podbierać z prostego i dobrze

uformowanego wału. W celu odciążenia operatora wprowadzono system automatycznego prowadzenia, który kieruje kombajnem według wyznaczonego śladu (Krzyżaniak i Kowalik 2019). Najczęściej do tego celu wykorzystywany jest system określający pozycję maszyny na podstawie sygnału GPS. Podczas zbioru zbóż wystarczający jest standardowy sygnał o dokładności prowadzenia +/- 30 cm bez konieczności kupowania dodatkowego sygnału korekcyjnego RTK. Podczas pierwszego przejazdu wyznacza się linię A-B, a następnie każdy następny przejazd odbywa się równoległe do wyznaczonego śladu z uwzględnieniem szerokości roboczej. Można również zaprogramować przejazd po łuku w zależności od kształtu pola. Wszystkie ślady przejazdu mogą zostać zapisane w systemie i być wykorzystywane na tym samym polu w kolejnych latach, bez konieczności ponownego ich wyznaczenia (De Baerdemaeker i Saeys 2013, Gozdowski 2018). Niektórzy producenci oferują również bardziej zaawansowane systemy umożliwiające wykorzystywanie map od innych maszyn tj. siewnik, rozsiewacz nawozu lub opryskiwacz. Możliwe jest wtedy automatyczne prowadzenie kombajnu podczas zbierania zboża, przejazdów na uwrociach oraz wykonywanie nawrotów w trybie automatycznym (Krzyżaniak i Kowalik 2019). Niektórzy producenci kombajnów do zbioru zbóż stosują mniej zaawansowane systemy prowadzenia automatycznego, bazujące na czujniku laserowym umieszczonym na przyrządzie żniwnym lub kabinie operatora. Na podstawie odbitych promieni lasera system rozpoznaje skoszony łąn zboża i prowadzi maszynę wzdłuż tego śladu. Jest to tańsze rozwiązanie, ale cechuje się mniejszą dokładnością, która jest zależna od czynników zewnętrznych tj. pył i kurz oraz wyległy łąn (Bieniek 2011, De Baerdemaeker i Saeys 2013).

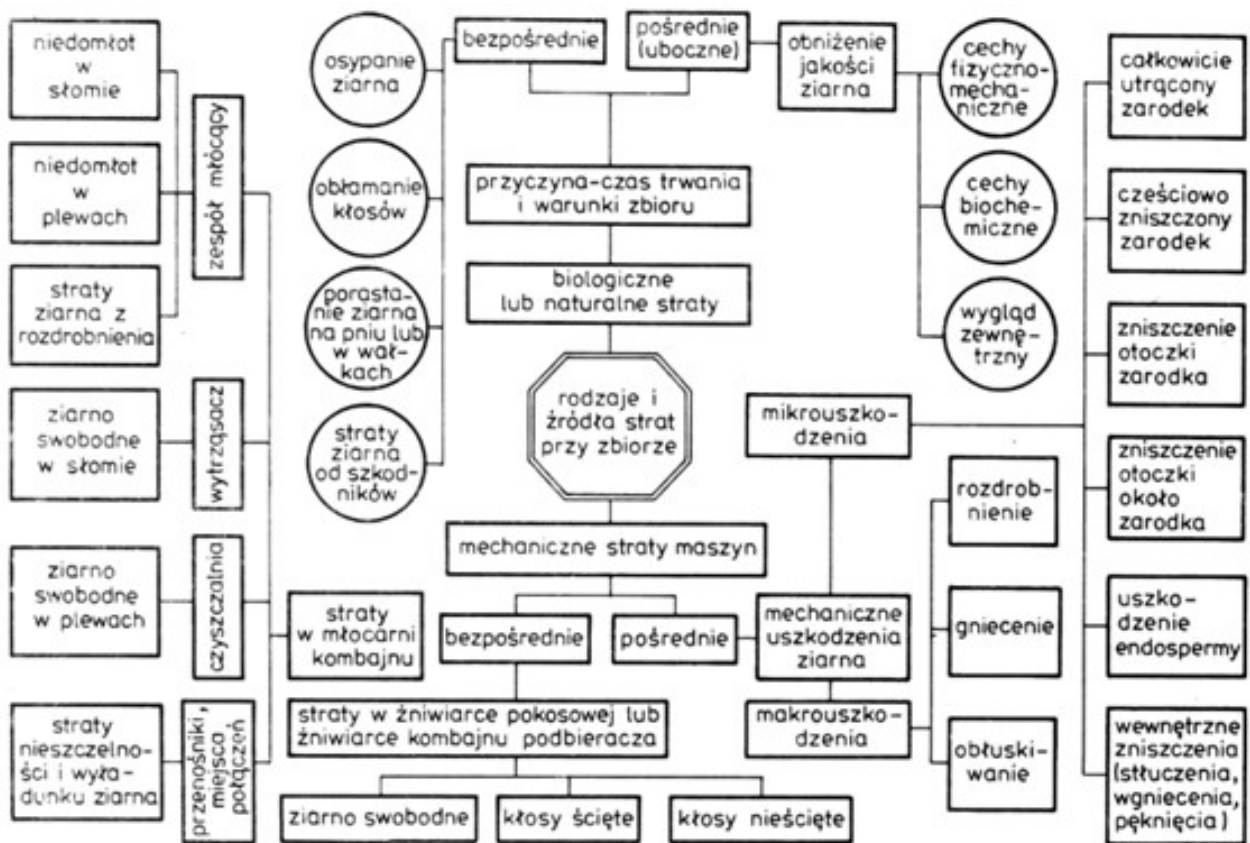
Spośród wyposażenia dodatkowego w kombajnach do zbioru zbóż coraz większą popularnością cieszą się systemy mapowania plonów. Dane o wielkości plonu uzyskane podczas zbioru są bardzo przydatne przy tworzeniu planów nawozowych. System składa się z czujnika wilgotności i czujnika przepływu ziarna umieszczonych w przenośniku ziarnowym oraz z anteny GPS do ustalania współrzędnych geograficznych podczas sprawdzania próbki ziarna (Samborski 2018, Munch 2019, Astanakulov *i in.* 2021). Mapy plonu mogą zostać zapisane na kartę pamięci lub jeśli maszyna jest wyposażona w system telematyczny, przesłane bezpośrednio na serwer przy wykorzystaniu transmisji danych sieci komórkowej. System ten nie tylko służy do przesyłania danych dotyczących plonu, ale również rejestruje inne parametry eksploatacyjne takie jak: parametry robocze silnika, zużycie paliwa, wydajność i czas pracy, aktualne położenie maszyny, kody błędów oraz informację o zbliżającym się przeglądzie technicznych (Oksanen *i in.* 2016, Zareei i

Abdollahpour 2016, Michielan i Mattetti 2022, Krzyżaniak i Kowalik 2022). Wszystkie przesłane dane można odczytać w aplikacji mobilnej albo za pomocą przeglądarki stron internetowych. Rozwiązanie to jest bardzo pomocne w czasie zbiorów do zdalnego monitorowania parametrów roboczych oraz po zakończonych zniwach może służyć do generowania raportów, oceny wykorzystania czasu pracy i optymalizacji zbioru w następnych sezonach agrotechnicznych (Kamilaris *i in.* 2017, Samborski 2018).

## **2.6. Straty ilościowe i jakościowe podczas kombajnowego zbioru zbóż**

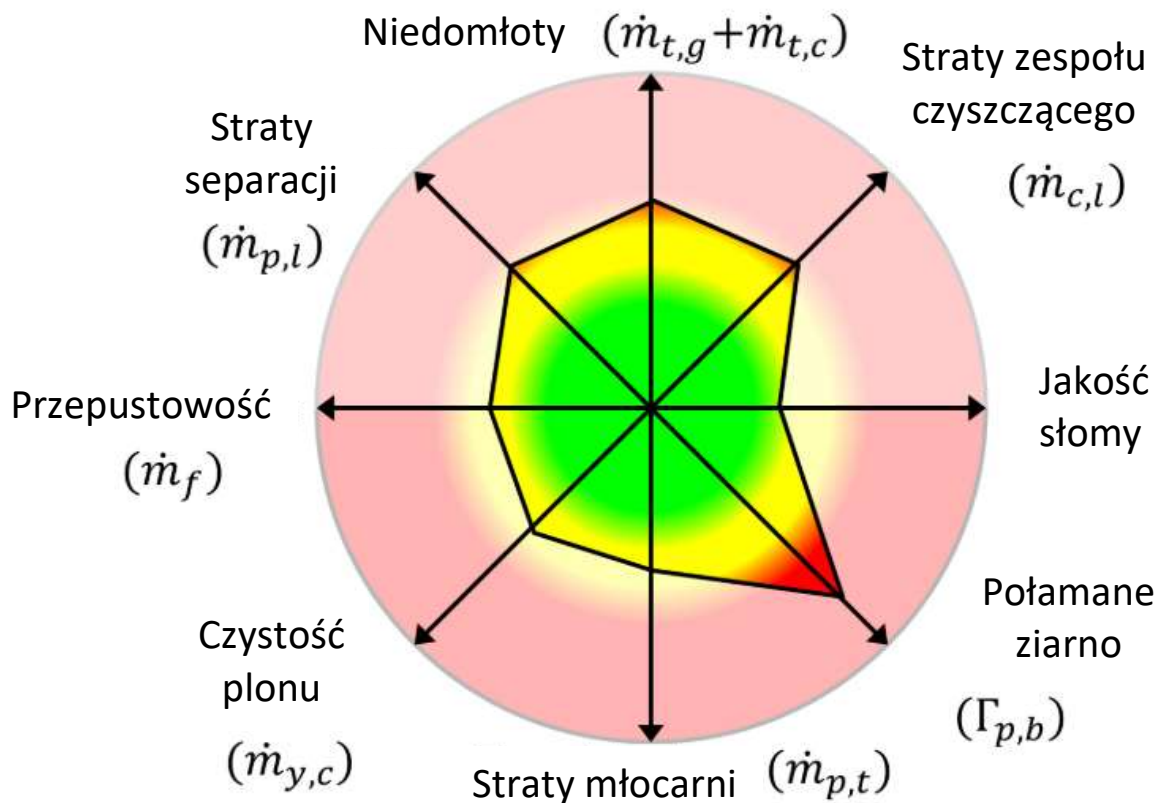
Największą wadą mechanicznego zbioru zbóż są straty ziarna, które można podzielić na straty ilościowe (bezpośrednie) oraz straty jakościowe (pośrednie). W skali całego kraju wielkość strat ziarna ma bardzo duże znaczenie ekonomiczne, szczególnie w przypadku zbioru materiału nasiennego (Tanaś *i in.* 2008, Złobecki i Langman 2010). Przeprowadzono szereg badań dotyczących powstawania strat ziarna podczas kombajnowego zbioru zbóż i rzepaku, które wykazały wpływ parametrów konstrukcyjno-technologicznych zespołów roboczych kombajnu oraz właściwości fizycznych zbieranych zbóż (Gieroba i Dreszer 1993b, Gieroba *i in.* 1993, Mikucki 1993, Miłosz 1993a, Dreszer 1994, Szpryngiel *i in.* 1995, Miu 2004, Banasiak *i in.* 2006, Bieniek *i in.* 2006, Zagajski i Dreszer 2006, Bieniek *i in.* 2007, 2008b, 2017, Detyna *i in.* 2006, Miu i Kutzbach 2007, 2008, Voicu *i in.* 2007, Żak *i in.* 2007, Craessaerts *i in.* 2007, Nguyen 2008, Špokas *i in.* 2008, 2016, Špokas i Steponavičius 2010, Tanaś i Zagajski 2010a, Barac *i in.* 2011, Mahmoudi *i in.* 2012, Chegini i Mirnezami 2012, Jamshidi *i in.* 2014, Mirasi, Kamran, *i in.* 2014, Patel i Varshney 2014, Sattar *i in.* 2015, Myhan i Jachimczyk 2016, Beckmann *i in.* 2017, Hermann 2018, Korn 2018, Šotnar *i in.* 2018, Zubko *i in.* 2018, Tomchuk 2020). Na rycinie 18 przedstawiono rodzaje i źródła strat powstających podczas zbioru zbóż kombajnem.





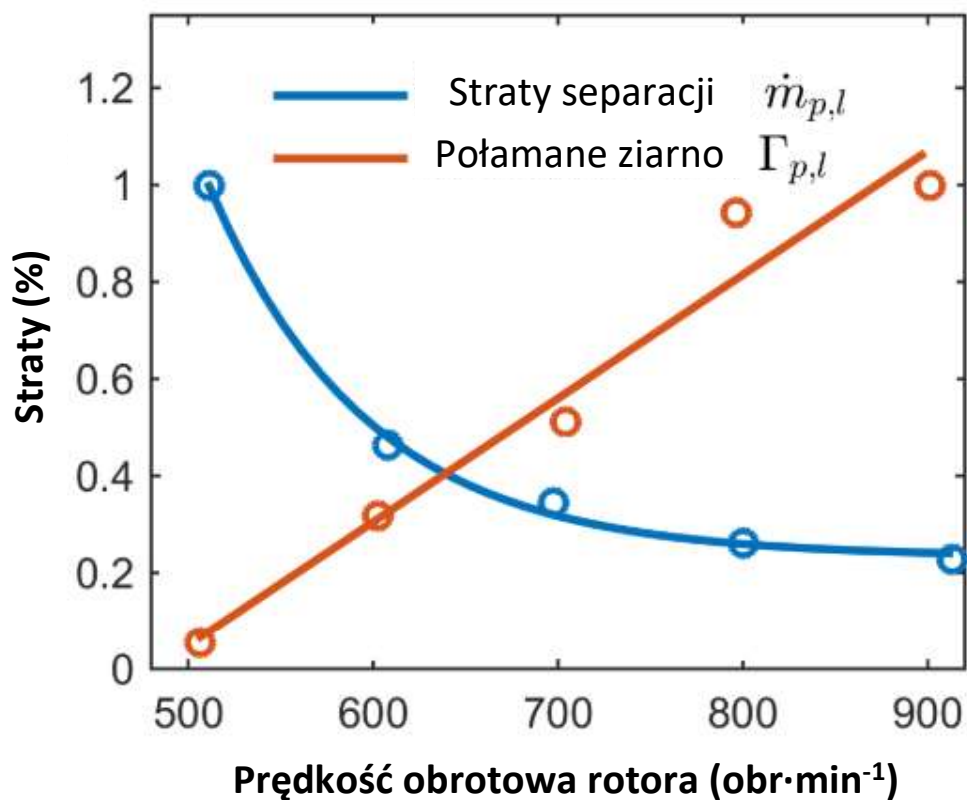
Ryc. 18. Rodzaje i źródła strat przy kombajnowym zbiorze zbóż (źródło: Miłosz 1984)

Podczas kombajnowego zbioru zbóż proces osiągnięcia wysokiej wydajności musi równoważyć się z osiągnięciem odpowiedniej jakości ziarna oraz jak najmniejszymi stratami. Optymalizacja wydajności jest trudnym procesem i wpływa na nią wiele czynników. Nie można uzyskać doskonałej jakości, najwyższej przepustowości i braku strat. Jeśli wybierzemy jeden kluczowy parametr pozostałe mogą osiągnąć gorszy rezultat (Eggerl 2017, Hermann *i in.* 2017). Na rycinie 19 przedstawiono zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami zbioru podczas optymalizacji parametrów roboczych kombajnu.



Ryc. 19. Zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami zbioru podczas optymalizacji parametrów roboczych kombajnu (źródło: Hermann i in. 2017)

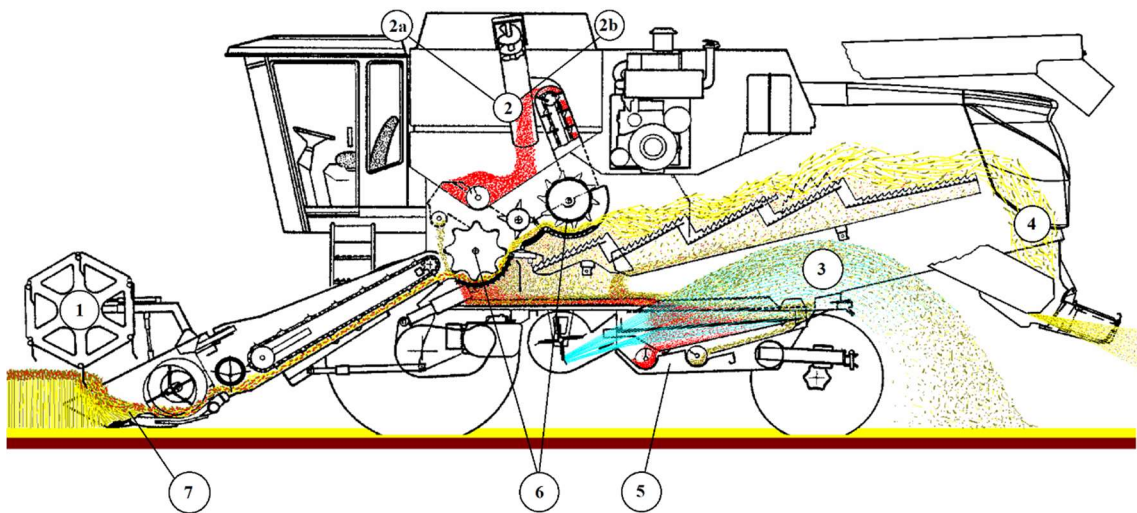
Najistotniejszymi parametrami eksploatacyjnymi kombajnu mającymi wpływ na wielkość strat ilościowych i jakościowych są: prędkość obrotowa bębna młocącego (ryc. 20), szerokość szczeliny roboczej między bębniem a klepiskiem, stopień otwarcia górnego i dolnego sita, prędkość obrotowa wentylatora oraz przepustowość (Zaman *i in.* 1992, Grochowicz i Szpryngiel 1995, Feiffer 2003a, Złobecki *i in.* 2006, Lashgari *i in.* 2008, Tanaś i Zagajski 2010b, Pishgar-Komleh *i in.* 2013, Hermann *i in.* 2016, Duma-Copcea *i in.* 2019). Biorąc zaś pod uwagę czynniki fizyczne zbieranej masy zbożowej jako najważniejsze można wyróżnić gatunek, odmianę, wilgotność, masę tysiąca ziaren, stosunek masy ziarna do masy słomy i siłę wiązania ziarna z kłosem (Złobecki 2005, Złobecki i Langman 2010, Śeran *i in.* 2019).



Ryc. 20. Wpływ zmiany prędkości obrotowej rotora na straty ilościowe i uszkodzenia ziarna (źródło: Hermann 2018)

### 2.6.1. Straty ilościowe

Straty ilościowe można zdefiniować jako ilość materiału ziarnistego, która w wyniku oddziaływania czynników zewnętrznych np.: zespołów roboczych podczas zbioru kombajnowego pozostaje na powierzchni pola. Wielkość ta zazwyczaj po przeliczeniu podawana jest w kilogramach na hektar lub w procentach odnoszących się do wielkości plonu (Feiffer 2003a, Etzbach *i in.* 2020). Straty ziarna mogą występować już przed zbiorem, następnie podczas zbioru w zespołach roboczych kombajnu (ryc. 21) oraz po zbiorze podczas transportu, suszenia i przechowywania ziarna (Feiffer *i in.* 2005, Esgici *i in.* 2016).



Ryc. 21. Miejsca powstawania strat ilościowych i jakościowych podczas zbioru zbóż kombajnem: 1 – ziarno obite nagarniaczem, 2 – mechaniczne uszkodzenia ziarna: a – makrouszkodzenia, b – mikrouszkodzenia, 3 – ziarno zawarte w plewach, 4 – ziarno zawarte w słomie, 5 – straty wskutek nieszczelnych połączeń, 6 – ziarno niedomłócone, 7 – przecięte kłosa i oberwane kłosa (źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów AGCO 2013)

Straty ziarna można podzielić na niezależne i zależne od obsługi kombajnu do zbioru zbóż. Do strat niezależnych zalicza się straty przed rozpoczęciem zbioru tj. straty spowodowane samoosypywaniem się ziarna i połamane kłosa. Przyczyną tego najczęściej są warunki atmosferyczne połączone ze zbyt późnym zbiorem. Do strat zależnych, na które wpływ mają osoby organizujące i wykonywujące zbiór zaliczamy:

- Straty przyrządu żniwnego: z nieściętych źdźbeł kłosonośnych, ziarno ze ściętych kłosów, które nie zostało wciągnięte przez przenośnik ślimakowo-palcowy oraz ziarno swobodne wybite przez złe ustawienie nagarniacza lub zbyt dużą prędkość obrotową nagarniacza (Zareei i Abdollahpour 2016, Chaab *i in.* 2020, Neitemeier *i in.* 2022).
- Straty zespołu młócająco-oddzielającego: ziarno niedomłócone, ziarno swobodne nieodseparowane od słomy oraz ziarno połamane i uszkodzone w wyniku złe ustawionych parametrów zespołu młócającego (obroty bębna i szczelina pomiędzy bębniem a klepiskiem) lub zbyt dużej przepustowości (niewłaściwa prędkość jazdy) (Tanaś *i in.* 2008, Szymanek i Dreszer 2011, Bomoi *i in.* 2022).
- Straty zespołu czyszczącego: ziarno swobodne wyrzucone przez niewłaściwe ustawienie sit żaluzjowych, zbyt wysoką prędkość obrotową wentylatora lub zbyt duże obciążenie podsiewacza i sit (niewłaściwa prędkość jazdy) (Detyna *i in.* 2006, Bieniek 2010, Mirzazadeh *i in.* 2022).

- Wszystkie pozostałe straty powstałe podczas transportu, suszenia i przechowywania ziarna (Gieroba i Dreszer 1988a, Feiffer 2003a).

### **2.6.2. Mechaniczne uszkodzenia ziarna**

W wyniku oddziaływania ruchomych elementów roboczych kombajnu na masę zbożową poprzez uderzanie, tarcie, uciskanie itp., ziarna są poddawane obciążeniom dynamicznym i quasi-statycznym, które poza celowym skutkiem takim jak oddzielenie ziarna od kłosa mogą powodować uszkodzenia mechaniczne. Technologia procesu omłotu nie jest w pełni dostosowana do właściwości biologicznych i fizykomechanicznych ziarniaków (Gieroba i Dreszer 1988a, Segit *i in.* 2003, Kornacki 2004, Zagajski i Dreszer 2006). Uszkodzenia mechaniczne obniżają wartość biologiczną ziarna. Ma to istotne znaczenie przy zbiorze nasion z przeznaczeniem na materiał siewny (Gieroba i Dreszer 1988b, Tys *i in.* 1996, Faligowska 2015, Gu *i in.* 2019, Derevjanko *i in.* 2020). Czynniki wpływające na powstawanie uszkodzeń w czasie zbioru można podzielić na trzy główne grupy:

- Właściwości i parametry omłacanej masy zbożowej (Szmigiel i Złobecki 2003, Sadowska 2006, Msuya i Stefano 2010, Szmigiel *i in.* 2014, Goli *i in.* 2016).
- Parametry eksploatacyjne zespołów roboczych (Craessaerts *i in.* 2007, Francik 2007, Omran 2008, Sadowska 2008).
- Rodzaj oraz cechy konstrukcyjne zespołu młócaço-wydzielającego (Kolowca *i in.* 1988, Miłosz 1993b, Szymanek i Dreszer 2011, Mirasi, Asoodar, *i in.* 2014, Masek *i in.* 2016).

Mechaniczne uszkodzenia ziarna można podzielić na dwie grupy: makrouszkodzenia i mikrouszkodzenia. Do pierwszej grupy zaliczyć można wszystkie ziarniaki, które mają widoczną utratę jakiegokolwiek części np.: uszkodzenie okrywy nasiennej, nasiona zgniecione i rozdrobnione, brak zarodka, brak części bielma. Druga grupa uszkodzeń jest trudna do wykrycia ponieważ zaliczają się do niej nasiona mające uszkodzony fragment tkanki, ale nie oddzielony od całości (Lityński 1987, Gieroba *i in.* 1988). W związku z tym ich wydzielenie podczas czyszczenia i sortowania jest niemożliwe. Obydwie grupy uszkodzeń mają silną zależność między sobą. Analizując wpływ zbioru kombajnowego i parametrów eksploatacyjnych na uszkodzenia ziarna należy przeprowadzić wielozmiennową analizę wariancji (Kornacki 2004).

Wyróżnić można również uszkodzenia typu biologicznego, które można wykryć jedynie sprawdzając zdolność kiełkowania. Przeprowadzone do tej pory badania wykazały, że nasiona z uszkodzeniami tego typu cechują się obniżoną wartością biologiczną podczas rozwoju roślin zarówno we wczesnych jak i późniejszych fazach organogeny (Styk *i in.* 1987, Tryka i Koper 1989, Pecen 1994, Złobecki 1995b, Szmigiel *i in.* 2014). Rośliny, które wyrosły z uszkodzonych ziarniaków są bardziej podatne na wymarzenie oraz są słabsze w rozwoju i mogą wypaść z normalnego okresu wegetacji powodując nierównomierne dojrzewanie. Opóźnienie wykłazania się roślin pszenicy jarej wyrosłej z uszkodzonych nasion może wynosić 3-4 dni, a procent roślin całkowicie niewykłoszonych jest większy dwukrotnie. Uszkodzone nasiona są dodatkowo podatne na działanie drobnoustrojów. W związku z tym ocena biologiczna wartości materiału siewnego powinna poza testem zdolności i energii kiełkowania obejmować również analizę siewek nienormalnych (Lityński 1987, Gieroba *i in.* 1988, Copeland i McDonald 2001, Grundas *i in.* 2002). Podczas przechowywania, w uszkodzonych nasionach szybciej następuje rozwój mikroorganizmów, szczególnie przy zwiększonej wilgotności. Jest to związane z tym, że uszkodzenie powierzchni ziarna ułatwia dostęp wody i tlenu. Może to powodować wystąpienie objawów samozagrzewania się, a w konsekwencji prowadzić do zmniejszenia wartości konsumpcyjnej oraz siewnej lub nawet całkowitego zepsucia. W związku z tym bardzo ważne jest również odpowiednie przechowywanie ziarna (Tys *i in.* 1996, Górski 1998, Kusińska 2008, Sypuła i Dadrzyńska 2008, Badawi *i in.* 2009, Rudziński 2011, Nadulski *i in.* 2012, Małuszyńska i Mańkowski 2022).

### 3. Problem naukowy

Z przeprowadzonej analizy dostępnej literatury wynika, że mimo poznania wielu czynników i zależności wpływających na jakość i ilość omłotu, nadal nie jest wiadomo jakie działania należy zastosować w celu dalszego zmniejszenia strat podczas kombajnowego zbioru zbóż. Nie jest też jednoznaczne czy zarówno typ zespołu młócaco-wydzielającego oraz parametry robocze kombajnu mają istotny wpływ na powstawanie strat podczas zbioru pszenicy ozimej. Duża liczba publikacji opisuje badania przeprowadzone w warunkach laboratoryjnych, na specjalnych stanowiskach badawczych, które tylko w pewnym stopniu są w stanie odzwierciedlić rzeczywiste warunki polowe. Analizując dostępną literaturę można też stwierdzić, że uzyskane w poszczególnych ośrodkach badawczych wyniki różnią się i trudno jest je porównać, ponieważ pochodzą z badań o odmiennych warunkach siedliskowych oraz dotyczą różnych gatunków zbóż i odmian. W związku z tym uzasadnione jest dalsze prowadzenie prac badawczych w celu oceny rzeczywistej jakości zbieranego materiału oraz wpływu parametrów eksploatacyjnych na powstawanie strat. Biorąc pod uwagę ciągle modernizowanie konstrukcji zespołów roboczych, stosowanie szeregu systemów automatycznych, zmieniające się cechy biologiczne zbieranych roślin wraz z wprowadzaniem nowych odmian oraz fakt, że producenci kombajnów do zbioru zbóż zazwyczaj nie udostępniają danych ani charakterystyki odnośnie strat ilościowych i jakościowych podczas zbioru, to prowadzenie dalszych badań staje się w zasadzie konieczne. Niewiele jest też znanych modeli matematycznych do prognozowania strat ziarna opierających się na kilku zmiennych parametrach. Większość poznanych modeli bazuje głównie na funkcji przepustowości, a najnowsze prace na temat modelowania strat ziarna przy zbiorze pszenicy ozimej bazują na kombajnach z rotorowym systemem młócaco-wydzielającym. Dostępne prace badawcze na ten temat, które dotyczyły kombajnów z konwencjonalnym systemem młócaco-wydzielającym były prowadzone w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku.

Prace badawcze mające na celu zwiększenie potencjału plonotwórczego oraz parametrów jakościowych roślin zbożowych powinny skupiać się poza obecnymi kierunkami również na ograniczeniu strat ziarna podczas zbioru. W dalszym ciągu największą wadą mechanicznego zbioru zbóż są straty ziarna mimo stosowania najnowszych i zaawansowanych technicznie rozwiązań w kombajnach zbożowych.

Biorąc pod uwagę skalę całego kraju to zarówno straty ilościowe jak i jakościowe mają duże znaczenie ekonomiczne w produkcji zbóż.

Producenci kombajnów w prowadzonych pracach badawczych dotyczących ograniczenia strat ziarna podczas zbioru projektują nowe typy zespołów roboczych oraz dokonują modernizacji istniejących już rozwiązań konstrukcyjnych. Poza pracami konstruktorskimi równie ważnym aspektem jest optymalizacja i poprawa funkcjonalności istniejących już maszyn. Szeroko podjęta tematyka pozwoliła na sformułowanie problemu naukowego w formie pytania: Czy na poziom strat i parametry jakościowe ziarna podczas kombajnowego zbioru pszenicy ozimej ma wpływ typ zespołu młócząco-wydzielającego oraz stosowane parametry eksploatacyjne?



#### 4. Cel i zakres pracy

Podjęty problem naukowy jest interdyscyplinarny i obejmuje wiele zagadnień. Jego rozwiązanie może być przeprowadzone w dyscyplinie naukowej rolnictwo i ogrodnictwo. Podstawą jego rozwiązania jest szczegółowa znajomość technologii zbioru zbóż - w szczególności pszenicy ozimej, a także maszyn wykorzystywanych w procesie technologicznym zbioru.

Celem pracy jest ocena zależności parametrów jakościowych i strat ziarna pszenicy ozimej od rodzaju zespołu młócaço-wydzielającego, zastosowanych parametrów roboczych w kombajnie do zbioru zbóż oraz wybranych parametrów ładu. Podejmując badania postawiono dwie hipotezy robocze:

- 1) Na powstawanie strat jakościowych uwzględniających makrouszkodzenia, mikrouszkodzenia i zanieczyszczenia ziarna, które występują podczas zbioru pszenicy ozimej istotny wpływ ma zarówno typ zespołu młócaço-wydzielającego oraz zastosowane parametry robocze.
- 2) Straty ilościowe powstające podczas zbioru pszenicy ozimej można prognozować na podstawie typu zespołu młócaço-wydzielającego, zastosowanych parametrów roboczych, przepustowości oraz wybranych parametrów omłacanej masy zbożowej.

W celu zweryfikowania hipotez roboczych zrealizowano następujące zadania badawcze:

- Przeprowadzono badania polowe w trakcie 3 sezonów wegetacyjnych, podczas zbioru pszenicy ozimej, z wykorzystaniem kombajnów zbożowych różniących się typem zespołu młócaço-wydzielającego oraz parametrami techniczno-eksploatacyjnymi.
- Na podstawie analizy statystycznej wyników badań dokonano oceny zależności parametrów jakościowych i strat ziarna pszenicy ozimej od zastosowanego rodzaju zespołu młócaço-wydzielającego oraz nastawionych parametrów roboczych w kombajnie do zbioru zbóż.
- Do głównych badanych parametrów należały: przepustowość kombajnu, czystość zebranego ziarna, straty ilościowe, makrouszkodzenia i mikrouszkodzenia ziarna, energia i zdolność kiełkowania, wybrane wskaźniki i współczynniki eksploatacyjne oraz koszty eksploatacji.

Wykonane analizy statystyczne będą wykorzystane do prognozowania strat ziarna dla wybranych rodzajów zespołów młócaço-wydzielających. Mogą być też pomocne w procesie decyzyjnym wyboru odpowiedniego typu kombajnu do zbioru zbóż do potrzeb danego gospodarstwa. Będą także pomocne w ocenie ekonomicznej procesu zbioru pszenicy wraz z oceną opłacalności kupna nowego lub używanego kombajnu, wynajmu długoterminowego albo korzystania z usług agrotechnicznych zbioru zbóż.

## **5. Materiał i metody badawcze**

### **5.1. Miejsce i czas wykonania badań**

Badania polowe zostały przeprowadzone w latach 2019-2021 w wielkoobszarowej spółdzielni rolniczej oraz w trzech gospodarstwach indywidualnych leżących w województwie wielkopolskim (w powiatach: nowotomyskim, poznańskim, gnieźnieńskim i średzkim) w czasie zbioru pszenicy ozimej odmiany Arkadia. We wszystkich gospodarstwach pszenica była uprawiana w systemie orkowym, ze zmianowaniem, na glebach o klasie bonitacyjnej IIIa i IIIb.

### **5.2. Charakterystyka warunków pracy i zbieranego materiału**

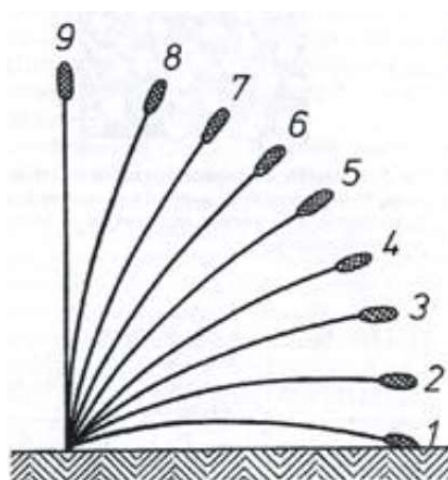
Charakterystyka warunków pracy podczas zbioru zbóż kombajnem obejmowała zgodnie z normą ISO 8210 informacje i dane dotyczące charakterystyki ładu oraz warunków meteorologicznych. Działka pomiarowa składała się z czterech odcinków pomiarowych (jedno powtórzenie badania na jednym odcinku pomiarowym) dla każdego badanego typu zespołu młóca-co-wydzielającego. Długość każdego odcinka wynosiła 50 m, a na całej jego długości kombajn pracował w sposób nieprzerwany, z prędkością roboczą pozwalającą na osiągnięcie 90% obciążenia silnika według wskazań komputera pokładowego, przy pełnej szerokości roboczej. W związku z tym każdy odcinek pomiarowy rozpoczynał się rozbiegiem o długości 25 m oraz kończył wybiegiem o tej samej długości. Pierwszy przejazd roboczy na każdej działce pomiarowej wykonano bez pomiaru wskaźników eksploatacyjnych, w celu wyeliminowania skutków towarzyszących obkaszaniu odcinka pomiarowego.

Charakterystykę ładu określono zgodnie z metodyką opracowaną przez Koszela (1998). W tym celu pobrano próbki zbieranego zboża z powierzchni 1 m<sup>2</sup>. Użyto do tego ramki pomiarowej o wymiarach 1·1 m. Pobrano 4 próbki dla każdej działki pomiarowej, po przekątnej pola, w obrębie wyznaczonego wcześniej rozbiegu i wybiegu odcinka pomiarowego, zawsze pozostawiając nienaruszone wcześniej wyznaczone odcinki pomiarowe. Pod względem plonu i innych cech pobrane próbki odpowiadały rzeczywistym warunkom ładu. W celu wyznaczenia parametrów charakteryzujących ład, ramkę pomiarową układano pod kątem około 40° do kierunku rzędów roślin. Do próbki pobranej z powierzchni 1 m<sup>2</sup> zaliczono wszystkie źdźbła zboża i łodygi chwastów zakorzenione na obszarze wyznaczonym przez ramkę pomiarową nawet jeśli ich części

nadziemnie znajdowały się poza ramką. Długość źdźbeł zmierzono po ich wyprostowaniu, od powierzchni pola do nasady kłosów, natomiast wysokość łanu do najdalej położonych części roślin. Wymienione cechy mierzono prostopadłe do podłoża (odległość pionowa). Następnie wycięto i zebrano całą próbkę zawierającą zboże i chwasty na przeciętnej (stosowanej podczas zbioru nastawie) wysokości ścierniska tj. ok. 16 cm. Poza tym zebrano kłosa leżące poniżej wysokości cięcia w obrębie ramki pomiarowej oraz ziarniaki leżące swobodnie na polu. Frakcje te wykorzystano do określenia strat ziarna spowodowanych samoobsypywaniem. Próbkę wycięto i zebrano w sposób delikatny i staranny, aby nie spowodować sztucznego zwiększenia strat. Z zebranych próbek z powierzchni 1 m<sup>2</sup> ręcznie wykruszono ziarno i oddzielono je od części słomistych i chwastów. Zważono każdą otrzymaną frakcję, a następnie określono biologiczny plon ziarna i stosunek masy ziarna do masy słomy. Biologiczny plon ziarna definiuje się jako plon możliwy do zebrania w określonych warunkach z powierzchni 1 ha. W celu jego określenia zsumowano masę ziarna z pobranej próbki oraz z zebranych kłosów i ziarna swobodnego leżącego na powierzchni pola w obrębie ramki pomiarowej.

Wyległość łanu określono stosując 9-stopniową skalę pochylenia źdźbła (ryc. 22), w której poszczególne stopnie oznaczają:

- 1° - 2° - źdźbło bardzo silnie pochylone,
- 3° - 4° - źdźbło silnie pochylone,
- 5° - 6° - źdźbło średnio pochylone,
- 7° - 8° - źdźbło bardzo słabo pochylone,
- 9° - brak pochylenia (Dubas i Michalski 1997).



Ryc. 22. Pochylenie źdźbła w skali 9-stopniowej (źródło: Dubas i Michalski 1997)

Wilgotność ziarna i słomy wyznaczono metodą suszarkowo-wagową, w czterokrotnym powtórzeniu, zgodnie z poniższymi normami:

- Ziarno zgodnie z PN-EN ISO 712:2012 suszono w temperaturze 130°C, masa pojedynczej próbki przed suszeniem wynosiła 100 g.
- Słomę zgodnie z ISO 18134-2 suszono w temperaturze 105°C, masa pojedynczej próbki przed suszeniem wynosiła 300 g .

Każdą próbkę umieszczono w suszarce laboratoryjnej na 2 godziny, następnie zważono i ponownie poddano procesowi suszenia przez 1 godzinę. Proces powtarzano, aż do momentu, gdy spadek masy próbki nie przekraczał 0,15%. Wilgotność dla poszczególnych próbek obliczono z poniższej zależności:

$$w = \frac{m_p - m_k}{m_p} \cdot 100 \quad (1)$$

gdzie:

w – wilgotność [%],

$m_p$  – masa początkowa próbki [g],

$m_k$  – masa końcowa próbki [g].

W celu wyznaczenia masy tysiąca ziaren w ośmiu powtórzeniach wydzielono losowo po 100 ziarniaków z ziaren czystych i bez uszkodzeń, a następnie zważono każde powtórzenie oddzielnie. Następnie dla uzyskanych wyników obliczono wariancję. Jeżeli uzyskany współczynnik zmienności nie przekraczał 4% obliczono masę 1000 ziaren (MTZ) zgodnie z poniższym wzorem:

$$MTZ = \frac{\sum \text{mas powtórzeń}}{\text{liczba powtórzeń}} \cdot 10 \text{ [g]} \quad (2)$$

Jeżeli otrzymany współczynnik zmienności przekraczał wartość 4%, pobrano kolejne 8 powtórzeń, a następnie obliczono odchylenie standardowe dla 16 powtórzeń (ISTA 2019).

Gęstość ziarna w stanie zsypanym wyznaczono zgodnie z PN-EN ISO 7971-3:2019-03 za pomocą gęstościomierza wyposażonego w cylinder 1000 ml.

W tabeli 1 przedstawiono informacje i dane dotyczące charakterystyki łąnu oraz warunków meteorologicznych uśrednione dla wszystkich działek pomiarowych w poszczególnych latach przeprowadzania badań.

Tabela 1. Charakterystyka ładu oraz warunki meteorologiczne dla działek pomiarowych w trakcie prowadzenia badań

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Wartość średnia dla 2019	Wartość średnia dla 2020	Wartość średnia dla 2021
1	Rodzaj zbieranego zboża	-	-	pszenica	pszenica	pszenica
2	Odmiana	-	-	Arkadia	Arkadia	Arkadia
3	Wysokość ładu	$h_l$	cm	75,3	74,8	76,3
4	Długość źdźbeł	$l_z$	cm	80,2	81,8	84,3
5	Liczba źdźbeł kłosonośnych	$i_z$	$szt \cdot m^{-2}$	607	653	636
6	Liczba chwastów	$i_{ch}$	$szt \cdot m^{-2}$	8	5	3
7	Pochylenie źdźbła	-	°	9	8	9
8	Plon ziarna biologiczny	$q_{zb}$	$t \cdot ha^{-1}$	8,26	7,40	8,89
9	Stosunek masy ziarna do masy słomy	$\delta$	-	1:1,15	1:1,23	1:0,97
10	Harvest index	HI	-	0,46	0,45	0,48
11	Wilgotność ziarna przed zbiorem	$w_z$	%	10,3	10,6	11,1
12	Wilgotność słomy przed zbiorem	$w_s$	%	16,4	15,7	16,8
13	Masa tysiąca ziaren	MTZ	g	42	44,5	49
14	Gęstość w stanie zsypanym	$\rho_u$	$kg \cdot hl^{-1}$	74,2	81,3	82,7
15	Temperatura powietrza	t	°C	27	25	24
16	Wilgotność względna powietrza	RH	%	58	53	60

### 5.3. Charakterystyka techniczno-eksploatacyjna

Do doświadczeń polowych wybrano trzy modele kombajnów do zbioru zbóż, charakteryzujące się różną przepustowością oraz różnym typem zespołu młócaço-wydzielającego. W celu wyeliminowania wpływu czynników wynikających z zastosowanych materiałów oraz jakości produkcji wybrano trzy modele wyprodukowane w tej samej fabryce jednego z wiodących producentów kombajnów do zbioru zbóż. Poniżej wyszczególniono trzy typy zespołów młócaço-wydzielających zastosowanych w badanych kombajnach:

- Kombajn z konwencjonalnym systemem młócaćym oraz z 5 klawiszowym wytrząsaczem słomy – oznaczenie: K.
- Kombajn z konwencjonalnym systemem młócaćym, wyposażony w dodatkowy bęben aktywnej separacji (MCS) oraz 6 klawiszowy wytrząsacz słomy – oznaczenie: K MCS.
- Kombajn z osiowym przepływem masy (rotorowy system omłotu), wyposażony w jeden wzdłużny bęben młócaço-wydzielający – oznaczenie: R.

Parametry techniczne i wskaźniki eksploatacyjne wybranych typów kombajnów do zbioru zbóż zestawiono w tabeli 2 zgodnie z danymi podanymi przez producenta oraz wskazaniemi komputera pokładowego maszyny.

Tabela 2. Charakterystyka techniczno-eksploatacyjna wybranych typów kombajnów do zbioru zbóż

Lp.	Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Typ kombajnu		
				K	K MCS	R
1	Moc znamionowa silnika	$P_z$	kW	175	221	292
2	Szerokość robocza konstrukcyjna	$B_k$	m	5,4	6,8	7,7
3	Szerokość bębna młócającego	$B_b$	mm	1331	1585	4814*
4	Średnica bębna młócającego	$d_b$	mm	600	600	600
5	Zakres prędkości obrotowej bębna młócającego	$\omega_b$	$\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$	380 – 1100	430 – 1210	280 – 1160
6	Powierzchnia klepiska	$F_k$	$\text{m}^2$	0,83	0,99	0,83
7	Kąt opasania klepiska	-	°	106°	106°	122°
8	Powierzchnia aktywnej separacji	$F_s$	$\text{m}^2$	–	0,53	1,44
9	Liczba klawiszy wytrząsacza słomy	-	szt	5	6	-
10	Powierzchnia wytrząsacza słomy	$F_w$	$\text{m}^2$	5,73	6,81	–
11	Zakres prędkości obrotowej wentylatora	$\omega_w$	$\text{obr} \cdot \text{min}^{-1}$	350-1050	350-1050	250-1400
12	Pojemność zbiornika ziarna	$V_z$	$\text{dm}^3$	8600	9000	125000

\*bęben wzdłużny



W trakcie przeprowadzania badań dla każdego typu zastosowano trzy warianty ustawień parametrów roboczych według zaleceń zawartych w instrukcji obsługi (tab. 3). Warianty te charakteryzowały się różną intensywnością omłotu, którą producent określa jako omłot łagodny (wariant 1), normalny (wariant 2) i intensywny (wariant 3).

Tabela 3. Parametry pracy zespołów roboczych kombajnów do zbioru zbóż stosowane w doświadczeniu

Typ kombajnu	Wariant ustawień	Parametr roboczy						
		Szczelina omłotowa [mm]		Obroty bębna młocącego [obr·min <sup>-1</sup> ]	Obroty separatora rotacyjnego [obr·min <sup>-1</sup> ]	Obroty wentylatora [obr·min <sup>-1</sup> ]	Sito górne [mm]	Sito dolne [mm]
		Wlot	Wylot					
K	Łagodny	18	10	850	-	750	12	6
	Normalny	16	8	900	-	800	13	7
	Intensywny	12	3	950	-	850	14	8
K MCS	Łagodny	18	10	800	750	750	12	6
	Normalny	16	8	850	750	800	13	7
	Intensywny	12	3	900	750	850	14	8
R	Łagodny	18	16	1050	-	950	14	6
	Normalny	14	12	1000	-	975	15	8
	Intensywny	12	10	950	-	1000	16	9

## 5.4. Charakterystyka jakości zbioru

### 5.4.1. Pomiar rzeczywistej szerokości roboczej

Rzeczywistą szerokość roboczą kombajnu zmierzono wykorzystując bazę pomiarową w postaci 4 palików rozstawionych w jednej linii, w odstępach 10 m wzdłuż odcinka pomiarowego, w odległości 1 m od ściany łąny zboża i równoległe do niego. Szerokość roboczą rzeczywistą otrzymano po przejeździe kombajnu mierząc odległość od palika do ściany łąny zboża i następnie odejmując od niej 1 m. Pomiar wykonano z dokładnością  $\pm 1$  cm.

#### 5.4.2. Określenie przepustowości kombajnu

Przepustowość kombajnu zgodnie z ISO 6689-1 definiuje się jako ilość masy zbożowej (ziarno i części słomiaste), jaka przechodzi przez zespół młócaço-wydzielający w jednostce czasu. Przepustowość kombajnu określono na podstawie takich czynników jak prędkość robocza kombajnu, rzeczywista szerokość robocza oraz plon masy zbożowej. W celu określenia przepustowości całej masy zbożowej przekształcono wzór na określenie przepustowości masy ziarna przedstawiony przez Miłozza (1996). Po przekształceniu przepustowość kombajnu obliczono według poniższego wzoru:

$$q = v_r \cdot B_r \cdot q_{mz} \quad (3)$$

gdzie:

$q$  - przepustowość kombajnu [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$v_r$  - prędkość robocza na odcinku pomiarowym [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ],

$B_r$  – szerokość robocza rzeczywista [m],

$q_{mz}$  – plon masy zbożowej na działce pomiarowej [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

#### 5.4.3. Obliczenie wydajności efektywnej i eksploatacyjnej

W celu obliczenia wskaźników i współczynników eksploatacyjnych dla każdego kombajnu przeprowadzono badania chronometryczne czasów pracy w czasie czterech zmian kontrolnych zgodnie z PN-90/R-55002. Zarejestrowano wszystkie czynności badanych maszyn oraz ich obsługi wraz z czasem ich trwania z dokładnością pomiaru  $\pm 1$  s dla czasów poniżej 20 min oraz z dokładnością  $\pm 1$  min dla czasów powyżej 20 min. Wyniki chronometrażu sklasyfikowano zgodnie z BN-76/9195-01 wyznaczając przedziały czasu (tab. 4).

Tabela 4. Symbole i określenia przedziałów czasu w badaniach eksploatacyjnych maszyn rolniczych

Symbol	Nazwa	Określenie
$T_1$	efektywny czas pracy	Czas, w ciągu którego maszyna obrabia lub przetwarza (zgodnie z przeznaczeniem) przedmiot pracy, a jej zespoły robocze znajdują się pod obciążeniem. Czas efektywny obejmuje również czas zużyty na nawroty, załadunek lub wyładunek materiału – jeżeli czynności te nie powodują przerwania procesu technologicznego wykonywanego przez maszynę.
$T_2$	czas pomocniczy	$T_2 = T_{21} + T_{22} + T_{23}$
$T_{21}$	czas nawrotów	Czas potrzebny na wykonywanie nawrotów na końcach pola, podczas których ulega przerwaniu proces technologiczny (wykonywany przez maszynę).
$T_{22}$	czas przejazdów jałowych	Czas zużyty na jałowe przejazdy na miejscu pracy (np. przejazdy z sadzarką ziemniaków do przyczepy z ziemniakami i powrót na miejsce, w którym przerwano pracę).
$T_{23}$	czas przestojów technologicznych	Czas zużywany na wykonanie czynności związanych z realizowanym przez maszynę procesem technologicznym, np. napełnianie i uzupełnianie zbiorników materiałem technologicznym (nasionami, wodą, nawozami itp.), uzupełnienie sznurka, folii, wyładunek zbieranego materiału (ziarna, siana, ziemniaków itp.) podnoszenie i opuszczanie znaczników, wymiana przyczep.
$T_3$	czas obsługi technicznej	$T_3 = T_{31} + T_{32} + T_{33}$
$T_{31}$	czas codziennej obsługi technologicznej	Czas zużyty na codzienną obsługę technologiczną w zakresie przewidzianym w instrukcji obsługi maszyny: czyszczenie, smarowanie, napełnianie zbiorników paliwem, dokręcanie połączeń śrubowych itp.
$T_{32}$	czas przygotowania maszyny do pracy	Czas potrzebny na: uruchomienie i podgrzanie silnika maszyny samojedznej, zmianę położenia maszyny (transport – praca), przygotowanie maszyny do wykonywania innego rodzaju czynności roboczych, przyczepianie (zawieszanie) i odczepianie maszyny itp.
$T_{33}$	czas przeprowadzenia regulacji	Czas zużywany na przeprowadzenie regulacji związanych ze zmianą warunków pracy (regulowanie głębokości orki, regulowanie prędkości obrotowej zespołów omlotowych, regulacje sit itp.).
$T_4$	czas usuwania usterek	$T_4 = T_{41} + T_{42}$
$T_{41}$	czas usuwania usterek technologicznych	Czas potrzebny na usuwanie zapchań zespołów roboczych (przerabianą masą, korzeniami), łącznie z czasem jałowego biegu maszyny przy zapobieganiu zapchaniom lub po ich usunięciu.
$T_{42}$	czas usuwania usterek technicznych	Czas przestoju maszyny zużywany na usuwanie usterek technicznych (złamań, odkształceń, zwarć, zatarć itp.), łącznie z czasem potrzebnym na: lokalizację uszkodzenia, demontaż i montaż uszkodzonej części, wymianę uszkodzonej części, regulację maszyny związanej z usunięciem uszkodzenia i naprawę uszkodzonej części (o ile naprawę przeprowadzono). Czas ten uwzględnia wszystkie naprawy, niezależne od tego, kto przeprowadza naprawę, gdzie i kiedy.
$T_5$	czas odpoczynku	Czas zużywany na odpoczynek i potrzeby fizjologiczne personelu obsługującego maszynę.
$T_6$	czas przejazdów transportowych	$T_6 = T_{61} + T_{62}$
$T_{61}$	czas przejazdów z miejsca postoju maszyny na pole i z powrotem	Czas przejazdów transportowych na trasie: gospodarstwo (baza maszynowa) – pole – gospodarstwo.

Tabela 4. – cd.

Symbol	Nazwa	Określenie
T <sub>62</sub>	czas przejazdów z pola na pole	Czas przejazdów transportowych z jednego miejsca pracy na inne.
T <sub>7</sub>	czas codziennej obsługi technicznej maszyn towarzyszących	Czas zużywany na przeprowadzenie codziennej obsługi technicznej maszyn towarzyszących w zakresie przewidzianym w instrukcji obsługi (ciągnik, agregaty napędowe itp.), warunkujący prawidłowe wykonanie procesu technologicznego przez badaną maszynę
T <sub>8</sub>	straty czasu z przyczyn niezależnych od badanej maszyny	$T_8 = T_{81} + T_{82} + T_{83}$
T <sub>81</sub>	straty czasu z przyczyn organizacyjnych	Straty czasu spowodowane: brakiem środków energetycznych lub transportowych, części wymiennych i materiałów (ziarno, woda, nawóz itp.), nieprzygotowaniem pola, niewystarczającą liczbą personelu itp.
T <sub>82</sub>	straty czasu z przyczyn meteorologicznych	Straty czasu na skutek niesprzyjających warunków wynikających z przyczyn meteorologicznych (rosa, opad, nieodpowiednia temperatura, prędkość wiatru itp.).
T <sub>83</sub>	straty czasu z innych przyczyn	Straty czasu związane z prowadzeniem badań, pobieraniem próbek, fotografowaniem, udzielaniem wskazówek, usuwaniem uszkodzeń lub usterek maszyn towarzyszących itp.
T <sub>02</sub>	operacyjny czas pracy maszyny	$T_{02} = T_1 + T_2$
T <sub>04</sub>	roboczy czas zmiany	$T_{04} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$
T <sub>07</sub>	eksploatacyjny czas zmiany	$T_{07} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7$
T <sub>08</sub>	ogólny czas zmiany	$T_{08} = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 + T_8$

Źródło: BN-76/9195-01 (1981), Norma branżowa. Maszyny rolnicze. Podział czasu pracy. Symbole i określenia.

Na podstawie wykonanych chronometraży według BN-77/9195-02 wyliczono następujące wskaźniki i współczynniki eksploatacyjne:

- Wydajność efektywna:

$$W_1 = \frac{60Q}{T_1} \quad (4)$$

gdzie:

$W_1$  – wydajność efektywna [ $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$Q$  – ilościowy efekt pracy wykonany przez maszynę podczas chronometraży [ha],

$T_1$  – efektywny czas pracy [min].

- Wydajność w czasie eksploatacyjnym:

$$W_{07} = \frac{60Q}{T_{07}} \quad (5)$$

gdzie:

$W_{07}$  – wydajność w czasie eksploatacyjnym [ $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$Q$  – ilościowy efekt pracy wykonany przez maszynę podczas chronometrażu [ha],

$T_{07}$  – eksploatacyjny czas zmiany [min].

- Wydajność w czasie ogólnym zmiany:

$$W_{08} = \frac{60Q}{T_{08}} \quad (6)$$

gdzie:

$W_{08}$  – wydajność w czasie ogólnym zmiany [ $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$Q$  – ilościowy efekt pracy wykonany przez maszynę podczas chronometrażu [ha],

$T_{08}$  – ogólny czas zmiany [min].

- Współczynnik wykorzystania czasu ogólnego zmiany:

$$K_{08} = \frac{T_1}{T_{08}} \quad (7)$$

gdzie:

$K_{08}$  – współczynnik wykorzystania czasu ogólnego zmiany [-],

$T_1$  – efektywny czas pracy [min],

$T_{08}$  – ogólny czas zmiany [min].

- Nakłady robocizny w czasie ogólnym zmiany  $A_{08}$ :

$$A_{08} = \frac{N}{W_{08}} \quad (8)$$

gdzie:

$A_{08}$  – nakłady robocizny w czasie ogólnym zmiany [ $\text{rbh} \cdot \text{ha}^{-1}$ ],

$N$  – liczba osób zatrudnionych przy obsłudze maszyny oraz środka energetycznego (bez liczby osób zatrudnionych przy obsłudze maszyn towarzyszących),

$W_{08}$  – wydajność w czasie ogólnym zmiany [ $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

- Zużycie materiałów energetycznych (zużycie paliwa)

$$q_i = \frac{Q_i}{Q} \quad (9)$$

gdzie:

$q_i$  – zużycie paliwa [ $\text{l} \cdot \text{ha}^{-1}$ ] [ $\text{l} \cdot \text{t}^{-1}$ ],

$Q_i$  – zużycie paliwa w okresie prowadzenia chronometrażu [l],

$Q$  – ilościowy efekt pracy wykonany przez maszynę podczas chronometrażu [ha] [t].

#### 5.4.4. Określenie czystości i makrouszkodzeń omlóconego ziarna

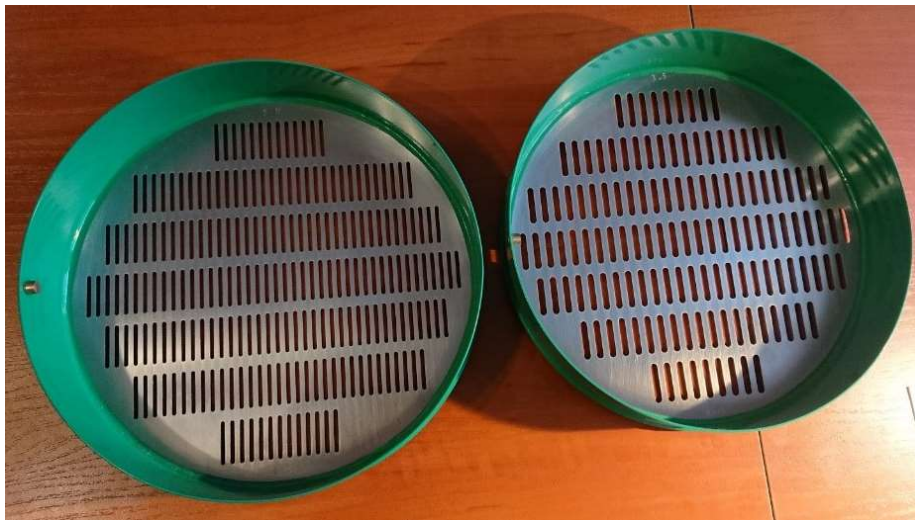
W celu określenia stopnia czystości i uszkodzeń omlóconego ziarna, przeprowadzono analizę wagową i procentową pobranych próbek ziarna z każdego odcinka pomiarowego. Próbki ziarna każda po 100 g pobrane zostały bezpośrednio ze zbiornika ziarna (ryc. 23). Przed pobraniem masę w zbiorniku wymieszano, aby próbka odpowiadała rzeczywistej jakości ziarna.



Ryc. 23. Zbiornik ziarna – miejsce pobierania próbek do określenia uszkodzeń i czystości ziarna  
(źródło: opracowanie własne)

Następnie za pomocą sit laboratoryjnych (ryc. 24) oraz oceny wzrokowej każdą próbkę ziarna rozdzielono na poszczególne frakcje:

- ziarno całe,
- ziarno połamane i uszkodzone,
- ziarno innych upraw polowych,
- nasiona chwastów,
- zielone części roślin,
- zanieczyszczenia lekkie i zanieczyszczenia ciężkie.



Ryc. 24. Ręczne sita laboratoryjne do oznaczania zawartości zanieczyszczeń (źródło: opracowanie własne)

Zgodnie z normą ISO 5223 dla ziarna pszenicy zastosowano sita szczelinowe o wymiarach:

- grube zanieczyszczenia: 3,50 x 20,00 mm,
- pszenica: 2,80 x 20,00 i 2,50 x 20,00 mm,
- drobne zanieczyszczenia: 1,00 x 20,00 mm.

Otrzymane frakcje zważono, a następnie określono procentowy udział wymienionych frakcji w próbce. W tym celu użyto wagę laboratoryjną o dokładności pomiaru  $\pm 0,01$  g. Stopień czystości ziarna wyznaczono jako sumę ziarna całego, ziarna połamanego i uszkodzonego oraz ziarna innych upraw polowych.



#### 5.4.5. Określenie mikrouszkodzeń omlóconego ziarna

W celu określenia mikrouszkodzeń omlóconego ziarna dla każdej próbki w czterech powtórzeniach wybrano losowo 100 ziarniaków z frakcji ziarno całe, a następnie poddano je 2 minutowej kąpieli w 1 procentowym wodnym roztworze jodu w jodku potasu (płyn Lugola). Roztwór wnikał w niewidoczne gołym okiem pęknięcia okrywy owocowo-nasiennej zabarwił skrobię na brunatny kolor (ryc. 25). Następnie ręcznie oddzielono ziarniaki z mikropęknięciami (widocznym zabarwieniem) i określono ich udział procentowy (Gieroba i Dreszer 1988a).



Ryc. 25. Ziarniaki z widocznym zabarwieniem spowodowanym wnikiem płynu Lugola przez pęknięcia okrywy owocowo-nasiennej (źródło: opracowanie własne)

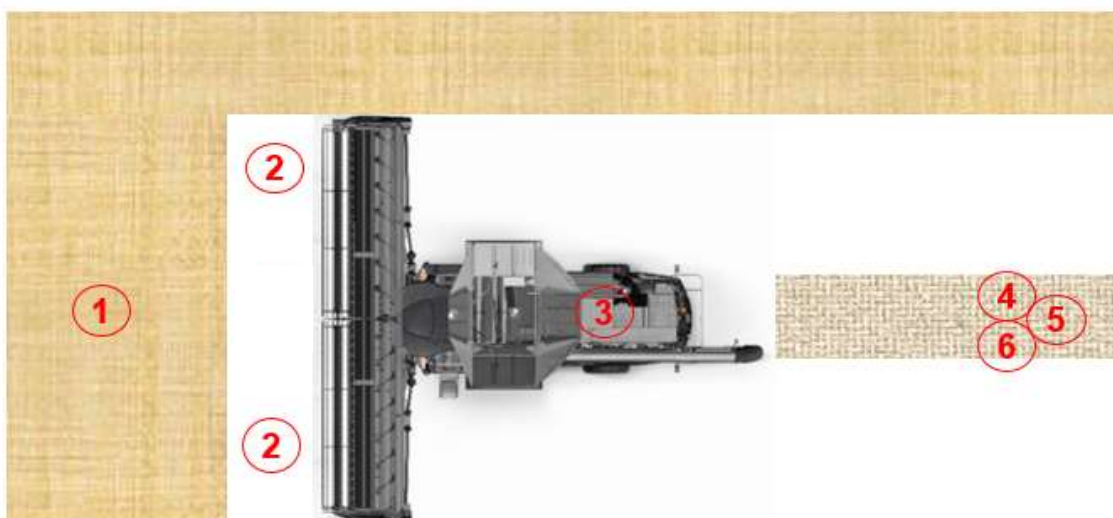
#### 5.4.6. Określenie strat ziarna

Do określenia strat ziarna zastosowano tacki pomiarowe o powierzchni  $0,25 \text{ m}^2$  (ryc. 26) zgodnie z metodyką opracowaną przez Feiffer *i in.* (2005). Tacki pomiarowe położono przed przejściem kombajnu przy pomiarze strat przyrzędu żniwnego oraz w trakcie przejścia kombajnu w celu pomiaru strat zespołu młócająco-wydzielającego oraz czyszczącego. Następnie z każdej tacki oddzielono frakcje słoniaste wraz z plewami, ziarno i niewymłócone kłosa. Miejsca pomiarów strat ilościowych wyszczególniono na rycinie 27.





Ryc. 26. Tacka pomiarowa do określania strat ziarna (źródło: opracowanie własne)



Ryc. 27. Miejsca pomiarów strat ilościowych podczas zbioru zbóż kombajnem: 1 – straty spowodowane samoobsypywaniem, 2 – straty na przyrządzie żniwnym, 3 – straty pod maszyną, 4 – straty zespołu czyszczącego, 5 – straty zespołu separującego, 6 – niewymłócone kłosy (źródło: opracowanie własne na podstawie materiałów AGCO 2013)

Straty ziarna spowodowane przez zespoły robocze kombajnu określono wykonując analizę wagową i procentową frakcji omłotowych zebranych podczas pomiaru przepustowości kombajnu. Z frakcji słomiastych wydzielono ręcznie wszystkie ziarna swobodne, zgoniny i plewy, a następnie zważono każdą frakcję oddzielnie. Oddzieloną

od ziarna swobodnego masę słomiastą (słoma, kłosy, zgoniny) poddano powtórnemu omłotowi w warunkach laboratoryjnych. Otrzymane w procesie tego omłotu ziarno zważono i uwzględniono w stratach. Przy określeniu procentowego udziału poszczególnych grup strat kombajnu za 100% przyjęto rzeczywisty plon ziarna plus straty zespołów roboczych kombajnu.

#### 5.4.7. Energia i zdolność kiełkowania

Po określeniu czystości i makrouszkodzeń z frakcji całego ziarna w czterech powtórzeniach losowo pobrano próbki po 100 ziaren. W dalszej kolejności w okresie trzech miesięcy po zbiorze wykonano test zdolności i energii kiełkowania. Jako próbę kontrolną wykorzystano ziarniaki omłócone ręcznie z próbek zebranych do określenia plonu biologicznego. Test energii i zdolności kiełkowania oraz określenie ilości siewek nienormalnych oraz nasion martwych wykonano w laboratorium Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Roślin i Nasiennictwa w Poznaniu zgodnie z metodyką opracowaną przez ISTA (2019). Nasiona zostały ułożone na podłożu bibułowym w temperaturze 20°C. Liczenie siewek dla określenia energii kiełkowania wykonano 4 dnia, a dla zdolności kiełkowania 8 dnia.

#### 5.5. Koszty eksploatacji

Do ustalenia kosztów technologii zbioru użyto metody kalkulacyjnej. Na koszt eksploatacji składają się koszty utrzymania (koszty stałe) oraz koszty użytkowania (koszty zmienne). Koszty eksploatacji obliczone zostały na podstawie wskazówek metodycznych opracowanych przez Muzalewskiego (2010) zgodnie z poniższymi zależnościami:

- Koszty utrzymania:

$$K_u = K_a + K_k + K_{ub} \quad (10)$$

gdzie:

$K_u$  – koszty utrzymania [ $\text{zł} \cdot \text{rok}^{-1}$ ],

$K_a$  – koszty amortyzacji [ $\text{zł} \cdot \text{rok}^{-1}$ ]:

$$K_a = \frac{C_m}{T} \quad (11)$$

$C_m$  – cena maszyny [ $\text{zł}$ ],

$T$  – przewidywany okres użytkowania [lat],

$K_k$  – koszty przechowywania [ $\text{zł} \cdot \text{rok}^{-1}$ ]:

$$K_k = k_k \cdot C_m \quad (12)$$

$k_k$  – wskaźnik kosztów przechowywania [ $\% \cdot \text{rok}^{-1}$ ],

$C_m$  – cena maszyny [ $\text{zł}$ ],

$K_{ub}$  – koszty ubezpieczenia i podatku drogowego [ $\text{zł} \cdot \text{rok}^{-1}$ ].

- Jednostkowy koszt utrzymania:

$$K_{uj} = \frac{K_u}{W_r} \quad (13)$$

gdzie:

$K_{uj}$  – jednostkowy koszt utrzymania [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$K_u$  – koszty utrzymania [ $\text{zł} \cdot \text{rok}^{-1}$ ],

$W_r$  – wykorzystanie roczne [ $\text{h} \cdot \text{rok}^{-1}$ ].

- Koszty użytkowania:

$$K_{uż} = K_n + K_p + K_{ep} + K_{mp} + K_r \quad (14)$$

gdzie:

$K_{uż}$  – koszty użytkowania [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$K_n$  – koszty naprawy [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ]:

$$K_n = \frac{C_m \cdot k_n}{T \cdot W_r} \quad (15)$$

$C_m$  – cena maszyny [ $\text{zł}$ ],

$k_n$  – wskaźnik kosztu napraw w okresie użytkowania [%],

$T$  – przewidywany okres użytkowania [lat],

$W_r$  – wykorzystanie roczne [ $\text{h} \cdot \text{rok}^{-1}$ ],

$K_p$  – koszty paliwa i smarów [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ]:

$$K_p = 1,06 \cdot Z_p \cdot C_p \quad (16)$$

$Z_p$  – zużycie paliwa [ $\text{l} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$C_p$  – cena paliwa [ $\text{zł} \cdot \text{l}^{-1}$ ],

$K_{ep}$  – koszty energii elektrycznej [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$K_{mp}$  – koszty materiałów pomocniczych [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$K_r$  – koszty robocizny bezpośredniej [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

- Koszt eksploatacji:

$$K_e = K_{uj} + K_{uż} \quad (17)$$

gdzie:

$K_e$  – jednostkowy koszt eksploatacji [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$K_{uj}$  – jednostkowy koszt utrzymania [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$K_{uż}$  – koszty użytkowania [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

- Koszt eksploatacji maszyny na hektar:

$$K_{e(ha)} = \frac{K_e}{W_{08}} \quad (18)$$

gdzie:

$K_{e(ha)}$  – koszt eksploatacji maszyny na hektar [ $\text{zł} \cdot \text{ha}^{-1}$ ],

$K_e$  – jednostkowy koszt eksploatacji [ $\text{zł} \cdot \text{h}^{-1}$ ],

$W_{08}$  – wydajność eksploatacyjna [ $\text{ha} \cdot \text{h}^{-1}$ ].

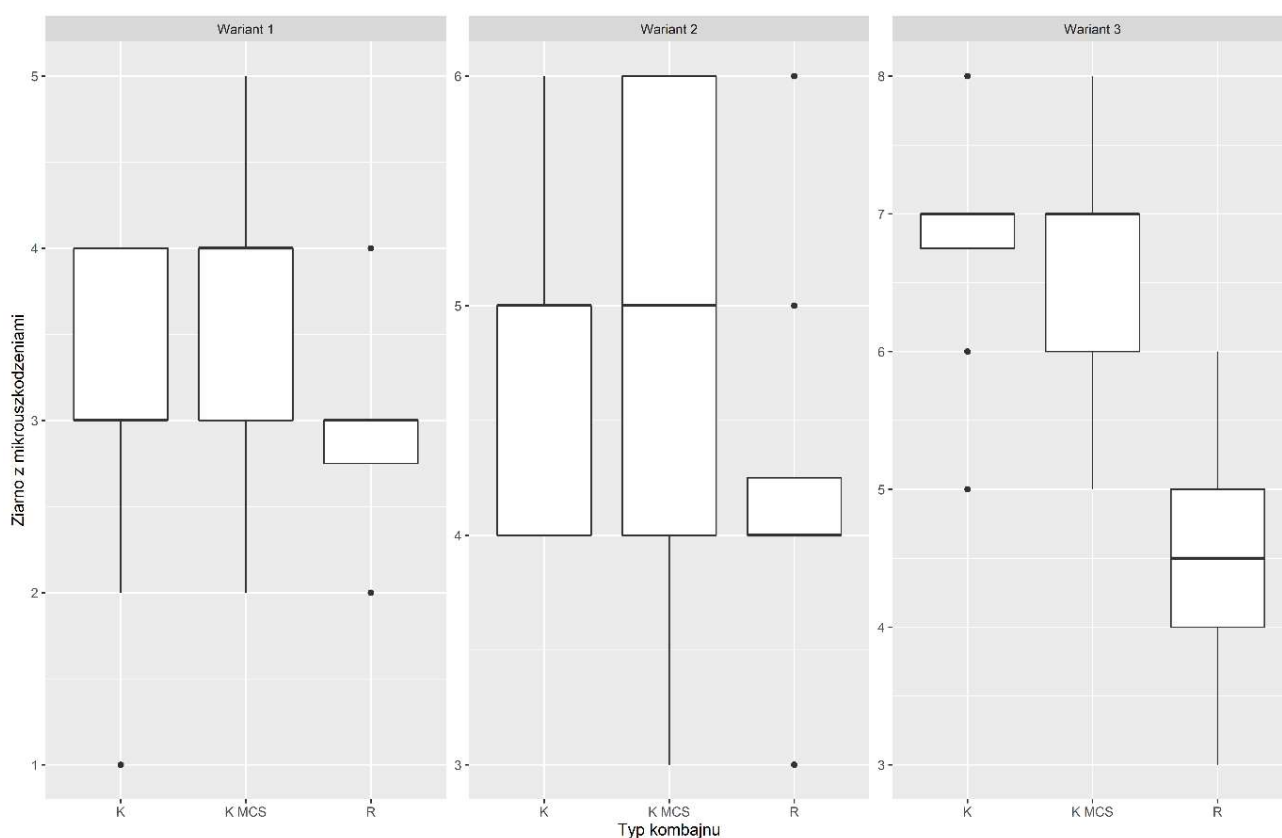
## 5.6. Analiza statystyczna wyników

W celu zweryfikowania postawionych hipotez badawczych przeprowadzono analizy statystyczne przy użyciu platformy do obliczeń statystycznych R. Za jej pomocą wykonano dwuczynnikowe analizy wariancji (ANOVA) dla modelu mieszanego, w których lata są czynnikiem losowym a warianty ustawienia oraz typy kombajnów – czynnikami stałymi (funkcja `lmer` z pakietu `lme4`). Przed wykonaniem analizy sprawdzono spełnienie założeń o rozkładzie normalnym (test Shapiro-Wilka) i jednorodności wariancji (test Levene). W przypadku niespełnienia założeń przekształcono wyniki pomiarów metodą Boxa-Coxa. Jeśli po przekształceniu nadal nie uzyskano spełnienia założeń, to analizę wariancji przeprowadzono stosując test permutacyjny (funkcja `perm.anova` z pakietu `RVAideMemoire`). Porównania wielokrotne wykonano stosując test Tukey’a (procedura `glht` z pakietu `stats` i `clld` z pakietu `multcomp`). Wykonano analizę regresji i kowariancji (funkcja `lm` z pakietu `stats`) metodą krokową (funkcja `step` z pakietu `stats`, w każdym kroku jedna zmienna może zostać dodana lub usunięta) i analizę korelacji  $r$  Pearsona. Przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$  dla wykonywanych analiz. Wykresy wykonano funkcją `ggplot` z pakietu `ggplot2`.

## 6. Wyniki

### 6.1. Rozkład uszkodzeń ziarna i strat ilościowych

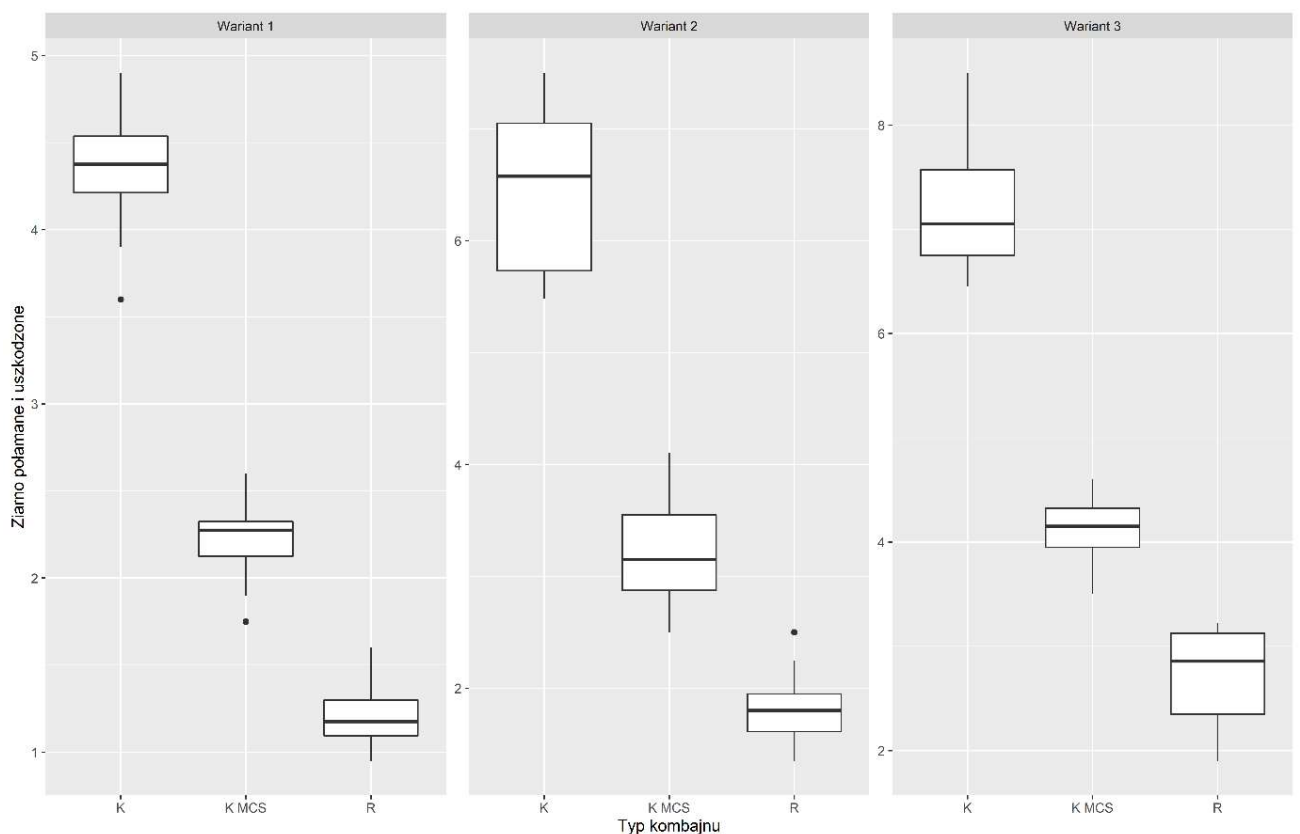
Rozkład wyników dla zmiennych: ziarno z mikrouszkodzeniami, ziarno połamane i uszkodzone oraz dla całkowitych strat kombajnu przedstawiono na wykresach pudełkowych w podziale na typy kombajnów i warianty ustawień parametrów roboczych. Wykresy przedstawiają medianę i odchylenie medianowe, zakres nieodstających i obserwacje odstające.



Ryc. 28. Rozkład wyników zmiennej ziarno z mikrouszkodzeniami ukazany w podziale na poszczególne typy kombajnów i warianty ustawień: pudełko – kwartyle: 25% ( $Q_1$ ) i 57% ( $Q_3$ ), kreska dzieląca pudełko na dwie części - mediana, wąsy zakres nieodstających  $Q_1 - 1,5 \cdot IQR$   $Q_3 + 1,5 \cdot IQR$  ( $IQR = Q_3 - Q_1$ ), kropki – obserwacje odstające

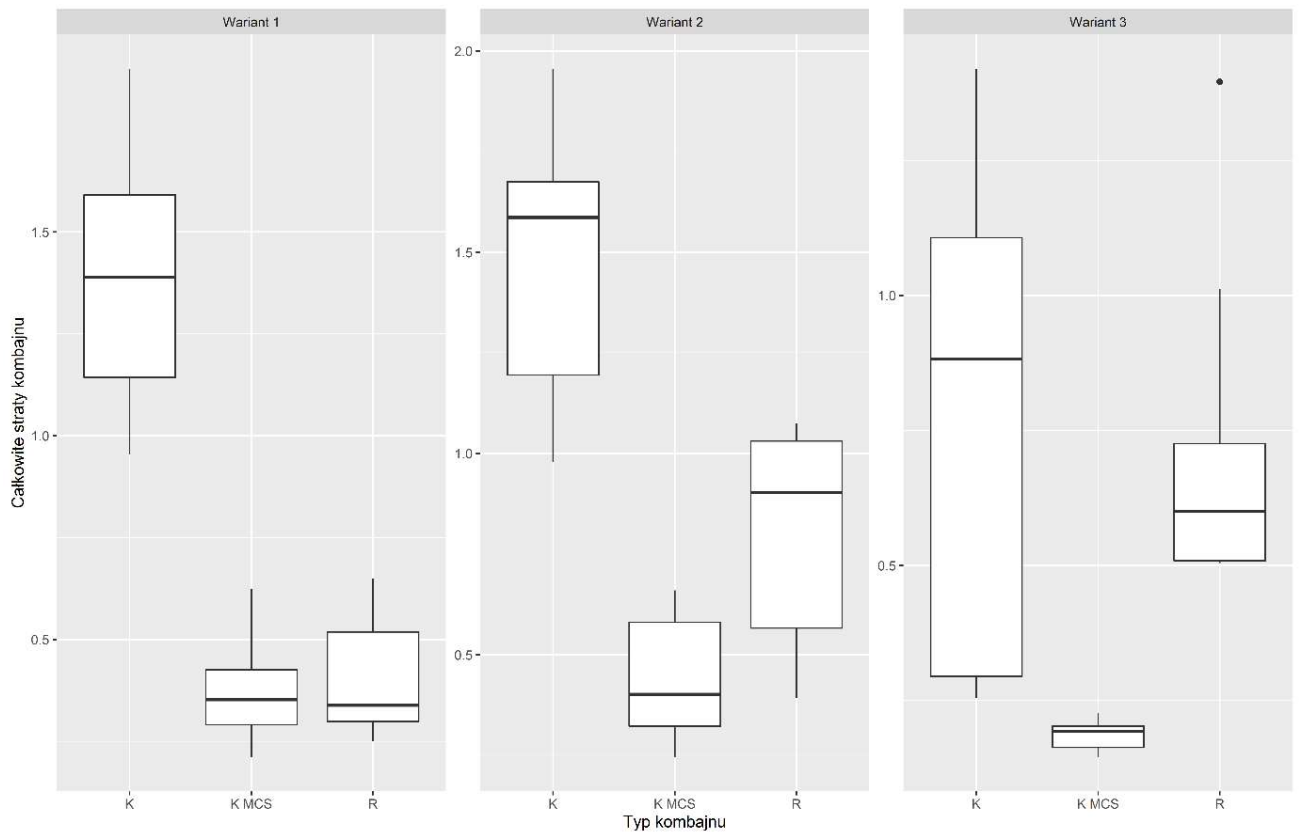
Na rycinie 28 widać, że obserwacja maksymalna ziarna z mikrouszkodzeniami dla kombajnu konwencjonalnego w wariacie 1 jest równa kwartyłowi górnemu, dlatego nie zostało wyznaczone odchylenie kwartyłowe ponadto mediana jest równa kwartyłowi dolnemu. Rozkład jest skośny (należy zaznaczyć, że każdy pojedynczy wykres jest

utworzony dla 12 obserwacji). Dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem obserwacje układają się bardziej równomiernie, jednak, ponieważ mediana jest równa kwartyłowi górnemu rozkład także jest skośny. Dla kombajnu rotorowego większość obserwacji to 3, odchylenia kwartyłowe wychodzą poza zakres nieodstających więc nie zostały wyznaczone, wszystkie obserwacje mniejsze od 3 i większe od 3 zostały uznane za odstające. Jedynie rozkład dla kombajnu rotorowego w wariancie 3 ustawień, przedstawia rozkład symetryczny bez obserwacji odstających, mediana dzieli pudełko na dwie równe części oraz wąsy są równych długości. Ogólnie można zauważyć, że mediana dla kombajnów konwencjonalnych w wariancie 2 i 3 jest wyższa (więcej ziaren z mikrouszkodzeniami) niż dla kombajnu rotorowego. Natomiast w wariancie 1 ustawień największą medianę ma kombajn konwencjonalny z separatorem. Mediany dla wariantu 1 są najniższe a dla wariantu 3 najwyższe.



Ryc. 29. Rozkład wyników zmiennej ziarno połamane i uszkodzone ukazany w podziale na poszczególne typy kombajnów i warianty ustawień

Dla ziarna połamanego i uszkodzonego większość wykresów przedstawia rozkład symetryczny (ryc. 29). Największą medianę przy każdym wariacie ustawień osiąga kombajn konwencjonalny a najmniejszą kombajn rotorowy. Wszystkie mediany w wariacie 1 osiągają najniższe wartości dla danych kombajnów a w wariacie 3 najwyższe.



Ryc. 30. Rozkład wyników zmiennej całkowite straty kombajnu ukazany w podziale na poszczególne typy kombajnów i warianty ustawień

Największą medianę dla całkowitych strat kombajnu osiąga kombajn konwencjonalny a najmniejszą konwencjonalny z separatorem (ryc. 30). Pomiedzy wariantami nie ma większych różnic pod względem mediany, jednak rozrzut obserwacji jest największy dla kombajnu konwencjonalnego w wariacie 3.

## 6.2. Zróznicowanie w poziomie przepustowości, charakterystyce jakościowej i stratach ziarna między poszczególnymi typami kombajnów i wariantami ustawień

W pierwszym kroku sprawdzono, czy występują różnice w przepustowości i charakterystykach ziarna między trzema typami kombajnów, trzema wariantami ustawień oraz czy interakcja pomiędzy tymi czynnikami jest istotna. W tym celu zastosowano analizę wariancji dla modelu mieszanego, w którym dwa czynniki były stałe: wariant ustawienia i typ kombajnu oraz jeden losowy: lata. Przed wykonaniem analizy sprawdzono spełnienie założenia o normalności rozkładu reszt oraz jednorodności wariancji porównywanych grup. W przypadku, gdy założenia nie były spełnione wyniki pomiarów przekształcono metodą Boxa-Coxa wybierając optymalną wartość  $\lambda$  przekształcenia (wyniki przedstawiono w tabeli 5). Jeśli przekształcone dane nadal nie spełniały założeń analizy wariancji, to zastosowano test permutacyjny. Testy szczegółowe wykonano stosując jednoczesny test porównań wielokrotnych Tukey'a (wyniki znajdują się w tabeli 6).

Tabela 5. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena,  $\lambda$  przekształcenia Boxa-Coxa, p-wartości analizy wariancji dla poziomu przepustowości i charakterystyki jakościowej ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia (lata – losowe)

Obserwacje	Surowe		przekształcone		ANOVA	p-wartości			
	SW	L	$\lambda$ BC	SW		L	metoda	Typ	Wariant
Stopnie swobody							2	2	4
Przepustowość	0,1956	0,0664				z	0,0000	0,0000	0,9861
Ziarno całe	0,9649	0,0262	2,0000	0,8717	0,0451	z	0,0010	0,0010	0,1039
Ziarno z mikrouszkodzeniami	0,3413	0,8712				z	0,0000	0,0000	0,0001
Ziarno połamane i uszkodzone	0,9190	0,0000	0,3838	0,3930	0,1535	z	0,0000	0,0000	0,0383
Zanieczyszczenia lekkie	0,8812	0,0624				z	0,0177	0,0000	0,1208
Zanieczyszczenia ciężkie	0,0330	0,0000	0,7879	0,0090	0,0001	p	0,0010	0,0010	0,0380
Stopień czystości ziarna	0,1357	0,0000	2,000	0,1312	0,0000	p	0,0010	0,0010	0,0490

z – zwykła analiza wariancji dla obserwacji surowych lub przekształconych

p – permutacyjna analiza wariancji dla obserwacji surowych

SW – test normalności Shapiro-Wilka

L – test Levena jednorodności wariancji

$\lambda$  BC –  $\lambda$  przekształcenia Boxa-Coxa



Tabela 6. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a dla poziomu przepustowości i charakterystyki jakościowej ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia (lata – losowe)

Zmienna zależna		Przepustowość		Ziarno całe		Ziarno z mikrouszkodzeniami wydzielone z ziarna całego		Ziarno połamane i uszkodzone		Zanieczyszczenia lekkie		Zanieczyszczenia ciężkie		Stopień czystości ziarna		
		kg·s <sup>-1</sup>		%		%		%		%		%		%		
Jednostka		Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	
Poziomy czynników		Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	
Typ	K	10,9	a	89,5	ab	4,94	b	6,02	c	0,31	ab	4,11	c	95,6	a	
	K MCS	13,3	b	94,4	b	5,06	b	3,19	b	0,26	a	2,10	b	97,6	b	
	R	18,7	c	96,7	c	3,89	a	1,92	a	0,33	b	1,08	a	98,6	c	
Wariant	1	15,3	c	95,4	a	3,22	a	2,60	a	0,17	a	1,70	a	98,0	b	
	2	14,3	b	93,8	b	4,64	b	3,85	b	0,26	b	2,07	a	97,6	b	
	3	13,3	a	91,4	c	6,03	c	4,67	c	0,46	c	3,38	b	96,1	a	
Typ: Wariant	K	1	11,9		91,9	c	3,17	ab	4,35	f	0,18		3,54	c	96,3	b
	K	2	10,9		89,7	b	4,83	d	6,50	g	0,29		3,56	c	96,2	b
	K	3	9,9		87,1	a	6,83	e	7,19	g	0,44		5,30	d	94,3	a
	K MCS	1	14,2		96,3	ef	3,58	abc	2,23	c	0,11		1,39	b	98,5	c
	K MCS	2	13,2		95,1	d	4,92	d	3,23	e	0,18		1,45	b	98,4	c
	K MCS	3	12,4		91,7	c	6,67	e	4,12	f	0,47		3,73	c	95,8	b
	R	1	19,8		98,1	g	2,92	a	1,21	a	0,18		0,55	a	99,3	d
	R	2	18,6		96,5	f	4,17	bcd	1,83	b	0,31		1,37	b	98,3	c
	R	3	17,7		95,4	de	4,58	cd	2,71	d	0,48		1,41	b	98,1	c

K – kombajn konwencjonalny

K MCS – kombajn konwencjonalny z separatorem

R – kombajn rotorowy

W – wariant

Śr. – poprawione średnie

Gr. – grupy jednorodne

Analiza wariancji wykazała istotne statystycznie zróżnicowanie między porównywanymi czynnikami. By sprawdzić które dokładnie średnie różnią się istotnie między sobą wykonano test *post-hoc* metodą Tukeya lub test permutacyjny. Wyniki testu porównań wielokrotnych oraz średnie poprawione przedstawiono w tabeli 6.

Wszystkie typy kombajnów różniły się istotnie przepustowością (tabela 6). Najmniejszą średnią przepustowość wynoszącą 10,9 kg·s<sup>-1</sup> wykazano dla kombajnu konwencjonalnego a największą wynoszącą 18,7 kg·s<sup>-1</sup> dla kombajnu rotorowego. Podobnie istotnie różniły się wszystkie warianty ustawień parametrów roboczych. Największą średnią przepustowość wynoszącą 15,3 kg·s<sup>-1</sup> stwierdzono dla wariantu 1, a najmniejszą wynoszącą 13,3 kg·s<sup>-1</sup> dla wariantu 3. Nie wykazano istotnej interakcji pomiędzy typami kombajnów i wariantami ustawień co oznacza, że przepustowość była najmniejsza dla wariantu 3 a największa dla wariantu 1 niezależnie od typu kombajnu.

Wszystkie typy kombajnów oraz wszystkie warianty różniły się istotnie pod względem zmiennej, którą był udział ziarna całego. Najwięcej ziaren całych pozostawia kombajn rotorowy, najmniej kombajn konwencjonalny. Ponadto średnia poprawiona jest najmniejsza dla wariantu 3 a największa dla wariantu 1 niezależnie od typu kombajnu. Wykazano istotną interakcję pomiędzy dwoma czynnikami: typem kombajnu i wariantem ustawienia. W związku z tym, że grupy jednorodne są krótkie i łączą jedynie różne warianty pomiędzy różnymi kombajnami, to tym samym świadczy to o istotnym wpływie każdego czynnika na udział całego ziarna. Najwięcej całych ziaren uzyskano podczas zbioru kombajnem rotorowym przy wariantach ustawienia 1 i 2 oraz kombajnem konwencjonalnym z separatorem przy wariacie 1. Udział ziarna całego powyżej 95% stwierdzono również dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem w wariacie nr 2 oraz dla kombajnu rotorowego w wariacie nr 3.

Najniższą średnią poprawioną dla ziarna z mikrouszkodzeniami uzyskano dla kombajnu rotorowego a najwyższą dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem. Ponadto kombajny konwencjonalne nie różniły się istotnie, zaś wszystkie warianty różniły się istotnie. Wykazano istotną interakcję pomiędzy wariantami i typami kombajnów. Grupy jednorodne łączą te same warianty pomiędzy typami kombajnu (literki a, d, e w tabeli 6). Jednakże warianty różnią się istotnie zarówno dla każdego typu kombajnu. Najmniej ziaren z mikrouszkodzeniami otrzymano dla wariantu 1 niezależnie od typu zespołu młócającego-wydzielającego kombajnu. Największy udział ziarna z mikrouszkodzeniami stwierdzono dla wariantu 3. Wykazano też istotną interakcję pomiędzy typem kombajnu i wariantem ustawienia. Najwięcej ziaren z mikrouszkodzeniami stwierdzono dla wariantu 3 oraz kombajnu konwencjonalnego i kombajnu konwencjonalnego z separatorem. Dla kombajnu rotorowego wariant 2 i 3 nie różnią się istotnie.

Najmniejszą średnią dla zmiennej ziarno połamane i ziarno uszkodzone wynoszącą 1,92% uzyskano dla kombajnu rotorowego a największą wynoszącą 6,02% dla kombajnu konwencjonalnego. Najmniej uszkodzeń powodował pierwszy wariant zastosowanych ustawień w kombajnach. Wykazano istotną interakcję pomiędzy wariantami i typami kombajnów. Grupy jednorodne łączą wariant 2 i 3 dla kombajnu konwencjonalnego (literka g w tabeli 6). Warianty ustawień różnią się istotnie zarówno dla kombajnu rotorowego jak i konwencjonalnego z separatorem. Zdecydowanie najmniej uszkodzeń powoduje kombajn rotorowy przy wariacie 1 a najwięcej konwencjonalny przy wariacie 2 i 3.

Najmniej (najmniejsza średnia) zanieczyszczeń lekkich wykazano dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem, a najwięcej dla kombajnu rotorowego. Kombajn konwencjonalny z kombajnem konwencjonalnym z separatorem oraz kombajn konwencjonalny z kombajnem rotorowym nie różnią się istotnie statystycznie pod względem tej cechy. Wszystkie warianty ustawień różnią się istotnie, a najmniejszą średnią zanieczyszczeń lekkich wynoszącą 0,17% uzyskano dla wariantu 1, największą zaś wynoszącą 0,46% dla wariantu 3. Interakcja pomiędzy wariantami i typami kombajnów nie była istotna. Dla wszystkich kombajnów, wystąpiła jednak wyraźna tendencja występowania największego udziału zanieczyszczeń lekkich dla trzeciego wariantu ustawień roboczych.

Podobnie jak w przypadku zanieczyszczeń lekkich wszystkie kombajny różniły się istotnie dla zanieczyszczeń ciężkich. Najmniej zanieczyszczeń ciężkich powodował kombajn rotorowy i była to wartość 1,08%. Najwięcej zanieczyszczeń ciężkich wynoszących 4,11% stwierdzono dla kombajnu konwencjonalnego. Dla zanieczyszczeń ciężkich wykazano też istotną interakcję pomiędzy typami kombajnów i wariantami ich ustawień. Istotna interakcja wykazała podobną tendencję. Kombajn konwencjonalny i kombajn konwencjonalny z separatorem, podobnie jak pierwszy i drugi wariant ustawień nie różniły się istotnie. Grupy jednorodne obejmowały również wariant 2 z 3 dla kombajnu rotorowego, gdzie również wykazano, że nie różnią się istotnie. Ponadto warianty 1 i 2 kombajnu konwencjonalnego nie różnią się od wariantu 3 kombajnu konwencjonalnego z separatorem (literka b w tabeli 6), zaś warianty 1 i 2 kombajnu konwencjonalnego z separatorem nie różnią się istotnie od wariantów 2 i 3 kombajnu rotorowego (literka c w tabeli 6). Istotnie najmniej zanieczyszczeń ciężkich uzyskano dla kombajnu rotorowego przy ustawieniach parametrów roboczych w wariacie 1, a najwięcej dla kombajnu klawiszowego przy 3 wariacie ustawień.

Na stopień czystości omłóconego ziarna istotny wpływ miały zarówno typy kombajnów jak i warianty parametrów roboczych. Największy stopień czystości ziarna wynoszący 98,6% stwierdzono dla kombajnu rotorowego, a najmniejszy wynoszący 95,6% dla kombajnu konwencjonalnego. W odniesieniu do wariantów ustawień parametrów roboczych, najmniejszy stopień czystości ziarna stwierdzono dla wariantu 3, natomiast warianty 1 i 2 ustawień parametrów roboczych nie różniły się istotnie. Dla stopnia czystości istotne różnice i grupy jednorodne są takie same jak dla zanieczyszczeń ciężkich jednak o odwrotnej tendencji tzn. jeśli zanieczyszczeń ciężkich było najwięcej to stopień czystości ziarna był najmniejszy i odwrotnie.

Tabela 7. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena,  $\lambda$  przekształcenia Boxa-Coxa, p-wartości analizy wariancji dla strat ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawień (lata – losowe)

Obserwacje	Surowe		przekształcone		ANOVA		p-wartości		
	SW	L	$\lambda$ BC	SW	L	metoda	Typ 2	Wariant 2	Typ*Wariant 4
Zmienna zależna									
Stopnie swobody									
Analiza masowa									
Straty przed zespołem żniwnym	0,0000	0,0010	-2,000	0,0000	0,0009	p	0,0210	0,5814	0,7153
Ziarno swobodne	0,0009	0,0000	0,1818	0,6720	0,0263	p	0,0010	0,1219	0,7203
Ogólne straty zespołu żniwnego	0,0000	0,0000	0,0202	0,4149	0,0486	p	0,0010	0,2887	0,7842
Ziarno z niewymłóconych kłosów	0,0067	0,0000	0,0606	0,1341	0,1004	z	0,0000	0,0000	0,0000
Ziarno w słomie, zgoninach i plewach	0,3078	0,0006	0,3030	0,1183	0,0116	p	0,0020	0,0559	0,1378
Ogólne straty młocarni	0,3632	0,0008	0,1010	0,0997	0,0176	p	0,0010	0,0330	0,0869
Całkowite straty kombajnu	0,4329	0,0005	0,1010	0,1757	0,0127	p	0,0010	0,0460	0,0979
Analiza procentowa									
Straty przed zespołem żniwnym	0,0000	0,04117	0,0202	0,0000	0,2163	p	0,0200	0,6344	0,7622
Ziarno swobodne	0,0000	0,0000	0,0606	0,2616	0,0686	z	0,0000	0,0000	0,0484
Ogólne straty zespołu żniwnego	0,0000	0,0000	-0,020	0,0667	0,1336	z	0,0000	0,0001	0,0432
Ziarno z niewymłóconych kłosów	0,0000	0,0000	-0,061	0,4874	0,1164	z	0,0000	0,0000	0,0000
Ziarno w słomie, zgoninach i plewach	0,3162	0,0003	0,2626	0,1332	0,0130	p	0,0010	0,0619	0,1748
Ogólne straty młocarni	0,3324	0,0002	0,0606	0,0797	0,0150	p	0,0010	0,0360	0,0909
Całkowite straty kombajnu	0,5294	0,0001	0,0202	0,1134	0,0130	p	0,0010	0,0360	0,1379

Analiza wariancji strat ziarna (tabela 7) wykazała istotne różnice pomiędzy porównywanymi czynnikami. Test porównań wielokrotnych Tukey'a oraz średnie poprawione przedstawiono w tabeli 8 i 9. Analizy omówiono jednocześnie dla wyników pomiarów masy i dla analizy procentowej danej zmiennej, ponieważ dla wielu zmiennych wyniki były identyczne lub podobne.

Tabela 8. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a strat ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia – analiza masowa (lata – losowe)

Zmienna zależna		Straty przed zespołem żniwnym		Ziarno tracone swobodnie		Ogólne straty zespołu żniwnego		Ziarno z niewymłoczonych kłosów		Ziarno w słomie, zgoninach i plewach		Ogólne straty młocarni		Całkowite straty kombajnu	
		kg·ha <sup>-1</sup>		kg·ha <sup>-1</sup>		kg·ha <sup>-1</sup>		kg·ha <sup>-1</sup>		kg·ha <sup>-1</sup>		kg·ha <sup>-1</sup>		kg·ha <sup>-1</sup>	
Jednostka		Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.
Poziomy czynników		Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.
Typ	K	0,34	b	4,10	c	4,71	c	8,90	b	86,6	c	95,5	c	100	c
	K MCS	0,08	a	2,37	b	2,37	b	6,29	a	17,6	a	23,9	a	26,2	a
	R	0,02	a	1,53	a	1,53	a	5,36	a	44,5	b	49,9	b	51,4	b
Wariant	1	0,19		2,32		2,57		9,89	c	46,4		56,2	ab	58,8	ab
	2	0,08		2,55		2,67		7,05	b	63,5		70,5	b	73,2	b
	3	0,17		3,12		3,36		3,61	a	38,9		42,5	a	45,9	a
Typ·Wariant	K	1	4,42	4,08		4,83		13,6	e	95,0		109		113	
	K	2	1,67	3,70		4,05		8,75	d	108		117		121	
	K	3	4,04	4,54		5,25		4,36	b	56,7		61,0		66,3	
	K MCS	1	1,25	1,63		1,63		9,94	d	18,7		28,6		30,3	
	K MCS	2	8,33	2,52		2,52		6,40	c	24,8		31,2		33,7	
	K MCS	3	3,37	2,95		2,95		2,54	a	9,3		11,8		14,8	
	R	1	7,77	1,26		1,26		6,14	c	25,4		31,5		32,8	
	R	2	4,44	1,45		1,45		5,99	c	57,6		63,6		65,0	
	R	3	6,25	1,87		1,87		3,93	b	50,7		54,6		56,5	

Tabela 9. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a strat ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia – analiza procentowa (lata – losowe)

Zmienna zależna		Straty przed zespołem żniwnym		Ziarno tracone swobodnie		Ogólne straty zespołu żniwnego		Ziarno z niewymłoczonych kłosów		Ziarno w słomie, zgoninach i plewach		Ogólne straty młocarni		Całkowite straty kombajnu	
		%		%		%		%		%		%		%	
Jednostka		Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.
Poziomy czynników		Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.
Typ	K	0,40	b	5,06	c	5,80	c	10,7	b	1,05	c	1,16	c	1,22	c
	K MCS	0,10	a	2,96	b	2,96	b	7,95	a	0,22	a	0,30	a	0,33	a
	R	0,03	a	1,87	a	1,87	a	6,55	a	0,55	b	0,61	b	0,62	b
Wariant	1	0,22		2,84	a	3,15	a	12,2	c	0,56		0,68	ab	0,72	ab
	2	0,11		3,17	a	3,31	a b	8,64	b	0,78		0,87	b	0,90	b
	3	0,20		3,87	b	4,17	b	4,41	a	0,48		0,52	a	0,56	a
Typ·Wariant	K	1	0,52	5,00	cd	5,93	d	16,4	e	1,15		1,32		1,37	
	K	2	0,22	4,55	cd	4,95	cd	10,5	d	1,31		1,42		1,47	
	K	3	0,47	5,62	d	6,51	d	5,25	b	0,70		0,75		0,81	
	K MCS	1	0,14	2,00	a	2,00	ab	12,6	d	0,23		0,35		0,37	
	K MCS	2	0,12	3,18	bc	3,18	bc	8,08	c	0,32		0,40		0,43	
	K MCS	3	0,05	3,70	cd	3,70	cd	3,17	a	0,12		0,15		0,19	
	R	1	0,00	1,53	a	1,53	a	7,53	c	0,31		0,38		0,40	
	R	2	0,00	1,79	a	1,79	a	7,30	c	0,72		0,79		0,81	
	R	3	0,08	2,29	ab	2,29	ab	8,91	b	0,62		0,67		0,69	

Przeprowadzona analiza statystyczna masowych strat ziarna, pomiędzy poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnów i wariantami ustawienia wykazała szereg istotnych różnic. Wykazano istotne zróżnicowanie pod względem strat przed zespołem żniwnym. Istotnie większe straty przed zespołem żniwnym wynoszące  $0,34 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  wystąpiły dla kombajnu konwencjonalnego i różniły się istotnie od strat przed zespołem żniwnym dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem i kombajnu rotorowego. Straty przed zespołem żniwnym dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem wynosiły  $0,08 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , a dla kombajnu rotorowego  $0,02 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  i nie różniły się istotnie.

Wszystkie typy kombajnów różniły się istotnie pod względem masy ziarna traconego swobodnie. Najmniejsza masa ziarna swobodnego traconego przez zespół żniwny wynosząca  $1,53 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  została stwierdzona dla kombajnu rotorowego a największa wynosząca  $4,10 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  podczas zbioru pszenicy kombajnem konwencjonalnym. Nie wykazano istotnych różnic pomiędzy wariantami ustawień oraz interakcji pomiędzy typem kombajnów i wariantami parametrów roboczych. Warianty ustawień parametrów roboczych nie różniły się istotnie, a masa traconego ziarna swobodnie wynosiła od  $2,32$  do  $3,12 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Podobny układ wyników jak w przypadku ziarna traconego swobodnie, stwierdzono również dla strat ogólnych zespołu żniwnego. Wszystkie typy kombajnów różniły się istotnie pod względem strat ogólnych zespołu żniwnego. Nie wykazano istotnych różnic pomiędzy wariantami ustawień oraz interakcji pomiędzy typem kombajnów i wariantami parametrów roboczych.

W analizie masowej, największe istotne zróżnicowanie badanych czynników oraz zależności interakcyjne stwierdzono dla masy ziarna uzyskanej z niewymłóconych kłosów. Dla tego czynnika, wszystkie typy kombajnów oraz ich warianty ustawień różniły się istotnie. Istotnie najwięcej ziarna w niewymłóconych kłosach o masie wynoszącej  $8,9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  wykazano dla kombajnu konwencjonalnego. Natomiast kombajn konwencjonalny z separatorem i kombajn rotorowy nie różniły się istotnie. Wszystkie warianty ustawień również różnią się istotnie, a najmniejszą masę ziarna w niewymłóconych kłosach wynoszącą  $3,61 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  stwierdzono dla wariantu 3, największą zaś wynoszącą  $9,89 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  dla wariantu 1. Wykazana została również interakcja pomiędzy typami kombajnów i wariantami ich ustawień. Najmniejszą masę ziarna w niewymłóconych kłosach wynoszącą  $2,54 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  stwierdzono dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem w 3 wariacie ustawień, największą zaś do kombajnu konwencjonalnego w 1 wariacie ustawień.

Oдноśnie ziarna pozostałego w słomie, w zgoninach i plewach oraz dla strat ogólnych, stwierdzono istotny i zarazem podobny wpływ badanych typów kombajnów. Dla wszystkich rodzajów strat, najmniejsze zostały stwierdzone dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem, a największe dla kombajnu konwencjonalnego. Na straty ziarna w zgoninach i plewach oraz na straty ogólne istotny wpływ miały także warianty ustawień parametrów roboczych. Najmniejsze istotnie straty stwierdzono dla wariantu 3, a największe dla wariantu 2. Dla ziarna pozostałego w słomie, w zgoninach i plewach oraz dla strat ogólnych, pomimo występującego zróżnicowania, zależności interakcyjnych nie stwierdzono.

Przeprowadzona analiza statystyczna procentowych strat ziarna, pomiędzy poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnów i wariantami ustawienia, również wykazała istotne i podobne różnicowanie badanych czynników. Wykazano istotne zróżnicowanie pod względem strat przed zespołem żniwnym. Istotnie większe straty przed zespołem żniwnym wystąpiły dla kombajnu konwencjonalnego i różniły się istotnie od strat przed zespołem żniwnym dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem i kombajnu rotorowego. Straty przed zespołem żniwnym dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem nie różniły się istotnie od kombajnu rotorowego.

Podobnie jak w przypadku strat masowych, wszystkie typy kombajnów różniły się istotnie pod względem strat procentowych ziarna traconego swobodnie przez zespół żniwny. Najmniejsza część ziarna traconego swobodnie przez zespół żniwny występowała przy użyciu kombajnu rotorowego i wynosiła 0,0187% a największa przy kombajnie konwencjonalnym i wynosiła 0,0506%. Ponadto wykazano istotne różnice pomiędzy wariantami ustawień parametrów roboczych. Najwięcej ziarna traconego swobodnie – 0,0387% stwierdzono dla wariantu 3, który różnił się istotnie w porównaniu do wariantów 1 i 2. Mniejsze straty wystąpiły w wariantach 1 i 2, które nie różniły się istotnie. Interakcja wykazała, że dla kombajnu konwencjonalnego i rotorowego wszystkie warianty są w jednej grupie jednorodnej, a więc nie różnią się istotnie (konwencjonalny literki d, rotorowy literki a w tabeli 9). W przypadku kombajnu konwencjonalnego z separatorem wariant 2 i 3 nie różnią się istotnie. Najwięcej ziarna traconego swobodnie – 0,0562% stwierdzono dla kombajnu konwencjonalnego i trzeciego wariantu ustawienia, a najmniej – 0,0153% dla kombajnu rotorowego przy wariacie nr 1.

Podobnie jak w analizie masowej, wszystkie typy kombajnów różniły się istotnie pod względem strat ogólnych zespołu żniwnego. Dodatkowo wykazano też istotne różnice pomiędzy wariantami ustawień oraz interakcję pomiędzy typem kombajnów i

wariantami parametrów roboczych. Najmniejsze straty procentowe wynoszące 0,0315% stwierdzono dla 1 wariantu ustawień, a największe dla wariantu 3. Interakcja wykazała, że w przypadku strat ogólnych zespołu żniwnego, zarówno dla kombajnu konwencjonalnego i rotorowego wszystkie warianty ustawień parametrów roboczych są w jednej grupie jednorodnej, a więc nie różnią się istotnie: kombajn konwencjonalny literki „d”, kombajn rotorowy literki „a” (tabela 9). W przypadku kombajnu konwencjonalnego z separatorem wariant 2 i 3 nie różnią się istotnie.

W odniesieniu do ogólnych strat zespołu żniwnego wykazano istotne różnice pomiędzy badanymi kombajnami. Najmniejsze średnie straty ogólne wynoszące 0,0187% stwierdzono dla kombajnu rotorowego a największe – 0,058% dla kombajnu konwencjonalnego. W przypadku ogólnych strat zespołu żniwnego, wykazano również istotne interakcje pomiędzy badanymi czynnikami. Warianty 1 i 3 ustawień parametrów roboczych kombajnów różniły się istotnie. Interakcja pomiędzy czynnikami wykazała, że ogólne straty zespołu żniwnego dla kombajnu konwencjonalnego i rotorowego nie różniły się istotnie przy różnych wariantach ustawień zaś dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem wariant 1 różnił się istotnie od wariantu 3. Najmniejszą średnią strat ogólnych zespołu żniwnego wynoszącą 0,0153% uzyskano dla kombajnu rotorowego w wariacie 1, a największą – 0,0651% dla konwencjonalnego w wariacie 3.

Analiza statystyczna dotycząca procentowych strat ziarna z niewymłóconych kłosów wykazała, że kombajn rotorowy nie różni się istotnie od kombajnu konwencjonalnego z separatorem. Natomiast obydwa kombajny różnią się istotnie w porównaniu do kombajnu konwencjonalnego, dla którego straty były większe i wynosiły 0,0107%. Wszystkie badane warianty ustawień parametrów roboczych kombajnów zbożowych różnią się istotnie. Najmniejsze straty wynoszące 0,0441% stwierdzono dla kombajnu rotorowego, dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem – 0,0864%, a największe dla kombajnu konwencjonalnego – 0,122%. Interakcja typów kombajnów z ich ustawieniami wykazała, że dla kombajnu konwencjonalnego i kombajnu konwencjonalnego z separatorem, wszystkie warianty ustawień różnią się istotnie. W przypadku kombajnu rotorowego istotnych różnic nie stwierdzono pomiędzy wariantem 1 i 2. Najmniejsze średnie straty ziarna z niewymłóconych kłosów stwierdzono dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem przy 3 wariacie ustawień, a największe dla kombajnu klawiszowego w wariacie 1.



W przypadku procentowych strat ziarna w słomie, zgoninach i plewach, istotne różnice wykazano tylko pomiędzy typami kombajnów. Najmniejsze straty ziarna w słomie, zgoninach i plewach wynoszące 0,22% stwierdzono dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem, dla kombajnu rotorowego – 0,55%, a największe dla kombajnu konwencjonalnego – 1,05%.

Dla ogólnych straty młocarni oraz całkowitych strat kombajnu, uzyskano podobne wyniki. Wszystkie typy kombajnów różniły się istotnie (tab. 9), najmniejsze straty wynoszące odpowiednio 0,30 i 0,38% stwierdzono dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem. W przypadku wariantów ustawień parametrów roboczych, stwierdzono również występowanie istotnych różnic. Najmniejsze istotnie średnie straty wynoszące odpowiednio 0,52 i 0,56% stwierdzono dla wariantu 3. Straty te nie różniły się też istotnie od wariantu pierwszego, gdzie wynosiły odpowiednio 0,68 i 0,72%. Wariant 2 ustawień parametrów roboczych charakteryzował się największymi średnimi stratami wynoszącymi odpowiednio 0,87 i 0,90% i nie różnił się istotnie od wariantu 1.

### **6.3. Przewidywanie poziomu całkowitych strat kombajnu na podstawie masy ziaren, stosunku masy ziarna do słomy, przepustowości i wariantu ustawień**

W kolejnym etapie analizy statystycznej wykonano analizę kowariancji metodą krokową. W analizie sprawdzono czy masa 1000 ziaren, stosunek masy ziarna do słomy i przepustowość przewidują straty kombajnów. W pierwszym kroku sprawdzono zależność pomiędzy badanymi zmiennymi, a współczynnikami korelacji Pearsona, które przedstawiono w tabeli 10.

Tabela 10. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy całkowitymi stratami kombajnu, masy 1000 ziaren, stosunkiem masy ziarna do słomy, przepustowością.

<b>Zmienna</b>	<b>Przepustowość</b>	<b>Stosunek masy ziarna do masy słomy</b>	<b>Masa 1000 ziaren</b>	<b>Całkowite straty kombajnu</b>
<b>Przepustowość</b>	1,0000	-0,1585	0,1173	-0,3263
<b>Stosunek masy ziarna do masy słomy</b>	-0,1585	1,0000	0,5459	-0,1185
<b>Masa 1000 ziaren</b>	0,1173	0,5459	1,0000	0,0662
<b>Całkowite straty kombajnu</b>	-0,3263	-0,1185	0,0662	1,0000

Współczynniki korelacji pomiędzy zmiennymi niezależnymi nie są zbyt wysokie (największy wynosi 0,55), dlatego do analizy regresji użyto wszystkie zmienne. Po wykonaniu obliczeń stwierdzono, że korelacja zmiennej zależnej: całkowite straty kombajnu, ze zmiennymi objaśniającymi nie wygląda imponująco, jednak wspólnie te zmienne mogą w pewnym stopniu wyjaśnić zmienność zmiennej objaśnianej.

Testy Shapiro-Wilka ( $p = 0,0061$ ) i Levena ( $p = 0,0000$ ) dla modelu kowariancji wykazały niespełnienie założeń, w związku z czym zastosowano przekształcenie Boxa-Coxa ( $\lambda = 0,14$ ), które poprawiło wyniki Testów Shapiro-Wilka ( $p = 0,5189$ ) i Levena ( $p = 0,0117$ ). W dalszym ciągu nie wykazano spełnienia założenia o jednorodności wariancji na poziomie istotności 0,05, jednak uzyskano znaczną poprawę.

Po wykonaniu procedury krokowej dobierania zmiennych do modelu ze zbioru wszystkich zmiennych i wszystkich podwójnych interakcji, do modelu zostały dołączone wszystkie czynniki oraz sześć interakcji podwójnych (tabela 11). Wykazano istotne różnice całkowitych strat kombajnu pomiędzy porównywanymi kombajnami. Brak istotnych różnic stwierdzono pomiędzy kombajnem konwencjonalnym i kombajnem rotorowym oraz pomiędzy kombajnem rotorowym i konwencjonalnym z separatorem (tabela 12). Brak istotnych różnic został potwierdzony również wśród wariantów ustawień parametrów roboczych – pomiędzy wariantami 1 i 2. Testy porównań wielokrotnych dla interakcji wykazały brak istotnych różnic pomiędzy wariantem 1 i 2 ustawień parametrów roboczych kombajnu konwencjonalnego i kombajnu konwencjonalnego z separatorem. Brak istotnych różnic został potwierdzony również dla kombajnu rotorowego dla 1 i 3 wariantu ustawień parametrów roboczych.

Tabela 11. Tablica analizy wariancji zależności Całkowitych strat kombajnu od masy ziaren, stosunku masy ziarna do słomy, przepustowości Adj  $R^2=0,86$

Response: (Całkowite_straty_kombajnu <sup>lambda</sup> - 1)/lambda			
Zmienna niezależna w modelu	Df	F value	p-wartość
Masa 1000 ziaren (MTZ)	1	1,0691	0,3039
Przepustowość (P)	1	39,5021	0,0000
Stosunek masy ziarna do słomy (SZS)	1	40,6806	0,0000
Typ kombajnu	2	173,267	0,0000
Wariant ustawienia	2	49,6376	0,0000
Typ·Wariant	4	19,7656	0,0000
Masa 1000 ziaren·Przepustowość	1	45,2788	0,0000
Masa 1000 ziaren·Stosunek masy ziarna do słomy	1	10,5731	0,0016
Masa 1000 ziaren·TYP	2	4,1744	0,0185
Przepustowość·Stosunek masy ziarna do słomy	1	3,8484	0,0529
Stosunek masy ziarna do słomy·Wariant	2	2,6849	0,0737

Tabela 12. Porównania wielokrotne typów kombajnów w analizie kowariancji (test Tukey'a)

Zmienna zależna	Jednostka	Średnie poprawione	Poziomy czynnika	Grupy jednorodne
<i>Całkowite straty kombajnu</i>	%	0,83	K	a
		0,29	K MCS	b
		0,98	R	a
<i>Całkowite straty kombajnu</i>	%	0,69	W1	b
		0,84	W2	b
		0,43	W3	a
<i>Całkowite straty kombajnu</i>	%	1,15	K W1	de
		1,09	K W2	d
		0,45	K W3	b
		0,36	K MCS W1	b
		0,40	K MCS W2	b
		0,17	K MCS W3	a
		0,76	R W1	c
		1,30	R W2	e
		0,96	R W3	cd

W oparciu o analizę kowariancji zostało wyznaczone równanie prognozy dla całkowitych strat kombajnu. Uzyskane z analizy kowariancji współczynniki istotnie różne od zera oznaczono gwiazdką, a postać równania jest następująca:

$$\begin{aligned}
 y = & \left( (-26,268^* + 0,657^* MTZ + 1,237^* P + 10,591^* SZS - 1,533 k_1 - 6,424^* k_2 \right. \\
 & + 0,962^* W_2 - 0,361 W_3 + 0,142 k_1 W_2 + 0,582^* k_2 W_2 + 0,258 k_1 W_3 \\
 & + 1,146^* k_2 W_3 - 0,031^* MTZ \cdot P - 0,271^* MTZ \cdot SZS + 0,010 MTZ k_1 \\
 & \left. + 0,131 MTZ k_2 + 0,093 P \cdot SZS - 1,105^* SZS \cdot W_2 - 0,564 SZS W_3 \right) \cdot (0,14 + 1)^{\frac{1}{0,14}}
 \end{aligned} \quad (19)$$

gdzie:

y - całkowite straty kombajnu [%],

$$k_1 = \begin{cases} 1, & \text{dla kombajnu z separatorem} \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

$$k_2 = \begin{cases} 1, & \text{dla kombajnu rotorowego} \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

$$W_2 = \begin{cases} 1, & \text{dla wariantu 2} \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

$$W_3 = \begin{cases} 1, & \text{dla wariantu 3} \\ 0, & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases}$$

pozostałe oznaczenia tak jak w tabeli 11.

#### 6.4. Zróźnicowanie w energii kiełkowania, zdolności kiełkowania, siewkach nienormalnych i nasionach martwych między poszczególnymi typami kombajnów i wariantami ustawień parametrów roboczych

W kolejnej analizie porównano badane typy kombajnów i warianty ustawień parametrów roboczych pod względem energii i zdolności kiełkowania, siewek nienormalnych i nasion martwych.

Tabela 13. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena,  $\lambda$  przekształcenia Boxa-Coxa, p-wartości analizy wariancji dla energii kiełkowania, zdolności kiełkowania, siewek nienormalnych i nasion martwych między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawień (lata – losowe)

Obserwacje	Surowe		przekształcone		ANOVA		p-wartości		
	SW	L	$\lambda$ BC	SW	L	metoda	Typ 2	Wariant 2	Typ*Wariant 4
Zmienna zależna									
Stopnie swobody									
Energia kiełkowania	0,5664	0,0000	2,0000	0,7040	0,0001	p	0,1329	0,8971	0,2488
Zdolność kiełkowania	0,5201	0,0033	2,0000	0,4980	0,0041	p	0,0040	0,9900	0,1828
Siewki nienormalne	0,0011	0,0000	0,5455	0,0009	0,0000	p	0,9261	0,6114	0,1818
Nasiona martwe	0,1606	0,3505				z	0,0000	0,0973	0,0000

Tabela 14. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a energii kiełkowania, zdolności kiełkowania, siewkach nienormalnych i nasionach martwych między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawień (lata – losowe)

Zmienna zależna		Energia kiełkowania		Zdolność kiełkowania		Siewki nienormalne		Nasiona martwe		
		%	%	%	%	%	%			
Jednostka		Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	
Typ	K	88,8		96,2	a	2,50		2,33	b	
	K MCS	89,3		96,1	a	2,61		2,33	b	
	R	91,4		97,5	b	2,50		1,03	a	
Wariant	1	90,1		96,5		2,56		1,92		
	2	89,9		96,6		2,69		1,72		
	3	90,4		96,6		2,36		2,06		
Typ·Wariant	K	1	88,2		95,9		2,58		2,50	de
		2	88,7		95,7		2,75		2,58	de
		3	91,4		96,9		2,17		1,92	cd
	K MCS	1	89,8		96,2		2,58		2,25	de
		2	89,9		96,0		3,25		1,75	bcd
		3	91,5		96,0		2,00		3,00	e
	R	1	92,9		97,5		2,50		1,00	ab
		2	89,9		98,0		2,08		0,83	a
		3	88,2		96,8		2,92		1,25	abc

Nie wykazano istotnych różnic pomiędzy badanymi czynnikami (typy kombajnów i warianty ustawień parametrów roboczych) pod względem energii kiełkowania i siewek nienormalnych (tabela 13). Typy kombajnów różniły się istotnie pod względem zdolności kiełkowania (tabela 14). Średnia zdolność kiełkowania wynosząca 97,5% była największa dla kombajnu rotorowego i różniła się istotnie od kombajnu konwencjonalnego i kombajnu konwencjonalnego z separatorem. Nie wykazano zależności interakcyjnych pomiędzy typami badanych kombajnów a ich wariantami ustawień parametrów roboczych dla energii kiełkowania, zdolności kiełkowania i siewek nienormalnych. Wystąpiła zaś widoczna tendencja dla cechy energia kiełkowania ziarniaków. Ziarniaki pszenicy ozimej największą energię kiełkowania wynoszącą 91,4% uzyskiwały po zbiorze kombajnem rotorowym.

Typy badanych kombajnów różniły się istotnie pod względem udziału nasion martwych. Istotnie najmniej nasion martwych stwierdzono dla kombajnu rotorowego i było to 1,03%. Natomiast dla kombajnu konwencjonalnego i kombajnu konwencjonalnego z separatorem analizy wykazały istotnie większy udział nasion martwych, który był taki sam dla obydwu kombajnów i wynosił 2,33%. Wykazana została też interakcja pomiędzy typami kombajnów a wariantami ustawień parametrów roboczych dla udziału nasion martwych. Najmniejszy średni udział nasion martwych dla wszystkich wariantów ustawień parametrów roboczych wynoszący odpowiednio 1,1; 0,83 i 1,25% stwierdzono dla kombajnu rotorowego. Ponadto wszystkie warianty ustawień parametrów roboczych kombajnu konwencjonalnego również nie różniły się istotnie (literka d w tabeli 14.). Największy istotnie udział nasion martwych stwierdzono dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem warianty 3 i 1 odpowiednio 3,00% i 2,25% oraz dla kombajnu konwencjonalnego we wszystkich wariantach ustawień 1, 2 i 3, gdzie udziały wynosiły odpowiednio 2,50; 2,58 i 1,92.

#### **6.5. Zróżnicowanie w zużyciu paliwa i w kosztach eksploatacji kombajnów**

Badane typy kombajnów zbożowych zostały porównane między sobą jednoczynnikową analizą wariancji pod względem zmiennych składających się na koszty ich eksploatacji. Analiza wykazała istotne statystycznie zróżnicowanie pod względem każdej z porównywanych zmiennych (tabela 15). Wykazano, że kombajn rotorowy zużywa istotnie więcej paliwa –  $62 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ , w porównaniu do kombajnów konwencjonalnych (tabela 16). Tym samym przekłada się to na istotnie większy koszt

paliwa i smarów oraz jednostkowy koszt eksploatacji maszyny, które wynoszą odpowiednio 322 zł·h<sup>-1</sup> i 1036 zł·h<sup>-1</sup>. Istotnie najniższy jednostkowy koszt eksploatacji agregatu maszynowego wykazano dla kombajnu konwencjonalnego i wynosił on 541 zł·h<sup>-1</sup>. W przeliczeniu na jednostkę wykonanej pracy, kombajn konwencjonalny z separatorem charakteryzuje się istotnie najmniejszymi kosztami, które wynoszą 265 zł·ha<sup>-1</sup>. Ponadto analiza wykazała, że kombajn rotorowy i kombajn konwencjonalny mają istotnie wyższe koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy w porównaniu do kombajnu konwencjonalnego z separatorem.

Tabela 15. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena analizy wariancji dla porównania średnich kosztów między kombajnami (lata – losowe)

Obserwacje	p-wartości		
	SW	L	ANOVA Typ
Zmienna zależna			2
Stopnie swobody			2
Zużycie paliwa	0,1287	0,4098	0,0004
Koszt paliwa i smarów	0,3592	0,5688	0,0000
Jednostkowy koszt eksploatacji maszyny	0,3542	0,8568	0,0000
Koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy	0,6271	0,5627	0,0000

Tabela 16. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a porównania średnich kosztów między kombajnami (lata – losowe)

Zmienna zależna	Zużycie paliwa		Koszt paliwa i smarów		Jednostkowy koszt eksploatacji maszyny		Koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy		
	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	
Jednostka	l·h <sup>-1</sup>		zł·h <sup>-1</sup>		zł·h <sup>-1</sup>		zł·ha <sup>-1</sup>		
Poziomy czynników	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	Śr.	Gr.	
K	28,8	a	151	a	541	a	340	b	
Typ	K MCS	28,0	a	147	a	608	b	265	a
	R	62,0	b	322	b	1063	c	326	b

### 6.6. Zależność pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny

W realizowanych obliczeniach statystycznych, wykonano też analizy korelacji *r* Pearsona, w których sprawdzono, czy zachodzi związek pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny i kosztem eksploatacji maszyny na jednostkę pracy. Wyniki zamieszczono w tabeli 17.

Tabela 17. Zależność (korelacja liniowa) pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny i tymi kosztami na jednostkę pracy oddzielnie dla każdego typu kombajnu

Kombajn	Zmienna		Wykorzystanie roczne
Konwencjonalny	Jednostkowy koszt eksploatacji maszyny	r Pearsona	-0,90
		istotność	0,006
	Koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy	r Pearsona	-0,90
		istotność	0,006
Konwencjonalny z separatorem	Jednostkowy koszt eksploatacji maszyny	r Pearsona	-0,90
		istotność	0,006
	Koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy	r Pearsona	-0,90
		istotność	0,006
Rotorowy	Jednostkowy koszt eksploatacji maszyny	r Pearsona	-0,87
		istotność	0,002
	Koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy	r Pearsona	-0,87
		istotność	0,002

W analizach wykonanych dla każdego z kombajnów uzyskano wyniki, które wskazują na istotne statystycznie i jednocześnie bardzo silne ujemne związki wykorzystania rocznego z kosztami eksploatacji kombajnu. Oznacza to, że w im większym stopniu odnotowano wykorzystanie agregatu maszynowego w ciągu roku, tym bardziej jednostkowe koszty eksploatacji malały.

W dalszej kolejności przeprowadzona została wielomianowa analiza kowariancji, stopnia drugiego (metoda krokowa doboru zmiennych do modelu) zależności pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny, kosztami na jednostkę pracy oraz typem kombajnu (tab. 18). Wykonano też porównania wielokrotne typów kombajnów w analizie kowariancji (tab. 19).

Tabela 18. Analiza kowariancji, wielomianowa stopnia drugiego zależności pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny i tymi kosztami na jednostkę pracy oraz typem kombajnu.

Źródło zmienności	Zmienna zależna				
	Jednostkowy koszt eksploatacji maszyny			Koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy	
	df	F	p-wartość	F	p-wartość
Typ kombajnu	2	167,3012	0,0000	72,881	0,0000
Wykorzystanie roczne	1	43,9562	0,0000	76,661	0,0000
Wykorzystanie roczne <sup>2</sup>	1	66,6253	0,0000	128,219	0,0000
Wykorzystanie roczne <sup>2</sup> · Typ kombajnu	2	30,9035	0,0000		
Wykorzystanie roczne · Typ kombajnu	2	8,6702	0,0035	21,250	0,0000
Poprawiony R <sup>2</sup>			0,96		0,95
Test Shapiro-Wilka			0,2797		0,2306
Test Levene			0,1821		0,4664

Tabela 19. Porównania wielokrotne typów kombajnów w analizie kowariancji – test Tukey’a

Zmienna zależna	Jednostka	Średnie	Typ kombajnu	Grupy jednorodne
Jednostkowy koszt eksploatacji maszyny	zł·h <sup>-1</sup>	350	K	a
		464	K MCS	a
		1229	R	b
Koszty eksploatacji maszyny na jednostkę pracy	zł·ha <sup>-1</sup>	220	K	a
		202	K MCS	a
		376	R	b

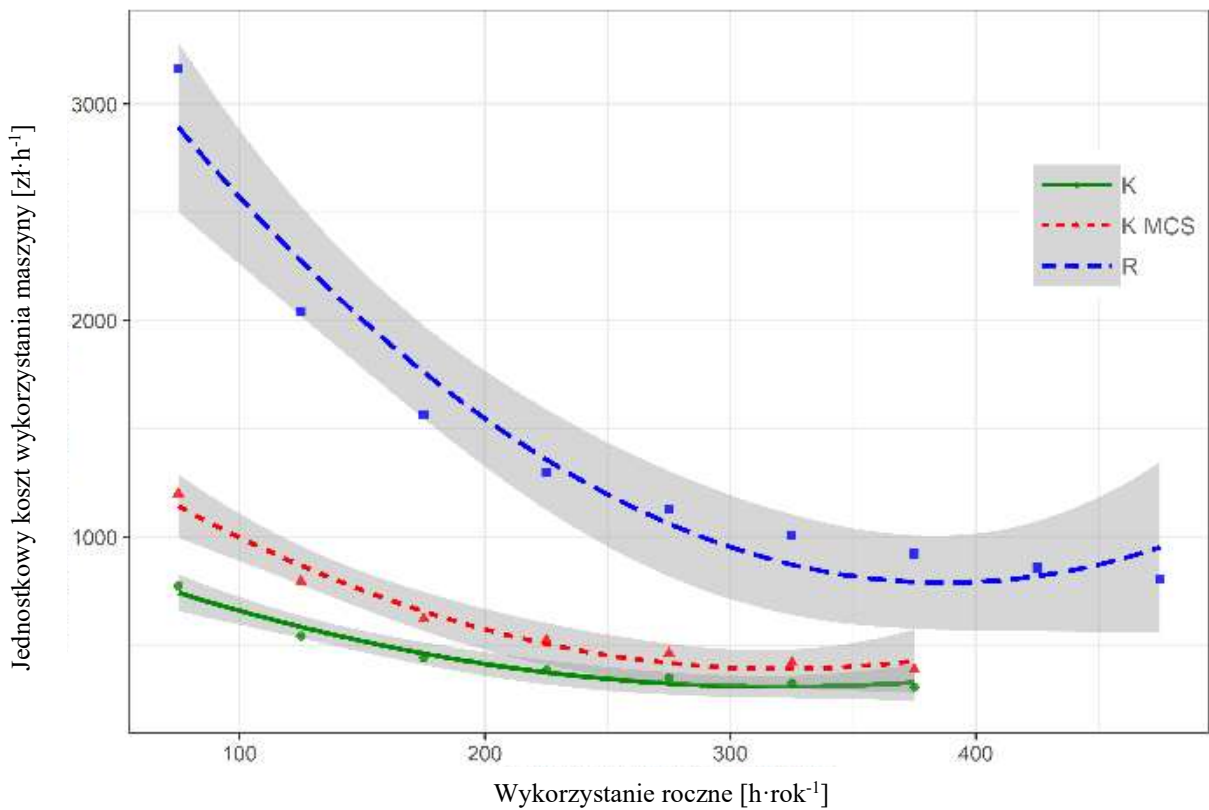
Krokowa analiza kowariancji, zależności kosztów eksploatacji maszyny na jednostkę pracy od wykorzystania rocznego do zmiennej grupującej, wykazała, że interakcja pomiędzy typami kombajnów a zmienną niezależną jest istotna. Analiza wykazała też istotne różnice pomiędzy typami badanych kombajnów oraz istotność zmiennej niezależnej – wykorzystania rocznego.

Krokowa analiza Kowariancji zależności Jednostkowego kosztu eksploatacji maszyny (zmienna zależna) od wykorzystania rocznego (zmienna niezależna) i (wykorzystania rocznego)<sup>2</sup> z uwzględnieniem typów kombajnów wykazała istotną interakcję pomiędzy typami kombajnów a zmienną niezależną w pierwszej i drugiej potęgach. Wykazane zostały też istotne różnice pomiędzy kombajnami oraz istotność zmiennej niezależnej – wykorzystania rocznego – w obu potęgach.

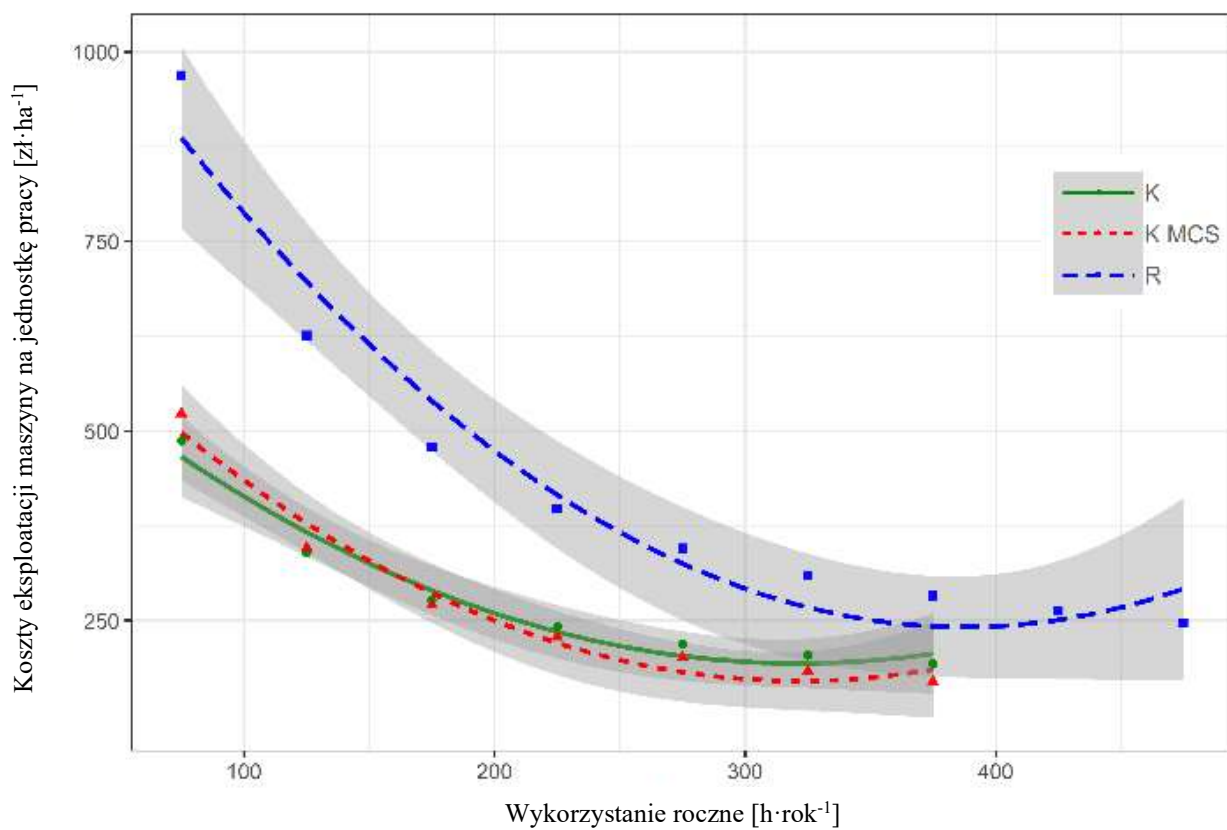
Krokowa analiza kowariancji zależności kosztów eksploatacji maszyny na jednostkę pracy (zmienna zależna) od wykorzystania rocznego (zmienna niezależna) i



(wykorzystania rocznego)<sup>2</sup> z uwzględnieniem typów kombajnów wykazała istotną interakcję pomiędzy typami kombajnów a zmienną niezależną w pierwszej potęgze. Wykazane zostały też istotne różnice pomiędzy kombajnami oraz istotność zmiennej niezależnej – wykorzystana rocznego – w obu potęgach. Parabole zależności uzyskane z analizy kowariancji Jednostkowego kosztu eksploatacji maszyny od wykorzystania rocznego kombajnu przedstawiono na rycinie 31. Zależność kosztów eksploatacji maszyny na jednostkę pracy od wykorzystania rocznego kombajnu przedstawiono na rycinie 32.



Ryc. 31. Parabole zależności jednostkowego kosztu eksploatacji maszyny od wykorzystania rocznego kombajnu.



Ryc. 32. Parabole zależności kosztów eksploatacji maszyny na jednostkę pracy od wykorzystania rocznego kombajnu.

## 7. Dyskusja

Straty ilościowe i jakościowe ziarna podczas zbioru zbóż stanowią duży problem w produkcji roślinnej. Wpływają one na zmniejszenie plonu, pogorszenie jakości siewnej i użytkowej ziarna, a przez to na koszty i opłacalność produkcji. Dodatkowo duże starty ilościowe pozostawione na polu powodują gorsze warunki dla uprawy roślin następczych (Tomchuk 2020). Na powstawanie start ziarna podczas kombajnowego zbioru zbóż mają wpływ zarówno właściwości i parametry zbieranej rośliny, rodzaj i parametry techniczne zespołu młócaço-wydzielającego oraz parametry eksploatacyjne zespołów roboczych kombajnu (Špokas *i in.* 2016, Šotnar *i in.* 2018). Prace hodowlane nad nowymi odmianami zbóż, w tym pszenicy ozimej ukierunkowane są głównie na zwiększenie plonu oraz parametrów jakościowych. W związku z tym zwiększa się ryzyko powstawania strat podczas zbioru. W celu zmniejszenia strat ziarna producenci kombajnów do zbioru zbóż modernizują i rozbudowują zespoły robocze. W związku z tymi zmianami ważną kwestią jest prowadzenie badań mających na celu poznanie mechanizmów powstawania strat w zespołach roboczych różnych rodzajów systemów omłotowych oraz wpływ poszczególnych parametrów roboczych (Bieniek 2010, Złobecki i Langman 2010, Hamzah i Alsharifi 2020, Suardi *i in.* 2020). Jest to ważne dla opracowania kryteriów doboru kombajnu dla potrzeb gospodarstwa rolnego, prognozowania strat ziarna oraz optymalizacji parametrów roboczych. Badania tego typu mają również znaczenie podczas oceny ekonomicznej procesu zbioru oraz całej produkcji zbóż.

Podczas analizowania wpływu różnych rodzajów zespołów młócaço-wydzielających oraz parametrów roboczych na jakość i straty ziarna pszenicy ozimej zbieranej kombajnem, przeprowadzono wielozmienną analizę wariancji uwzględniającą zarówno typ kombajnu, warianty ustawień oraz interakcje pomiędzy typem kombajnu a wariantem ustawień. Tak rozbudowana analiza pomogła dokładniej poznać wpływ poszczególnych czynników na zmienne zależne. Mało jest aktualnych badań na temat powstawania strat podczas zbioru pszenicy ozimej oraz innych zbóż, w których są brane pod uwagę jednocześnie różne typy zespołów młócaço-wydzielających, różne parametry eksploatacyjne oraz zachodzące między nimi interakcje. W celu głębszego poznania mechanizmu powstawania strat i zbadania istotności poszczególnych czynników słuszne wydaje się badanie takich interakcji. Do określenia wydajności

efektywnej  $W_1$  i wydajności w czasie eksploatacyjnym  $W_{07}$  zastosowano pełny chronometraż podczas czterech zmian kontrolnych. Dzięki dużej liczbie przedziałów czasowych zastosowanie tej metody daje wysoką dokładność pomiaru. W najnowszych badaniach eksploatacyjnych autorzy tj. Benes *i in.* (2014), Masek, Novak, i Pavlicek (2015), Masek, Novak, Kroulik, *i in.* (2015), Špokas *i in.* (2016) nie wykonywali metody chronometrażowej i obliczeń wskaźników i współczynników eksploatacyjnych tylko opierali się na wydajności i zużyciu paliwa określonej przez system pokładowy maszyny. Jest to metoda mniej dokładna, ponieważ systemy większości producentów określają tylko wydajność efektywną i nie uwzględniają pozostałych przedziałów czasowych.

Głównymi parametrami oceny eksploatacyjnej kombajnów do zbioru zbóż są: przepustowość, poziom uszkodzeń i strat ziarna oraz stopień czystości ziarna. Porównując przepustowość i parametry jakościowe w badaniach własnych można zaobserwować, że dla wszystkich wariantów kombajn rotorowy charakteryzował się największą przepustowością, największym procentowym udziałem ziarna całego w zbieranym materiale, najmniejszą ilością mikrouszkodzeń, ziarna połamanego i uszkodzonego oraz największym stopniem czystości ziarna. Średnia przepustowość kombajnu rotorowego była większa od kombajnu konwencjonalnego o 71,56% natomiast od konwencjonalnego z separatorem o 40,6%. Porównując warianty ustawień dla wszystkich typów kombajnów można zaobserwować, że najmniejszą średnią przepustowość osiągnięto przy zastosowaniu wariantu 3 i była ona mniejsza o 13,1% od wariantu 1. Pomiędzy 1 a 3 wariantem ustawień średnia wartość przepustowości kombajnu konwencjonalnego zmieniła się o  $2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , konwencjonalnego z separatorem o  $1,8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ , a rotorowego o  $2,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ . Na zmniejszenie przepustowości bezpośredni wpływ miało zmniejszenie szczeliny roboczej.

W badaniach własnych największe różnice parametrów jakościowych odnotowano w udziale ziarna całego, ziarna połamanego i uszkodzonego oraz stopniu czystości ziarna. Ziarno zebrane przy zastosowaniu parametrów roboczych z wariantu 1, dla wszystkich typów kombajnów charakteryzowało się najmniejszym udziałem mikrouszkodzeń wydzielonych z ziarna całego, a największym z wariantu 3. Jest to związane z intensywniejszym omłotem, którym charakteryzowały się ustawienia w wariacie 3. Dla wszystkich trzech wariantów ustawień ziarno zebrane kombajnem rotorowym charakteryzowało się najmniejszym udziałem mikrouszkodzeń, z tym, że w wariacie 1 średni udział ziarna z mikrouszkodzeniami był zbliżony do ziarna zebranego kombajnem konwencjonalnym i wynosił 0,25%. Można tym samym stwierdzić, że w systemie z

osiowym przepływem masy ziarno jest traktowane łagodniej niż w systemach ze stycznym zasilaniem. Te zależności potwierdzają się również w przypadku makrouszkodzeń, do których zaliczane jest ziarno połamane i uszkodzone. Ziarno zebrane przy użyciu parametrów roboczych z wariantu 1 miało najmniej uszkodzonych i połamanych ziarniaków niezależnie od typu kombajnu, natomiast wariant 3 najwięcej. We wszystkich trzech wariantach ustawień mediana ziarna połamanego i uszkodzonego była najmniejsza dla próbek zebranych kombajnem rotorowym. Niezależnie od wariantu ustawień najwięcej ziarna połamanego i uszkodzonego znajdowało się w próbkach zebranych kombajnem z konwencjonalnym systemem omłotu. Różnice w ilości makrouszkodzeń pomiędzy poszczególnymi typami kombajnów były znacznie większe w porównaniu do mikrouszkodzeń. Kombajn konwencjonalny z separatorem generował podczas zbioru mniejszy udział uszkodzeń niż kombajn konwencjonalny niezależnie od wariantu ustawień parametrów roboczych. Wpływa na to większa powierzchnia omłotu i separacji oraz to, że zastosowanie dodatkowego bębna separującego pozwala zredukować obroty bębna młocącego o  $50 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$  w każdym wariantcie ustawień. Masek *i in.* (2016) prowadzili badania, których celem było rozpoznanie i porównanie wpływu mechanizmu młocącego kombajnów zbożowych na uszkodzenia ziarna. Porównanie to oparto na pomiarach polowych przeprowadzonych na dwóch typach kombajnów zbożowych, z omłotem stycznym (kombajn klawiszowy z separatorem oraz kombajn hybrydowy) oraz osiowym (dwa kombajny rotorowe). Ziarno pszenicy ozimej i jęczmienia jarego oceniano po omłocie. Stwierdzono, że kombajny z bębniem młocącym zasilanym w sposób styczny generowały większy udział uszkodzeń. Dla tych kombajnów średni udział uszkodzeń wynosił 1,84%, a dla kombajnów z osiowym przepływem masy: 0,35%. Analiza wyników wykazała, że udział uszkodzeń ziarna po zbiorze kombajnem z rotorowym układem młocąco-wydzielającym był istotnie mniejszy w porównaniu z zespołem młocącym zasilanym stycznie. Dodatkowo wykazano, że ustawienia parametrów roboczych również mają wpływ na powstawanie uszkodzeń ziarna i należy je zmodyfikować zgodnie z rzeczywistymi warunkami. Pośrednio potwierdzono również wpływ wilgotności ziarna na wytrzymałość mechaniczną ziarniaków. W związku z tym, należy uwzględnić też wpływ pogody w danym roku na mechaniczne uszkodzenia ziarna. Według Špokas *i in.* (2008) największy wpływ na uszkodzenia ziarna ma prędkość obwodowa cepa bębna młocącego. Poprzez zwiększenie szybkości podawania zboża do młocarni zmniejszają się uszkodzenia ziarna. Autorzy zbadali wpływ prędkości podawania zboża do zespołu młocącego, prędkości obwodowej bębna młocącego oraz

szczeliny między bębniem a klepiskiem na uszkodzenia ziarna. Oceniając warunki zbioru zboża dopuszczalny przepływ zboża wynosi od 0,70 do 0,96 kg·(s·m)<sup>-1</sup> na jeden metr długości cepów kombajnu z wielobębnowym zespołem młócaço-wydzielającym. Przy zbiorze suchego zboża (o wilgotności 12–14%) i zasileniu młocarni dopuszczalnym przepływem granicznym, prędkość optymalna bębna młócaçoego wynosiła 25 m·s<sup>-1</sup>. Podczas zbioru mokrego zboża (wilgotność > 18%) prędkość optymalna bębna młócaçoego wynosiła od 31 m·s<sup>-1</sup> do 34 m·s<sup>-1</sup>. Omłot ziarna i stopień jego uszkodzenia na całej długości klepiska zwiększały się, gdy zmniejszał się prześwit między cepami bębna a klepiskiem. W badaniach przeprowadzonych przez Špokas *i in.* (2008) optymalny prześwit zależał od wilgotności masy zbożowej. Dla bardzo suchych zbóż o zawartości wilgoci poniżej 12%, optymalna szczelina między cepami bębna młócaçoego a wlotem klepiska wynosiła 12 mm, dla suchych zbóż o zawartości wilgoci w zakresie 12–14%, optymalna szczelina wynosiła 11 mm. Przy średniej wilgotności od 14 do 16% lub wysokiej zawartości wilgoci powyżej 16%, szczelina optymalna wynosiła 10 mm. Wykazano, że istotny wpływ na straty spowodowane niedomłotem oraz na uszkodzenia ziarna ma wilgotność zbieranego materiału oraz parametry zespołu młócaço-wydzielającego. Autorzy wykazali takie zależności również w późniejszych badaniach (Špokas *i in.* 2016).

W badaniach własnych trochę inaczej wyniki rozkładały się dla całkowitych strat ilościowych kombajnu. Dla tej zmiennej przy zastosowaniu parametrów roboczych z wariantu 1, najmniejszą średnią wartość strat całkowitych powodował kombajn konwencjonalny z separatorem, a nieznacznie większą wynoszącą 0,3% - kombajn rotorowy. Podobnie sytuacja wyglądała przy zastosowaniu ustawień z wariantu 2 i wariantu 3, najmniejsze średnie straty całkowite uzyskał kombajn konwencjonalny z separatorem. Dla kombajnów konwencjonalnych wraz ze zmniejszaniem przepustowości zmniejszał się ogólny poziom strat młocarni. Przy zmniejszeniu przepustowości o około 2 kg·s<sup>-1</sup> ogólne straty zespołu młócaçoego dla kombajnu konwencjonalnego zmniejszyły się o 0,57% natomiast dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem o 0,2%. Inna zależność występowała podczas zbioru pszenicy kombajnem rotorowym. Zmniejszenie przepustowości z 19,8 do 17,7 kg·s<sup>-1</sup> powodowało zwiększenie strat młocarni średnio o 0,29%. Związane jest to z inną charakterystyką omłotu w kombajnie z osiowym przepływem masy.

W badaniach własnych zmniejszenie prędkości jazdy (przepustowości) nie wpływało na zmniejszenie ogólnych strat zespołu żniwnego. Biorąc pod uwagę wszystkie

typy kombajnów można zaobserwować wzrost strat ogólnych zespołu żniwnego przy mniejszej przepustowości. Badania, których celem było opracowanie bezwymiarowego modelu do przewidywania strat powstających na przyrządzie żniwnym były prowadzone przez Chaab *i in.* (2020). W badaniach polowych monitorowano konwencjonalny kombajn zbożowy. Do oceny polowej wzięto pod uwagę takie parametry jak: prędkość obrotowa nagarniacza (21, 25 i 35 obr·min<sup>-1</sup>), prędkość jazdy do przodu (2, 3 i 4 km·h<sup>-1</sup>) oraz wysokość ścinania nad powierzchnią pola (15, 25 i 35 cm). Wyniki wykazały, że optymalne wartości uzyskano przy: wskaźniku nagarniacza (stosunek prędkości jazdy do prędkości obrotowej nagarniacza) wynoszącym 1,38, wysokości listwy tnącej nad powierzchnią pola 15 cm, prędkości jazdy kombajnu zbożowego 4 km·h<sup>-1</sup> i prędkości obrotowej nagarniacza 21 obr·min<sup>-1</sup>. Dla porównania w badaniach własnych wskaźnik nagarniacza wynosił: dla kombajnów konwencjonalnych ok. 1,2 a dla kombajnu rotorowego 1,1, a odległość listwy tnącej od powierzchni pola wynosiła ok. 16 cm. Zaobserwowano taką samą zależność pomiędzy prędkością roboczą a stratami powstającymi na przyrządzie żniwnym, czyli ogólne straty zespołu żniwnego rosły wraz ze zmniejszaniem prędkości roboczej kombajnu.

Uwzględniając wszystkie warianty ustawień można stwierdzić, że najmniejszymi stratami całkowitymi charakteryzował się kombajn konwencjonalny z separatorem, a największymi konwencjonalny, a różnica wynosiła 0,89%. Zastosowane warianty ustawień wpływały istotnie na straty całkowite dla wszystkich typów kombajnów. Dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem średnia wartość strat całkowitych maksymalnie wynosiła 0,43%. Dla wszystkich trzech wariantów ustawień największe straty powodował kombajn konwencjonalny, aczkolwiek spełniał wymagania agrotechniczne stawiane maszynom do zbioru zbóż - straty całkowite poniżej 2% (Jagiełło 2013). Badania poziomu strat podczas zbioru pszenicy zwyczajnej na podstawie niektórych wskaźników technicznych były również przeprowadzone przez innych autorów. Hamzah i Alsharifi (2020) wykorzystali do badań dwa kombajny z konwencjonalnym zespołem młócaço-wydzielającym, a poziom strat był mierzony przy trzech prędkościach roboczych: 2,5, 3 i 4,24 km·h<sup>-1</sup>, z uwzględnieniem dwóch przedziałów wilgotności ziarna: 11–13% i 13–15%. Badania przeprowadzono w eksperymencie czynnikowym w układzie randomizowanych kompletnych bloków z trzema powtórzeniami. Wyniki pokazały, że prędkość jazdy (zmiana przepustowości) miała istotny wpływ na poziom strat. Zbiór przy prędkości 2,5 km·h<sup>-1</sup> charakteryzował się najmniejszymi stratami we wszystkich badanych zespołach roboczych w porównaniu

do pozostałych dwóch przepustowości. Średnie całkowite straty kombajnu przy przedziale wilgotności ziarna w przedziale 11-13% wynosiły dla pierwszego kombajnu 3,281% a dla drugiego 3,576%, natomiast dla drugiego zakresu wilgotności odpowiednio 3,493% i 3,669%. Wykazano również, że wilgotność ziarna też miała istotny wpływ na generowanie strat: poziom strat w zakresie wilgotności 11–13% był istotnie niższy od przedziału 13–15% przy wszystkich badanych prędkościach roboczych. W porównaniu do kombajnu konwencjonalnego z badań własnych, Hamzah i Alsharifi uzyskali znacznie wyższe straty. Wpływać na to może fakt, że stosowali jeden wariant ustawień we wszystkich badanych warunkach. W badaniach Šotnar *i in.* (2018) przedstawiono wpływ zmiany parametrów roboczych na straty ilościowe dla kombajnu z rotorowym zespołem młócająco-wydzielającym podczas zbioru jęczmienia jarego i pszenicy ozimej. Ilościowe wartości strat były zawsze mniejsze dla ustawień własnych w porównaniu do ustawień zalecanych przez producenta. Podczas zbioru jęczmienia, w zależności od średniego plonu ziarna na danym polu, przy ustawieniach własnych całkowite straty ziarna wahały się od 0,41% do 0,68%, natomiast przy ustawieniach zalecanych od 0,52% do 0,95%. W przypadku pszenicy wyniki były podobne. Straty podczas zbioru przy ustawieniach niestandardowych wahały się od 0,49% do 0,75%, podczas gdy straty przy ustawieniach zalecanych wahały się od 0,58% do 0,97%. Wyniki te pokazują istotny wpływ parametrów roboczych kombajnu na całkowite straty ziarna. Umiejętności operatora i dobra znajomość procesu zbioru, który jest złożonym zagadnieniem są niezbędne do zmniejszenia strat ziarna podczas zbioru, a co za tym idzie zwiększenia opłacalności jego produkcji.

Biorąc pod uwagę straty oraz uszkodzenia ziarna za najbardziej korzystny wariant parametrów roboczych dla wszystkich trzech badanych typów kombajnów można uznać wariant 1: najmniejszy poziom mikrouszkodzeń – 3,22% oraz udział ziarna połamanego i uszkodzonego – 2,60%, średnie całkowite straty kombajnów wynosiły 0,72%. Zastosowanie wariantu 2 i 3 podczas zbioru kombajnem rotorowym zwiększało zarówno poziom mikrouszkodzeń ziarna, udział ziarna połamanego i uszkodzonego oraz całkowite straty kombajnu. Dla kombajnów konwencjonalnych wariant 2 i 3 charakteryzował się znacznym zwiększeniem poziomu mikrouszkodzeń i ziarna połamanego i uszkodzonego. Jednocześnie można zaobserwować zmniejszenie całkowitych strat kombajnu przy zastosowaniu wariantu 3. Spowodowane jest to tym, że bezpośredni wpływ na powstawanie uszkodzeń ma zarówno szczelina robocza jak i prędkość obrotowa bębna młócającego. Na podstawie analizy badań własnych można stwierdzić, że typ zespołu



młócaço-wydzielającego oraz parametry robocze mają istotny wpływ na powstawanie strat jakościowych podczas zbioru pszenicy ozimej: makrouszkodzeń i mikrouszkodzeń oraz zanieczyszczeń ziarna, co potwierdza pierwszą hipotezę roboczą. Spokas i Steponavičius (2011) zbadali jakość pracy dwóch kombajnów wyposażonych w jeden rotor młócaço-wydzielający, zwracając szczególną uwagę na straty separacji ziarna, uszkodzenia ziarna, ilość zanieczyszczeń w ziarnie oraz zużycie paliwa. Określono zależność między szybkością podawania pszenicy ozimej do kombajnu a wymienionymi czynnikami eksploatacyjnymi. Stwierdzono, że przy zwiększeniu przepustowości pszenicy ozimej z 3,4 do 27,2 kg·s<sup>-1</sup> kombajny nie przekroczyły dopuszczalnego limitu uszkodzeń ziarna, który wynosił 1%. Najmniej uszkodzeń ziarna – 0,2%, wystąpiło przy przepustowości 20 kg·s<sup>-1</sup>. Straty zespołu młócaço-wydzielającego ziarno dla obu badanych kombajnów wynosiły około 0,4%.

W badaniach własnych założono, że na poziom strat poza przepustowością typem zespołu młócacego i parametrami roboczymi ma również wpływ stosunek masy ziarna do masy słomy oraz masa 1000 ziaren. W oparciu o analizę kowariancji zostało wyznaczone równanie, które potwierdza to założenie dzięki czemu można przyjąć drugą hipotezę za prawdziwą. Przy zastosowaniu większej ilości parametrów zmiennych, matematyczny model procesu powstawania strat ziarna charakteryzuje się wyższą dokładnością. We wcześniejszych badaniach autorzy przedstawiali równania opisujące całkowite straty ziarna kombajnu do zbioru zbóż uwzględniając różne parametry robocze oraz parametry omłacanej masy. Zubko *i in.* (2018) w swoich badaniach przedstawili proces powstawania strat ziarna pszenicy ozimej podczas zbioru kombajnem rotorowym za pomocą funkcji kwadratowej biorąc pod uwagę tylko jedną zmienną jaką była aktualna prędkość jazdy. Šotnar *i in.* (2018) również analizowali powstawanie strat ziarna pszenicy ozimej w kombajnie z osiowym przepływem masy opisując je funkcją kwadratową, gdzie zmienną niezależną był średni poziom plonu w t·ha<sup>-1</sup>. Dodatkowo w tych badaniach autorzy uwzględnili dwa warianty ustawień parametrów roboczych zastosowanego kombajnu do zbioru zbóż. Bieniek *i in.* (2017) w swoich badaniach założyli, że na powstawanie strat w kombajnie z rotorowym zespołem młócaço-wydzielającym wpływa więcej czynników. W wyniku wielokrotnej regresji liniowej powstało równanie strat ilościowych w zespole separującym z uwzględnieniem takich parametrów jak: prędkość obrotowa rotora, prędkość robocza kombajnu oraz prędkość obrotowa silnika. Jeszcze bardziej rozbudowane równanie opisujące powstawanie strat ziarna stworzyli na podstawie wyników swoich badań Voicu *i in.* (2007). Model ten bazował na siedmiu

zmiennych tj.: przepustowość kombajnu, prędkość powietrza przepływającego przez zespół czyszczący, szczelina na sitach, częstotliwość ruchów posuwisto-zwrotnych kosza sitowego, długość sit oraz stosunek masy zanieczyszczeń do masy ziaren znajdujących się na sitach.

W badaniach własnych typ kombajnu oraz zastosowane warianty ustawień parametrów roboczych nie wpłynęły istotnie na energię kiełkowania. Ziarno zebrane kombajnem rotorowym charakteryzowało się najwyższą zdolnością kiełkowania natomiast kombajnem konwencjonalnym z separatorem najniższą. Mimo istotnych statystycznie różnic w zdolności kiełkowania pod względem użytkowym różnica była niewielka, a średnie różniły się o 1,4%. Dla wszystkich typów kombajnów zdolność kiełkowania przekraczała 96% co spełnia wymagania jakościowe dla nasion roślin zbożowych przeznaczonych na kwalifikowany materiał siewny zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi (*Dz.U. 2020 poz. 975*). Pod względem nasion martwych zaobserwowano istotne różnice pomiędzy typami kombajnów oraz przy różnych wariantach ustawień dla każdego typu kombajnu. W badaniach przeprowadzonych przez Masek *i in.* (2016) stwierdzono wyższą zdolność kiełkowania ziaren zebranych kombajnami z osiowym przepływem masy. Różnice w kiełkowaniu ziarniaków w porównywanych różnych systemach omłotu nie były duże i wynosiły 95,00 – 97,83% dla pszenicy ozimej i 93,75 – 96,75% dla jęczmienia jarego. Ziarna zebrane przez rotorowy system omłotu mają wyższą zdolność kiełkowania wynoszącą ponad 97% dla pszenicy i ponad 95% dla jęczmienia. Lashgari *i in.* (2008) zbadali poprzez analizę wariancji wpływ prędkości roboczej, prędkości obrotowej bębna młócającego oraz szczeliny pomiędzy bębniem a klepiskiem w kombajnie konwencjonalnym na uszkodzenia ziarna pszenicy i kiełkowanie nasion. Zastosowano trzy poziomy regulacji dla każdej ze zmiennych, tj. prędkość jazdy do przodu: 1,2, 1,8 i 2,5 km·h<sup>-1</sup>, prędkość obrotowa bębna młócającego 800, 900, 1000 obr·min<sup>-1</sup> oraz szczelina robocza 15, 20 i 25 mm. Wyniki wykazały istotny wzrost uszkodzeń ziarniaków i spadek kiełkowania nasion pod wpływem zmniejszenia prędkości jazdy, zwiększenia obrotów bębna i zmniejszenia szczeliny między bębniem młócającym a klepiskiem. Najmniejszą ilość uszkodzonych ziaren wynoszącą 5,47% oraz największą zdolność kiełkowania nasion wynoszącą 96,61% uzyskano dla ziarna zebranego z prędkością roboczą 1,8 km·h<sup>-1</sup>, prędkość obrotowa bębna młócającego wynosiła 800 obr·min<sup>-1</sup>, a szczelina pomiędzy bębniem a wlotem klepiska była równa 25 mm.

Największe godzinowe zużycie paliwa uzyskał kombajn rotorowy, a najmniejsze kombajn konwencjonalny z separatorem. Różnica pomiędzy tymi dwoma typami kombajnów wynosiła  $34 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ . Kombajn konwencjonalny zużywał tylko  $0,8 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$  więcej paliwa. Jednak biorąc pod uwagę ilość wykonanej pracy w tym czasie to można zaobserwować, że kombajn rotorowy zużywa średnio  $18,96 \text{ l}\cdot\text{ha}^{-1}$ , konwencjonalny  $18 \text{ l}\cdot\text{ha}^{-1}$  a konwencjonalny z separatorem  $12,17 \text{ l}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Kombajn konwencjonalny mimo silnika o mniejszej mocy zużywa więcej paliwa niż kombajn konwencjonalny z separatorem. Masek, Novak, Kroulik, *i in.* (2015) w swoich badaniach porównywali parametry pracy kombajnów zbożowych w wybranym gospodarstwie rolnym. Zmierzono i oceniono parametry pracy kombajnu z konwencjonalnym zespołem młócaço-wydzielającym oraz kombajnu rotorowego. Kombajn konwencjonalny osiągnął średnią wydajność godzinową  $3,1 \text{ ha}\cdot\text{h}^{-1}$ , kombajn z osiowym przepływem masy miał średnią wydajność godzinową  $4,6 \text{ ha}\cdot\text{h}^{-1}$ . Wydajności są ściśle związane ze zużyciem paliwa. Badania te potwierdziły wyższą energochłonność osiowej koncepcji omłotu i separacji w porównaniu z konwencjonalnym układem młócaço-wydzielającym. System osiowy osiągnął wyższy poziom wydajności dzięki dużej przepustowości materiału. Potwierdzono również korzystny wpływ większej szerokości roboczej zespołu żniwnego na zmniejszenie zużycia paliwa. Takie same zależności autorzy (Masek, Novak, i Pavlicek 2015) udowodnili w innych swoich badaniach. Może być to czynnik powodujący zwiększone zużycie paliwa w kombajnie konwencjonalnym w badaniach własnych. Špokas *i in.* (2014) w badaniach na temat zużycia paliwa przez kombajn zbożowy o przepływie osiowym z dwoma rotorami młócaço-wydzielającymi wykazali, że na poziom zużycia paliwa wpływają również parametry zespołów roboczych. Badania wykazały, że gdy gleba jest wilgotna, a zbiornik na ziarno pełny to prędkość kombajnu poruszającego się po ściernisku powyżej  $6 \text{ km h}^{-1}$  jest uważana za nieracjonalną, gdyż zużycie paliwa wzrasta. Podczas zbioru suchej pszenicy ozimej, jęczmienia jarego i owsa zużycie paliwa na tonę ziarna jest najmniejsze, gdy kombajn pracuje z przepustowością od  $15$  do  $18 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ . Przy przepustowości masy wynoszącej  $16,6 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  i przy zwiększeniu prędkości obrotowej rotoru z  $1000$  do  $1200 \text{ obr}\cdot\text{min}^{-1}$ , wzrost godzinowego zużycia paliwa wynosi  $16,8 \text{ l}$  przy zbiorze pszenicy ozimej i  $4,4 \text{ l}$  przy zbiorze jęczmienia jarego. Zwiększenie szczelin pomiędzy rotorem młócaćym a klepiskiem z  $10$  do  $14 \text{ mm}$  przy przepustowości  $16,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$  jęczmienia jarego, pozwala na zmniejszenie godzinowego zużycia paliwa o około  $12 \text{ l}$ . Kiedy kombajn zbożowy pracuje z przepustowością

16 kg·s<sup>-1</sup> podczas zbioru pszenicy ozimej, a słoma jest odkładana w pokos, to zużycie paliwa wynosi 8,0 l·h<sup>-1</sup> mniej w porównaniu z rozdrabnianiem słomy.

Wysokie zużycie paliwa przekłada się w eksploatacji kombajnu konwencjonalnego na wysokie koszty eksploatacji na jednostkę pracy: 340 zł·ha<sup>-1</sup>. Najniższe koszty eksploatacji na jednostkę pracy osiągnął kombajn konwencjonalny z separatorem (326 zł·ha<sup>-1</sup>). Wykonane analizy pokazały, że zachodzi bezpośredni związek pomiędzy wykorzystaniem rocznym maszyny a jednostkowymi kosztami eksploatacji. Aby użytkowanie maszyny było opłacalne musi ona być wykorzystywana w ciągu roku odpowiednią liczbę godzin. Jeśli te zależności nie są spełnione w aspekcie ekonomicznym bardziej opłaca się wynajem maszyny. Przyjmując koszt usługi na poziomie 350 zł·ha<sup>-1</sup> (średnia z lat, w których przeprowadzono badania) można zaobserwować, że dla maszyny konwencjonalnej oraz dla kombajnu konwencjonalnego z separatorem koszt wykonania usługi równoważy się przy około 125 h·rok<sup>-1</sup> a dla kombajnu rotorowego dopiero przy ponad 250 h·rok<sup>-1</sup>. W badaniach własnych na wysoki koszt eksploatacji kombajnu konwencjonalnego poza zużyciem paliwa wpływało małe wykorzystanie roczne. Wykonana analiza kosztów ma kluczowe znaczenie podczas doboru odpowiedniego typu kombajnu na potrzeby gospodarstwa. W swoich badaniach na temat kosztów eksploatacji kombajnów do zbioru zbóż Olt *i in.* (2019) wykazali, że jednostkowy koszt eksploatacji (EUR·h<sup>-1</sup>) kombajnów zbożowych jest różny ze względu na ich zmienne roczne obciążenie pracą, tj. liczbę godzin pracy. Koszty utrzymania kombajnów zbożowych są niższe w pierwszym roku, jednak wyniki badań pokazały, że koszty te rosną z roku na rok. Koszt utrzymania w pierwszym roku użytkowania (2004) kombajnu konwencjonalnego z wielobębnowym układem młócaço-wydzielającym wyniósł 4,59 EUR·h<sup>-1</sup> (20,50 zł·h<sup>-1</sup>). W ostatnim roku użytkowania (2014) koszty utrzymania wzrosły do 15 EUR·h<sup>-1</sup> (67 zł·h<sup>-1</sup>). W tych badaniach najwyższy koszt na jednostkę powierzchni wygenerował zbiór zbóż kombajnem konwencjonalnym z separatorem 176,32 EUR·ha<sup>-1</sup> (787,64 zł·ha<sup>-1</sup>). Koszt ten jest nienormalnie duży i spowodowany wysokimi kosztami utrzymania oraz tym, że ten kombajn w badaniach osiągnął najniższą wydajność (średnia wydajność eksploatacyjna 1,36 ha·h<sup>-1</sup>). Najniższy jednostkowy koszt eksploatacji osiągnął kombajn z rotorowym układem omłotu: 41,62 EUR·ha<sup>-1</sup> (185,92 zł·ha<sup>-1</sup>). Średni jednostkowy koszt zbioru dla wszystkich kombajnów pracujących w tym gospodarstwie (4 kombajny konwencjonalne z separatorem oraz 2 kombajny rotorowe) wyniósł 63 EUR·ha<sup>-1</sup> (281,43 zł·ha<sup>-1</sup>) co stanowiło 13,4% kosztów całkowitych uprawy zbóż w badanym gospodarstwie. Duma-Copcea *i in.* (2019) oraz

Şeran *i in.* (2019) w swoich pracach wskazują, że w celu osiągnięcia lepszej wydajności eksploatacyjnej a tym samym zmniejszenia kosztów należy racjonalnie dobrać środki transportowe, niezależnie do każdego kombajnu. W celu zapewnienia maksymalnej wydajności roboczej przy minimalnym zużyciu paliwa kombajny powinny być zabezpieczone odpowiednimi środkami transportu do odbioru ziarna. Liczba środków transportu powinna być skorelowana z wydajnością godzinową kombajnów i odległością transportową produktów. Organizacja w dobrych warunkach zbioru zbóż, poprzez pełne wykorzystanie czasu pracy, unikanie zbędnych postojów i przemieszczeń, wykorzystanie maszyn z maksymalną wydajnością pracy i przy określonym zużyciu paliwa, pozwala zredukować koszty eksploatacji. Szuk i Berbeka (2014) prowadzili badania, których celem było rozstrzygnięcie, czy bardziej opłacalną alternatywą jest korzystanie przez gospodarstwo ze zbioru usługowego czy zakup nowego lub używanego kombajnu do zbioru zbóż. Utworzono dwie grupy typologiczne kombajnów zbożowych (grupa A: kombajn konwencjonalny o wydajności eksploatacyjnej  $0,85 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ , grupa B: kombajn konwencjonalny z separatorem o wydajności eksploatacyjnej  $1,65 \text{ ha} \cdot \text{h}^{-1}$ ) Ustalono punkty graniczne równoważące cenę usługi w godzinach pracy i powierzchnię w hektarach przeznaczoną do zbioru. Badania wykazały, że zakup nowego kombajnu będzie racjonalny tylko w tych gospodarstwach, w których minimalna powierzchnia uprawy zbóż i roślin podobnych technologicznie zostanie osiągnięta dla grupy A na poziomie 128 ha, dla grupy B na poziomie 173 ha. W przypadku niespełnienia tych wymagań obszarowych gospodarstwa powinny korzystać z usług lub mogą sobie pozwolić na zakup sprzętu używanego za średnią cenę nieprzekraczającą: 89 530 zł dla kombajnów grupy A i 176 315 zł dla kombajnów grupy B.

Wykonane analizy są rozszerzeniem wiedzy poznawczej z zakresu metody oceny procesu zbioru, czynników wpływających na powstawanie strat i uszkodzeń, przebiegu podstawowych funkcji tj. przepustowość oraz jednostkowe koszty eksploatacji w zależności od wybranych parametrów. Praca ma dodatkowo znaczenie użytkowe, ponieważ uzyskane wyniki pozwalają na prognozowanie strat ziarna w zależności od zastosowanych parametrów, dobór odpowiedniego typu kombajnu do potrzeb danego gospodarstwa oraz ocenę ekonomiczną procesu zbioru pszenicy ozimej.

## 8. Wnioski

W oparciu o przeprowadzone badania i wykonaną analizę statystyczną wyników można sformułować następujące wnioski:

- 1) Typ zespołu młóca-co-wydzielającego oraz parametry robocze mają istotny wpływ na straty ziarna, mikrouszkodzenia i makrouszkodzenia oraz stopień zanieczyszczeń podczas zbioru pszenicy ozimej.
- 2) Ziarno zebrane kombajnem z rotorowym zespołem młóca-co-wydzielającym dla wszystkich trzech wariantów parametrów roboczych charakteryzowało się najmniejszym udziałem mikrouszkodzeń – 3,89%, uszkodzonego i połamanego ziarna – 1,92%, najwyższym stopniem czystości ziarna – 98,6%. Jednocześnie kombajn z osiowym przepływem masy osiągnął najwyższą średnią przepustowość wynoszącą  $18,7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- 3) Wykazano istotną interakcję pomiędzy typem kombajnu a wariantem ustawień parametrów roboczych. Zależności interakcyjne wykazano dla ziarna całego, ziarna z mikrouszkodzeniami, ziarna połamanego i uszkodzonego oraz stopnia czystości ziarna.
- 4) Pod względem strat i uszkodzeń ziarna najbardziej korzystnym wariantem ustawień dla wszystkich trzech typów kombajnów był wariant 1 – omlot łagodny. Dodatkowo wszystkie trzy typy kombajnów w tym wariacie osiągnęły najwyższą przepustowość.
- 5) Osiągnięcie wyższej wydajności zbioru, obniżenie strat ilościowych i jakościowych ziarna pszenicy ozimej jest możliwe poprzez stosowanie właściwych parametrów roboczych kombajnu podczas zbioru zbóż. W celu doboru właściwych parametrów pracy, operator musi wykazać się znajomością instrukcji obsługi oraz wiedzą specjalistyczną z zakresu zbioru zbóż.
- 6) Optymalizacja kosztów zbioru pszenicy ozimej jest możliwa poprzez właściwe wykorzystanie roczne kombajnu do zbioru zbóż, na które istotny wpływ ma typ użytkowanego kombajnu. Ponadto umiejętne wykorzystanie kombajnu w procesie zbioru pozwala dodatkowo osiągnąć wyższą wydajność co również przekłada się na niższe jednostkowe koszty eksploatacji.
- 7) Do prognozowania poziomu całkowitych strat badanych typów kombajnów na podstawie przepustowości, masy 1000 ziaren, stosunku masy ziarna do masy

słomy oraz wariantów parametrów roboczych można wykorzystać równanie prognozy strat uzyskane z analizy kowariancji.

- 8) Ziarno zebrane przez wszystkie trzy typy badanych kombajnów zbożowych, spełnia wymagania jakościowe dla nasion roślin zbożowych przeznaczonych na kwalifikowany materiał siewny. Najwyższą zdolność kiełkowania wynoszącą 97,5% osiągnęło ziarno zebrane kombajnem z osiowym przepływem masy.
- 9) Wszystkie trzy typy badanych kombajnów zbożowych spełniały wymagania agrotechniczne stawiane maszynom do zbioru zbóż pod względem całkowitych strat ziarna podczas zbioru. Pod względem czystości ziarna wymagania spełniały kombajn konwencjonalny z separatorem rotacyjnym oraz kombajn rotorowy natomiast pod względem uszkodzeń ziarna tylko kombajn rotorowy.
- 10) Przeprowadzone badania i wykonane analizy mogą być pomocne podczas podejmowania decyzji o wyborze odpowiedniego typu kombajnu zbożowego do potrzeb danego gospodarstwa. Ułatwiają także podejmowanie decyzji odnośnie oceny ekonomicznej opłacalności kupna nowego lub używanego kombajnu, wynajmu długoterminowego albo korzystania z usług agrotechnicznych.
- 11) Celowe wydaje się dalsze prowadzenie badań w celu oceny wpływu typu zespołu młócaco-wydzielającego oraz parametrów roboczych na parametry jakościowe ziarna oraz koszty eksploatacji podczas zbioru innych gatunków zbóż i roślin podobnych technologicznie.

## 9. Spis literatury

1. AGCO (2013). *Combines - introduction guide. Training material*. Breganze.
2. Astanakulov K., Shovazov K., Borotov A., Turdibekov A. i Ibrokhimov S. (2021). Wheat harvesting by combine with GPS receiver and grain sensor, *E3S Web of Conferences* 227.
3. Badawi M., Salama A., Mersal I. i Attia N. (2009). Effect of seed classes, harvesting dates and storage periods on yield and seed quality of wheat, *Journal of Agricultural Sciences, Mansoura University* 34 (12), 11375–11390.
4. De Baerdemaeker J. i Saeys W. (2013). Advanced control of combine harvesters. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, s. 1–5. IFAC.
5. Banasiak J., Bieniek J. i Lewandowski B. (2006). Wpływ nachylenia terenu na czystość ziarna zbieranego kombajnem Bizon Z 058 wyposażonym w sito daszkowe, *Inżynieria Rolnicza* 2, 61–69.
6. Barac S., Djokic D., Biberdzic M., Milenkovic B., Djikic A. i Aksic M. (2011). Results of the comparative research of grain losses in wheat harvest by wheat combines with tangential harvest device, *Balkan Agricultural Engineering Review* 16, 38–42.
7. Beckmann K., Pförtner J. i Böttinger S. (2017). Influence of elliptical sieve movements on the functioning of the combine cleaning unit, *Landtechnik* 72 (6), 266–278.
8. Benes L., Novak P., Masek J. i Petrasek S. (2014). John deere combine harvesters fuel consumption and operation costs. *Engineering for Rural Development*, s. 13–17.
9. Bieniek J. (2010). *Separacja ziarna w kombajnach zbożowych*. Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław.
10. Bieniek J. (2011). *Ekspertyza - kombajnowy zbiór zbóż*. Wrocław.
11. Bieniek J., Banasiak J. i Komarnicki P. (2007). Wpływ wybranych parametrów strumienia powietrza na rozkład przesiewanej masy zbożowej, *Inżynieria Rolnicza* 8 (96), 13–20.
12. Bieniek J., Banasiak J. i Lewandowski B. (2006). Straty ziarna w zespole czyszczącym kombajnu zbożowego wyposażonego w sito daszkowe, *Inżynieria Rolnicza* 3, 71–77.
13. Bieniek J., Banasiak J. i Pogoda G. (2008a). Application of the multi-plane sieve for the harvester-thresher cereals cropping under the conditions of sloping areas, *Eksploatacja i Niezawodność* 2, 34–39.
14. Bieniek J., Banasiak J. i Pogoda G. (2008b). Wpływ wzdłużnego nachylenia sita dwupłaszczyznowego na czystość ziarna zbieranego kombajnem zbożowym, *Inżynieria Rolnicza* 4 (102), 105–110.
15. Bieniek J., Żarek Ł., Romański L., Komarnicki P. i Kobel P. (2017). Evaluation



- of New Holland CR9080 Operation, *Agricultural Engineering* 21 (1), 5–18.
16. Bilde M.L. i Revsbeck T.T. (2017). Optimized material flow and cleaning capacity with new return pan system in a combine harvester. *Land.Technik AgEng 2017*, s. 105–110. VDI Verlag.
  17. BN-76/9195-01 (1981). *Maszyny rolnicze. Podział czasu pracy. Symbole i określenia*. Instytut Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa.
  18. BN-77/9195-02 (1977). *Maszyny rolnicze. Metody badań eksploatacyjnych*. Instytut Budownictwa Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa.
  19. Bomoi M.I., Nawi N.M., Aziz S.A. i Kassim M.S.M. (2022). Sensing Technologies for Measuring Grain Loss during Harvest in Paddy Field: A Review, *AgriEngineering* 4 (1), 292–310.
  20. Böttinger S. (2013). Stand und Tendenzen der Mähdrusch-Entwicklung. *VDI-MEG Kolloquium Mähdrescher*, s. 7–12.
  21. Boyko A. i Dumenko K. (2011). Research on reliability of subsystems of grain harvesting combine, *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa - OL PAN* 11c, 5–11.
  22. Broholm B. i Morrison A. (2017). Combine harvester concave adjustment system – independent adjustment of the concave inlet and outlet clearance. *Land.Technik AgEng 2017*, s. 111–116. VDI Verlag.
  23. Calcante A., Fontanini L. i Mazzetto F. (2013). Coefficients of repair and maintenance costs of self-propelled combine harvesters in Italy, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 15, 141–147.
  24. Chaab R.K., Karparvarfard S.H., Rahmanian-Koushkaki H., Mortezaei A. i Mohammadi M. (2020). Predicting header wheat loss in a combine harvester, a new approach, *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences* 19 (2), 179–184.
  25. Chegini G.R. i Mirnezami S. V. (2012). Analysis and comparison of wheat losses in two harvesting methods, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 14 (3).
  26. Chen D., Wang S. i Zheng Y. (2011). An ARM-based environment for combine harvester process monitor via CAN bus, *Physics Procedia* 22, 258–262.
  27. Claes U. (2020). Development of an advanced grain handling system for a new combine range. *LAND.TECHNIK 2020*, s. 383–386. VDI Verlag.
  28. Copcea A.D., Ilea R. i Crîsta I. (2017). Studies regarding grain loss in straw cereals, *Research Journal of Agricultural Science* 49 (2), 43–45.
  29. Copeland L.O. i McDonald M.B. (2001). Seed vigor and vigor testing. *Principles of Seed Science and Technology*, s. 165–191. Springer US, Boston, MA.
  30. Craessaerts G., De Baerdemaeker J., Missotten B. i Saeys W. (2010). Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester, *Biosystems Engineering*

106 (2).

31. Craessaerts G., Saeys W., Missotten B. i De Baerdemaeker J. (2007). A genetic input selection methodology for identification of the cleaning process on a combine harvester, Part II: Selection of relevant input variables for identification of material other than grain (MOG) content in the grain bin, *Biosystems Engineering* 98 (3), 297–303.
32. Czechlowski M. i Wojciechowski T. (2013). System mechatroniczny do selektywnego zbioru ziarna zbóż, *Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów* 4 (95), 41–50.
33. Czechlowski M., Wojciechowski T., Adamski M. i Niedbała G. (2018). Application of Apg-Eupos high precision positioning system for cereal harvester monitoring, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 63 (4), 44–50.
34. Derevjanko D., Holovach I., Bulgakov V., Kuvachev V. i Olt J. (2020). Theoretical and experimental research into impact of threshing tools in combine grain harvesters on quality of cereal crop seeds, *Agronomy Research* 18 (2), 393–403.
35. Detyna J., Banasiak J. i Bieniek J. (2006). Kinematyczne aspekty przemieszczania materiałów ziarnistych w procesie separacji sitowej, *Inżynieria Rolnicza* 2, 231–238.
36. Dieckmeyer S. i Schröder M. (2022). An interactive solution to calibrate loss sensors of a combine harvester. *AgEng LAND. TECHNIK 2022*, s. 25–30. VDI Verlag.
37. Dixon J., Nalley L., Kosina P., La Rovere R., Hellin J. i Aquino P. (2006). Adoption and economic impact of improved wheat varieties in the developing world, *Journal of Agricultural Science* 144 (6), 489–502.
38. Drażkiewicz K., Najewski A., Skrzypek A. i Szarzyńska J. (2022). *Lista opisowa odmian roślin rolniczych 2022. Zboża*.
39. Dreszer K.A. (1993). Wybrane problemy pracy wielobębnowego zespołu młócaço-separującego, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 408, 229–236.
40. Dreszer K. (1994). The influence of work parameters of the threshing set on the amount of seed grain damages, *International Agrophysics* 8, 203–208.
41. Dreszer K. i Gieroba J. (1995). Problemy uszkodzeń ziarna w trzybębnowym zespole młócaço-wydzielającym, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 424, 149–153.
42. Dreszer K.A., Pawłowski T., Szczepaniak J., Szymanek M. i Tanaś W. (2015). Mechanizacja zbioru zbóż kombajnami. *Maszyny rolnicze*, s. 189–211. Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych, Poznań.
43. Dubas A. i Michalski T. (1997). Rośliny zbożowe. W: A. Dubas i S. Gładysiak (red) *Szczegółowa uprawa roślin rolniczych*, s. 10–77. Wydawnictwo Akademii

Rolniczej w Poznaniu, Poznań.

44. Duma-Copcea A., Mihaş C., Sirbu C., Scedei D.N., Pop V. i Anuta F. (2019). Wheat harvesting technology, *Research Journal of Agricultural Science* 51, 19–25.
45. Dz.U. 2020 poz. 975 Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 27 maja 2020 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie terminów składania wniosków o dokonanie oceny polowej materiału siewnego poszczególnych grup roślin lub gatunków roślin rolniczych i warzywnych oraz szczegółowych wymagań w zakresie wytwarzania i jakości materiału siewnego tych roślin.
46. Eggerl A. (2017). Optimization of combine processes using expert knowledge and methods of artificial intelligence, *Ph.D. dissertation*.
47. Eggerl A., Bosch H., Bruns A. i Wobcke S. (2013). Model-based development of control algorithms for optimizing combine processes. *VDI-MEG Kolloquium Mährescher*, s. 59–68.
48. Esgici R., Sessiz A. i Bayhan Y. (2016). The relationship between the age of combine harvester and grain losses for paddy, *Mechanization in agriculture* 1, 51–53.
49. Etbach P.C., Rademacher T. i Rubenschuh U. (2020). Determination of grain losses and broken grains comparison of measuring methods and methods of result representation of lossthroughput-characteristics and broken grains at combine harvester benchmark tests. *VDI Berichte*.
50. Faligowska A. (2015). Utrata wigoru i wartości siewnej nasion łubinu białego i grochu siewnego na skutek mechanicznego zbioru, *Nauka Przyroda Technologie* 9 (4).
51. FAO (2022). *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*.
52. Feiffer A. (2003a). *Mähdrusch bei Ernteerschwerenissen und Trockenschäden*. Sondershausen.
53. Feiffer P. (2003b). When will we see the intelligent combine? (Combine Loss Calibration and Performance Database for European Wheats). *Proceedings of the International Conference on Crop Harvesting and Processing*, s. 1–3. Kentucky.
54. Feiffer P., Feiffer A., Kutschenreiter W. i Rademacher T. (2005). *Getreideernte - sauber, sicher, schnell*. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
55. Flierl P. (2020). Development of a header-prototype in order to increase combine throughput in grain harvest. *LAND. TECHNIK 2020*, s. 375–382. VDI Verlag.
56. Foster C., Posselius J. i Lukac B. (2017). Autonomous agricultural machines – the next evolution in farming. *Land. Technik AgEng 2017*, s. 85–92. VDI Verlag.
57. Francik S. (2007). Wyznaczanie wartości podstawowych parametrów technicznych nowoczesnych kombajnów zbożowych przy użyciu SSN, *Inżynieria Rolnicza* 2 (90), 55–61.

58. Fu J., Chen Z., Han L.J. i Ren L.Q. (2018). Review of grain threshing theory and technology, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 11 (3), 12–20.
59. Gaworski M., Janiga K. i Wilski D. (2015). Assessment of selection and use of combine harvesters, *Agriculture* 66, 29–36.
60. Gieroba J. i Dreszer K. (1988a). Wybrane metody określania uszkodzeń ziarna, *Postępy Nauk Rolniczych* 3, 31–37.
61. Gieroba J. i Dreszer K. (1988b). Wpływ mechanicznych uszkodzeń ziarna pszenicy Grana na zdolność kiełkowania, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 351.
62. Gieroba J. i Dreszer K.A. (1993a). Ocena wybranych typów kombajnów zbożowych w aspekcie strat ziarna i zużycia paliwa, *Postępy Nauk Rolniczych* 2, 91–106.
63. Gieroba J. i Dreszer K. (1993b). Wybrane zagadnienia procesu omłotu i wydzielania ziarna z masy zbożowej, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 1, 17–24.
64. Gieroba J., Dreszer K. i Dudkowski J. (1993). Wpływ zespołu młócaço-wydzielającego kombajnu Bison Z110 na biologiczną wartość ziarna, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 408, 219–228.
65. Gieroba J., Nowak J. i Dreszer K. (1988). Wpływ wybranych czynników na uszkodzenia i biologiczną wartość ziarna zbieranego kombajnami, *Postępy Nauk Rolniczych* 4, 31–50.
66. Goli A., Khazaei J., Taheri M., Khojamli A. i Sedaghat A. (2016). Effect of Mechanical Damage on Soybean Germination, *International Academic Journal of Science and Engineering* 3 (10), 48–58.
67. Górski M. (1998). Zdolność kiełkowania ziarniaków pszenicy ozimej w długoterminowym przechowywaniu, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 463, 245–254.
68. Gozdowski D. (2018). Systemy nawigacji ciągników i maszyn rolniczych. W: S. Samborski (red) *Rolnictwo precyzyjne*, s. 253–263. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
69. Grochowicz M. i Szpryngiel M. (1995). Adjustment of grain combine harvester assemblies to decrease damage and quantitative losses of rape seeds during one-stage harvest, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 427, 41–44.
70. Grundas S., Geodecki M. i Velikanov L. (2002). Zastosowanie metody rentgenograficznej w badaniach materiałów roślinnych, *Acta Agrophysica* 63, 39–47.
71. Grześ Z. (2002). Badania rzeczywistych kosztów obsługi technicznej nowoczesnych kombajnów zbożowych, *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCCXLIII*, 123–127.
72. Grześ Z. i Kowalik I. (2006). Badania rocznego wykorzystania maszyn

rolniczych, *Inżynieria Rolnicza* 3, 189–195.

73. Grześ Z., Rybacki P. i Kowalik I. (2017). Strategie serwisowania maszyn rolniczych, *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna*, 14–15.
74. Gu R. liang, Huang R., Jia G. yao, Yuan Z. peng, Ren L. sha, Li L. i Wang J. hua (2019). Effect of mechanical threshing on damage and vigor of maize seed threshed at different moisture contents, *Journal of Integrative Agriculture* 18, 1571–1578.
75. GUS (2021a). *Rolnictwo w 2020 r.* Główny Urząd Statystyczny, Departament Rolnictwa, Warszawa.
76. GUS (2021b). *Powszechny Spis Rolny 2020 Raport z wyników.* Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
77. GUS (2022a). *Rocznik statystyczny rolnictwa 2022.* Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
78. GUS (2022b). *Rolnictwo w 2021 r.* Zakład Wydawnictw Statystycznych, Warszawa.
79. Hamzah I.J. i Alsharifi S.K.A. (2020). Innovative harvesting methods about the harvest losses for two machines, *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 26 (4), 913–918.
80. Hanna H.M. i Quick G.R. (2019). Grain Harvesting Machinery. *Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering*, s. 157–174. Elsevier.
81. Hassani H.S., Jafari A., Mohtasebi S.S. i Setayesh A.M. (2011). Investigation on grain losses of the JD 1165 combine harvester equipped with variable pulley and belt for forward travel, *American Journal of Food Technology* 6 (4), 314–321.
82. Hermann D. (2018). Optimisation of combine harvesters using model-based control, *Ph.D. dissertation*.
83. Hermann D., Bilde M.L., Andersen N.A. i Ravn O. (2016). A framework for semi-automated generation of a virtual combine harvester, *IFAC-PapersOnLine* 49 (16), 55–60.
84. Hermann D., Schøler F., Bilde M.L., Andersen N.A. i Ravn O. (2017). Computer based control of the separation process in a combine harvester. *Land.Technik AgEng 2017*, s. 599–604. VDI Verlag.
85. *International Rules for Seed Testing* (2019). International Seed Testing Association (ISTA).
86. Isern T.D. (1990). *Bull threshers and bindlestiffs: harvesting and threshing on the North American plains.* University Press of Kansas, Kansas.
87. Ismail Z.E. i Abdel-Mageed A.E. (2010). Workability and machinery performance for wheat harvesting, *Misr Journal of Agricultural Engineering* 27 (1), 90–103.
88. ISO 18134-2 (2017). *Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven*

- dry method - Part 2: Total moisture - Simplified method*. International Organization for Standardization.
89. ISO 5223 (1995). *Test sieves for cereals*. International Organization for Standardization.
  90. ISO 6689-1 (1997). *Equipment for harvesting - combines and functional components - Part 1: Vocabulary*. International Organization for Standardization.
  91. ISO 8210 (1989). *Equipment for harvesting - Combine harvesters - Test procedure*. International Organization for Standardization.
  92. ISO 8210 (2021). *Equipment for harvesting - Combine harvesters - Test procedure and performance assessment*. International Organization for Standardization.
  93. Izdebski W. (2001a). Wpływ strategii wyposażenia gospodarstwa rolnego w kombajny zbożowe na poziomie kosztów zbioru, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 3, 91–98.
  94. Izdebski W. (2001b). Wpływ czynników techniczno-organizacyjnych na efektywność kombajnowego zbioru zbóż, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 2, 95–102.
  95. Jagiełło T. (2013). Maszyny i urządzenia do czyszczenia, sortowania i suszenia nasion oraz zbioru zbóż i roślin okopowych.
  96. Jagielski J. i Sychaj-Fabisiak E. (2011). *Plonowanie i cechy jakościowe ziarna wybranych odmian pszenicy ozimej w zależności od stopnia odsiewu materiału siewnego*. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, Bydgoszcz.
  97. Jamshidi A.R., Tayari E., Jasem Nejad M. i Neisy A. (2014). The comparing of seed loss of four types usual combine on wheat farms in Shoushter region, *Advances in Environmental Biology* 8, 6 SPEC.
  98. Jańczak-Pieniążek M., Buczek J., Tobiasz-Salach R. i Bobrecka-Jamro D. (2020). Wpływ intensywności uprawy na produktywność mieszańcowych i populacyjnych odmian pszenicy ozimej, *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 59–66.
  99. Kamilaris A., Kartakoullis A. i Prenafeta-Boldú F.X. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture* 143, 23–37.
  100. Kanafojski C. (1980). *Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych, Tom 2 - Maszyny do zbioru roślin źdźbłowych i łodygowych*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
  101. Kasprzak M. i Wirkijowska A. (2013). Charakterystyka wybranych wskaźników technologicznych ziarna pszenicy zwyczajnej, *Acta Agrophysica* 20 (1), 77–89.
  102. Kieloch R. i Kulon T. (2019). Wpływ intensywności uprawy na zdrowotność

roślin oraz zmienność plonowania odmian pszenicy ozimej, *Progress in Plant Protection* 59, 149–155.

103. Knapowski T., Kozera W., Murawska B., Wszelaczyńska E., Pobereźny J., Mozolewski W. i Keutgen A.J. (2015). Ocena parametrów technologicznych wybranych odmian pszenicy ozimej pod względem wypiekowym, *Inżynieria i aparatura chemiczna* 54 (5), 255–256.
104. Koch M. i Zeuner M. (2020). Modular driveline solutions for a new generation of combine harvesters. *LAND. TECHNIK 2020*, s. 369–374. VDI Verlag.
105. Kolowca J., Frączek J. i Złobecki A. (1988). Wpływ cech anatomiczno-morfologicznych ziarna pszenicy na stopień i charakter jego uszkodzeń w procesie zbioru kombajnowego, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 351, 55–61.
106. Komarnicki P., Stępień B. i Stopa R. (2012). Ocena kryterialna optymalnego doboru maszyn rolniczych, *Inżynieria Rolnicza* 4 (139), 145–155.
107. Korn C. (2018). Application of coupled CFD-DEM simulation to separation process in combine harvester cleaning devices.
108. Kornacki A. (2004). Zastosowanie wielozmiennej analizy wariancji do badania uszkodzeń ziarna powstałych przy omłocie pszenicy w ośmiobębnowym zespole młócaço-wydzielającym, *Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria* 3 (1–2), 3–10.
109. Kośmicki Z. (2008). Kierunki rozwoju techniki rolniczej, *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna* 1.
110. Koszel T. (1998). Zestawienie i ocena pracy agregatów do zbioru ziarna zbóż - kombajny zbożowe. W: K. Tomaszewski (red) *Zestawienie i ocena pracy rolniczych agregatów maszynowych*, s. 191–217. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, Lublin.
111. Kowalik I. i Grześ Z. (2006). Wpływ wykorzystania maszyn rolniczych na koszty mechanizacji w gospodarstwach rolniczych o różnej powierzchni, *Inżynieria Rolnicza* 13, 201–208.
112. Kroll A. i Kaszkowiak J. (2013). Ograniczanie strat rzepaku podczas zbioru kombajnem, *Postępy w Inżynierii Mechanicznej* 1 (1), 43–49.
113. Krzysiak Z., Gołacki K. i Dreszer K.A. (1998). Przegląd zespołów czyszczących kombajnów zbożowych, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 3, 43–54.
114. Krzyżaniak K. i Kowalik I. (2019). Nowoczesne systemy kontrolno-sterujące stosowane w kombajnach do zbioru zbóż, *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna* 6, 8–12.
115. Krzyżaniak K. i Kowalik I. (2022). Use of the telematics systems to technical service of tractors and agricultural machines, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 67 (2), 21–26.

116. Kusińska E. (2008). Wpływ warunków przechowywania ziarna pszenicy na zdolność kiełkowania, *Inżynieria Rolnicza* 9, 165–171.
117. Kutzbach H.D. i Quick G.R. (1999). Harvester and threshers. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol. III. Plant Production Engineering*, s. 311–347. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph.
118. Lashgari M., Mobli H., Omid M., Alimardani R. i Mohtasebi S.S. (2008). Qualitative analysis of wheat grain damage during harvesting with John Deere combine harvester, *International Journal of Agriculture and Biology* 10 (2), 201–204.
119. Li Y., Su Z., Liang Z. i Li Y. (2020). Variable-diameter drum with concentric threshing gap and performance comparison experiment, *Applied Sciences (Switzerland)* 10 (15).
120. Liang Z., Li Y., Zhao Z., Xu L. i Tang Z. (2015). Monitoring mathematical model of grain cleaning losses on longitudinal-axial flow combine harvester, *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery* 46 (1).
121. Liska M. (1985). 150-lat kombajnów zbożowych, *Maszyny i Ciągniki Rolnicze* 2, 25–28.
122. Lityński M. (1987). Uszkodzenia nasion i ich wpływ na wartość siewną, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 240, 321–338.
123. Maciulewski B. i Pawlak J. (2014). Wyposażenie gospodarstw rolnych w sprzęt do produkcji roślinnej, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 3 (85), 19–30.
124. Maertens K. i De Baerdemaeker J.G. (2003). Flow rate based prediction of threshing process in combine harvesters, *Applied Engineering in Agriculture* 19 (4).
125. Mahmoudi A., Mirzazadeh A. i Abdollahpor S. (2012). Minimizing combine harvester rear losses by intelligent modeling of MOG passing concave, *Elixir Agriculture* 52, 11397–11401.
126. Małuszyńska E. i Mańkowski D.R. (2022). Wartość siewna kwalifikowanego materiału siewnego pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L. subsp. *aestivum*) przechowywanego w magazynie nasiennym, *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 297/298, 13–20.
127. Mańkowski D.R., Ludański Z. i Flaszka M. (2012). Propozycja metody oceny postępu biologicznego i technologicznego w uprawie roślin na przykładzie pszenicy ozimej, *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin* 263, 91–104.
128. Mark Hanna H. (2010). Combine harvest settings to reduce grain loss and improve grain quality. *Proceedings of the Integrated Crop Management Conference*, s. 33–36.
129. Markowski P., Choszcz D., Lipiński A., Kaliniewicz Z., Konopka S. i Rawa T. (2005). Identyfikacja rozkładu poprzecznego strat nasion podczas kombajnowego zbioru rzepaku, *Inżynieria Rolnicza* 3 (63), 327–332.



130. Masek J., Kumhala F., Novak P. i Fic T. (2016). Influence of different threshing system design on grain damage. *Engineering for Rural Development*, s. 756–761.
131. Masek J., Novak P. i Jasinskas A. (2017). Evaluation of combine harvester operation costs in different working conditions. *Engineering for Rural Development*, s. 1180–1185.
132. Masek J., Novak P., Kroulik M. i Jasinskas A. (2015). Performance evaluation of combine harvesters. *International Scientific Conference Rural Development*.
133. Masek J., Novak P. i Pavlicek T. (2015). Evaluation of combine harvester fuel consumption and operation costs. *Engineering for Rural Development*, s. 78–83.
134. Mazur R. (2006). Czym żniwowano po wojnie? Cz. III, *RetroTRAKTOR.pl*, <https://retrotraktor.pl/czym-zniwowano-po-wojnie-cz-iii/>.
135. Mazurek K., Turski A., Rapiński J. i Śmieja M. (2015). Układy jezdno-napędowe kombajnów zbożowych na podstawie wybranych modeli maszyn, *Logistyka* 3, 3136–3140.
136. Michielan E. i Mattetti M. (2022). Combine harvester – outlining the combine harvester usage through CANBUS data analysis. *AgEng LAND. TECHNIK 2022*, s. 41–46. VDI Verlag.
137. Mikucki K. (1993). Model matematyczny procesu powstawania strat ziarna w kombajnie zbożowym, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 408, 179–185.
138. Miłosz T. (1984). Niektóre aspekty mechanizacji zbioru zbóż, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 305, 289–293.
139. Miłosz T. (1993a). *Efektywność procesu zbioru zbóż kombajnami zbożowymi. Rozprawa habilitacyjna. Prace Naukowo-Badawcze*. IBMER, Warszawa.
140. Miłosz T. (1993b). Wpływ wybranych czynników zasilania na jakość procesu omłotu, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 1, 9–16.
141. Miłosz T. (1996). Wybrane czynniki determinujące proces zbierania zbóż kombajnami zbożowymi, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 2, 33–43.
142. Mirasi A., Asoodar M.A., Samadi M. i Kamran E. (2014). The Evaluation of wheat losses harvesting in two conventional combine (John Deere 1165, 955) in Iran, *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 2 (5), 1417–1425.
143. Mirasi A., Kamran E., Asoodar M.A. i Samadi M. (2014). The Investigation of wheat losses harvesting in Lordegan County (Iran), *International journal of Advanced Biological and Biomedical Research* 2 (5), 1427–1435.
144. Mirzazadeh A., Abdollahpour S. i Hakimzadeh M. (2022). Optimized Mathematical Model of a Grain Cleaning System Functioning in a Combine

- Harvester using Response Surface Methodology, *Acta Technologica Agriculturae* 25 (1), 20–26.
145. Miu P.I. (2004). Applied modeling theory of material separation in combine harvesters. *ASAE Annual International Meeting 2004*, s. 1–11.
  146. Miu P. (2016). *Combine harvesters. Theory, modeling and design*. CRC Press, Boca Raton.
  147. Miu P.I. i Kutzbach H.D. (2007). Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit, *Computers and Electronics in Agriculture* 58 (2), 93–99.
  148. Miu P.I. i Kutzbach H.D. (2008). Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units-Part I, *Computers and Electronics in Agriculture* 60 (1), 96–104.
  149. Molendowski F. i Romański L. (2011). Ocena porównawcza kombajnu zbożowego New Holland CS6070 z kombajnem Bizon Rekord Z-058, *Inżynieria Rolnicza* 8, 223–228.
  150. Molendowski F., Romański L. i Górnik Ł. (2012). Ocena eksploatacyjna wybranych kombajnów do zbioru zbóż metodą wskaźnika zespolonego, *Inżynieria Rolnicza* 4 (139), 277–284.
  151. Mostofi Sarkari M.R. (2010). Field evaluation of grain loss monitoring on combine JD 955, *Advances in Environmental Biology* 4 (2), 162–167.
  152. Msuya D.G. i Stefano J. (2010). Responses of maize ( *Zea mays* ) seed germination capacity and vigour to seed selection based on size of cob and selective threshing, *World Journal of Agricultural Sciences* 6 (6), 683–688.
  153. Munch P. (2019). Predictive Feed-Rate Control for Combine Harvesters. *LAND. TECHNIK AgEng 2019*, s. 545–552. VDI Verlag.
  154. Muzalewski A. (2007). Model optymalizacji wyboru pomiędzy zakupem maszyny a najmem usługi, *Inżynieria Rolnicza* 2 (90), 197–203.
  155. Muzalewski A. (2010). *Koszty eksploatacji maszyn*. Wydawnictwo ITP, Falenty - Warszawa.
  156. Muzalewski A. (2013). Wyposażenie w kombajny do zbioru zbóż oraz ich użytkowanie w wybranych gospodarstwach rolnych, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 1, 51–59.
  157. Myhan R. i Jachimczyk E. (2016). Grain separation in a straw walker unit of a combine harvester: Process model, *Biosystems Engineering* 145, 93–107.
  158. Nadulski R., Kusińska E., Guz T. i Kobus Z. (2012). Wpływ wilgotności ziarniaków i nacisku pionowego na ich energię i zdolność kiełkowania, *Inżynieria Rolnicza* 2 (137), 221–229.
  159. Neitemeier D., Spiekermann S., Irmer D., Baumgarten J. i Wilken A. (2022). Automatic adjustment of auger headers with variable table length to improve a

- continuous crop flow and reduce pickup grain losses of a combine harvester. *LAND.TECHNIK* 2022, s. 235–242. VDI Verlag.
160. Nguyen X.T. (2008). Grundlagenuntersuchungen zur Kombination von zwei Tangentialdreschwerken mit tangentialer Gutzuführung. Dissertation. Technischen Universität Dresden
161. Oksanen T., Linkolehto R. i Seilonen I. (2016). Adapting an industrial automation protocol to remote monitoring of mobile agricultural machinery: a combine harvester with IoT, *IFAC-PapersOnLine* 49 (16), 127–131.
162. Oleksiak T. (2016). Plonowanie odmian ozimej pszenicy jakościowej w doświadczeniach i w produkcji w Polsce, *Polish Journal of Agronomy*, 66–73.
163. Olt J., Küüt K., Ilves R. i Küüt A. (2019). Assessment of the harvesting costs of different combine harvester fleets, *Research in Agricultural Engineering* 65, 25–32.
164. Omran M.S. (2008). A comparative study of the most widely harvesting systems for wheat crop in Egypt, *Misr Journal of Agricultural Engineering* 25 (3), 804–823.
165. Osueke C. (2011). Simulation and optimization modeling of performance of a cereal thresher, *International Journal of Engineering & Technology* 11 (3).
166. Pantke S., Korn C., Herlitzius T. i Zürn R. (2017). Concept for weed seed separation in combine harvesters Th. Leonhardt., *Land.Technik AgEng 2017*, s. 117–126. VDI Verlag.
167. Patel S.K. i Varshney B.P. (2014). Modeling of wheat crop harvesting losses, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 16 (2), 97–102.
168. Pecen J. (1994). Internal damage identification of seeds, *International Agrophysics* 8, 289–293.
169. Pishgar-Komleh S.H., Keyhani A., Mostofi Sarkari M.R. i Jafari A. (2013). Assessment and determination of seed corn combine harvesting losses and energy consumption, *Elixir Agriculture* 54, 12631–12637.
170. Piwowar A. (2012). Wyposażenie gospodarstw rolnych w kombajny i silosokombajny w latach 1996-2010, *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna* 5.
171. PN-90/R-55002 (1990). *Maszyny rolnicze. Metody badań. Postanowienia ogólne*. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości.
172. PN-EN ISO 712:2012 (2012). *Ziarno zbóż i przetwory zbożowe. Oznaczanie wilgotności. Metoda odwoławcza*. Polski Komitet Normalizacyjny.
173. Quick G.R. i Buchele W.F. (1978). *The Grain Harvesters*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph.
174. Rachwał P. (2019). Dobór maszyn do gospodarstwa rolnego na przykładzie kombajnu zbożowego – studium przypadku, *Problemy Drobnych Gospodarstw Rolnych* 1, 71–83.

175. Raisbeck C.S. (1964). Design requirements of an experimental combine-harvester. University of Wollongong.
176. Rudziński R. (2011). Zasady przechowywania i magazynowania towarów pochodzenia rolniczego, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczo-Humanistycznego w Siedlcach* 88 (15), 113–126.
177. Sadowska U. (2006). Uszkodzenia ziarna jęczmienia nago i okrytoziarnistego podczas kombajnowego zbioru, *Inżynieria Rolnicza* 13, 409–415.
178. Sadowska U. (2008). Zależność strat jakościowych ziarna jęczmienia nagoziarnistego od parametrów regulacyjnych kombajnu, *Inżynieria Rolnicza* 10 (108), 215–220.
179. Samborski S. (2018). Mapowanie plonów. W: S. Samborski (red) *Rolnictwo precyzyjne*, s. 275–295. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
180. Sattar M., Mueen-u-Din, Ali M., Ali L., Waqar M.Q., Ali M.A. i Khalid L. (2015). Grain Losses of Wheat as Affected by Different Harvesting and Threshing Techniques, *International Journal of Research in Agriculture and Forestry* 2 (6), 20–26.
181. Savickas D., Steponavičius D., Kliopova I. i Saldukaitė L. (2020). Combine Harvester Fuel Consumption and Air Pollution Reduction, *Water, Air, and Soil Pollution* 231 (3).
182. Segit Z., Szwed G. i Szwed-Urbaś K. (2003). Uszkodzenia ziarniaków pszenicy twardej w wyniku obciążeń dynamicznych, *Acta Agrophysica* 2 (4), 841–849.
183. Sęk T., Przybył J. i Kowalik I. (1994). Ocena eksploatacyjno-energetyczna kombajnu CLAAS Commandor 228 CS podczas zbioru kukurydzy na ziarno, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 416, 209–215.
184. Şeran P., Creţ C., Duma Copcea A. i Mihuş C. (2019). Mechanization technology for wheat harvesting with self-propelled grain harvesting combine, *Research Journal of Agricultural Science* 51 (4), 168–171.
185. Sikora Z. (2013). *Kombajny zbożowe - budowa, działanie, użytkowanie, obsługa*. Wydawnictwo i Handel Książkami „KaBe”, Krosno.
186. Šotnar M., Pospíšil J., Mareček J., Dokukilová T. i Novotný V. (2018). Influence of the Combine Harvester Parameter Settings on Harvest Losses, *Acta Technologica Agriculturae* 21 (3), 105–108.
187. Špokas L., Adamčuk V., Bulgakov V. i Nozdrovick L. (2016). The experimental research of combine harvesters, *Research in Agricultural Engineering* 62, 106–112.
188. Spokas L. i Steponavičius D. (2011). Comparison of working quality of combine harvesters equipped with a single threshing rotor. *Rural Development*.
189. Špokas L. i Steponavičius D. (2010). Impact of wheat stubble height on combine technological parameters, *Journal of Food, Agriculture and*

*Environment* 8 (2).

190. Špokas L. i Steponavičius D. (2011). Fuel consumption during cereal and rape harvesting and methods of its reduction, *Journal of Food, Agriculture and Environment* 9 (3–4).
191. Špokas L., Steponavičius D. i Butkus V. (2014). Reduction of fuel consumption of two rotors axial flow combine harvester, *Journal of Food, Agriculture and Environment* 12 (2), 329–333.
192. Špokas L., Steponavičius D. i Petkevičius S. (2008). Impact of technological parameters of threshing apparatus on grain damage, *Agronomy Research* 6 Special, 367–376.
193. Styk B., Szot B. i Styk W. (1987). Ocena zdolności kiełkowania nasion pszenicy ozimej poddanych statycznym obciążeniom mechanicznym, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 320, 177–186.
194. Suardi A., Stefanoni W., Bergonzoli S., Latterini F., Jonsson N. i Pari L. (2020). Comparison between two strategies for the collection of wheat residue after mechanical harvesting: Performance and cost analysis, *Sustainability* 12.
195. Sypuła M. i Dadrzyńska A. (2008). Wpływ czasu przechowywania ziarna pszenicy na zmianę jego cech jakościowych, *Inżynieria Rolnicza* 1 (99), 371–376.
196. Szafrąńska A. (2011). Nowa metoda oceny jakości wybranych odmian pszenicy za pomocą aparatu mixolab, *Postępy Nauki i Technologii Przemysłu Rolno-Spożywczego* 66 (3), 74–89.
197. Szmigiel A., Kołodziejczyk M., Oleksy A., Złobecki A. i Hebda T. (2014). Odporność ziarna odmian pszenicy ozimej na uszkodzenia mechaniczne, *Fragmenta Agronomica* 31 (3), 102–109.
198. Szmigiel A. i Złobecki A. (2003). Odporność oplewionych i nieoplewionych ziarniaków owsa na uszkodzenia mechaniczne, *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 193–197.
199. Szpryngiel M., Grochowicz M. i Szot B. (1995). Sources and causes of rape seed damage during combine harvesting, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 427, 27–33.
200. Szuk T. i Berbeka T. (2014). Annual use as a criterion for selection of combine harvester utilisation form, *Agricultural Engineering* 1 (149), 221–227.
201. Szymanek M. i Dreszer K.A. (2011). Wpływ zespołu omłotowego na stopień omłotu i straty ziarna kukurydzy, *Inżynieria Rolnicza* 4, 289–294.
202. Tanaś W., Dreszer K.A. i Zagajski P. (2008). Wpływ wilgotności na straty i uszkodzenia ziarna podczas zbioru kombajnowego zbóż, *Inżynieria Rolnicza* 9, 299–303.
203. Tanaś W. i Zagajski P. (2010a). Wpływ automatycznej regulacji zespołów roboczych na jakość pracy kombajnów zbożowych, *Inżynieria Rolnicza* 4 (122), 245–251.

204. Tanaś W. i Zagajski P. (2010b). Matematyczne modelowanie poziomu uszkodzeń ziarna podczas zbioru kombajnowego, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 55 (2), 110–112.
205. Tomchuk V. (2020). Loss management when harvesting grain, legume and oilseed crops, *Norwegian Journal of development of the International Science* 50, 54–67.
206. Tryka S. i Koper R. (1989). Badanie wpływu uszkodzeń mechanicznych ziarna pszenicy o zróżnicowanym typie struktury na natężenie ultrasłabej biochemiluminescencji, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 354, 177–183.
207. Tys J., Szwed G., Fałęcki A. i Łukaszuk J. (1996). Wykorzystanie metody dynamicznej w ocenie podatności na uszkodzenia nasion zbóż i rzepaku, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 425, 265–268.
208. Vöcking H., Heitmann C. i Wilken A. (2017). Automatic adjustments of combine harvesters. *Land.Technik AgEng 2017*, s. 99–104. VDI Verlag.
209. Voicu G., Căsandriu T. i Stan G. (2007). Using the dimensional analysis for a mathematical model to predict the seeds losses at the cleaning system of the cereals harvesting combines, *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering* 69 (4), 29–39.
210. Whitlam J. (2018). *The combine harvester*. Amberley Publishing, Gloucestershire.
211. Wiley C. (2010). Combine harvester: innovating modern wheat farming by history day award winner Christopher Wiley, *HistoryLink.org*, <https://www.historylink.org/File/10222>.
212. Yanke B., Vandeven M. i Bomleny D. (2019). High Capacity Draper Header – Development of a high capacity draper header for a new generation of combine harvesters. *LAND.TECHNIK AgEng 2019*, s. 527–536. VDI Verlag.
213. Zagajski P. i Dreszer K.A. (2006). Stan badań teoretycznych nad omłotem i wydzielaniem ziarna z masy zbożowej, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 51, 4–9.
214. Zagajski P. i Dreszer K.A. (2007). Czynniki decydujące o energochłonności omłotu zbóż, *Inżynieria Rolnicza* 9 (97), 279–288.
215. Żak W., Zagajski P. i Dreszer K.A. (2007). Zespoły żniwne do zbioru rzepaku, *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 52 (1), 62–67.
216. Zaman Q., Chaudhry A.D. i Asghar Rana M. (1992). Wheat harvesting losses in combining as affected by machine and crop parameters, *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 29, 1–4.
217. Zareei S. i Abdollahpour S. (2016). Modeling the optimal factors affecting combine harvester header losses, *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* 18 (2), 60–65.

218. Zareei S., Pour S.A., Moghaddam M. i Sahrayan H. (2012). Optimum setting of combine header for wheat harvesting using Taguchi method, *Research on Crops* 13 (3), 1142–1146.
219. Zhao Z., Li Y., Chen J. i Xu J. (2011). Grain separation loss monitoring system in combine harvester, *Computers and Electronics in Agriculture* 76 (2).
220. Ziemińska J., Wyrzykowska M. i Niewęglowski M. (2015). Jakość materiału siewnego pszenicy ozimej (*Triticum aestivum*) uprawianej w wybranych gospodarstwach w rejonie środkowo-wschodniej Polski, *Fragmenta Agronomica* 32 (4), 97–104.
221. Złobecki A. (1995a). Zależność strat jakościowych ziarna pszenicy od warunków zbioru kombajnem, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 423, 243–253.
222. Złobecki A. (1995b). Zastosowanie metody rentgenowskiej do oceny podatności ziarna na uszkodzenia powstające na skutek obciążeń wielokrotnych, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 426, 213–221.
223. Złobecki A. (2005). Metoda optymalizacji procesu omłotu w kombajnie zbożowym, *Acta Agrophysica* 6 (3), 845–854.
224. Złobecki A. i Langman J. (2010). Zastosowanie analizy czynnikowej do oceny strat w czasie zbioru kombajnem zbożowym, *Acta Agrophysica* 16 (2), 471–481.
225. Złobecki A., Macura R. i Michalczyk M. (2006). Modelowanie procesu omłotu przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych, *Inżynieria Rolnicza* 13, 403–408.
226. Zubko V., Roubík H., Zamora O. i Khvorost T. (2018). Analysis and forecast of performance characteristics of combine harvesters, *Agronomy Research* 16 (5), 2282–2302.

## 10. Spis rycin

Ryc. 1. Struktura powierzchni zasiewów w 2021 r. ....	11
Ryc. 2. Struktura towarowej produkcji rolniczej w 2021 r.....	12
Ryc. 3. Zróżnicowanie plonów oraz udział województw w zbiorach pszenicy w 2021 r. .....	13
Ryc. 4. Struktura zasiewów w gospodarstwach indywidualnych o powierzchni powyżej 1 ha użytków rolnych w 2020 r. ....	14
Ryc. 5. Liczba kombajnów do zbioru zbóż w gospodarstwach rolnych według Powszechnego Spisu Rolnego .....	15
Ryc. 6. Urządzenie do zrywania kłosów.....	17
Ryc. 7. Pierwsza maszyna żniwna Bella z 1826 r. ....	18
Ryc. 8. Pierwszy zespół młócający skonstruowany przez Meikla .....	19
Ryc. 9. Młocarnia stacjonarna firmy Clayton i Shuttleworth z 1879 r.....	19
Ryc. 10. Pierwszy przyczepiany kombajn CLAAS z napędem przekazywanym od WOM ciągnika.....	20
Ryc. 11. Pierwszy kombajn produkcji polskiej: Vistula.....	21
Ryc. 12. Kombajn polskiej produkcji: Bizon Z056 Super.....	22
Ryc. 13. Schemat blokowy przepływu masy zbożowej w klasycznym kombajnie do zbioru zbóż.....	24
Ryc. 14. Schemat technologiczny kombajnu do zbioru zbóż z konwencjonalnym systemem omłotu.....	26
Ryc. 15. Schemat technologiczny kombajnu do zbioru zbóż z konwencjonalnym systemem omłotu i aktywnym bębniem separującym .....	27
Ryc. 16. Schemat rozmieszczenia zespołów roboczych w kombajnie do zbioru zbóż z rotorowym systemem młócająco-separującym.....	28
Ryc. 17. Rozmieszczenie zaawansowanych czujników przepływu masy i start ziarna w kombajnie z systemem kontrolującym przepływ masy .....	30
Ryc. 18. Rodzaje i źródła strat przy kombajnowym zbiorze zbóż .....	33



Ryc. 19. Zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami zbioru podczas optymalizacji ustawień kombajnu .....	34
Ryc. 20. Wpływ zmiany prędkości obrotowej rotora na straty ilościowe i uszkodzenia ziarna.....	35
Ryc. 21. Miejsca powstawania strat ilościowych i jakościowych podczas zbioru zbóż kombajnem.....	36
Ryc. 22. Pochylenie żdźbła w skali 9-stopniowej .....	44
Ryc. 23. Zbiornik ziarna – miejsce pobierania próbek do określenia uszkodzeń i czystości ziarna.....	54
Ryc. 24. Ręczne sita laboratoryjne do oznaczania zawartości zanieczyszczeń .....	55
Ryc. 25. Ziarniki z widocznym zabarwieniem spowodowanym wniknięciem płynu Lugola przez pęknięcia okrywy owocowo-nasiennej.....	56
Ryc. 26. Tacka pomiarowa do określania strat ziarna .....	57
Ryc. 27. Miejsca pomiarów strat ilościowych podczas zbioru zbóż kombajnem .....	57
Ryc. 28. Rozkład wyników zmiennej ziarno z mikrouszkodzeniami ukazany w podziale na poszczególne typy kombajnów i warianty ustawień.....	61
Ryc. 29. Rozkład wyników zmiennej ziarno połamane i uszkodzone ukazany w podziale na poszczególne typy kombajnów i warianty ustawień.....	62
Ryc. 30. Rozkład wyników zmiennej całkowite straty kombajnu ukazany w podziale na poszczególne typy kombajnów i warianty ustawień.....	63
Ryc. 31. Parabole zależności jednostkowego kosztu eksploatacji maszyny od wykorzystania rocznego kombajnu. ....	81
Ryc. 32. Parabole zależności kosztów eksploatacji maszyny na jednostkę pracy od wykorzystania rocznego kombajnu. ....	82

## 11. Spis tabel

Tabela 1. Charakterystyka ładu oraz warunki meteorologiczne dla działek pomiarowych w trakcie prowadzenia badań.....	46
Tabela 2. Charakterystyka techniczno-eksploatacyjna wybranych typów kombajnów do zbioru zbóż.....	48
Tabela 3. Parametry pracy zespołów roboczych kombajnów do zbioru zbóż stosowane w doświadczeniu.....	49
Tabela 4. Symbole i określenia przedziałów czasu w badaniach eksploatacyjnych maszyn rolniczych.....	51
Tabela 5. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena, $\lambda$ przekształcenia Boxa-Coxa, p-wartości analizy wariancji dla poziomu przepustowości i charakterystyki jakościowej ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia .....	64
Tabela 6. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a dla poziomu przepustowości i charakterystyki jakościowej ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia .....	65
Tabela 7. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena, $\lambda$ przekształcenia Boxa-Coxa, p-wartości analizy wariancji dla strat ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawień .....	68
Tabela 8. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a strat ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia – analiza masowa .....	69
Tabela 9. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a strat ziarna między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawienia – analiza procentowa .....	69
Tabela 10. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy całkowitymi stratami kombajnu, masy 1000 ziaren, stosunkiem masy ziarna do słomy, przepustowością. ....	73
Tabela 11. Tablica analizy wariancji zależności Całkowitych strat kombajnu od masy ziaren, stosunku masy ziarna do słomy, przepustowości $Adj R^2=0,86$ .....	74
Tabela 12. Porównania wielokrotne typów kombajnów w analizie kowariancji (test Tukey'a).....	75

Tabela 13. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena, $\lambda$ przekształcenia Boxa-Coxa, p-wartości analizy wariancji dla energii kiełkowania, zdolności kiełkowania, siewek nienormalnych i nasion martwych między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawień.....	76
Tabela 14. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a energii kiełkowania, zdolności kiełkowania, siewkach nienormalnych i nasionach martwych między poszczególnymi poziomami czynników: typami kombajnu i wariantami ustawień .....	76
Tabela 15. p-wartości Testu Shapiro-Wilka i testu Levena analizy wariancji dla porównania średnich kosztów między kombajnami.....	78
Tabela 16. Średnie poprawione i porównania wielokrotne (grupy jednorodne) uzyskane metodą jednoczesnego testu Tukey'a porównania średnich kosztów między kombajnami .....	78
Tabela 17. Zależność (korelacja liniowa) pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny i tymi kosztami na jednostkę pracy oddzielnie dla każdego typu kombajnu .....	79
Tabela 18. Analiza kowariancji, wielomianowa stopnia drugiego zależności pomiędzy wykorzystaniem rocznym a jednostkowym kosztem eksploatacji maszyny i tymi kosztami na jednostkę pracy oraz typem kombajnu. ....	80
Tabela 19. Porównania wielokrotne typów kombajnów w analizie kowariancji – test Tukey'a.....	80