UNIWERSYTET PRZYRODNICZY W LUBLINIE
WYDZIAŁ AGROBIOINŻYNIERII

ROZPRAWA DOKTORSKA

Olimpia Klikocka-Wiśniewska

Agrobiofortyfikacja pszenicy jarej w siarkę na różnych dawkach azotu w aspekcie poprawy właściwości technologicznych, chemicznych i prozdrowotnych ziarna

Rozprawa doktorska
wykonana w Katedrze
Herbologii i Technik Uprawy Roślin
pod kierunkiem
dr hab. Elżbiety Harasim, prof. uczelni

LUBLIN 2022

Spis treści:

Strona

1. WSTĘP…….. 3
2. PRZEGLĄD LITERATURY…….. 5
2.1. Pochodzenie i znaczenie gospodarcze pszenicy jarej……. 5
2.2. Wymagania klimatyczno-glebowe i pokarmowe pszenicy jarej…….. 7
2.3. Azot w środowisku i nawożeniu pszenicy jarej…… 9
2.3.1. Azot w roślinie…… 9
2.3.2. Nawożenie azotem…….. 11
2.4. Siarka w środowisku i nawożeniu pszenicy jarej……. 14
2.4.1. Siarka w roślinie……. 15
2.4.2. Źródła i krążenie siarki w przyrodzie……. 19
2.4.3. Nawożenie siarką…… 23
2.5. Agrobiofortyfikacja zbóż……. 28
2.5.1. Istota agrobiofortyfikacji…… 28
2.5.2. Właściwości chemiczne i prozdrowotne ziarna zbóż……. 33
3. HIPOTEZA ROBOCZA I CEL BADAŃ…… 46
4. MATERIAŁ I METODY…… 48
4.1. Opis terenu badań……. 48
4.2. Opis doświadczenia…….. 50
4.3. Warunki meteorologiczne …… 54
4.4. Wykaz badanych cech oraz opis metod analitycznych i statystycznych……. 56
5. WYNIKI BADAŃ…….. 61
5.1. Analiza wariancji badanych cech ziarna……... 61
5.2. Analiza wartości cech technologicznych, jakościowych i prozdrowotnych ziarna……. 63
5.3. Analiza składu chemicznego ziarna…….. 71
5.4. Efektywność nawożenia pszenicy jarej……. 93
6. DYSKUSJA…… 97
7. WNIOSKI…… 115
8. PIŚMIENNICTWO…… 117
Streszczenie…… 138
Summary……. 140
Spis tabel……. 142
Spis wykresów……. 143
Spis rysunków……. 144
ANEKS…… 145

1. WSTĘP

Pszenica zwyczajna (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare*) jest genetycznym heksaploidem, który pochodzi z Azji Środkowej. Została udomowiona 6000 lat p.n.e. i do dzisiejszych czasów jest zbożem o podstawowym znaczeniu w żywieniu *Homo sapiens*. Jest uprawiana na całym świecie, a liczba odmian sięga 50 tys. Głównymi producentami są: Chiny, Indie, USA, Rosja i Francja. Polska zajmuje 17 miejsce w świecie pod względem areału uprawy pszenicy. W strukturze zasiewów naszego kraju pszenica zajmuje 22,3%. Uprawia się ją na powierzchni 2417 tys. ha, w tym odmian jarych 492 tys. ha. Średni plon ziarna w 2018 roku wynosił 4,06 $t \cdot ha^{-1}$ (GUS 2020). W Krajowym Rejestrze (COBORU 2020) znajduje się obecnie 40 odmian pszenicy jarej zwyczajnej. Ziarno pszenicy przeznacza się na mąkę dla ludzi i paszę dla zwierząt. Mąka służy w głównej mierze do wyrobu pieczywa i makaronów. Jakość mąki zależy od wartości użytkowej ziarna, zaś ta od sposobu i warunków jej uzyskania (Rachoń i in. 2020).

Przy podnoszeniu wydajności i jakości *sensu stricto* produkcji roślinnej bardzo ważną rolę odgrywa zbilansowane nawożenie. W ostatnich latach przy ustalaniu potrzeb pokarmowych roślin, bierze się pod uwagę siarkę. To pierwiastek, który w latach 80. XX wieku był postrzegany w paradygmacie wyłącznie niekorzystnego oddziaływania jego związków na ekosystemy (Bloem 1998, Klikocka 2010, 2011, Wójcikowska-Kapusta i in. 2019). Jednakże w wyniku coraz częściej pojawiających się sygnałów o deficytach siarki w glebie, zainteresowanie tymże składnikiem pokarmowym w kontekście jego niezbędności wzrosło (Klikocka i in. 2003, Brodowska 2013, Stankowski i in. 2019).

W Polsce objawy niedoboru siarki w rzepaku na początku lat 90. zbadali Grzebisz i Fotyma (1996). Współcześnie problematyka ta skupia dużą uwagę naukowców, na co wskazuje rosnąca liczba doniesień naukowych, potwierdzających istotność niedoboru siarki w żywieniu roślin (Siebielec i in. 2017, Tabak i in. 2019).

Także drugi analizowany w pracy składnik pokarmowy – azot jest bardzo ważny w produkcji roślinnej, ponieważ w największym stopniu decyduje o wielkości oraz jakości zebranego plonu (Knapowski i Ralcewicz 2004, Klikocka i Cybulska 2014).

Współcześnie na całym świecie przeprowadzane są badania empiryczne, których celem jest ustalenie wpływu azotu i siarki na plonowanie i jakość roślin uprawnych. Korzystne oddziaływanie azotu i siarki na wielkość i wartość biologiczną plonów odnotowuje się zwłaszcza w doświadczeniach z rzepakiem (Malhi i in. 2007). Włączenie siarki do podstawowego nawożenia zbóż azotem powoduje optymalizację plonów poprzez wyższą

wydajność jednostkową i jakość pozyskanego ziarna (Podleśna i in. 2003, Podleśna i Cacak-Pietrzak 2006, Stankowski i in. 2019). Odpowiednio zbilansowane nawożenie S i N jest ważne, z uwagi na wspólne interakcje podczas procesu pobierania i asymilacji tych składników w roślinie (Pilbeam 2015). Część interakcji między metabolizmem N i S pochodzi z O-acetyloseryny, bezpośredniego prekursora cysteiny, przy czym stężenie tego aminokwasu siarkowego zależy od żywienia azotem (Hesse i in. 2015). Siarka jako ważny składnik białka pszenicy wpływa na poprawę parametrów jakościowych mąki (Tea i in.. 2007, Klikocka i Cybulska 2014, Dostálová i in. 2015, Klikocka i in. 2016).

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Pochodzenie i znaczenie gospodarcze pszenicy jarej

Pszenica jest najstarszym obok jęczmienia zbożem, użytkowanym przez człowieka. Gatunki pszenicy, różniące się liczbą chromosomów, uprawiano już kilka tysięcy lat p.n.e. na Bliskim Wschodzie w regonie określanym mianem Żyznego Półksiężyca, który rozciąga się od Palestyny po Mezopotamię (tab. 1). Pierwszymi gatunkami, który uprawiano około 8-10 tys. lat p.n.e. były pszenice samopsza i płaskurka. Dominujący gatunek, czyli pszenica zwyczajna, zwana też miękką (*Triticum aestivum* ssp. *vulgare* L.) pojawiła się nieco później, około 6 tys. lat p.n.e. Gatunek ten, wywodzący się prawdopodobnie z Kaukazu, powstał w wyniku skrzyżowania gatunku pszenicy twardej, *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides* (genom AABB) i kozieńca, *Aegilops tauschii* (genom DD). Największą zaletą tego gatunku jest skład białek glutenowych, w których stosunek gliadyn do glutenin kształtuje się, jak 50:50, co decyduje o dobrych parametrach wypiekowych mąki. O przewadze nad innymi gatunkami zadecydowały także dobra wymłacalność ziarna z plew, zimotrwałość oraz duża plenność (Nucia 2018, Bielski i in. 2020).

Tabela 1. Podział systematyczny uprawnych gatunków pszenicy

Liczba Chromosomów	Gatunki	
	niewymłacalne (ziarno oplewione)	wymłacalne (ziarno nieoplewione)
Diploidalne (2n = 14)	*Triticum monococcum* L.	brak
Tetraploidalne (2n = 28)	*Triticum dicoccum* Schübl. (syn.) *Triticum dicoccon* Schrank.)	*Triticum durum* Desf. *Triticum turgidum* L. *Triticum polonicum* L. *Triticum orientale* Perc. *Triticum carthlicum* Nevski (syn. *Tricticum persicum* Vav. Ex Zhuk).
Heksaploidalne (2 n = 42)	*Triticum aestivum* L. ssp. *spelta* L. *Triticum aestivum* L. ssp. *macha* Mac Key *Triticum aestivum* L. ssp. *vavilovi* Sears	*Triticum aestivum* L. ssp. *vulgare* Mac Key *Triticum aestivum* L. ssp. *compactum* Mac Key *Triticum aestivum* L. ssp. *sphaero-coccum* Mac Key

Pszenica jest podstawowym zbożem konsumpcyjnym, co wynika ze składu ziarna, w tym zawartości glutenu, składnika decydującego o przydatności ziarna, ściślej mąki do wypieku chleba (Nucia 2018). Ziarno pszenicy zużywa się także do produkcji makaronów (pszenica twarda), płatków, słodu, czy też pozyskania skrobi. Ziarno pszenicy nie spełniającej warunków wypiekowych traktuję się jako zboże paszowe (Bielski i in. 2020). Pszenica jest zbożem, które najlepiej nadaje się na paszę, ponieważ posiada wysoką wartość pokarmową ziarna, a małą zawartość substancji antyżywieniowych w porównaniu z innymi zbożami. W skład chemiczny ziarna pszenicy wchodzą związki, które posiadają odmienne struktury chemiczne, właściwości fizyko – chemiczne oraz funkcjonalne. Funkcję energetyczną pełni skrobia, która stanowi około 65% suchej masy ziarniaka. Substancjami odżywczymi oraz zapasowymi są białka, które stanowią 10-17% suchej masy ziarna. Inne związki, takie jak pentozany, cukry proste, celuloza, tłuszcze oraz sole mineralne, zawierają odpowiednio 6-9%, 3-6%, 2,5-3,3%, 2-2,5% 1,4-2,3% suchej masy ziarniaka (Nucia 2018). Odmiany pszenicy ze względu na kierunek użytkowania klasyfikuje się w pięciu grupach (Zych 2020):

1. E – elitarna – odmiany odporne na porastanie o najlepszej wartości przemiałowej, wykorzystywane jako tzw. poprawiacze;
2. A – jakościowa – odmiany odporne na porastanie o bardzo dobrej wartości przemiałowej i wypiekowej;
3. B – chlebowa – odmiany o dobrej wartości wypiekowej i przemiałowej;
4. K – ciastkowa – odmiany o mniejszej zawartości białka z wysoką liczbą opadania, wykorzystywane w przemyśle cukierniczym;
5. C – pozostałe, w tym paszowa – odmiany przeznaczone na cele paszowe.

Ziarno pszenicy powinno charakteryzować się określonymi parametrami jakościowymi, a ocenę przydatności ziarna do wypieku chleba i klasyfikacji odmian dokonuje się na podstawie ośmiu podstawowych wskaźników: liczby opadania, zawartości białka, wskaźnika sedymentacji, wydajności i wodochłonności mąki, rozmiękczania i energii ciasta oraz objętości chleba (Klikocka 2020). Charakteryzują one właściwości ziarna, mąki, ciasta i pieczywa. Właściwy dobór odmiany do uprawy, to główny czynnik, który daje podstawę do wyprodukowania ziarna o określonych parametrach jakościowych.

Jakość ziarna pszenicy uwarunkowana jest również działaniem warunków atmosferycznych w okresie wegetacji, glebowych oraz czynników agrotechnicznych. Dostępność składników pokarmowych dostarczonych w nawozach, a zwłaszcza intensywność nawożenia azotem połączonego z ochroną roślin wpływa na wartość technologiczną wyprodukowanego ziarna pszenicy (Iwańska i in. 2020). Obecnie w hodowli pszenicy

prowadzi się intensywną selekcję rodów w kierunku poprawy jakości i uzyskania nowych odmian, z jeszcze lepszymi cechami jakościowymi. Podstawowe kryterium decydujące o kierunku wykorzystania konsumpcyjnego ziarna pszenicy to właściwości reologiczne ciasta. To istotny element w ocenie wartości wypiekowej ciasta. Wartości reologiczne w największym stopniu zależą od stosunku glutenin i gliadyn, które wchodzą w skład glutenu (Nucia 2018, Shewry i Hey 2015). Znaczenie jakości zbóż we współczesnej hodowli oraz produkcji ciągle wzrasta. Właściwy dobór odmiany to podstawa do uzyskania ziarna o pożądanych właściwościach technologicznych, a intensywna ochrona roślin oraz nawożenie azotem dają możliwość uzyskania wyższych plonów o lepszej jakości (Ellmann 2011).

2.2. Wymagania klimatyczno-glebowe i pokarmowe pszenicy jarej

Czynnikiem ograniczającym plony, który obok właściwej agrotechniki oraz stanowiska ma również ogromne znaczenie są warunki pogodowe. Głównym elementem różnicującym plony roślin zbożowych jest duża rozbieżność pomiędzy ilością, natężeniem oraz rozkładem opadów atmosferycznych w sezonie wegetacyjnym (Gąsiorowska i in., 2011, Iwańska i in. 2020).

Potrzeby wodne pszenicy jarej są duże. Wynikają one z dużego współczynnika transpiracji – 500 l/kg s.m. Suma opadów zimowych pod pszenicę jarą powinna wynosić 150-250 mm. Ich niedobór niebezpiecznie zmniejsza zapasy wody, z kolei nadmiar utrudnia uprawy wiosenne i opóźnia siew (Bielski i in. 2020).

Optymalna ilość opadów dla pszenicy jarej uprawianej w warunkach gleby ciężkiej w okresie do lipca kształtuje się w przedziale 151- 200 mm, przy czym wzrost ilości opadów do 300 mm skutkuje mniejszym spadkiem plonu ziarna niż ich suma poniżej 150 mm. Optymalna ilość opadów dla pszenicy jarej uprawianej w warunkach gleby średniej w okresie do lipca wynosi 240 mm. Nie mniejsze znaczenie niż ogólna suma opadów ma ich rozkład w okresie wegetacji. Przeciętny rozkład opadów w przeważającej części naszego kraju nie sprzyja uzyskiwaniu bardzo dużych plonów pszenicy jarej. Opady w okresie marzec-kwiecień działają niekorzystnie na uzyskiwany plon pszenicy jarej zarówno na glebach pszennych dobrych, jak i żytnich bardzo dobrych. Optymalna wartość opadów w okresie marzec-kwiecień wynosi 42 mm. Wieloletnie badania wykazały, że wielkość plonu ziarna pszenicy jarej zależy od ilości opadów w maju i czerwcu oraz ich sumy w całym okresie wegetacji. Największe potrzeby opadowe pszenica jara wykazuje w czerwcu. Optimum w tym okresie wynosi około 100 mm zarówno dla kompleksów glebowych pszennych, jak i żytnich.

Umiarkowane opady w lipcu sprzyjają dalszemu wykształceniu ziarna i dojrzewaniu na pędach głównych i bocznych. W uprawie pszenicy jarej na glebach kompleksu pszennego dobrego w północno-wschodniej Polsce optymalnymi warunkami opadowymi są: liczba dni z opadem w okresie marzec-lipiec wynosząca 90 dni, opad w marcu i kwietniu równy 42 mm, opad w czerwcu wynoszący 96 mm, a w lipcu 34 mm. Optymalny układ czynników opadowych w uprawie pszenicy jarej na glebach kompleksu żytniego bardzo dobrego to: 100 dni z opadem w okresie marzec-lipiec, opad w marcu i kwietniu wynoszący 42 mm, w maju – 80 mm, a w czerwcu –100 mm (Dmowski i in. 2008, Dmowski i Dzieżyc 2009, Radzka i in. 2009).

Wymagania termiczne pszenicy jarej różnią się od wymagań pszenicy ozimej. W okresie wschodów i kiełkowania są one jeszcze niewielkie. Dobrze znosi też wiosenne przymrozki, nawet do -6°C, stąd szkody w uprawach pszenicy jarej występują rzadko tym bardziej, że uprawiana jest ona na lepszych glebach, na których przygruntowe spadki temperatury są mniejsze. Pszenica jara kiełkuje już w temperaturze 1-3°C, ale szybciej kiełkuje i równomierniej wschodzi w temperaturze wyższdej. Siać ją należy możliwie najwcześniej, gdyż jarowizuje w temperaturze 3-4°C. Im wcześniejszy siew, tym lepiej rośliny ukorzenią się i rozkrzewią, co decyduje o ich wzroście i plonowaniu. Optimum termiczne po siewie to 6-6,5°C w ciągu doby. W fazie krzewienia wymagana jest temperatura od 8° do 12°C. Zarówno wyższa jak i niższa temperatura ogranicza krzewienie roślin. Niższa temperatura od podanej wydłuża okres krzewienia oraz osłabia tempo wzrostu i rozwoju roślin. Temperatura wyższa natomiast ogranicza rozwój pędów bocznych i tym samym zmniejsza zagęszczenie łanu. W okresie strzelania w źdźbło najlepsza jest umiarkowana, ale niezbyt niskia temperatura, najlepiej nie przekraczająca 14°C. Również w fazie nalewania ziarna temperatura powyżej 17°C przyczynia się do obniżania plonu (Grzebisz 2012, Bielski i in. 2020).

Wymagania glebowe pszenicy jarej są największe spośród wszystkich zbóż jarych. Pod uprawę pszenicy jarej najbardziej odpowiednie są gleby kompleksów pszennego bardzo dobrego, pszennego dobrego i pszennego górskiego, zaliczane do klas bonitacyjnych I-IIIa. Przy odpowiednim nawożeniu organiczno-mineralnym pszenicę jarą można z dobrym skutkiem uprawiać na glebach kompleksu pszennego wadliwego i żytniego bardzo dobrego. W sprzyjających warunkach klimatyczno-glebowych możliwa jest uprawa pszenicy jarej na glebach zaliczanych do kompleksu żytniego dobrego, klasy bonitacyjnej IV a oraz IVb (Grzebisz 2012, Klikocka i in. 2013, Bielski i in. 2020).

Pszenica jara do wytworzenia 100 kg ziarna (wraz z odpowiednią ilością słomy) pobiera

z gleby średnio 7,6 kg składników mineralnych (fosfor – 1,2 kg P_2O_5, potas – 2,6 kg K_2O, magnez – 0,4 kg MgO, azot – 2,8 kg N, wapń –0,6 kg CaO) (Bielski i in. 2020). Na glebach o pH niższyn niż 5,6 reaguje bardzo korzystnie na wapnowanie. Pszenica jara jest średnio wrażliwa na niedobór potasu i fosforu. W plonie ziarna 4 t ziarna z 1 ha pszenica jara wynosi około 300 kg NPKCaMg, w tym 48 kg·ha^{-1} P_2O_5 i aż 104 kg·ha^{-1} K_2O. W płodozmianie z regularnie stosowanym obornikiem dawki te można zmniejszyć o około 10 kg·ha^{-1} P_2O_5 i 40 kg·ha^{-1} K_2O. Na glebach ubogich w te składniki należy zwiększyć dawki fosforu i potasu w stosunku do wymagań pokarmowych o: 40-60 kg·ha^{-1} P_2O_5 i 30-50 kg·ha^{-1} K_2O, poprawiając jednoczesnie zasobność gleby w te składniki. Racjonalne, przyrodniczo-optymalne nawożenie fosforem i potasem dla plonu 4 t ziarna może wtedy wynosić około 90-110 kg P_2O_5·ha^{-1} i 155 kg K_2O ·ha^{-1}. Plon zbóż jarych stabilizuje magnez. Dlatego gleby ubogie w ten składnik należy wzbogacić nawozami z jego udziałem, bądź stosować nawozy magnezowe (Grzebisz 2012, Klikocka i in. 2013, Bielski i in. 2020).

2.3. Azot w środowisku i nawożeniu pszenicy jarej

2.3.1. Azot w roślinie

Azot zajmuje czwarte miejsce w biomasie roślin, po węglu, tlenie i wodorze (Kocoń 2014). Spełnia on istotną rolę w procesach biochemicznych, jako część struktury białek, enzymów, kwasów nukleinowych i cząsteczek chlorofilu. Wchodzi również w skład nukleotydów, porfiryn, hormonów roślinnych, metabolitów wtórnych, a także nośników energii np. ATP. Zdaniem Filipka (2006) pierwiastek ten gromadzi się głównie w nasionach, a korzenie i łodygi zawierają zazwyczaj najmniej azotu. Zawartość azotu w roślinach waha się od 5,0 do 50,0 g N·ha^{-1} suchej masy. Najwięcej tego składnika zawierają rośliny motylkowe, a najmniej zboża.

Według Kocoń (2014) rośliny pobierają azot głównie w formie jonów amonowych (NH_4^+) i azotanowych (NO_3^-). Asymilacja jonu NO_3^- pobranego z podłoża przez rośliny wymaga wydatkowania 20 ATP·mol^{-1} energii, a przy NH_4^+ 5 ATP·mol^{-1} (Salsac i in. 1987). Jak zauważa Bloom i in. (1992) z energetycznego punktu widzenia jony amonowe są korzystniejszym źródłem azotu, ponieważ nie wymagają redukcji przed wbudowaniem w aminokwasy. Starck (2004) wskazuje, że bardzo energochłonnej asymilacji azotanów do aminokwasów i białek, kluczową rolę odgrywają enzymy: reduktaza azotanowa (NR), redukująca NO_3^- w cytozolu do NO_2^- i azotynowa (NiR) redukująca NO_2^- do NH_4^+ w

chloroplastach.

Przenikanie jonów z roztworu glebowego do pozornie wolnej przestrzeni korzenia następuje biernie, na zasadzie dyfuzji (Rutkowska 2004). W glebie o podwyższonej zawartości jonów NO_3^- obserwuje się u roślin wzrost korzeni bocznych, dzięki czemu roślina lepiej wykorzystuje zasoby glebowe (Liu i in. 2010). Jak donosi Xu i in. (2012) rośliny dobrze zaopatrzone w azot wykazują wyższą aktywność fotosyntezy. Z licznych badań wynika ścisła zależność pomiędzy pobieraniem azotu w różnych postaciach i jego metabolizmem a fotosyntezą (Starek 2002).

Badania Fatygi i in. (1994) wskazują, że nawożenie azotem wpływa na wzrost masy ziarna z kłosa, jeśli w okresie wegetacji występują niedobory wody. Gdy opady w okresie wegetacji są obfite i równomiernie rozłożone, uzyskuje się większą liczbę kłosów na $1m^2$, ale jednocześnie mniejszą masę ziarna z kłosa. Według Ellmanna (2011) azot wpływa korzystnie na budowę i płodność kłosa oraz zwiększa masę ziarniaków. Jaśkiewicz (2014) donosi, że nawożenie azotem zwiększa rozkrzewienie produkcyjne roślin, a przez to obsadę kłosów na jednostce powierzchni, masę ziarna z rośliny i kłosa oraz zawartość białka w ziarnie.

W roślinach dojrzałych azot gromadzi się głównie w ziarniakach (Rutkowska 2014). Podczas nalewania ziarna dochodzi do remobilizacji azotu z organów wegetatywnych. Mi i in. (2000) uważają, że zasoby azotu zakumulowanego w częściach wegetatywnych w zupełności pokrywają potrzeby rozwijającego się ziarna. Według Hoffland i in. (2000) azot przyczynia się do wytworzenia związków chemicznych, które chronią rośliny przed chorobami i pasożytami

Nadmierne zaopatrzenie roślin w azot powoduje wytworzenia zbyt dużej masy wegetatywnej o zabarwieniu ciemnozielonym, opóźnienie dojrzewania, sprzyja wyleganiu roślin, zmniejsza ich odporność na choroby i szkodniki oraz przedłuża okres wegetacji. Jurga i Kocoń (2013) stwierdziły, że nadmierne zaopatrzenie roślin w azot doprowadza do wzmożonego pobierania związków azotowych, których rośliny nie są w stanie przetworzyć na białko. W efekcie dochodzi do nadmiernego wysycenia tkanek roślinnych azotanami (V), do ich kumulacji oraz ich zredukowanych form – azotanów (III), potocznie nazywanymi azotynami. Jak podaje Kopcewicz i Lewak (2002) jeżeli zawartość azotu przekracza górną granicę wartości krytycznej w roślinie, to obserwuje się zmniejszenie plonu rolniczego, a w roślinie nasilają się objawy toksyczne.

Według Starck (2002) w warunkach deficytu azotu dochodzi do zahamowania wzrostu roślin, dotyczy to w większym stopniu pędu niż korzeni. Niedobór azotu w roślinach uprawnych zmniejsza wytwarzanie liści oraz ich powierzchnię, powodując tym samym

zmniejszenie obszaru pochłaniania światła w procesie fotosyntezy. Rośliny zmniejszając powierzchnię asymilacyjną liścia, chronią tym samym wcześniej wytworzone organy przed niedoborem azotu (Rutkowska 2014).

Objawy niedoboru azotu występują w pierwszej kolejności na liściach starszych, a później przenoszą się na liście młodsze. Wszystkie liście są małe i wcześnie opadają. Najbardziej charakterystyczną oznaką niedożywienia azotowego jest jasnozielone zabarwienie roślin i ich niedorozwój. Zdaniem Starek (2004) w roślinach z intensywną fotosyntezą przy deficytowym poziomie azotu, fotoasymilaty gromadzą się często w chloroplastach w postaci skrobi i nawet w ciągu nocy nie ulegają w dostatecznym stopniu rozkładowi do cukrów. Adamczyk i Godlewski (2010) zauważają, że rośliny bronią się przed niedoborem azotu przez efektywne gospodarowanie posiadanymi zasobami tego pierwiastka. Ich zdaniem zboża posiadają umiejętność „przekierowania" azotu z części wegetatywnych do nasion.

2.3.2. Nawożenie azotem

Azot, to najbardziej plonotwórczy składnik pokarmowy spośród wszystkich pierwiastków, a jego plonotwórcza rola w stosunku do zbóż jest poparta wynikami licznych doświadczeń polowych (Filipek 2006).

Pierwotnym źródłem azotu dla roślin są związki organiczne będące pozostałościami obumarłych szczątek zwierząt i roślin, resztek pożniwnych oraz odchodów. Azot zawarty w tych związkach (aminokwasy, białka, amidy, aminy, kwasy nukleinowe), choć stanowi około 90% całego azotu glebowego, jest przez rośliny wyższe przyswajalny w niewielkich ilościach. Jak wiadomo rośliny muszą pobierać znaczne ilości azotu do prawidłowego rozwoju. Dlatego rośliny wytworzyły innego typu metodę pozyskiwania tego pierwiastka. Oprócz pobierania azotu w formie organicznej, rośliny opanowały także umiejętność pozyskiwania azotu w formie nieorganicznej (jony amonowe i azotanowe) (Adamczyk i Godlewski 2010).

W nawozach mineralnych azot występuje w formie amonowej (NH_4^+ - saletrzaki, saletra amonowa, salmag), azotanowej (NO_3^- - saletra wapniowa, saletra sodowa, saletra amonowa, salmag) i amidowej (NH_2 – mocznik). Nawozy azotowe zawierające azot w formie jonu amonowego NH_4^+ są nawozami typowo przedsiewnymi. Jon amonowy ulega sorpcji wymiennej, co zabezpiecza go przed wymyciem w głębsze warstwy gleby. W przypadku pogłównego zastosowania nawozów amonowych jon NH_4^+ może być silnie

zasorbowany w wierzchniej warstwie gleby, a w następstwie głębiej sięgające korzenie roślin nie są w stanie pobrać azotu. Z tego też względu nawozy amonowe wymagają przykrycia i wymieszania z glebą (bronowanie roślin, użycie kultywatora). W przypadku stosowania nawozu płynnego, np. wody amoniakalnej, głębokość przykrycia jest zróżnicowana w zależności od zwięzłości gleby. Na glebach ciężkich wodę amoniakalną wprowadza się na głębokość 3-4 cm, na średnich 7-8 cm, a na lekkich około 12 cm (Filipek 2006).

Forma amonowa nawozów azotowych wspomaga pobieranie przez rośliny siarki, która wpływa na prawidłowy przebieg fotosyntezy, krzewienie i podwyższoną odporność roślin. Stosowanie formy amonowej ogranicza akumulację azotanów(V) w roślinach. W nawozach jon amonu związany jest z fosforanami(V) i siarczanami(VI). Forma azotanowa jest typową formą pogłówną, ponieważ łatwo ulega wymywaniu. Powinna być stosowana w okresach intensywnego wzrostu roślin, w postaci saletry sodowej, potasowej, magnezowej i wapniowej. Forma saletrzana wspomaga pobieranie przez rośliny potasu, magnezu i wapnia. Forma saletrzano-amonowa jest najbardziej uniwersalną formą nawozów azotowych, łączy w sobie właściwości nawozów przedsiewnych i pogłównych (Kowal 2009). Przy pogłównym stosowaniu nawozów saletrzano-amonowym wskazane jest ich przykrycie (bronowanie zasiewu) (Filipek 2006). Forma amidowa azotu występuje w moczniku, który uważany jest za nawóz uniwersalny. Mocznik może być stosowany przedsiewnie i pogłównie, zarówno doglebowo jak i dolistnie. Działa wolniej, gdyż najpierw musi ulec w glebie rozkładowi do formy amonowej, a następnie do formy azotanowej(V). Mocznik powoduje 2-4 krotnie mniejsze zasolenie gleby niż inne formy azotu oraz wpływa na mniejszą akumulację azotanów(V) w roślinach (Kowal 2009).

Osiągnięcie wysokich plonów ziarna odpowiedniej jakości oraz zadowalających efektów ekonomicznych i bezpieczeństwa ekologicznego wymaga dokładnego ustalenia zapotrzebowania roślin w azot w poszczególnych fazach wzrostu i rozwoju. Według Pecio (2014) wyróżnia się trzy zasadnicze fazy krytyczne odżywiania azotem zbóż jarych:

1. Przed siewem,
2. Od strzelania w źdźbło do początku kłoszenia (BBCH 31-50),
3. Od wykłoszenia do początku kwitnienia (BBCH 55-61).

Dawka azotu zastosowana przedsiewnie wpływa korzystnie na krzewistość oraz stopień zróżnicowania elementów kłosa, a następnie na ich wykształcenie. Już w fazie krzewienia w stożku wzrostu powstają zawiązki kłosków i kwiatków, których dalszy rozwój dokonuje się w fazie strzelania w źdźbło. Nawożenie drugą dawką – w fazie strzelania w źdźbło – zapobiega redukcji elementów kłosa i zwiększa powierzchnię asymilacyjną liścia. Trzecia dawka azotu,

zastosowana w okresie od liścia flagowego do dojrzałości mlecznej, utrzymuje sprawność aparatu asymilacyjnego, wpływa na dobre wypełnienie ziarna i zawartość białka (Pecio 2010).

W warunkach deficytu azotu w początkowym fazach rozwoju dochodzi do zahamowania wzrostu roślin (Starck 2002). Jak podkreśla Mazurek i in. (1999) zawiązki organów kłosa powstają w okresie krzewienia, a ich rozwój dokonuje się w fazie strzelania w źdźbło. Jeżeli w tym okresie wystąpią niedobory składników pokarmowych, zawiązki nie rozwijają się w pełni i następuje redukcja liczby płodnych kwiatów, a więc w konsekwencji liczby ziaren w kłosie.

Przy zbyt dużych dawkach azotu pojawiają się zaburzenia w metabolizmie roślin, w efekcie czego następuje obniżka plonu i pogorszenie jego jakości (Mazurek i Sułek 1999). Pecio (2014) uważa, że zbyt duża dawka azotu wniesiona w początkowym okresie wzrostu prowadzi do nadmiernego, niepotrzebnego krzewienia, przedłuża żywotność słabych pędów, które bezproduktywnie wykorzystują asymilaty, co w konsekwencji osłabia źdźbło kłosonośne. Jak podają Podolska i Sułek (2002) intensywne krzewienie powoduje, że rośliny wykorzystują dużą część substancji odżywczych na rozwój wegetatywny, co zmniejsza ich ilość przeznaczoną na akumulację i rozwój kłosa. W efekcie liczba wytworzonych ziaren w kłosach, szczególnie pędów bocznych, jest znacznie mniejsza.

W Polsce zużycie nawozów azotowych systematycznie rośnie, natomiast ich efektywność rolnicza (produktywność) jest niewielka (Jadczyszyn i Kopiński 2013). W województwach kujawsko–pomorskim, opolskim i wielkopolskim zużycie azotu w nawozach mineralnych osiągnęło lub przekroczyło średni poziom nawożenia w państwach Unii Europejskiej (UE-27), wynoszący około 64 kg $N \cdot ha^{-1}$ UR. W tych województwach poziom nawożenia azotem wynosi ponad 90 kg $N \cdot ha^{-1}$ UR. W Polsce wschodniej i centralnej zużycie azotu z nawozów mineralnych jest mniejsze i mieści się w granicach 50 - 80 kg $N \cdot ha^{-1}$ UR. W województwach podkarpackim i małopolskim o rozdrobnionej strukturze agrarnej zużycie azotu z nawozów mineralnych jest jeszcze mniejsze i nie przekracza poziomu 40 kg $N \cdot ha^{-1}$ UR.

Według Jadczyszyn (2006) opad atmosferyczny dostarcza dodatkowo do gleby przeciętnie około 19 kg $N \cdot ha^{-1}$ w ciągu roku. Uwzględniając długość okresu wegetacyjnego roślin polowych, można przyjąć, że dostępnych jest dla nich około 10 kg $N \cdot ha^{-1}$.

2.4. Siarka w środowisku i nawożeniu pszenicy jarej

Siarka należy do VI grupy układu okresowego tzw. "tlenowców". Jej masa atomowa wynosi 32,064, a ciężar właściwy, zależnie od odmiany w jakiej występuje waha się od 1,96 (siarka jednoskośna) do 2,07 $g \cdot cm^{-3}$ (siarka rombowa). O właściwościach chemicznych siarki decyduje jej występowanie w kilku stopniach utlenienia: -2, +4, +6 (Verlinden 2002). Siarka obecnie jest podstawowym surowcem wykorzystywanym w produkcji H_2SO_4, CS_2, papieru, cementu, kauczuku, farb, leków, kosmetyków, a także fungicydów (np. mankozeb, tiram, kaptan) i herbicydów (np. metrybuzyna) (Klikocka 2005a). Pod względem rozpowszechnienia pierwiastek ten zajmuje 16 miejsce w skorupie ziemskiej. Występuje w naturze w formie elementarnej, jak też w licznych związkach nieorganicznych i organicznych, w kilkuset minerałach i ich złożach, w skałach magmowych i osadowych, w węglu kamiennym i brunatnym, w ropie naftowej, gazie ziemnym, w glebie, wodzie i powietrzu (Siuta i Rejman-Czajkowska 1980, Motowicka-Terelak i Terelak 1998).

Siarka – symbol S (łac. *sulfur*) jest niemetalem barwy żółtej, odkrytym w starożytności. Egipcjanie (2000 p.n.e.) nazwali siarkę „*brimstone - burning stone",* to znaczy „palący się kamień". Używali jej jako pigmentu do produkcji kosmetyków, natomiast Chińczycy stosowali siarkę w produkcji prochu strzelniczego. W średniowieczu siarka (ściślej siarka filozofów - *sulfur philosophorum, balsamum Naturae*), jako składnik wszystkich ciał, odgrywała fundamentalną rolę w rozwoju alchemii. Jako jeden z trzech pierwiastków (*tria principia* - siarka, rtęć, sól) kamienia filozoficznego (*lapis philosophorum*), za pomocą którego dokonywano transmutacji metalu nieszlachetnego w złoto lub srebro. Sam kamień filozoficzny był eliksirem młodości, przedłużającym życie i przywracającym zdrowie. Siarka w alchemii jest „ojcem metali" a rtęć „matką", tłustą ziemią, balsamem Natury, zawierającą w sobie zarodek-nasienie *lapis philosophorum*, symbolem energii rzeczy i ognia (Junius 1979, Schung i Haneklaus 2003, Klikocka 2005a). Lavoisier w roku 1772 zaliczył siarkę do pierwiastków chemicznych, a w roku 1781 Nicolas Deyeux opisał po raz pierwszy rolę siarki w roślinie. Horstmann w 1911 roku zgłębił szczegółowo znaczenie pierwiastka (Gupta i Schnug, 2001).

2.4.1. Siarka w roślinie

Niedobór siarki, jako problem żywieniowy w produkcji roślinnej ujawnił się Europie w ostatnich 20-latach. Najwcześniej, gdyż w drugiej połowie lat 80. XX wieku w Europie Zachodniej. Obecnie niedobór siarki dla szerokiego spektrum roślin uprawnych (rzepak,

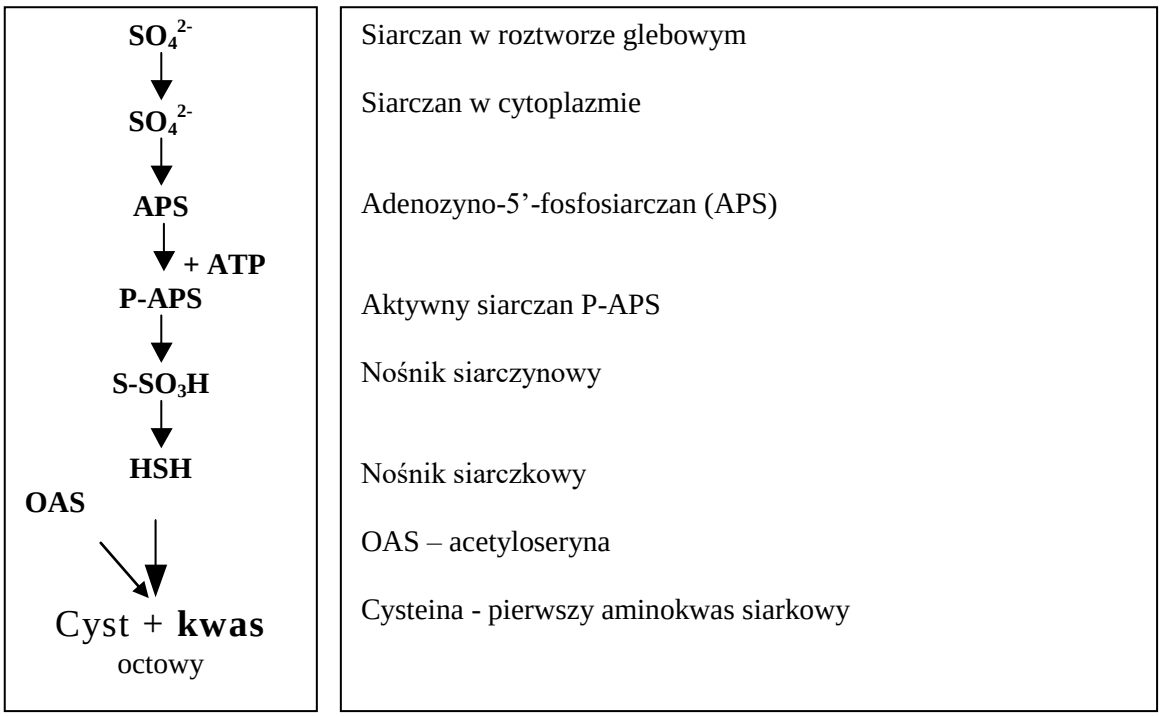
zboża) obserwuje się w północnych regionach Niemiec (Schnug i Haneklaus 1998), północnej i wschodniej Anglii (Zhao i in. 1997a, b), Danii (Eriksen 1997) i wielu innych krajach (Bloem 1998).

W Polsce po raz pierwszy objawy niedoboru siarki w rzepaku (objawy utajone) na początku lat 90. odnotowali Grzebisz i Fotyma (1996). Obecnie problem ten przyciąga coraz większą uwagę naukowców, na co wskazuje rosnąca liczba doniesień naukowych potwierdzających tym samym wagę zjawiska (Terelak i in. 1995, Grzebisz i Przygocka-Cyna 2003, Fotyma 2003, Klikocka i in. 2003, Koc i in. 2003, Kulczycki i Spiak 2003, Lipiński i in. 2003, Potarzycki 2003, Kopeć i Gondek 2004, Podleśna i in. 2003, Toboła i Jakubus 2003, Spychaj-Fabisiak i in. 2004, Brodowska 2013).

Niedobór S pogarsza plonowanie i zdrowotność roślin, przykładowo obniża wartość wypiekową pszenicy czy zawartość olejków gorczycznych (glukozylanów) w kapustnych (Haneklaus i in. 2000, Schnug i Haneklaus 2003, Podleśna i in. 2003. Gaj i Klikocka 2013). W tej sytuacji niedobór siarki w roślinach uprawnych nabiera głębokiego znaczenia gospodarczego. Ważnym elementem racjonalnej technologii uprawy wielu roślin jest suplementacja siarki poprzez nawożenie w zależności od wymagań uprawianej rośliny.

Siarka jest niezbędnym pierwiastkiem w pełnieniu wielu funkcji fizjologicznych i w rozwoju roślin. Jej zawartość wynosi 0,1 - 3,5% suchej masy, szczególnie dużo zawierają rośliny z rodziny *Brassicaceae* i *Liliaceae* (Klikocka 2005a). Rośliny pobierają siarkę z podłoża w postaci utlenionej, jako SO_4^{2-} a w małych ilościach mogą też asymilować jako SO_2 z atmosfery (Grzebisz i Przygocka-Cyna 2003). Siarka jest transportowana z korzeni do pędu, głównie przez ksylem. Redukcja anionów SO_4^{2-} odbywa się głównie w chloroplastach, konkurując o elektrony z $NADP^+$ i z reduktazą azotynową, uczestniczącą w redukcji azotynów. Reakcje redukcji siarczanów zachodzą intensywne w rosnących liściach i stopniowo słabną w miarę ich starzenia się. Mogą jednak zachodzić również w korzeniach. Redukcja anionu SO_4^{2-} pobranego z podłoża, jest procesem bardzo energochłonnym. Energia wydatkowana podczas redukcji SO_4^{2-} do S^{2-} (zmiana stopnia utlenienia z +6 do –2) i syntezy cysteiny wynosi 732 $kJ \cdot mol^{-1}$ (Starck, 2002, Grzebisz i Härdter 2006). Proces ten ma cztery etapy, nie do końca rozpoznane (Starck 2002, Klikocka 2005a). W etapie aktywacji powstaje z udziałem ATP (adenozynotrifosforan) aktywny siarczan, czyli adenozyno-5'-fosfosiarczan (APS) i pirofosforan (PPi), rozpadający się na fosforan (Pi) (rys. 1). Zaktywowany siarczan jest przenoszony na nośnik z grupą tiolową (RSH), którym może być glutation (GSH). Powstaje wówczas tiosulfonian, redukowany do tiosiarczku, a jednocześnie wydziela się AMP (adenozynomonofosforan). W reakcji tej donorem elektronów jest ferrodoksyna (Fd).

W czwartym etapie zachodzi synteza cysteiny, po przeniesieniu grupy tiolowej na *O*-acetyloserynę. W syntezie sulfolipidów uniwersalnym donorem reszt SO_4^{2-} jest 5'-fosfosiarczan 3'-fosfoadenozyny (P-APS). Zredukowane związki siarki mogą być ponownie utleniane, co w sposób szczególny różni metabolizm tego pierwiastka od metabolizmu azotu (rys. 2) (Starck 2002, Kopriva i Koprivova 2003, Salac 2005, Klikocka 2005a, Grzebisz i Härdter 2006, Podleśna 2013).



Rys. 1. Asymilacja siarczanów w roślinach wyższych (Grzebisz i Haerdter 2006)

Siarka bierze udział w procesie powstawania węglowodanów i tłuszczów, w syntezie aminokwasów (cysteina, cystyna, metionina), występuje w białkach (SH, S-S), ferredoksynie, tiolach (RSH), glutationie (L-γ-glutamylo-L-cysteinylo-glicyna, w skrócie GSH-antyoksydant), sulfolipidach, koenzymach (np. CoA), witaminach (B_1, H), penicylinie, kwasie liponowym, fitochelatynach (wiążą metale ciężkie), enzymach zapachu i smaku (cykloalliina – cebula i chrzan, allicyna – czosnek), glukozynolanie w *Brassicaceae*, który co prawda jest substancją nieżywieniową, lecz jego pochodne (izo i tiocyjaniny) nadają ostry smak i zapach olejkowi gorczycy (Starck 2002, Verkleij i in. 2003, Klikocka 2005a).

Jednym z charakterystycznych objawów braku siarki, podobnie jak azotu, jest chloroza liści, czerwowane żyłki, czasem brak turgoru liści. Chloroza pojawia się najpierw na liściach młodych. Rośliny mają małe, wąskie, blado zielone blaszki liściowe (*„wash outs"*) oraz

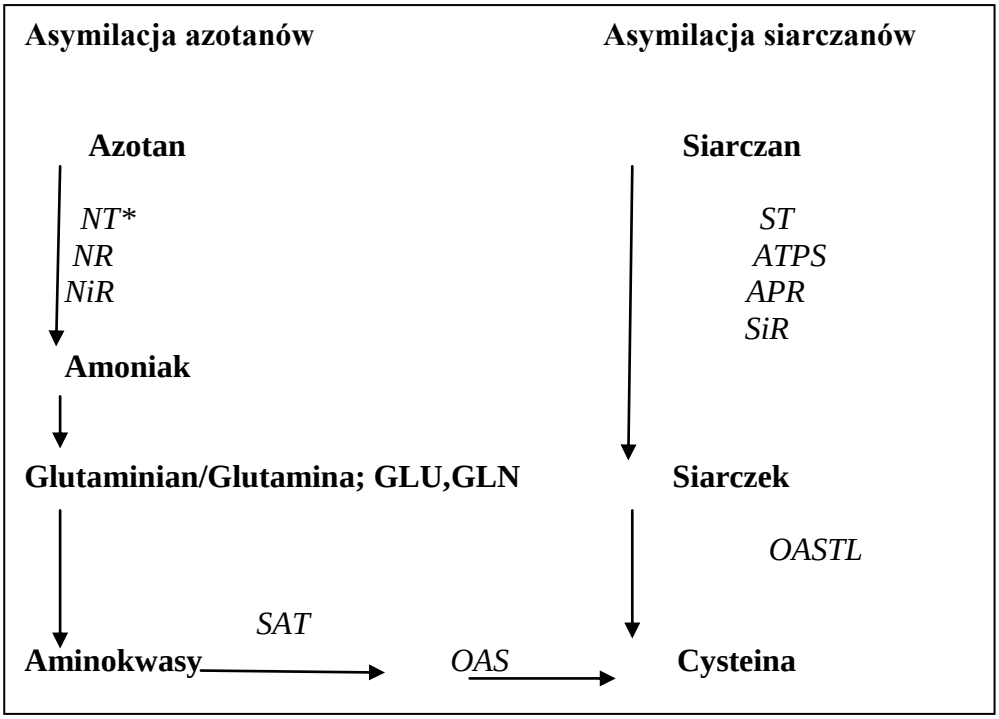
cienkie łodygi z bogato rozwinietą zdrewniałą tkanką wzmacniajacą (Merrien 1991). Zmianom podlegają także organy generatywne. Przykładowo deficyt w rzepaku siarki prowadzi do wytworzenia płatków korony o barwie białej (*„white blooming"*), (Schnug i Haneklaus 1998, 2003).

Biorąc pod uwagę zapotrzebowanie roślin uprawnych na siarkę można sklasyfikować je następująco (Siuta i Rejman-Czajkowska 1980):

- 1 grupa: rośliny o bardzo dużym zapotrzebowaniu na siarkę. Są to głównie rośliny krzyżowe (rzepak, gorczyca, rzodkiew, rzepa) i liliowate (np. czosnek). Pobierają one 40 - 80 kg $S \cdot ha^{-1}$.
- 2 grupa: rośliny o dużym zapotrzebowaniu na siarkę. Są to rośliny motylkowate, a zwłaszcza lucerny i koniczyny, także buraki cukrowe. Pobierają one 30 – 40 kg $S \cdot ha^{-1}$.
- 3 grupa: rośliny o stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na siarkę. Są to różne gatunki traw łąkowych, zboża, ziemniaki. Pobierają one 15 – 25 kg $S \cdot ha^{-1}$.

Zdaniem Lityńskiego i Jurkowskiej (1982) zawartość siarki ogólnej w roślinach uprawnych może wahać się w szerokich granicach 0,6 - 12 $g \cdot kg^{-1}$ s.m., najczęściej 2-5 $g \cdot kg^{-1}$ s.m. Niemniej Oenema i Postma (2003) są zdania, że zawartość siarki w biomasie większości roślin uprawnych zawiera się w zakresie 1 - 3 $g \cdot kg^{-1}$ s.m. Kovar i Grant (2011) są zdania, że optymalny poziom siarki w suchej masie roślin zbożowych wynosi 1,5 - 4 $g \cdot kg^{-1}$ s.m. Lityński i Jurkowska (1982) zauważają, że najbogatsze w siarkę są młode liście roślin, a najuboższe nasiona. Marska i Wróbel (2000) podają, że 70% siarki w liściach skupiają białka chloroplastów, zaś 30% białka cytoplazmy.

Niedobór siarki wpływa na obniżenie zdrowotności roślin, plonu i jego jakości. Choroby, na przykład cylindrosporioza liści rzepaku (*Pyrenopeziza brassicae*), czy mączniak prawdziwy (*Erysiphe graminis)* w zbożach występują w mniejszym nasileniu, gdy jest odpowiednio duży dopływ S do rośliny (Schnug i Ceynowa 1990, Haneklaus i in. 2002). Jak wykazały Klikocka (2005b), Klikocka (2010) siarka wpływa na podwyższenie odporności ziemniaka (*odporność indukowana nawożeniem siarką OINS,* ang- „*sulfur induced resistance" - SIR)* na porażenie grzybem *Rhizoctonia solani*. Nawożenie siarką podwyższa ponadto plony roślin uprawnych i polepsza ich jakość, np.: cebuli, czosnku, zbóż, buraków cukrowych i *Brassica* (Schnug i Haneklaus 1998, Toboła i Jakubus 2003, Cyna i Grzebisz 2003). Badania przeprowadzone przez Podleśną i in. (2003), Barczak (2010) i Klikocką (2020) wykazały, że nawożenie siarką wpływa korzystnie na ilość i jakość glutenu pszenicy ozimej, a tym samym poprawia wartość wypiekową mąki.



*NT** - transporter azotanu, *NR* – reduktaza azotanowa, *NiR* – reduktaza azotynowa, ST – transporter siarczanu, *ATPS* - sulfurylaza ATP, *APR* – reduktaza, *SiR* – reduktaza siarczynowa, *OASTL* – O-acetyloseryno(tiol)liaza, *SAT* – acetylotransferaza serynowa

Rys. 2. Prawdopodobne połączenie asymilacji azotanu i siarczanu przez O-acetyloserynę (*OAS*) (Podleśna 2013)

Jak donoszą Barczak i Nowak (2013), siarka stosowana do nawożenia owsa powoduje poprawę zawartości Mg w ziarnie w porównaniu z wariantami niewożenionymi siarką. Grant i Hawkesford (2015) twiedzą, że siarka sprzyja pobieraniu fosforu, zwłaszcza w glebach zasadowych. Również w warunkach niedostatku siarki w glebie, dodatek siarki do gleby polepsza pobieranie przez rośliny: Mo, Ni, Zn, Fe, Cu, Al, Hg, Pb, Cd i Se (Grant i Hawkesford 2015, Klikocka i in. 2017).

Siarka to pierwiastek niezbędny dla prawidłowego przebiegu procesów fizjologicznych w roślinie. Jej obieg jest ściśle zespolony z azotem, przez co obieg jednego komponentu ogranicza syntezę i działanie drugiego (Grzebisz i Härdter 2006, Podleśna 2013) (rys. 2). Jak podaje Podleśna (2013) zależności te zaczynają się już w glebie, ponieważ stwierdzono, że niedobór w niej siarki obniża wykorzystanie dostępnego azotu. Potarzycki (2003) stwierdził współdziałanie azotu i siarki w kształtowaniu plonu jęczmienia jarego, które polegało na lepszej redystrybucji azotu z organów wegetatywnych do generatywnych. Zatem ze względu

na niezbędność obu tych składników w przebiegu ważnych procesów w roślinie, ich obecność oraz działanie jest wzajemnie zależne.

2.4.2. Źródła i krążenie siarki w przyrodzie

Pierwotnym źródłem siarki są głębsze warstwy skorupy ziemskiej, skąd wyprowadzana jest na jej powierzchnię oraz do atmosfery i hydrosfery dzięki działalności wulkanicznej i erozji skał magmowych (Oenema i Postma 2003). Siarka w glebie występuje w formie organicznej i nieorganicznej. Około 95% siarki ogólnej w glebie stanowią formy organiczne związane z węglem – integralna część próchnicy oraz thio-aminokwasy (cysteina i metionina) (Grant i Hawkesford 2015). Siarka nieorganiczna w litosferze występuje w postaci niezwiązanej, tworząc jednopierwiastkowy minerał o wzorze chemicznym S, zwany siarką rodzimą (skały osadowe i wody morskie), a także jest składnikiem kilkuset minerałów należących do różnych grup systematycznych, np. siarczków (skały magmowe i wulkany) i siarczanów (skały osadowe i wody morskie). Aż 98% ogólnej masy siarki w skorupie ziemskiej skupia się w pięciu minerałach: pirotyn, piryt, markasyt, gips i anhydryt. Siarka może być także składnikiem minerałów krzemowych, gdzie grupa SO_4^{2-} zastępuje grupę SiO_4^{2-}. Poza tym wchodzi w skład gazu ziemnego i ropy naftowej w formie siarkowodoru (H_2S) (Motowicka-Terelak i Terelak 1998, Haneklaus i in. 2002, Klikocka 2011).

Siarka i jej związki w biosferze, w układzie: litosfera-hydrosfera-atmosfera podlegają dużej dynamice przemian, chroniącej świat roślin i zwierząt zarówno przed niedoborem, jak i nadmiarem tego składnika. Ponadto zawartość tego pierwiastka w biosferze waha się istotnie w zależności od czynników antropogenicznych (Motowicka-Terelak i Terelak, 1998, Terelak i in. 1988. Fotyma 2003, Grzebisz i Przygocka-Cyna 2003, Klikocka 2005a). Cykl siarki w biosferze zależy od szeregu procesów biologicznych (z udziałem flory i fauny), biogeochemicznych oraz fizyko-chemicznych (Siuta i Rejman-Czajkowska 1980, Motowicka-Terelak i Terelak 1998, Klikocka 2005c). Na przykład, znajdujący się w powietrzu siarkowodór w wyniku stopniowego utleniania przechodzi w formę SO_2 i SO_3. Tlenki te przy obecności pary wodnej lub wody przechodzą w kwas siarkowy, który następnie reaguje z kationami zasadowymi i tworzy różne siarczany (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Jony siarczanowe oraz SO_2 są pobierane przez rośliny i po redukcji włączane do syntezy tioaminokwasów wchodzących w skład białek oraz innych związków siarki. Organizmy zwierzęce niezbędne do życia związki siarki pozyskują natomiast od roślin (Salac 2005).

Nieorganiczne związki siarki, tworzące się w trakcie wietrzenia i przemiany materii organicznej w organizmach żywych podlegają reakcjom abiotycznym i biotycznym, prowadzonych przy współudziale bakterii (*Thiotrix, Sulfolobus, Thiobacterium, Thiospira, Thiobacillus: thiooxidans, thioparus, concretivorus, denitrificans, novellas* i inne) oraz promieniowców i grzybów (Siuta i Rejman-Czajkowska 1980, Motowicka-Terelak i Terelak 1998, Klikocka 2005a). Uwolnione w wyniku wietrzenia siarczki (np. FeS) w obecności tlenu są utleniane do formy elementarnej S (donorów elektronów), a w kolejnym etapie dzięki bakteriom zredukowana forma S^o utlenia się do siarczanów (S^{+6}). Wytworzony w tej reakcji kwas siarkowy jest produktem przejściowym, gdyż obecne kationy zasadowe: Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ i Na^+ oraz kationy Fe^{2+} i Al^{3+} reagują z anionami SO_4^{2-} tworząc odpowiednie siarczany (Scherer 2001). Natomiast w warunkach beztlenowych zachodzi proces odwrotny, redukcja związków siarki (procesy denitryfikacyjne) do siarkowodoru (S^{2-}). W klimacie suchym dochodzi do nagromadzenia $CaSO_4$, $MgSO_4$ i Na_2SO_4, podczas gdy w klimacie wilgotnym jony SO_4^{2-} występują w roztworze glebowym lub w stanie zasorbowanym na powierzchni koloidów glebowych. Jony SO_4^{2-} roztworu glebowego pozostają w stanie równowagi dynamicznej z siarczanami fazy stałej (Johnson i Mitchell 1998). Sorpcja jonów siarczanowych wzrasta w miarę obniżania się pH gleby i zależy od składu mineralogicznego gleby. Obniżenie pH powoduje wzrost ładunku dodatniego uwodnionych tlenków glinu, co jest kompensowane adsorpcją jonów ujemnie naładowanych, a więc i siarczanów. Spadek pH wpływa także na wzrost sorpcji tlenków żelaza wobec siarczanów. Z minerałów ilastych najwięcej jonów SO_4^{2-} sorbuje kaolinit (Scherer 2001).

W glebach uprawnych zawartość siarki wynosi zazwyczaj około 1%, jednakże jej główna masa znajduje się w formie związków organicznych. Siarka organiczna występuje w komórkach żywych organizmów i w substancji organicznej, przede wszystkim w próchnicy. Badania izotopowe z ^{35}S wykazały, że siarka wchodząca w skład próchnicy pochodzi przeważnie z rozkładu organicznych połączeń siarkowych, a nie siarczanów przedostających się do gleby różnymi drogami (Koter i Panek 1996, Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Związki siarki organicznej w glebie ulegają rozkładowi i ponownej resyntezie. Kierunek i nasilenie procesu mineralizacji organicznych połączeń siarki w glebie zależy od wielu czynników. Uwalnianie do gleby siarki w wyniku mineralizacji związków organicznych zachodzi wówczas, gdy stosunek C:S w rozkładanej przez drobnoustroje substancji jest mniejszy od 200. Jeżeli stosunek C:S wynosi 200-400:1 następuje w glebie przewaga procesów immobilizacji siarki. Tabatabai (1986) podaje, że stosunek C:N:S zależy od rodzaju gleby, wymywania i nawożenia i wynosi średnio 130:12:1, natomiast Brady i Weil (1996)

uważają, że typowy stosunek C:N:S w glebach mineralnych powinien wynosić 100:8:1. Natomiast stosunek N:S wynosi w granicach 6,7 - 11,1.

Szacuje się, że zawartość siarki w skałach osadowych na obszarze Polski wynosi 0,4%. Ponieważ gleby naszego kraju są aż w 90% wytworzone ze skał osadowych, siarka zajmuje pozycję jednego z sześciu głównych składników gleb: N, P, K, Ca, Mg i S (Lityński i Jurkowska, 1982). Zawartość siarki w glebach krajowych zdaniem Lipińskiego i in. (2003) waha się w granicach 70-1070 $mg \cdot kg^{-1}$. Największe znaczenie rolnicze i ekologiczne ma jednak w glebie siarka siarczanowa ($S\text{-}SO_4$), gdyż jest wskaźnikiem zaopatrzenia roślin w ten pierwiastek oraz może dostarczać informacji na temat zagrożeń dla środowiska glebowego, wynikających z depozytu siarki atmosferycznej. Na podstawie analizy $S\text{-}SO_4$ w 37 tys. próbek glebowych, pobranych z głębokości 0-20 cm na obszarze Polski stwierdzono, że największe obszary gleb zasiarczonych znajdowały się w południowo-środkowej i zachodniej części kraju a także wokół aglomeracji warszawskiej (Motowicka-Terelak i Terelak 1998). Na zanieczyszczenie siarką lokalnie wpływają także miejscowe źródła emisji, jak: paleniska domowe, zakłady chemiczne. Ponadto według Motowickiej-Terelak i Terelaka (1998) na północy oraz południowym wschodzie przeważają gleby o naturalnej, niskiej zawartości siarki siarczanowej (klasa 0), a na obszarze całego kraju gleby z podwyższoną zawartością siarczanów (klasa 1). Potwierdzają to również regionalnie prowadzone badania przez Kulczyckiego i Spiak (2003), Spychaj-Fabisiak i in. (2004), oraz Klikocką (2005c). Gleby silnie zdegradowane wskutek zasiarczenia (klasa 3) zajmują w Polsce 4% powierzchni kraju. W większości gleb Polski użytkowanych rolniczo ilość siarki siarczanowej jednakże nie przekracza 25 $mg \cdot kg^{-1}$ gleby, z czego większość badanych gleb na powierzchni 1 ha w warstwie ornej zawiera nie więcej jak 50 kg siarki siarczanowej, a ponad 30% nie więcej jak 30 $kg \cdot ha^{-1}$ siarki dostępnej dla roślin (Lipiński i in. 2003).

Zauważalnym problemem w rolnictwie krajów świata i Europy jest niedobór siarki w glebach uprawnych spowodowany przez ekstremalne zaostrzenie norm środowiskowych pod koniec ubiegłego wieku. W Polsce w 2015 roku niską zawartość (I) siarki siarczanowej stwierdzono w 198 punktach monitoringowych (91,7% wszystkich profili), co było zbliżonym wynikiem do zaobserwowanego w 2010 roku. Zawartość naturalną średnią (II) wykazano dla 10 profili, a naturalną wysoką (III) dla 6 profili. Jedynie w 2 próbkach poziom siarki siarczanowej mieścił się w zakresie zawartości określanej jako antropogenicznie podwyższona (IV). Zauważalny jest też spadek przeciętnej zawartości siarki na przestrzeni lat, z 1,38 mg $S\text{-}SO_4 \cdot 100$ g w 1995 r. do 1,00 w 2015 r. (Siebielec i in. 2017). Zjawisko to może skutkować deficytami siarki dla wrażliwych gatunków roślin uprawnych. Ponadto może

zachodzić obawa, że poszczególne składniki w nawozach NPK nie będą zrównoważone i niedobór siarki może zmniejszyć wykorzystanie pozostałych składników, przede wszystkim azotu (Klikocka i Cybulska 2014).

Azot i siarka są ważnymi składnikami białka i odpowiedni stosunek N:S wpływa istotnie na jakość ziarna, jak i optymalne plonowanie roślin uprawnych. Pomiędzy siarką a azotem w roślinie zachodzi wiele interakcji na różnych poziomach, np. pobierania, przyswajania NO_3 i SO_4^{2-} oraz tworzenia metabolitów N i S (Klikocka i Marks 2018). Niedobór siarki w produkcji roślinnej może powodować poważne problemy gospodarcze i ekologiczne. W przypadku niewystarczającej zawartości siarki (i magnezu) może obowiązywać "prawo minimum", podczas gdy intensywne nawożenie upraw azotem może prowadzić do ograniczenia jego wykorzystania przez rośliny. Wpływa to wówczas na zmniejszoną zawartość siarki oraz jej pierwotnych i wtórnych metabolitów w plonach roślin, które odgrywają ważną rolę w diecie i zdrowiu zwierząt i ludzi (Klikocka i Marks 2018).

Rośliny uprawne w Polsce pobierają z plonem od 6,0 (woj. podlaskie) do 16,6 kg $S \cdot ha^{-1}$ (woj. opolskie), a dopływ siarki z atmosfery w formie mokrej i suchej rózni się na obszarze kraju od 6 (woj. warmińsko-mazurskie) do 20 kg $S \cdot ha^{-1}$ (woj. śląskie), (Grzebisz i Przygocka-Cyna, 2003). Gorlach i Mazur (2002) podają, że siarka pobierana jest przez rośliny uprawne w ilościach zbliżonych do fosforu. Lecz, w przypadku roślin takich jak: cebula, czosnek, kapustne pobranie wynosi nawet do kilkuset kilogramów tego składnika z hektara (15 – 20 kg $S \cdot t^{-1}$). Trawy, w tym zboża pobierają 18 - 30 kg siarki z hektara (3 – 5 kg $S \cdot t^{-1}$), natomiast okopowe (w tym ziemniaki) pobierają 18 - 40 kg $S \cdot ha^{-1}$ (do 1 kg $S \cdot t^{-1}$) (Fotyma 2003, Bloem 1998, Potarzycki 2003, Klikocka 2010). Grzebisz i Przygocka-Cyna (2003) oraz Klikocka i Sachajko (2011) twierdzą, że pobranie siarki przez rośliny uprawne w Polsce do 9 kg $S \cdot ha^{-1}$; ich zdaniem jest to tzw. wartość stałej równowagi siarki, która nie prowadzi do ujemnego bilansu składnika. Oznacza to, że ujemny bilans siarki nie występuje tylko do poziomu 2,25 t·ziarna ha^{-1}.

2.4.3. Nawożenie siarką

Głównym źródłem zasilania gleb Polski w siarkę do niedawna były emisje przemysłowe SO_2, które w roku 1980 wynosiły rocznie około 5 mln ton SO_2. Realizując porozumienia międzynarodowe („klub 30%” z 1985 r., porozumienie z Oslo w 1994 r i protokół z Gothenberga w 2002 r.) poziom tych emisji aktualnie, wskutek proekologicznej działalności przemysłu wynosi w granicach od 1,0 do 1,4 mln ton $SO_2 \cdot rok^{-1}$ (Fotyma 2003, Spychaj-

Fabisiak i in. 2004). Niedobory siarki w Polsce będą nadal narastać na skutek ograniczenia emisji a także: intensyfikacji produkcji rzepaku, kukurydzy i pszenicy, zwłaszcza w gospodarstwach nastawionych na gospodarkę resztkami roślinnymi, głównie słomą zbóż oraz zmniejszenia zużycia nawozów naturalnych i mineralnych (głównie fosforowych) oraz pestycydów zawierających siarkę (Fotyma 2003). Zdaniem Grzebisza i Przygockiej-Cyny (2003) oraz Haneklaus i in. (2002) niedobór siarki w produkcji rolniczej może wywołać poważny problem ekonomiczny i ekologiczny. Niedożywienie roślin siarką może wywołać skutek „prawa minimum", a jednoczesne intensywne nawożenie roślin azotem może spowodować spadek wykorzystania tego składnika przez rośliny. Fotyma (2003) twierdzi, że siarka poprzez metabolizm aminokwasów stymuluje pobieranie azotu przez rośliny uprawne. Biskupski i in. (2003) podają, że rośliny wykazujące brak siarki zawierają większe ilości rozpuszczalnych połączeń azotowych (azotanów, azotynów i nitrozoamin). Według Haneklaus i in. (2002) ocieplenie się klimatu wpływa na zmianę typów gleby, wzrost erozji i efekt cieplarniany. W wyniku tego następuje akumulacja substancji organicznej, a w niej węgla przy jednoczesnym limitowaniu udziału azotu, siarki i fosforu, co w rezultacie doprowadza do spadku żyzności gleby.

Dotychczasowe badania nad nawożeniem zbóż koncentrowały się przede wszystkim wokół azotu, jako głównego czynnika plonotwórczego i modyfikującego skład chemiczny ziarna. Nie dostrzegano pozytywnej roli siarki w kształtowaniu wielkości i jakości plonów, najczęściej rozpoznając ujemne skutki zanieczyszczenia tym pierwiastkiem, którego związki przez długie lata zaliczane były, jako czynnik degradacji ekosystemów (Motowicka-Terelak i Terelak 2000). Obecnie uważa się, że czynnikiem ograniczającym wzrost roślin jest niewystarczająca zasobność gleb w siarkę, a siarka w żywieniu roślin zajmuje czwarte miejsce po azocie, fosforze i potasie (Jamal i in. 2010). Giri i in. (2011) dodają, że nawożenie siarką jest istotną częścią nowoczesnego rolnictwa.

Motowicka-Terelak i Terelak (2000) oraz Grzebisz i Przygocka–Cyna (2003) uważają, że w warunkach Polski, przy dominującym udziale gleb lekkich i bardzo lekkich warstwa orna przeważającej części gleb użytkowanych rolniczo dostarcza zbyt małych ilości siarki siarczanowej by pokryć potrzeby pokarmowe roślin uprawnych. Najmniej siarki dostępnej dla roślin zawierają gleby wytworzone z piasków gliniastych lekkich, piasków słabogliniastych oraz gleby wytworzone z piasków gliniastych mocnych i glin piaszczystych. Najwięcej siarki zawierają gleby wytworzone z glin średnich i ciężkich oraz mady i rędziny (Lipiński i in. 2003).

Klikocka i in. (2015) donoszą, że w glebach Polski użytkowanych rolniczo, ilość siarki

siarczanowej zawiera się w zakresie 3,6 - 50,7 mg SO_4^{2-}·kg^{-1}, co oznacza, że w warstwie ornej gleby (25 cm) znajduje się tylko 14,6 kg S·ha^{-1}. Zjawisko to jest spowodowane zmniejszoną emisją związków siarki przez przemysł, ograniczonym nawożeniem roślin uprawnych obornikiem i superfosfatem pojedynczym (Schnug i Haneklaus 1994). Szacuje się, że w ostatnich latach w Polsce z nawożeniem mineralnym wnosi się rocznie do gleb średnio 10 kg S·ha^{-1} (Szulc 2008). Jest to ilość, która zdecydowanie nie zaspokaja zapotrzebowania roślin uprawnych na ten składnik. Jak donosi Podleśna (2013) średnio dla całego obszaru Polski bilans siarki dla upraw żyta jest ujemny i wynosi -13,5 kg S·ha^{-1}. Przy ilości 18-24 kg S·ha^{-1} odprowadzanej z plonem podstawowym i ubocznym zbóż wynoszącym 6 ton, uważa się, że w perspektywie czasu deficyt siarki w glebach uprawnych Polski będzie się pogłębiał (Szulc 2008).

Lityński i Jurkowska (1982) podają, że zależnie od warunków glebowych i klimatycznych ilość wymywanej siarki z gleby szacuje się na 7 do 80 kg S·ha^{-1} rocznie. Na ogół gleby nie nawożone tracą od 30 do 40 kg S·ha^{-1} rocznie, a nawożone do 70 kg S·ha^{-1} rocznie. Według Krishna (2013) aby przywrócić produktywność gleby o zawartości S <5 mg·kg^{-1} należy wnieść z nawożeniem 40 – 60 kg S·ha^{-1}. Gleby o zawartości S 10 - 15 mg·kg^{-1} wzbogacamy siarką w ilości 30 kg S·ha^{-1}, a gleb o zawartości siarki >20 mg·kg^{-1} nie nawozimy.

Nawozy mineralne zawierające w swym składzie siarkę można podzielić na dwie grupy w zależności od formy chemicznej pierwiastka. Pierwszą grupę stanowią nawozy siarczanowe: siarczan amonu, siarczan potasu, superfosfat pojedynczy; przedstawicielem drugiej grupy jest siarka elementarna (Kulczycki i Spiak 2003, Klikocka 2005a, Jakubus 2002). Źródłem siarki może być również gips i piryt, jednak są one trudne do wysiania i wymieszania z glebą (Messick i in. 2003).

Siarka towarzyszy nawozom potasowym, ponadto występuje niemal we wszystkich nawozach fosforowych (Eriksen 1997). Proste nawozy fosforowe zawierają od 1% (fosforany amonowe) do 12% (superfosfat prosty) siarki w postaci siarczanów, głównie wapnia i amonu. Jednak największe ilości pierwiastka wnoszone są wraz z siarczanem amonu (24% S), siarczanem potasu (18%), superfosfatem pojedynczym (12% S), gipsem lub fosfogipsem (18–19% S), siarczanem magnezu (13% S), kizerytem (22% S) i siarką elementarną (100%).

Podleśna (2009) proponuje aby do nawożenia ozimin stosować nawozy zawierające siarkę w formie słabo rozpuszczalnej w wodzie, jak superfosfaty proste, najlepiej w formie granulowanej, aby przedłużyć ich działanie. Natomiast do nawożenia roślin jarych i do nawożenia pogłównego przydatne są formy siarczanowe, rozpuszczalne w wodzie.

Klikocka i Cybulska (2014) podają, że nawozy siarkowe można wnosić w całości przedsiewnie lub aplikować je z podziałem na 2-3 dawki, równocześnie z azotem. Wówczas pierwszą dawkę nawozów siarkowych wnosi się przedsiewnie, drugą dawkę w fazie krzewienia BBCH 20-29, a trzecią w fazie kłoszenia BBCH 50-59. Staugaitis i in. (2014) dodają, że zastosowanie siarki przed siewem jest bardzo korzystne z punktu widzenia plonu. Podleśna (2009) zaleca aplikację siarki w fazie krzewienia zbóż. Jak podkreśla zastosowana siarka w tej fazie działa skuteczniej niż zaaplikowana w fazie strzelania w źdźbło.

Zboża wykazują zapotrzebowanie na siarkę w trzech fazach rozwoju: krzewienie, strzelanie w źdźbło oraz nalewanie ziarna. W fazie krzewienia rośliny dostatecznie zaopatrzone w siarkę dobrze się krzewią. Proces ten w rezultacie zwiększa liczbę potencjalnych kłosów (Grzebisz i Härdter 2006). Pedersen i in. (1998) zalecają by w przypadku zbóż nawożenie siarką stosować w początkowych fazach krzewienia. W fazie strzelania w źdźbło dobre odżywienie siarką rośliny pozwala jej utrzymać większą liczbę ziarniaków w kłosie. W fazie nalewania ziarna, rośliny dobrze odżywione siarką wyraźnie zwiększają masę ziarniaków (Grzebisz i Härdter 2006). Zboża wykazują największe zapotrzebowanie na siarkę w fazie nalewania ziarna, w okresie po kwitnieniu pobierają największe ilości tego pierwiastka z gleby (Grzebisz 2008). Stąd obecność siarki przyswajalnej w środowisku glebowym w fazie nalewania ziarna jest tak ważna.

Jak zauważa Wielebski (2006) przedsiewne nawożenie siarką jest szczególnie ważne z uwagi na niski poziom anionu siarczanu (SO_4^{2-}) w roztworze glebowym zimą i wiosną, warunkowany wymywaniem oraz niskim stopniem mineralizacji powiązanym z temperaturą powietrza.

Zdaniem Lipińskiego i in. (2003) zawartość siarki siarczanowej w glebie stanowi jedno z kryteriów doboru stanowiska dla roślin w zależności od ich wymagań w stosunku do siarki. W doświadczeniu polowym wykazano, że wczesną wiosną, najwięcej siarki siarczanowej zawierała gleba nawożona w wariancie z siarczanem potasu (37,1 mg $S–SO_4 \cdot kg^{-1}$) oraz w wariancie z superfosfatem pojedynczym (26,1 mg $S–SO_4 \cdot kg^{-1}$) (Szulc i Rutkowska 2009). Natomiast mniejsze ilości siarki siarczanowej zawierała gleba w wariantach z solą potasową (25,1 mg $S–SO_4 \cdot kg^{-1}$) oraz z superfosfatem potrójnym (20,9 mg $S–SO_4 \cdot kg^{-1}$).

Badania Barczak i Majcherczak (2009) nad nawożeniem jęczmienia jarego siarką dowiodły, że sposób aplikacji tego składnika miał niebagatelny wpływ na kształtowanie liczby ziaren w kłosie i masy tysiąca ziaren. Wykazano, że stosowanie doglebowe siarki wpływa korzystniej na liczbę ziaren w kłosie i masę tysiąca ziaren niż aplikacja dolistna. Według Aulakha (2003) zastosowanie w nawożeniu siarki pierwiastkowej lub gipsu jest

opłacalnym sposobem zwiększania produkcji. Wolnodziałające nawozy siarkowe (siarka elementarna, siarczan wapnia, siarczan gipsu) pod zboża jare uprawiane na glebie lekkiej najlepiej zastosować w uprawie pożniwnej lub pod orkę przedzimową. Pod zboża ozime siarkę elementarną lub gips wnosimy przed siewem roślin – najpóźniej do końca fazy krzewienia (Podleśna 2009). Jak dodają Kulczycki i Spiak (2003) oraz Klikocka (2004) stosowanie siarki elementarnej preferowane jest na glebach, z których możliwe są duże straty tego pierwiastka przez wymywanie, w takich warunkach stopniowe uwalnianie siarczanów z tych nawozów stanowi ich zaletę.

Legris–Delaporte i in. (1987) wskazują na możliwość stosowania siarki elementarnej i siarczanu gipsu w nawożeniu pogłównym. Kulczycki (2011) dowodzi, że drobno zmielona siarka elementarna może być wykorzystana w nawożeniu dolistnym roślin uprawnych. Tak zastosowana forma siarki ulega utlenieniu na powierzchni liści rośliny i jest włączana w jej metabolizm do związków organicznych, takich jak aminokwasy, peptydy i białka, jednocześnie podnosząc plon ziarna. Haneklaus i in. (2007) podają, że stosowanie siarki elementarnej na kłos jest skuteczną metodą zmniejszania infekcji kłosa przez grzyby *Fusarium.*

Obornik jest ważnym źródłem wnoszenia związków siarki do agroekosytemów. Według Siwik–Ziomek (2005) 1 tona obornika zawiera w swoim składzie 0,9 - 1,2 kg S. Jadczyszyn i in. (2012) podają, że planując nawożenie siarką poprzez zastosowanie obornika należy zmniejszyć o 5 kg $S \cdot ha^{-1}$ ilość wprowadzanej siarki z nawozami mineralnymi na każde 10 ton zastosowanego obornika. Siarka w oborniku występuje w połączeniach organicznych nieprzyswajalnych dla roślin, dopiero po mineralizacji tych połączeń staje się dla nich dostępna (Jakubus 2006). Wprowadzenie do gleby siarki organicznej może być korzystniejsze niż mineralne nawożenie siarką, ponieważ wiąże się z stopniowym uwalnianiem tego pierwiastka z materii organicznej. Zdaniem Förstera i in. (2012) z nawozów organicznych mniej niż 30% z całkowitej puli siarki jest bezpośrednio dostępna dla roślin.

W literaturze przedmiotu zaznacza się fakt, iż szczególnie wyraźną efektywność nawożenia siarką odnotowuje się w warunkach niedostatku tego pierwiastka w glebie (Szulc 2008). Jak zaznaczają Barczak i Nowak (2013), stwierdzony przez niektórych badaczy brak dodatniego oddziaływania siarki na plony roślin zbożowych może wynikać z uprawy tych roślin na glebach o średniej do wysokiej zawartości siarki przyswajalnej (rezultatem jest brak reakcji roślin na nawożenie siarką). Wielebski (2012) najwyższą produktywność siarki obserwował na glebie brunatnej, kompleksu żytniego dobrego, zaś najniższe wskaźniki efektywności nawożenia na glebie brunatnej właściwej, kompleksu pszennego dobrego. Jak

dodaje Pedersen i in. (1998) w odniesieniu do zbóż plonotwórcze działanie siarki wykazano do 60% badanych przypadków.

Zdaniem Szulca i Rutkowskiej (2009) termin wiosenny oznaczania zawartości siarki siarczanowej w glebie z punktu widzenia diagnostyki nawożenia siarką wydaje się najbardziej prawidłowy. Jak dotąd metody diagnozowania potrzeb nawożenia roślin uprawnych siarką na podstawie testów glebowych są mało przydatne w praktyce (Grzebisz i Härdter 2006). W celu wiarygodnego prognozowania dostępności siarki dla roślin, obok wykonania analizy glebowej, niezbędne jest oznaczenie zawartości tego składnika w liściach, w fazie kwitnienia (Barczak 2010). Bloem (1998) oraz Klikocka (2005c) proponują zastosować narzędzie diagnostyczne, to jest model prognozowania niedoborów siarki w glebach uprawnych – *Model for the Predicting Sulphur Deficiency* (MOPS). Wiąże on analizę gleby z rośliną, co pozwala tym samym na diagnozę potrzeb nawożenia siarką roślin uprawnych. Przydatność narzędzi diagnostycznych zawierających elementy modelu prognozowania niedoborów siarki w glebach uprawnych (MOPS) potwierdzili w swych badaniach Zgorelec i in. (2012). Z kolei Juda-Rezler (2004) proponuje model *ROSE (Risk of airborne sulphur species to the environment)*, gdzie jedną z części składowych jest regionalny, numeryczny model rozprzestrzeniania się siarki w atmosferze, *POLSOX-II*. Model ten pozwala na obliczenie depozycji SO_2, co może mieć również ogromne znaczenie praktyczne przy ocenie bilansu siarki.

Nawożenie siarką roślin uprawnych skutkuje zwiększeniem zawartości tego składnika w ich częściach wegetatywnych i generatywnych, co ma istotne znaczenie dla prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin. Zwiększenie zawartości siarki w biomasie roślin w wyniku nawożenia tym pierwiastkiem stwierdzili McGrath i Zhao (1996). Według Podleśnej i in. (2003), Barczak (2010) i Klikockiej (2020) nawożenie siarką zwiększa zawartość białka w ziarnie zbóż, decydując tym samym o wartości wypiekowej mąki.

Grzebisz i Przygocka-Cyna (2003) zwracają uwagę, że jeszcze do niedawna zalecano nawozić w Polsce zboża siarką w ilości 10–20 kg $S \cdot ha^{-1}$ w połączeniu z azotem, a w gospodarstwach rolnych, które zrezygnowały z produkcji zwierzęcej, zapotrzebowanie na siarkę kształtowało się na poziomie 30 kg $S \cdot ha^{-1}$. Aktualnie w Europie aby uzyskać zadowalający plon ziarna o dobrej jakości pod zboża rekomenduje się dawki siarki w zakresie 20-40 kg $S \cdot ha^{-1}$, a w Ameryce Północnej 17-34 kg $S \cdot ha^{-1}$ (Morris 2007).

Zdaniem Bloem (1998), Haneklaus i in. (2000) i Podleśnej (2009) nawożenie siarką zwiększa wykorzystanie azotu przez rośliny uprawne. Potwierdza to w swoich badaniach Boreczek (2001). Stosowanie nawożenia azotowo–siarkowe przy zachowaniu stosunku N:S

równego 10:1 powoduje uzyskanie wyższych plonów roślin uprawnych, niż przy stosowaniu tylko nawożenia azotowego (Biskupski i in. 2003). W warunkach niedoboru siarki w glebie obniżona jest plonotwórcza efektywność azotu, a intensyfikacja nawożenia N pogłębia jeszcze deficyt siarki, który z kolei hamuje pobieranie azotu przez rośliny (Boreczek 2001, Barczak 2010). Według Zuzhang i in. (2010) konsekwencją niewystarczającego zaopatrzenia roślin uprawnych w S jest obniżenie wydajności i zmniejszenie efektywności innych środków produkcji, które z kolei prowadzą do wyższych kosztów produkcji.

2.5. Agrobiofortyfikacja zbóż

2.5.1. Istota agrobiofortyfikacji

W ciągu ostatniej dekady zboża i ich produkty zdobyły szczególną uwagę wśród naukowców i konsumentów - jako podstawa żywienia człowieka oraz możliwość podtrzymania i poprawy stanu zdrowia. Zgodnie z zasadami piramidy żywieniowej opracowanej przez Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA) nisko przetworzone produkty zbożowe są klasyfikowane prawie w podstawowej części piramidy żywieniowej i powinny być spożywane jako najważniejsze źródło minerałów w diecie człowieka. W Polsce produkty zbożowe stanowią około 50% dziennego zapotrzebowania na ten składnik odżywczy, zwłaszcza K, P, Mg, Fe, Zn i Cu (Pieczyńska 2011).

Tabela 2. Metody zwiększania udziału w spożyciu mikroelementów (Chojnacka i in. 2011)

Metoda	Wyszczególnienie	Literatura
Fortifikacja	Dodawanie mikroelementów do żywności podczas przetwarzania	Meenakshi i in. 2010.
Suplementacja	Przyjmowanie suplementów mikroelementów, np. w postaci tabletek	Stein i in. 2008.
Biofortyfikacja	Interwencja oparta na zwiększeniu zawartości mikroelementów, głównie w podstawowych produktach spożywczych	White i Broadley 2009.
Biofortyfikacja agronomiczna	Stosowanie nawozów mineralnych (w tym mikroelementów) i organicznych; zmianowanie roślin, uprawa roli, metody genetyczne	Zhao i McGrath 2009, Galinha i in. 2011.

Dla dobrego samopoczucia ludzie wymagają co najmniej 22 składników mineralnych. Rośliny uprawne są ważnym źródłem pożywienia dla ludzi, a także są wykorzystywane jako

pasza dla zwierząt w postaci świeżej lub przetworzonej. Dlatego ich wartość odżywcza i udział makro i mikroskładników odżywczych, które zawierają, jest bardzo ważne dla zdrowia ludzi i zwierząt (Graham i in. 2007). Jak wykazują badania znaczna część ludzi na całym świecie cierpi z powodu niedoborów składników mineralnych, takich jak żelazo, cynk, jod, miedź, selen, wapń i magnez.

Niedostatek mikroelementów w pożywieniu, zwany niedożywieniem mikroelementami, lub inaczej jako ukryty głód (hidden hunger), dotyka ponad połowę światowej populacji, zwłaszcza kobiety i dzieci w wieku przedszkolnym, szczególnie w krajach rozwijających się. W 2000 r., w World Health Report zaliczono niedobory żelaza, witaminy A, kwasu foliowego, cynk i jodu do najpoważniejszych ograniczeń zdrowotnych na całym świecie (WHO 2000, Allen 2000, Allen i in. 2006). Braki te są spowodowane głównie dietami charakteryzującymi się niskim spożyciem warzyw, owoców oraz produktów zwierzęcych i rybnych, które są bogatymi źródłami minerałów (White i Broadley 2009, Miller i Welch 2013).

Tradycyjne sposoby dostarczania składników mineralnych do organizmu człowieka lub zwierząt, poza podstawową dietą polegają głównie na suplementacji mineralnej, dywersyfikacji diety i fortyfikacji żywności (Welch i Graham 2002). Alternatywnym rozwiązaniem może być "biofortyfikacja". Biofortyfikację zdefiniowano jako proces zwiększania biologicznie dostępnych zawartości podstawowych pierwiastków w jadalnych częściach roślin uprawnych poprzez interwencję agronomiczną lub dobór genetyczny (White i Broadley 2005, Broadley i in. 2006, Waters i Sankaran 2011) (tab. 2). Biofortyfikację w makro- i mikroskładniki można przeprowadzić poprzez odpowiednią agrotechnikę i hodowlę roślin (Zuo i Zhang 2009, Chojnacka i in. 2011). Według Skoczylasa i in. (2018) biofortyfikacja roślin jest metodą produkcji oraz hodowli roślin, która polega na wzbogaceniu surowców roślinnych w składniki mineralne w celu poprawienia odżywczej wartości gotowego produktu.

Biofortyfikacja agronomiczna. Asortyment i sposób stosowania nawozów jest głównym narzędziem zmian w zawartości minerałów roślinnych i jakości żywności (Graham i in. 2001). Zauważono, że w krajach rozwijających się zboża są na ogół głównym źródłem spożycia cynku i innych mikroelementów, podczas gdy proces zielonej rewolucji wpłynął na ich znacze zmiejszenie zawartości (Dar 2004), szczególnie w nowoczesnych odmianach ryżu i pszenicy w porównaniu z tradycyjnymi odmianami (Cakmak 2002). Zarówno badania szklarniowe, jak i eksperymenty polowe wykazały, że nawożenie cynkiem może spowodować znaczny wzrost plonów roślin uprawnych. Na przykład, w doświadczeniach polowych w Turcji stosowanie cynku spowodowało wzrost plonu pszenicy do 500%, w zależności od

lokalnych warunków glebowych i metody stosowania cynku (Cakmak 2002). Podczas nawożenia dolistnego pszenicy siarczanem cynku ($ZnSO_4$) otrzymano wysoce korztystne efekty. Zauważono również, że dodatek cynku do nawożenia glebowego miał również istotny wpływ na wzrost plonu pszenicy (Wang i in. 2008, Yang i in. 2007).

Nawożenie mikroelementami może mieć pozytywny wpływ na wydajność pszenicy i jakość ziarna, wymaga to jednak badań nad wyborem najbardziej skutecznych metod ich stosowania (Allaway 1986). Dolistne zastosowanie Zn na glebach wapiennych z jego niedoborem zwiększyło zawartość pierwiastka już we wczesnej fazie nalewania ziarna (Yang i in. 2007). Stosowanie odpowiednich nawozów mikroelementówych może z powodzeniem wpływać na zwiekszenie w plonie zawartości cynku, jodu, selenu, miedzi i niklu (Allaway 1986, House i Welch 1989). Zawartość manganu można zwiększyć tylko przez późne dolistne dokarmanie generatywnych części roślin (kłosy u zbóż), (Ascher 1994). Wykazano, że stosowanie w nawożeniu siarki w sposób doglebowy lub dolistny istotnie zwiększa zawartość całkowitych form N, P, K, Na, Ca, Mg, Zn, Mn, Cu, Fe, B i Se w bulwach ziemniaka i ziarnie zbóż (Klikocka 2011, Klikocka i Głowacka 2013, Klikocka i in. 2017).

Niedobór siarki w glebie w kilku rejonach świata doprowadził do wprowadzenia nawozów zawierających siarkę, w celu zwiększenia plonowania i poprawy jakości roślin uprawnych (Klikocka 2010). Wśród nawozów zawierających S, coraz bardziej popularne staje się stosowanie siarki elementarnej (S^o). Zastosowanie tej formy siarki pomaga zmniejszyć jej straty podczas wymywania formy siarczanowej, szczególnie na glebach lekkich i jednoczesnie długotrwały dopływ $S\text{-}SO_4$ w procesie utleniania S^o. Biochemiczne utlenianie S^o produkuje H_2SO_4, co obniża pH gleby i rozpuszcza $CaCO_3$ w alkalicznej glebie wapiennej, dzięki czemu warunki glebowe są bardziej korzystne dla wzrostu roślin, w tym wzrasta dostępność składników odżywczych roślin, zwłaszcza P (Jaggi i in. 2005). Podczas gdy wapń jest stosowany w celu podwyższenia pH gleb kwaśnych, co może wpłynąć na zwiększenie stężenia wapnia w roślinach, to jednak nastepuje w tym miejscu zmniejszenie zawartości w glebie kationów mikroelementów. Z drugiej strony, stosowanie nawozów naturalnych, zwłaszcza obornika powoduje wzrost wielu składników odżywczych, szczególnie mikroelementów. Dlatego ich stosowanie może być postrzegane jako sposób agronomicznej biofortyfikacji zwiekszającej wartość odżywczą i równowagę składników odżywczych w żywności pochodznia roślinnego (Graham i in. 2001).

Zmianowanie (płodozmian, rotacja roślin) jest bardzo ważnym sposobem zarządzania glebą i roślinami w procesie produkcji żywności. Zmianowanie zbóż, okopowych i roślin bobowatych grubonasiennych w płodozmianie pozwala na prawidłową walkę z chwastami,

zwłaszcza uciążliwymi. Także dla korzystnego bilansu azotu ważny w zmianowaniu jest udział roślin bobowatych. Jednym z zalecanych sposobów uprawy jest stosowanie wielokrotnej (równoczesnej) uprawy roślin, polikultury, co zwiększa różnorodność gatunków na polach i stabilność agrosystemów. W ogólnej kategorii uprawy wielokrotnej istnieje kilka podkategorii, np.: uprawa mieszanek, uprawa rzędowa, wstęgowa lub pasowa - na przemian kilku roślin (Głowacka 2016). Najczęstszą formą uprawy wielokrotnej są mieszane zasiewy zbóż z roślinami strączkowymi. W tym systemie poszczególne gatunki mogą efektywniej wykorzystywać różne zasoby lub te same zasoby, co może zwiększyć całkowity plon na jednostkę powierzchni w porównaniu z uprawą jednego gatunku (Głowacka 2016).

Systemy uprawy roli zmieniają się, ale obecnie brany jest pod uwagę wpływ uprawy roli na skład jakościowy i chemiczny roślin (Graham i in. 2001, Klikocka 2000, Klikocka i Sommer 2003, Harasim 2018, Harasim i in. 2020, Kwiatkowski i in. 2020). Wiadomo, że przejście na uproszczone lub zminimalizowane systemy uprawy roli powoduje tendencję do zmniejszania zawartości składników odżywczych, szczególnie obniżone zawartości w plonach roślin dotyczą zwłaszcza azotu i fosforu, ale także mikroelementów. Dlatego należy w pełni zrozumieć długoterminowe skutki stosowania takich systemów uprawy roli.

Hodowla roślin w przeszłości była ukierunkowana na wyższą wydajność agronomiczną, a nie na jakość odżywczą (Morris i Sands 2006). Na przykład, plony ziarna pszenicy zostały aktualnie zwiększone trzykrotne w porównaniu z wydajnością wynoszącą 0,86 $t \cdot ha^{-1}$ na początku XX wieku (Zhang i in. 2009). Zwiększona wydajność roślin spowodowała, że nastąpiło mniejsze stężenie (zawartość) minerałów w ziarnie. McGrath i in. (2007) stwierdzili zmiejszenie zawartości Fe i Zn w ziarnie pszenicy na przestrzeni lat, na podstawie przebadanych, zarchiwizowanych próbek (1845-2005) w stacji badawczej w Rothamsted, w Anglii Znaczące negatywne relacje między wzrostem plonu a zawartością w ziarnie Fe i Zn zaobserwowano również w innych badaniach w USA (Garvin i in. 2006). Wydaje się zatem, że zawarość Fe i Zn w ziarnie pszenicy zmniejszyły się z czasem, częściowo z powodu efektu "rozcieńczenia" wynikającego ze zwiększonych plonów. Dlatego stare odmiany z banku genów i odmiany o wysokim poziomie mikroelementów są krzyżowane z wysokowydajnymi odmianami w celu uzyskania roślin, które są wysoce produktywne i dają ziarno z wysoką zawartością elementów odżywczych (Chojnacka i in. 2011). Nowoczesne odmiany roślin są ponadto bardziej wydajne w przyswajaniu mikroelementów z gleby. Dlatego, wymagałoby to bardziej rozległego i rozpoznanego nawożenia mikroelementami w celu ich uzupełnienia w pobieraniu przez rośliny uprawne (Dickinson i in. 2009).

Inżynieria genetyczna polega po pierwsze na wprowadzeniu obcego DNA do gatunku uprawnego lub na sztucznej modyfikacji własnego DNA w celu osiągnięcia pożądanych rezultatów (Graham i in. 2001). Proces ten może polegać na przekształceniu pojedynczej komórki w celu osiągnięcia pożądanego efektu, a następnie poprzez technikę hodowli tkanek otrzymuje się zmianę DNA w całej roślinie.

W chwili obecnej trwają programy badawcze i hodowlane, mające na celu wzbogacenie roślin, będących głównym źródłem żywności w krajach rozwijających się o najważniejsze mikroelementy: żelazo, prowitamina A, cynk i kwas foliowy. Program HarvestPlus jest realizowany przez 15 centrów międzynarodowych instytutów badawczych CGIAR (Consultative Group for International Agricultural Research) i jest nakierowany na wiele gatunków roślin rolniczych, będących stałą częścią diety ubogich społeczeństw (www. Harvestplus.org). W I fazie podjęto program hodowli ryżu (*Oryza sativa* L.), pszenicy (*Triticum aestivum* L.), kukurydzy (*Zea mays* L.), manioku (*Manihot esculenta* Crantz), wilca ziemniaczanego (batat) o słodkim miąższu pomarańczy (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) i fasoli zwyczajnej (*Phaseolus vulgaris* L.) - które są spożywane głównie w Afryce, Azji, i Ameryce Łacińskiej. Studia nas wymienionymi roślinami są już kompletne, dlatego przystąpiono do II etapu badań nad: bananem (*Musa acuminate* × *M. balbisiana* Colla), jęczmieniem (*Hordeum vulgare* L.), bobowatymi: wspięgą wężowatą (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), orzechami Bambora groundnuts (*Vigna subterranean* (L.) Verdc.), soczewicą (*Lens culinaris* Medik.), prosem (*Panicum miliaceum* L.), niklą indyjską (*Cajanus cajan* (L.) Millsp. syn. *Cajanus indicus* Spreng.) oraz ziemniakiem (*Solanum tuberosum* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) i pochrzynem (*Dioscorea* spp.) (Pfeiffer i Clafferty 2007).

Podstawowym problemem na świecie jest występujący, z prognozą do zwiększenia się głód wśród ludzi. Szacuje się, że do 2050 r. populacja ludzka osiągnie 9 mld osób (Chojnacka i in. 2011). Wyzwaniem dla globalnego społeczeństwa jest zapewnienie bezpieczeństwa żywnościowego i żywieniowego (Allen 2000). Z drugiej strony, oczekiwania dotyczące wyższej wydajności ziarna w przeszłości spowodowały spadek w nich zawartości minerałów. Planuje się, że w przyszłości zostanie położony nacisk na produkcję wysokiej jakości żywności, która jest rozumiana jako żywność zawierająca odpowiedni poziom składników odżywczych, a nie tylko wymaganą część energii (Pijls i in. 2009). Niedobór elementów mineralnych w żywności pochodzenia roślinnego dotyczy szczególnie: Fe, Zn, Se, I, Cu, Ca i Mg (Zhao i McGrath 2009), ale szczególnie Fe i Zn (Meenakshi i in. 2010). Ocenia się, że 5 miliardów ludzi cierpi z powodu niedoboru żelaza. Negatywne skutki związane z ukrytym głodem (hidden hunger) obejmują większą podatność na choroby

zakaźne, zaburzenia rozwoju fizycznego i poznawczego oraz śmiertelność (Stein i in. 2008). Najbardziej zagrożone są kobiety i dzieci (White i Broadley 2005).

2.5.2. Właściwości chemiczne i prozdrowotne ziarna zbóż

Ziarna zbóż, takich jak ryż, pszenica, jęczmień, kukurydza lub sorgo są najważniejszym elementem diety człowieka i zwierząt na świecie (Graham i in. 2001, Wang i Outworker 2012). Wiadomo, że pszenica jest symbolem diety śródziemnomorskiej (Harnandez i in. 2011). Światowe wykorzystanie zbóż na świecie w sezonie 2016/17 stanowiło 2007 milionów ton, z czego sama pszenica wyniosła 732 miliony ton (FAO 2020). Prognoza przewiduje, że w sezonie 2017/2018 zapotrzebowanie na żywność ze zbóż wzrośnie o 1,3%, a zużycie na mieszkańca wyniesie 148 $kg \cdot rok^{-1}$, w tym tylko pszenicę w wysokości 66,7 $kg \cdot rok^{-1}$. Zatem zboża są głównym źródłem mikroelementów w żywieniu człowieka (Branch i in. 2007).

W wielu regionach, zwłaszcza w których brakuje mikroelementów, pszenica stanowi około 50% ludzkiej diety. Jest również dobrym źródłem makro- i mikroelementów (Rodriquez i in. 2011). Na podstawie badań Lončarića i in. (2012) można stwierdzić, że niektóre chorwackie genotypy pszenicy charakteryzują się wyższą zawartością żelaza i miedzi, niż inne zboża rosnące na kontynencie europejskim.

Kabata-Pendias i Pendias (1999) podają, że ziarno zbóż zawiera ($mg \cdot kg^{-1}$): Al 10-140, As 0,03+0,6, B 0,2-4, Cd 0,03-0,5, Co 0,15-0,6, Cr 0,003-0,4, Cu 2,6-6, F 2-8, Hg 0,03-0,1, Mo 0,21-0,6, Mn 10,45, Ni 0,1-0,5, Pb 0,2-0,5, Se 0,005-0,046, V 0,06-0,1, Zn 15-60. Kabata-Pendias i Pendias (1999) podają, że 17 pierwiastków śladowych uważa się obecnie za niezbędne do rozwoju większości roślin, a mianowicie: Al, B, Br, Cl, Co, Cu, F, Fe, I, Mn, Mo, Ni, Rb, Si, Ti, V, Zn. Za niezbędne dla człowieka Kabata-Pendias i Pendias (1999) uważają 20 pierwiastków śladowych: As, B, Br. Cl, Cr, Co, Cu, F, Fe, I, Li, Mn, Mo, Ni, Se, Si, Sn, V i Zn. Wymienia się także istotne znaczenie, na poziomie bardzo małych koncentracji ($ng \cdot kg^{-1}$), nastepujących pierwiastków: Ba, Cd, Pb, Rb, Sr, Ti, ale ich funkcja nie została jeszcze określona. Zapotrzebowanie organizmów na pierwiastki sladowe ustala się na ogół w odniesieniu do całodziennej diety. Przeprowadzone ostanio badania wskazują na możliwość wystąpienia niedoborów niektórych pierwiastków śladowych w grupach całych populacji, np. żelaza (zwłaszcza u młodych kobiet), cynku i selenu (Kabata-Pendias i Pendias 1999). Pieczyńska i in. (2011) twierdzą, że w Polsce produkty zbożowe w 50% pokrywają zapotrzebowanie na pierwiastki chemiczne, w tym szczególnie, K, P, Mg, Fe, Zn i Cu.

Biorąc pod uwagę biologiczne znaczenie pierwiastków możemy je podzielić na: pierwiastki biogenne, makroelementy, mikroelementy i ultraelementy. Mianem makroelementów (makrominerałów, makroskładników, pierwiastków głównych, makropierwiastków) określa się pierwiastki, których zawartość w danym środowisku (także organizmie) jest stosunkowo duża. Ponieważ między różnymi typami środowisk i grupami organizmów występują pod tym względem różnice, różnie określane są wartości graniczne wyróżniania makroelementów. Różna jest też ich lista. Szczególnie duże różnice występują między przyrodą nieożywioną a organizmami. W przypadku roślin za makroskładniki uważa się: węgiel, wodór, tlen, azot, fosfor, potas, siarkę, wapń i magnez (Barker i Pilbeam 2007). C, H, O, N i S tworzą grupę pierwiastków strukturalnych. Za graniczną zawartość między makroelementami a mikroelementami zwykle przyjmuje się 0,1% masy (Kopcewicz i Lewak 2002). Ponieważ pojęcia makroskładników nie zawsze są ostro zdefiniowane (oprócz zawartości może być brane pod uwagę również biologiczne wykorzystanie), do roślinnych makroskładników czasem zaliczane są ponadto żelazo, chlor, sód i krzem, włączane w innych systemach do mikroskładników (Barker i Pilbeam 2007). W przypadku człowieka makroelementami bywają nazywane pierwiastki, których dobowe zapotrzebowanie w diecie przekracza 100 mg na dobę. Niezbędne są one do prawidłowego rozwoju jego organizmu. Zalicza się do nich: fosfor, wapń, magnez, chlor, potas, sód, siarka, azot, wodór, tlen, węgiel (Jarosz 2017, Kopcewicz i Lewak 2002). Mikroelementy, mikroskładniki i pierwiastki śladowe są pierwiastkami chemicznymi występującymi w bardzo małych (śladowych) ilościach w organizmach roślinnych i zwierzęcych. Zapotrzebowanie u ludzi na te pierwiastki wynosi poniżej 100 mg na dobę (Jarosz 2017, Kopcewicz i Lewak 2002). Do mikroelementów w diecie człowieka zalicza się: jod, żelazo, fluor, bor, kobalt, miedź, chrom, cynk, mangan, molibden, selen. Lista mikroelementów roślin może zależeć od ujęcia, ale zasadniczo obejmuje miedź, bor, mangan, cynk i molibden. Zazwyczaj obejmuje również żelazo (które często występuje w ilościach większych niż pozostałe mikroelementy, co zbliża je do makroelementów), a niekiedy też chlor, sód, krzem, kobalt i wanad. Czasem natomiast za mikroelementy uznaje się wszystkie znajdowane w roślinach pierwiastki (poza makroelementami). W zależności od czułości pomiaru taka lista objąć może praktycznie wszystkie występujące w naturze pierwiastki, które mogą mniej lub bardziej przypadkowo znaleźć się w organizmie, przez co zwykle ogranicza się ją do pierwiastków istotnych dla roślin, nawet jeśli ich rola jest słabo poznana (Kopcewicz i Lewak 2002). Niektóre mikroelementy, są niezbędne w ustroju do celów budulcowych (szczególnie w tkance kostnej), wchodzą w skład: płynów ustrojowych, niektórych enzymów, związków

wysokoenergetycznych, itp. Wywierają również wpływ na regulację czynności narządowych i ogólnoustrojowych. Inne mikroelementy występując w nadmiernych stężeniach (np. chrom, kobalt, miedź, żelazo, molibden, nikiel, cyna, wolfram, cynk) mogą wywoływać skutki niepożądane. Ponadto niektóre pierwiastki są wyłącznie toksyczne (srebro, bizmut, kadm, rtęć, ołów, tal, tor, uran).

Kolejną grupą pierwiastków są ultraelementy, występujące w ilościach kilku μg na gram masy ciała. Zaliczamy do nich: rad, srebro, złoto, platynę. W organizmach, w procesach metabolicznych pełnią one rolę aktywatorów enzymów.

W połowie XIX w. za dziesięć niezbędnych do rozwoju roślin pierwiastków uznano: C, O, H, N, S, P, K, Ca, Mg i Fe. W chwili obecnej takie kryteria spełnia wiele innych pierwiastków, których znaczenie przedstawiono w tabeli 3. Zestawienie w tabeli 3 opracowano na podstawie publikacji: Czerwiński 1980, Kabata-Pendias i Pendias 1999, Szweykowska 200, Kopcewicz i Lewak 2002, Barker i Pilbeam 2015, Kozłowska 2007, Kabata-Pendias i Szteke 2012 i in.

Tabela 3. Charakterystyka biologiczna pierwiastków chemicznych (kolejność pierwiastków wynika z przeciętnej zawartości w organizmie ludzkim)

Nazwa (zapotrzebowanie dobowe)	Znaczenie biologiczne	Niektóre skutki niedoboru
	dla zwierząt i roślin	
Pierwiastki biogenne		
Tlen, O (~ 2 kg)	Podstawowe składniki związków organicznych, wchodzących w skład wszystkich organizmów żywych: cukrów, tłuszczów, białek, kwasów nukleinowych (DNA i RNA). Tlen bierze udział w oddychaniu komórkowym, wraz z wodorem tworzy wodę, zaś z węglem dwutlenek węgla, który jest substratem do fotosyntezy.	Śmierć organizmu (np. z głodu, odwodnienia lub uduszenia).
Węgiel, C (~ 200 g)		
Wodór, H (~ 200 g)		
Azot, N (~ 10 g)	Składnik wszystkich białek, zasad azotowych (wchodzących w skład kwasów nukleinowych), związków przenoszących energię (ATP, ADP) oraz witamin. U roślin stymuluje wzrost, wchodzi w skład chlorofilu, niektórych koenzymów, barwników fotosyntetycznych oraz fitohormonów.	U zwierząt: zahamowanie procesów życiowych, zaburzenie bilansu azotowego (wychudzenie, osłabiony wzrost, ogólne osłabienie, obrzęki, brak apetytu, zmiany skórne, choroby wątroby. U roślin: zahamowanie wzrostu, cienkie i krótkie pędy. Liście małe i bladozielone, żółkną.

		Słabe krzewienie, przyśpieszone dojrzewanie. Roślina strzelista i wątła.
Fosfor, P (700 – 900 mg)	Pierwiastek o największej ilości funkcji w organizmie. Składnik m.in.: kwasów nukleinowych, związków przenoszących energię, fosfolipidów, białek. Odpowiada za utrzymanie odpowiedniego pH. U zwierząt: Odgrywa rolę w skurczach mięsni i pracy neuronów. Ważny składnik kości i zębów, w postaci hydroksyapatytu. U roślin: gromadzony w nasionach w postaci fityny.	U zwierząt: zaburzenia metabolizmu. Łamliwość i zniekształcenia kości, zgrubienia stawów, próchnica zębów, brak apetytu, zwiększona nerwowość. U roślin: zahamowanie wzrostu łodyg i liści. Stają się one ciemnozielone, czasem z fioletowoczerwonymi przebarwieniami od spodu, opóźnienie kwitnienia i owocowania, degeneracja nasion.
Siarka, S (~ 2 g)	Składnik dwóch aminokwasów: metioniny i cysteiny (która poprzez mostki dwusiarczkowe tworzy strukturę trzeciorzędową białka) oraz enzymów i koenzymów (np. koenzym A). Bierze udział w procesach oddechowych w komórce. Wchodzi w skład niektórych wielocukrów (w postaci siarczanów). U zwierząt: wchodzi w skład większości białek, m.in. wytwarzanych przez komórki naskórka, budujących włosy, paznokcie, rogi i kopyta oraz pióra (np. keratyna włosów i paznokci), a także wielu hormonów (np. insuliny) i witamin (np. B_1). Wpływa na właściwe nawilżenie i natłuszczenie skóry.	U zwierząt: Osłabiony lub zahamowany wzrost i równowaga ustrojowa. U roślin: zaburzenia biosyntezy chlorofilu, zahamowanie wzrostu. Liście są małe i bladozielone (chloroza), pojawiają się na nich czerwonawe żyłki.
Makroelementy		
Potas, K (1,5 – 3,5 g)	Reguluje równowagę osmotyczna i wodno-elektrolitową (jonową) komórki (zwiększa wydalanie wody z organizmu), zwiększa przepuszczalność błon komórkowych, podwyższa stopień uwodnienia cytoplazmy (zmniejsza jej lepkość). U zwierząt: Jest podstawowym kationem płynów tkankowych i wewnątrzkomórkowym. Reguluje odczyn i ciśnienie krwi. Wraz z jonami sodu odpowiada za polaryzację błon komórkowych (utrzymuje potencjał spoczynkowy aksonów), bierze udział w przewodzeniu impulsów nerwowych	Zaburzenia równowagi wodno-elektrolitowej. U zwierząt: kurcze mięśni i ich zwiotczenie, ogólne osłabienie organizmu, choroby serca (np. tachykardia) i nerek, apatia, uczucie splątania. Zwolnienie reakcji na bodźce, suchość skóry. U roślin: Zahamowanie wzrostu, martwica organów, mniejsza odporność na choroby. Więdnięcie liści, które stają się ciemnozielone, a następnie pokrywają się białożółtymi

	(wpływa na skurcze mięśni). U roślin: Aktywator ponad 40 enzymów, ma wpływ na procesy wzrostowe (kiełkowanie, wzrost, tworzenie nasion i całokształt przemiany materii, m.in. fotosyntezę, otwieranie i zamykanie szparek, odporność na stres.	plamami (chloroza). Utrata turgoru (zwiędły pokrój rośliny), skrócone międzywęźla, słabo rozwinięty system korzeniowy.
Wapń, Ca (800 mg – 1 g)	Zmniejsza przepuszczalność błon komórkowych, obniża stopień uwodnienia cytoplazmy (zwiększa jej lepkość). U zwierząt: Jest drugim przekaźnikiem w sygnalizacji komórkowej. Stanowi główny budulec kości i zębów kręgowców i skorup jaj ptaków. Wiąże się z niektórymi białkami (np. kolagenem). Jest jednym z czynników krzepnięcia krwi. Uczestniczy w biosyntezie hormonów. Jest potrzebny do prawidłowego funkcjonowania układu mięśniowego i serca (uczestniczy w mechanizmie skurczu mięśnia. Bierze udział w przewodnictwie impulsów nerwowych). U roślin: Jest aktywatorem enzymów. Łączy się ze składnikami ścian (składnik blaszki środkowej).	U zwierząt: Łamliwość i zniekształcenia kości (np. krzywica u dzieci, osteopenia i osteoporoza u dorosłych), choroby zębów, zgrubienia stawów. Zaburzenia metaboliczne (np. biegunka), zaburzenia krzepnięcia krwi i funkcjonowania układu mięśniowego i nerwowego (wzmożenie odruchów, stany lękowe). Utrata apetytu. U roślin: zahamowanie biosyntezy białka, gromadzenie się węglowodanów w organizmie, zaburzenia gospodarki wodnej. Rozkład błon komórkowych, nieprawidłowy wzrost i martwica organów (jasnozielona barwa liści i ich zwijanie się na brzegach, łamliwość górnej części łodygi), niewytwarzanie włośników przez korzenie.
Magnez, Mg (250 – 400 mg)	Wraz z wapniem zmniejsza przepuszczalność błon komórkowych. Obniża stopień uwodnienia cytoplazmy (zwiększa jej lepkość). Odpowiada za biosyntezę i utrzymanie właściwej struktury kwasów nukleinowych. Utrzymuje właściwą strukturę i koordynuje współpracę obu podjednostek rybosomów. Jest składnikiem enzymów oddechowych. U zwierząt: Jest składnikiem zębów i kości (bierze udział w ich tworzeniu), krwi oraz innych tkanek. Jest aktywatorem wielu enzymów (np. fosfofruktokinazy). Uczestniczy m.in. w replikacji kwasów nukleinowych (a zarazem w biosyntezie	U zwierząt: wzmożona aktywność układu nerwowego i mięśniowego (drżenia mięśni i kurcze, osłabienie mięśni, pracy serca (zaburzenia rytmu serca). Rozdrażnienie, wzmożony zespół napięcia przedmiesiączkowego (PMS), migreny, apatia. Wzrost podatności na nowotwory. U roślin: słabszy rozwój, zahamowanie fotosyntezy, więdnięcie, chloroza, żółknięcie i obumieranie liści, wynikające z braku chlorofilu (plamy między nerwami liści).

	białek), wytwarzaniu mocznika oraz transporcie fosforanów. Wraz z wapniem odpowiada za prawidłowe funkcjonowanie układu nerwowego (utrzymuje pompę sodowo-potasową warunkującą potencjał spoczynkowy aksonów) i mięśniowego (składnik komórek mięśniowych). Bierze udział w wytwarzaniu energii przez komórki (w trawieniu cukrów i tłuszczów). Ułatwia asymilację witaminy C i wapnia. Odpowiada za termoregulację. U roślin: aktywator enzymów uczestniczących w metabolizmie węglowodanów. Składnik chlorofilu i enzymów fotosyntetycznych.	
Sód, Na (550 mg – 2 g)	Reguluje równowagę osmotyczną i jonową komórki. U zwierząt: Jest podstawowym kationem płynu pozakomórkowego i krwi (reguluje jej odczyn i ciśnienie). Wraz z jonami potasu odpowiada za polaryzację błon komórkowych, bierze udział w przewodzeniu impulsów nerwowych (wpływa na skurcze mięśni).Odpowiada za transport jelitowy aminokwasów i węglowodanów. Składnik soku żołądkowego. U roślin: jest niezbędny do fotosyntezy.	Zaburzenia równowagi wodno-elektrolitowej. U zwierząt: Zanik różnicy potencjałów i utrata pobudliwości komórek. Osłabienie lub brak apatytu. Matowość oczu, zanik połysku sierści, matowienie włosów, lizanie różnych przedmiotów. Odwodnienie, niskie ciśnienie krwi, skurcze mięśni. U roślin: jedynie niewielu gatunkom jest potrzebny do życia, a jego niedobór powoduje osłabienie wzrostu (np. halofity czy burak cukrowy). W pozostałych przypadkach jest zbędny, a czasem nawet toksyczny.
Chlor, Cl (750 – 800 mg)	Wraz z jonami sodu i potasu reguluje równowagę osmotyczną i jonową komórki. U zwierząt: jest podstawowym anionem płynów tkankowych i podstawowym anionem zewnątrzkomórkowym. Reguluje odczyn i ciśnienie krwi, ułatwia uwalnianie tlenu z erytrocytów. Tworzy kwas solny w żołądku, aktywuje enzymy trawienne (amylazę ślinową i pepsynogen).	Zaburzenia oddychania komórkowego i równowagi wodno-elektrolitowej. U zwierząt: zaburzenia trawienia. Objawy często jak przy niedoborze sodu. U roślin: Zaburzenia fotosyntezy, chloroza i obumieranie liści.

	U roślin: czynnik katalityczny w fotolizie wody (faza jasnej fotosyntezy), transportuje asymilaty, wpływa na uwodnienie cytoplazmy.	
Mikroelementy		
Żelazo, Fe (15 – 19 mg)	Składnik enzymów oddechowych (cytochromy, peroksydazy, katalazy). U zwierząt: Składnik hemoglobiny oraz koenzymów wielu enzymów uczestniczących m.in. w tworzeniu ATP. U roślin: Składnik enzymów fotosyntetycznych oraz uczestniczących w wiązaniu azotu atmosferycznego.	Zaburzenia oddychania komórkowego. U zwierząt: Niedokrwistość (anemia), hipoksja, słaby wzrost, ospałość, osłabiona odporność na infekcje, bóle głowy, zaburzenia wchłaniania witamin z grupy B, arytmia serca, zaburzenia termoregulacji, zapalenie błon śluzowych, upośledzenie funkcji poznawczych. U roślin: chloroza liści i zaburzenia fotosyntezy.
Cynk, Zn (10 – 20 mg)	Uczestniczy w różnych etapach biosyntezy białek (wchodzi w skład polimeraz, uczestniczy w replikacji DNA i ekspresji genów), składnik enzymów oddechowych. U zwierząt: Składnik wielu enzymów odpowiedzialnych m.in. za metabolizm białek (składnik wielu proteinaz, węglowodanów i tłuszczów). Składnik insuliny (odgrywa także ważną rolę w jej magazynowaniu w trzustce), reguluje stężenie witaminy A. Bierze udział w formowaniu tkanki kostnej, stymuluje wzrost i naprawę tkanek (przyspiesza gojenie ran). Reguluje równowagę kwasowo-zasadową organizmu (składnik anhydrozy węglanowej). Jest niezbędny do prawidłowego funkcjonowania układu odpornościowego. Odpowiada za percepcję smaku, węchu i słuchu. U roślin: Składnik enzymów biorących udział w metabolizmie azotowym. Jest niezbędny do wytwarzania auksyn.	Zaburzenia biosyntezy białek i kwasów nukleinowych. U zwierząt: Zaburzenia odczuwania smaku i zapachu. Niedokrwistość (anemia), powolne gojenie ran, choroby skóry (m.in. łuszczyca), włosów (np. łysienie), łamliwość włosów i paznokci. Nowotwory, zanik mięści, zahamowanie wzrostu i rozwoju, opóźnienie dojrzałości płciowej (zaburzenia rozwoju i czynności gonad, niepłodność u samców), upośledzenie funkcji poznawczych, biegunka. U roślin: Chloroza, zwijanie się i karłowacenie liści, żółte plamy na liściach (tzw. choroba małych liści). Liście i kwiaty przedwcześnie opadają, międzywęźla są skrócone (głównie u drzew owocowych). Małe plony.
Miedź, Cu (2 – 3 mg)	Wchodzi w skład enzymów oddechowych (np. oksydaza cytochromowa i oksydaza askorbinowa). U zwierząt: Jest kofaktorem wielu	Zaburzenia oddychania komórkowego. U zwierząt: Zaburzenia biosyntezy białek strukturalnych

	enzymów, np. dysmutazy ponadtlenkowej, usuwającej z organizmu szkodliwy anionorodnik ponadtlenkowy. Uczestniczy w biosyntezie adrenaliny, melaniny, kolagenu, elastyny i keratyny, a także (wraz z żelazem) hemu (składnik hemoglobiny. Występuje w ceruloplazminie (białko osocza krwi).U niektórych bezkręgowców (np. mięczaków)jest składnikiem błękitnej hemocyjaniny (odpowiednik hemoglobiny). U roślin: Składnik enzymów fotosyntetycznych oraz enzymów biorących udział w biosyntezie chlorofilu, jest ważnym regulatorem procesów redoks (np. denitryfikacja). Ma duży wpływ na metabolizm lipidów i związków żelaza.	(pękanie naczyń krwionośnych, łamliwość kości), niedokrwistość (anemia), brak apetytu, ospałość, biegunka, niedowłady. U roślin: Utrata turgoru, bielenie i zamieranie szczytów pędów. Liście początkowo nabierają intensywnie zielonego koloru, później następuje ich chloroza. Bielenie i usychanie wierzchołków młodych liści.
Mangan, Mn (2 – 5 mg)	Aktywator i składnik grup prostetycznych niektórych enzymów, np. enzymów oddechowych (dehydrogenaza izocytrynianiwa, karboksylaza pirogronianowa). U zwierząt: Aktywator arginazy (enzym cyklu mocznikowego). Uczestniczy w biosyntezie mukopolisacharydów i hormonów tarczycy. Jest konieczny do prawidłowego rozwoju tkanek (zwłaszcza kostnej) oraz do funkcjonowania ośrodkowego układu nerwowego (wpływa na funkcje mózgu). Współdziała z witaminami B_1 i B_6 oraz cytochromami, zwiększa asymilację miedzi. Bierze udział w metabolizmie białek i węglowodanów. Jest potrzebny do rozmnażania i laktacji. U roślin: Potrzebny do prawidłowego wzrostu oraz do wydzielania tlenu w procesie fotosyntezy (aktywator enzymów jasnej fazy fotosyntezy), składnik enzymów uczestniczących w metabolizmie azotowym.	Zaburzenia oddychania komórkowego. U zwierząt: Osłabienie wzrostu i płodności, wychudzenie, deformacja odnóży, osłabienie tkanki łącznej, spowolniony metabolizm glukozy. U roślin: Łamliwość pędów, usychanie liści, które zostają pokryte szarozielonymi plamami, zwłaszcza u nasady blaszki (chloroza).
Krzem, Si (10 mg)	U zwierząt: Prawdopodobnie pełni rolę strukturalną. Występuje w osoczu krwi oraz sierści. Może być potrzebny przy formowaniu się tkanki łącznej (np. szkieletu). Jest niezbędny dla zwierząt, wytwarzających krzemionkowe elementy	U zwierząt: Choroby skóry (np. trądzik), wypadanie włosów, deformacje kości.

	szkieletu (np. gąbki szklane). U roślin: W przypadku niektórych gatunków usztywnia ściany komórkowe, a także zwiększa odporność na drobnoustroje. Korzystnie wpływa na wzrost traw.	
Fluor, F (1 – 4 mg)	U zwierząt: Składnik kości i szkliwa zębów, inaktywator fosfataz.	U zwierząt: Większa podatność na próchnicę zębów.
Bor, B (500 μg)	U zwierząt: Gromadzi się w kościach i układzie nerwowym, współdziała z wapniem. U roślin: Składnik ścian komórkowych. Bierze udział w metabolizmie kwasów nukleinowych, wzroście i rozwoju komórek, biosyntezie ligniny oraz regulacji gospodarki węglowodanowej. Jest niezbędny do kwitnienia i owocowania.	U zwierząt: Prawdopodobnie osłabienie zdolności uczenia się. U roślin: Upośledzenie wzrostu, , żółknięcie i kruchość liści, opadanie pączków kwiatowych, gnicie korzeni, zaprzestanie wytwarzania nasion, obumieranie tzw. stożka wzrostu (też zgorzel liści sercowych buraka).
Molibden, Mo (3 – 250 μg)	U zwierząt: Jest koenzymem wielu enzymów (np. oksydazy aldehydowej, dehydrogenazy ksantynowej). Bierze udział w metabolizmie zasad azotowych i detoksykacji ksenobiotyków. U roślin: Składnik enzymów uczestniczących w wiązaniu i przemianach azotu (denitryfikacja, biosynteza białek), bierze udział w biosyntezie witaminy C.	U zwierząt: Osłabiony wzrost. Zaburzenia metabolizmu zasad azotowych. U roślin: Zahamowanie wzrostu, chloroza i usychanie liści, opadanie kwiatów.
Jod, I (160 μg)	U zwierząt: Składnik hormonów tarczycy regulujących wiele funkcji organizmu (np. akcja serca, metabolizm tłuszczów, pobudliwość układu nerwowego, termoregulacja). U roślin: Zwiększa aktywność niektórych enzymów (inwertaz i peroksydaz).	U zwierząt: Choroby tarczycy (np. wole), karłowatość, kretynizm (wrodzony zespół niedoboru jodu), spowolnienie metabolizmu, obrzęki skóry.
Chrom, Cr (100 – 150 μg)	U zwierząt: Wzmaga działanie insuliny, składnik czynnika tolerancji glukozy. Obniża poziom cholesterolu w osoczu krwi.	U zwierząt: Zaburzenia gospodarki białek i lipidów. Hipercholesterolemia, obniżona asymilacja glukozy, nudności, niepokój, zaburzenia depresyjne, spadek masy ciała.
Selen, Se (60 – 70 μg)	U zwierząt: Wchodzi w skład selenocysteiny (aminokwasu wchodzącego m.in. w skład peroksydazy glutanionowej – przeciwutleniacza, chroniącego hemoglobinę przed	U zwierząt: Zaburzenia wzrostu (a nawet jego zahamowanie) i płodności, hemoliza, kardiomiopatie, degeneracja mięśni i wątroby, podatność na

	działaniem nadtlenku wodoru). Stymuluje cykl pracy serca, neutralizuje niektóre toksyny (kadm, rtęć),współdziała z tokoferolem (witaminą E).	infekcje. Upośledzone usuwanie reaktywnych form tlenu z organizmu.
Kobalt, Co (50 µg)	U zwierząt: Składnik witaminy B_{12} (kobalaminy), biorącej udział w procesie tworzenia erytrocytów (jest niezbędna w biosyntezie hemoglobiny). Aktywator niektórych enzymów. U roślin: Bierze udział w reakcjach enzymatycznych roślin motylkowatych (składnik ureazy), żyjących w symbiozie z bakteriami brodawkowymi.	U zwierząt: Niedokrwistość (anemia), zaburzenia krzepnięcia krwi i biosyntezy białek oraz kwasów nukleinowych. Wahania nastroju, nadpobudliwość. U roślin: Zahamowanie rozwoju bakterii brodawkowatych i procesu wiązania azotu przez rosliny motylkowate.
Nikiel, Ni (30 µg)	U zwierząt: Składnik ureazy – enzymu rozkładającego mocznik na amoniak i dwutlenek węgla. U roślin: bierze udział w reakcjach enzymatycznych u motylkowatych (bobowatych drobnonasiennych).	U zwierząt: Osłabiony metabolizm azotu i żelaza. U roślin: Prawdopodobnie powoduje ograniczony wzrost.
Wanad, V (10 µg)	U zwierząt: Aktywator enzymów uczestniczących w biosyntezie ATP. Wpływa na działanie pompy sodowo-potasowej, uczestniczy w metabolizmie glukozy, pobudza produkcję glutationu, uczestniczy w mineralizacji kości.	U zwierząt: Osłabiony wzrost, zaburzenia płodności, hipercholesterolemia, miażdżyca, cukrzyca.
Cyna, Sn (0,2 – 3 µg)	U zwierząt: Prawdopodobnie wpływa na działanie witaminy B_2 (ryboflawiny).	U zwierząt: Zaburzenia wzrostu i rozmnażania, prawdopodobnie również łysienie.
Wolfram, W (0,2 – 0,35 µg)	U zwierząt: składnik tkanek (od 0,5-50 ppb). U człowieka: składnik kości, krwi. Dawka z pożywieniem 8-12 µg/dzień.	U człowieka nadmiar uszkadza system nerwowy.

Zboża i ich przetwory współczesnemu człowiekowi dostarczają w dziennej racji pokarmowej około 30% energii i białka oraz około 54% węglowodanów. Oprócz składników energetycznych są one bogatym źródłem licznych substancji bioaktywnych. Część z nich wykazuje właściwości prozdrowotne. Uwzględniając obecne zalecenia dietetyczne, wskazujące na zwiększenie spożycia produktów zbożowych pełnoziarnistych, badanie substancji bioaktywnych zbóż jest aktualnie bardzo ważnym zagadnieniem naukowym. Liczne badania wskazują na kluczową rolę tych związków, szczególnie przeciwutleniaczy w obniżaniu ryzyka zapadania na choroby układu krążenia, nowotworowe oraz w spowalnianiu procesów starzenia się (Manach i in. 2004, Rothkaehl 2011, Zieliński i in. 2012, Klikocka i Marks 2018). W ziarniakach zbóż znajdują się liczne przeciwutleniacze: fenolokwasy oraz

ich estry i glikozydy, flawonoidy, fitoestrogeny (lignany), fitosterole, tokoferole i tokotrientole, karetonoidy, melatonina, fosforany inozytolu, glutation, mikroelementy (Fe, Se, Cu, Zn i Mn) wchodzące w skład enzymów antyoksydacyjnych (peroksydaza glutationowa, dysmutaza nadtlenkowa). Fitoestrogeny oraz fitosterole są również ważnymi związkami o aktywności hormonalnej. Związkami odżywczymi, również o właściwościach prozdrowotnych są ponadto: witaminy E i C, witaminy z grupy B oraz niezbędne kwasy tłuszczowe (NNKT) (Ciołek i Makarska 2004, Vitaglione i in. 2008).

Produkty zbożowe w 65% są źródłem błonnika pokarmowego, który zapobiega chorobom cywilizacyjnym to jest: cukrzycy, miażdżycy, otyłości, próchnicy, chorobie niedokrwiennej serca i zaparciom (Vitaglione i in. 2008). Aminokwasy, peptydy, białka zapewniają prawidłową budowę tkanek, regulują procesy metaboliczne i ułatwiają przyswajanie składników metabolicznych. Wielonasycone kwasy tłuszczowe przeciwdziałają chorobom krążenia, hamują stany zapalne i alergię, umożliwiają prawidłowy rozwój układu nerwowego. Szczególnie cenne są witaminy antyoksydacyjne: witamina A (β-karoten), C i E. Flawonoidy wpływają na hamowanie nowotworów, cukrzycy typu II i miażdżycy. Również podczas procesów technologicznych, np. podczas wypieku chleba, w wyniku reakcji Maillarda powstają korzystne produkty, takie jak: melanoidyny, pronylo-L-lizyna. Mają one silne właściwości przeciwutleniajace i przeciwnowotworowe (Slavin 2000). Człowiek dziennie spożywa około 3,5 kg tlenu, z czego 2,8% nie jest redukowana i prowadzi do powstania wolnych rodników. Obroną jest spożywanie produktów, zawierających antyoksydanty czyli przeciwutleniacze, hamują one znacząco procesy utleniania (Zielińska i Zieliński 2009). Zboża w diecie są głównym źródłem przeciwutleniaczy, takich jak: flawonoidy, kwasy fenolowe, lignany, selen (Weider i in. 2000, Biesalski i in. 2009). Największy udział w kwasach fenolowych w ziarniakach pszenicy ma kwas ferulowy, *p*kumarowy i wanilinowy (Zieliński i Kozłowska 2000, Nijveldt 2001, Zieliński i in. 2001, Zieliński 2002, Gawlik-Dziki 2004, Marciniak i Obuchowski 2006).

Chleb pszenny jest ważnym składnikiem diety i bogatym źródłem pierwiastków, w tym mikroelementów. W tabeli 4 z godnie z zaleceniami EFSA (2017) przedstawiono zawartość białka, tłuszczów, węglowodanów i makro- i mikroelementów oraz zalecane diety (RDA) w 100 g chleba pszennego dla: kobiet w wieku 30 lat (Teklić i in. 2013).

Tabela 4. Właściwości odywcze chleba pszennego (w 100 g) (Teklić i in. 2013)

Wyszczególnienie	Zawartość w 100 g chleba pszennego	Udział w zalecanej diecie (%) (RDA - 2000 kcal)*
Wartość energetyczna	266 Kcal	13
Tłuszcz	3.6 %	4
Węglowodany	48.0 %	48
Białko	11.0 %	11
Wapń, Ca	142,0 mg	14
Żelazo, Fe	3,46 mg	19
Magnez, Mg	48,0 mg	15
Fosfor, P	155,0 mg	22
Potas, K	184,0 mg	4
Sód, Na	521,0 mg	35
Cynk, Zn	1,21 mg	15
Miedź, Cu	0,159 mg	18
Mangan, Mn	1,123 mg	62
Selen, Se	28,8 mcg	52

RDA - Recommended Dietary Allowances – zalecane spożycie (EFSA 2017, Jarosz 2017).

Suplementacja (biofortyfikacja rolnicza) siarki do nawożenia NPK, jak wykazują badania skutecznie wpływa na poprawę składu chemicznego ziarna pszenicy jarej. Dlatego można zarekomendować dodatek siarki do nawożenia pszenicy jarej, jako sposób agronomicznej biofortyfikacji w mikroelementy (Fe, Mn, Zn, Cu), w rejonach z niską zawartością siarki w glebach, a także w warunkach gleb o wysokim odczynie (pH). Jak wynika z dokonanego przeglądu literatury zastosowanie siarki w formie elementarnej i siarczanowej sprzyja wyższemu plonowaniu roślin, poprawie ich składu chemicznego (wzrost zawartości makro- i mikroelementów w ziarnie pszenżyta, pszenicy i w bulwach ziemniaka) oraz zwiększaniu odporności na choroby grzybowe i bakteryjne.

3. HIPOTEZA ROBOCZA I CEL BADAŃ

Zagadnienie niedoboru siarki w glebach uprawnych Ameryki Północnej, Kanady, Australii i Nowej Zelandii oraz jezior Afryki od lat 50. ubiegłego wieku jest przedmiotem licznych prac naukowych. Podobnie od lat 60. XX wieku w Europie Zachodniej coraz więcej uwagi poświęca się temu zagadnieniu, a w niektórych krajach, jak Francja i Niemcy ukazuje się coraz więcej prac naukowych dotyczących reakcji roślin krzyżowych i zbożowych na nawożenie siarką. W Polsce nie prowadzono dotąd badań polowych nad nawożeniem siarką pszenicy jarej na właściwości jakościowe, chemiczne i prozdrowotne ziarna, a dostępne opracowania naukowe dotyczą innych roślin zbożowych i generalnie ich plonowania (pszenica, pszenżyto, jęczmień, kukurydza) (Goźliński 1970, Podleśna i in. 2003, Potarzycki 2003, Klikocka 2010), krzyżowych (rzepak, gorczyca) (Brodowska 2013), okopowych (ziemniak, burak cukrowy) (Klikocka 2004).

Niedostatek opracowań naukowych dotyczących nawożenia roślin uprawnych siarką jest skutkiem tego, że w Polsce przez długie lata utrzymywał się dodatni bilans tego składnika w agroekosystemach, wynikający z wysokiej emisji SO_2 do atmosfery. Prowadzone działania ekologiczne mające na celu ograniczenie emisji SO_2 do atmosfery spowodowały, że począwszy od drugiej połowy lat 80. XX wieku w Europie Zachodniej zaczęto zauważać ujemny bilans siarki w glebie. W warunkach Polski, przy dominującym udziale gleb lekkich i bardzo lekkich, w sytuacji podjętych w latach 90. XX wieku działań proekologicznych, od pewnego czasu również pojawiają się sygnały o niedoborach tego pierwiastka w glebie. Obecnie gleby uprawne Polski charakteryzują się na znacznym obszarze niską zawartością przyswajalnej formy siarki ($S\text{-}SO_4^{2-}$), co oznacza, że nie zaspokajają potrzeb pokarmowych roślin uprawnych.

Nawożenie siarką zwiększa plon roślin w sposób pośredni, wpływając na przemiany azotu w roślinie i syntezę białek, natomiast jej bezpośredni wpływ na plonowanie roślin nie został do końca poznany i jednoznacznie określony. Wykazano natomiast, że metabolizm siarki w roślinie jest ściśle związany z metabolizmem azotu, a stosunek N:S we wskaźnikowych częściach roślin stanowi jeden z lepszych i powszechnie akceptowanych testów roślinnych potrzeb nawożenia siarką. Optymalny stosunek N:S zależnie od gatunku rośliny powinien wynosić 15:1. Zagadnienie optymalnego stosunku N:S ma również wymiar środowiskowy, gdyż niedobór siarki prowadzi do obniżenia efektywności działania i stopnia wykorzystania azotu nawozowego przez rośliny uprawy polowej. Azot niewykorzystany przez rośliny uprawne z nawozów mineralnych, szczególnie przy dużych opadach w sezonie

wegetacyjnym i lżejszych glebach, jest wymywany do wód gruntowych, co w konsekwencji powoduje zmiany właściwości chemicznych i fizykochemicznych gleby.

W kontekście tego problemu interesujące i wskazane staje się określenie wpływu nawożenia siarką na kształtowanie wielkości i jakości plonu pszenicy jarej oraz składu chemicznego i właściwości prozdrowotnych jej ziarna w warunkach glebowo-klimatycznych regionu Zamojszczyzny o małej presji przemysłowej względem tego pierwiastka.

Wybór problemu badawczego nie jest przypadkowy. Został on oparty na przeprowadzonych wcześniej obserwacjach polowych i analizie literatury dotyczącej statusu azotu i siarki w biosferze oraz w nawożeniu roślin uprawnych. Wybór problemu badawczego pozwolił na sformułowanie hipotezy roboczej podjętych badań, która brzmi następująco:
gleby uprawne nie pokrywają w sposób naturalny zapotrzebowania pszenicy jarej na azot i siarkę.

W hipotezie zerowej (H_0) założono, że nawożenie kontrolne (PK+N+0S) oraz nawożenie NPK uzupełnione w siarkę (PK+N+S) mogą być ze sobą porównane, gdyż dają podobny efekt w odniesieniu do badanych cech. Brak podobieństwa może być natomiast wyrażony w postaci hipotezy alternatywnej (H_1) (wzór 1):

(1^0) H_0: $\Lambda_{NPK} = \Lambda_{NPKS}$ przeciwko alternatywie (2^0) H_1: $V_{NPK} \neq V_{NPKS}$ [1]

$F^0 \geq F\alpha$ $F^0 < F\alpha$

gdzie: H_0 – efekty obiektowe są zerowe, Λ – dla każdego,

H_1 – efekty obiektowe są różne, V – istnieje

F^0 – funkcja testowa F-Snedecora obliczona w analizie wariancji

$F\alpha$ – rozkład funkcji testowej F (*$\alpha = 0{,}05$, ** $\alpha = 0{,}01$)

Aby zweryfikować postawioną hipotezę, w latach 2014-2016 przeprowadzono badania polowe na glebie średniej brunatnej dystroficznej typowej (BDt), wytworzonej z gliny piaszczystej średnioziarnistej (gpśr) [PTG 2008], o odczynie lekko kwaśnym, zaliczonej do kompleksu żytniego dobrego. Założony w warunkach klimatyczno-glebowych Zamojszczyzny trzyletni eksperyment polowy miał za celu poznanie plonowania i jakości ziarna pszenicy jarej, składu chemicznego i właściwości prozdrowotnych ziarna w warunkach stosowania nawożenia azotem w dawkach 0, 50, 100 i 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ i siarki w dawce 40 kg $S \cdot ha^{-1}$. Ponadto dokonano oceny zastosowanego nawożenia na wybór optymalnej łączonej dawki N+S oddziałującej najkorzystniej na efektywność rolniczą i fizjologiczną nawożenia oraz wykorzystanie N i S z nawozów.

4. MATERIAŁ I METODY

4.1. Opis terenu badań

Doświadczenie polowe przeprowadzono w miejscowości Malice, gmina Werbkowice k. Hrubieszowa (50°42' N, 23°15' E). Subregion ten, zwany Kotliną Hrubieszowską położony jest w południowej części województwa lubelskiego w regionie Zamojszczyzny. Powierzchnia Zamojszczyzny wynosi 63,07 tys. ha (6307 km^2), co stanowi 1,6% powierzchni Polski. Użytki rolne stanowią 71%, a lasy 23% powierzchni. Jest to region typowo rolniczy, który obejmuje powiaty: hrubieszowski, zamojski, tomaszowski i biłgorajski (Kondracki 1994).

Pokrywę geologiczną regionu tworzą w znacznej części utwory lessowe i lessowate, za wyjątkiem części południowo-wschodniej (Równiny Biłgorajskiej i Płaskowyżu Tarnogrodzkiego), gdzie dominują lżejsze i słabsze z rolniczego punktu widzenia gleby wytworzone z piasków słabo gliniastych i luźnych. Najlepsze grunty orne Zamojszczyzny (klasy I, II, IIIa) występuja w gminach: Hrubieszów, Dołhobyczów, Ulhówek i Telatyn. Gleby najsłabsze (klasy V i VI) dominują w granicach Biłgoraja, Józefowa i Potoku Górnego. Średnio grunty orne Zamojszczyzny zaliczane są do klasy III, a użytki zielone do – IV klasy bonitacyjnej (Kern i in. 1990).

Na terenie gminy Werbkowice występuje zróżnicowanie wartości klas bonitacyjnych gruntów ornych. Grunty orne gminy Werbkowice należą do klas: I (4,1%), II (33,1%), IIIa (39,1%), III b (8,7%), IVa (11,4%), IVb (1,6%), V (1,8%), VI (0,2%), VIz (0%) (Kern i in. 1990).

Klimat panujący w gminie Werbkowice jest typu umiarkowanego, przejściowego, ze znacznym wpływem kontynentalizmu. Klimat jest tu kształtowany przede wszystkim przez cztery rodzaje mas powietrza. Wyraźną przewagę w długości okresu występowania mają masy powietrza polarno-morskiego i polarno-kontynentalnego – łącznie 90,5%. Na drugim miejscu pod względem długości okresu występowania znajdują się masy powietrza arktycznego – 7,3%. Udział mas powietrza tropikalnego osiąga średnio na rok wartość jedynie 2%. Masy powietrza polarno-morskiego napływają najczęściej w miesiącach letnich, zwłaszcza w lipcu (80%), rzadziej wiosną. Powodują one pogodę o zwiększonej liczbie dni pochmurnych w lecie, a zimą odwilże. Częstość występowania mas powietrza polarno-kontynentalnego największa jest w marcu (50,3%) i w listopadzie (około 40%), najrzadsza w lecie. Masy te przynoszą w lecie występowanie wysokich temperatur i niewielkie

zachmurzenie. W lecie jest to pogoda upalna, a w zimie mroźna (Pawłowski 2006). Okres wegetacyjny na Zamojszczyźnie trwa przeciętnie 216–218 dni i jest nieco krótszy we wschodniej części regionu oraz na Roztoczu Tomaszowskim (Pawłowski 2006).

Średnie roczne usłonecznienie w gminie Werbkowice wynosi 1574 godzin i kształtuje się znacznie powyżej średniej dla terytorium Polski. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi ok. 7,3ºC, w tym za miesiące zimowe (XII–II) wynosi -3ºC, za miesiące letnie (VI–VIII) 17,1–17,2ºC. Najwyższa średnia temperatura powietrza występuje w lipcu 17,6–17,8^{o}C, a najniższa w styczniu -4,2ºC (Samborski 2013).

W gminie Werbkowice czas trwania okresu bez przymrozków wynosi 242 dni, a z przymrozkami gruntowymi 43 dni. Czas trwania poszczególnych pór roku wynosi odpowiednio: przedwiośnie – 38 dni, wiosna – 55 dni, lato – 95 dni, jesień – 62 dni, przedzimie – 33 dni, zima – 82 dni. Średnie roczne sumy opadów atmosferycznych wynoszą około 550 mm na rok, a roczna liczba dni z opadem wynosi około 157 dni. Średni opad atmosferyczny w miesiącach zimowych (XII–II) wynosi 90 mm, a w miesiącach letnich (VI–VIII) 210 mm. Największe miesięczne sumy opadów notuje się w lipcu – prawie 90 mm, najmniejsze w styczniu – nieco ponad 25 mm. Średni opad atmosferyczny w czasie trwania okresu wegetacji roślin wynosi 417 mm. Pokrywa śnieżna zalega średnio około 62 dni (Pawłowski 2006).

Zachmurzenie średnie roczne w gminie Werbkowice sięga około 61%. Okres największego zachmurzenia występuje od listopada do lutego i wynosi około 79% pokrycia nieba. Najmniejsze zachmurzenie występuje w sierpniu. Liczba dni pogodnych (z pokryciem nieba chmurami 0–27%) wynosi 52, liczba dni pochmurnych (z pokryciem nieba chmurami 80–100%) wynosi 138 dni. W skali roku przeważają wiatry z kierunku: południowo–zachodniego, zachodniego i północno–zachodniego. Zimą, podobnie jak jesienią dominują wiatry z kierunków zachodniego i południowo–zachodniego. W skali całego roku średnia prędkość wiatru wynosi około 3 $m \cdot s^{-1}$. Mgły zdarzają się średnio 39 dni w roku. Burze występują średnio przez 19 dni w roku. Pierwsze dni z burzą pojawiają się po 20 kwietnia, a ostatnie przypadają na drugą połowę września. Najwięcej dni z burzą występuje w czerwcu i lipcu – średnio 5 dni, a najmniej w kwietniu i wrześniu – średnio 1 dzień (Samborski 2013).

4.2. Opis doświadczenia

Doświadczenie polowe przeprowadzono w latach 2014-2016, w miejscowości Malice, gmina Werbkowice, k. Hrubieszowa (50º42' N, 23º15' E) na glebie średniej brunatnej

dystroficznej typowej (BDt), wytworzonej z gliny piaszczystej średnioziarnistej (gpśr) [PTG 2008], (piasek 68%, pył 31%, ił 1%), zaliczonej do kompleksu żytniego dobrego, o odczynie lekko kwaśnym. Bezpośrednio przed założeniem doświadczenia właściwości gleby (tab. 5) określono metodami opisanymi przez Mocka i in. (1997), Mocka, Drzymałę (2010) oraz Ostrowską i in. (1991).

Tabela 5. Charakterystyka gleby w doświadczeniu polowym

Wyszczególnienie	Jednostka	Rok prowadzenia badań		
		2014	2015	2016
pH w M $CaCl_2$	-	5,7	5,6	5,8
C –ogólny	$g \cdot kg^{-1}$	9,2	8,9	8,5
N –ogólny		0,9	0,9	0,8
N min.	$kg \cdot ha^{-1}$	70,8	69,4	67,9
P -przyswajalny	$mg \cdot kg^{-1}$	53,5	55,5	50,3
K –przyswajalny		87,6	86,2	80,6
Mg –przyswajalny		35,8	34,7	35,3
S-ogółem		98,8	89,3	82,0
$S\text{-}SO_4$ – przyswajalna		15,4	13,6	12,3

Przedmiotem badań była pszenica jara (*Triticum aestivum* L.) odmiany Kandela (DANKO Hodowla Roślin Choryń) nawożona zróżnicowanymi dawkami azotu (czynnik I) i siarki (czynnik II) (rys. 3). Eksperyment polowy założono w III dekadzie września 2013 roku w gospodarstwie indywidualnym, metodą split-plot w czterech powtórzeniach. Pod przedplon, którym był ziemniak zastosowano obornik bydlęcy w ilości 30 $t \cdot ha^{-1}$, a po zbiorze przedplonu została wykonana orka średnia na głębokość 20 cm.

W doświadczeniu polowym uwzględniono 2 czynniki:

1. Nawożenie azotem w dawkach: 0, 50, 100, 150 $kg \cdot ha^{-1}$,
2. Nawożenie siarką: 0, 40 $kg \cdot ha^{-1}$.

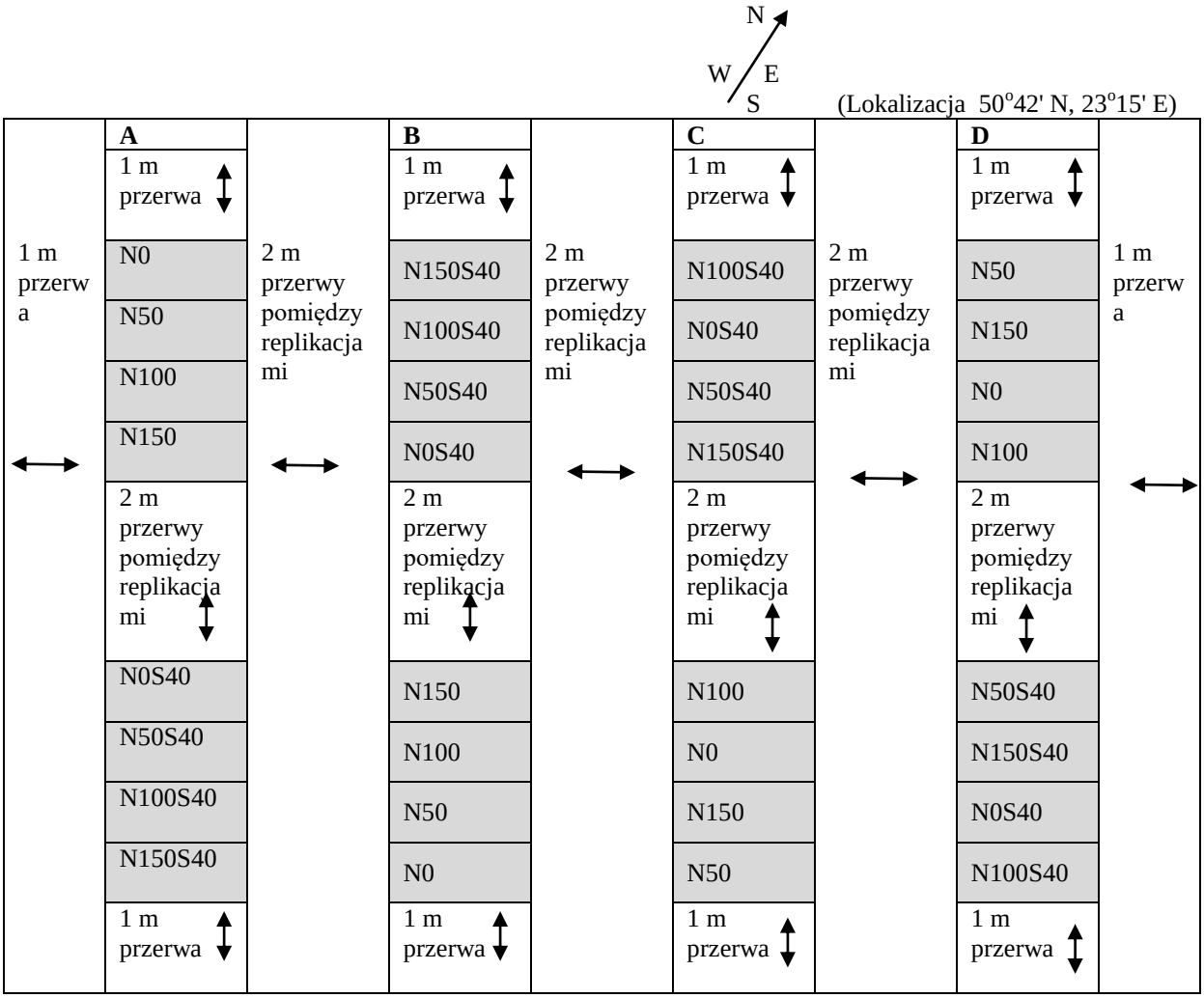
Azot stosowano w formie saletry amonowej (34%). Dawkę azotu w ilości 50 kg $N \cdot ha^{-1}$ stosowano przedsiewnie, a 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ wnoszono w dwóch terminach (przed siewem i pogłównie w fazie strzelania w źdźbło - BBCH 30-31). Natomiast dawkę w wysokości 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ wnoszono w trzech terminach (przed siewem, pogłównie w fazie strzelania w źdźbło - BBCH 30-31 oraz pogłównie w fazie między połową a pełnią kłoszenia - BBCH 55-59) (tab. 6). Siarkę w dawce 40 $kg \cdot ha^{-1}$ wnoszono w dwóch terminach, przedsiewnie w dawce 30 kg $S \cdot ha^{-1}$ w postaci kizerytu – $MgSO_4 \times H_2O$ oraz w fazie między połową a pełnią kłoszenia (BBCH 55-59) w dawce 10 kg $S \cdot ha^{-1}$ dolistnie w formie siedmiowodnego siarczanu magnezu ($MgSO_4 \times 7H_2O$) (5% roztwór SO_3 na 300 l $H_2O \cdot ha^{-1}$).

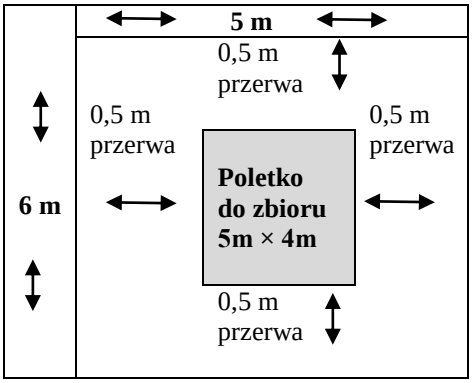
Przed siewem ziarna na wszystkich wariantach nawozowych wniesiono nawozy fosforowe (superfosfat potrójny granulowany 46%, w dawce 90 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$) i potasowe (sól potasowa 60% w dawce 100 kg $K_2O \cdot ha^{-1}$). Poletka o różnych kombinacjach nawozowych bilansowano w poprzez stosowanie wapna magnezowego i węglanu wapnia, w celu wyrównania pH gleby.

Tabela 6. Schemat wnoszenia dawek azotu i siarki

Pierwiastek	Dawka ($kg \cdot ha^{-1}$)	Termin stosowania		
		przed siewem	BBCH 30-31	BBCH 55-59
Azot	0	-	-	-
	50	50	-	-
	100	50	50	-
	150	50	50	50
Siarka	0	-	-	-
	40	30	-	10

Agrotechnologia pszenicy jarej była prowadzona zgodnie z aktualnymi zaleceniami. Całokształt zabiegów przedstawiono w tabeli 7. Pszenicę jarą Kandelę, zaliczoną pod względem wartości użytkowej do pszenic z klasy jakościowej A, charakteryzującej się bardzo dobrymi cechami wypiekowymi, wysiewano w ilości zapewniającej obsadę 500 szt. roślin na 1 m^2. Siew w zależności od roku, wykonywano pomiędzy 28 marca a 5 kwietnia.
Ziarniaki przed siewem zaprawiono zaprawą Vitavax 200 FS (*s.a. karboksyna*), w ilości 300 $ml \cdot 100 \cdot kg^{-1}$. Do niszczenia chwastów dwuliściennych i jednoliściennych zastosowano mieszaninę herbicydów Granstar 75 WG (*sulfmetmetonmetyl*) (20 $g \cdot ha^{-1}$) i Puma Super 069 EW (*fenoxaprop-P-etylu*) (1 $l \cdot ha^{-1}$) w fazie krzewienia się zboża (BBCH 28). Występowanie chorób podsuszkowych ograniczano stosując w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 30-32) Alert 375 SC (*flusilazol + karbendazym*) - 1,0 $l \cdot ha^{-1}$, natomiast przeciw chorobom liści i kłosa, w stadium BBCH 58-59, Tilt CB 37,5 (*propikonazol + karbendazym*) w ilości 1 $l \cdot ha^{-1}$. Do zwalczania szkodników zastosowano Decis 2,5 EC (deltametryna) w dawce 0,25 $l \cdot ha^{-1}$, w stadium BBCH 58-59. Aby zapobiec wyleganiu roślin stosowano regulator wzrostu Stabilan 750 SL (*chlorek chloromekwatu*) w ilości 1,8 $l \cdot ha^{-1}$ w fazie strzelania w źdźbło (BBCH 30-32).





Rys. 3. Schemat doświadczenia polowego z pszenicą jarą (2014) (52m × 28m) i pojedynczego poletka.
A, B, C i D – bloki (replikacje). N – nawożenie azotem; NS – nawożenie azotem z dodatkiem siarki w dawce 40 kg S·ha^{-1}. Poletko w założeniu – 30 m^2 (5m × 6m), a do do zbioru – 20 m^2 (4m × 5m).

Tabela 7. Zabiegi agrotechniczne w uprawie pszenicy jarej

Lp.	Zabiegi agrotechniczne	2013/2014	2014/2015	2015/2016
1.	Zbiór przedplonu (ziemniak)	12.09	11.09	10.09
2.	Orka średnia (20 cm)	26.09	25.09	27.09
3.	Kultywatorowanie (15 cm)	01.04	26.03	23.03
4.	Nawożenie NPKS	03.04	29.03	24.04
5.	Bronowanie (5 cm)	03.04	29.03	24.04
6.	Siew pszenicy	03.04	29.03	24.04
7.	Bronowanie (2 cm)	03.04	29.03	24.04
8.	Oprysk herbicydem (BBCH 28)	11.05	14.05	18.05
9.	Nawożenie 1/3 N (BBCH 30-31)	01.06	28.05	30.05
10.	Oprysk fungicydem i antywylegaczem (BBCH 30-32)	02.06	31.05	03.06
11.	Nawożenie 1/3 N, ½ S (BBCH 55-59)	22.06	14.06	17.06
12.	Oprysk fungicydem (BBCH 58-59)	23.06	16.06	20.06
13.	Oprysk insektycydem (BBCH 58-59)	23.06	16.06	20.06
14.	Zbiór ziarna	20.08	09.08	12.08

Charakterystyka odmiany: Kandela – jest odmianą jakościową (grupa A). Posiada dużą do bardzo dużej odporność na rdzę; na mączniaka i rdzę brunatną – dużą, na brunatną plamistość liści, septoriozę liści i plew - średnią, na fuzariozę kłosów oraz choroby podstawy źdźbła – dość małą. Rośliny są średniej wysokości (89 cm), o małej odporności na wyleganie (6,6 w skali 1-9^{o}). Termin kłoszenia i dojrzewania jest średni. Masa 1000 ziaren 48,0 – 49,5 g, wyrównanie dość słabe, gęstość w stanie zsypnym bardzo duża. Odporność na porastanie ziarna jest przeciętna, a liczba opadania duża do bardzo dużej. Zawartość białka i ilość glutenu są duże. Wskaźnik sedymentacji SDS jest bardzo duży. Ogólna wydajność mąki jest dość dobra. Tolerancja na zakwaszenie gleby jest przeciętna. W trzyletnim cyklu badań (2011-2013) w woj. lubelskim uzyskano plon ziarna w wysokości 106% (5,9 t·ha^{-1}) wzorca na przeciętnym poziomie agrotechniki i 103% (7,1 t·ha^{-1}) wzorca w technologii intensywnej, trzeci rok na LOZ dla Lubelszczyzny (COBORU 2014).

Siew: zalecana głębokość siewu nasion pszenicy jarej wynosi 2–3 cm, w rozstawie rzędów 8–12 cm. Zalecana obsada roślin odmiany Kandela wynosi: 400–450 kiełkujących nasion na 1 m^2, co stanowi 180–200 kg ziarna na 1·ha^{-1} (COBORU 2014). Optymalny termin siewu pszenicy jarej na zachodzie kraju przypada na okres od 15 do 25 marca, a na wschodzie od 25 marca do 05 kwietnia, przy czym dopuszczalny jest opóźniony termin siewu do 15 kwietnia. Pszenica jara Kandela jest formą przewódkową (posiada cechy zboża jarego i ozimego), a więc jesienny siew tej odmiany jest również możliwy.

4.3. Warunki meteorologiczne

Sumy opadów atmosferycznych w sezonie wegetacyjnym (III-VIII) 2014 roku wynosiły 519,7 mm i były większe o 152,2 mm od sumy wieloletniej (1971-2011: 367,5 mm). W sezonie wegetacyjnym 2015 roku sumy opadów osiągnęły 266,4 mm, co powodowało, że były one niższe o 101,1 mm niż suma wieloletnia. W sezonie wegetacyjnym 2016 roku opady były wyższe od średniej wieloletniej o 84,2 mm i wynosiły 451,7 mm. Szczególnie duże opady w 2014 roku obserwowano w maju (141,1 mm), czerwcu (91,3 mm), lipcu (146,1 mm) i sierpniu (82,8 mm). Ogólnie rok 2014 można uznać za przekropny. W roku 2015 przekropny był jedynie maj (91,1 mm), natomiast czerwiec i sierpień był suchy (odpowiednio 36,2i 11,3 mm). W roku 2016 czerwiec i lipiec były przekropne (odpowiednio 116,8 i 115,3 mm), a czerwiec i sierpień charakteryzowały się optymalnym rozkładem opadów atmosferycznych. Sumy wartości temperatury powietrza w analizowanych sezonach wegetacyjnych (III-VIII) były wyższe od sumy wieloletniej (1971-2011: 2392°C). W sezonie 2014 – o 254°C, w sezonie 2015 – o 320°C, a w sezonie 2016 – o 247°C. Generalnie, w każdym miesiącu analizowanych lat, temperatura powietrza przekraczała średnią temperaturę z wielolecia. Nie zauważono jednak aby rozkład opadów i temperatury wpływał znacząco na różnicowanie faz rozwojowych pszenicy jarej. Jednakże czynnik pogodowy zaważył istotnie na plonowaniu roślin, co zostało przedstawione w części pracy z rezultatami badań (rys. 4).

Zestawienie liczbowe opadów atmosferycznych i temperatury powietrza podano w tabelach 25A-27A. Na podstawie danych meteorologicznych obliczono współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa, według wzoru (Bac i in. 1993):

$$k = \frac{p \times 10}{\sum t} \qquad [1]$$

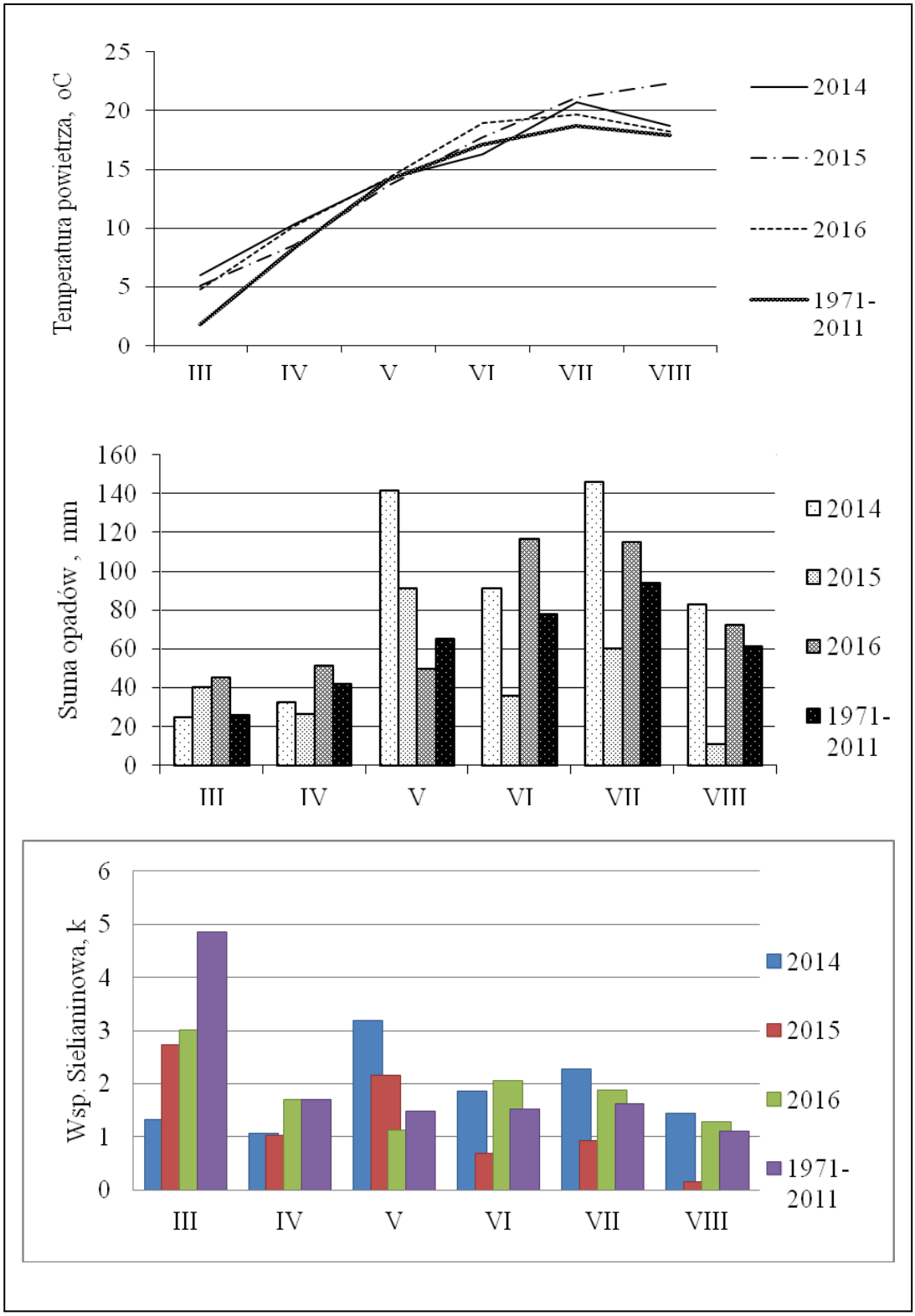
gdzie:

p – suma miesięcznych opadów atmosferycznych (mm),

$\sum$ t – suma średnich dobowych temperatur powietrza z tego miesiąca (°C).

Do określenia charakterystyki sezonu przyjęto skalę opisową i liczbową:

- skrajnie suchy (ss) ≤ 0,4
- bardzo suchy (bs) 0,4 ≤ 0,7
- suchy (s) 0,7 ≤ 1,0
- dość suchy (ds) 1,0 ≤ 1,3
- optymalny (o) 1,3 ≤ 1,6



Rys. 4. Sumy opadów (mm), temperatura powietrza (°C) i współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa (k) w latach 2014-2016 oraz średnie wieloletnie (1971-2011) (Stacja Badawcza w Zamościu)

- dość wilgotny (dw) 1,6 ≤ 2,0
- wilgotny (w) 2,0 ≤ 2,5
- bardzo wilgotny (bw) 2,5 ≤ 3,0
- skrajnie wilgotny (sw) > 3,0 (Skowera i Puła 2004).

Wartość współczynnika hydrotermicznego obliczono dla sezonu wegetacyjnego pszenicy jarej (III-VIII). Poszczególne sezony dla wegetacji roślin określono jako: 2014 – dość wilgotny (1,96), 2015 – suchy na pograniczu dość suchego (0,98) i 2016 – dość wilgotny na pograniczu optymalnego (1,71), (rys. 4, tab. 27A).

4.4. Wykaz badanych cech i opis metod analitycznych i statystycznych

W fazie dojrzałości pełnej, do zbioru (BBCH 89-92), określono plon ziarna oraz elementy składowe plonu. W tym celu pobrano losowo z każdego poletka (4 m × 5 m) po 30 kłosów celem oznaczenia komponentów plonu: liczbę ziaren w kłosie (szt·kłos^{-1}), masę 1000 ziaren (g) i masę ziarna z 1 kłosa (g). Po zbiorze oznaczono plon ziarna (przy wilgotności 11%) z każdego poletka (kg) i przeliczono go w t·ha^{-1}. Masę tysiąca ziaren oznaczono według PN-68/R-74017 na liczniku nasion LN-S-50. Wilgotność ziarna i zawartość skrobi w ziarnie oznaczono za pomocą techniki w bliskiej podczerwieni przy użyciu spektrometru firmy Perten Inframatic typ IM9200 w Laboratorium Centrali Nasiennej w Zamościu. Zawartość białka ogólnego w ziarnie obliczono jako iloczyn N w ziarnie x 5,7. Zawartość cysteiny (kwas cysteinowy) (mg·g^{-1}) i metioniny (sulfon metioniny) (mg·g^{-1}) oznaczono w Centralnym Laboratorium Badawczym Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie według metody CLA/PLC/34/2011. Zawartość tłuszczu (%), popiołu (%) i włókna surowego (%) wykonano w Centralnym Laboratorium Badawczym w Lublinie odpowiednio w kolejności metodą: (1) CLB/PSO/10/2019, wersja 6 z dnia 04.03.2019, (2) CLB/PSO/5/2019, wersja 5 z dnia 04.03.2019, (3) CLB/PSO/27/2019, wersja 3 z dnia 04.03.2019. Zawartość flawonoidów (suma w przeliczeniu na kwercetynę) i o-dihydroksyfenole (suma w przeliczeniu na kwas kawowy) (%) wykonano w Centralnym Laboratorium Badawczym w Lublinie odpowiednio w kolejności metodą: (1) Farmakopea Polska, Wydanie VI, 2002 r., str. 150 i (2) CLA/SR/20/2013, wersja 4 z dn. 30.01.2013 r.

Analizy zawartości (g·kg^{-1} s.m.): azotu ogólnego i siarki ogólnej w suchej masie ziarna wykonano na aparacie CNS-2000 LECO należącym do Katedry Ekologii Lasu Uniwersytetu

Rolniczego w Krakowie. Zawartość azotu oznaczono w zróżnicowanym detektorze przewodności cieplnej a siarki w podczerwieni.

Zawartość makroelementów ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.): fosforu, potasu, magnezu, wapnia, chloru i sodu oraz mikroelementów ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.): żelaza, fluoru, cynku, krzemu, jodu, miedzi, manganu, chromu, selenu, boru, molibdenu, niklu, wanadu, kobaltu i wolframu wykonano w Centralnym Laboratorium Badawczym Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie według metody CLB/ESA/5/2019 wersja 3 z dnia 10.12.2019 r.

Z zawartości ogólnych form pierwiastków oraz plonu obliczono akumulację (pobranie). Metodę obliczeń i terminologię podano za Grzebiszem (2009):

$$NP = P \cdot PSM \qquad [2]$$

gdzie:

NP – akumulacja pierwiastka ($kg \cdot ha^{-1}$, $g \cdot ha^{-1}$),

P – zawartość pierwiastka ($g \cdot kg^{-1}$ s.m., $mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),

PSM – plon suchej masy ($t \cdot ha^{-1}$).

Na podstawie zawartości azotu i siarki w roślinie obliczono wzajemny stosunek ilościowy tych składników (N:S). Metodę obliczeń przyjęto za Grzebiszem (2009):

$$N:S = ZN/ZS \qquad [3]$$

gdzie:

ZN – zawartość azotu ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.),

ZS – zawartość siarki ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.).

Efektywność rolniczą (agronomiczną) azotu i siarki obliczono za Fotymą (2003):

- efektywność agronomiczna azotu lub siarki ($kg \cdot kg^{-1}$):

$$E_A = (PZN - PZK)/DN \qquad [4]$$

gdzie:

PZN – plon ziarna roślin nawożonych azotem/siarką ($t \cdot ha^{-1}$) ,

PZK – plon ziarna roślin nie nawożonych azotem/siarką ($t \cdot ha^{-1}$),

DN – dawka azotu/siarki ($kg \cdot ha^{-1}$).

Plony ziarna oceniono również pod względem efektywności ekonomicznej (krańcowej) produkcji, według formuły (Harasim 2018).

$$Ee = \frac{W_n - W_0 \text{ (lub } W_{n-1})}{K_N - K_{N-1}} = \frac{\Delta W}{\Delta K_N} \quad \text{(zł wartości ziarna/1 zł kosztu N)} \qquad [5]$$

gdzie:

W_n – wartość plonu ziarna rośliny nawożonej dowolną dawką azotu ($zł \cdot ha^{-1}$);

W_0 - wartość plonu ziarna dla obiektu kontrolnego bez azotu (zł·ha^{-1});

W_{n-1} - wartość plonu ziarna dla mniejszej dawki azotu (zł·ha^{-1});

K_N – koszt dowolnej dawki azotu (zł·ha^{-1});

K_{N-1} – koszt mniejszej dawki azotu (zł·ha^{-1});

ΔW – przyrost wartości plonu ziarna spowodowany większą dawką azotu (zł·ha^{-1});

ΔK_N – przyrost kosztu wynikający z zastosowania większej dawki azotu (zł·ha^{-1}).

Efektywność ekonomiczna (krańcowa) wyraża stosunek przyrostu plonu do przyrostu kosztów nawożenia, który umożliwia ustalenie optymalnego poziomu nawożenia mineralnego – granic intensyfikowania (Krasowicz 1991, Klepacki 1997, Harasim 2012).

W obliczeniach uwzględniono ceny zakupu środków produkcji (materiałów) i zbytu ziarna z 2016 roku: ziarno pszenicy jarej: 1 tona – 650 zł·t^{-1}, saletra amonowa 34% - 1388 zł·t^{-1}, kizeryt - 1400 zł·t^{-1}, siedmiowodny siarczan magnezu - 1400 zł·t^{-1} (na podstawie cen drukowanych przez IERGiŻ, lipiec 2016).

Wyniki cech badanych zestawiono w tabelach w następującej kolejności:

1- Plon ziarna (t·ha^{-1}),
2- Liczba ziaren w kłosie (szt.),
3- Masa tysiąca ziaren (g),
4- Masa ziarna z 1 kłosa (g),
5- Liczba kłosów (szt·m^{-2}),
6- Zawartość skrobi (%),
7- Zawartość glutenu (%),
8- Zawartość białka ogólnego (%),
9- Zawartość cysteiny (kwas cysteinowy) (mg·g^{-1}),
10- Zawartość metioniny (sulfon metio niny) (mg·g^{-1}),
11- Zawartość tłuszczu (%),
12- Zawartość włókna surowego (%),
13- Zawartość flawonoidów (suma w przeliczeniu na kwercetynę) (%)
14- Zawartość o-dihydroksyfenoli (suma w przeliczeniu na kwas kawowy) (%)
15- Zawartość popiołu (%),
16- Zawartość azotu ogólnego (N- og.) w ziarnie (g·kg^{-1} s.m.),
17- Akumulacja azotu ogólnego (N-og.) w plonie ziarna (kg·ha^{-1}),
18- Zawartość siarki ogólnej (S-og.) w ziarnie (g·kg^{-1} s.m.),
19- Akumulacja siarki ogólnej (S-og.) w plonie ziarna (kg·ha^{-1}),
20- Zawartość fosforu (P) w ziarnie (g·kg^{-1} s.m.),

21- Akumulacja fosforu (P) w plonie ziarna ($kg \cdot ha^{-1}$),
22- Zawartość potasu (K) w ziarnie ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.),
23- Akumulacja potasu (K) w plonie ziarna ($kg \cdot ha^{-1}$),
24- Zawartość magnezu (Mg) w ziarnie ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.),
25- Akumulacja magnezu (Mg) w plonie ziarna ($kg \cdot ha^{-1}$),
26- Zawartość wapnia (Ca) w ziarnie ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.),
27- Akumulacja wapnia (Ca) w plonie ziarna ($kg \cdot ha^{-1}$),
28- Zawartość chloru (Cl) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
29- Akumulacja chloru (Cl) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
30- Zawartość sodu (Na) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
31- Akumulacja sodu (Na) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
32- Zawartość żelaza (Fe) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
33- Akumulacja żelaza (Fe) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
34- Zawartość manganu (Mn) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
35- Akumulacja manganu (Mn) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
36- Zawartość cynku (Zn) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
37- Akumulacja cynku (Zn) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
38- Zawartość miedzi (Cu) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
39- Akumulacja miedzi (Cu) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
40- Zawartość krzemu (Si) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
41- Akumulacja krzemu (Si) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
42- Zawartość boru (B) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
43- Akumulacja boru (Bu) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
44- Zawartość jodu (I) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
45- Akumulacja jodu (I) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
46- Zawartość cyny (Sn) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
47- Akumulacja cyny (Sn) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
48- Zawartość chromu (Cr) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
49- Akumulacja chromu (Cr) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
50- Zawartość molibdenu (Mo) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
51- Akumulacja molibdenu (Mo) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
52- Zawartość fluoru (F) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
53- Akumulacja fluoru (F) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
54- Zawartość selenu (Se) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),

55- Akumulacja selenu (Se) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
56- Zawartość niklu (Ni) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
57- Akumulacja niklu (Ni) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
58- Zawartość kobaltu (Co) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
59- Akumulacja kobaltu (Co) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
60- Zawartość wanadu (V) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
61- Akumulacja wanadu (V) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
62- Zawartość wolframu (W) w ziarnie ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.),
63- Akumulacja wolframu (W) w plonie ziarna ($g \cdot ha^{-1}$),
64- Stosunek N:S w ziarnie,
65- Efektywność rolnicza (EA) nawożenia N (kg ziarna/1 kg składnika w nawozie),
66- Efektywność rolnicza (EA) nawożenia S (kg ziarna/1 kg składnika w nawozie),
67- Wskaźnik efektywności krańcowej (EK) nawożenia N ($zł \cdot zł^{-1}$ w nawozie),
68- Wskaźnik efektywności krańcowej (EK) dla nawożenia N + S ($zł \cdot zł^{-1}$ w nawozach).

Analiza statystyczna: do testowania hipotezy zerowej H_0 wykorzystano analizę wariancji z funkcją testową F-Snedecora, obliczono również prawdopodobieństwo rozkładu F. Istotność różnic oceniano testem Tukeya ($\alpha = 0{,}05$, $\alpha = 0{,}01$), które następnie poddano analizie *post-hoc.* Obliczono ponadto współczynnik zmienności (*CV%*) będący miarą rozrzutu wyników, jako iloraz standardowego odchylenia i średniej oraz błąd standardowy. W celu określenia zależności i związków między badanymi cechami przeprowadzono analizę korelacji, determinacji i regresji liniowej. Do wykonania analizy statystycznej posłużył program Excel 7.0 i Statistica (StatSoft Polska'2013).

5. WYNIKI BADAŃ

5.1. Analiza wariancji badanych cech ziarna

Przeprowadzona analiza wariancji wykazała, że różnice w wielkości plonu ziarna pszenicy jarej, liczby ziaren w kłosie, masy tysiąca ziaren, masy ziarna z 1 kłosa i liczby kłosów na 1 m^2 były statystycznie istotne w zależności od zastosowanej dawki azotu (czynnik I) i dodatku do nawożenia siarki (czynnik II) (tab. 2A). Analiza wariancji w przypadku wszystkich wymienionych cech technologicznych pszenicy jarej (plon ziarna i jego struktura) nie wykazała statystycznie istotnego współdziałania czynników zastosowanych w doświadczeniu. Jednakże, chociaż nie potwierdzono tego statystycznie można zauważyć, że wszystkie analizowane cechy na tle wzrastających dawek azotu i siarki wykazały dodatni trend. Oznacza to, że porównując interakcję czynnika II (nawożenie siarką) na tle różnych poziomów czynnika I (nawożenie azotem) stwierdzono korzystną reakcję, wynikającą z dodatniego oddziaływania dodatku siarki do nawożenia azotem. W przypadku czynnika pogodowego zaobserwowano jego istotny wpływ w odniesieniu do wszystkich badanych cech.

Plon ziarna pszenicy jarej wykazał zmienność na nawożenie azotem (*CV%* = 9,19), nawożenie siarką (*CV%* = 1,43) oraz współdziałanie tych czynników (*CV%* = 9,31). Niewielką zmienność plonu ziarna powodował czynnik pogodowy (*CV%* = 2,06), jednak jego interakcja z nawożeniem azotem była wysoka (*CV%* = 9,31), podczas gdy z nawożeniem siarką wiele niższa (*CV%* = 2,53). Pozostałe badane cechy technologiczne pszenicy jarej, w zależności od zastosowania zróżnicowanych dawek azotu (czynnik I) i siarki (czynnik II) okazały się bardziej stabilne. Ich zmienność, w zależności od badanych czynników i ich współdziałania była niewielka (*CV%* = 0,89 - 7,18). Natomiast w przypadku czynnika pogodowego i jego interakcji z nawożeniem azotem i nawożeniem siarką zmienność była większa (*CV%* = 1,67 - 10,17), (tab. 2A).

Przeprowadzona analiza wariancji dla cech jakościowych i oceny prozdrowotności ziarna pszenicy jarej wykazała, że różnice w zawartości glutenu, białka ogólnego, cysteiny, metioniny, tłuszczu, włókna surowego, flawonoidów, o-dihydroksyfenoli i popiołu były statystycznie istotne w zależności od zastosowanej dawki azotu (czynnik I) i dodatku do nawożenia siarki (czynnik II), (tab. 4A - 6A). Analiza wariancji w przypadku wszystkich wymienionych cech jakościowych i prozdrowotnych pszenicy jarej nie wykazała statystycznie istotnego współdziałania czynników zastosowanych w doświadczeniu. Pomimo tego, chociaż nie potwierdzono tego statystycznie można zauważyć, że wszystkie

analizowane cechy na tle wzrastających dawek azotu i siarki wykazały dodatni trend. Oznacza to, że porównując interakcję czynnika II (nawożenie siarką) na tle różnych poziomów czynnika I (nawożenie azotem) stwierdzono korzystną reakcję, wynikającą z dodatniego oddziaływania dodatku siarki do nawożenia azotem. W przypadku czynnika pogodowego zaobserwowano jego istotny wpływ w odniesieniu do wszystkich badanych cech.

Badane cechy jakościowe podlegały większej zmienności pod wpływem nawożenia azotem aniżeli dodatku siarki. W przypadku cech oddziaływanie nawożenia azotem i siarką na zmienność wyników była podobna. Czynnik pogodowy wpływał w niewielkim stopniu na zmienność badanych cech (*CV%* = od 0,67 przy zawartości metioniny do 26,5 dla zawartości o-dihydroksyfenoli). Interakcja lat badań z nawożeniem azotem i siarką była jeszcze silniejsza.

Analiza wariancji nie wykazała istotnego wpływu nawożenia azotem na zawartość skrobi w ziarnie pszenicy jarej (tab. 4A). Natomiast analiza wariancji wykazała, że różnice w zawartości wszystkich badanych pierwiastków: azotu, siarki, fosforu, potasu, magnezu, wapnia, sodu, żelaza, manganu, cynku, miedzi, chloru, krzemu, boru, jodu, cyny, chromu, molibdenu, fluoru, selenu, niklu, kobaltu, wanadu i wolframu (tab. 8A, 12A, 16A, 20A) były statystycznie istotne w zależności od zastosowanej dawki azotu (czynnik I). Podobnie było w przypadku dodatku do nawożenia siarki (czynnik II), z wyjątkiem zawartości niklu (tab. 2A). Analiza wariancji w przypadku większości wymienionych pierwiastków nie wykazała statystycznie istotnego współdziałania czynników zastosowanych w doświadczeniu. Tylko współdziałanie azotu i siarki wystąpiło w odniesieniu do zawartości jodu. Oznacza to, że porównując interakcję czynnika II (nawożenie siarką) na tle różnych poziomów czynnika I (nawożenie azotem) stwierdzono korzystną reakcję, wynikającą z dodatniego oddziaływania dodatku siarki do nawożenia azotem. W przypadku czynnika pogodowego zaobserwowano jego istotny wpływ w odniesieniu do większości badanych pierwiastków.

Zawartość pierwiastków chemicznych wykazała nieco wyższą zmienność (*CV%*) na nawożenie azotem aniżeli na nawożenie siarką. Niewielką zmienność plonu ziarna powodował czynnik pogodowy, a jego interakcja z nawożeniem azotem i siarką była nieco silniejsza.

Podobny układ w przeprowadzonej analizie wariancji uzyskano dla akumulacji pierwiastków w ziarnie pszenicy jarej. Nie stwierdzono tylko istotnego wpływu nawożenia azotem na akumulację niklu i nawożenia siarką na akumulację boru i niklu (tab. 10A, 14A, 18A, 22A). Zmienność wyników dotyczących akumulacji była większa niż w zakresie zawartości pierwiastków.

5.2. Analiza wartości cech technologicznych, jakościowych i prozdrowotnych ziarna

Analiza wyników wykazała istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem (czynnik I) na wielkość plonu ziarna pszenicy jarej oraz większość badanych cech struktury plonu ziarna i cech biometrycznych rośliny. Plon ziarna wzrastał istotnie proporcjonalnie po zastosowaniu każdej dawki azotu i był największy po zastosowaniu dawki najwyższej azotu - 150 kg·ha^{-1} (6,947 t·ha^{-1}) o 1,335 t·ha^{-1} (19,2%) w stosunku do plonu wariantu kontrolnego (bez azotu) oraz po zastosowaniu dawki azotu 150 kg·ha^{-1}, lecz nie był to przyrost statystycznie istotny (tab. 8, wykres 1).

W odniesieniu do liczby ziaren w kłosie, masy tysiąca ziaren, masy ziarna z kłosa i liczby kłosów na jednostce powierzchni stwierdzono istotne oddziaływanie nawożenia azotem. Najkorzystniejsze wartości cech stwierdzono po zastosowaniu dawki najwyższej azotu – 150 kg·ha^{-1}. W przypadku MTZ i masy ziarna z kłosa przyrosty wartości cech były wprost proporcjonalne do zastosowanej dawki azotu (tab. 8, wykres 1).

Nawożenie siarką (czynnik II) wykazało korzystny wpływ plonotwórczy w stosunku do kontroli wyrażony wzrostem plonu ziarna pszenicy jarej (o 2,8%), liczby ziaren z kłosa (o 6,2%), MTZ (o 2,1%), masy ziarna z kłosa (o 8,5%) i obsady kłosów (o 1,8%) (tab. 8).

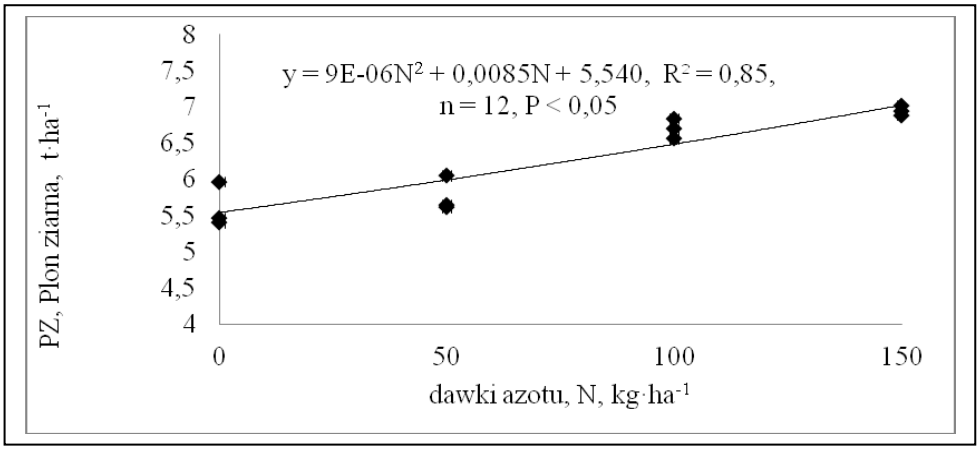
W przypadku współdziałania zróżnicowanych dawek azotu i siarki nie odnotowano oddziaływania czynnika II (nawożenie siarką) na czynnik I (nawożenie azotem). Jednakże bez względu na dodatek siarki można zauważyć, że wszystkie badane cechy kształtowały się korzystnie po zastosowaniu każdej dawki azotu - 50, 100 i 150 kg·ha^{-1}. Natomiast suplementacja siarki, w ilości 40 kg·ha^{-1} powodowała, że niezależnie od dawki azotu wartość badanych cech ulegała poprawie (chociaż nie potwierdzono tego statystycznie). Generalnie można stwierdzić, że nawożenie siarką zwiększało oddziaływanie azotu na plon i elementy jego struktury oraz cechy biometryczne roślin. Po jej wniesieniu wzrastała ranga badanych cech na tle każdego poziomu dawki N, przy czym bardzo korzystne było stosowanie dawek 100 i 150 kg N·ha^{-1} wzbogaconych w dodatek S, w ilości 40 kg·ha^{-1} (tab. 8).

Warunki meteorologiczne (opady i temperatura powietrza) w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 2014 (dość wilgotny) wpłynęły istotnie na masę tysiąca ziaren i liczbę kłosów na 1 m^2. W roku 2016 (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) najkorzystniejsze wartości otrzymano w przypadku plonu ziarna, liczby ziaren w kłosie, MTZ i masy ziarna z kłosa. W roku 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) wartość badanych cech była istotnie niższa niż w latach 2014 i 2015 roku (tab. 8, rys. 4).

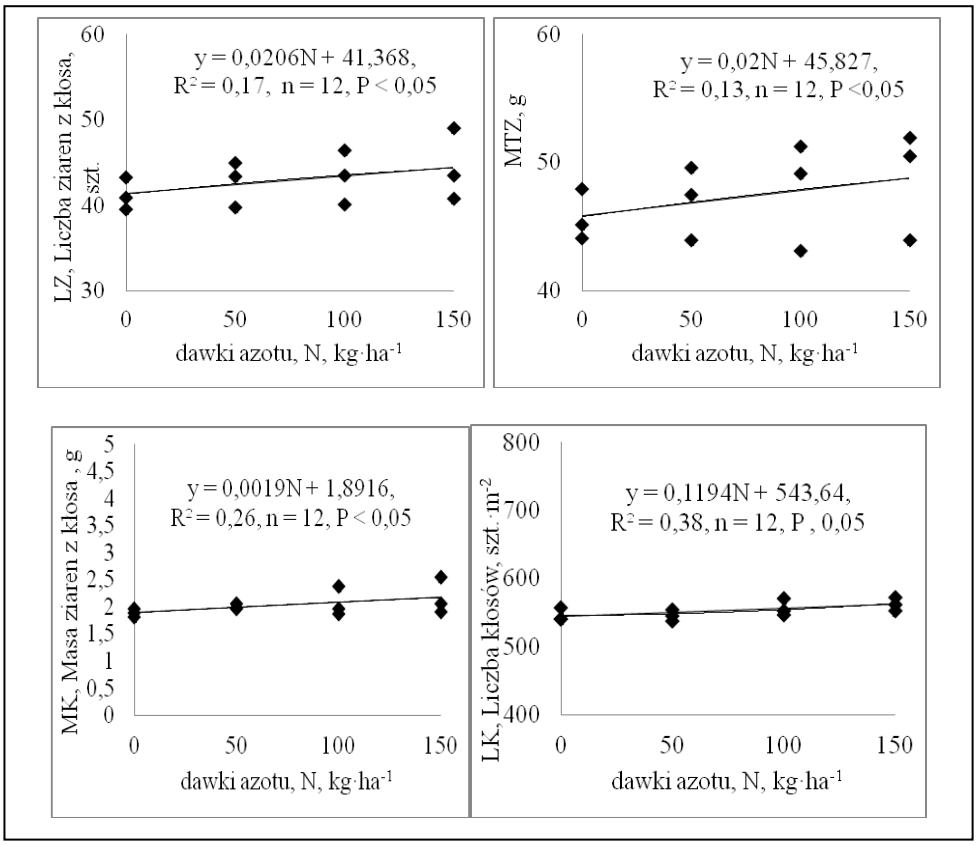
Tabela 8. Wpływ nawożenia pszenicy jarej azotem i siarką na plon ziarna i elementy jego struktury (2014-2016)

Nawożenie		Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$)	Liczba ziaren w kłosie (szt.)	Masa tysiąca ziaren (g)	Masa ziarna z kłosa (g)	Liczba kłosów ($szt \cdot m^{-2}$)
S	N					
Numer cechy		1	2	3	4	5
0 S	0	5,570 a	40,26 a	45,30 a	1,82 a	541,9 a
	50	5,670 a	41,66 a	46,46 a	1,93 a	541,3 a
	100	6,596 a	42,08 a	47,40 a	1,99 a	549,2 a
	150	6,837 a	42,17 a	48,10 a	2,03 a	558,4 a
40 S	0	5,655 a	42,16 a	46,18 a	1,94 a	550,0 a
	50	5,875 a	43,69 a	47,49 a	2,07 a	550,1 a
	100	6,802 a	44,58 a	48,19 a	2,16 a	563,7 a
	150	7,057 a	46,67 a	49,48 a	2,31 a	566,3 a
Średnio	0 S	6,168 B	41,54 B	46,81 B	1,94 B	547,7 B
	40 S	6,347 A	44,28 A	47,83 A	2,12 A	557,5 A
Średnio	0	5,612D	41,21 C	45,74 D	1,88 D	546,0 B
	50	5,773 C	42,68 B	46,97 C	2,00 C	545,7 B
	100	6,699 B	43,33 B	47,80 B	2,07 B	556,4 AB
	150	6,947 A	44,42 A	48,79 A	2,17 A	562,3 A
Średnio	2014	6,207 B	40,03 C	49,28 A	1,97 B	563,3 A
	2015	6,131 B	43,22 B	43,76 B	1,89 C	547,0 B
	2016	6,435 A	45,48 A	48,93 A	2,23 A	547,5 B
	Średnio	6,258	42,91	47,32	2,03	552,6

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)



Wykres. 1. Wpływ wielkości dawki azotu na plon ziarna pszenicy jarej, ($t \cdot ha^{-1}$) (n = 12)



Wykres 2. Wpływ wielkości dawki azotu na liczbę ziaren w kłosie, MTZ, masę ziarna z 1 kłosa i liczbę kłosów pszenicy jarej (n = 12)

Tabela 9. Współczynniki korelacji pomiędzy badanymi cechami technologicznymi ziarna pszenicy jarej

Badana cecha (n = 24)	Nr cechy		Współczynnik korelacji (r)		
		2	3	4	5
Plon ziarna (t·ha^{-1})	1	**0,418**	**0,406**	**0,524**	**0,572**
Liczba ziaren w kłosie (szt.)	2		0,200	**0,825**	-0,163
Masa tysiąca ziaren (g)	3			**0,712**	**0,480**
Masa ziarna z 1 kłosa (g)	4				0,155
Liczba kłosów (szt·m^{-2})	5				-

Objaśnienia: istotne przy α = 0,05: r = **0,406**, istotne przy α = 0,01: r = **0,517**

Z plonem ziarna pszenicy jarej korelowały istotnie dodatnio: liczba ziaren w kłosie, MTZ, masa ziarna z kłosa i liczba kłosów. Dlatego też należy te cechy uznać za istotnych predyktorów plonu ziarna pszenicy jarej, szczególnie liczbę kłosów (r = 0,572) i MTZ (r = 0,542), (tab. 9).

Analiza wyników badań wykazała istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem (czynnik I) na wszystkie badane cechy jakości ziarna pszenicy jarej, z wyjątkiem zawartości skrobi. Zawartość glutenu, białka ogólnego i metioniny w ziarnie przyrastała istotnie wprost proporcjonalnie w miarę zwiększania dawki azotu i była najwyższa po zastosowaniu dawki 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ (odpowiednio 36,10%, 16,84% i 3,50 $mg \cdot g^{-1}$).

W odniesieniu do zawartości cysteiny już najmniejsza dawka azotu - 50 kg $N \cdot ha^{-1}$ spowodowała istotny wzrost zawartości aminokwasu w stosunku do stwierdzonej na dawce kontrolnej, bez azotu (o 7,1%). Dalsze zwiększanie dawki azotu nie wpływało istotnie na wzrost zawartości cysteiny. Zawartość tłuszczu w ziarnie pszenicy jarej była najwyższa po zastosowaniu nawożenia azotem, w dawce 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ (1,23%). Zastosowanie dawek 50 i 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ działało podobnie na zawartość tłuszczu i było istotnie wyższe niż w przypadku ziarna zebranego z obiektów kontrolnych, gdzie nie stosowano nawożenia azotem (o 24,0%), (tab. 10, wykres 3).

W przypadku nawożenia siarką (czynnik II) analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ siarki na wzrost zawartości: glutenu (4,2%), cysteiny (5,5%), metioniny (13,7%) i tłuszczu (17,0%) w stosunku ich wartości na obiektach bez nawożenia S (tab. 10).

Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarki była nieistotna, lecz można zauważyć, że nawożenie siarką stymulowało oddziaływanie azotu. Po wniesieniu siarki wzrastała ranga badanych cech na tle ich wartości na każdym poziomie N, przy czym bardzo korzystne okazało się stosowanie dawek 100 i 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ wzbogaconych o dodatek siarki, w ilości 40 $kg \cdot ha^{-1}$. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od dawki azotu wartość badanych cech ulegała poprawie (chociaż nie potwierdzono tego statystycznie).

Warunki pogodowe, opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na zróżnicowanie zawartości glutenu, cysteiny i metioniny w ziarnie pszenicy jarej. Pozostałe cechy jakościowe ziarna podlegały modyfikacjom pod wpływem pogody. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny - współczynnik hydrotermiczny 1,96) sprzyjał akumulacji białka ogólnego i tłuszczu. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego – 0,98) wpłynął korzystnie na większość badanych cech jakościowych ziarna. Natomiast sezon wegetacyjny 2016 (dość wilgotny na pograniczu optymalnego – 1,71) ograniczał zawartość białka ogólnego i tłuszczu w ziarnie pszenicy jarej (tab. 10, rys. 4).

Tabela 10. Wpływ nawożenia azotem i siarką na cechy jakościowe ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

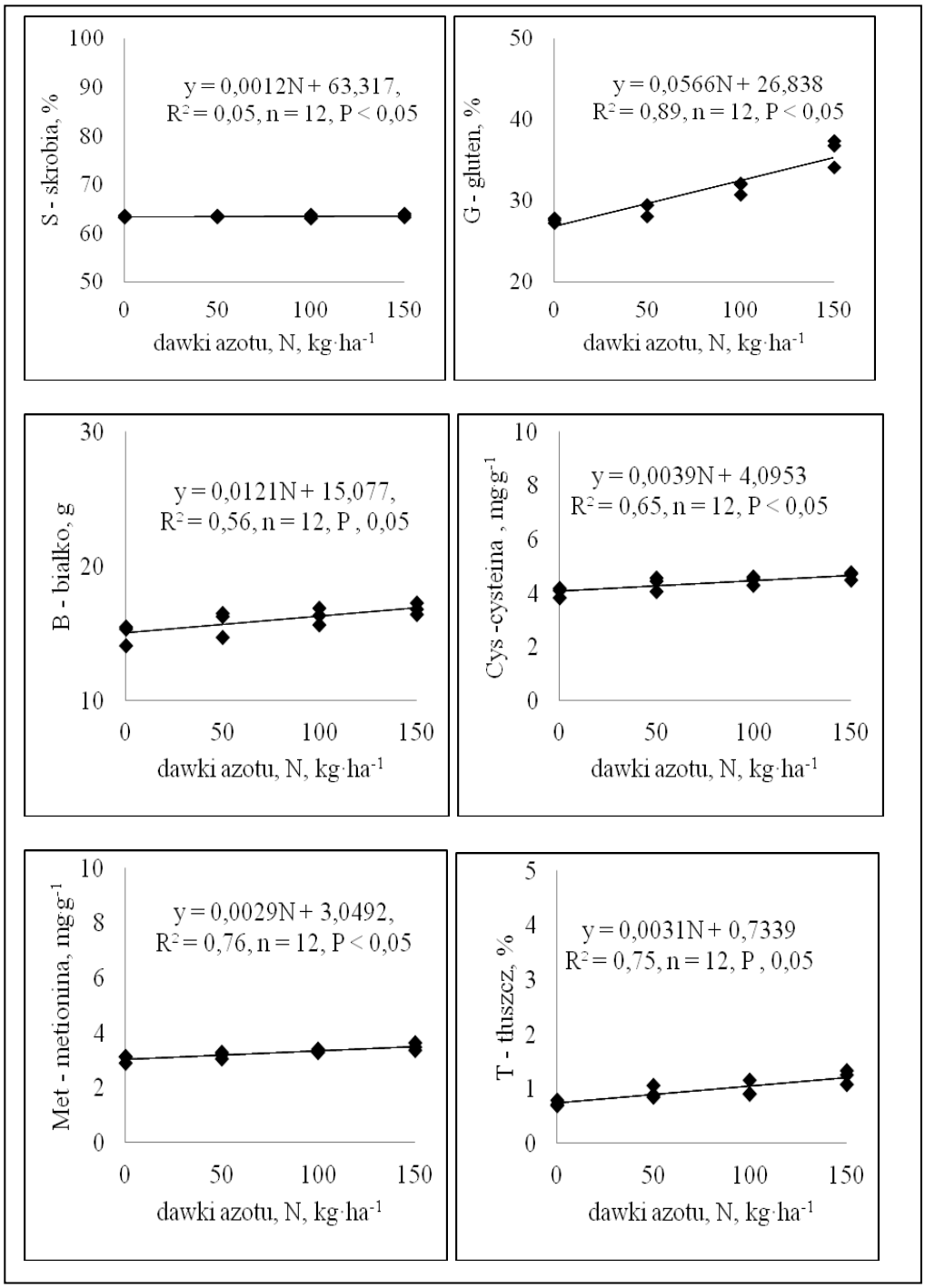
Nawożenie		Zawartość					
S	N						
Numer cechy		skrobia (%)	gluten (%)	białko og. (%)	cysteina ($mg \cdot g^{-1}$)	metionina ($mg \cdot g^{-1}$)	tłuszcz (%)
		6	7	8	9	10	11
0 S	0	63,17 a	26,66 a	14,85 a	3,77 a	2,83 a	0,68 a
	50	63,20 a	28,18 a	15,61 a	4,28 a	2,91 a	0,87 a
	100	63,20 a	30,82 a	16,26 a	4,45 a	3,13 a	0,93 a
	150	63,40 a	36,01 a	16,66 a	4,55 a	3,26 a	1,05 a
40 S	0	63,53 a	28,43 a	15,10 a	4,33 a	3,29 a	0,77 a
	50	63,60 a	29,87 a	16,06 a	4,44 a	3,45 a	0,99 a
	100	63,37 a	32,46 a	16,33 a	4,52 a	3,57 a	1,06 a
	150	63,77 a	36,20 a	17,01 a	4,76 a	3,73 a	1,41 a
Średnio	0 S	63,24 B	30,42 B	15,84 B	4,26 B	3,03 B	0,88 B
	40 S	63,57 A	31,74 A	16,13 A	4,51 A	3,51 A	1,06 A
Średnio	0	63,35 A	27,55 D	14,97 D	4,05 B	3,06 CD	0,73 C
	50	63,40 A	29,02 C	15,83 C	4,36 AB	3,18 C	0,93 B
	100	63,28 A	31,64 B	16,29 B	4,49 A	3,35 B	0,99 B
	150	63,58 A	36,10 A	16,84 A	4,65 A	3,50 A	1,23 A
Średnio	2014	63,14 BC	30,37 A	16,51 A	4,49 A	3,30 A	1,04 A
	2015	63,35 B	31,50 A	16,23 B	4,49 A	3,25 A	0,98 A
	2016	63,73 A	31,36 A	15,22 C	4,18 A	3,26 A	0,88 B
	Średnio	63,40	31,08	15,98	4,39	3,27	0,97

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)

Tabela 11. Współczynniki korelacji pomiędzy badanymi cechami jakościowymi ziarna pszenicy jarej

Badana cecha (n = 24)	Nr cechy	Współczynnik korelacji (r)					
		6	7	8	9	10	11
Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$)	1	0,211	**0,859**	**0,534**	**0,503**	**0,564**	**0,677**
Zawartość skrobi (%)	6		0,238	-0,061	0,051	**0,511**	0,061
Zawartość glutenu (%)	7			**0,620**	**0,637**	**0,538**	**0,716**
Zawartość białka og. (%)	8				**0,816**	**0,460**	**0,794**
Zawartość cysteiny ($mg \cdot g^{-1}$)	9					**0,623**	**0,715**
Zawartość metioniny ($mg \cdot g^{-1}$)	10						**0,587**
Zawartość tłuszczu (%)	11						-

Objaśnienia: istotne przy $\alpha = 0,05$: r = **0,406**, istotne przy $\alpha = 0,01$: r **= 0,517**



Wykres 3. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość: skrobi (%), glutenu (%), białka ogólnego (%), cysteiny ($mg \cdot g^{-1}$), metioniny ($mg \cdot g^{-1}$) i tłuszczu (%), (n = 12)

Pomiędzy plonem ziarna pszenicy a wszystkimi cechami jego jakości (z wyjątkiem zawartości skrobi) uzyskano istotnie dodatnie korelacje. Najwyższy współczynnik korelacji uzyskano pomiędzy plonem ziarna a zawartością glutenu (r = 0,859), (tab. 11).

Analiza wyników badań wykazała istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem (czynnik I) na badane cechy jakości prozdrowotnych ziarna pszenicy jarej. Zawartość włókna surowego (błonnika), flawonoidów (suma w przeliczeniu na kwercetynę), o-dihydroksyfenoli

(suma w przeliczeniu na kwas kawowy) i popiołu w ziarnie przyrastała istotnie w miarę zwiększania dawki azotu i była najwyższa po zastosowaniu dawki N w ilości 150 kg·ha^{-1} (odpowiednio 4,19%, 0,027%, 0,091%, 2,11%). Jednak, w odniesieniu do zawartości włókna surowego i o-dihydroksyfenoli zastosowanie dawki najmniejszej azotu 50 kg·ha^{-1} nie powodowało istotnego przyrostu składników, dopiero dawka 100 kg·ha^{-1} i jej zwiększenie do 150 kg·ha^{-1} dawało istotne wzrosty zawartości włókna surowego i o-dihydroksyfenoli w ziarnie (tab. 12, wykres 4).

W przypadku nawożenia siarką (czynnik II) stwierdzono korzystny wpływ siarki na wzrost zawartości: włókna surowego (błonnika) (7,6%), flawonoidów (14,3%), o-dihydroksyfenoli (9,4%) i popiołu (6,4%) w stosunku do stwierdzonych na obiektach bez nawożenia S (tab. 12).

Współdziałanie nawożenia azotem i siarką było nieistotne, lecz można zauważyć, że nawożenie siarką stymulowało działanie azotu; po wniesieniu S wzrastały wartości badanych cech na tle każdego poziomu dawki N, przy czym bardzo korzystne stało się stosowanie dawek 100 i 150 kg N·ha^{-1} wzbogaconych o dodatek S, w ilości 40 kg·ha^{-1}. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od dawki azotu wartość badanych cech ulegała poprawie, chociaż nie potwierdzono tego statystycznie.

Opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 wpływały istotnie na zróżnicowanie zawartości włókna surowego, flawonoidów, o-dihydroksyfenoli i popiołu w ziarnie pszenicy jarej. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej niekorzystny z badanych lat dla rozkładu wyników analizowanych cech. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) sprzyjał wzrostowi zawartości włókna surowego i popiołu w ziarnie. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) powodował wzrost flawonoidów i o-dihydroksyfenoli (tab. 12, rys. 4).

Plon ziarna pszenicy był dodatnio skorelowany z wszystkimi cechami jakości prozdrowotnych ziarna. Najwyższy współczynnik korelacji stwierdzono pomiędzy plonem ziarna a zawartością popiołu (r = 0,738). Badane cechy korelowały istotnie dodatnio pomiędzy sobą. Jedynie pomiędzy zawartością włókna surowego a zawartością o-dihydroksyfenoli związek ten nie był statystycznie istotny (tab. 13).

Tabela 12. Wpływ nawożenia azotem i siarką na cechy jakościowo-prozdrowotne ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

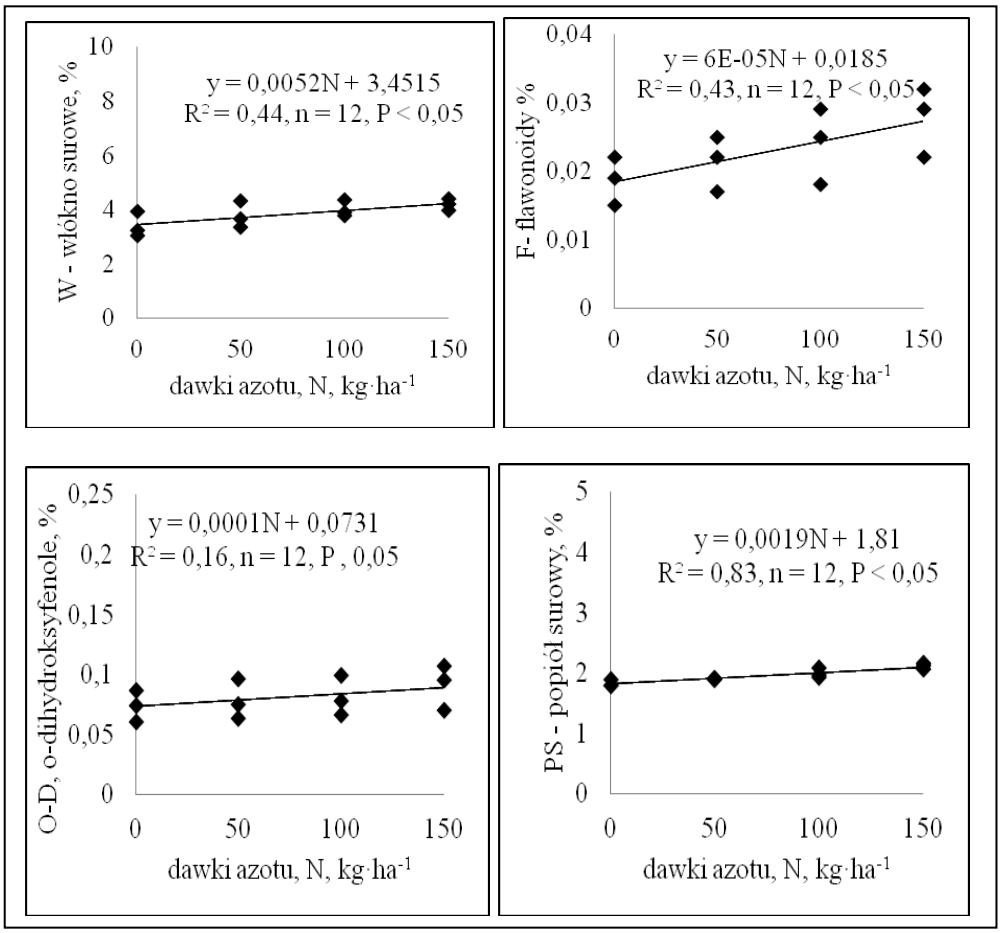
Nawożenie		Zawartość włókna surowego (%)	Zawartość flawonoidów (%)	Zawartość o-dihydro-ksyfenoli (%)	Zawartość popiołu (%)
S	N				
Numer cechy		12	13	14	15
0 S	0	3,31 a	0,016 a	0,069 a	1,76 a
	50	3,64 a	0,018 a	0,074 a	1,82 a
	100	3,71 a	0,020 a	0,076 a	1,93 a
	150	4,00 a	0,022 a	0,087 a	2,04 a
40 S	0	3,49 a	0,021 a	0,079 a	1,88 a
	50	3,90 a	0,024 a	0,083 a	1,97 a
	100	4,06 a	0,028 a	0,086 a	2,05 a
	150	4,38 a	0,033 a	0,094 a	2,18 a
Średnio	0 S	3,66 B	0,019 B	0,077 B	1,89 B
	40 S	3,96 A	0,026 A	0,085 A	2,02 A
Średnio	0	3,40 C	0,018 D	0,074 C	1,82 D
	50	3,77 BC	0,021 C	0,078 C	1,89 C
	100	3,89 B	0,024 B	0,081 B	1,99 B
	150	4,19 A	0,027 A	0,091A	2,11 A
Średnio	2014	3,61 B	0,018 C	0,065 C	1,92 B
	2015	4,25 A	0,024 B	0,081 B	2,00 A
	2016	3,58 B	0,027 A	0,098 A	1,94 B
	Średnio	3,81	0,023	0,081	1,95

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)

Tabela 13. Współczynniki korelacji pomiędzy badanymi cechami technologicznymi ziarna pszenicy jarej

Badana cecha (n = 24)	Nr cechy		Współczynnik korelacji (r)		
		12	13	14	15
Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$)	1	**0,455**	**0,576**	**0,487**	**0,738**
Zawartość włókna surowego (%)	12		**0,523**	0,249	**0,785**
Zawartość flawonoidów (%)	13			**0,776**	**0,681**
Zawartość o-dihydroksyfenoli (%)	14				**0,476**
Zawartość popiołu (%)	15				-

Objaśnienia: istotne przy $\alpha = 0,05$: r = **0,406**, istotne przy $\alpha = 0,01$: r = **0,517**



Wykres 4. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość: włókna surowego (%), flawonoidów (%), o-dihydroksyfenoli (%) i popiołu (%) (n = 12).

5.3. Analiza składu chemicznego ziarna

Analiza wyników badań wykazała istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem (czynnik I) na zawartość azotu (N), siarki (S), fosforu (P), potasu (K), magnezu (Mg) i wapnia (Ca) w ziarnie pszenicy jarej. Zawartość azotu, magnezu i wapnia zwiększała się wraz ze zastosowaną dawką azotu; wzrost był statystycznie istotny w miarę zwiększania dawki. Zawartość siarki w ziarnie nie wzrosła istotnie po zastosowaniu azotu w ilości 50 kg·ha^{-1}, dopiero dawki azotu 100 i 150 kg·ha^{-1} powodowały istotny wzrost zawartości tego pierwiastka w stwierdzonej na kontroli, odpowiednio o 7,0% i 10,2%. W przypadku zawartości fosforu i potasu w ziarnie istotnych różnic nie stwierdzono w działaniu pomiędzy dawkami azotu 50 i 100 kg·ha^{-1}, zaś podwyższenie dawki azotu do 150 kg·ha^{-1} powodowało istotny wzrost tych pierwiastków w stosunku do zawartości występujących na obiekcie kontrolnym a dawką 50 kg N·ha^{-1} odpowiednio o 2,5% i 8,0% (tab. 14, wykres 5).

W przypadku nawożenia siarką (czynnik II) analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ tego składnika na wzrost zawartości w ziarnie: azotu (N) (4,5%), siarki (S) (5,1%), fosforu (P) (7,6%), potasu (7,5%), magnezu (Mg) (6,5%) i wapnia (Ca) (11,0%) w stosunku do stwierdzonej na obiektach bez nawożenia S (tab. 14).

Współdziałanie zróżnicowanych dawek nawożenia azotem i siarką było nieistotne, lecz można zauważyć, że zastosowanie siarki stymulowało działanie azotu. Po wniesieniu siarki wzrastała zawartość badanych pierwiastków (N, S, P, K, Mg i Ca) w ziarnie na każdym poziomie nawożenia N. Bardzo korzystne okazało się stosowanie dawek 100 i 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ z dodatkiem siarki, w ilości 40 $kg \cdot ha^{-1}$. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od dawki azotu wartość badanych cech ulegała poprawie. Tej zależności nie potwierdzono statystycznie.

Warunki pogodowe, opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na zróżnicowanie zawartości fosforu i magnezu w ziarnie pszenicy jarej. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla wzrostu w ziarnie zawartości azotu i potasu. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) sprzyjał wzrostowi zawartości wapnia. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) powodował wzrost w ziarnie siarki, potasu i wapnia (tab. 14, rys. 4).

Wyniki badań wskazują na istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na akumulację (pobranie) azotu (N), siarki (S), fosforu (P), potasu (K), magnezu (Mg) i wapnia (Ca) przez ziarno pszenicy jarej. Akumulacja azotu, siarki, fosforu, magnezu i wapnia wzrastała w suchej masie ziarna wraz ze zwiększaniem dawki azotu; wzrost ten był statystycznie istotny w miarę zwiększania dawki N. Jedynie akumulacja potasu w ziarnie nie wzrosła istotnie po zastosowaniu azotu w ilości 50 $kg \cdot ha^{-1}$, natomiast dawka azotu 100 i 150 $kg \cdot ha^{-1}$ powodowały istotny wzrost pobrania pierwiastka w stosunku do jego akumulacji na kontroli, odpowiednio o 21,0% i 27,42% (tab. 15, wykres 6).

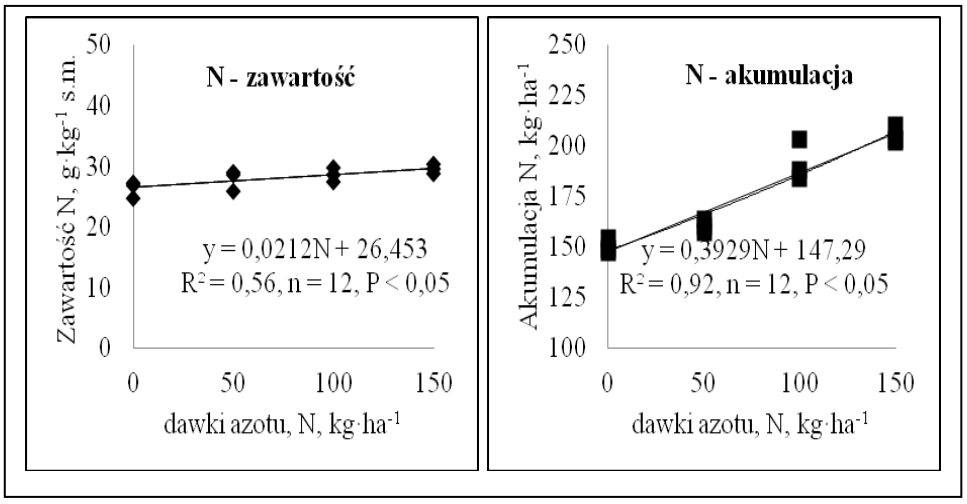
W przypadku nawożenia siarką analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ tego składnika na wzrost akumulacji w suchej masie ziarna: azotu (N) (4,5%), siarki (S) (5,1%), fosforu (P) (7,6%), potasu (7,5%), magnezu (Mg) (6,5%) i wapnia (Ca) (11,0%) w porównaniu do stwierdzonej na obiektach bez nawożenia S (tab. 15).

Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarki była nieistotne, lecz nawożenie siarką korzystnie wpływało na działanie azotu, bowiem po wniesieniu siarki wzrastała akumulacja badanych pierwiastków (N, S, P, K, Mg i Ca) w ziarnie na tle każdego poziomu

Tabela 14. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość maroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N	N	S	P	K	Mg	Ca
Numer cechy		16	17	18	19	20	21
0 S	0	26,05 a	1,30 a	4,11 a	4,22 a	1,38 a	0,35 a
	50	27,38 a	1,32 a	4,23 a	4,35 a	1,54 a	0,42 a
	100	28,53 a	1,41 a	4,30 a	4,42 a	1,62 a	0,45 a
	150	29,23 a	1,44 a	4,34 a	4,51 a	1,67 a	0,48 a
40 S	0	26,49 a	1,34 a	4,40 a	4,32 a	1,48 a	0,42 a
	50	28,18 a	1,36 a	4,45 a	4,42 a	1,53 a	0,45 a
	100	28,64 a	1,42 a	4,48 a	4,62 a	1,63 a	0,47 a
	150	29,85 a	1,49 a	4,55 a	4,97 a	1,82 a	0,53 a
Średnio	0 S	27,80 B	1,37 B	4,25 B	4,38 B	1,55 B	0,43 B
	40 S	28,29 A	1,40 A	4,47 A	4,58 A	1,61 A	0,47 A
Średnio	0	26,27 D	1,32 C	4,25 C	4,27 BC	1,43 D	0,38 D
	50	27,78 C	1,34 C	4,34 B	4,39 B	1,54 C	0,43 C
	100	28,59 B	1,42 B	4,39 AB	4,52 AB	1,63 B	0,46 B
	150	29,54 A	1,47 A	4,45 A	4,74 A	1,75 A	0,51 A
Średnio	2014	28,96 A	1,33 C	4,33 A	4,75 A	1,58 A	0,41 B
	2015	28,47 B	1,36 B	4,38 A	4,16 B	1,58 A	0,46 A
	2016	26,71 C	1,47 A	4,36 A	4,54 A	1,59 A	0,47 A
	Średnio	28,04	1,39	4,36	4,48	1,58	0,45

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)

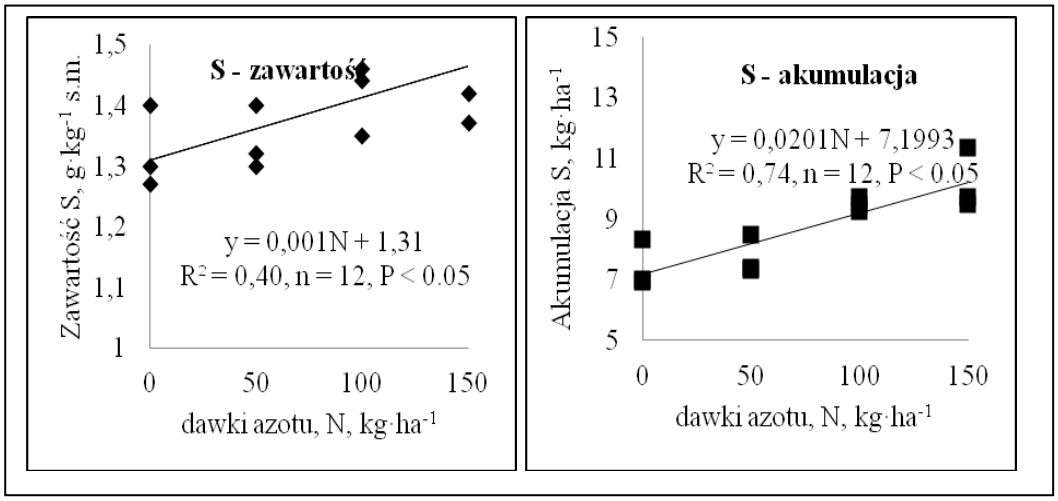


Wykres 5. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($kg \cdot ha^{-1}$) azotu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)

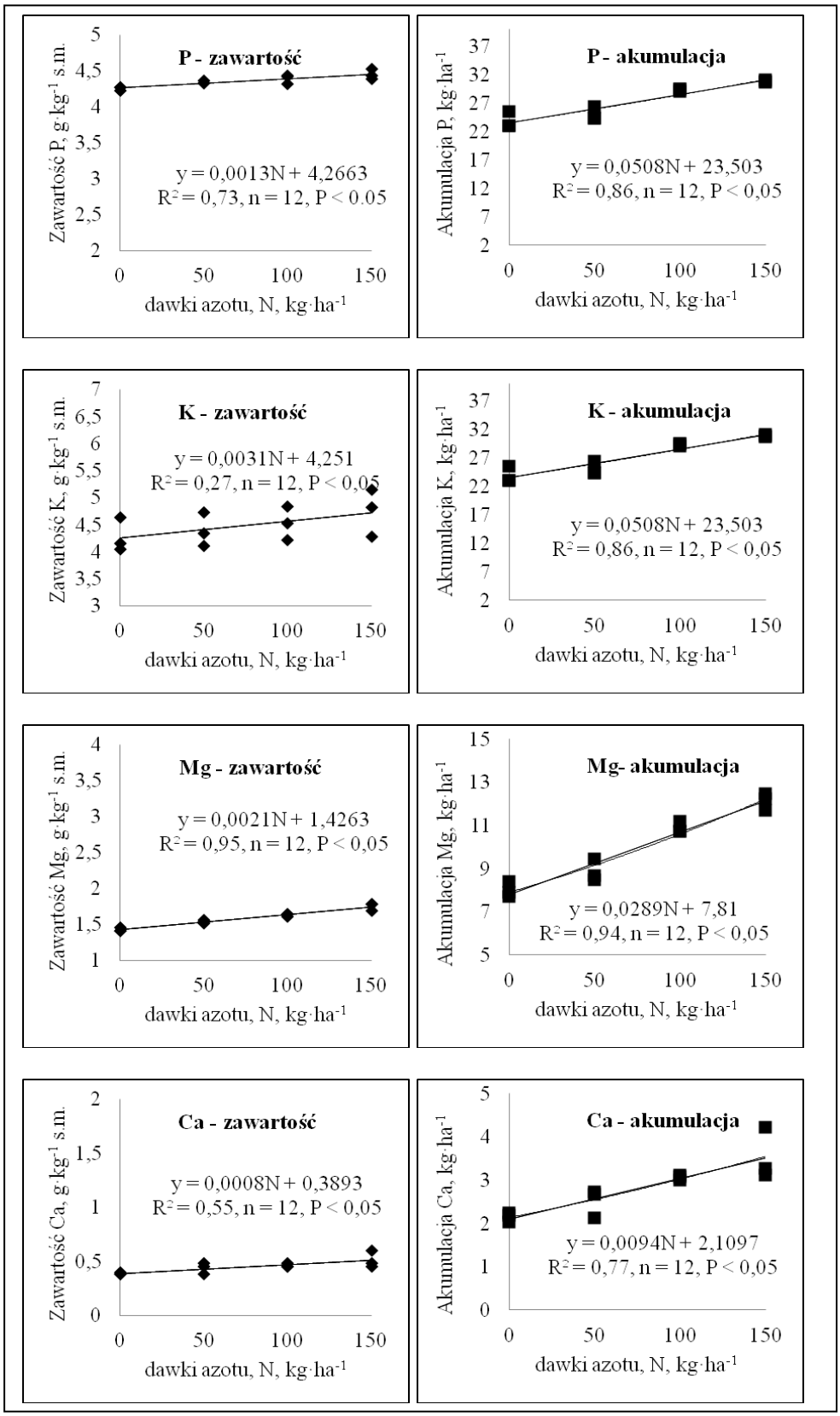
Tabela 15. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację makroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Akumulacja ($kg \cdot ha^{-1}$)					
S	N	N	S	P	K	Ca	Mg
Numer cechy		22	23	24	25	26	27
0 S	0	144,9 a	7,26 a	22,89 a	23,47 a	7,66 a	1,95 a
	50	155,0 a	7,49 a	23,99 a	24,67 a	8,75 a	2,36 a
	100	188,2 a	9,29 a	28,33 a	29,19 a	10,71 a	2,97 a
	150	199,8 a	9,87 a	29,69 a	30,86 a	11,42 a	3,31 a
40 S	0	149,5 a	7,59 a	24,86 a	24,42 a	8,35 a	2,35 a
	50	165,3 a	7,99 a	26,15 a	25,98 a	8,97 a	2,65 a
	100	194,9 a	9,66 a	30,49 a	31,47 a	11,06 a	3,17 a
	150	210,6 a	10,52 a	32,11a	35,10 a	12,87 a	3,77 a
Średnio	0 S	172,0 B	8,48 B	26,23 B	27,05 B	9,64 B	2,65 B
	40 S	180,1 A	8,94 A	28,40 A	29,24 A	10,31 A	2,98 A
Średnio	0	147,2 D	7,43 D	23,88 D	23,95 C	8,01 D	2,15 D
	50	160,1 C	7,74 C	25,07 C	25,32 C	8,86 C	2,51 C
	100	191,5 B	9,47 B	29,41 B	30,33 B	10,89 B	3,07 B
	150	205,2 A	10,20 A	30,90 A	32,98 A	12,14 A	3,54 A
Średnio	2014	180,5 A	8,27 B	26,94 B	29,54 A	9,86 A	2,59 C
	2015	174,9 B	8,38 B	26,93 B	25,53 B	9,79 A	2,81 B
	2016	172,6 B	9,48 A	28,08 A	29,36 A	10,27 A	3,05 A
	Średnio	176,0	8,71	27,31	28,14	9,97	2,82

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)



Wykres 6. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($kg \cdot ha^{-1}$) siarki w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)



Wykres 7. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($kg \cdot ha^{-1}$) fosforu, potasu, magnezu i wapnia w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)

dawki N, przy czym bardzo korzystne stało się stosowanie dawek 100 i 150 kg N·ha^{-1} wzbogaconych w dodatek siarki, w ilości 40 kg·ha^{-1}. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od wielkości dawki azotu wartość badanych cech ulegała poprawie (chociaż nie potwierdzono tego statystycznie).

Warunki pogodowe, opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na akumulację magnezu w suchej masie ziarna pszenicy jarej. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla akumulacji (pobrania) azotu i potasu w suchej masie ziarna. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) na tle pozostałych lat nie sprzyjał akumulacji pierwiastków w ziarnie, z wyjątkiem magnezu. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) powodował wzrost akumulacji w ziarnie siarki, fosforu, potasu, magnezu i wapnia. Zatem przebieg pogody w sezonie wegetacyjnym 2016 był najkorzystniejszy do pobierania pierwiastków przez suchą masę ziarna pszenicy jarej, za wyjątkiem azotu (tab. 15, rys. 4).

Analiza wyników badań wykazała istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na zawartość chloru (Cl), sodu (Na), żelaza (Fe), manganu (Mn), cynku (Zn) i miedzi (Cu) w ziarnie. Zawartość żelaza zwiększała się istotnie wraz ze wzrostem dawki azotu i była najwyższa po wniesieniu azotu w dawce 150 kg·ha^{-1}. Zawartości chloru, manganu i cynku wzrastała istotnie w miarę zwiększania dawki azotu do 100 kg·ha^{-1}. Nie stwierdzono istotnej różnicy w zawartości sodu i miedzi w ziarnie zebranym z poletek kontrolnych i nawożonych azotem w ilości 50 kg·ha^{-1}. Dopiero zastosowanie dawek azotu 100 i 150 kg·ha^{-1} wpływało istotnie na wzrost zawartości sodu i miedzi w ziarnie (tab. 16, wykres 8-11).

W przypadku nawożenia siarką stwierdzono korzystny wpływ siarki na wzrost zawartości w ziarnie: chloru (Cl) (8,0%), sodu (Na) (20,9%), żelaza (Fe) (5,8%), cynku (Zn) (3,75%) i miedzi (Cu) (4,1%) w stosunku ich wartości na obiektach bez nawożenia S. Dodatek do nawożenia NPK siarki w ilości 40 kg·ha^{-1} spowodował zmniejszenie w ziarnie zawartości manganu (Mn) o 5,3% (tab. 16).

Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarki było nieistotna, lecz można zauważyć, że nawożenie siarką wzmacniało działanie azotu. Po wniesieniu siarki wzrastała zawartość badanych pierwiastków (Cl, Na, Fe, Mn, Zn i Cu) w ziarnie poziomie dawki N, przy czym bardzo korzystne stało się stosowanie dawek 100 i 150 kg N·ha^{-1} wzbogaconych w dodatek siarki, w ilości 40 kg·ha^{-1}. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od dawki azotu wartość badanych cech, z wyjątkiem zawartości manganu ulegała poprawie, ale nie potwierdzono tego statystycznie.

Warunki pogodowe, opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na zróżnicowanie zawartości chloru w ziarnie pszenicy jarej. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla wzrostu w ziarnie zawartości żelaza i miedzi. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) generalnie ograniczał zawartość w ziarnie badanych pierwiastków, za wyjątkiem chloru. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) był najkorzystniejszy spośród badanych sezonów wegetacyjnych i powodował wzrost w ziarnie wszystkich pierwiastków, z wyjątkiem żelaza (tab. 16, rys. 4).

Analiza wyników badań wykazała istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na akumulację (pobranie) chloru (Cl), sodu (Na), żelaza (Fe), manganu (Mn), cynku (Zn) i miedzi (Cu) przez suchą masę ziarna pszenicy jarej. Akumulacja wszystkich wymienionych pierwiastków w suchej masie ziarna zwiększała się wraz ze wzrostem dawki azotu, przy czym wzrost ten był statystycznie istotny w miarę zwiększania dawki tego składnika. Najwyższą zawartość pierwiastków osiągnięto zatem po zastosowaniu dawki azotu w ilości 150 $kg \cdot ha^{-1}$ (tab. 17, rys. 9-10). W przypadku nawożenia siarką analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ siarki na wzrost akumulacji w suchej masie ziarna: chloru (Cl) (11,1%), sodu (Na) (23,2%), żelaza (Fe) (8,9%), cynku (Zn) (6,3%) i miedzi (Cu) (6,9%) w stosunku do ich wartości na obiekcie bez nawożenia S. Dodatek do nawożenia NPK siarki w ilości 40 $kg \cdot ha^{-1}$ spowodował zmniejszenie w ziarnie akumulacji (pobrania) manganu (Mn) o 2,6% (tab. 17).

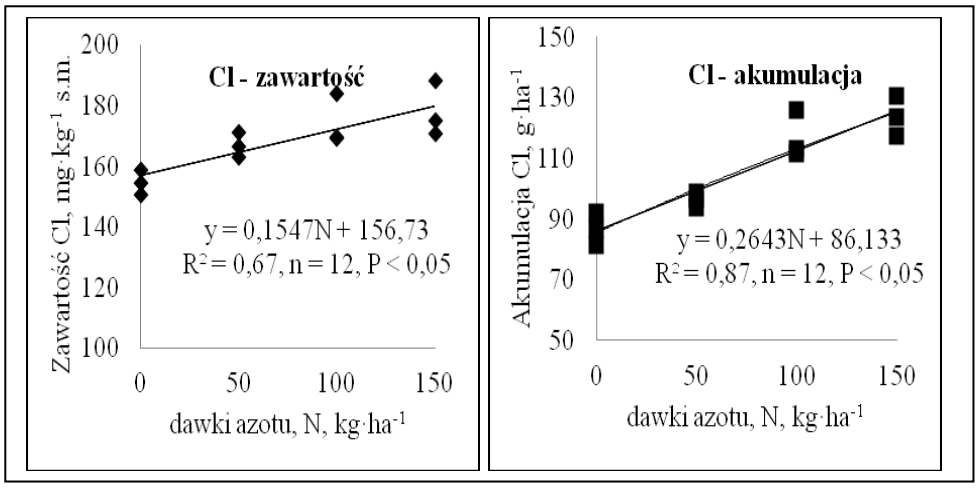
Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarkki wykazało dodatni trend na akumulację w suchej masie ziarna Na, Fe, Mn, Zn i Cu. Akumulacja chloru podlegała współdziałaniu pod wpływem nawożenia azotem i siarką. Generalnie dawki azotu 100 i 150 $kg \cdot ha^{-1}$ podwyższały pobranie chloru, a dawka azotu 50 $kg \cdot ha^{-1}$ i wariant kontrolny ograniczyły akumulację chloru w ziarnie. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od wielkości dawki azotu wartość badanych cech, z wyjątkiem akumulacji manganu, ulegały poprawie, ale nie potwierdzono tego statystycznie.

Warunki pogodowe w okresie wegetacji pszenicy w latach 2014-2016 nie wpływały na akumulację chloru w ziarnie. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla akumulacji żelaza i miedzi w ziarnie. Natomiast pogoda w 2016 roku sprzyjała akumulacji w ziarnie sodu, manganu, cynku i miedzi (tab. 17, rys. 4).

Tabela 16. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N	Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
Numer cechy		28	29	30	31	32	33
0 S	0	155,7 a	4,49 a	40,07 a	36,10 a	32,13 a	3,45 a
	50	159,0 a	7,75 a	42,27 a	37,37 a	33,20 a	3,63 a
	100	163,3 a	10,78 a	43,43 a	39,33 a	34,73 a	3,76 a
	150	167,0 a	12,36 a	45,30 a	40,00 a	35,23 a	3,98 a
40 S	0	153,3 a	7,50 a	42,53 a	34,43 a	34,00 a	3,64 a
	50	174,7 a	9,07 a	44,20a	36,33 a	34,53 a	3,72 a
	100	185,0 a	10,98 a	46,47 a	36,77 a	35,40 a	3,95 a
	150	188,7 a	17,20 a	48,43 a	37,20 a	36,63 a	4,15 a
Średnio	0 S	161,3B	8,85 B	42,77 B	38,20 A	33,83 B	3,71 B
	40 S	175,4 A	11,19 A	45,41 A	36,18 B	35,14 A	3,87 A
Średnio	0	154,5 D	6,00 CD	41,30 D	35,27 C	33,07 BC	3,54 CD
	50	166,8 C	8,41 C	43,23 C	36,85 B	33,87 B	3,68 C
	100	174,2 AB	10,88 B	44,95 B	38,05 A	35,07 A	3,86 B
	150	177,8 A	14,78 A	46,87 A	38,60 A	35,93 A	4,07 A
Średnio	2014	173,4 A	8,33 C	46,65 A	35,55 C	33,93 B	3,92 A
	2015	166,3 A	10,11 B	42,25 BC	36,94 B	31,21C	3,60 AB
	2016	165,4 A	11,61 A	43,36 B	39,09 A	38,31 A	3,84 A
	Średnio	168,3	10,02	44,09	37,19	34,48	3,79

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)

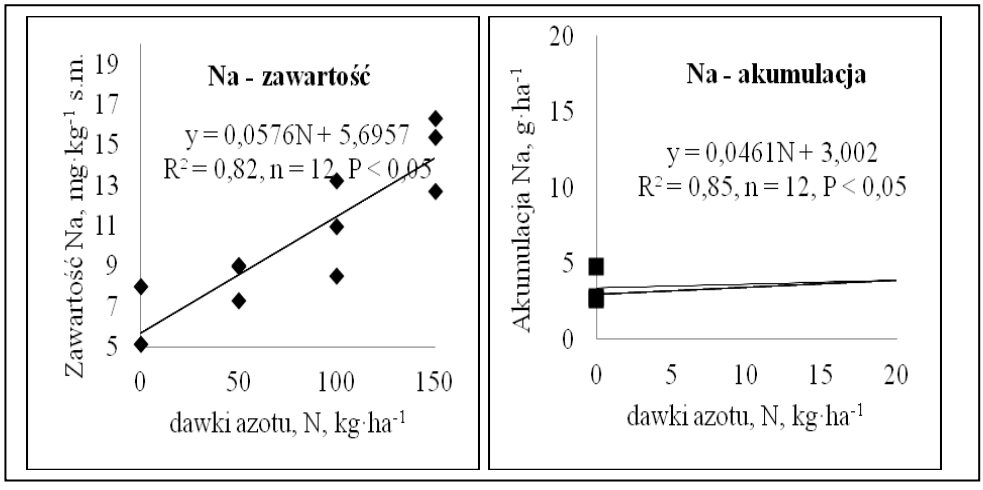


Wykres 8. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) chloru w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)

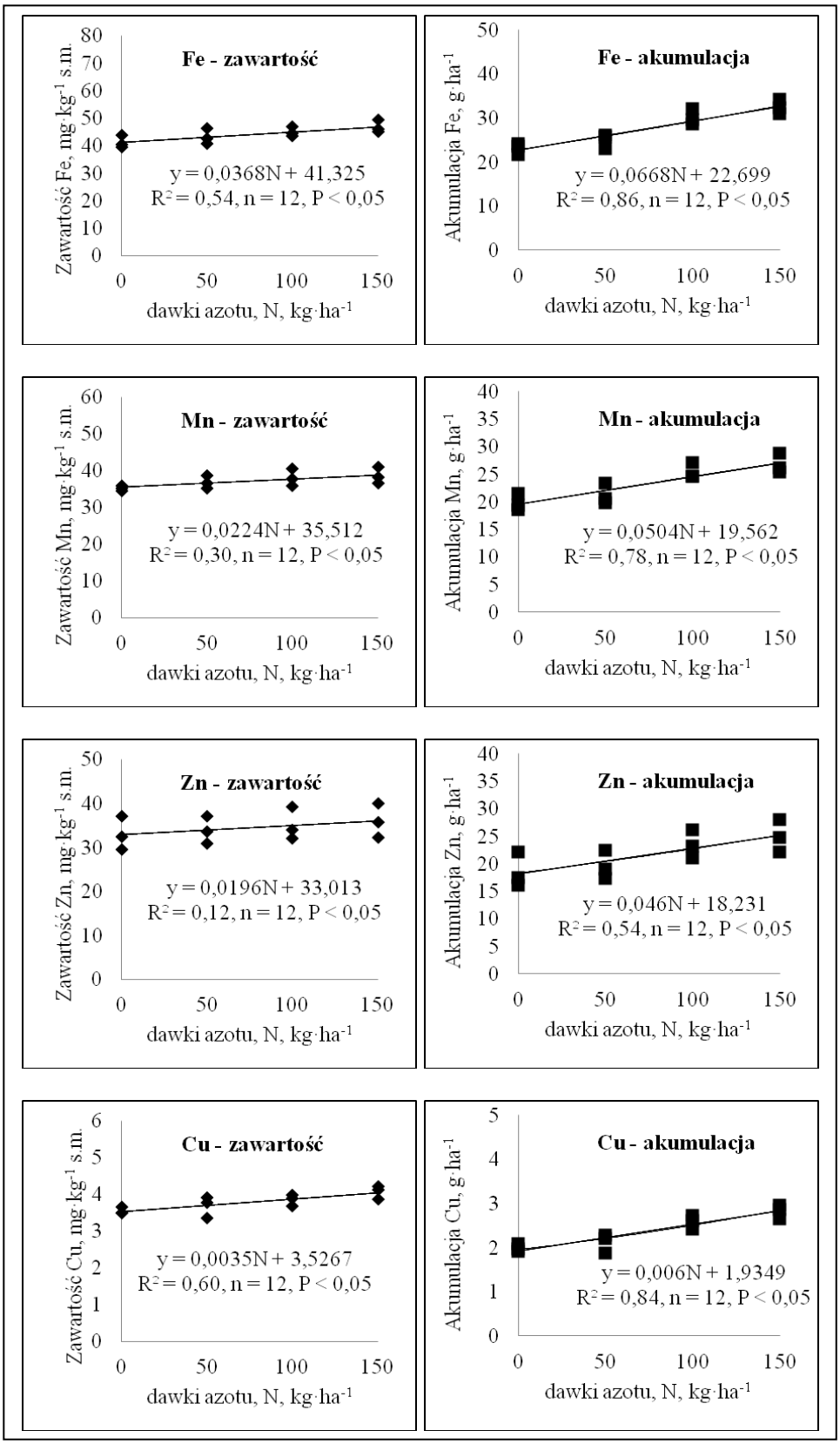
Tabela 17. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
S	N	Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
Numer cechy		34	35	36	37	38	39
0 S	0	86,6 de	2,53 a	21,85 a	20,13 a	17,96 a	1,92 a
	50	90,2 d	4,39 a	23,96 a	21,21 a	18,89 a	2,06 a
	100	107,9 bc	7,10 a	28,67 a	25,92 a	22,92 a	2,48 a
	150	114,2 b	8,46 a	30,97 a	27,36 a	24,10 a	2,72 a
40 S	0	86,8 de	4,28 a	24,03 a	19,47 a	19,29 a	2,05 a
	50	102,5 c	5,34 a	25,96 a	21,38 a	20,32 a	2,19 a
	100	125,8 a	7,46 a	31,61 a	25,01 a	24,08 a	2,69 a
	150	133,1 a	12,13 a	34,19 a	26,26 a	25,88 a	2,93 a
Średnio	0 S	99,7 B	5,62 B	26,36 B	23,65 A	20,97 B	2,30 B
	40 S	112,1 A	7,31 A	28,95 A	23,03 B	22,39 A	2,47 A
Średnio	0	86,7 D	3,41 D	22,94 D	19,80 D	18,63 D	1,99 D
	50	96,4 C	4,87 C	24,96 C	21,29 C	19,60 C	2,13 C
	100	116,9 B	7,28 B	30,14 B	25,46 B	23,50 B	2,59 B
	150	123,6 A	10,30 A	32,58 A	26,81 A	24,99 A	2,83 A
Średnio	2014	108,5 A	5,35 B	28,91 A	22,11 B	21,12 B	2,44 A
	2015	102,4 A	6,41 C	26,04 C	22,70 B	19,20 C	2,22 B
	2016	106,8 A	7,63 A	28,01 B	25,21 A	24,71 A	2,49 A
	Średnio	105,9	6,46	27,66	23,34	21,68	2,38

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)



Wykres 9. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) sodu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)



Wykres 10. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość (mg·kg^{-1} s.m.) i akumulację (g·ha^{-1}) żelaza, manganu, cynku i miedzi w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)

Wyniki badań wskazują na istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na zawartość krzemu (Si), boru (B), jodu (I), cyny (Sn), chromu (Cr) i molibdenu (Mo) w ziarnie. Jednakże, spośród wymienionych pierwiastków, jedynie zawartość jodu zwiększała się istotnie wraz ze wzrostem dawki azotu i była najwyższa po wniesieniu azotu w ilości 150 kg·ha^{-1}. Zawartości krzemu, cyny i chromu wzrastały istotnie w miarę zwiększania dawki azotu do 100 kg·ha^{-1}, natomiast zastosowanie dawki najwyższej azotu 150 kg·ha^{-1} nie dawało statystycznie istotnych wzrostów pierwiastków. W przypadku zawartości w ziarnie boru nie stwierdzono istotnych różnic po zastosowaniu dawek azotu 50 i 100 kg·ha^{-1}. W odniesieniu do zawartości molibdenu istotnych różnic nie stwierdzono w działaniu wariantu kontrolnego i najmniejszej dawki azotu 50 kg·ha^{-1} (tab. 18, wykres 11).

W przypadku nawożenia siarką wyniki badań wskazują na korzystny wpływ siarki na wzrost zawartości w ziarnie: krzemu (Si) (11.2%), jodu (I) (61,2%), cyny (Sn) (10,0%) i chromu (Cr) (20,8%) w stosunku do ich wartości na obiektach bez nawożenia S. Dodatek do nawożenia NPK siarki w ilości 40 kg·ha^{-1} spowodował zmniejszenie w ziarnie zawartości boru (B) i molibdenu (Mo), odpowiednio o 19,3% i 26,3% (tab. 18).

Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarki było nieistotne w przypadku zawartości krzemu, boru, cyny, chromu i molibdenu, można zauważyć, że dodatek siarki na tle wzrastających dawek azotu podwyższało zawartość tych pierwiastków. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od dawki azotu, wartość badanych cech ulegała poprawie (chociaż nie potwierdzono tego statystycznie). W zakresie zawartości jodu w ziarnie stwierdzono współdziałaniu czynników doświadczenia. Więcej jodu zawierało ziarno zebrane z obiektów gdzie do nawożenia NPK dodawano siarkę (tab. 18).

Warunki pogodowe, opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na zróżnicowanie zawartości krzemu w ziarnie pszenicy jarej. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla wzrostu w ziarnie jodu i chromu. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) był korzystny do wzrostu zawartości w ziarnie cyny, chromu i molibdenu. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) sprzyjał wzrostowi zawartości w ziarnie boru i chromu (tab. 18, rys. 4).

Analiza wyników badań wykazała istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na akumulację (pobranie) przez suchą masę ziarna krzemu (Si), boru (B), jodu (I), cyny (Sn), chromu (Cr) i molibdenu (Mo). Jednakże spośród wymienionych pierwiastków, jedynie zawartości krzemu, jodu i cyny były istotnie akumulowane przez suchą masę ziarna wraz ze wzrostem dawki azotu; były najwyższe po wniesieniu azotu w dawce 150 kg·ha^{-1}.

Akumulacja boru, chromu i molibdenu wzrastała istotnie w miarę zwiększania dawki azotu do 100 kg·ha^{-1}, natomiast zastosowanie dawki najwyższej azotu 150 kg·ha^{-1} nie dawało statystycznie istotnego wzrostu zawartości pierwiastków. Także w przypadku akumulacji pierwiastków nie stwierdzono istonych różnic pomiędzy wariantem kontrolnym a dawką azotu 50 kg·ha^{-1} (tab. 19, wykres 11-13).

W przypadku nawożenia siarką analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ siarki na wzrost akumulacji (pobrania) przez sucha masę ziarna pszenicy jarej: krzemu (Si) (13,5%), jodu (I) (32,1%), cyny (Sn) (12,8%) i chromu (Cr) (23,0%) w stosunku ich wartości na obiektach bez nawożenia S. Dodatek do nawożenia NPK siarki w ilości 40 kg·ha^{-1} spowodował zmniejszenie akumulacji przez ziarno boru (B) i molibdenu (Mo), odpowiednio o 16,7% i 24,3% (tab. 19).

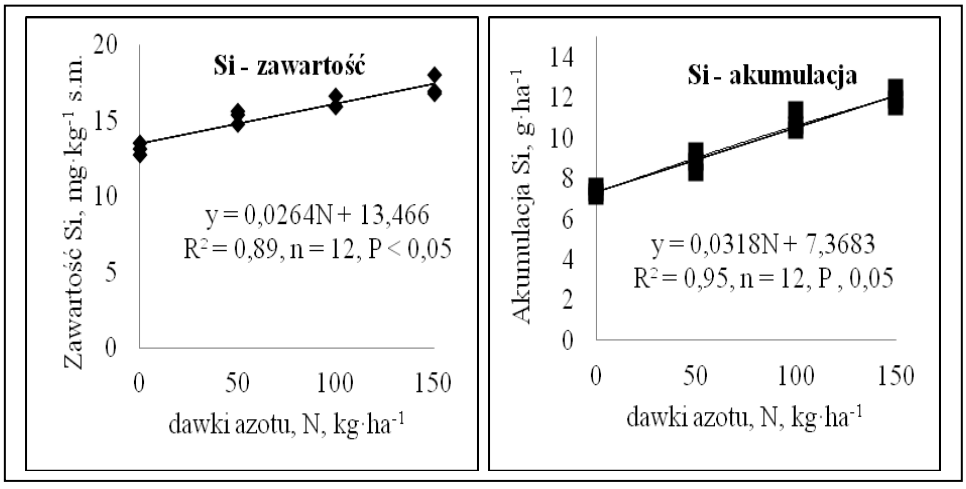
Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarki było nieistotne w przypadku akumulacji przez suchą masę ziarna krzemu, boru, chromu i molibdenu, można zauważyć, że dodatek siarki na tle wzrastających dawek azotu podwyższał akumulację pierwiastków. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od dawki azotu wartość badanych cech ulegała poprawie (chociaż nie potwierdzono tego statystycznie). Akumulacja jodu i cyny przez suchą masę ziarna podlegała współdziałaniu czynników doświadczenia. Więcej jodu i cyny pobrało ziarno zebrane z obiektów, gdzie wraz ze wzrostem dawki azotu dodawano siarkę. Natomiast w przypadku akumulacji cyny stwierdzono, że na wzrost jej pobrania przez ziarno wpływały dawki azotu 100 i 150 kg·ha^{-1} w odniesieniu do dawki 50 kg·ha^{-1} i wariantu kontrolnego oraz dodatek siarki do nawożenia NPK (tab. 19).

Warunki pogodowe, opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na zróżnicowanie akumulacji (pobrania) krzemu i chromu w suchej masie ziarna pszenicy jarej. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla akumulacji w ziarnie jodu. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) był korzystny do wzrostu pobrania przez ziarno cyny i molibdenu. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) sprzyjał wzrostowi akumulacji wszystkich badanych pierwiastków, z wyjątkiem molibdenu (tab. 19, rys. 4).

Tabela 18. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N	Si	B	I	Sn	Cr	Mo
Numer cechy		40	41	42	43	44	45
0 S	0	11,97 a	1,753 a	0,189 h	0,582 a	0,327 a	0,197 a
	50	14,83 a	1,900 a	0,399 g	0,616 a	0,378 a	0,205 a
	100	15,63 a	2,093 a	0,507 f	0,630 a	0,409 a	0,281 a
	150	15,77 a	2,227 a	0,791 d	0,648 a	0,474 a	0,291 a
40 S	0	14,30 a	1,190 a	0,546 e	0,615 a	0,422 a	0,125 a
	50	15,70 a	1,750 a	1,053 c	0,682 a	0,461 a	0,165 a
	100	16,67 a	1,613 a	1,461 b	0,717 a	0,551 a	0,225 a
	150	18,72 a	1,883a	1,807 a	0,739 a	0,568 a	0,201 a
Średnio	0 S	14,55 B	1,993 A	0,472 B	0,619 B	0,397 B	0,243 A
	40 S	16,35 A	1,609 B	1,217 A	0,688 A	0,501 A	0,179 B
Średnio	0	13,13 C	1,472 C	0,368 D	0,599 C	0,375 BC	0,161 B
	50	15,27 B	1,825 B	0,726 C	0,649 B	0,420 B	0,185 B
	100	16,15 AB	1,853 B	0,984 B	0,673 AB	0,480 AB	0,253 A
	150	17,24 A	2,055 A	1,299 A	0,694 A	0,521 A	0,246 A
Średnio	2014	15,96 A	1,443 C	0,982 A	0,636 B	0,438 A	0,174 B
	2015	15,13 A	1,825 B	0,696 C	0,678 A	0,429 A	0,326 A
	2016	15,25 A	2,136 A	0,855 B	0,646 AB	0,480 A	0,134 C
	Średnio	15,45	1,801	0,844	0,654	0,449	0,211

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)

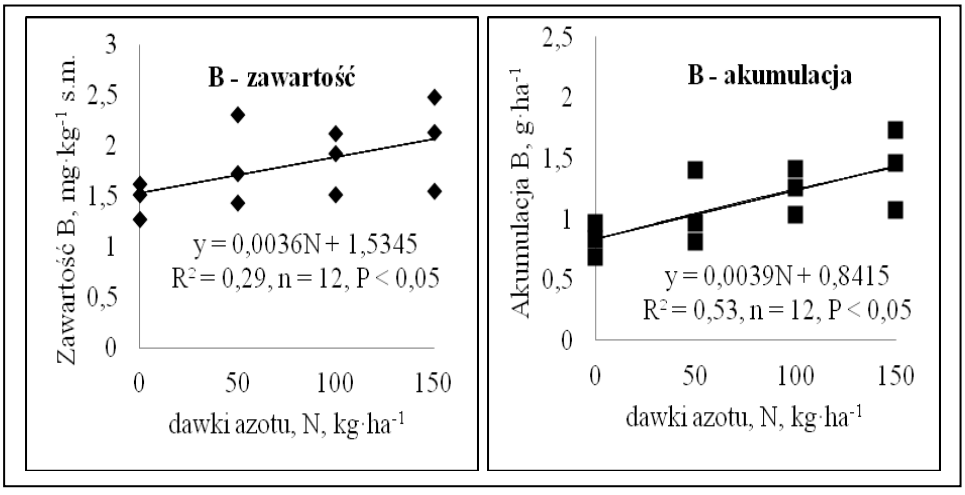


Wykres 11. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) krzemu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)

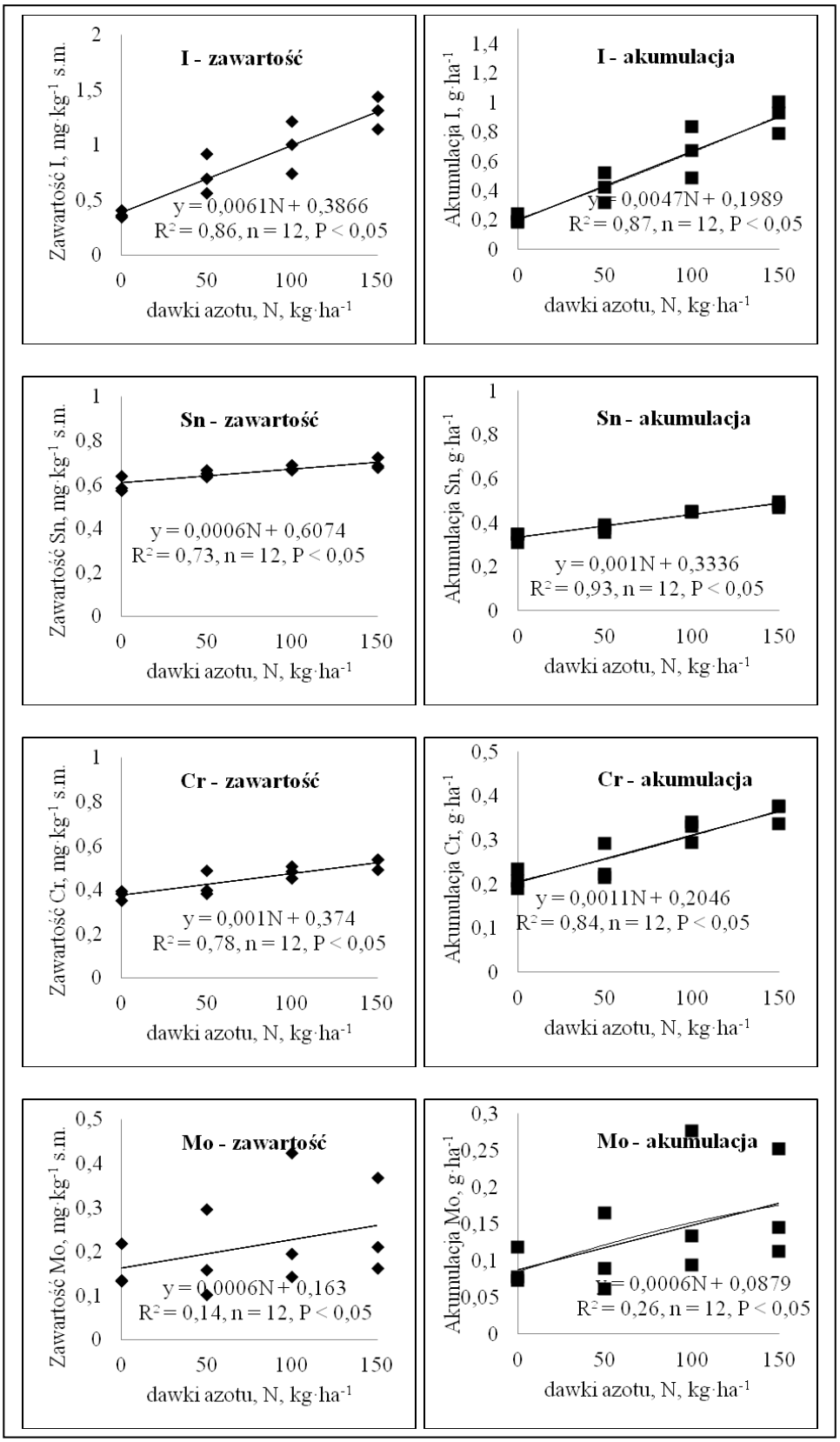
Tabela 19. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
S	N	Si	B	I	Sn	Cr	Mo
Numer cechy		46	47	48	49	50	51
0 S	0	6,66 a	0,980 a	0,106 h	0,325 g	0,182 a	0,110 a
	50	8,43 a	1,082 a	0,227 g	0,349 f	0,216 a	0,115 a
	100	10,31 a	1,377 a	0,336 e	0,415 d	0,269 a	0,184 a
	150	10,78 a	1,524 a	0,541 d	0,443 c	0,324 a	0,199 a
40 S	0	8,07 a	0,676 a	0,309 f	0,347 f	0,239 a	0,070 a
	50	9,21 a	1,037 a	0,616 c	0,400 e	0,271 a	0,096 a
	100	11,34 a	1,096 a	0,996 b	0,487 b	0,375 a	0,153 a
	150	13,20 a	1,329 a	1,276 a	0,521 a	0,401 a	0,141 a
Średnio	0 S	9,05 B	1,241 A	0,303 B	0,383 B	0,248 B	0,152 A
	40 S	10,46 A	1,034 B	0,799 A	0,439 A	0,322 B	0,115 B
Średnio	0	7,37 D	0,828 BC	0,208 D	0,336 D	0,211 BC	0,090 BC
	50	8,82 C	1,059 B	0,422 C	0,375 C	0,244 B	0,105 B
	100	10,83 B	1,237 AB	0,666 B	0,451 B	0,322 AB	0,168 AB
	150	11,99 A	1,426 A	0,908 A	0,482 A	0,363 A	0,170 A
Średnio	2014	10,02 A	0,902 C	0,638 A	0,398 B	0,277 A	0,110 B
	2015	9,36 A	1,131 B	0,446 B	0,418 A	0,266 A	0,203 A
	2016	9,87 A	1,380 A	0,569 AB	0,417 A	0,311 A	0,087 C
	Średnio	9,75	1,138	0,551	0,411	0,285	0,133

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)



Wykres 12. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) boru w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)



Wykres 13. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość (mg·kg^{-1} s.m.) i akumulację (g·ha^{-1}) jodu, cyny, chromu i molibdenu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)

Wyniki badań wskazują na istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na zawartość selenu (Se), kobaltu (Co), wanadu (V) i wolframu (W) w ziarnie pszenicy jarej. Jednakże, spośród wymienionych pierwiastków, jedynie zawartość kobaltu i wolframu zwiększała się istotnie wraz ze wzrostem dawki azotu i była najwyższa po wniesieniu azotu w dawce 150 kg·ha^{-1}. Zawartość selenu wykazywała trend rosnący pomiędzy dawką kontrolną (0 N) a dawką w ilości 50 kg·ha^{-1}, oraz dawką azotu 50 kg·ha^{-1} a dawką azotu 100 kg kg·ha^{-1}, ponadto dawką azotu 100 kg·ha^{-1} a dawką azotu 150 kg·ha^{-1}. Przy czym po zastosowaniu dawki azotu 150 kg·ha^{-1} zawartość selenu była istotnie wyższa od stwierdzonej na dawce azotu 50 kg·ha^{-1} i na obiekcie kontrolnym. W przypadku zawartości wanadu nie stwierdzono istotnej różnicy pomiędzy działaniem dawek azotu 50 kg·ha^{-1} i 100 kg·ha^{-1}. Wniesienie dawki najwyższej 150 kg·ha^{-1} dawało statystycznie istotny wzrost zawartości pierwiastka w stosunku do wartości na dawkach mniejszych i w warunkach wariantu kontrolnego. Zawartość fluoru i niklu najwyższa była w ziarnie zebranym z wariantów kontrolnych, przy czym stosowanie każdej dawki azotu powodowało obniżenie zawartości pierwiastków (tab. 20, wykres 14-16).

W przypadku nawożenia siarką analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ siarki na wzrost zawartości w ziarnie: fluoru (F) (12.2%), selenu (Se) (16,3%), kobaltu (Co) (18,6%), wanadu (V) (28,3%) i wolframu (W) (10,1%) w stosunku do ich wartości na obiektach bez nawożenia S. Dodatek siarki do nawożenia NPK w ilości 40 kg·ha^{-1} nie wpływał istotnie na zawartość niklu w ziarnie pszenicy, można było nawet zauważyć trend spadku pierwiastka o 4,5% po zastosowaniu siarki (tab. 20).

Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarki było nieistotne w przypadku zawartości wszystkich wymienionych pierwiastków, można jednak zauważyć, że dodatek siarki na tle wzrastających dawek azotu obniżał zawartość niklu. Natomiast wzrastające dawki azotu powodowały obniżenie zawartości fluoru, a nawożenie siarką powodowało wzrost pierwiastka w ziarnie (tab. 20).

Opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na zróżnicowanie zawartości niklu i wolframu w ziarnie pszenicy jarej. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla wzrostu zawartości w ziarnie fluoru i selenu, a sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) był korzystny do wzrostu zawartości wanadu. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) sprzyjał wzrostowi zawartości w ziarnie kobaltu, jak i wanadu (tab. 20, rys. 4).

Wyniki badań wykazały istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na akumulację (pobranie) przez suchą masę ziarna selenu (Se), kobaltu (Co), wanadu (V) i wolframu (W).

Akumulacja wymienionych pierwiastków istotnie zwiększała się w suchej masie ziarna wraz ze wzrostem dawki azotu; była najwyższa po wniesieniu azotu w dawce 150 kg·ha^{-1}. Akumulacja fluoru w ziarnie istotnie malała po zastosowaniu nawożenia azotem, szczególnie w dawkach 50 i 150 kg·ha^{-1} w stosunku do jej wielkości na obiekcie kontrolnym i po aplikacji azotu w dawce 100 kg·ha^{-1}. Podobny trend wystąpił w przypadku zawartości niklu, chociaż w tym przypadku nie potwierdzono występujących istotnych różnic (tab. 21, wykres 14-16).

W przypadku nawożenia siarką analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ tego pierwiastka na wzrost akumulacji (pobrania) przez suchą masę ziarna: fluoru (F) (14,9%), selenu (Se) (19,4%), kobaltu (Co) (21,8%), wanadu (V) (30,3%) i wolframu (W) (12,8%) w stosunku do obiektów bez nawożenia S. Dodatek siarki w ilości 40 kg·ha^{-1} do nawożenia N nie wpływał istotnie na akumulację niklu (Ni) w suchej masie ziarna pszenicy w stosunku do jej wartości na obiekcie kontrolnym, gdzie nie stosowano siarki do nawożenia (tab. 21).

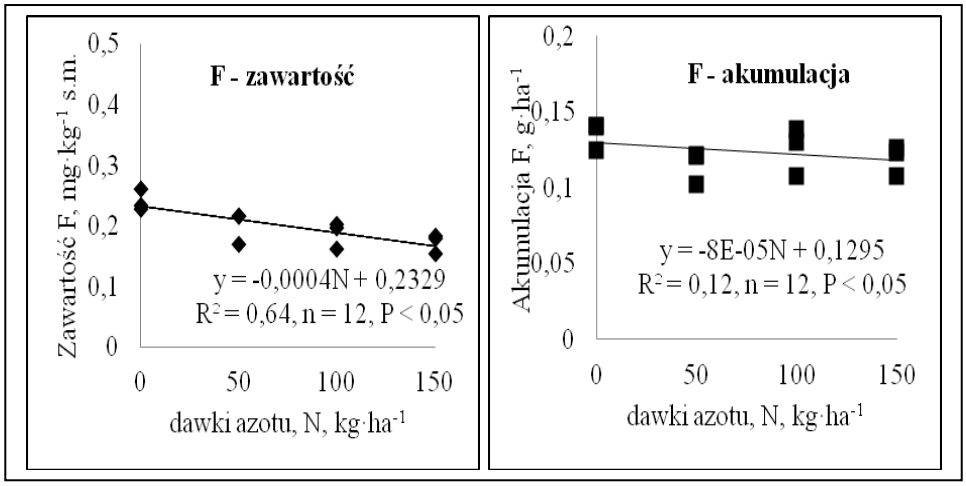
Współdziałanie zróżnicowanych dawek azotu i siarki było nieistotne w przypadku akumulacji przez suchą masę ziarna wszystkich omawianych pierwiastków, przy czym wzrost dawek azotu na tle nawożenia siarką podwyższał akumulację selenu, kobaltu, wanadu i wolframu. Nawożenie siarką powodowało, że niezależnie od dawki azotu akumulacja tych pierwiastków ulegała poprawie (nie potwierdzonej statystycznie). Akumulacja fluoru wykazywała trend spadkowy wraz ze wzrostem dawki azotu i trend wzrostowy po zastosowaniu dodatku siarki. Natomiast akumulacja niklu przez suchą masę ziarna pszenicy wykazała trend spadkowy zarówno w warunkach podwyższania dawki azotu, jak i siarki (tab. 21).

Warunki pogodowe, opady i temperatura w okresie wegetacji pszenicy jarej w latach 2014-2016 nie wpływały istotnie na zróżnicowanie akumulacji (pobrania) niklu i wolframu w suchej masie ziarna. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) był najbardziej korzystny dla akumulacji w ziarnie fluoru i selenu. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) był najmniej korzystny dla pobrania przez ziarno omawianych pierwiastków. Natomiast rozkład pogody w 2016 roku (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) sprzyjał istotnie wzrostowi akumulacji kobaltu, wanadu, a także wykazwyał dodatni trend w pobieraniu niklu i wolframu (tab. 21, rys. 14).

Tabela 20. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N	F	Se	Ni	Co	V	W
Numer cechy		52	53	54	55	56	57
0 S	0	0,225 a	0,073 a	0,222 a	0,0031 a	0,075 a	0,0490 a
	50	0,193 a	0,086 a	0,207 a	0,0045 a	0,089 a	0,0570 a
	100	0,176 a	0,093 a	0,196 a	0,0065 a	0,096 a	0,0620 a
	150	0,154 a	0,097 a	0,175 a	0,0086 a	0,104 a	0,0717 a
40 S	0	0,256 a	0,086 a	0,241 a	0,0040 a	0,097 a	0,0527 a
	50	0,207 a	0,097 a	0,197 a	0,0067 a	0,123 a	0,0603 a
	100	0,199 a	0,115 a	0,170 a	0,0073 a	0,132 a	0,0683 a
	150	0,189 a	0,120 a	0,157 a	0,0099 a	0,155 a	0,0850 a
Średnio	0 S	0,187 B	0,087 B	0,200 A	0,0057 B	0,091 B	0,0599 B
	40 S	0,213 A	0,104 A	0,191 A	0,0070 A	0,127 A	0,0666 A
Średnio	0	0,241 A	0,079 BC	0,232 A	0,0035 D	0,086 C	0,0508 D
	50	0,200 AB	0,092 B	0,202 AB	0,0056 C	0,106 B	0,0587 C
	100	0,187 B	0,104 AB	0,183 B	0,0069 B	0,114 AB	0,0652 B
	150	0,172 B	0,108 A	0,166 BC	0,0093 A	0,130 A	0,0783A
Średnio	2014	0,215 A	0,148 A	0,204 A	0,0049 B	0,085 C	0,0608 A
	2015	0,205 B	0,061C	0,191 A	0,0055 B	0,112 A	0,0640 A
	2016	0,180 C	0,078 B	0,192 A	0,0086 A	0,130 A	0,0650 A
	Średnio	0,200	0,096	0,196	0,0063	0,109	0,0633

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)

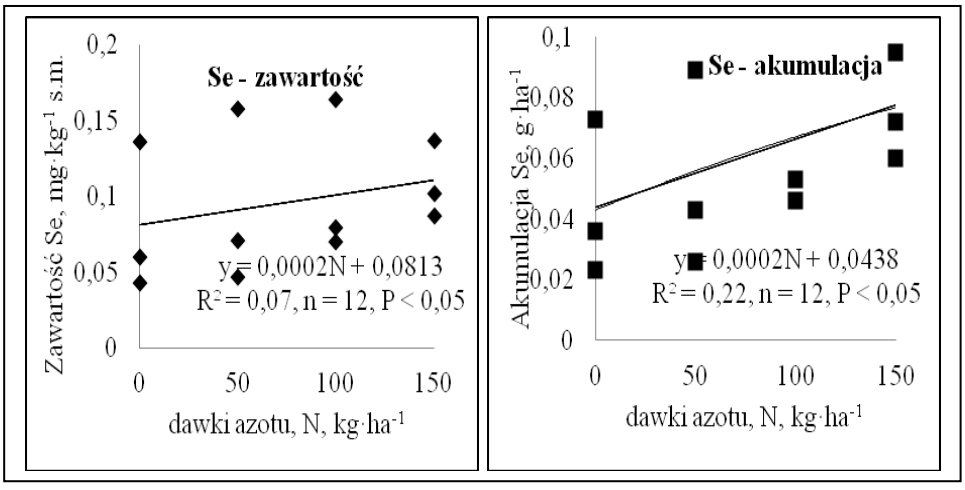


Wykres 14. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) fluoru w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)

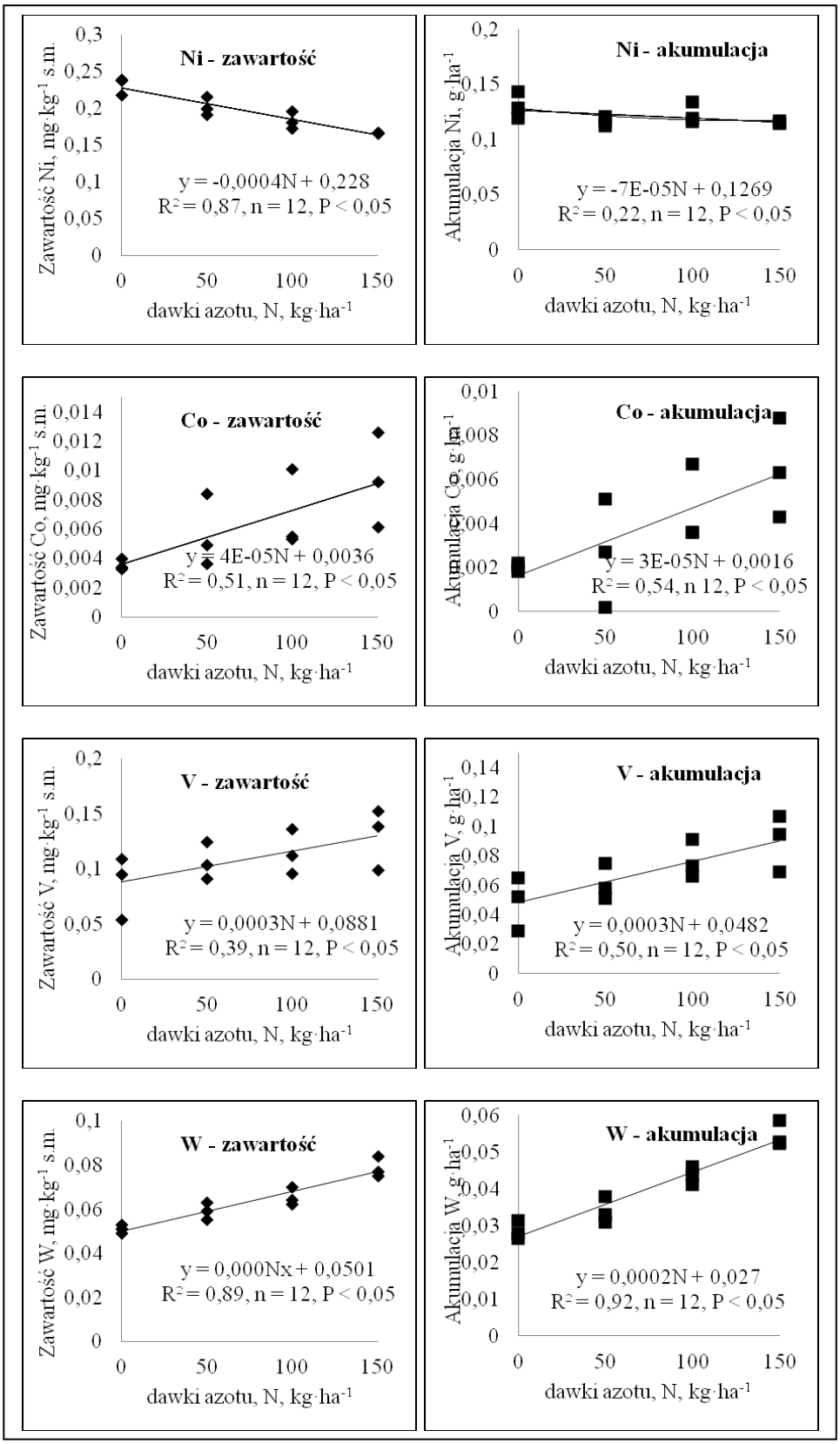
Tabela 21. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
S	N	F	Se	Ni	Co	V	W
Numer cechy		58	59	60	61	62	63
0 S	0	0,125 a	0,040 a	0,123 a	0,0017 a	0,0420 a	0,0273 a
	50	0,109 a	0,049 a	0,117 a	0,0026 a	0,0508 a	0,0324 a
	100	0,116 a	0,062 a	0,129 a	0,0043 a	0,0634 a	0,0409 a
	150	0,105 a	0,066 a	0,120 a	0,0059 a	0,0714 a	0,0490 a
40 S	0	0,145 a	0,048 a	0,137 a	0,0022 a	0,0554 a	0,0298 a
	50	0,121 a	0,056 a	0,116 a	0,0039 a	0,0722 a	0,0355 a
	100	0,135 a	0,079 a	0,116 a	0,0050 a	0,0900 a	0,0465 a
	150	0,134 a	0,085 a	0,111 a	0,0070 a	0,1093 a	0,0600 a
Średnio	0 S	0,114 B	0,054 B	0,122 A	0,0036 B	0,0569 B	0,0374 B
	40 S	0,134 A	0,067 A	0,120 A	0,0046 A	0,0817 A	0,0429 A
Średnio	0	0,135 A	0,044 D	0,130 A	0,0020 D	0,0487 D	0,0286 D
	50	0,115 BC	0,053 C	0,116 A	0,0033 C	0,0615 C	0,0339 C
	100	0,126 AB	0,070 B	0,123 A	0,0046 B	0,0767 B	0,0437 B
	150	0,119 B	0,075 A	0,115 A	0,0065 A	0,0904 A	0,0545 A
Średnio	2014	0,132 A	0,092 A	0,125 A	0,0031 B	0,0538 C	0,0384 A
	2015	0,125 B	0,039 C	0,116 A	0,0035 B	0,0696 B	0,0399 A
	2016	0,115 C	0,051 B	0,123 A	0,0057 A	0,0845 A	0,0422 A
	Średnio	0,124	0,061	0,121	0,0041	0,0693	0,0402

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)



Wykres 15. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) selenu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)



Wykres 16. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość (mg·kg^{-1} s.m.) i akumulację (g·ha^{-1}) niklu, kobaltu, wanadu i wolframu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12

Zawartość i akumulacja pierwiastków z grupy makro- i mikroelementów korelowała istotnie z plonem ziarna pszenicy jarej. Istotnie dodatnie korelacje pomiędzy ich zawartością i akumulacją a plonem ziarna odnotowano w przypadku, plon ziarna ↔ zawartość i akumulacja pierwiastka: azot (N), siarka (S), fosfor (P), potas (K), wapń (Ca), magnez (mg), chlor (Cl), sód (Na), żelazo (Fe), mangan (Mn), cynk (Zn), miedź (Cu), krzem (Si), jod (I), cyna (Sn), chrom (Cr), kobalt (Co), wanad (V) i wolfram (W) (tab. 22).

Pomiędzy plonem ziarna a zawartością boru (B) i selenu (Se) korelacja była dodatnia lecz statystycznie nieistotna. Wystąpiła natomiast dodatnia istotna korelacja między plonem ziarna a akumulacją w suchej masie ziarna boru (B) i selenu (Se). Plon ziarna był skorelowany dodatnio z zawartością i akumulacją w ziarnie molibdenu (Mo) i ujemna, statystycznie istotna korelacja wystąpiła pomiędzy plonem ziarna a zawartością w ziarnie fluoru (F) i niklu (Ni). Natomiast pomiędzy plonem ziarna a akumulacją wymienionych pierwiastków korelacja była również ujemna, lecz statystycznie nieistotna (tab. 22).

W tabelach 23A i 24A zamieszczono macierz korelacji pomiędzy zawartością w ziarnie i akumulacją w suchej masie ziarna wszystkich badanych pierwiastków. Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że pomiędzy pierwiastkami w ziarnie zachodzą o różnej sile zależności. Makroelementy i mikroelementy, w większości są istotnie dodatnio skorelowane między sobą, zarówno w przypadku ich zawartości w ziarnie, jak i akumulacji w suchej masie ziarna. Tendencję do ujemnej korelacji z zawartością niektórych innych pierwiastków ma na ogół fluor i nikiel, przy czym można zauważyć także korelacje ujemne pomiędzy zawartością, manganu, cynku, miedzi, boru, molibdenu, fluoru i niklu a innymi pierwiastkami. W przypadku akumulacji pierwiastków dodatnie korelacje z reguły zachodzą między makroelementami a pozostałymi pierwiastkami. Mikroelementy między sobą były często ujemne skorelowane. To oznacza, że podlegają one silniejszej konkurencji w pobieraniu przez ziarno pszenicy jarej. Jako pierwiastki śladowe podlegają one interakcjom ujemnym pomiędzy sobą w warunkach zmiany warunków glebowych (roztworu glebowego) powodowane nawożeniem azotem i siarką (tab. 23A i 24A).

Tabela 22. Współczynniki korelacji pomiędzy plonem ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) a zawartością i akumulacją pierwiastków w suchej masie ziarna pszenicy jarej

Nazwa pierwiastka (n = 24)	Współczynnik korelacji (r)	
	zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.)	akumulacja ($kg \cdot ha^{-1}$)
Azot (N)	**0,534**	**0,936**
Siarka (S)	**0,701**	**0,940**
Fosfor (P)	**0,520**	**0,970**
Potas (K)	**0,477**	**0,873**
Wapń (Ca)	**0,646**	**0,853**
Magnez (Mg)	**0,815**	**0,955**
Chlor (Cl)	**0,513**	**0,834**
Sód (Na)	**0,817**	**0,863**
Żelazo (Fe)	**0,641**	**0,937**
Mangan (Mn)	**0,476**	**0,908**
Cynk (Zn)	**0,513**	**0,867**
Miedź (Cu)	**0,735**	**0,951**
Krzem (Si)	**0,687**	**0,891**
Bor (B)	0,381	**0,622**
Jod (I)	**0,684**	**0,738**
Cyna (Sn)	**0,551**	**0,884**
Chrom (Cr)	**0,697**	**0,839**
Molibden (Mo)	0,173	0,338
Fluor (F)	**-0,595**	-0,039
Selen (Se)	0,256	**0,467**
Nikiel (Ni)	**-0,615**	-0,081
Kobalt (Co)	**0,699**	**0,765**
Wanad (V)	**0,579**	**0,730**
Wolfram (W)	**0,807**	**0,899**

Objaśnienia: istotne przy α = 0,05: r = **0,406**, istotne przy α = 0,01: r **= 0,517**

Bardzo ważną cechą w ocenie nawożenia azotem i siarką jest stosunek N:S w ziarnie pszenicy jarej. Zarówno nawożenie azotem, jak i dodatek siarki do NPK nie miały istotnego wpływu na relację N:S w ziarnie (tab. 23), która wyniosła średnio 20,33. Natomiast istotnie na stosunek N:S wpływała pogoda w sezonach wegetacyjnych. Najszerszy stosunek N:S (21,79) odnotowano w sezonie 2014, który określono jako dość wilgotny. Istotnie węższy stosunek N:S w ziarnie wystąpił w sezonie wegetacyjnym 2015, który określono jako suchy na pograniczu dość suchego. Istotnemu zawężaniu relacji N:S w ziarnie w odniesieniu do sezonów sprzyjał rozkład pogody w warunkach roku 2016 (18,21), uznanego jako dość wilgotny na pograniczu optymalnego. Zatem sezon wegetacyjny 2016 należy ocenić jako najbardziej korzystny dla stosunku N:S, który optymalnie w świetle innych badań powinien wynosić jak 1:15 (tab. 23) (Oenema i Postma 2003, Grzebisz i Haerdter 2006).

Tabela 23. Wpływ nawożenia azotem i siarką na stosunek N:S w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Wyszczególnienie		Dawka azotu (kg N·ha^{-1})				Średnio
		0	50	100	150	
Dawka S (kg S·ha^{-1})	0 S	20,09 a	20,77 a	20,27 a	20,41a	20,39 A
	40 S	19,83 a	20,87 a	20,21 a	20,15 a	20,27 A
Lata	2014	20,70 *a*	22,29 *a*	21,97 *a*	22,20 *a*	21,79 *A*
	2015	21,48 *a*	21,67 *a*	19,90 *a*	20,86 *a*	20,98 *B*
	2016	17,71 *a*	18,49 *a*	18,86 *a*	17,78 *a*	18,21 *C*
Średnio		19,96 A	20,82 A	20,24 A	20,28 A	20,33

Objaśnienia: Wartości z różnymi literami w obrębie kolumny są statystycznie różne ($\alpha<0,05$)

5.4. Efektywność nawożenia pszenicy jarej

Zastosowanie azotu w dawce 50 kg·ha^{-1} w stosunku do obiektu kontrolnego (bez azotu) powodowało przyrost plonu ziarna pszenicy jarej o 2,01 kg na 1 kg azotu zastosowanego w nawozie. Zwiększenie dawki azotu do 100 kg·ha^{-1} spowodowało zwiększenie przyrostu ziarna do 10,26 kg na 1 kg azotu, zaś zastosowanie azotu w ilości 150 kg·ha^{-1} spowodowało zmniejszenie przyrostu ziarna do 8,45 kg na 1 kg azotu (tab. 24, wykres 17). Oznacza to obniżenie efektywności rolniczej nawożenia azotem przy dawce 150 kg·ha^{-1}. Największy przyrost ziarna na 1 kg zastosowanego azotu stwierdzono w przypadku zwiększenia dawki

azotu z 50 do 100 kg·ha^{-1}, gdzie uzyskano przyrost plonu ziarna aż 18,82 kg na każdy kg azotu (tab. 24).

Zastosowanie do najniższej dawki azotu, 50 kg·ha^{-1} dodatku siarki w ilości 40 kg·ha^{-1} powodowało przyrost plonu ziarna w ilości 6,11 kg na 1 kg azotu, co stanowiło aż 3-krotny wzrost efektywności rolniczej azotu w stosunku do obiektu bez siarki. Oznacza to, że siarka istotnie zwiększa efektywność pobierania azotu przez ziarno pszenicy jarej. Spośród badanych kombinacji najwyższą efektywność wykorzystania azotu wykazano w układzie 50 N ↔ 100 N + 40 S, czyli zwiększenie nawożenia azotem do 100 kg·ha^{-1} z równoczesnym dodatkiem siarki powodowało przyrost plonu ziarna w ilości 22,63 kg na każdy zastosowany kg azotu suplementowany siarką.

Tabela 24. Efektywność rolnicza nawożenia pszenicy jarej różnymi dawkami azotu i dodatkiem siarki (średnio 2014-2016)

Kombinacje nawozowe: azot i siarka		Efektywność rolnicza nawożenia (A_E) (kg ziarna / 1 kg składnika)	
		N	S
Numer cechy		64	65
N	0 – 50	2,01	-
	0 – 100	10,26	-
	0 – 150	8,45	-
	50 – 100	18,82	-
	50 – 150	11,26	-
	100 – 150	2,42	-
N × S	0 – 0+S	-	2,12
	0 – 50+S	6,11	7,64
	0 – 100+S	12,32	30,80
	0 – 150+S	9,92	37,18
	50 – 100+S	22,63	28,28
	50 – 150+S	13,87	34,67
	100 – 150+S	9,23	11,53
S	50+S – 100+S	18,53	23,16
	50+S – 150+S	11,82	29,54
	100+S – 150+S	5,11	6,38

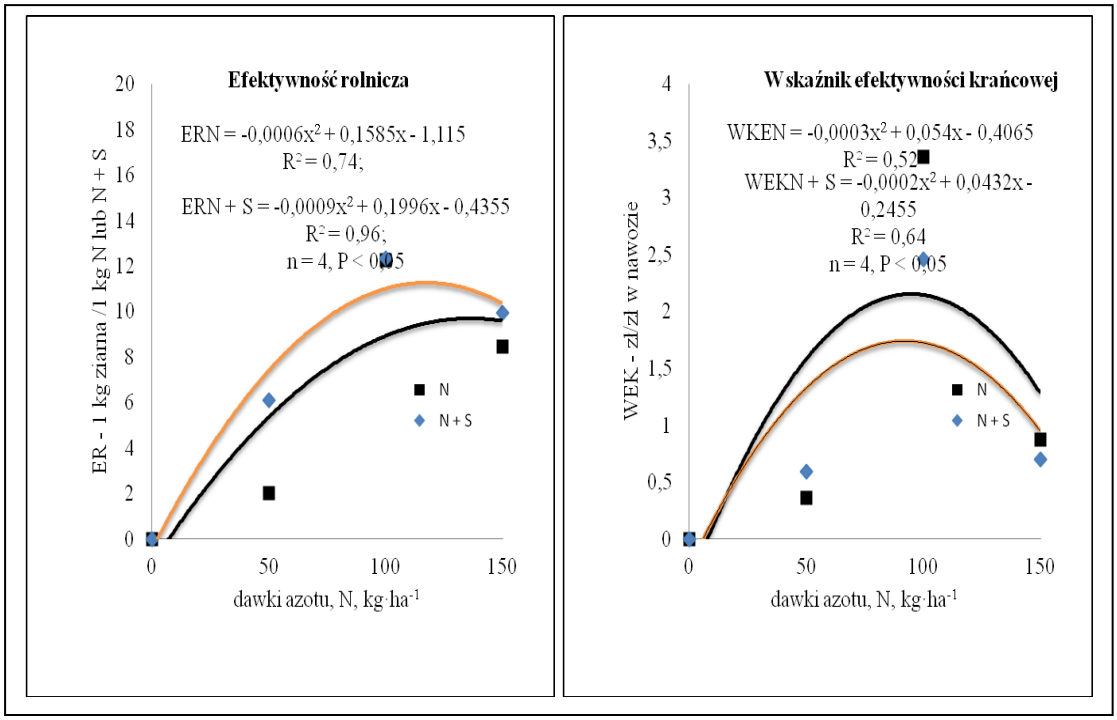
Potwierdza to także kombinacja 50 N + 40 S ↔ 100 N + 40 S, gdzie uzyskano przyrost ziarna w ilości 18,53 kg na każdy kg zastosowanego w nawozach azotu przy dodatku siarki. Dawki azotu w ilości 150 kg·ha^{-1} bez i z dodatkiem siarki były nieefektywne rolniczo bowiem powodowały zmniejszenie przyrostu plonu ziarna w stosunku do dawki 100 kg·ha^{-1}.

Tabela 25. Efektywność ekonomiczna krańcowa nawożenia azotem pszenicy jarej

Dawka N (kg·ha^{-1})	Plon ziarna (t·ha^{-1})	Przyrost plonu (kg ziarna)	Przyrost nawożenia (kg N·ha^{-1})	Wartość przyrostu plonu (zł)	Koszt przyrostu nawożenia (zł)	Efektywność krańcowa (zł · zł$^{-1}$)
0	5,57	-	-	-	-	-
50	5,67	100	50	65,0	180	0,36
100	6,60	930	50	604,5	180	3,36
150	6,84	240	50	156,0	180	0,87
0*	5,66	-	-	-	-	-
50*	5,88	220	50	143,0	180**	0,79
100*	6,80	920	50	598,0	180**	3,32
150*	7,06	260	50	169,0	180**	0,94

*dawki azotu na tle nawożenia siarką w ilości 40 kg S·ha^{-1}

** łącznie nawożenie azotem i siarką



Wykres 17. Efektywność rolnicza i wskaźnik efektywności krańcowej nawożenia pszenicy jarej zróżnicowanymi dawkami azotu i dodatku siarki (n = 4).

Zastosowanie nawożenia siarką w obiekcie kontrolnym (bez azotu) powodowało przyrost plonu ziarna pszenicy jarej w ilości 2,12 kg na 1 kg siarki. Dodatek azotu wraz ze wzrostem dawki powodował wprost proporcjonalny przyrost plonu ziarna, który był najwyższy przy dawce 150 kg·ha^{-1} i wyniósł 37,18 kg na 1 kg siarki w nawozie. Należy jednak zauważyć, że największe przyrosty plonu ziarna były po wniesieniu dawek azotu 50 i

100 kg·ha^{-1}, a dawka najwyższa choć powodowała jeszcze przyrost, to był on mniejszy od efektu działania dawek mniejszych (tab. 24, wykres 17).

Biorąc pod uwagę wszystkie badane kombinacje nawożenia azotem i siarką należy stwierdzić, że w przypadku wskaźnika efektywności krańcowej należy uznać korzystne działanie łącznego stosowania azotu w dawce 100 kg·ha^{-1} wraz z dodatkiem siarki w ilości 40 kg·ha^{-1}. W tej kombinacji w stosunku do innych układów osiągnięto najwyższy wskaźnik efektywności krańcowej, który wynosił odpowiednio 3,36 (bez S) i 246 zł·zł$^{-1}$ z dodatkiem siarki (tab. 25, rys. 17). Zatem tę kombinację dawek N i S można zalecać do stosowania w praktyce do nawożenia pszenicy jarej (tab. 24, wykres 17).

Spośród ocenianych efektów ekonomicznych nawożenie azotem bez stosowania siarki, dawka azotu w ilości 50 kg·ha^{-1} powodowała niewielki przyrost plonu ziarna w porównaniu do wyników uzyskanych na obiekcie kontrolnym bez nawożenia azotem. Zwiększenie dawki z 50 do 100 kg N·ha^{-1} spowodowało wyraźny wzrost plonu ziarna i w rezultacie najkorzystniejszy wskaźnik krańcowej efektywności ekonomicznej. Na 1 zł kosztu zastosowanego azotu przypadało 3,36 zł przyrostu wartości plonu. Natomiast zwiększnie dawki azotu ze 100 do 150 kg·ha^{-1} znacząco obniżyło efektywność nawożenia, bowiem wraz ze wzrostem dawki azotu zmalała efektywność tego czynnika do 0,87 zł (tab. 25). Nawożenie siarką w dawce 40 kg S ha^{-1} poprawiło wydajność nawożenia pszenicą jarą azotem w dawce 50 i 150 kg N ha^{-1}; nie było to jednak uzasadnione ekonomicznie (wskaźnik <1,0); (tab. 25). Przy dawce 100 kg N ha^{-1} wskaźnik efektywności ekonomicznej utrzymywał się na porównywalnym poziomie jak w warunkach bez siarki (3,32 i 3,36 zł$^{-1}$). Dla obu wariantów nawożenia azotem (z siarką i bez) najskuteczniejsza i uzasadniona finansowo okazała się jedynie dawka 100 kg N ha-1. Zatem poziom nawożenia azotem w ilości 100 kg·ha^{-1} może być zalecany do stosowania w praktyce do nawożenia pszenicy jarej.

6. DYSKUSJA

Wybór problemu badawczego w prezentowanych badaniach oparty został na wcześniejszych obserwacjach polowych oraz analizie literatury dotyczącej statusu azotu i siarki w biosferze oraz w nawożeniu roślin uprawnych. Pozwoliło to na sformułowanie hipotezy roboczej podjętych badań, że gleby lekkie nie pokrywają w sposób naturalny zapotrzebowania pszenicy jarej na azot i siarkę. W celu rozpoznania wpływu siarki nawozowej na plonowanie i jakość pszenicy jarej oraz poprawę właściwości chemicznych i prozdrowotnych przeprowadzono ścisłe 3-letnie doświadczenie polowe w latach 2014-2016.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano istotnie korzystny wpływ nawożenia azotem na wielkość plonu ziarna pszenicy jarej oraz większość badanych cech struktury plonu ziarna i cech biometrycznych rośliny. Plon ziarna charakteryzował się najkorzystniej po zastosowaniu dawki średniej i najwyższej azotu, to jest 100 i 150 kg·ha^{-1} w stosunku do wariantu kontrolnego (bez azotu), wzrost wynosił odpowiednio dla dawki najwyższej 19,2 i 16,2% i dla dawki najmniejszej azotu 50 kg·ha^{-1}, odpowiednio o 16,9 i 13,8%. Azot zaliczany jest do najważniejszych pierwiastków plonotwórczych i został szeroko opisany w literaturze (Mazurek i in. 1999; Wróbel, Szempliński 1999; Rutkowska 2002; Ralcewicz, Knapowski 2004; Kocoń 2005; Podolska 2007). Nawożenie siarką wykazało korzystny wpływ w stosunku do kontroli wyrażony wzrostem plonu ziarna pszenicy jarej (o 2,8%), liczby ziaren z kłosa (o 6,2%), MTZ (o 2,1%), masy ziarna z kłosa (o 8,5%) i obsady kłosów (o 1,8%). Tezę o korzystnym plonotwórczym działaniu siarki na plonowanie pszenicy jarej potwierdzają liczne badania (Podleśna i in. 2003, Gondek i Gondek 2010, Podleśna 2013, Brodowska 2013, Klikocka 2010). Nawożenie pszenicy ozimej siarką w dawce 60 kg S·ha^{-1}, w badaniach Podleśnej i in. (2003), powodowało wzrost plonu ziarna (o 11%). Brodowska (2013) podaje, że nawożenie siarką generalnie skutkuje wzrostem MTZ pszenicy ozimej. Grzebisz (2009) twierdzi, że masa 1000 ziaren powstaje dopiero po zawiązaniu się ziarniaków (za co odpowiada głównie azot, potas i woda) i zależy od warunków pogodowych (głównie temperatury), odżywienia azotem i innymi składnikami mineralnymi, w tym siarką. W badaniach własnych nastąpił także wzrost liczby kłosów, który był nie tylko wynikiem odżywienia azotem, lecz także siarką. W tym przypadku można mówić o współdziałaniu azotu i siarki, chociaż zjawiska tego nie potwierdzono statystycznie. Jak twierdzą Grzebisz i Härdter (2006) plonotwórcza rola siarki w roślinie sprowadza się do kontroli gospodarki azotowej roślin. Grzebisz (2008) uważa, że niedobór siarki prowadzi do

zahamowania wzrostu rośliny, ale analogicznie jak dla azotu, depresja wzrostu w pierwszej kolejności obejmuje organy nadziemne. Ujemne skutki niedożywienia siarką prowadzą najpierw do zmniejszenia procesów fotosyntetycznych, syntezy węglowodanów, syntezy białek, a ostatecznie do redukcji wzrostu całej rośliny (w pierwszej kolejności liści). Zmniejszenie zawartości chlorofilu w liściu, w połączeniu ze zredukowaną syntezą białek, ujawnia się w postaci chlorozy siatkowej. U zbóż objawy widoczne są na całej blaszce liściowej najmłodszych liści. W trakcie prowadzenia własnego doświadczenia obserwowano wizualnie zróżnicowany odcień zieloności łanu na poletkach, przy czym najbardziej zielone rośliny występowały na kombinacjach 100 i 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ bez i z dodatkiem siarki. Jasnozielony łan obserwowano także w wariantach 0 i 50 $kg \cdot ha^{-1}$ N bez siarki. W każdym przypadku dodatek siarki poprawiał intensywność zieleni roślin.

Tezę o korzystnym plonotwórczym działaniu siarki na plonowanie pszenicy jarej potwierdziły badania Gondek i Gondek (2010). Według Podleśnej (2013) oraz Klikockiej i Cybulskiej (2014) uprawa pszenicy w warunkach niedoboru siarki doprowadziła do zahamowania wzrostu i rozwoju roślin, a także do zmiany składu chemicznego organów wegetatywnych i ziarna. Rośliny o ograniczonym dostępie do siarki siarczanowej w glebie wykazały diametralną redukcję plonu ziarna z pędu głównego i z pędów bocznych, z jednoczesną redukcją masy tysiąca ziaren. Opisywane spostrzeżenia mają również odzwierciedlenie w badaniach własnych, w których to dodatek siarki do nawożenia N w ilości 40 kg $S \cdot ha^{-1}$ wpływał istotnie na wzrost plonu ziarna o 2,8%. Korzystny wpływ siarki na plonowanie pszenicy jarej potwierdziły również Podleśna i Cacak-Pietrzak (2006).

W przypadku współdziałania zróżnicowanych dawek nawożenia azotem i siarką nie odnotowano istotnej interakcji badanych czynników. Jednakże zauważono, że bez względu na dodatek siarki wszystkie badane cechy kształtowały się korzystnie po zastosowaniu każdej wzrastającej dawce azotu. Natomiast dodatek siarki, w ilości 40 $kg \cdot ha^{-1}$ powodował, że niezależnie od dawki azotu (czynnik II) wartość badanych cech ulegała poprawie (chociaż nie potwierdzono tego statystycznie). Generalnie można stwierdzić, że nawożenie siarką zwiększało oddziaływanie azotu na plon i elementy jego struktury, a także na cechy biometryczne roślin. Po jej wniesieniu wzrastała ranga badanych cech na tle każdego poziomu dawki N, przy czym bardzo korzystne było stosowanie dawek 100 i 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ wzbogaconych w dodatek S, w ilości 40 $kg \cdot ha^{-1}$. Ten typ działania czynnika plonotwórczego, w tym przypadku nawozowego sygnalizuje na działanie addytywne siarki. Ujawnia się w warunkach działania czynnika niedoborowego w stopniu umiarkowanie słabym, zgodnie z regułami określonymi przez *prawo malejących przyrostów produkcji*, znane jak prawo

Mitscherlicha (Grzebisz 2009). Generalnie współdziałanie addytywne składników ujawnia się wówczas, gdy zachodzi stały wskaźnikowy wzrost masy (plonu) w następstwie zastosowanego drugiego czynnika.

Ziarno przeznaczone na cele konsumpcyjne powinno charakteryzować się wysoką wartością technologiczną, określaną przez parametry jakościowe ziarna i mąki, m.in.: zawartość białka, ilość i rozpływalność glutenu, wskaźnik sedymentacji, liczba opadania, wyrównanie ziarna, wodochłonność mąki, objętość pieczywa (Podolska i Grabiński 2002, Podolska i Sułek 2002). W literaturze naukowej wiele miejsca poświęca się zagadnieniu nawożenia azotem pszenicy jakościowej oraz jego wpływu na plon i wartość technologiczną ziarna (Knapp i Harms 1988, Mazurek i in. 1999, Stankowski i in. 1999, Wróbel i Szempliński 1999, Rutkowska 2002, Ralcewicz i Knapowski 2004, Podolska 2007). Natomiast znacznie mniejszy nacisk kładzie się na nawożenie pozostałymi składnikami mineralnymi, w tym siarką (Zhao i in. 1997a). A jak wiadomo, wielkość a także jakość plonu, zgodnie z prawem minimum, uzależniona jest od składnika pokarmowego, który występuje w ilościach najmniejszych w stosunku do potrzeb rośliny (Grzebisz i Härdter 2006).

Bardzo ważnym elementem uprawy pszenicy jakościowej jest jej przydatność do celów piekarskich. Järwan i in. (2008) stwierdzają, że zastosowanie siarki w doświadczeniu z pszenicą ozimą nie wpływało jednoznacznie na zawartość białka i glutenu mokrego w ziarnie, ale w innych doświadczeniach zwiększeniu uległ indeks glutenu, a jakość białka uległa poprawie. Siarka wpływała na zwiekszenie zawartości aminokwasów oraz wszystkich jakościowych parametrów wypiekowych, takich jak: liczba jakości i czas stałości ciasta oraz objętość bochenka (Podleśna 2005). W przeprowadzonych badaniach własnych wykazano również korzystny wpływ na wzrost zawartości aminokwasów siarkowych: cysteiny i metioniny, która to ostatnia decyduje o jakości mąki. Grzebisz i Härdter (2006) podają, że pierwszym produktem organicznym siarki w roślinie jest cysteina, aminokwas egzogenny, który decyduje o jakości białka roślinnego i jego wartości dla zwierząt i człowieka, Rośliny dobrze odżywione siarką zwiększają zawartość nie tylko chlorofilu, ale i białka. Zależność ta podkreśla silny funkcjonalny związek, zachodzący już na poziomie molekularnym, między siarką a azotem (Hesse i in. 2015). Produkcja białka w roślinie zachodzi kosztem zawartej w niej skrobi, co jest następstwem procesu zużywania związków węgla w procesie syntezy białek. Prawidłowości te zostały zauważone również we własnych badaniach, gdyż nawożenie azotem wpływało na podwyższenie zawartości białka i aminokwasów siarkowych: cysteiny i metioniny kosztem obniżenia zawartości skrobi. Grzebisz i Härdter (2006) twierdzą również, że skutkiem wzrostu zawartości białek właściwych w roślinie po zastosowaniu siarki

jest znaczny wzrost rośliny, a w liściach chlorofilu, co objawia się intensyfikacją zielonej barwy liści. Goźliński (1970) stwierdził, że zastosowanie siarki w uprawie owsa i jęczmienia jarego wpływało na wzrost wykorzystania pobranego azotu do tworzenia plonu i syntezy białek. Przy niedoborze siarki pobrany azot gromadził się głównie w słomie i w dużej ilości występował w formie niebiałkowej, co powodowało niewykorzystanie tej części azotu w plonie ziarna. Podobną zależność obserwowano również w badaniach Klikockiej i Cybulskiej (2014).

Jak informuje Boros (2011) w IHAR-PIB wykonano badania składu chemicznego w ziarnie 57 odmian pszenicy zwyczajnej, reprezentujących 38 odmian formy ozimej i 19 formy jarej z Krajowego Rejestru Odmian. Każdy taki zestaw prób ziarna pochodził z 3 różnych rejonów agroklimatycznych Polski, a mianowicie z rejonu zachodniego (Świebodzin-Chrząstowo), północno-wschodniego (Krzyżewo-Marianowo) i południowego (Węgrzce) ze zbioru 2008 r. Skład chemiczny obejmował ogółem 15 komponentów ziarna pozwalających na pełną charakterystykę wartości odżywczej, prozdrowotnej i paszowej ziarna, jak również interakcję genotypowo-środowiskową. Komponentami tymi były: białko, składniki mineralne, lipidy, skrobia przyswajalna, kompleks błonnika pokarmowego i alkilorezorcynole. Analizowanymi składnikami błonnika były nieskrobiowe polisacharydy, udział w nich frakcji rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych, w tym polimerów arabinoksylanów, kwasy uronowe oraz lignina Klasona. Zawartość składników odżywczych jak i błonnika pokarmowego oraz innych związków o charakterze bioaktywnym w ziarnie pszenicy jest cechą odmianową, uwarunkowaną genetycznie, jednakże modyfikowaną przez warunki środowiska, w którym ziarno zostało produkowane (Boros 2011). Przeprowadzone badania przez Boros (2011) wykazały, że różne odmiany pszenicy w bardzo różny sposób reagują na zmienne warunki glebowo-klimatyczne w odniesieniu do składu chemicznego. W tym względzie można wyróżnić odmiany stabilne, które niezależnie od warunków uprawy zachowują prawie niezmieniony skład chemiczny ziarna bądź wybranych jego składników. Są także i takie odmiany, których skład chemiczny ziarna ogółem lub różnych składników zmienia się nawet bardzo znacznie pod wpływem zmiennych warunków agroklimatycznych. W kolejnych badaniach przeprowadzonych przez Boros i in. (2020) wykazano, że czynnik genetyczny (odmiana) ma istotny wpływ na zawartość substancji odżywczych oraz na kompleks błonnika pokarmowego w ziarnie mieszanin odmianowych pszenicy jarej. Na podstawie przebadanych 19 odmian pszenicy jarej Boros (2011) wykazała, że średnia zawartość białka wynosiła 15% s.m., popiołu 1,7 % s.m., tłuszczu 2,7 % s.m., skrobi 63,5% s.m., błonnika pokarmowego

12,3% s.m., składniki mineralne 1,68% s.m. Zawartości te zbliżone są do otrzymanych wyników własnych.

Plonotwórcza rola siarki ujawnia się we wzroście plonu ziarna poprzez lepsze wykorzystanie azotu nawozowego. W praktyce rolniczej zadanie to polega na przetworzeniu zastosowanego azotu nawozowego w plon białka. Zatem prawidłowe odżywienie pszenicy siarką poprawia cechy jakościowe ziarna. Jakość plonu ziarna we własnych badaniach była poprawiana poprzez zastosowanie siarki w nawożeniu. Badania wykazały, że różnice w zawartości glutenu, białka ogólnego, cysteiny, metioniny, tłuszczu, włókna surowego, flawonoidów, o-dihydroksyfenoli i popiołu były statystycznie istotne w zależności od zastosowanej dawki azotu (czynnik I) i dodatku do nawożenia siarki (czynnik II). Zawartość glutenu, białka ogólnego i metioniny w ziarnie przyrastała istotnie wprost proporcjonalnie w miarę zwiększania dawki azotu i była najwyższa po zastosowaniu dawki 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ (odpowiednio 36,10%, 16,84% i 3,50 $mg \cdot g^{-1}$). W odniesieniu do zawartości cysteiny już najmniejsza dawka azotu (50 $N \cdot ha^{-1}$) spowodowała istotny wzrost aminokwasu w stosunku stwierdzonej na dawce kontrolnej, bez azotu (o 7,1%). Dalsze podwyższanie dawki azotu nie wpływało już na istotny wzrost cysteiny. Zawartość tłuszczu w ziarnie pszenicy jarej była najwyższa po zastosowaniu nawożenia azotem w dawce 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ (1,23%). Zastosowanie dawek 50 i 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ działało podobnie na zawartość tłuszczu i było istotnie wyższe niż w przypadku ziarna zebranego z obiektów kontrolnych, gdzie nie stosowano azotu (o 24,0%). Zawartość włókna surowego (błonnika), flawonoidów (suma w przeliczeniu na kwercetynę), o-dihydroksyfenoli (suma w przeliczeniu na kwas kawowy) i popiołu w ziarnie przyrastała istotnie w miarę zwiększania dawki azotu i była najwyższa po zastosowaniu dawki N w ilości 150 $kg \cdot ha^{-1}$ (odpowiednio 4,19%, 0,027%, 0,091%, 2,11%). Jednak, w odniesieniu do zawartości włókna surowego i o-dihydroksyfenoli zastosowanie dawki najmniejszej azotu (50 $kg \cdot ha^{-1}$) nie powodowało istotnego przyrostu zawartości składników, dopiero dawka 100 $kg \cdot ha^{-1}$ i jej zwiększenie do 150 $kg \cdot ha^{-1}$ dawało istotne wzrosty zawartości włókna surowego i o-dihydroksyfenoli w ziarnie. Azot zaliczany jest do najważniejszych pierwiastków plonotwórczych, mających niewątpliwie też największy wpływ na parametry jakościowe ziarna i mąki m.in. zawartość białka i glutenu mokrego, rozpływalność glutenu, liczbę opadania, wskaźnik sedymentacji Zeleny'ego, wodochłonność mąki czy objętość pieczywa (Mazurek i in. 1999, Wróbel i Szempliński 1999, Rutkowska 2002, Ralcewicz i Knapowski 2004, Kocoń 2005, Podolska 2007). W przypadku nawożenia siarką (czynnik II) analiza wyników badań wykazała korzystny wpływ siarki na wzrost zawartości: glutenu (4,2%), cysteiny (5,5%), metioniny (13,7%) i tłuszczu (17,0%) oraz włókna surowego (błonnika)

(7,6%), flawonoidów (14,3%), o-dihydroksyfenoli (9,4%) i popiołu (6,4%) w stosunku do obiektów bez nawożenia S. Nawożenie pszenicy ozimej siarką, w dawce 60 kg $S \cdot ha^{-1}$, w badaniach Podleśnej i in. (2003) prowadziło do wzrostu zawartości białka (o 1%) i glutenu w ziarnie (o 2%). Natomiast Klikocka i in. (2016) wykazali dodatkowo korzystny wpływ nawożenia siarką na zwiększenie zawartości w ziarnie cysteiny i metioniny.

Zboża i ich przetwory współczesnemu człowiekowi dostarczają w dziennej racji pokarmowej około 30% energii i białka oraz około 54% węglowodanów. Oprócz składników energetycznych są one bogatym źródłem licznych substancji bioaktywnych. Część z nich wykazuje właściwości prozdrowotne. Uwzględniając obecne zalecenia dietetyczne, wskazujące na zwiększenie spożycia produktów zbożowych pełnoziarnistych, badanie substancji bioaktywnych zbóż jest aktualnie bardzo ważnym zagadnieniem naukowym. Liczne badania wskazują na kluczową rolę tych związków, szczególnie przeciwutleniaczy w obniżaniu ryzyka zapadania na choroby układu krążenia, nowotworowe oraz w spowalnianiu procesów starzenia się (Rothkaehl 2011, Manach i in. 2004, Zieliński i in. 2012, Klikocka i Marks 2018). W ziarniakach zbóż znajdują się liczne przeciwutleniacze: fenolokwasy oraz ich estry i glikozydy, flawonoidy, fitoestrogeny (lignany), fitosterole, tokoferole i tokotrientole, karetonoidy, melatonina, fosforany inozytolu, glutation, mikroelementy (Fe, Se, Cu, Zn i Mn) wchodzące w skład enzymów antyoksydacyjnych (peroksydaza glutationowa, dysmutaza nadtlenkowa). Fitoestrogeny oraz fitosterole są również ważnymi związkami o aktywności hormonalnej. Związkami odżywczymi, również o właściwościach prozdrowotnych są ponadto: witaminy E i C, witaminy z grupy B oraz niezbędne kwasy tłuszczowe (NNKT) (Ciołek i Makarska 2004, Vitaglione i in. 2008).

Produkty zbożowe w 65% są źródłem błonnika pokarmowego, który zapobiega chorobom cywilizacyjnym to jest: cukrzycy, miażdżycy, otyłośći, próchnicy, chorobie niedokrwiennej serca, zaparciu (Vitaglione i in. 2008). Aminokwasy, peptydy, białka zapewniają prawidłową budowę tkanek, regulują procesy metaboliczne i ułatwiają przyswajanie składników metabolicznych. Wielonasycone kwasy tłuszczowe przeciwdziałają chorobom krążenia, hamują stany zapalne i alergię, umożliwiają prawidłowy rozwój układu nerwowego. Szczególnie cenne są witaminy antyoksydacyjne A (β-karoten) oraz C i E. Flawonoidy wpływają na hamowanie rozwoju nowotworów, cukrzycy typu II i miażdżycy. Również podczas procesów technologicznych, np. podczas wypieku chleba, w wyniku reakcji Maillarda powstają korzystne produkty, takie jak melanoidyny i pronylo-L-lizyna. Mają one silne właściwości przeciwutleniajace i przeciwnowotworowe (Slavin 2000). Człowiek dziennie spożywa około 3,5 kg tlenu, z czego 2,8% nie jest redukowana i prowadzi do

powstania wolnych rodników. Obroną jest spożywanie produktów, zawierających antyoksydanty czyli przeciwutleniacze, które hamują znacząco procesy utleniania (Zielińska i Zieliński 2009). Zboża w diecie są głównym źródłem przeciwutleniaczy, takich jak: flawonoidy, kwasy fenolowe, lignany, selen (Weider i in. 2000; Biesalski i in. 2009). Największy udział w kwasach fenolowych w ziarniakach pszenicy ma kwas ferulowy, *p*kumarowy i wanilinowy (Nijveldt 2001, Zieliński i Kozłowska 2000, Zieliński i in. 2001, Zieliński 2002, Gawlik-Dziki 2004, Marciniak i Obuchowski 2006).

W przypadku wszystkich wymienionych cech jakościowych i prozdrowotnych ziarna pszenicy jarej nie wykazano statystycznie istotnego współdziałania czynników zastosowanych w doświadczeniu. Pomimo tego, chociaż nie potwierdzono tego statystycznie można zauważyć, że wszystkie analizowane cechy na tle wzrastających dawek azotu i dodatku siarki wykazały dodatni trend zmian ich wartości. Oznacza to, że porównując interakcję czynnika II (nawożenie siarką) na tle różnych poziomów czynnika I (nawożenie azotem) stwierdzono korzystną reakcję, wynikającą z dodatniego oddziaływania dodatku siarki do nawożenia azotem. W przypadku czynnika pogodowego zaobserwowano jego istotny wpływ w odniesieniu do wszystkich badanych cech. Zjawisko to należy tłumaczyć *prawem malejących przyrostów produkcji (prawo Mitscherlicha)* (Grzebisz 2009). Generalnie należy stwierdzić, że wysoką efektywność plonotwórczą siarki można jednak osiągnąć tylko w warunkach jej dużego niedoboru (Walker i Booth 1994, Jakubus 2002, Wielebski 2006, Szulc 2008, Grzebisz 2008, 2009). Zdaniem Adiputry i Andersona (2005), Eriksena i in. (2001) oraz Inala i in. (2003) dodatnie zależności między dawką siarki a zawartością tego składnika w roślinie wskazują na niewielką zdolność do redystrybucji tego składnika i mogą charakteryzować dostępność siarczanów w glebie.

W badaniach własnych stwierdzono zależność pomiędzy zawartością siarki w ziarnie pszenicy jarej i wielkością plonu ziarna. Można na tej podstawie wysnuć wniosek, że siarka nie podlegała efektowi rozcieńczenia i jej zawartość kształtowała się na optymalnym poziomie do końca wegetacji roślin. Ponadto wykazano istotny wpływ czynnika pogodowego na wielkość plonu ziarna i jego strukturę oraz cechy jakościowe i prozdrowotne ziarna pszenicy jarej. Warunki meteorologiczne: opady i temperatura powietrza w okresie wegetacji pszenicy jarej w roku 2014 (dość wilgotny) wpłynęły istotnie korzystnie na masę tysiąca ziaren i liczbę kłosów na 1 m^2. W roku 2016 (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) najkorzystniejsze wartości otrzymano w przypadku plonu ziarna, liczby ziaren w kłosie, MTZ i masy ziarna z kłosa. W roku 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) wartość badanych cech była istotnie niższa niż w 2014 i 2015 roku. Warunki pogodowe w latach 2014-2016 nie

wpływały istotnie na zróżnicowanie zawartości glutenu, cysteiny i metioniny w ziarnie pszenicy jarej. Pozostałe cechy jakościowe ziarna podlegały modyfikacjom pod wpływem pogody. Rozkład pogody w roku 2014 (dość wilgotny) sprzyjał akumulacji białka ogólnego i tłuszczu. Sezon wegetacyjny 2015 (suchy na pograniczu dość suchego) sprzyjał większości badanych cech jakościowych i prozdrowotnych ziarna. Natomiast sezon wegetacyjny 2016 (dość wilgotny na pograniczu optymalnego) ograniczał zawartość białka ogólnego i tłuszczu w ziarnie pszenicy jarej. Rozkład pogody w 2016 roku powodował jednakże wzrost flawonoidów i o-dihydroksyfenoli w ziarnie pszenicy jarej.

W kształtowaniu plonu ziarna dużą rolę odgrywa suma i rozkład opadów. Dmowski i in. (2008) wykazali zależność plonu od liczby dni z opadem w okresie od marca do lipca. Plony ziarna osiągane przy 80 dniach z opadem były wyższe o około 0,7 $t \cdot ha^{-1}$ niż przy 58 dniach. Z badań Radzkiej i in. (2009) wynika, że posuchy występujące w kwietniu sprzyjają plonowaniu pszenicy jarej, natomiast występujące w maju i czerwcu obniżają plony tej rośliny. Także Dmowski i Dzieżyc (2009) stwierdzili, że największe potrzeby opadowe pszenica jara wykazuje w czerwcu. Optimum w tym okresie wynosi około 100 mm, przy czym w warunkach kompleksu pszennego dobrego czynnik ten zwiększał plon o 0,98 $t \cdot ha^{-1}$, natomiast kompleksu żytniego bardzo dobrego o 0,41 $t \cdot ha^{-1}$. Zdaniem Grzebisza (2009) krytyczna faza zapotrzebowania zbóż na wodę przypada na okres od fazy strzelania w źdźbło (BBCH 31) aż do wzrostu ziarniaka (BBCH 71). Niedobór wody w tym okresie redukuje liczbę ziarniaków na jednostce powierzchni, co oznacza z reguły obniżkę plonu ziarna. Natomiast masa 1000 ziaren kształtuje się po zawiązaniu się ziarniaków i zależy głównie od dostępności wody (poza azotem i potasem) oraz od temperatury (i odżywienia siarką) (Grzebisz 2008). Zdaniem Grzebisza (2008) zbyt wysoka temperatura powoduje intensywną hydrolizę białek liści, tym samym degradację chlorofilu, który zawiera azot. W następstwie tego zjawiska liście wiążą mniej dwutlenku węgla i okres nalewania ziarniaka ulega skróceniu, a konsekwencją tego jest mniejsza MTZ. Ten okres również jest krytyczny dla siarki. Obserwowano istotny wpływ czynnika pogodowego w odniesieniu do większości badanych cech. Jedynie wskaźnik sedymentacji Zeleny'ego i liczba opadania nie zależały od warunków pogodowych. Woźniak i Staniszewski (2007) podają, że warunki pogodowe mają wpływ na cechy jakościowe ziarna. W badaniach cytowanych autorów mniejsza suma opadów atmosferycznych i większa suma temperatury powietrza sprzyjały wyższej zawartości białka i glutenu w ziarnie pszenicy oraz wyższej wartości wskaźnika Zeleny'ego. Woźniak i Staniszewski (2007) wskazują ponadto za innymi autorami, że (1) szczególnie negatywnie na plon ziarna i jego jakość wpływają niedobory opadów w okresie kłoszenia, kwitnienia i

zawiązywania ziarniaków; (2) ciepłe i umiarkowanie wilgotne miesiące letnie zwiększają zawartość białka w ziarnie; (3) chłodna i wilgotna pogoda w tym okresie zwiększa aktywność alfa-amylazy, co prowadzi do porastania ziarna; (4) umiarkowanie suchy i ciepły sezon wegetacyjny sprzyja gromadzeniu białka w ziarnie pszenicy ozimej, a zwłaszcza dużej zawartości glutenu oraz wysokiej wartości wskaźnika sedymentacji Zeleny`ego.

Przeprowadzona analiza wariancji wykazała, że różnice w zawartości wszystkich badanych pierwiastków chemicznych: azotu, siarki, fosforu, potasu, magnezu, wapnia, sodu, żelaza, manganu, cynku, miedzi, chloru, krzemu, boru, jodu, cyny, chromu, molibdenu, fluoru, selenu, niklu kobaltu, wanadu i wolframu były statystycznie istotne w zależności od zastosowanej dawki azotu (czynnik I). Podobnie było w przypadku dodatku do nawożenia siarki (czynnik II), z wyjątkiem zawartości niklu. Analiza wariancji w przypadku większości wymienionych pierwiastków nie wykazała statystycznie istotnego współdziałania czynników zastosowanych w doświadczeniu. Tylko współdziałanie azotu i siarki wystąpiło w odniesieniu do zawartości jodu. Podobny układ w przeprowadzonej analizie wariancji uzyskano dla akumulacji pierwiastków w ziarnie pszenicy jarej. Nie stwierdzono tylko istotnego wpływu nawożenia azotem na akumulację niklu i nawożenia siarką na akumulację boru i niklu.

Zawartość i pobranie pierwiastków chemicznych (makro- i mikroelementów) zależy od wielu czynników, między innymi od: gatunku rośliny (Ciołek i in. 2012), odmiany (Korzeniowska 2015), warunków środowiska i uwarunkowań agronomicznych (Gao i in. 2012, Woźniak i Staniszewski 2007, Woźniak i Stępniowska 2017). Nawożenie siarką wykazuje korzystny wpływ na wzrost zawartości w ziarnie zbóż ogólnego-N, P, K, Na, Ca i Mg (Barczak i Nowak 2013). Ziarno pszenicy uprawianej według średnio intensywnej technologii zawierało w $mg \cdot kg^{-1}$: 2,55 - Cu, 25,6 – Mn, 22,9 - Fe, and 21,6 – Zn (Woźniak i Stępniowska 2017). W badaniach Wojtkowiak i in. (2018) zawartość tych składników w ziarnie była następująca ($mg \cdot kg^{-1}$): 1,81 - 2,20 Cu, 40,7 - 54,5 Fe, 19,1 - 25,6 Zn i 24,6 - 29,0 Mn. Kabata-Pendias i Pendias (1999) podają, ziarno zbóż zawiera ($mg \cdot kg^{-1}$): 10-140 Al, 0,03-0,6 As, 0,2-4 B, 0,03-0,5 Cd, 0,15-0,6 Co, 0,003-0,4 Cr, 2,6-6,0 Cu, 2-8 F, 0,03-0,1 Hg, 0,21-0,6 Mo, 10,45 Mn, 0,1-0,5 Ni, 0,2-0,5 Pb, 0,005-0,046 Se, 0,06-0,1 V, 15-60 Zn. Podobne zakresy zawartości pierwiastków w ziarnie pszenicy jarej obserwowano w badaniach własnych. Barker i Pilbeam (2015) i inni badacze podają, że zawartość chloru w kłosach pszenicy wynosi od 200 do 22000 $mg \cdot kg^{-1}$.

Według Kabaty-Pendias i Pendias (1999) 17 pierwiastków śladowych uważa się obecnie za niezbędne do rozwoju większości roślin, a mianowicie: Al, B, Br, Cl, Co, Cu, F, Fe, I, Mn, Mo, Ni, Rb, Si, Ti, V, Zn. Natomiast za niezbędne dla człowieka uważa 20 pierwiastków

śladowych: As, B, Br. Cl, Cr, Co, Cu, F, Fe, I, Li, Mn, Mo, Ni, Se, Si, Sn, V i Zn. Wymienia się także istotne znaczenie na poziomie bardzo małych koncentracji ($ng \cdot kg^{-1}$), nastepujących pierwiastków: Ba, Cd, Pb, Rb, Sr, Ti, ale ich funkcja nie została jeszcze określona. Zapotrzebowanie organizmów na pierwiastki śladowe ustala się na ogół w odniesieniu do całodziennej diety. Przeprowadzone ostanio badania wskazują na mozliwość wystąpienia niedoborów niektórych pierwiastków śladowych w grupach całych populacji, np. żelaza (zwłaszcza u młodych kobiet), cynku i selenu (Kabata-Pendias i Pendias 1999). Pieczyńska i in. (2011) twierdzą, że w Polsce produkty zbożowe w 50% pokrywają zapotrzebowanie na pierwiastki, w tym szczególnie, K, P, Mg, Fe, Zn i Cu.

W literaturze poświęca się wiele uwagi kwestii nawożenia azotem pszenicy wysokiej jakości i jego wpływu na wielkość plonu ziarna i zawartość w nim składników odżywczych (Pilbeam 2015). We własnych badaniach wykazano, że wszystkie dawki azotu powodowały wzrost makroelementów w ziarnie pszenicy jarej. Kozera i in. (2018) stwierdzili podobną zależność, natomiast Brzozowska (2008) nie zaobserwowała znaczącego wpływu nawożenia azotem na zawartość makroskładników w ziarnie pszenicy ozimej, z wyjątkiem azotu i potasu. Według Nogalskiej i in. (2012) główne znaczenie w kształtowaniu zawartości i pobraniu makroelementów odgrywa odmiana pszenicy i wielkość plonu ziarna. W ośmioletnim doświadczeniu (1999-2007) Shi i in. (2010) badali wpływ nawożenia azotem w dawkach 0, 130 i 300 kg ha^{-1} na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy ozimej. Jak wynika z badań pod wpływem nawożenia N wzrastała zawartość żelaza (Fe), (Zn), i miedzi (Cu), natomiast nie zmieniała się zawartość manganu (Mn). Kutman i in. (2011, 2012) informują, że pobraniu Fe i Zn przez pszenicę twardą sprzyja nawożenie azotem. Także Xue i in. (2012) opisują korzystny wpływ nawożenia N na zawartość i akumulację Zn. Natomiast Williams i Vlamis (1971) stwierdzili, że zawartość Mn w roślinach zależała of formy zastosowanego nawożenia azotem i zwiększała się w następującej kolejności: $(NH_4)_2SO_4 > NH_4NO_3 > Ca(NO_3)_2$.

W badaniach własnych dodatek siarki do nawożenia N wpłynął istotnie dodatnio na zawartość w ziarnie makroelementów. Jak donoszą Barczak i Nowak (2013), siarka stosowana do nawożenia jęczmienia spowodowała niewielki spadek P, K i Ca oraz wzrost Mg w ziarnie owsa w porównaniu z wariantami bez siarki. Natomiast Gondek i Gondek (2010), nie obserwowali istotnych różnic w zawartości Mg w ziarnie pszenicy pod wpływem dodatku siarki do nawożenia NPK. Również Skwierawska i in. (2008) stwierdzili, że nawożenie mineralne z dodatkiem siarki nie różnicuje zawartości P i K w ziarnie jęczmienia jarego. Grant i Hawkesford (2015) twiedzą, że siarka sprzyja pobieraniu fosforu, zwłaszcza

w glebach zasadowych. Autorzy ci wskazują na lepsze pobieranie przez rośliny, w warunkach dostatku siarki: Mo, Ni, Zn, Fe, Cu, Al, Hg, Pb, Cd i Se. Również Klikocka i in. (2017) wykazali, że nawożenie siarką podwyższa w ziarnie poszency jarej odmiany Tybalt zawartość i pobranie Se, odpowiednio o 20,8% i 25,3% w odniesieniu do średniej zawartości i pobrania: 0.025 $mg \cdot kg^{-1}$ i 0,419 $g \cdot ha^{-1}$.

Całkowita zawartość pierwiastków w większości gleb mineralnych, jak Fe, Zn i Cu byłaby wystarczająca dla zaspokojenia potrzeb pokarmowych roślin uprawnych, lecz pod warunkiem ich fitodostępności (Shuman 1998). Siarka współdziała z pierwiastkami śladowymi poprzez wpływ na chemię gleby, dynamikę pobrania i transportu pierwiastków do korzeni rośliny. Dlatego siarka może pośrednio wpływać na dostępność wielu pierwiastków śladowych, w tym Zn, Fe i Mn poprzez zmniejszenie pH gleby (Soliman i in. 1992). Gleby zasadowe często zawierają duże ilości Fe, ale może być ono niedostępne dla roślin. Dostępność Fe w rhizosferze może być zwiększona przez zakwaszenie gleby za pomocą siarki elementarnej (Shuman 1998).

Niezbędnym elementem diety są makro- i mikroelementy (Barker i Pilbeam 2015, Klikocka i in. 2018, Barczak i in. 2018). Na przykład siarka jest materiałem budulcowym tkanek, a żelazo i miedź bierze udział w powstawaniu erytrocytów i hemoglobiny (Klikocka, Marks 2018). Także niski status Se w organizmie człowieka może zwiększać ryzyko chorób układu krążenia, raka i innych chorób spowodowanych przez wolne rodniki (Ducsay i in. 2009, Rayman 2000, Klikocka i in. 2017, Klikocka i in. 2020).

Pomiędzy zawartością i akumulacją pierwiastków chemicznych: z grupy makro- i mikroelementów a plonem ziarna pszenicy jarej stwierdzono liczne korelacje. Istotnie dodatnie korelacje pomiędzy zawartością i akumulacją a plonem ziarna odnotowano w przypadku, plon ziarna ↔ zawartość i akumulacja pierwiastka: azot (N), siarka (S) fosfor (P), potas (K), wapń (Ca), magnez (mg), chlor (Cl), sód (Na), żelazo (Fe), mangan (Mn), cynk (Zn), miedź (Cu), krzem (Si), jod (I), cyna (Sn), chrom (Cr), kobalt (Co), wanad (V) i wolfram (W). Jak podaje Grembecka (2007) stopień przyswajania pierwiastków chemicznych zależy od wielu czynników wśród których można wyróżnić skład pożywienia jak i cechy indywidualne (Kabata-Pendias i Pendias 1999). Jednakże istotna jest nie tylko zawartość danego pierwiastka, ale również wzajemny stosunek ilościowy poszczególnych składników mineralnych. Dzięki temu, że cynk, miedź, selen, żelazo, mangan, magnez i wapń wykazują działanie antagonistyczne w stosunku do kadmu, a żelazo, miedź, cynk, magnez, selen, wapń, potas i fosfor w stosunku do ołowiu można tak skomponować posiłki by częściowo zniwelować działanie toksyczne takich metali jak kadm i ołów (Dobrzański i in. 1996).

Dostarczenie organizmowi pierwiastków śladowych we właściwej proporcji i ilości jest możliwe jedynie przy urozmaiconej diecie. Zarówno niedobory, jak i nadmierne spożywanie składników mineralnych mogą mieć szkodliwe oddziaływanie, gdyż różnica między dawką niezbędną a toksyczną jest zazwyczaj bardzo mała (Grembecka 2007).

Pomiędzy plonem ziarna a zawartością boru (B) i selenu (Se) korelacje były dodatnie lecz statystycznie nieistotne. Wystąpiła natomiast dodatnia istotna korelacja pomiędzy plonem ziarna pszenicy jarej a akumulacją w suchej masie ziarna boru (B) i selenu (Se). Pomiędzy plonem ziarna a zawartością i akumulacją w ziarnie molibdenu (Mo) korelacje były dodatnie, lecz statystycznie nieistotne. Ujemna, statystycznie istotna korelacja wystąpiła pomiędzy plonem ziarna a zawartością w ziarnie fluoru (F) i niklu (Ni). Natomiast pomiędzy plonem ziarna a akumulacją wymienionych pierwiastków korelacja była również ujemna, lecz statystycznie nieistotna.

Wielu autorów informuje, że rośliny nisko plonujące zawierają więcej składników odżywczych na jednostkę masy w stosunku do dostępnych składników odżywczych gleby niż rośliny wysokoplonujące, niezależnie od zawartości składników odżywczych w glebie (Cakmak 2002). Jest to zjawisko koncentracji i rozcieńczania. Kiedy roślina wydaje wysoki plon nie jest w stanie pobrać dużych ilości składników pokarmowych z gleby. W związku z tym składniki mineralne już pobrane są rozcieńczane w zwiększonej masie rośliny, a ich zawartość w roślinach w stosunku do dostępnych elementów w glebie zmniejsza się wraz ze wzrostem wydajności. Zjawisko to nie zostało jednak potwierdzone we własnym badaniu.

Pomiędzy zawartością pierwiastków w ziarnie i akumulacją ich w suchej masie ziarna zachodziły liczne korelacje. Makroelementy i mikroelementy, w większości istotnie dodatnio korelowały pomiędzy sobą, zarówno w przypadku ich zawartości w ziarnie, jak i ich akumulacji w suchej masie ziarna. Zauważono we własnych badaniach, że tendencję do tworzenia korelacji z zawartością niektórych innych pierwiastków miały generalnie fluor i nikiel. Ponadto stwierdzono także nieliczne korelacje ujemne pomiędzy zawartością, manganu, cynku, miedzi, boru, molibdenu, fluoru i niklu a innymi pierwiastkami. W przypadku akumulacji pierwiastków dodatnie korelacje z reguły wystąpiły między makroelementami i pozostałymi pierwiastkami. Mikroelementy z innymi mikroelementami miały często ujemne korelacje. To oznacza, że podlegały silniejszej konkurencji w pobieraniu przez ziarno pszenicy jarej. Jako pierwiastki śladowe podlegały interakcjom ujemnym pomiędzy sobą w warunkach zmiany warunków glebowych (roztworu glebowego) powodowane nawożeniem azotem i siarką. Kabata-Pendias i Pendias (1999) podają, że w organizmach żywych siarka powoduje antagonizmy z As, Ba, Fe, Mo, Pb, Se i Zn. Siarka jest

natomiast w synergii z F i Fe. Synergię tworzy Ca z Cu, Mn, Zn, a także podlega jej również związek Mg z Al, Zn oraz P z Al, B, Cu, F, Fe, Mo, Mn, Zn, a także N z B, Cu, Fe, Mo. Antagonistą N jest B, F, Cu i Mn. Wiekszość interakcji pomiędzy pierwiastkami głównymi i śladowymi są to antagonizmy lub interakcje obojętne.

Interakcje pomiędzy składnikami składników odżywczymi mogą wystąpić na powierzchni korzenia lub w obrębie rośliny i mogą być podzielone na dwie główne kategorie. W pierwszej kategorii są interakcje, które występują między jonami, ponieważ jony są w stanie utworzyć wiązanie chemiczne. Interakcje w tym przypadku są spowodowane powstawaniem osadów lub kompleksów. Na przykład ten rodzaj interakcji występuje, gdy wapnowanie kwaśnych gleb zmniejsza stężenie prawie wszystkich mikroelementów z wyjątkiem molibdenu. Także, przykładowo Cu jest silniej związana przez substancję organiczną i zmiana pH gleby nie wpływa istotnie na pobranie Zn przez roślinę. Odwrotną tendencję wykazuje cynk (Fageria 2001). Druga forma interakcji występuje pomiędzy jonami, których właściwości chemiczne są na tyle podobne, że konkurują one o miejsce adsorpcji, transportu i funkcji na powierzchniach korzeni roślin lub w tkankach roślinnych. Takie interakcje są bardziej powszechne między składnikami mineralnymi o podobnej wielkości, ładunku, geometrii koordynacji i konfiguracji elektronowej (Grzebisz 2009). Współdziałania kation-kation i anion-anion występują głównie na poziomie błony i mają przede wszystkim charakter konkurencyjny, co następuje po dodaniu dwóch składników pokarmowych. Występuje wtedy interakcja synergiczna (pozytywna), co wpływa na wzrost plonów i wzrost zawartości i pobrania składników mineralnych (Hiatt i Legget 1974). Podobnie, jeśli dodanie dwóch składników pokarmowych powoduje spadek plonu rośliny interakcje są negatywne (antagonistyczne). Gdy nie ma zmian, nie ma interakcji. W prezentowanym doświadczeniu wystąpiła interakcja pozytywna (synergiczna, addytywna), bowiem suplementacja do nawożenia N dodatku siarki wpłynęła na wzrost plonu ziarna i poprawę w większości badanych cech, w tym zawartości i pobrania pierwiastków chemicznych.

Metaliczne mikroelementy mogą wchodzić w interakcje z Fe, co przejawia się w ograniczeniu akumulacji Fe w roślinie. Interakcja między Mn i Fe w ich absorpcji przez rośliny jest znana od dłuższego czasu (Johnson 1917). Jon Mn^{2+} ma podobne właściwości do kationów alkalicznych, takich jak Ca^{2+} i Mg^{2+} oraz metali ciężkich, takich jak Zn^{2+} i Fe^{2+}; w ten sposób jony te wpływają na absorpcję i transport manganu. Obserwowano, że w przypadku zawartości Cu i Fe w źdźbłach pszenicy wystapił anatagonizm, co może może prowadzić do niedoboru Fe (Michaud i in. 2008). Niedobór jednego składnika odżywczego może znacznie zwiększyć absorpcję jednego lub więcej innych składników odżywczych

(Kochian 1991). Stwierdzono również pobieranie wyrównawcze mikroelementów pod wpływem stresu związanego z niedoborem między Mn^{2+} i Cu^{2+} lub Zn^{2+} (del Rio i in. 1978), Zn^{2+} i Fe^{2+} lub Cu^{2+} (Rengel i Graham 1995).

W badaniach własnych wykazano istotny wpływ pogody na zawartość i akumulację makro- i mikropierwiastków w ziarnie pszenicy jarej. Takie zależności w przypadku Fe, M, Cu i Zn stwierdzili również Woźniak i Stępniowska (2017). Zauważyli, że niska zawartość miedzi występowała w latach z małymi opadami atmosferycznymi i wysoką temperaturą, podobnie jak w badaniach własnych. Natomiast na zawartość Fe, Mn and Zn w ziarnie pszenicy warunki pogodowe nie miały istotnego wpływu odmiennie niż naszych badaniach. Wymienieni autorzy donoszą, też że duże sumy opadów ułatwiły nagromadzenie P w ziarnie, podczas gdy niedobory przyczyniły się do większej akumulacji potasu i magnezu w ziarnie.

Wraz z intensyfikacją upraw roślin zbożowych w celu zwiększenia plonów niezbędne jest bilansowanie nawożenia azotowego z siarką. Stwierdzonego bowiem niedobór siarki przyswajalnej w glebach Polski (poprzez zaostrzenie norm środowiskowych, wpływających na emisję SO_2 do atmosfery oraz niedostateczną ilość stosowania obornika) (Klikocka i in. 2015). Niedożywienie roślin siarką może wywołać skutek „prawa minimum", jednocześnie intensywne nawożenie roślin azotem może spowodować spadek jego wykorzystania. Metabolizm siarki w roślinie jest ściśle związany z metabolizmem azotu i stosunek N:S we wskaźnikowych częściach roślin zależnie od gatunku powinien wynosić 15-10:1 (Oenema i Postma 2003). Zagadnienie optymalnego stosunku N:S ma również wymiar środowiskowy, gdyż niedobór siarki prowadzi do obniżenia efektywności działania i stopnia wykorzystania azotu ze stosowanych powszechnie nawozów azotowych, w tym organicznych i naturalnych. Zawężenie relacji N:S w roślinie prowadzi do akumulacji nieorganicznych związków siarki, natomiast rozszerzenie tego stosunku zwiększa akumulację niebiałkowych form azotu (amidów, aminokwasów czy nawet azotanów) (Hesse i in. 2015). Zatem rodzaj i poziom nawożenia mineralnego zbóż może mieć wpływ nie tylko na zwiększenie produktywności, ale na jakość plonów, a więc skład chemiczny i aktywność biokomponentów ziarna. Bardzo ważną cechą w ocenie nawożenia azotem i siarką jest stosunek N:S w ziarnie pszenicy jarej. Zarówno nawożenie azotem, jak i dodatek siarki do nawożenia NPK nie miały istotnego wpływu na stosunek N:S w ziarnie. Wyniósł on średnio 20,33. Istotnie natomiast na stosunek N:S wpływała pogoda w sezonach wegetacyjnych. Najszerszy stosunek N:S (21,79) odnotowano w sezonie 2014, który określono jako dość wilgotny. Istotnie węższy stosunek N:S w ziarnie wystąpił w sezonie wegetacyjnym 2014, który określono jako suchy na pograniczu dość suchego. Natomiast istotnemu zawężaniu stosunku N:S w ziarnie w

odniesieniu do omówionych sezonów sprzyjał rozkład pogody w roku 2016), uznanego jako dość wilgotny na pograniczu optymalnego. Zatem sezon wegetacyjny 2016 należy przyjąć jako najbardziej korzystny dla stosunku N:S, który optymalnie w świetle innych badań powinien wynosić jak 1:15 (Oenema i Postma 2003). Fotyma (2003) prowadząc badania nad nawożeniem pszenicy jarej siarką, wykazała że zastosowanie dawki 60 kg S·ha^{-1} zwiększyło plon ziarna i pobranie azotu, nie miało natomiast wpływu na akumulację siarki w ziarnie. Ponadto stwierdziła, że siarka zwiększa plony roślin w sposób pośredni, wpływając na przemiany azotu w roślinie. Za miarodajny wskaźnik zaopatrzenia roślin w siarkę uznaje się stosunek N:S w białkach. Zdaniem Oenemy i Postmy (2003) wynosi on 15:1. We własnych badaniach stosunek N:S w ziarnie pszenicy jarej był szerszy i wynosił średnio 20,33:1, przy czym należy stwierdzić, że nawożenie azotem rozszerzało stosunek N:S, a nawożenie siarką nie zmieniało tej relacji.

Zastosowanie azotu w dawce 50 kg·ha^{-1} w stosunku do obiektu kontrolnego (bez azotu) powodowało przyrost plonu ziarna pszenicy jarej o 2,01 kg na 1 kg azotu zastosowanego w nawozie. Zwiększenie dawki azotu do 100 kg·ha^{-1} spowodowało zwiększenie przyrostu ziarna do 10,26 kg na 1 kg azotu, natomiast zastosowanie dawki azotu w ilości 150 kg·ha^{-1} przyczyniło się do zmniejszenia przyrostu ziarna do 8,45 kg na 1 kg azotu. Oznacza to spadek efektywności rolniczej nawożenia azotem przy dawce 150 kg·ha^{-1}. Największy przyrost ziarna na 1 kg zastosowanego azotu wykazano w przypadku zwiększenia dawki azotu z 50 do 100 kg·ha^{-1}, gdzie uzyskano przyrost ziarna aż 18,82 kg na każdy kg azotu.

Podleśna i in. (2018) podaje, że spośród dawek azotu uwzględnionych w badaniach, największą efektywność rolniczą osiągnięto zwiększając nawożenie azotem żyta jarego do 60 kg·ha^{-1} z równoczesnym dodatkiem siarki (ERN = 14,53 kg).

Zastosowanie najniższej dawki azotu 50 kg·ha^{-1} i dodatku siarki w ilości 40 kg·ha^{-1} powodowało przyrost plonu ziarna w ilości 6,11 kg na 1 kg azotu, co stanowiło aż 3-krotny wzrost efektywności rolniczej azotu w stosunku do obiektu bez siarki. Oznacza to, że siarka istotnie zwiększa efektywność pobierania azotu przez ziarno pszenicy jarej. Spośród badanych kombinacji najwyższą efektywność wykorzystania azotu wykazano w układzie 50 N ↔ 100 N + 40 S, czyli zwiększenie nawożenia azotem do 100 kg·ha^{-1} z równoczesnym dodatkiem siarki powodowało przyrost plonu ziarna w ilości 22,63 kg na każdy zastosowany kg azotu suplementowany nawożeniem siarką. Potwierdzają to także kombinacje 50 N + 40 S ↔ 100 N + 40 S, gdzie uzyskano przyrost plonu ziarna w ilości 18,53 kg na każdy kg zastosowanego w nawozach azotu przy dodatku siarki. Dawka azotu w ilości 150 kg·ha^{-1} bez i z dodatkiem siarki była nieefektywna rolniczo, bowiem spowodowała zmniejszenie przyrostu

plonu ziarna w stosunku stwierdzonego na dawce 100 kg·ha^{-1}. Wojciechowski (2009) oraz Klikocka i Cybulska (2014) stwierdzili, że zastosowanie nawożenia azotowego w uprawie pszenicy jarej poprawiło znacznie efektywność rolniczą tego składnika. Efektywność była korzystniejsza, średnio dla układu kombinacji 0–80 kg N i 0–120 kg N. Efektywność fizjologiczna, podobnie jak rolnicza, zmniejszała się wraz ze wzrostem dawki N. Po zastosowaniu 40 kg·ha^{-1} była ponad dwukrotnie większa niż na dawce 80 kg i blisko 2,5-krotnie od stwierdzonej w warunkach najwyższej dawki N. Najlepsze wykorzystanie azotu mineralnego przez pszenicę stwierdzono przy nawożeniu 40 i 80 kg N·ha^{-1}. Zjawisko to zostało potwierdzone również we własnych badaniach.

Podleśna i in. (2018) wykazali, że największe wykorzystanie N przez żyto jare wystąpiło po zastosowaniu azotu w dawce 60 kg·ha^{-1}. Natomiast wykorzystanie siarki na obiekcie kontrolnym (bez nawożenia azotem) wyniosło 0,35% a największe wykorzystanie tego składnika stwierdzono po zastosowaniu azotu w dawkach 60 i 90 kg·ha^{-1} w połączeniu z siarką w ilości 40 kg·ha^{-1} i wynosiło odpowiednio 3,18 i 3,80%. Wojciechowski (2009) wykazał ponadto, że po zwiększeniu dawki N z 40 do 80 kg·ha^{-1} wykorzystanie azotu było o 38,6% wyższe niż dla przedziału nawożenia 80–120 kg i o 72,7% niż w przedziale 0–40 kg·ha^{-1}. Małe wykorzystanie azotu dla przedziału 0–40 kg·ha^{-1} zdaniem Wojciechowskiego (2009) oraz Klikockiej i Cybulskiej (2014) może dowodzić, że dawka ta również bardziej wpływała na poprawę stanu roślin i budowanie części wegetatywnych, a dopiero dalsza intensyfikacja nawożenia azotem powoduje lepsze wykorzystanie azotu w przyroście masy ziarna. Potarzycki (2003) podaje, że wykorzystanie azotu przez jęczmień jary oraz efektywność agronomiczna nawożenia azotem zależały od nawożenia siarką. Po zastosowaniu superfosfatu prostego w dawce odpowiadającej 50 kg S·ha^{-1} wykorzystanie azotu z nawozów przez jęczmień wynosiło niemal 70%. Również wykorzystanie siarki wzrastało na obiekcie z azotem. Korzystny wpływ siarki na efektywność azotu nawozowego obserwowano w uprawie różnych gatunków roślin, zwłaszcza rzepaku (Jenzen i Bettany 1984, Pedersen i in. 1998, Delogu i in. 1998). W doświadczeniu wazonowym Eriksena (2002) aż 75% siarki zawartej w ziarnie i słomie jęczmienia jarego pochodziło z siarczanu wapnia zastosowanego przedsiewnie. Wojciechowski (2009) wykazał również, iż wskaźnik efektywności końcowej nawożenia N był ściśle skorelowany z wydajnością rolniczą tego nawożenia. Kolejne, wyższe dawki nawożenia N powodowały zmniejszenie jego końcowej efektywności wyrażonej w zł przyrostu plonu ziarna przypadającej na 1 zł w nawozie.

Zastosowanie nawożenia siarką na obiekcie kontrolnym (bez azotu) powodowało przyrost plonu ziarna pszenicy jarej w ilości 2,12 kg na 1 kg siarki w nawozie. Dodatek azotu

wraz ze wzrostem dawki powodował wprost proporcjonalny przyrost ziarna, który był najwyższy przy dawce 150 kg·ha^{-1} i wyniósł 37,18 kg na 1 kg zastosowanej siarki w nawozie. Należy jednak zauważyć, że największe przyrosty plonu ziarna były po wniesieniu dawek azotu 50 i 100 kg·ha^{-1}, a dawka najwyższa azotu (150 kg·ha^{-1}) choć powodowała jeszcze przyrost, ale był on mniejszy niż na niższych dawkach tego składnika.

Spośród badanych kombinacji nawożenia azotem i siarką należy stwierdzić, że w przypadku wskaźnika efektywności krańcowej za najkorzystniejsze należy uznać kombinacje ze stosowaniem azotu w ilości 100 kg·ha^{-1} oraz łącznym stosowaniem azotu w dawce 100 kg·ha^{-1} wraz z dodatkiem siarki w ilości 40 kg·ha^{-1}. W tych kombinacjach w stosunku do innych układów osiągano najwyższy wskaźnik efektywności krańcowej, który wynosił odpowiednio 3,36 i 2,46 zł·zł$^{-1}$ w nawozie. Układ ten może być zalecany do stosowania w praktyce nad nawożeniem azotem i siarką pszenicy jarej.

Generalnie należy stwierdzić, że w warunkach ujemnego bilansu siarki w glebach uprawnych Zamojszczyzny konieczne jest stosowanie siarki nawozowej. Na podstawie prezentowanego doświadczenia dowiedziono, że stosowanie przedsiewne siarki w ilości 40 kg·ha^{-1} w postaci kizerytu granulowanego i pogłówne dokarmianie siedmiowodnym siarczanem magnezu (10 kg S·ha^{-1}) jest satysfakcjonujące w połączeniu z nawożeniem azotem w dawkach 100 i 150 kg·ha^{-1} w formie saletry amonowej do osiągnięcia optymalnego plonu ziarna, korzystnych wartości cech struktury plonu (liczby ziaren w kłosie, MTZ) i liczby kłosów na jednostce powierzchni, a także optymalneych zawartości cech jakościowych i prozdrowotnych oraz makro- i mikropierwiastków będących celem suplementacji odżywiania w badane pierwiastki dla człowieka.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że w warunkach niedoboru siarki w glebie uprawnej i aplikacji nawozów azotowych, konieczne jest stosowanie siarki w uprawie roślin. Ponieważ rolnictwo polskie przechodzi na integrowany system produkcji, w którym stosowane nawożenie mineralne powinno być niższe lub równe pobraniu składników, proponuje się, zalecać w praktyce stosowanie nawożenia pszenicy jarej azotem w dawce 100 kg N·ha^{-1} w powiązaniu z siarką w ilości 40 kg·ha^{-1}.

Przetwory zbożowe są podstawą piramidy żywnościowej (oprócz sportu, spożywania warzyw i owoców) więc są bardzo ważne dla funkcjonowania organizmu człowieka. Jak wykazują niniejsze badania ziarno pszenicy jarej jest cennym źródłem skrobi, glutenu, białka ogólnego, aminokwasów siarkowych (cysteiny i metioniny), tłuszczu, włókna surowego (błonnika), flawonoidów, o-dihydroksyfenoli oraz zawartych w popiele cennych makro- i mikreoelemntów, będących składnikiem wielu suplementów diety, poprawiających kondycję i

zdrowie człowieka. Jak wykazano w badaniach, dodatek siarki do nawożenia azotem jest skutecznym sposobem suplementacji (wzbogacenia zawartości) wymienionych składników ziarna pszenicy jarej.

7. WNIOSKI

Badania wykazały, że pszenica jara odmiany Kandela, uprawiana na glebie brunatnej dystroficznej typowej, wytworzonej z gliny piaszczystej średnioziarnistej, zaliczonej do kompleksu żytniego dobrego wykazała dodatnią reakcję na nawożenie azotem i siarką, wyrażoną wielkością i jakością plonów. We wnioskach zestawiono najważniejsze naukowe i utylitarne osiągnięcia prowadzonych badań:

1. Najbardziej korzystny wpływ na plon ziarna pszenicy jarej oraz jego strukturę (liczba ziaren w kłosie, MTZ, masa ziarna z kłosa, liczba kłosów na 1 m^2) miało zastosowanie azotu (czynnik I) w dawkach 100 i 150 $kg \cdot ha^{-1}$ połączone z nawożeniem siarką (czynnik II) w ilości 40 $kg \cdot ha^{-1}$.

2. Nawożenie siarką, niezależnie od nawożenia azotem powodowało istotny wzrost plonu ziarna i poprawę wszystkich elementów jego struktury. Pod wpływem nawożenia siarką stwierdzono istotną poprawę wartości cech jakościowych i prozdrowotnych ziarna pszenicy jarej.

3. Nawożenie azotem zwiększało istotnie i wprost proporcjonalnie do dawki i dodatku siarki zawartość w suchej masie ziarna: azotu, siarki, fosforu, potasu, magnezu, wapnia, chloru, sodu, żelaza, cynku, miedzi, krzemu, boru, jodu, cyny, chromu, molibdenu, selenu, kobaltu, wanadu i wolframu. Nawożenie azotem obniżyło również zawartość w ziarnie manganu, fluoru i niklu, a nawożenie siarką wpłynęło negatywnie na zawartość manganu, boru, molibdenu oraz nie miało wpływu na zawartość niklu.

4. Stosowanie azotu w ilości 50 $kg \cdot ha^{-1}$ bez względu na dodatek siarki było niewystarczające. Wartości badanych cech plonu ziarna i jego jakości były silniej determinowane przez nawożenie azotem i jego współdziałanie z warunkami pogodowymi niż przez nawożenie siarką.

5. Wartości badanych cech jakościowych i prozdrowotnych ziarna pszenicy jarej, tj. zawartość glutenu, białka ogólnego, cysteiny (kwas cysteinowy), metioniny (sulfon metioniny), tłuszczu, włókna surowego, flawonoidów (suma w przeliczeniu na kwercetynę), o-dihydroksyfenoli (suma w przeliczeniu na kwas kawowy) i popiołu kształtowały się korzystnie i proporcjonalnie do wzrostu dawki azotu oraz dodatku siarki w dawce 40 $kg \cdot ha^{-1}$. Zawartość skrobi była cechą stałą i jedynie zależała od nawożenia siarką.

6. Większość badanych cech technologicznych, jakościowych i prozdrowotnych ziarna, jego skład chemiczny i akumulacja pierwiastków w suchej masie ziarna były dodatnio

skorelowane z plonem ziarna. Jedynie zawartość i akumulacja niektórych mikroelementów (fluor, nikiel) wykazały w niektórych przypadkach ujemne korelacje pomiędzy badanymi pierwiastkami.

7. Akumulacja pierwiastków chemicznych w suchej masie ziarna zależała od nawożenia azotem i siarką. Nawożenie azotem w połączeniu z siarką powodowało wzrost pobrania: azotu, siarki, fosforu, potasu, magnezu, wapnia, chloru, sodu, żelaza, cynku, miedzi, krzemu, jodu, cyny, chromu, selenu, kobaltu, wanadu i wolframu. Nawożenie azotem obniżało akumulację fluoru i powodowało trend spadkowy zawartości niklu, natomiast nawożenie siarką obniżyło zawartość manganu, boru, molibdenu i niklu.

8. Nawożenie azotem i siarką nie miało istotnego wpływu na wartość stosunku N:S. Relacja między N i S podlegała zmianie pod wpływem pogody w poszczególnych sezonach wegetacyjnych.

9. Spośród badanych kombinacji nawozowych najwyższą efektywność rolniczą osiągano w układzie nawożenia 50 N ↔ 100 N + 40 S, czyli zwiększenia nawożenia azotem do 100 $kg \cdot ha^{-1}$ z równoczesnym dodatkiem 40 kg $S \cdot ha^{-1}$. Wzrost poziomu nawożenia azotem do 150 $kg \cdot ha^{-1}$ powodował zmniejszenie efektywności agronomicznej i krańcowej, a dodatek siarki - spadek jej wykorzystania przez ziarno.

10. Najkorzystniejszy wskaźnik efektywności krańcowej osiągano na obiektach nawożonych 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ i 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ + 40 kg $S \cdot ha^{-1}$. Kombinacja 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ + dodatek siarki 40 $kg \cdot ha^{-1}$ ze względu na efektywność ekonomiczną produkcji i jakość ziarna może być zalecana do stosowania w nawożeniu pszenicy jarej.

7. PIŚMIENNICTWO

1. Adamczyk B., Godlewski M. 2010. *Różnorodność strategii pozyskiwania azotu przez rośliny*. Kosmos. Post. Nauk Biol., 59, 1-2: 211-222.
2. Adiputra I.G.K., Anderson J.W. 1995. *Effect of sulphur nutrition on redistribution of sulphur in vegetative barley.* Physiol. Plant., 95: 147-154.
3. Allaway W.H. 1986. *Soil-plant-animal and human interrelationships in trace element nutrition.* W: *Trace Elements in Human and Animal Nutrition*. W. Mertz, (ed.) Academic Press, Orlando, FL, 465-488.
4. Allen L., de Benoist B., Dary O., Hurrell R. (Eds). 2006. *Guidelines on Food Fortification with Micronutrients*. World Health Organization and Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2006.
5. Allen L.H. 2000. *Ending Hidden Hunger: the History of Micronutrient Deficiency Control*. Background Analysis for the World Bank - UNICEF Nutrition Assessment Project World Bank, 2000.
6. Ascher J.S. 1994. *Phosphorus and manganese seed coatings for crop growth and yield*. Ph.D. thesis, University of New England, Armidale, 1994.
7. Aulakh M.S. 2003. *Crop responses to sulphur nutrition.* In: Abrol Y.P, Ahmad A (eds.): *Sulphur in plants.* Kluwer Academic Publ., Dodrecht, 341-358.
8. Bac S., Kożmiński C., Rojek M. 1993. *Agrometeorolgia.* PWN Warszawa, 248 ss.
9. Barczak B., Majcherczak E. 2009. *Wpływ zróżnicowanego nawożenia siarką na wybrane elementy struktury plonu jęczmienia jarego.* J. Cent. Eur. Agric., 9 4: 777–784.
10. Barczak B. 2010. *Siarka jako składnik pokarmowy kształtujący wielkość i jakość plonów wybranych roślin uprawnych*. Rozprawa habilitacyjna 144. Wyd. Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego im. J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy, Bydgoszcz.
11. Barczak B., Nowak K. 2013. *Content of macroelements and their ionic ratios in oat grain depending on the sulphur form and dose.* J. Cent. Europ. Agric., 14(1): 114-123.
12. Barczak B., Klikocka H., Kozera W. (2018). *Assessment of the effect of sulphur fertilization on the yield and micronutrient accumulation of oat grain.* J. Elem., 23(1): 45-56.
13. Barker A.V., Pilbeam D.J. 2015. *Handbook of Plant Nutrition.* Second Edition. CRC PressTaylor & Francis Group Boca Raton, London, New York, 2015.
14. Bielski S., Budzyński W., Dubis B., Głąb L., Michalski T., Sowiński J., Szempliński W.

2020. *Rośliny zbożowe. Cz. IV*. W: *Uprawa roślin. T. II.* Red. Kotecki A. Wyd. UP Wrocław. 15-108.

15. Biesalski H.K., Dragsted L.O., Elmadfa I., Grossklaus R., Müller M., Schrenk D., Walter P. 2009. *Bioactive compounds. Safety and efficacy.* Nutrition, 25: 1206-1211.
16. Biskupski A., Winiarski A., Malinowski P. 2003. *Stan produkcji krajowej nawozów zawierających siarkę oraz tendencje światowe ich wytwarzania i stosowania.* Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz., 4, 17: 9-30.
17. Bloem E.M. 1998. *Schwefel-Bilanz von Agrarökosystemem unter besonderer Berücksichtigung hydrologischer und bodenphysikalischer Standorteigenschaften.* Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft, 192: 1–156.
18. Bloom A.J., Sukrapanna S., Warner R. 1992. *Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley*. Plant Physiol., 99: 1294-1301.
19. Boreczek B. 2001. *Bilans siarki w uprawie wybranych roślin polowych.* Fragm. Agron., 18(4): 118–135.
20. Boros D. 2011. *Zboża: wszechstronne wykorzystanie*. Poradnik dla producentów. Agro Serwis, 5: 57-66.
21. Boros D., Wosniewska M., Gzowska M., Zych J., Gacek E. 2020. Poprawa wartości pokarmowej ziarna pszenicy jarej poprzez siewy miesznin odmianowych. Biul. IHAR, 289: 37-49.
22. Brady N.C., Weil R.R. 1996. *The nature and properties of soils.* Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp. 444.
23. Broadley M.R., White P.J., Bryson R.J. I in. 2006. *Biofortication of UK food crops with selenium*. Proc. Nutrit. Soc., 65: 169–181.
24. Brodowska M.S. 2013. *Nawożenie mineralne jako czynnik determinujący wpływ siarki na plonowanie, skład chemiczny i jakość roślin uprawnych.* Rozprawy Naukowe UP w Lublinie, 380: 159 ss.
25. Brzozowska I. 2008. *Macroelement content in winter wheat grain as affected by cultivation and nitrogen application methods.* Acta Agroph., 11(1): 23-32.
26. Cakmak I. 2002. *Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways.* Plant Soil, 247: 3-24.
27. Chojnacka K., Mikulewicz M., Cieplik J. 2011. *Biofortification of Food with Microelements*. Amer. J. Agric. Biol. Sci., 6, 4: 544-548.
28. Ciołek A., Makarska E. 2004. *The influence of chemical protection on antioxidant activity of polyphenols and tocopherols in hard wheat (Triticum durum Desf.) grains.* Biul. IHAR,

231: 147-156.

29. Ciołek A., Makarska E., Wesołowski M., Cierpiała R. 2012. *Content of selected nutrients in wheat, barley and oat grain from organic and conventional farming.* J. Elem., 17(2): 181-189.
30. COBORU. 2014. Wyniki z doświadczeń. Zboża jare. Słupia Wielka.
31. COBORU. 2020. Lista odmian roślin rolniczych. Słupia Wielka.
32. Cyna K., Grzebisz W. 2003. *Wpływ nawożenia siarką elementarną na zawartość siarczanów w glebie i plonowanie rzepaku ozimego*. Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz.,4, 17: 104–116.
33. Czerwiński W. 1980. *Fizjologia roślin*. PWN Warszawa, 604 ss.
34. Dar W.D. 2004. *Macro-benefits from micronutrients for grey to green revolution in agriculture*. IFA international symposium on micronutrients, 23-25 February 2004, New Delhi, India, 2004.
35. Delogu G., Cattivelli L., Pecchioni N., De Falcis D., Maggiore T., Stanca A.M. 1998. *Uptake and agronomic efficiency of nitrogen in winter barley and winter wheat.* Eur. J. Agron., 9: 11–20.
36. del Río L.A., Sevilla F., Gómez M., Yáñez J., López-Gorgé J. 1987. *Superoxide dismutase: An enzyme system for the study of micronutrient interactions in plants.* Planta, 140: 221–225.
37. Dickinson N., Macpherson G., Hursthouse A.S., Atkinson J. 2009. *Micronutrient deficiencies in maternity and child health: A review of environmental and social context and implications for Malawi*. Environ. Geochem. Heal., 31: 253-272.
38. Dmowski Z., Dzieżyc H., Nowak L. 2008. *Ocena wpływu wybranych parametrów opadu i gleby na plonowanie pszenicy jarej w rejonie południowo-zachodnim Polski.* Acta Agroph., 11(3): 613−622.
39. Dmowski Z., Dzieżyc H. 2009. *Potrzeby opadowe pszenicy jarej na glebach kompleksów pszennego dobrego i żytniego bardzo dobrego w północno-wschodniej Polsce.* Acta Agrop., 13(1): 39−48.
40. Dobrzański Z., Kołacz R., Bodek E. 1996. *Metody przeciwdziałania bioakumulacji metali ciężkich zwierząt.* Med. Wet., 52(12), 763.
41. Dostálová Y., Hřivna L., Kotková B., Burešová I., Janečková M., Šottníková V. 2015. *Effect of nitrogen and sulphur fertilization on the quality of barley protein.* Plant Soil Environ., 61(9), 399-404.

42. Ducsay L., Ložek O., Varga L. 2009. *The influence of selenium soil application on its content in spring wheat.* Plant Soil Environ., 55(2)*:* 80-84.
43. EFSA 2017. *Dietary reference values and dietary guidelinies*, https://www.efsa.europa.eu/.
44. Ellmann T. 2011. *Wpływ poziomu ochrony roślin, nawożenia azotem i terminu zbioru na plonowanie pszenicy ozimej*. Fragm. Agron., 28(2): 15-25.
45. Eriksen J. 1997. *Sulphur cycling in Danish agricultural soils: inorganic, sulphate dynamics and plant uptake.* Soil Biol. Biochem., 29 (9/10): 1379–1385.
46. Eriksen J., Nielsen M., Mortensen J., Schjorring J. 2001. *Redistribution of sulphur during generative growth of barley plants with different sulphur and nitrogen status.* Plant Soil, 230: 239–246.
47. Eriksen J. 2002. *Organic manures as sources of fertiliser sulphur*. International Fertiliser Society. York.
48. Fageria V.D. 2001. *Nutrient interactions in crop plants*. J. Plant Nutr., 24, 8: 1269-1290.
49. Fatyga J., Chrzanowska-Drożdż B., Liszewski M. 1994. *Wysokość i jakość plonu pszenicy jarej pod wpływem różnych dawek azotu*. Zesz. Nauk. AR Wrocław, 254, Rol., 62: 113–128.
50. Filipek T. 2006. *Chemia rolna*. Wyd. AR Lublin: 282 ss.
51. Fotyma E. 2003. *Wpływ nawożenia siarką na wykorzystanie azotu z nawozów mineralnych przez rośliny uprawy polowej*. Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz., 4, 17: 117–136.
52. Förster S., Welp G., Scherer H.W. 2012. *Sulfur specification in bulk soil as influenced by long–term application of mineral and organic fertilizers*. Plant Soil Environ., 58(7): 316-321.
53. Gaj R., Klikocka H. 2011. *Wielofunkcyjne działanie siarki w roślinie od żywienia do ochrony.* Prog. Plant Prot./Post. Ochr. Roślin, 51 (1): 33–44.
54. Galinha C., Freitas M.C., Pacheco A.M.G. 2011. *Enrichment factors and transfer coefficients from soil to rye plants by INAA*. J. Radioanal. Nucl. Chem., 286: 583-589.
55. Gao X, Lukow O.M., Grant C.A. 2012. *Grain concentrations of protein, Fe and Zn and bread making quality in spring wheat as affected by seeding date and nitrogen fertilizer management*. J. Geochem, Explor., 121: 36-44.
56. Garvin D.F., Welch R.M., Finley W. 2006. *Historical shifts in the seed mineral micronutrient concentration of US hard red winter wheat germplasm.* J. Sci. Food Agric., 86: 2213–2220.
57. Gawlik-Dziki U. 2004. *Phenolic acids as bioactive compounds in food products.*

Żywność. Nauka. Technologia. Jakość, 4 (41): 29–40.

58. Gąsiorowska, B., Koc, G., Buraczyńska, D., Struk, K. 2011. *Wpływ warunków pogodowych na plonowanie zbóż uprawianych w rolniczej stacji doświadczalnej w Zawadach.* Infrastr. Ekol. Teren. Wiejsk., 6, 91-99.
59. Giri P.K., Saha M., Halder M.P., Mukherjee D. 2011. *Effect of pesticides on microbial transformation of sulphur in soil*. Inter. J. Plant. Anim. Environ. Sci., 1(2): 115-121.
60. Girma K., Mosali J., Freeman W., Raun W.R., Martin K.L., Tkomason W.E. 2005. *Forage and grain yield response to applied sulphur in winter wheat as influences by source and rate.* J. Plant. Nutr., 28:1541-1553.
61. Głowacka A. 2016. *The role of intercropping in plant biofortyfication*. W: *Cropping Systems: Applications, Management and Impact*. J. G. Hodges (ed), Nova Science Publisher Inc., NY USA, 1-24.
62. Gondek K., Gondek A. 2010. *The influence of mineral fertilization on the yield and content of selected macro and microelements in spring wheat.* J. Res. Appl. Agric. Eng., 55 (1): 30–36.
63. Gorlach E., Mazur T. 2002. *Chemia rolna*. PWN, Warszawa, 346 ss.
64. Goźliński H. 1970. *Działanie nawozowe siarki (SO_4^{2-}) przy różnych poziomach nawożenia roślin azotem*. Cz. I. *Badania z owsem i jęczmieniem.* Rocz. Nauk Rol., A, 96 (4): 133–149.
65. Graham R.D., Welch R.M., Bouis H.E. 2001. *Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps*. In Advances in Agronomy, Edited by Sparks D, 70: 77-142.
66. Graham R.D., Welch R.M., Saunders D.A. i in. 2007. *Nutritious subsistence food system*. Adv.Agron., 92: 1-74.
67. Grant C., Hawkesford M.J. 2015. *Sulfur.* W: Barker A.V., Pilbeam D.J. 2015. *Handbook of Plant Nutrition.* Second Edition. CRC PressTaylor & Francis Group Boca Raton, London, New York, 2015.
68. Grembecka M. 2007. *Ocena bromatologiczna i chemometryczna żywności pochodzenia roślinnego na podstawie jej składu mineralnego.* Praca doktorska. Akademia Medyczna Gdańsk. 469 ss.
69. Grzebisz W., Fotyma E. 1996. *Ocena odżywienia siarką rzepaku uprawianego w północnozachodniej Polsce*. Rośliny Oleiste, 17 (1): 275–280.
70. Grzebisz W., Przygocka-Cyna K. 2003. *Aktualne problemy gospodarowania siarką w rolnictwie polskim.* Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz., 4: 64–77.

71. Grzebisz W., Härdter R. 2006. *Kizeryt – naturalny siarczan magnezu w produkcji roślinnej*. Verlagsgesseischaft für Ackerbau GmbH, Kassel, Niemcy 2006.
72. Grzebisz W. 2008. *Nawożenie roślin uprawnych. Część I*. Podstawy nawożenia. PWRiL, Poznań, 428 ss.
73. Grzebisz W. 2009. *Nawożenie roślin uprawnych. Część II*. Nawozy i systemy nawożenia. Podstawy nawożenia. PWRiL, Poznań, 376 ss.
74. Grzebisz W. 2012. *Technologie nawożenia roślin uprawnych*. *Tom 2. Zboża i kukurydza*. PWRiL, Poznań, 279 ss.
75. Gupta A.K., Schnug E. 2001. *Physiological, agronomic, horticultural and industrial aspects of sulphur nutrition in plants*. In: Bora et al. (eds.), *Production and Developmental Plant Physiology Pointer Publishers*, Jaipur (India): 269–286.
76. GUS. 2020. Rocznik statystyczny rolnictwa, Warszawa 2020.
77. Haneklaus S., Bloem E., Schnug E. 2000. *Sulphur in egroecosystems.* Folia Univ. Agric. Stetin, Agricultura, 204 (81): 17–32.
78. Haneklaus S., Bloem E., Schnug E. 2002. *Sulfur.* In: Rattan Lal (ed.): *Encyclopedia of soil science.* Marcel Dekker Inc., New York: 1282-1288.
79. Haneklaus S., Bloem E., Funder U., Schnug E. 2007. *Effect of foliar applied elemental sulphur on Fusarium infections in barley*. Landbauforschung Völkenrode, 3(57): 213-217.
80. Harasim A. 2012. *Rachunek ekonomiczny w gospodarstwie rolniczym.* IUNG-PIB. Puławy, 30 ss.
81. Harasim E. 2018. *Studia nad plonowaniem jakością ziarna i opłacalnością produkcji ozimej formy pszenicy zwyczajnej i twardej*. Wydawnictwo IUNG-PIB, Puławy, 134 s.
82. Harasim E., Antonkiewicz J., Kwiatkowski C. 2020. *The effects of catch crops and tillage systems on selected physical properties and enzymatic activity of loess soil in a spring wheat monoculture.* Agronomy-Basel, 10, 3, 334.
83. Harvestplus. 2020. www.harvestplus.org
84. Hesse H., Nikiforova V., Gakičre B., Hoefgen R. 2015. *Molecular analysis and control of cysteine biosynthesis: Integration of nitrogen and sulphur metabolism.* J Exp Bot, 55, 1283.
85. Hiatt A.J., Leggett J.E. 1974. *Ionic Interactions and Antagonisms in Plants.* W: *The plant root and its environment.* Carson E.W. (ed.), University Press of Virginia: Charlottesville, VA, 101-143.
86. Hoffland E., Dicke M., van Tintelen W., Dijkman H., van Beusichem M.L. 2000. *Nitrogen availability and defense of tomato against two-spotted spider mite*. J. Chem.

Ecol., 26: 2697-2711.

87. House W.A., Welch R.M. 1989. *Bioavailability of and interactions between zinc and selenium in rats fed wheat grain intrinsically labeled with 65Zn and 75Se.* J. Nutr., 119: 916-921.
88. Inal A., Günes A., Alphaslan M., Adak M., Taban S., Eraslan F. 2003. *Diagnosis of sulphur deficiency and effects of sulphur on yield and yield components of wheat grown in central Anatolia,* Turkey. J. Plant Nutr., 26 (7): 1483–1498.
89. Iwańska, M., Paderwski, J., Stępień, M., Rodrigues, P.C. 2020. *Adaptation of winter wheat cultivars to different environments: A case study in Poland.* Agronomy, 10, 632.
90. Jadczyszyn T. 2006. *Sporządzanie planu nawożenia z uwzględnieniem wyników badań gleby*. Raporty IUNG–PIB, 1: 37-43.
91. Jadczyszyn T., Kowalczyk J., Lipiński W. 2012. *Nawożenie mineralne na gruntach ornych i trwałych użytkach zielonych*. Instrukcja upowszechnieniowa nr 184, IUNG–PiB Puławy: 24 ss.
92. Jadczyszyn T., Kopiński J. 2013. *Produkcyjne i środowiskowe aspekty nawożenia azotem*. Studia i Raporty IUNG–PIB, 34(8): 27-45.
93. Jaggi R.C., Aulakh M.S., Sharma R. 2005. *Impacts of elemental S applied under various temperature and moisture regimes on pH and available P in acidic, neutral and alkaline soils,* Biol. Fertil. Soils, 41: 52–58.
94. Jakubus M. 2002. *Kształtowanie się zawartości siarki ogólnej siarczanowej w poziomie próchnicznym gleb uprawnych w zależności od odczynu*. Zesz. Probl. Post. Nauk. Roln., 482: 205–214.
95. Jakubus M. 2006. *Siarka w środowisku*. Wyd. AR w Poznaniu: 49 ss.
96. Jamal A., Moon Y-S., Abdid M.Z. 2010. *Sulphur – a general overview and interaction with nitrogen*. Austral. J. Crop Sci., 4(7): 523-529.
97. Jarosz M. (red). 2017. *Normy żywienia dla populacji Polski i ich zastosowanie. Instytut Żywności i Żywienia,* Warszawa, 377 s.
98. Jaśkiewicz B. 2014. *Wpływ nawożenia azotem na plonowanie i zawartość białka w ziarnie odmian pszenżyta ozimego*. Fragm. Agron., 31(1): 25-31.
99. Järwan M., Edesi L., Adamson A., Lukme L., Akk A. 2008. *The effect of sulphur fertilization on yield, quality of protein and baking properties of winter wheat.* Agr. Res., 6 (2): 459–469.
100. Jenzen H.H., Bettany J.R. 1984. *Sulphur nutrition of rapessed. 1. Influence of fertilizer nitrogen and sulfur rates.* Soil Sci. Soc. Am. J., 48: 100–107.

101. Johnson M.O. 1917. *Manganese as a cause of the depression of the assimilation of iron by pineapple plants*. Indust. Engin. Chem., 9: 47–49.

102. Johnson D.W., Mitchell M.J. 1998. *Responses of forest ecosystem to changing sulfur inputs*. In: Maynard D.G. (ed.), *Sulfur in the environment*. Marcel Dekker, Inc., New York: 219-262.

103. Junius M.M., 1979. *Alchimia verde – Spagyrica vegetale.* Roma.

104. Juda-Rezler K. 2004. *Modeling of the air pollution with sulphur species in Poland.* Environ. Prot. Engin., 4.

105. Jurga B., Kocoń A. 2013. *Czynniki wpływające na zawartość azotanów (V) i azotanów (III) w roślinach*. Studia i Raporty IUNG–PIB, 34(8): 47-56.

106. Kabata-Pendias A., Pendias H. 1999. *Biogeochemia pierwiastków śladowych.* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 400 ss.

107. Kabata-Pendias A., Szteke B. 2012. Pierwiastki śladowe w geo- i biosferze. Wyd. IUNG: Puławy Kalembasa S., Amberger A., Symanowicz A., Godlewska A. 1995. *Zawartość organicznych i nieorganicznych związków siarki i fosforu w glebie po wieloletnim zróżnicowanym nawożeniu.* Zesz. Probl. Post. Nauk. Roln., 421a: 173.

108. Kern H., Budzyńska K., Gądor K., Hołowiński J., Zbysław B., Deputat T. 1990. *Warunki przyrodnicze produkcji rolnej. Województwo zamojskie.* IUNG Puławy, 51 ss.

109. Klikocka H. 2000. *Effect of Soil Tillage and N- Fertilization in a Spring Triticale Field Experiment on Soil Physical Properties and the Content of Plant Available Microelements in the Soil*. Landbauforschung Völkenrode, 50, 3/4: 139-144.

110. Klikocka H., Haneklaus S., Bloem E., Schnug E. 2003. *Ocena potrzeb nawożenia ziemniaka siarką.* Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz., 4, 17: 143–150.

111. Klikocka H., Sommer C. 2003. *The effect of different methods of soil tillage and weed control on physical properties in the soil with potato cultivation.* Landbauvorschung Völkenrode, 53, 4: 269-277.

112. Klikocka H. 2004. *Nawożenie ziemniaka siarką*. Fragm. Agron., 21(3): 80–94.

113. Klikocka H. 2005a. *Sulphur status in environment.* J. Elem., 10 (3): 625–643, cz. I.

114. Klikocka H. 2005b. *Wpływ nawożenia siarką na wielkość plonu i stopień porażenia bulw ziemniaka przez Streptomyces scabies i Rihizoctonia solani*. Fragm. Agron., 22(4): 38–50.

115. Klikocka H. 2005c. *Prognoza potencjalnych niedoborów siarki w glebach uprawnych Zamojszczyzny – przydatność modelu MOPS.* Fragm. Agron., 22(4): 51–70.

116. Klikocka H. 2010. *Znaczenie siarki w biosferze i nawożeniu roślin.* Przemysł

Chemiczny, 89/7: 903-908.

117. Klikocka H. 2011. *The effect of sulphur kind and dose on content and uptake micro-nutrients by potato tubers (Solanum tubersosum L.)*. Acta Scient. Polon. Hort. Cultus, 10, 2: 137-151.

118. Klikocka H., Sachajko J. 2011. *Kompleksowa ocena agrotechnologii ziemniaka i pszenżyta jarego*. Rozprawy i Monografie (4). Instytut Agrofizyki im. B. Dobrzańskiego PAN w Lublinie. Lublin, 128 ss.

119. Klikocka H., Cybulska M., Podleśna A., Zarychta M, Narolski B., Głowacka A., Stepaniuk M., Stepaniuk S. 2013. *Agrotechnologia pszenicy jarej. Instrukcja wdrożeniowa,* Wyd. IUNG-PIB Puławy, 2013.

120. Klikocka H., Głowacka A. 2013. *Does the sulphur fertilization modify magnesium and calcium content in potato tubers (Solanum tuberosum L.)?"* Acta Scient. Polon. Hort. Cultus, 12, 5: 41-53.

121. Klikocka H., Cybulska M. 2014. *Sulphur and nitrogen fertilization of spring wheat. Mineral fertilization of spring wheat.* Sarrbrucken, LAP Lambert Academic Publishing. 122 pp. ISBN 978-3-659-61515-3.

122. Klikocka H., Wyłupek T., Narolski B. 2015. *Analiza zawartości siarki w biosferze Zamojszczyzny.* Ochr. Środ., 37(1): 33- 42.

123. Klikocka H., Cybulska M., Barczak B., Narolski B., Szostak B., Kobiałka A., Nowak A., Wójcik E. (2016). The effect of sulphur and nitrogen on grain yield and technological quality of spring wheat. Plant Soil Environ., 62 (5): 230-236.

124. Klikocka H., A. Kobiałka., B. Szostak., B. Barczak. 2017. *The effect of sulphur and nitrogen fertilization on selenium content and uptake by grain of spring wheat.* J. Elem., 22(3): 985-994.

125. Kliko------cka H., Marks M. 2018. *Sulphur and nitrogen fertilization as a potential means of agronomic biofortyfication to improve the content and uptake of microelements in spring wheat grain DM.* J. Chem., 2018, 1-20.

126. Klikocka H., Marks M., Barczak B., Szostak B., Podleśna A., Podleśny J. 2018. *Response of spring wheat to NPK and S fertilization. The content and uptake of macronutrients and the value of ionic ratios.* Open Chemistry, 16, 1059-1065.

127. Klikocka H., Podleśna A., Podleśny J., Narolski B., Haneklaus S., Bloem E., Schnug E. 2020. *Improvement of the Content and Uptake of Micronutrients in Spring Rye Grain DM Through Nitrogen and Sulfur Supplementation.* Agronomy-Basel, 10(1), 35: 1-11.

128. Klikocka H. 2020. *Wpływ nawożenia siarką i azotem na plon ziarna i cechy*

jakościowe pszenicy jarej. Agron. Sci., 75(3), 117-129.

129. Knapowski T., Ralcewicz M. 2004. *Ocena wskaźników jakościowych ziarna i mąki pszenicy ozimej w zależności od zróżnicowanego nawożenia azotem*. Annales UMCS, E, 59 (2): 959–968.

130. Knapp J.S., Harms C.I. 1988. *Nitrogen fertilization and plant growth regulator effect on yield and quality four wheat cultivars.* J. Prod. Agric., 1 (2): 94–98.

131. Koc J., Szyperek W., Glińska-Lewczuk K., Cymes I., Skwierawski A. 2003. *Wpływ użytkowania geosystemów młodoglacjalnych na zawartość siarczanów VI w wodach powierzchniowych*. Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 4, 17: 50–61.

132. Kochian L.V. 1991. *Mechanism of micronutrient uptake and translocation in plants*. W: *Micronutrients in Agriculture.* Red.: Mortvedt J.J., Cox F.R., Shuman L.M., Welch R.M/. Madison, WI: Soil Science Society of America, 29-296.

133. Kocoń A. 2005. *Nawożenie jakościowej pszenicy jarej i ozimej a plon i jakość ziarna*. Pam. Puł., 139: 55–64.

134. Kocoń A. 2014. *Potrzeby pokarmowe roślin*. Studia i Raporty IUNG–PIB, 37(11): 19-31.

135. Kondracki J. 1994. *Geografia Polski. Mezoregiony fizyczno-geograficzne.* PWN Warszawa: 196-215.

136. Kopcewicz J., Lewak S. 2002. *Fizjologia roślin.* PWN Warszawa 2002: 806 ss.

137. Kopeć M., Gondek K. 2004. *Wpływ długotrwałego zróżnicowanego nawożenia na zawartość siarki w glebie i runi łąki górskiej*. Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 1 (18): 62–74.

138. Kopriva S., Koprivova A. 2003. *Sulphate assimilation: a pathway which likes to surprise*. In: Abrol Y.P., Ahmad A. (eds.), *Sulphur in plants*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht: 87-112.

139. Korzeniowska J., Stanisławska-Glubiak E., Kantek K., Lipiński W., Gaj R. 2015. *Micronutrient status of winter wheat in Poland.* J. Centr. Europ. Agric., 16, 1: 54-64.

140. Koter M., Panek H. 1996. *Badania nad pobieraniem dwutlenku siarki z atmosfery i opadów przez rośliny uprawne przy wykorzystaniu izotopu ^{35}S.* Rocz. Nauk Roln., A. 90:499.

141. Kovar J., Grant C. 2011. *Nutrient cycling in soil: sulfur*. Ed. Hatfield J.L., Sauer T.J. In: Soil Menagement: Building a Stable Base for Agriculture: 103-115.

142. Kowal D. 2009. *Metody wytwarzania granulowanych nawozów wieloskładnikowych z wykorzystaniem mocznika*. Rozprawa doktorska. Wyd. ZUT Szczecin: 216 ss.

143. Kozera W., Barczak B., Knapowski T., Spychaj-Fabisiak E., Murawska B. 2018. *Reaction of spring barley to NPK and S fertilization. Yield, the content of macroelements and the value of ionic ratios.* Roman. Agric. Res., 34: 275-285.

144. Kozłowska M. 2007. *Fizjologia roślin. Od teorii do nauk stosowanych*. PWRiL, Poznań, 554 ss.

145. Krasowicz S. 1991. *Zasady ustalania kosztów krańcowych w produkcji roślinnej. W: Doradztwo ekonomiczno-organizacyjne w zakresie produkcji roślinnej.* IUNG Puławy: 34-49.

146. Krishna K.R. 2013. *Agroecosystem: Soils, Climate, Crops, Nutrient Dynamics and Productivity*. Apple Academic Press, Inc. Canada. CRC Press Taylor & Francis Group: 552 ss.

147. Kulczycki G., Spiak Z. 2003. *Zawartość siarki ogólnej i siarczanowej w glebach Polski Południowo-Zachodniej*. Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz., 4, 17: 75–81.

148. Kulczycki G. 2011. *The effect of soil and foliar sulphur application on winter wheat yield and soil properties*. Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 43: 21-28.

149. Kutman U.B., Yildiz B., Cakmak I. 2011. *Improved nitrogen status enhances Zn and Fe concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat.* J. Cer. Sci., 53: 118–125.

150. Kutman U.B., Kutman B.Y., Ceylan Y., Ova E.A., Cakmak I. 2012. *Contributions of root uptake and remobilization to grain zinc accumulation in wheat depending on post-anthesis zinc availability and nitrogen nutrition*. Plant Soil, 361: 177–187.

151. Kwiatkowski C., Harasim E., Staniak M. 2020. *Effect of catch crops and tillage systems on some chemical properties of loess soil in a short monoculture of spring wheat.* J. Elem., 25(1): 35-43.

152. Legris–Delaporte S., Ferron F., Landry J., Costes C. 1987. *Metabolization of elemental sulfur in wheat leaves consecutive to its foliar application*. Plant Physiol., 85: 1026-1030.

153. Lipiński W., Terelak H., Motowicka-Terelak T. 2003. *Propozycja liczb granicznych zawartości siarki siarczanowej w glebach mineralnych na potrzeby doradztwa nawozowego.* Rocz. Glebozn., 54 (3): 79–84.

154. Lityński T., Jurkowska H. 1982. *Żyzność gleby i odżywianie się roślin*. PWN. Warszawa, 643 ss.

155. Liu J., An X., Cheng L., Chen F., Bao J., Yuan L., Zhang F., Mi G. 2010. *Auxin transport in maize roots in response to localized nitrate supply*. Ann. Bot., 106: 1019–

1026.

156. Lončarić Z., Popović B., Karalić K., Jurković Z., Nevistić A., Engler M. 2012. *Soil chemical properties and wheat genotype impact on micronutrient and toxic elements content in wheat integral flour.* Medic. Glas., 9: 97-103.

157. Malhi S.S, Gan Y., Raney J.P., 2007. *Yield, seed quality, sulfur uptake of Brassica oilseed crops in response to sulfur fertilization.* Agron. J., 99(2), 570-577.

158. Manach C, Scalbert A, Morand C, Remesey C, Jimenez L. 2004. *Polyphenols: food sources andbioavailability.* Am. J. Clin. Nutr., 79: 727-747

159. Marciniak A., Obuchowski W. 2006. *Prozdrowotne właściwości ziarna zbóż.* Prz. Zboż. Młyn., 5:11-13.

160. Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Second Edition, Boston, MA: Academic Press.

161. Marska E., Wróbel J. 2000. *Znaczenie siarki dla roślin uprawnych*. Folia Univ. Agric. Stetin, Agricultura, 204 (81): 69–76.

162. Mazurek J., Jaśkiewicz B., Klupczyński Z. 1999. *Plonowanie i jakość ziarna pszenicy jarej w zależności od techniki nawożenia azotem.* Pam. Puł., 118: 257–261.

163. Mazurek J., Sułek A. 1999. *Wpływ różnych dawek i technik nawożenia azotem na plon i cechy jakościowe ziarna pszenicy jarej.* Pam. Puł., 118: 271–274.

164. McGrath S.P., Zhao F.J. 1996. *Sulphur uptake, yield responses und the interactions between nitrogen and sulphur in winter cilseed rape.* J. Agric. Sci., Cambridge, 126: 53–62.

165. McGrath S.P., Zhao F.J., Fan S. 2007. *Decreasing mineral concentration in wheat grain over the last 160 years.* W: *Biogeochemistry of Trace Elements: Environmental Protection, Remediation and Human Health*, Zhu Y., Lepp N., Naidu R. (Red.). Beijing, China: Tsinghua University Press, 2007: 291-282.

166. Meenakshi, J.V., N.L. Johnson, V.M. Manyong, H. DeGroote and J. Javelosa *et al*., 2010. *How costeffective is biofortification in combating micronutrient malnutrition*? An *Ex ante* Assessment. World Dev., 38: 64-75.

167. Merrien A. 1991. *Diagnostica des risques de malnutrition soufree chez le colza d'hiver.* In : Duc P. (ed.), *L'azote et le soufre dans le sol*. Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette Cedex: 197-204.

168. Messick D.L., de Brey C., Fan M.X., 2003. *Sources of sulphur, their processing and use in fertiliser manufacture*. Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 2(15): 81-103.

169. Mi G., Tang L., Zhang F., Zhang J. 2000. *Is nitrogen uptake after anthesis in wheat*

regulated by sink size? Field Crop Res., 68(3): 183-190.

170. Michaud A.M., Chappellaz C., Hinsinger P. 2008. *Copper phytotoxicity affects root elongation and iron nutrition in durum wheat (Triticum turgidum durum L.).* Plant and Soil, 310, 1–2: 151–165.

171. Miller D.D., Welch R.M. 2013. *Food system strategies for preventing micronutrient malnutrition*. Food Policy, 42: 115–128.

172. Mocek A., Drzymała S., Maszner P. 1997. *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb.* Wyd. AR Poznan, 445 ss.

173. Mocek A., Drzymała S. 2010. *Geneza, analiza i klasyfikacja gleb.* Poznań. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu. 264 ss.

174. Morris C.E., Sands D.C. 2006. *The breeder's dilemma-yield or nutrition?* Nat. Biotech., 24: 1078–1080.

175. Morris R.J. 2007. *Sulphur in Agriculture. Global overview*. Fertiliz. Focus, 1/2: 12–16.

176. Motowicka-Terelak T., Terelak H. 1998. *Siarka w glebach Polski – stan i zagrożenia.* Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 106.

177. Motowicka-Terelak T., Terelak H. 2000. *Siarka w glebach i roślinach Polski.* Folia Univ. Agric. Stetin. Agricultura 204 (81): 716.

178. Nijveldt R. 2001. *Flawonoids a review of probable mechanism of action and potential applicantions.* Am. J. Clin. Nutr., 74: 418-425.

179. Nogalska A., Sienkiewicz S., Czapla J., Skwierawska M. 2012. *The effect of multi-component fertilizers on the yield and mineral composition of winter wheat and macronutrient uptake.* Journal of Elementology, 17(4): 629-638.

180. Nucia, A. 2018. *Białka gluteninowe - charakterystyka i ich wpływ na właściwości reologiczne pszenicy.* Agron. Sci., 73(2), 5-16.

181. Oenema O., Postma R. 2003. *Managing sulphur in agroecosystems.* In: Abrol Y.P, Ahmad A. (eds.), Sulphur in plants. Kluwer Academic Publ., Dordrecht: 45-70.

182. Ostrowska A., Gawlinski S., Szczubiałka Z. 1991. *Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin.* Katalog. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa.

183. Pawłowski J. 2006. *Środowisko przyrodnicze okolic Hrubieszowa. W: Dzieje Hrubieszowa. Tom. I., Od pradziejów do 1918 roku.* Red. Szczygieł R., Urząd Miejski Hrubieszów 2006: 9-29.

184. Pecio A. 2010. *Współdziałanie azotu i ochrony roślin w intensywnej produkcji zbóż*. Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 41: 133-145.

185. Pecio A. 2014. *Nawożenie zbóż jarych*. Studia i Raporty IUNG–PIB, 37(11): 83-98.

186. Pedersen C.A., Knudsen L., Schnug E. 1998. *Sulphur fertilisation*. In: Schnug E., Beringer H. (eds.), *Sulphur in Agroecosystems*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht: 115–134.

187. Pfeiffer W., Clafferty M.C. 2007. *Harvestplus: breeding crops for better nutrition.* Crop Sci., 47, S3: 88–105.

188. Pieczyńska J., Prescha1A., Weber R., Biernat J., GrajetaH. 2011. *The effect of cultivation intensity on mineral content in grain, flakes and bran of winter wheat (Triticum aestivum L.). Preliminary study*. Rocz. PZH, 62, 2: 199-203.

189. Pijls L., Ashwell M., Lambert J. 2009. *EURRECA-A network of excellence to align European micronutrient recommendations.* Food Chem., 113: 748-753.

190. Pieczyńska J., Prescha1 A., Weber R., Biernat J., Grajeta H. 2011. *The effect of cultivation intensity on mineral content in grain, flakes and bran of winter wheat (Triticum aestivum L.). Preliminary study*. Rocz. PZH, 62(2): 199-203.

191. Pilbeam D.J. 2015. *Nitrogen.* In: Barker A.V., Pilbeam D.J.: *Handbook of Plant Nutrition.* Second Edition. CRC PressTaylor & Francis Group Boca Raton, London, New York, 17-63.

192. Podleśna A., Cacak-Pietrzak G., Sowiński M. 2003. *Reakcja pszenicy ozimej na nawożenie siarką w doświadczeniu polowym.* Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 4, 17: 169–179.

193. Podleśna A. 2005. *Nawożenie siarką jako czynnik kształtujący metabolizm roślin uprawnych i jakość płodów rolnych*. Pam. Puł., 139: 161–174.

194. Podleśna A., Cacak-Pietrzak G. 2006. *Kształtowanie plonu oraz parametrów przemiałowych i wypiekowych pszenicy jarej poprzez nawożenie azotem i siarką.* Pam. Puł., 142: 382–391.

195. Podleśna A. 2009. *Perspektywy nawożenia roślin siarką.* Mat. Konf. Nauk.-Tech. nt: „Stan obecny i perspektywy nawożenia roślin w Polsce w aspekcie regulacji prawnych", Puławy 4–5.11.2009.

196. Podleśna A. 2013. *Studia nad rolą siarki w kształtowaniu gospodarki mineralnej oraz wielkości i jakości plonu wybranych roślin uprawnych.* Rozprawa habilitacyjna. Monografie i Rozprawy Naukowe, 37. IUNG Puławy: 144 ss.

197. Podleśna A., Klikocka H., Narolski B. 2018. *Efektywność nawożenia oraz wykorzystania azotu i siarki przez żyto jare.* Przem. chem., 97(8):1308-1311.

198. Podolska G., Grabiński J. 2002. *Możliwości pogodzenia kryteriów jakościowych*

ziarna zbóż z zasadami dobrej praktyki rolniczej. Mat. szkol. 84/02. Wdrażanie nowych proekologicznych technologii w zakresie produkcji roślin uprawnych. IUNG Puławy: 167–182.

199. Podolska G., Sułek A. 2002. *Główne elementy technologii produkcji decydujące o wysokiej jakości ziarna pszenicy.* Pam. Puł., 130: 597–605.

200. Podolska G. 2007. *Kształtowanie cech jakościowych ziarna pszenicy poprzez technologię produkcji.* Studia i Raporty. IUNG-BIP Puławy, 9: 55–64.

201. Potarzycki J. 2003. *Rola siarki z superfosfatu prostego w nawożeniu jęczmienia jarego. Plon i jakość ziarna*. Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz., 4, 17: 180–192.

202. Rachoń L., Krochmal-Marczak B., Cebulak T., 2020. *Przydatność ziarna jarej pszenicy zwyczajnej, twardej i orkiszowej do produkcji pieczywa w zależności od intensywności technologii produkcji.* Agron. Sci., 75(2), 25−36.

203. Radzka E., Koc G., Bombik A. 2009. *Wpływ posuch na plonowanie pszenicy jarej w środkowowschodniej Polsce.* Acta Agroph., 13(2): 445–454.

204. Ralcewicz M., Knapowski T. 2004. *Wpływ zróżnicowanego nawożenia azotem na wysokość plonu i wartość technologiczną pszenicy jarej.* Ann. UMCS, E, 59(2): 969–978.

205. Rayman M.P. 2000. *The importance of selenium to human health.* Lancet, 356: 233–241.

206. Rengel Z., Graham R.D. 1995. *Wheat genotypes differ in Zn efficiency when grown in chelate-buffered nutrient solution. II. Nutrient uptake*. Plant Soil, 176: 317–324.

207. Rodriquez H., Alfonso D., Morales, Rodriquez Rodriquez E., Diaz Romero C. *Minerals and trace elements in a collection of wheat landraces from the Canary Islands.* J. Food Comp. Anal., 24:1081-1090.

208. Rothkaehl J. 2011. *O jakości ziarna. Świat zbóż.* Biul. Inf. Kraj. Feder. Prod. Zbóż, 17: 15–16.

209. Rutkowska A. 2002. *Efektywność późnych dawek azotu w nawożeniu pszenicy jakościowej.* Pam. Puł., 130: 647–552.

210. Rutkowska A. 2004. *Studia nad nawożeniem pszenicy ozimej azotem*. Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 4(21): 93 ss.

211. Rutkowska A. 2014. *Racjonalne i efektywne nawożenie azotem*. Studia i Raporty IUNG–PIB, 37(11): 33-46.

212. Salac I. 2005. *Influence of sulphur and nitrogen supply on S metabolites involved in the Sulphur Induced Resistance (SIR) of Brassica napus L*. Landbauvorschung Voelkenrode. Sonderheft 277: 121 pp.

213. Salsac L., Chaillou S., Morot-Gaudry J.F., Lesaint C., Jolivet E. 1987. *Nitrate and ammonium nutrition in plants*. Plant Physiol. Biochem., 25: 553-558.

214. Samborski A. 2013. *Wybrane uwarunkowania rozwoju turystyki i rekreacji na Zamojszczyźnie*. Facta Simonidis, 1(6): 267-279.

215. Scherer H.W. 2001. *Sulphur in crop production*. Eur. J. Agron., 14: 81–111.

216. Schnug E., Ceynova J. 1990. *Phytopathological aspects of glucosinolates in oilseed rape.* J. Agron. Crop Sci., 165: 319 – 328.

217. Schnug E., Haneklaus S. 1994. *Ecological aspects of plant sulphur supply.* Norw. J. Agric. Sci., 15 (supl.): 149-156.

218. Schung E., Haneklaus S. 1998. *Diagnosis of sulphur nutrition*. In: Schnug E., Beringer H. (eds.). *Sulphur in Agreocosystems*. Kluwer Academic Publ. Dordecht: 1–38.

219. Schnug E., Haneklaus S. 2003. *Sulphur deficiency in Brassica napusbiochemistry – symptomatology – morphogenesis.* Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 144: 1–31.

220. Shewry, P.R., Hey S.J. 2015. *The contribution of wheat to human diet and health.* Food Energy Sec. 493, 178-202.

221. Shi R., Zhang Y., Chen X i in. 2010. *Influence of long-term nitrogen fertilization on micronutrient density in grain of winter wheat (Triticum aestivum L.)*. J. Cereal Sci., 51: 165–170.

222. Shuman L.M. 1998. *Micronutrient fertilizers*. J. Crop Prod., 1: 165–195.

223. Siebielec G., Smreczak B., Klimkowicz-Pawlas A., Kowalik M., Kaczyński R., Koza P., Ukalska-Jaruga A., Łysiak M., Wójtowicz U., Poręba L., Chabros E. 2017. *Raport z III etapu realizacji zamówienia „Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2015-2017*", IUNG-PIB Puławy, 2017.

224. Siuta J., Rejma-Czajkowska M. 1980. *Siarka w biosferze*. PWRiL Warszawa: 393 ss.

225. Siwik–Ziomek A. 2005. *Wpływ nawożenia na zawartość siarki i jej frakcji oraz aktywność wybranych enzymów uczestniczących w przemianach tego biopierwiastka w glebie*. Rozprawa doktorska. ATR Bydgoszcz.

226. Skoczylas Ł., Liszka-Skoczylas M., Żmudziński D., Rudnik D. 2018. *Biofortyfikacja roślin uprawnych jako metoda walki z deficytem składników mineralnych w diecie człowieka. Żywność a składniki bioaktywne.* Komonikaty. Mat. XIII Konf. Nauk. „ Żywność XXI wieku". Kraków 24-25. 09. 2018: 58-67.

227. Skowera B., Puła J. 2004. *Skrajne warunki pluwiotermiczne w okresie wiosennym na obszarze Polski w latach 1971-2000.* Acta Agroph., 3, 1: 171–177.

228. Skwierawska M., Zawartka L., Zawadzki B. 2008. *The effect of different rates and*

forms of applied sulphur on nutrient composition of planted crops. Plant Soil Environ., 54(5): 179-189.

229. Slavin J.L. 2000. *Mechanisms for the impact of whole grain foods on cancer risk.* J. Am. Coll. Nutr., 19: 300-307.

230. Soliman M.F., Kostandi S.F., van Beusichem M.L. 1992. *Influence of sulfur and nitrogen fertilizer on the uptake of iron, manganese, and zinc by corn plants grown in calcareous soil*. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 23, 11–12: 1289–1300.

231. Spychaj-Fabisiak E., Długosz J., Koper J. 2004. *Przestrzenne zróżnicowanie zawartości różnych form siarki na poziomie powierzchniowym gleb pola uprawnego na równinie Sępopolskiej.* Naw. Nawoż. / Fertil. Fertiliz., 1, 18: 7–16.

232. Stankowski S., Piech M., Podolska G., Mazurek J. 1999. *Wpływ rożnych sposobów nawożenia azotem na jakość ziarna odmian pszenicy ozimej.* Pam. Puł., 118: 405–415.

233. Stankowski S., Podolska G., Kaczmarek S., Jaroszewska A., Hury G., Sobolewska M., 2019. J. Elem. 24(3), 1007−1023.

234. Starck Z. 2002. *Mechanizmy integracji procesów fotosyntezy i dystrybucji biomasy w niekorzystnych warunkach środowiska.* Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 481: 113–123.

235. Starck Z. 2004. *Plastyczność współdziałania metabolizmu azotu i węgla w niekorzystnych warunkach środowiska.* Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 496: 83–102.

236. Staugaitis G., Braziene Z., Marcinkevičius A., Mažeika R., Antanaitis Š., Staugaitienė R. 2014. *Spring barley as affected by nitrogen and sulphur fertiliser rates calculated using different diagnostic methods*. Zemdirbyste-Agriculture, 101(4): 373-380.

237. Stein A.J. Meenakshi J.V., Qaim M. I in. 2008. *Potential impacts of iron biofortification in India*. *Social Science & Medicine*, 66: 1797-1808.

238. Szulc W. 2008. *Potrzeby nawożenia roślin uprawnych siarką oraz metody ich wyznaczania.* Rozprawy Naukowe i Monografie 332, SGGW, Warszawa, 98 ss.

239. Szulc P. 2009. *Effect of nitrogen fertilization and methods of magnesium application on chlorophyll content, accumulation of mineral components and morphology of two maize hybrid types in the initial growth period*. *Part II. Uptake of mineral components*. Acta Sci. Pol., Agric., 8 (2): 51–62.

240. Szulc W., Rutkowska A. 2009. *Nawozy mineralne jako źródło siarki w świetle trwałych doświadczeń nawozowych*. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 538: 277-282.

241. Szweykowska A. 2000. *Fizjologia roślin.* Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu In. A. Mickiewicza w Poznaniu, 241 ss.

242. Tabak M., Lepiarczyk A., Filipek-Mazur B., Bachara P. 2019. *The effect of*

fertilization with ammonium nitrate enriched with ammonium sulfate on the quantity and quality of winter wheat grain yield as well as on soil properties. Plant Soil Environ. 65, 211–217.

243. Tabatabai M. A. (red.). 1986. *Sulphur in agriculture.* Amer. Soc. Agro., Madison, Wi.

244. Tea I., Genter T., Naulet N., Lummerzheim M., Kleiber D., 2007. *Interaction between nitrogen and sulfur by foliar application and its effects on flour bread-making quality.* J. Sci. Food Agric., 87(15), 2853–2859.

245. Teklić T., Lončarić Z., Kovačević V., Singh B.R. 2013. *Metallic trace elements in cereal grain – a review: how much metal do we eat?* Food Energy Secur., 2, 2: 81–95.

246. Terelak H., Piotrowska M., Motowicka-Terelak M., Stuczyński T., Budzyńska K. 1995. *Zawartość metali ciężkich i siarki w glebach użytków rolnych Polski oraz ich zanieczyszczenie tymi składnikami.* Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 418: 45–60.

247. Terelak H., Motowicka-Terelak T., Pasternacki J., Wilkos S. 1988. *Zawartość form siarki w glebach mineralnych Polski*. Pam. Puł., 91 supl: 1–59.

248. Toboła P., Jakubus M. 2003. *Ocena wartości nawozowej gipsu i siarczanu amonu jako źródeł siarki dla rzepaku*. Naw. Nawoż./Fertil. Fertiliz., 4, 17: 56–63.

249. Verkleij J.A.C., Sneller F.E.C., Schat H. 2003. *Metallothioneins and phytochelatins: ecophysiological aspects.* In: Abrol Y.P., Ahmad A. (eds.), *Sulphur in plants.* Kluwer Academic Publ., Dordrecht: 163-176.

250. Verlinden G. 2002. *Sulfur dynamics in Belgian agricultural soils*. Dissertationes de Agricultura, Nr. 506, Katholieke Universiteit Leuven, 1-172.

251. Vitaglione P., Napolitano A., Fogliano V. 2008. *Cereal dietary fibre: a natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut.* Trends Food Sci. Technol., 19: 451-463.

252. Walker K., Booth E.J. 1994. *Sulphur deficiency in Scotland and the efects of sulphur supplementation on yield and quality of oilseed rape*. Norw. J. Agric. Sci. 15 supl.: 97–104.

253. Wang Z.H., Li S.H., Malhi S.S. 2008. *Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops*. J. Sci. Food Agric., 88: 7–23.

254. Wang Y.M., Outworker P.B.F. 2012. *Molecular and environmental factors determining grain quality in rice.* Food Energy Secur., 1: 111-132.

255. Waters B.M., Sankaran R.P. 2011. *Moving micronutrients from the soil to the seeds: Genes and physiological processes from a biofortification perspective.* Plant Sci., 180: 562-574.

256. Weider S., Amarowicz R., Karamać M., Frączek E. 2000. *Changes in endogenus phenolic acids during development of Secale cereale caryopses and after dehydratation treatment of unripe rye.* Plant Physiol. Biochem., 38: 595-602.

257. Welch R.M., Graham R.D. 2002. *Breeding crops for enhanced micronutrient content*. Plant Soil, 245: 205-210.

258. White P.J., Broadley M.R. 2009. *Biofortification of crops with seven mineral elements often lacking in human diets-iron, zinc, copper, calcium, magnesium, selenium and iodine*. New Phytol. J., 182: 49-84.

259. White P.J., Broadley R.M. 2005. *Biofortifying crops with essential mineral elements*. Trends Plant Sci., 10: 586–593.

260. WHO 2000. *World Health Report*. Geneva, World Health Organization, 2000.

261. Wielebski F. 2006. *Nawożenie różnych typów odmian rzepaku ozimego siarką w zróżnicowanych warunkach glebowych*. Cz. II. *Wpływ na jakość i skład chemiczny nasion*. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops., 22(2): 283–297.

262. Wielebski F. 2012. *Reakcja rzepaku ozimego na nawożenie siarką w zależności od poziomu zaopatrzenia roślin w azot*. Rośliny Oleiste – Oilseed Crops, 33: 245-272.

263. Williams D.E., Vlamis J. 1971. *Comparative accumulation of manganese and boron in barley tissues.* Plant Soil, 33, 623–628.

264. Wojciechowski W. 2009. *Znaczenie międzyplonów ścierniskowych w optymalizacji nawożenia azotem jakościowej pszenicy jarej*. Wyd. Uniw. Przyrodniczego we Wrocławiu, 76: 122 ss.

265. Wojtkowiak K., Stępień A., Pietrzak-Fiećko R., Warechowska M. 2018. *Effects of nitrogen fertilisation on the yield, micronutrient content and fatty acid profiles of winter wheat (Triticum aestivum L.) varieties.* J. Elem., 23, 2: 483-495.

266. Woźniak A., Staniszewski M. 2007. *Wpływ warunków pogodowych na jakość technologiczną ziarna pszenicy jarej (odmiana Opatka) i pszenicy ozimej (odmiana Korweta).* Acta Agroph., 9(2): 525–540.

267. Woźniak A., Stępniowska A. 2017. *Yield and quality of durum wheat grain in different tillage systems.* J. Elem., 22, 3: 817-829.

268. Wójcikowska-Kapusta A., Żukowska G., Myszura M. 2019. *Wpływ dodatku wapna poflotacyjnego i osadu ściekowego na zawartość siarki w profilach rekultywowanych gleb.* Przem. Chem., 98(12), 2021-2025.

269. Wróbel E., Szempliński W. 1999. *Plonowanie i wartość technologiczna ziarna pszenicy ozimej nawożonej zróżnicowanymi dawkami azotu*. Pam. Puł., 118: 447–454.

270. Xu G., Fan X., Miller A.J. 2012. *Plant nitrogen assimilation and use efficiency*. Annu. Rev. Plant Biol., 63: 5.1-5.30.

271. Xue Y.F., Yue S.C., Zhang Y,Q i in. 2012. *Grain and shoot zinc accumulation in winter wheat affected by nitrogen management*. Plant Soil, 361: 153–163.

272. Yang X.E., Chen W.R., Feng Y. 2007. *Improving human micronutrient nutrition through biofortification in the soil-plant system: China as a case study*, Environ. Geochem. Heal., 29: 413–428.

273. Zgorelec Ž., Pehnec G., Bašić F., Kisić I., Mesić M., Žužul S., Jurišić A., Šestak I., Vadić V., Čačković M. 2012. *Sulphur cycling between terrestrial agroecosystem and atmosphere*. Arh Hig Rada Toksik., 63: 301-310.

274. Zhang F., Fan M., Gao X., Zou Ch., Zuo Y. 2009. *Soil and Crop Management for Improving Iron and Zinc Nutrition of Crops.* W: *Development and Uses of Biofortified Agricultural Products*. (ed:) Taylor & Francis Group, LLC.

275. Zhao F.J., Withers P.J.A., Evans E.J., Monaghan J., Salmon S.E., Shewry P.R., McGrath S.P. 1997a. *Sulfur nutrition: An important factor for the quality of wheat and rapeseed.* W: Plant nutrition-for sustainable food production and environment. Red.: Ando T. i in., Kluwer Academic Publishers: 917–922.

276. Zhao F.J., McGrath S.P., Salmon S.E., Shewry P.R., Quayle R., Withers P.J.A., Evans E.J., Monaghan J. 1997b. *Optimising sulphur inputs for breadmaking quality of wheat.* Asp. Appl. Biol., 50: 199–205.

277. Zhao G.J., McGrath S.P. 2009. *Biofortification and phytoremediation*, Current Opin. Plant Biol., 12: 373-380.

278. Zieliński H., Kozłowska H. 2000. *Antioxidant activity and total phenolics in selected cereal grains and their different morphological fractions*. J. Agric. Food Chem., 48: 2008-2016.

279. Zieliński H., Kozłowska H., Lewczuk B. 2001. *Bioactive compounds in the cereal rains before and after hydrothermal processing.* Innov. Food Sci. Emerg. Technol., 2/3: 159-169.

280. Zieliński H. 2002. *Low molecular weight antioxidants in the cereal grains – a review.* Pol. J. Food Nutr. Sci.,11/52: 3-9.

281. Zielińska D., Zieliński H. 2009. *Low molecular weight antioxidants and other biologically active components of buckwheat seeds - invited review.* Eur. J. Plant Sci. Biotechnol., 3, (SI 1): 29-38.

282. Zieliński H., Achremowicz B., Przygocka M. 2012. *Antioxidants in cereal grains.*

Żywność. Nauka. Technologia. Jakość, 1 (80): 5–26.

283. Zuo Y., Zhang F. 2009. *Iron and zinc biofortification strategies in dicots plants by intercropping with gramineous species: a review*. Agron. Sustain. Devel. 29: 63-71.

284. Zuzhang L., Guangrong L., Fusheng Y., Xiangan T., Blair G. 2010. *Effect of sources of sulphur on yield and disease incidence in crops in ngix Province, China*. 19th World Congress of Soil Science, Soli Solutions for a Changing World 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia.

285. Zych J. (red.). 2020. *Lista opisowa odmian roślin rolniczych 2020. Rośliny zbożowe.* COBORU, 170.

Streszczenie

W celu rozpoznania wpływu siarki nawozowej na plonowanie i jakość ziarna pszenicy jarej oraz poprawę właściwości chemicznych i prozdrowotnych przeprowadzono ścisłe 3-letnie doświadczenie polowe. Przedmiotem badań była pszenica jara (*Triticum aestivum* L.*)* odmiany Kandela nawożona zróżnicowanymi dawkami azotu (czynnik I) i siarki (czynnik II). Eksperyment statyczny przeprowadzono w latach 2014-2016 według metody split-plot, w gospodarstwie rolnym w Malicach koło Hrubieszowa, na glebie średniej brunatnej dystroficznej typowej (BDt), wytworzonej z gliny piaszczystej średnioziarnistej (gpśr) [PTG 2008], zaliczonej do kompleksu żytniego dobrego. Pod przedplon, którym był ziemniak zastosowano obornik bydlęcy w ilości 30 $t \cdot ha^{-1}$.

Doświadczenie obejmowało 2 czynniki (w czterech powtórzeniach):

1. Nawożenie azotem w dawkach: 0, 50, 100, 150 $kg \cdot ha^{-1}$;
2. Nawożenie siarką w dawkach: 0, 40 $kg \cdot ha^{-1}$.

W fazie dojrzałości pełnej, do zbioru (BBCH 89-92), określono plon ziarna oraz jego elementy składowe. Z każdego poletka (4 m × 5 m) pobierano losowo po 30 kłosów celem oznaczenia komponentów plonu: liczbę ziaren w kłosie ($szt \cdot kłos^{-1}$), masę 1000 ziaren (g) i masę ziarna z kłosa (g). Po zbiorze oznaczono plon ziarna (przy wilgotności 11%) z każdego poletka (kg) i przeliczono go w $t \cdot ha^{-1}$. W suchej masie ziarna badano cechy jakościowe ziarna: zawartość skrobi (%), białka ogólnego (%), cysteiny (kwas cysteinowy) ($mg \cdot g^{-1}$), metioniny (sulfon metioniny) ($mg \cdot g^{-1}$), tłuszczu (%) i włókna surowego (%). Spośród cech wpływających na właściwości prozdrowotne uwzględniono: zawartość flawonoidów (suma w przeliczeniu na kwercetynę) (%) i o-dihydroksyfenoli (suma w przeliczeniu na kwas kawowy) (%). Badano także w ziarnie zawartość popiołu (%), makro- i mikroelementów: azotu ogólnego (N- og.), siarki ogólnej (S-og.), fosforu (P), potasu (K), magnezu (Mg), wapnia (Ca), chloru (Cl) i sodu (Na) ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.). Spośród mikroelementów badano zawartość: żelaza (Fe) , fluoru (F), cynku (Zn), krzemu (Si), jodu (I), miedzi (Cu), manganu (Mn), chromu (Cr), selenu (Se), boru (B), molibdenu (Mo), niklu (Ni), wanadu (V), kobaltu (Co) i wolframu (W) ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.). Obliczono także akumulację pierwiastków (pobranie) z plonem ($kg \cdot ha^{-1}$, $g \cdot ha^{-1}$). Obliczono ponadto stosunek N:S w ziarnie oraz efektywność rolniczą i ekonomiczną krańcową nawożenia azotem i siarką.

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że pszenica jara odmiany Kandela dodatnio reagowała na nawożenie azotem i siarką, wyrażone wielkością i jakością plonów oraz składem chemicznym i poprawą właściwości prozdrowotnych ziarna. Najkorzystniejszy wpływ na plon ziarna pszenicy jarej oraz jego strukturę, cechy jakościowe, chemiczne i

prozdrowotne miało zastosowanie azotu (czynnik I) w dawkach 100 i 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ oraz nawożenie siarką (czynnik II) w ilości 40 kg $S \cdot ha^{-1}$. Stosowanie dawki 50 kg $N \cdot ha^{-1}$ bez względu na dodatek siarki było nieefektywne.

Podsumowując należy stwierdzić, że w warunkach niedoboru siarki w glebach uprawnych Zamojszczyzny konieczne jest stosowanie siarki nawozowej. Ponieważ rolnictwo polskie przechodzi na integrowany system produkcji wariant 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ w połączeniu z 40 kg $S \cdot ha^{-1}$ może być zalecany do stosowania w produkcji pszenicy jarej.

Słowa kluczowe: pszenica jara, azot, siarka, biofortyfikacja agronomiczna, skład chemiczny ziarna, właściwości prozdrowotne, efektywność nawożenia.

Summary

In order to identify the influence of fertilizer sulfur on the yield and quality of spring wheat grain and to improve chemical and health-promoting properties, a strict 3-year field experiment was carried out. The subject of the research was spring wheat (Triticum aestivum L.), Kandela cultivar, fertilized with various doses of nitrogen (factor I) and sulfur (factor II). The static experiment was conducted in the years 2014-2016 according to the split-plot method, at an agriculture in Malice near Hrubieszów, on typical brown dystrophic soil (TBDs), made of medium-grained sandy loam (mgsl) [PTG 2008], classified as a good rye complex. Cattle manure in the amount of 30 t·ha^{-1} was used under the forecrop, which was potato.

The experiment included 2 factors (in four replications):

1. Nitrogen fertilization in the following doses: 0, 50, 100, 150 kg·ha^{-1};
2. Fertilization with sulfur in doses: 0,40 kg·ha^{-1}.

In the full maturity phase, in the harvest (BBCH 89-92), the grain yield and its components were determined.

From each plot (4 m × 5 m), 30 ears were randomly collected in order to determine the yield components: the grains number per ear (pcs spike $^{-1}$), weight of 1000 grain (g) and grain weight per ear (g). After harvest, the grain yield (at 11% humidity) from each plot (kg) was determined and converted into t·ha^{-1}. In the dry grain weight, the grain quality characteristics were examined: the content of starch (%), the total protein (%), cysteine (cysteic acid) (mg·g^{-1}), methionine (methionine sulfone) (mg·g^{-1}), fat (%) and crude fiber (%).

Among the factors affecting health-promoting properties, the following were taken into account: the content of flavonoids (total amount calculated as quercetin) (%) and o-dihydroxyphenols (total amount calculated as coffee acid) (%).

The content of ash (%), macro- and microelements: total nitrogen (N-in total), total sulfur (S in total), phosphorus (P), potassium (K), magnesium (Mg) and calcium (Ca), chlorine (Cl) and sodium (Na) (g·kg-1 d.w.).Among the microelements, the content of: iron (Fe), fluorine (F), zinc (Zn), silicon (Si), iodine (I), copper (Cu), manganese (Mn), chromium (Cr), selenium (Se), boron (B), molybdenum (Mo), nickel (Ni), vanadium (V), cobalt (Co) and tungsten (W) (mg·kg^{-1} d.w.). The accumulation of elements (uptake) with the yield was also calculated (kg·ha^{-1}, g·ha^{-1}). Moreover, the N: S ratio in grain was calculated, as well as agricultural and marginal economic efficiency of nitrogen and sulfur fertilization. The research showed that spring wheat of the Kandela cultivar positively responded to fertilization

with nitrogen and sulfur, expressed in the size and quality of the crops, as well as in the chemical composition and improvement of health-promoting properties of the grain. The use of nitrogen (factor I) in doses of 100 and 150 kg $N \cdot ha^{-1}$ and sulfur fertilization (factor II) in the amount of 40 kg $S \cdot ha^{-1}$. The application of the dose of 50 kg $N \cdot ha^{-1}$ regardless of the addition of sulfur was ineffective.

To sum up, it should be stated that in the conditions of sulfur deficiency in the cultivated soils of the Zamość region, it is necessary to use fertilizer sulfur.

As Polish agriculture is switching to an integrated production system, the variant 100 kg $N \cdot ha^{-1}$ in combination with 40 kg $S \cdot ha^{-1}$ may be recommended for use in the production of spring wheat.

Key words: spring wheat, nitrogen, sulfur, agronomic biofortification, grain chemical composition, pro-health properties, fertilization efficiency.

Spis tabel

1.	Podział systematyczny uprawnych gatunków pszenicy…….	5
2.	Metody zwiększania udziału w spożyciu mikroelementów (Chojnacka i in. 2011)…….	29
3.	Charakterystyka biologiczna pierwiastków chemicznych (kolejność pierwiastków wynika z przeciętnej zawartości w organizmie ludzkim)……..	36
4.	Właściwości odywcze chleba pszennego (w 100 g) (Teklić i in. 2013)……..	45
5.	Charakterystyka gleby w doświadczeniu polowym……	50
6.	Schemat wnoszenia dawek azotu i siarki……	51
7.	Zabiegi agrotechniczne w uprawie pszenicy jarej…….	53
8.	Wpływ nawożenia pszenicy jarej azotem i siarką na plon ziarna i elementy jego struktury (2014-2016)……..	64
9.	Współczynniki korelacji pomiędzy badanymi cechami technologicznymi ziarna pszenicy jarej…….	65
10.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na cechy jakościowe ziarna pszenicy jarej (2014-2016)…….	67
11.	Współczynniki korelacji pomiędzy badanymi cechami jakościowymi ziarna pszenicy jarej……..	67
12.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na cechy jakościowo-prozdrowotne ziarna pszenicy jarej (2014-2016)……...	70
13.	Współczynniki korelacji pomiędzy badanymi cechami technologicznymi ziarna pszenicy jarej…….	70
14.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość maroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)……..	73
15.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację makroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)……...	74
16.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016) …….	78
17.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)……..	79
18.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)…….	83
19.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)……	84
20.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)…….	88
21.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)……..	89
22.	Współczynniki korelacji pomiędzy plonem ziarna ($t \cdot ha^{-1}$) a zawartością i akumulacją pierwiastków w suchej masie ziarna pszenicy jarej……	92
23.	Wpływ nawożenia azotem i siarką na stosunek N:S w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)……	93
24.	Efektywność rolnicza nawożenia pszenicy jarej różnymi dawkami azotu i siarki (2014-2016)…….	94
25.	Efektywność ekonomiczna krańcowa nawożenia azotem pszenicy jarej…	95

Spis wykresów

1. Wpływ wielkości dawki azotu na plon ziarna pszenicy jarej, ($t \cdot ha^{-1}$) (n = 12)……. 64
2. Wpływ wielkości dawki azotu na liczbę ziaren w kłosie, MTZ, masę ziarna z 1 kłosa i liczbę kłosów pszenicy jarej (n = 12)……... 65
3. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość: skrobi (%), glutenu (%), białka ogólnego (%), cysteiny ($mg \cdot g^{-1}$), metioniny ($mg \cdot g^{-1}$) i tłuszczu (%) (n = 12) 68
4. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość: włókna surowego (%), flawonoidów (%), o-dihydroksyfenoli (%) i popiołu (%) (n = 12)……. 71
5. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($kg \cdot ha^{-1}$) azotu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…….. 73
6. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($kg \cdot ha^{-1}$) siarki w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…….. 74
7. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($kg \cdot ha^{-1}$) fosforu, potasu, magnezu i wapnia w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…….. 75
8. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) chloru w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…….. 78
9. Wpływ wielkości wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) sodu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…….. 79
10. Wpływ dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) żelaza, manganu, cynku i miedzi w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…….. 80
11. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) krzemu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…….. 83
12. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) boru w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)……. 84
13. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) jodu, cyny, chromu i molibdenu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…… 85
14. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) fluoru w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…… 88
15. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) selenu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12)…… 89
16. Wpływ wielkości dawki azotu na zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.) i akumulację ($g \cdot ha^{-1}$) niklu, kobaltu, wanadu i wolframu w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n = 12…… 90
17. Efektywność rolnicza i wskaźnik efektywności krańcowej nawożenia pszenicy jarej zróżnicowanymi dawkami azotu i dodatku siarki (n = 4)…….. 95

Spis rysunków

1.	Asymilacja siarczanów w roślinach wyższych (Grzebisz i Haerdter 2006).....	16
2.	Prawdopodobne połączenie asymilacji azotanu i siarczanu przez O-acetyloserynę (*OAS*) (Podleśna 2013)…….	18
3.	Schemat doświadczenia polowego z pszenicą jarą (2014) (52m × 28m) i pojedynczego poletka……	52
4.	Sumy opadów (mm), temperatura powietrza (°C) i współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa (k) w latach 2014-2016 oraz średnie wieloletnie (1971-2011) (Stacja Badawcza w Zamościu)…….	55

ANEKS

Tabela 1A. Wpływ nawożenia azotem i siarką pszenicy jarej na plon ziarna i elementy jego struktury (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$)	Liczba ziaren w kłosie (szt.)	Masa tysiąca ziaren (g)	Masa ziarna z kłosa (g)	Liczba kłosów ($szt \cdot m^{-2}$)
S	N						
Numer cechy			1	2	3	4	5
0 S	0	2014	5,356	39,75	47,70	1,90	546,5
		2015	5,494	40,08	43,69	1,75	540,3
		2016	5,859	40,95	44,50	1,82	539,0
		Średnio	5,570	40,26	45,30	1,82	541,9
	50	2014	5,600	40,00	49,12	1,96	548,3
		2015	5,473	44,88	43,46	1,95	530,8
		2016	5,938	40,10	46,80	1,88	545,0
		Średnio	5,670	41,66	46,46	1,93	541,3
	100	2014	6,784	39,75	49,05	1,95	560,5
		2015	6,423	43,48	42,55	1,85	538,5
		2016	6,580	43,00	50,60	2,18	548,5
		Średnio	6,596	42,08	47,40	1,99	549,2
	150	2014	6,818	39,00	49,24	1,92	573,0
		2015	6,812	42,00	43,70	1,84	553,5
		2016	6,882	45,50	51,35	2,34	548,8
		Średnio	6,837	42,17	48,10	2,03	558,4
40 S	0	2014	5,452	39,25	48,20	1,89	566,8
		2015	5,441	41,73	44,53	1,86	541,5
		2016	6,071	45,50	45,80	2,08	541,8
		Średnio	5,655	42,16	46,18	1,94	550,0
	50	2014	5,684	39,50	49,97	1,97	560,0
		2015	5,757	45,08	44,36	2,00	545,3
		2016	6,185	46,50	48,13	2,24	545,0
		Średnio	5,875	43,69	47,49	2,07	550,1
	100	2014	6,898	40,50	49,17	1,99	580,3
		2015	6,695	43,50	43,61	1,90	555,0
		2016	6,812	49,75	51,80	2,58	555,8
		Średnio	6,802	44,58	48,19	2,16	563,7
	150	2014	7,066	42,50	51,78	2,20	571,5
		2015	6,953	45,00	44,16	1,99	571,0
		2016	7,152	52,50	52,50	2,76	556,3
		Średnio	7,057	46,67	49,48	2,31	566,3

Tabela 2A. Wyniki obliczeń statystycznych plonu ziarna pszenicy jarej i elementów jego struktury (2014-2016)

Zmienne		Plon ziarna ($t \cdot ha^{-1}$)	Liczba ziaren w kłosie (szt.)	Masa tysiąca ziaren (g)	Masa ziarna z kłosa (g)	Liczba kłosów ($szt \cdot m^{-2}$)
Numer cechy		1	2	3	4	5
CV%	N	9,19	2,71	2,37	5,19	1,28
	S	1,43	3,19	1,08	4,36	0,89
	L	2,06	5,20	5,34	7,18	1,37
	N × S	9,31	4,36	2,61	6,95	1,58
	S × L	2,53	6,73	5,45	8,98	1,67
	N × L	9,60	6,47	6,43	10,17	1,96
F obl.	N	555,6	18,17	39,51	38,08	11,20
	S	40,37	75,59	24,68	80,67	16,03
	L	42,03	100,7	301,9	109,3	19,31
	N × S	1,25	3,67	0,40	3,45	0,42
	S × L	1,25	30,02	0,36	21,70	1,23
	N × L	11,42	9,17	25,69	17,66	1,03
p-wartość	N	0,0007	0,0001	0,0002	0,0003	0,0072
	S	0,0000	0,0021	0,0025	0,0001	0,0071
	L	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0024
	N × S	0,3719	0,0824	0,7574	0,0921	0,7466
	S × L	0,3506	0,0008	0,7111	0,0018	0,3575
	N × L	0,0046	0,0082	0,0005	0,0014	0,4868
$NIR_{0,05}$	N	0,097	1,09	0,71	0,07	8,46
	S	0,069	0,77	0,50	0,05	5,98
	L	0,084	0,94	0,62	0,06	7,33
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	1,33	r.n.	0,08	r.n.
	N × L	0,169	1,89	1,23	0,12	r.n.
$NIR_{0,01}$	N	0,148	1,65	1,08	0,10	12,82
	S	0,104	1,17	0,76	0,07	9,06
	L	0,128	1,43	0,93	0,09	11,10
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	2,02	r.n.	0,13	r.n.
	N × L	0,256	2,86	1,87	0,18	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 3A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na cechy jakościowe ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Zawartość					
S	N							
Składnik			skrobia (%)	gluten (%)	białko ogólne (%)	cysteina ($mg \cdot g^{-1}$)	metionina ($mg \cdot g^{-1}$)	tłuszcz (%)
Numer cechy			6	7	8	9	10	11
0 S	0	2014	63,20	26,55	15,11	3,87	3,09	0,63
		2015	63,20	25,83	15,47	3,66	2,64	0,77
		2016	63,10	27,60	13,97	3,77	2,75	0,64
		Średnio	63,17	26,66	14,85	3,77	2,83	0,68
	50	2014	63,20	26,80	16,22	4,69	3,24	0,92
		2015	63,40	29,60	16,20	4,35	2,73	0,86
		2016	63,00	28,13	14,40	3,80	2,76	0,83
		Średnio	63,20	28,18	15,61	4,28	2,91	0,87
	100	2014	62,90	31,60	16,96	4,56	3,29	1,00
		2015	63,50	30,70	16,46	4,48	3,25	0,89
		2016	63,20	30,15	15,36	4,31	2,85	0,89
		Średnio	63,20	30,82	16,26	4,45	3,13	0,93
	150	2014	62,80	33,70	17,33	4,64	3,35	1,12
		2015	64,00	36,50	16,63	4,67	3,54	1,12
		2016	63,40	37,82	16,02	4,33	2,88	0,90
		Średnio	63,40	36,01	16,66	4,55	3,26	1,05
40 S	0	2014	63,30	27,90	15,56	4,34	3,14	0,78
		2015	63,30	29,30	15,55	4,72	3,20	0,80
		2016	64,00	28,10	14,19	3,92	3,54	0,74
		Średnio	63,53	28,43	15,10	4,33	3,29	0,77
	50	2014	63,20	29,40	16,80	4,42	3,32	1,20
		2015	63,50	29,40	16,28	4,57	3,35	0,91
		2016	64,10	30,80	15,10	4,34	3,67	0,85
		Średnio	63,60	29,87	16,06	4,44	3,45	0,99
	100	2014	63,00	32,42	16,85	4,64	3,39	1,32
		2015	62,70	33,55	16,20	4,61	3,57	0,93
		2016	64,40	31,40	15,93	4,32	3,74	0,92
		Średnio	63,37	32,46	16,33	4,52	3,57	1,06
	150	2014	63,50	34,60	17,21	4,77	3,59	1,38
		2015	63,20	37,10	17,01	4,84	3,74	1,56
		2016	64,60	36,90	16,82	4,67	3,87	1,28
		Średnio	63,77	36,20	17,01	4,76	3,73	1,41

Tabela 4A. Wyniki obliczeń statystycznych cech jakościowych ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Zawartość					
		skrobia (%)	gluten (%)	białko ogólne (%)	cysteina ($mg \cdot g^{-1}$)	metionina ($mg \cdot g^{-1}$)	tłuszcz (%)
Numer cechy		6	7	8	9	10	11
CV%	N	0,18	10,46	4,27	5,06	5,05	18,42
	S	0,26	2,13	0,88	2,88	7,33	9,04
	L	0,38	1,62	3,44	3,30	0,67	6,90
	N × S	0,32	10,73	4,39	6,19	8,92	21,26
	S × L	0,66	2,73	3,62	4,58	8,83	11,72
	N × L	0,47	10,80	5,65	6,14	5,80	20,84
F obl.	N	1,11	78,73	82,15	7,64	18,25	36,99
	S	7,07	9,80	10,52	7,41	115,08	26,70
	L	7,90	2,82	80,02	4,86	0,48	7,79
	N × S	0,19	0,80	0,91	1,32	0,22	3,37
	S × L	11,90	0,31	2,94	0,83	25,62	1,31
	N × L	0,71	1,69	3,96	0,18	2,72	2,58
p-wartość	N	0,4162	0,0000	0,0000	0,0179	0,0020	0,0003
	S	0,0375	0,0203	0,0176	0,0346	0,0000	0,0021
	L	0,0208	0,1371	0,0000	0,0555	0,6403	0,0215
	N × S	0,8990	0,5384	0,4916	0,3527	0,8789	0,0960
	S × L	0,0082	0,7419	0,1287	0,4806	0,0012	0,3365
	N × L	0,6569	0,2697	0,0591	0,9723	0,1244	0,1372
$NIR_{0,05}$	N	r.n.	1,46	0,30	0,32	0,15	0,12
	S	0,30	1,04	0,21	0,23	0,11	0,08
	L	0,37	r.n.	0,26	r.n.	r.n.	0,10
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	0,52	r.n.	r.n.	r.n.	0,19	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
$NIR_{0,01}$	N	r.n.	2,22	0,46	r.n.	0,23	0,18
	S	r.n.	1,57	0,32	r.n.	0,17	0,13
	L	r.n.	r.n.	0,40	r.n.	r.n.	r.n.
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	0,78	r.n.	r.n.	r.n.	0,29	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 5A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na cechy jakościowe ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Zawartość włókna surowego (%)	Zawartość flawonoidów (%)	Zawartość o-dihydro-ksyfenoli (%)	Zawartość popiołu (%)
S	N					
Numer cechy			12	13	14	15
0 S	0	2014	2,98	0,014	0,057	1,76
		2015	3,92	0,015	0,065	1,79
		2016	3,03	0,018	0,085	1,74
		Średnio	3,31	0,016	0,069	1,76
	50	2014	3,59	0,017	0,062	1,80
		2015	4,07	0,018	0,066	1,80
		2016	3,25	0,018	0,095	1,85
		Średnio	3,64	0,018	0,074	1,82
	100	2014	3,69	0,019	0,062	1,88
		2015	4,10	0,019	0,068	2,05
		2016	3,35	0,023	0,099	1,86
		Średnio	3,71	0,020	0,076	1,93
	150	2014	3,84	0,022	0,067	1,99
		2015	4,13	0,020	0,094	2,02
		2016	4,02	0,024	0,100	2,11
		Średnio	4,00	0,022	0,087	2,04
40 S	0	2014	3,09	0,015	0,065	1,83
		2015	3,96	0,023	0,084	2,00
		2016	3,43	0,025	0,088	1,82
		Średnio	3,49	0,021	0,079	1,88
	50	2014	3,71	0,016	0,066	1,96
		2015	4,57	0,025	0,084	2,01
		2016	3,42	0,031	0,098	1,94
		Średnio	3,90	0,024	0,083	1,97
	100	2014	3,82	0,018	0,070	2,02
		2015	4,61	0,030	0,087	2,12
		2016	3,75	0,035	0,100	2,00
		Średnio	4,06	0,028	0,086	2,05
	150	2014	4,12	0,021	0,072	2,13
		2015	4,64	0,038	0,096	2,22
		2016	4,38	0,039	0,115	2,20
		Średnio	4,38	0,033	0,094	2,18

Tabela 6A. Wyniki obliczeń statystycznych cech jakościowych ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Zawartość włókna surowego (%)	Zawartość flawonoidów (%)	Zawartość o-dihydro-ksyfenoli (%)	Zawartość popiołu (%)
Numer cechy		12	13	14	15
CV%	N	7,39	14,91	7,59	5,56
	S	3,86	16,50	5,41	3,44
	L	8,15	16,38	26,35	1,68
	N × S	8,40	22,68	9,34	6,55
	S × L	9,10	26,29	17,39	3,91
	N × L	11,60	22,36	18,37	6,05
F obl.	N	51,75	17,26	10,36	62,98
	S	42,31	63,36	15,78	72,58
	L	94,24	31,24	72,07	8,67
	N × S	0,98	1,53	0,07	0,31
	S × L	2,36	17,53	1,62	1,85
	N × L	6,40	0,36	1,12	2,94
p-wartość	N	0,0001	0,0024	0,0087	0,0001
	S	0,0006	0,0002	0,0073	0,0001
	L	0,0000	0,0007	0,0001	0,0170
	N × S	0,4640	0,3013	0,9764	0,8146
	S × L	0,1778	0,0031	0,2730	0,2366
	N × L	0,0199	0,8792	0,4486	0,1075
$NIR_{0,05}$	N	0,16	0,0032	0,0076	0,05
	S	0,11	0,0023	0,0054	0,04
	L	0,14	0,0028	0,0066	0,05
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	0,0040	r.n.	r.n.
	N × L	0,27	r.n.	r.n.	r.n.
$NIR_{0,01}$	N	0,24	0,0049	0,0116	0,08
	S	0,17	0,0035	0,0082	0,06
	L	0,21	0,0043	0,0100	r.n.
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	0,0060	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *α = 0,05, ** α = 0,01, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 7A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość makroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N		N	S	P	K	Mg	Ca
Numer cechy			16	17	18	19	20	21
0 S	0	2014	26,50	1,31	4,20	4,58	1,41	0,35
		2015	27,14	1,22	4,00	3,97	1,36	0,35
		2016	24,50	1,38	4,13	4,11	1,36	0,35
		Średnio	26,05	1,30	4,11	4,22	1,38	0,35
	50	2014	28,45	1,31	4,23	4,68	1,51	0,35
		2015	28,42	1,30	4,21	4,09	1,56	0,45
		2016	25,27	1,35	4,25	4,28	1,56	0,45
		Średnio	27,38	1,32	4,23	4,35	1,54	0,42
	100	2014	29,75	1,35	4,22	4,77	1,61	0,45
		2015	28,88	1,43	4,36	4,12	1,61	0,45
		2016	26,95	1,45	4,31	4,37	1,65	0,45
		Średnio	28,53	1,41	4,30	4,42	1,62	0,45
	150	2014	30,40	1,35	4,34	4,76	1,66	0,45
		2015	29,18	1,38	4,48	4,21	1,66	0,45
		2016	28,11	1,60	4,21	4,57	1,69	0,55
		Średnio	29,23	1,44	4,34	4,51	1,67	0,48
40 S	0	2014	27,30	1,29	4,33	4,67	1,51	0,40
		2015	27,28	1,32	4,45	4,11	1,46	0,45
		2016	24,90	1,41	4,41	4,19	1,46	0,40
		Średnio	26,49	1,34	4,40	4,32	1,48	0,42
	50	2014	29,48	1,29	4,42	4,77	1,56	0,40
		2015	28,57	1,33	4,45	4,11	1,46	0,50
		2016	26,49	1,45	4,48	4,39	1,56	0,45
		Średnio	28,18	1,36	4,45	4,42	1,53	0,45
	100	2014	29,57	1,35	4,41	4,89	1,66	0,45
		2015	28,42	1,45	4,52	4,31	1,66	0,50
		2016	27,94	1,46	4,52	4,67	1,56	0,45
		Średnio	28,64	1,42	4,48	4,62	1,63	0,47
	150	2014	30,20	1,38	4,52	4,88	1,71	0,45
		2015	29,84	1,45	4,57	4,32	1,90	0,50
		2016	29,50	1,64	4,56	5,70	1,86	0,65
		Średnio	29,85	1,49	4,55	4,97	1,82	0,53

Tabela 8A. Wyniki obliczeń statystycznych zawartości makroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Zawartość ($g \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
		N	S	P	K	Mg	Ca
Numer cechy		16	17	18	19	20	21
CV%	N	4,27	4,24	1,63	3,89	7,43	10,11
	S	0,88	1,18	2,58	2,33	1,89	4,67
	L	3,44	4,29	0,43	5,49	0,23	5,41
	N × S	4,39	4,43	3,08	4,83	7,97	11,33
	S × L	3,62	4,55	2,66	6,16	1,94	7,36
	N × L	5,65	6,55	1,89	7,44	7,63	13,51
F obl.	N	82,15	40,0	6,9	6,1	31,86	27,5
	S	10,52	9,3	52,0	6,5	6,22	17,6
	L	80,02	61,4	0,7	18,2	0,04	11,8
	N × S	0,91	0,5	0,5	1,1	2,79	1,2
	S × L	2,94	2,8	0,8	1,5	0,11	1,2
	N × L	3,96	7,2	1,0	2,0	0,87	6,9
p-wartość	N	0,0000	0,0002	0,0226	0,0297	0,0004	0,0007
	S	0,0176	0,0225	0,0004	0,0430	0,0469	0,0057
	L	0,0000	0,0001	0,5188	0,0028	0,9569	0,0083
	N × S	0,4916	0,6706	0,7069	0,4118	0,1314	0,3942
	S × L	0,1287	0,1399	0,4930	0,3046	0,8962	0,3554
	N × L	0,0591	0,0148	0,5189	0,2034	0,5639	0,0167
$NIR_{0,05}$	N	0,53	0,04	0,11	0,28	0,08	0,03
	S	0,37	0,03	0,08	0,20	0,06	0,02
	L	0,46	0,03	r.n.	0,24	r.n.	0,03
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
$NIR_{0,01}$	N	0,80	0,06	r.n.	r.n.	0,13	0,05
	S	r.n.	r.n.	0,12	r.n.	r.n.	0,04
	L	0,69	0,05	r.n.	0,37	r.n.	0,05
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Objaśnienia: r.n.

Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 9A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację makroelemntów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Akumulacja ($kg \cdot ha^{-1}$)					
S	N		N	S	P	K	Mg	Ca
Numer cechy			22	23	24	25	26	27
0 S	0	2014	141,9	7,02	22,50	24,53	7,55	1,87
		2015	149,1	6,69	21,98	21,81	7,47	1,92
		2016	143,5	8,09	24,20	24,08	7,97	2,05
		Średnio	144,9	7,26	22,89	23,47	7,66	1,95
	50	2014	159,3	7,34	23,69	26,21	8,46	1,96
		2015	155,5	7,11	23,04	22,38	8,54	2,46
		2016	150,1	8,02	25,24	25,41	9,26	2,67
		Średnio	155,0	7,49	23,99	24,67	8,75	2,36
	100	2014	201,8	9,16	28,63	32,36	10,92	3,05
		2015	185,5	9,18	28,00	26,46	10,34	2,89
		2016	177,3	9,54	28,36	28,75	10,86	2,96
		Średnio	188,2	9,29	28,33	29,19	10,71	2,97
	150	2014	207,3	9,20	29,59	32,45	11,32	3,07
		2015	198,8	9,40	30,52	28,68	11,31	3,07
		2016	193,5	11,01	28,97	31,45	11,63	3,79
		Średnio	199,8	9,87	29,69	30,86	11,42	3,31
40 S	0	2014	148,8	7,03	23,61	25,46	8,23	2,18
		2015	148,4	7,18	24,21	22,36	7,94	2,45
		2016	151,2	8,56	26,77	25,44	8,86	2,43
		Średnio	149,5	7,59	24,86	24,42	8,35	2,35
	50	2014	167,6	7,33	25,12	27,11	8,87	2,27
		2015	164,5	7,66	25,62	23,66	8,41	2,88
		2016	163,8	8,97	27,71	27,15	9,65	2,78
		Średnio	165,3	7,99	26,15	25,98	8,97	2,65
	100	2014	204,0	9,31	30,42	33,73	11,45	3,10
		2015	190,3	9,71	30,26	28,86	11,11	3,35
		2016	190,3	9,95	30,79	31,81	10,63	3,07
		Średnio	194,9	9,66	30,49	31,47	11,06	3,17
	150	2014	213,4	9,75	31,94	34,48	12,08	3,18
		2015	207,5	10,08	31,78	30,04	13,21	3,48
		2016	211,0	11,73	32,61	40,77	13,30	4,65
		Średnio	210,6	10,52	32,11	35,10	12,87	3,77

Tabela 10A. Wyniki obliczeń statystycznych dla akumulacji makroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Akumulacja ($kg \cdot ha^{-1}$)					
		N	S	P	K	Mg	Ca
Numer cechy		22	23	24	25	26	27
CV%	N	13,26	13,32	10,69	13,02	16,35	18,82
	S	2,30	2,63	3,99	3,89	3,39	5,99
	L	1,89	6,30	1,99	6,57	2,12	6,71
	N × S	13,48	13,60	11,41	13,78	16,87	19,84
	S × L	3,13	6,92	5,43	7,92	4,01	9,19
	N × L	13,53	14,99	11,05	14,94	16,67	21,34
F obl.	N	1002,5	614,8	324,3	53,30	170,4	84,01
	S	90,40	72,07	135,3	14,28	22,01	25,54
	L	30,50	206,0	16,78	20,35	4,29	16,00
	N × S	3,04	1,83	0,23	1,62	3,61	0,76
	S × L	8,28	6,90	2,98	2,09	0,10	1,27
	N × L	10,41	13,03	5,57	1,63	1,95	6,64
p-wartość	N	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000
	S	0,0001	0,0001	0,0000	0,0092	0,0034	0,0023
	L	0,0007	0,0000	0,0035	0,0021	0,0697	0,0039
	N × S	0,1144	0,2427	0,8700	0,2821	0,0846	0,5542
	S × L	0,0188	0,0279	0,1261	0,2043	0,9068	0,3464
	N × L	0,0059	0,0032	0,0277	0,2839	0,2186	0,0182
$NIR_{0,05}$	N	2,9	0,19	0,65	2,01	0,50	0,23
	S	2,1	0,13	0,46	1,42	0,35	0,16
	L	2,5	0,16	0,56	1,74	r.n.	0,20
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	3,6	0,23	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	5,1	0,32	1,12	r.n.	r.n.	0,40
$NIR_{0,01}$	N	4,5	0,28	0,98	3,04	0,76	0,35
	S	3,1	0,20	0,69	2,15	0,53	0,25
	L	3,7	0,25	0,85	2,63	r.n.	0,30
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	7,7	0,49	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 11A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N		Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
Numer cechy			28	29	30	31	32	33
0 S	0	2014	174,0	3,51	42,10	34,70	31,50	3,50
		2015	142,0	3,64	38,60	36,10	28,00	3,39
		2016	151,0	6,33	39,50	37,50	36,90	3,46
		Średnio	155,7	4,49	40,07	36,10	32,13	3,45
	50	2014	174,0	6,66	46,20	35,70	33,10	3,87
		2015	145,0	8,77	39,80	37,30	29,30	3,46
		2016	158,0	7,82	40,80	39,10	37,20	3,57
		Średnio	159,0	7,75	42,27	37,37	33,20	3,63
	100	2014	182,0	8,96	46,50	36,10	34,20	3,95
		2015	146,0	10,70	42,20	39,40	31,10	3,59
		2016	162,0	12,67	41,60	42,50	38,90	3,74
		Średnio	163,3	10,78	43,43	39,33	34,73	3,76
	150	2014	184,0	9,26	48,50	36,90	35,10	4,05
		2015	149,0	12,43	43,50	39,90	31,50	3,77
		2016	168,0	15,40	43,90	43,20	39,10	4,13
		Średnio	167,0	12,36	45,30	40,00	35,23	3,98
40 S	0	2014	127,0	6,26	45,50	34,30	33,50	3,78
		2015	175,0	6,64	40,60	34,50	31,20	3,59
		2016	158,0	9,60	41,50	34,50	37,30	3,54
		Średnio	153,3	7,50	42,53	34,43	34,00	3,64
	50	2014	168,0	7,88	46,50	34,80	34,20	3,95
		2015	188,0	9,24	41,90	35,90	32,60	3,26
		2016	168,0	10,08	44,20	38,30	36,80	3,96
		Średnio	174,7	9,07	44,20	36,33	34,53	3,72
	100	2014	186,0	8,01	47,40	35,70	33,60	4,02
		2015	193,0	11,19	44,90	36,00	33,10	3,79
		2016	176,0	13,75	47,10	38,60	39,50	4,05
		Średnio	185,0	10,98	46,47	36,77	35,40	3,95
	150	2014	192,0	16,10	50,50	36,20	36,20	4,20
		2015	192,0	18,30	46,50	36,40	32,90	3,95
		2016	182,0	17,20	48,30	39,00	40,80	4,30
		Średnio	188,7	17,20	48,43	37,20	36,63	4,15

Tabela 12A. Wyniki obliczeń statystycznych zawartości mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
		Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
Numer cechy		28	29	30	31	32	33
CV%	N	5,30	32,43	4,67	3,44	3,19	5,19
	S	4,21	11,69	3,00	2,71	1,91	2,10
	L	2,13	13,37	4,24	3,91	8,48	3,56
	N × S	7,37	35,56	5,58	4,48	3,77	5,62
	S × L	7,87	17,78	5,29	4,95	8,78	5,21
	N × L	6,25	35,60	6,35	5,40	9,13	6,62
F obl.	N	8,62	26,61	40,2	30,9	18,8	20,3
	S	16,32	22,07	49,6	57,7	20,2	10,0
	L	2,09	14,44	49,6	60,1	199,5	14,4
	N × S	2,62	4,12	0,5	2,4	0,7	0,2
	S × L	18,32	0,06	2,9	7,4	4,0	0,7
	N × L	1,00	1,01	0,5	2,7	1,1	1,6
p-wartość	N	0,0136	0,0001	0,0002	0,0005	0,0019	0,0015
	S	0,0068	0,0033	0,0004	0,0003	0,0041	0,0194
	L	0,2050	0,0051	0,0002	0,0001	0,0000	0,0051
	N × S	0,1454	0,0664	0,6667	0,1696	0,5800	0,8771
	S × L	0,0028	0,9446	0,1336	0,0239	0,0783	0,5377
	N × L	0,5019	0,4975	0,8146	0,1275	0,4589	0,2949
$NIR_{0,05}$	N	12,14	1,73	1,30	0,92	1,01	0,17
	S	8,58	1,22	0,92	0,65	0,72	0,12
	L	r.n.	1,49	1,12	0,80	0,88	0,15
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	14,86	r.n.	r.n.	1,13	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	1,59	r.n.	r.n.
$NIR_{0,01}$	N	r.n.	2,61	1,97	1,39	1,54	0,26
	S	13,00	1,85	1,39	0,98	1,09	0,19
	L	r.n.	2,26	1,70	1,21	1,33	0,23
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	22,52	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 13A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
S	N		Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
Numer cechy			34	35	36	37	38	39
0 S	0	2014	93,2	1,88	21,21	18,59	16,87	1,87
		2015	78,0	2,00	21,21	19,83	15,38	1,86
		2016	88,5	3,71	23,14	21,97	21,62	2,03
		Średnio	86,6	2,53	21,85	20,13	17,96	1,92
	50	2014	97,4	3,73	25,87	19,99	18,54	2,17
		2015	79,4	4,80	21,78	20,41	16,04	1,89
		2016	93,8	4,64	24,23	23,22	22,09	2,12
		Średnio	90,2	4,39	23,96	21,21	18,89	2,06
	100	2014	123,5	6,08	31,55	24,49	23,20	2,68
		2015	93,8	6,87	27,11	25,31	19,98	2,31
		2016	106,6	8,34	27,37	27,97	25,60	2,46
		Średnio	107,9	7,10	28,67	25,92	22,92	2,48
	150	2014	125,5	6,31	33,07	25,16	23,93	2,76
		2015	101,5	8,47	29,63	27,18	21,46	2,57
		2016	115,6	10,60	30,21	29,73	26,91	2,84
		Średnio	114,2	8,46	30,97	27,36	24,10	2,72
40 S	0	2014	69,2	3,41	24,81	18,70	18,26	2,06
		2015	95,2	3,61	22,09	18,77	16,98	1,95
		2016	95,9	5,83	25,19	20,94	22,64	2,15
		Średnio	86,8	4,28	24,03	19,47	19,29	2,05
	50	2014	95,5	4,48	26,43	19,78	19,44	2,25
		2015	108,2	5,32	24,12	20,67	18,77	1,88
		2016	103,9	6,23	27,34	23,69	22,76	2,45
		Średnio	102,5	5,34	25,96	21,38	20,32	2,19
	100	2014	128,3	5,53	32,70	24,63	23,18	2,77
		2015	129,2	7,49	30,06	24,10	22,16	2,54
		2016	119,9	9,37	32,08	26,29	26,91	2,76
		Średnio	125,8	7,46	31,61	25,01	24,08	2,69
	150	2014	135,7	11,38	35,68	25,58	25,58	2,97
		2015	133,5	12,72	32,33	25,31	22,88	2,75
		2016	130,2	12,30	34,54	27,89	29,18	3,08
		Średnio	133,1	12,13	34,19	26,26	25,88	2,93

Tabela 14A. Wyniki obliczeń statystycznych dla akumulacji mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
		Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu
Numer cechy		34	35	36	37	38	39
CV%	N	14,13	40,39	13,72	12,35	12,18	14,25
	S	5,83	13,05	4,46	1,34	3,29	3,55
	L	2,46	14,40	4,54	5,76	10,53	4,91
	N × S	15,68	43,53	14,47	12,47	12,63	14,71
	S × L	8,72	19,44	6,53	6,02	11,08	6,17
	N × L	14,83	43,23	14,57	13,65	16,16	15,25
F obl.	N	91,93	78,79	272,7	260,1	191,2	199,6
	S	48,86	24,69	86,45	9,14	41,87	36,64
	L	4,17	15,03	44,86	84,84	214,3	35,06
	N × S	5,65	4,51	1,82	1,84	0,35	0,60
	S × L	24,88	0,01	4,51	3,21	1,78	1,91
	N × L	3,44	0,74	2,36	0,56	1,10	2,63
p-wartość	N	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	S	0,0005	0,0025	0,0001	0,0233	0,0006	0,0009
	L	0,0732	0,0046	0,0002	0,0000	0,0000	0,0005
	N × S	0,0350	0,0556	0,2445	0,2410	0,7906	0,6362
	S × L	0,0012	0,9854	0,0638	0,1129	0,2475	0,2279
	N × L	0,0790	0,6376	0,1600	0,7530	0,4541	0,1323
$NIR_{0,05}$	N	6,2	1,17	0,92	0,71	0,76	0,10
	S	4,4	0,83	0,65	0,51	0,54	0,07
	L	r.n.	1,02	0,80	0,62	0,66	0,08
	N × S	8,8	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	7,6	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
$NIR_{0,01}$	N	9,4	1,78	1,39	1,08	1,16	0,15
	S	6,7	1,26	0,99	0,77	0,82	0,10
	L	r.n.	1,54	1,21	0,94	1,00	0,13
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	11,6	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 15A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N		Si	B	I	Sn	Cr	Mo
Numer cechy			40	41	42	43	44	45
0 S	0	2014	12,90	1,440	0,114	0,529	0,322	0,130
		2015	11,00	1,890	0,218	0,618	0,325	0,289
		2016	12,00	1,930	0,236	0,599	0,334	0,171
		Średnio	11,97	1,753	0,189	0,582	0,327	0,197
	50	2014	15,20	1,460	0,420	0,563	0,312	0,159
		2015	13,40	1,920	0,306	0,652	0,340	0,350
		2016	15,90	2,320	0,470	0,634	0,483	0,106
		Średnio	14,83	1,900	0,399	0,616	0,378	0,205
	100	2014	15,50	1,540	0,640	0,585	0,326	0,198
		2015	16,20	2,060	0,360	0,662	0,420	0,469
		2016	15,20	2,680	0,520	0,642	0,481	0,175
		Średnio	15,63	2,093	0,507	0,630	0,409	0,281
	150	2014	16,20	1,560	0,944	0,590	0,420	0,214
		2015	14,30	2,230	0,650	0,700	0,480	0,457
		2016	16,80	2,890	0,780	0,655	0,522	0,202
		Średnio	15,77	2,227	0,791	0,648	0,474	0,291
40 S	0	2014	14,20	1,100	0,597	0,616	0,379	0,139
		2015	15,20	1,150	0,461	0,660	0,435	0,144
		2016	13,50	1,320	0,580	0,569	0,452	0,092
		Średnio	14,30	1,190	0,546	0,615	0,422	0,125
	50	2014	16,10	1,420	1,420	0,704	0,447	0,156
		2015	16,10	1,530	0,820	0,680	0,451	0,240
		2016	14,90	2,300	0,920	0,661	0,485	0,098
		Średnio	15,70	1,750	1,053	0,682	0,461	0,165
	100	2014	17,80	1,480	1,790	0,742	0,640	0,190
		2015	15,60	1,790	1,112	0,712	0,479	0,378
		2016	16,60	1,570	1,480	0,696	0,533	0,108
		Średnio	16,67	1,613	1,461	0,717	0,551	0,225
	150	2014	19,80	1,540	1,930	0,762	0,655	0,204
		2015	19,25	2,030	1,640	0,742	0,498	0,278
		2016	17,10	2,080	1,850	0,712	0,552	0,121
		Średnio	18,72	1,883	1,807	0,739	0,568	0,201

Tabela 16A. Wyniki obliczeń statystycznych zawartości mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
		Si	B	I	Sn	Cr	Mo
Numer cechy		40	41	42	43	44	45
CV%	N	9,76	11,65	40,50	5,43	12,49	18,63
	S	5,81	10,66	44,14	5,27	11,52	15,23
	L	2,38	15,75	13,86	2,74	5,03	39,09
	N × S	11,71	16,38	61,89	7,77	17,18	24,46
	S × L	6,97	19,92	46,79	7,07	14,17	43,75
	N × L	10,12	20,47	43,64	6,19	14,12	45,59
F obl.	N	12,56	7,26	87,82	40,47	6,7	35,38
	S	13,35	18,24	313,04	115,59	17,0	70,97
	L	1,12	19,90	15,43	15,47	1,6	233,62
	N × S	1,06	1,01	12,95	4,20	0,3	1,96
	S × L	1,82	2,82	3,90	30,20	2,7	23,64
	N × L	0,09	0,94	1,93	0,90	0,4	10,39
p-wartość	N	0,0054	0,0202	0,0000	0,0002	0,0244	0,0003
	S	0,0107	0,0053	0,0000	0,0000	0,0062	0,0002
	L	0,3872	0,0022	0,0043	0,0043	0,2739	0,0000
	N × S	0,4338	0,4521	0,0050	0,0639	0,8440	0,2219
	S × L	0,2411	0,1370	0,0822	0,0007	0,1427	0,0014
	N × L	0,9951	0,5308	0,2218	0,5472	0,8622	0,0059
$NIR_{0,05}$	N	1,70	0,31	0,15	0,022	0,087	0,026
	S	1,20	0,22	0,10	0,016	0,061	0,019
	L	r.n.	0,27	0,13	0,019	r.n.	0,023
	N × S	r.n.	r.n.	0,21	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	0,027	r.n.	0,032
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	0,046
$NIR_{0,01}$	N	2,58	r.n.	0,22	0,034	r.n.	0,040
	S	1,82	0,33	0,16	0,024	0,093	0,028
	L	r.n.	0,41	0,19	0,029	r.n.	0,035
	N × S	r.n.	r.n.	0,31	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	0,041	r.n.	0,049
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	0,069

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 17A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
S	N		Si	B	I	Sn	Cr	Mo
Numer cechy			46	47	48	49	50	51
0 S	0	2014	6,91	0,771	0,061	0,283	0,172	0,070
		2015	6,04	1,038	0,120	0,339	0,179	0,159
		2016	7,03	1,131	0,138	0,351	0,196	0,100
		Średnio	6,66	0,980	0,106	0,325	0,182	0,110
	50	2014	8,51	0,818	0,235	0,315	0,175	0,089
		2015	7,33	1,051	0,167	0,357	0,186	0,192
		2016	9,44	1,378	0,279	0,376	0,287	0,063
		Średnio	8,43	1,082	0,227	0,349	0,216	0,115
	100	2014	10,52	1,045	0,434	0,397	0,221	0,134
		2015	10,41	1,323	0,231	0,425	0,270	0,301
		2016	10,00	1,763	0,342	0,422	0,316	0,115
		Średnio	10,31	1,377	0,336	0,415	0,269	0,184
	150	2014	11,05	1,064	0,644	0,402	0,286	0,146
		2015	9,74	1,519	0,443	0,477	0,327	0,311
		2016	11,56	1,989	0,537	0,451	0,359	0,139
		Średnio	10,78	1,524	0,541	0,443	0,324	0,199
40 S	0	2014	7,74	0,600	0,325	0,336	0,207	0,076
		2015	8,27	0,626	0,251	0,356	0,237	0,078
		2016	8,20	0,801	0,352	0,345	0,274	0,056
		Średnio	8,07	0,676	0,309	0,347	0,239	0,070
	50	2014	9,15	0,807	0,807	0,400	0,254	0,089
		2015	9,27	0,881	0,472	0,391	0,260	0,138
		2016	9,22	1,423	0,569	0,409	0,300	0,061
		Średnio	9,21	1,037	0,616	0,400	0,271	0,096
	100	2014	12,28	1,021	1,235	0,512	0,441	0,131
		2015	10,44	1,198	0,744	0,477	0,321	0,253
		2016	11,31	1,069	1,008	0,474	0,363	0,074
		Średnio	11,34	1,096	0,996	0,487	0,375	0,153
	150	2014	13,99	1,088	1,364	0,538	0,463	0,144
		2015	13,38	1,411	1,140	0,516	0,346	0,193
		2016	12,23	1,488	1,323	0,509	0,395	0,087
		Średnio	13,20	1,329	1,276	0,521	0,401	0,141

Tabela 18A. Wyniki obliczeń statystycznych akumulacji mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
		Si	B	I	Sn	Cr	Mo
Numer cechy		46	47	48	49	50	51
CV%	N	18,30	19,42	47,62	14,22	21,25	27,17
	S	7,24	9,07	45,07	6,80	12,97	13,76
	L	2,89	17,18	14,41	2,24	6,80	37,79
	N × S	19,94	21,90	68,35	15,99	25,15	30,91
	S × L	8,22	20,28	47,78	7,99	16,10	41,84
	N × L	18,68	26,70	50,58	14,57	22,87	49,38
F obl.	N	45,50	18,39	158,9	276,5	16,87	56,20
	S	21,35	12,03	427,0	189,3	18,84	43,21
	L	1,70	21,58	21,82	10,25	2,59	163,0
	N × S	1,39	0,97	26,13	9,76	0,48	2,13
	S × L	1,40	2,48	5,58	25,87	2,51	15,16
	N × L	0,40	0,99	2,90	3,32	0,47	10,34
p-wartość	N	0,0002	0,0020	0,0000	0,0000	0,0025	0,0001
	S	0,0036	0,0133	0,0000	0,0000	0,0049	0,0006
	L	0,2600	0,0018	0,0018	0,0116	0,1543	0,0000
	N × S	0,3349	0,4652	0,0008	0,0100	0,7082	0,1982
	S × L	0,3159	0,1640	0,0620	0,0011	0,1617	0,0045
	N × L	0,8565	0,5054	0,1102	0,0847	0,8092	0,0060
$NIR_{0,05}$	N	1,06	0,206	0,083	0,0122	0,0589	0,0193
	S	0,75	0,146	0,059	0,0099	0,0416	0,0136
	L	r.n.	0,178	0,072	0,0122	r.n.	0,0169
	N × S	r.n.	r.n.	0,0118	0,0199	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	0,0172	r.n.	0,0236
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	0,0334
$NIR_{0,01}$	N	1,60	0,3012	0,126	0,0213	0,0892	0,0292
	S	1,13	r.n.	0,089	0,0150	0,0631	0,0207
	L	r.n.	0,270	0,109	r.n.	r.n.	0,053
	N × S	r.n.	r.n.	0,178	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	0,0261	r.n.	0,0358
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	0,0506

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 19A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na zawartość mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
S	N		F	Se	Ni	Co	V	W
Numer cechy			52	53	54	55	56	57
0 S	0	2014	0,239	0,122	0,261	0,0032	0,060	0,0480
		2015	0,226	0,040	0,222	0,0031	0,080	0,0480
		2016	0,210	0,057	0,184	0,0030	0,085	0,0510
		Średnio	0,225	0,073	0,222	0,0031	0,075	0,0490
	50	2014	0,224	0,152	0,248	0,0028	0,064	0,0520
		2015	0,212	0,042	0,191	0,0025	0,085	0,0560
		2016	0,142	0,065	0,182	0,0082	0,118	0,0630
		Średnio	0,193	0,086	0,207	0,0045	0,089	0,0570
	100	2014	0,204	0,159	0,232	0,0047	0,070	0,0560
		2015	0,190	0,046	0,185	0,0054	0,091	0,0620
		2016	0,133	0,073	0,170	0,0095	0,128	0,0680
		Średnio	0,176	0,093	0,196	0,0065	0,096	0,0620
	150	2014	0,173	0,120	0,179	0,0054	0,073	0,0660
		2015	0,166	0,076	0,172	0,0085	0,101	0,0680
		2016	0,122	0,095	0,175	0,0120	0,139	0,0810
		Średnio	0,154	0,097	0,175	0,0086	0,104	0,0717
40 S	0	2014	0,281	0,149	0,215	0,0033	0,047	0,0500
		2015	0,230	0,045	0,214	0,0048	0,110	0,0540
		2016	0,258	0,063	0,293	0,0038	0,133	0,0540
		Średnio	0,256	0,086	0,241	0,0040	0,097	0,0527
	50	2014	0,207	0,163	0,183	0,0069	0,118	0,0580
		2015	0,218	0,051	0,207	0,0046	0,120	0,0610
		2016	0,195	0,076	0,200	0,0085	0,130	0,0620
		Średnio	0,207	0,097	0,197	0,0067	0,123	0,0603
	100	2014	0,201	0,168	0,159	0,0058	0,122	0,0720
		2015	0,206	0,093	0,177	0,0056	0,132	0,0780
		2016	0,190	0,085	0,175	0,0106	0,143	0,0550
		Średnio	0,199	0,115	0,170	0,0073	0,132	0,0683
	150	2014	0,190	0,153	0,152	0,0068	0,125	0,0840
		2015	0,192	0,097	0,162	0,0098	0,175	0,0850
		2016	0,186	0,109	0,158	0,0132	0,165	0,0860
		Średnio	0,189	0,120	0,157	0,0099	0,155	0,0850

Tabela 20A. Wyniki obliczeń statystycznych dla zawartości mikroelementów w ziarnie pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Zawartość ($mg \cdot kg^{-1}$ s.m.)					
		F	Se	Ni	Co	V	W
Numer cechy		52	53	54	55	56	57
CV%	N	12,83	11,83	12,37	33,02	14,53	15,94
	S	6,53	8,92	2,26	10,15	16,30	5,27
	L	7,46	39,37	2,88	25,65	17,06	2,87
	N × S	14,54	15,11	13,27	34,81	22,34	17,08
	S × L	11,20	40,43	9,33	27,72	23,88	7,54
	N × L	15,42	42,53	13,10	45,74	23,01	16,66
F obl.	N	39,47	10,7	7,35	54,7	6,10	32,29
	S	30,68	18,3	0,73	15,5	23,02	10,60
	L	20,03	178,4	0,60	49,5	12,61	1,57
	N × S	1,03	0,7	0,86	0,9	0,65	1,28
	S × L	9,79	0,6	5,30	0,5	0,60	3,98
	N × L	2,11	4,6	0,25	8,6	0,39	0,98
p-wartość	N	0,0002	0,0079	0,0196	0,0001	0,0297	0,0004
	S	0,0015	0,0052	0,4244	0,0076	0,0030	0,0174
	L	0,0022	0,0000	0,5795	0,0002	0,0071	0,2830
	N × S	0,4452	0,5028	0,5110	0,4825	0,6127	0,3619
	S × L	0,0129	0,5642	0,0472	0,6048	0,5805	0,0794
	N × L	0,1921	0,0436	0,9427	0,0096	0,8613	0,5084
$NIR_{0,05}$	N	0,016	0,014	0,036	0,0011	0,0256	0,0071
	S	0,012	0,010	r.n.	0,0008	0,0181	0,0050
	L	0,014	0,012	r.n.	0,0010	0,0222	r.n.
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	0,044	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	0,024	r.n.	0,0020	r.n.	r.n.
$NIR_{0,01}$	N	0,025	0,021	r.n.	0,0017	r.n.	0,0107
	S	0,017	0,015	r.n.	0,0012	0,0274	0,0076
	L	0,021	0,018	r.n.	0,0015	0,0336	r.n.
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	0,0030	r.n.	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 21A. Wpływ nawożenia azotem i siarką na akumulację mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Nawożenie		Lata	Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
S	N		F	Se	Ni	Co	V	W
Numer cechy			58	59	60	61	62	63
0 S	0	2014	0,128	0,065	0,140	0,0017	0,0321	0,0257
		2015	0,124	0,022	0,122	0,0017	0,0440	0,0264
		2016	0,123	0,033	0,108	0,0018	0,0498	0,0299
		Średnio	0,125	0,040	0,123	0,0017	0,0420	0,0273
	50	2014	0,125	0,085	0,139	0,0016	0,0358	0,0291
		2015	0,116	0,023	0,105	0,0014	0,0465	0,0306
		2016	0,084	0,039	0,108	0,0049	0,0701	0,0374
		Średnio	0,109	0,049	0,117	0,0026	0,0508	0,0324
	100	2014	0,138	0,108	0,157	0,0032	0,0475	0,0380
		2015	0,122	0,030	0,119	0,0035	0,0584	0,0398
		2016	0,088	0,048	0,112	0,0063	0,0842	0,0447
		Średnio	0,116	0,062	0,129	0,0043	0,0634	0,0409
	150	2014	0,118	0,082	0,122	0,0037	0,0498	0,0450
		2015	0,113	0,052	0,117	0,0058	0,0688	0,0463
		2016	0,084	0,065	0,120	0,0083	0,0957	0,0557
		Średnio	0,105	0,066	0,120	0,0059	0,0714	0,0490
40 S	0	2014	0,153	0,081	0,117	0,0018	0,0256	0,0273
		2015	0,125	0,024	0,116	0,0026	0,0599	0,0294
		2016	0,157	0,038	0,178	0,0023	0,0807	0,0328
		Średnio	0,145	0,048	0,137	0,0022	0,0554	0,0298
	50	2014	0,118	0,093	0,104	0,0039	0,0671	0,0330
		2015	0,126	0,029	0,119	0,0026	0,0691	0,0351
		2016	0,121	0,047	0,124	0,0053	0,0804	0,0383
		Średnio	0,121	0,056	0,116	0,0039	0,0722	0,0355
	100	2014	0,139	0,116	0,110	0,0040	0,0842	0,0497
		2015	0,138	0,062	0,119	0,0037	0,0884	0,0522
		2016	0,129	0,058	0,119	0,0072	0,0974	0,0375
		Średnio	0,135	0,079	0,116	0,0050	0,0900	0,0465
	150	2014	0,134	0,108	0,107	0,0048	0,0883	0,0594
		2015	0,133	0,067	0,113	0,0068	0,1217	0,0591
		2016	0,133	0,078	0,113	0,0094	0,1180	0,0615
		Średnio	0,134	0,085	0,111	0,0070	0,1093	0,0600

Tabela 22A. Wyniki obliczeń statystycznych akumulacji mikroelementów w suchej masie ziarna pszenicy jarej (2014-2016)

Zmienne		Akumulacja ($g \cdot ha^{-1}$)					
		F	Se	Ni	Co	V	W
Numer cechy		58	59	60	61	62	63
18,	N	6,11	21,00	4,86	40,67	22,63	24,62
	S	8,14	10,36	1,03	11,18	17,92	6,89
CV%	L	5,60	37,82	2,98	27,60	18,11	3,95
	N × S	10,43	23,78	6,58	42,38	29,57	25,90
	S × L	11,43	39,27	9,27	29,82	25,68	9,06
	N × L	9,73	44,38	7,25	52,58	29,49	25,40
	N	8,54	30,67	1,11	114,3	16,38	61,82
	S	45,45	22,40	0,15	25,92	30,78	14,52
F obl.	L	10,75	149,2	0,62	78,92	15,72	2,39
	N × S	1,20	1,18	0,87	1,12	1,32	1,77
	S × L	11,40	0,47	5,33	0,29	0,51	2,91
	N × L	2,98	3,42	0,48	12,03	0,47	1,19
	N	0,0138	0,0005	0,4174	0,0000	0,0027	0,0001
	S	0,0005	0,0032	0,7133	0,0022	0,0014	0,0089
p-	L	0,0104	0,0000	0,5680	0,0000	0,0041	0,1729
wartość	N × S	0,3878	0,3937	0,5077	0,4120	0,3535	0,2527
	S × L	0,0090	0,6469	0,0468	0,7574	0,6223	0,1307
	N × L	0,1048	0,0802	0,8036	0,0040	0,8115	0,4205
	N	0,0103	0,0092	r.n.	0,0006	0,0155	0,0050
	S	0,0073	0,0065	r.n.	0,0004	0,0110	0,0036
$NIR_{0,05}$	L	0,0089	0,0080	r.n.	0,0005	0,0134	r.n.
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	0,0127	r.n.	0,0274	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	0,0011	r.n.	r.n.
	N	r.n.	0,0139	r.n.	0,0009	0,0235	0,0076
	S	0,0111	0,0098	r.n.	0,0007	0,0166	0,0054
$NIR_{0,01}$	L	r.n.	0,0120	r.n.	0,0008	0,0203	r.n.
	N × S	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	S × L	0,0192	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.	r.n.
	N × L	r.n.	r.n.	r.n.	0,0016	r.n.	r.n.

Objaśnienia:
Zmienne: N - dawka azotu ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S – dawka siarki ($df_1 = 1$, $df_2 = 6$), L – lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × S – dawka azotu × dawka siarki ($df_1 = 3$, $df_2 = 6$), S × L – dawka siarki × lata ($df_1 = 2$, $df_2 = 6$), N × L – dawka azotu × lata ($df_1 = 6$, $df_2 = 6$): gdzie df_1 – stopnie swobody zmiennej, df_2 – stopnie swobody błędu; *CV%* - współczynnik zmienności; F obl. z analizy wariancji: istotne różnice na poziomie *$\alpha = 0,05$, ** $\alpha = 0,01$, p-wartość rozkładu F, NIR – najmniejsza istotna różnica; r.n. – różnica nieistotna

Tabela 23A. Współczynniki korelacji (r) pomiędzy zawartością pierwiastków w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n= 24)

Pierwiastek	S	P	K	Ca	Mg	Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	Si	B	I	Sn	Cr	Mo	F	Se	Ni	Co	V	W
Azot (N)	0,10	**0,41**	**0,48**	**0,43**	**0,66**	**0,49**	**0,45**	**0,72**	-0,02	-0,16	**0,58**	**0,65**	-0,11	**0,60**	**0,52**	0,33	0,40	-0,13	**0,50**	**-0,47**	0,25	0,12	**0,53**
Siarka (S)		**0,45**	**0,42**	**0,78**	**0,65**	0,30	**0,79**	0,30	**0,64**	**0,72**	**0,57**	**0,45**	**0,58**	**0,43**	0,34	**0,53**	-0,06	**-0,54**	-0,06	**-0,41**	**0,81**	**0,70**	**0,70**
Fosfor (P)			0,33	**0,56**	**0,60**	**0,52**	**0,65**	**0,57**	-0,05	0,29	**0,47**	**0,68**	-0,12	**0,74**	**0,69**	**0,69**	0,02	-0,10	0,15	-0,39	**0,51**	**0,66**	**0,58**
Potas (K)				**0,45**	**0,53**	**0,42**	0,36	**0,80**	0,01	**0,52**	**0,81**	**0,50**	-0,12	**0,65**	0,21	**0,41**	-0,40	-0,10	**0,73**	-0,27	**0,45**	0,18	0,42
Wapń (Ca)					**0,76**	**0,42**	**0,76**	0,36	**0,45**	**0,43**	**0,50**	**0,59**	0,40	**0,56**	**0,57**	**0,58**	0,10	**-0,48**	-0,04	**-0,55**	**0,75**	**0,68**	**0,79**
Magnez (Mg)						**0,47**	**0,86**	**0,65**	0,38	0,34	**0,74**	**0,79**	0,37	**0,71**	**0,63**	**0,62**	0,20	**-0,52**	0,31	**-0,65**	**0,72**	**0,61**	**0,90**
Chlor (Cl)							**0,42**	**0,59**	-0,14	0,24	**0,46**	**0,63**	-0,13	**0,64**	0,38	**0,41**	-0,16	-0,21	0,37	-0,24	0,31	**0,48**	**0,55**
Sód (Na)								**0,51**	**0,51**	**0,53**	**0,64**	**0,73**	**0,45**	**0,67**	**0,65**	**0,68**	0,14	**-0,54**	0,05	**-0,61**	**0,80**	**0,77**	**0,85**
Żelazo (Fe)									-0,10	0,36	0,88	**0,75**	-0,22	**0,81**	**0,42**	**0,53**	-0,16	-0,11	**0,79**	-0,16	-0,38	0,39	**0,54**
Mangan (Mn)										**0,48**	0,24	0,14	**0,92**	-0,03	0,17	0,28	0,19	**0,48**	-0,31	**-0,50**	**0,68**	0,34	**0,42**
Cynk (Zn)											**0,60**	0,36	0,34	**0,41**	0,11	**0,49**	**-0,59**	**-0,45**	0,16	-0,23	**0,67**	**0,52**	0,39
Miedź (Cu)												**0,69**	0,13	**0,79**	**0,44**	**0,60**	-0,22	-0,37	**0,64**	**-0,49**	**0,65**	0,40	**0,64**
Krzem (Si)													0,06	0,13	**0,69**	**0,76**	-0,02	-0,40	**0,43**	**-0,59**	**0,58**	**0,59**	**0,72**
Bor (B)														-0,07	0,17	0,20	0,24	**-0,82**	-0,37	**-0,46**	**0,61**	0,39	**0,46**
Jod (I)															**0,79**	**0,81**	-0,14	-0,19	**0,49**	**-0,60**	**0,58**	**0,67**	**0,72**
Cyna (Sn)																0,08	0,28	-0,32	0,08	**-0,79**	**0,556**	**0,69**	**0,72**
Chrom (Cr)																	-0,08	**-0,43**	0,20	**-0,64**	**0,67**	**0,74**	**0,76**
Molibden (Mo)																		0,16	-0,29	-0,28	-0,12	-0,10	0,21
Fluor (F)																			0,13	**0,65**	**-0,71**	**-0,44**	**-0,58**
Selen (Se)																				-0,06	0,03	-0,16	0,18
Nikiel (Ni)																					**-0,61**	**-0,48**	**-0,70**
Kobalt (Co)																						**0,77**	**0,71**
Wanad (V)																							**0,71**
Wolfram (W)																							-

Objaśnienia: istotne przy α = 0,05: r = **0,406**, istotne przy α = 0,01: r **= 0,517**

Tabela 24A. Współczynniki korelacji (r) pomiędzy akumulacją pierwiastków w suchej masie ziarna pszenicy jarej (n =24)

Pierwiastek	S	P	K	Ca	Mg	Cl	Na	Fe	Mn	Zn	Cu	Si	B	I	Sn	Cr	Mo	F	Se	Ni	Co	V	W
Azot (N)	**0,82**	**0,92**	**0,87**	**0,81**	**0,94**	**0,87**	**0,81**	**0,95**	**0,79**	**0,71**	**0,93**	**0,91**	**0,50**	**0,78**	**0,88**	**0,78**	**0,43**	**0,03**	**0,88**	-0,15	**0,67**	**0,62**	**0,87**
Siarka (S)		**0,92**	**0,84**	**0,92**	**0,92**	**0,79**	**0,91**	**0,85**	**0,93**	**0,92**	**0,91**	**0,82**	**0,72**	**0,68**	**0,82**	**0,80**	0,23	-0,13	**0,82**	-0,08	**0,87**	**0,81**	**0,90**
Fosfor (P)			**0,86**	**0,87**	**0,95**	**0,91**	**0,89**	**0,94**	**0,84**	**0,84**	**0,93**	**0,92**	**0,53**	**0,82**	**0,93**	**0,88**	0,32	0,06	**0,45**	-0,12	**0,78**	**0,806**	**0,91**
Potas (K)				**0,83**	**0,88**	**0,82**	**0,76**	**0,93**	**0,74**	**0,86**	**0,95**	**0,84**	**0,41**	**0,82**	**0,77**	**0,77**	0,03	0,08	**0,69**	-0,08	**0,74**	**0,62**	**0,81**
Wapń (Ca)					**0,90**	**0,77**	**0,88**	**0,79**	**0,82**	**0,80**	**0,83**	**0,81**	**0,64**	**0,71**	**0,82**	**0,77**	0,25	-0,11	0,28	-0,19	**0,85**	**0,80**	**0,90**
Magnez (Mg)						**0,84**	**0,91**	**0,92**	**0,86**	**0,81**	**0,94**	**0,92**	**0,62**	**0,78**	**0,89**	**0,82**	0,35	-0,05	**0,48**	-0,18	**0,80**	**0,77**	**0,92**
Chlor (Cl)							**0,75**	**0,88**	**0,67**	**0,74**	**0,85**	**0,89**	0,36	**0,81**	**0,80**	**0,78**	0,15	0,08	**0,56**	-0,04	**0,62**	**0,72**	**0,84**
Sód (Na)								0,12	**0,83**	**0,81**	**0,84**	**0,86**	**0,65**	**0,74**	**0,86**	**0,80**	0,28	-0,09	0,27	-0,19	**0,86**	**0,86**	**0,91**
Żelazo (Fe)									**0,76**	**0,82**	**0,97**	**0,93**	**0,40**	**0,86**	**0,86**	**0,83**	0,20	0,12	**0,68**	-0,10	**0,69**	**0,65**	**0,85**
Mangan (Mn)										**0,86**	**0,84**	**0,75**	**0,86**	**0,51**	**0,77**	**0,74**	0,35	-0,38	0,23	-0,19	**0,85**	**0,69**	**0,82**
Cynk (Zn)											**0,88**	**0,77**	**0,62**	**0,67**	**0,71**	**0,78**	-0,08	-0,15	0,40	-0,04	**0,84**	**0,75**	**0,77**
Miedź (Cu)												**0,90**	**0,86**	**0,81**	**0,85**	**0,83**	0,17	-0,01	**0,63**	-0,11	**0,79**	**0,70**	**0,88**
Krzem (Si)													**0,45**	**0,86**	**0,90**	**0,88**	0,22	-0,01	**0,57**	-0,22	**0,72**	**0,75**	**0,90**
Bor (B)														0,02	**0,52**	**0,48**	0,34	**-0,66**	-0,08	-0,27	**0,75**	**0,85**	**0,65**
Jod (I)															**0,87**	**0,84**	0,02	0,24	**0,62**	-0,29	**0,64**	**0,76**	**0,79**
Cyna (Sn)																**0,93**	0,39	-0,00	0,40	-0,39	**0,75**	**0,82**	**0,91**
Chrom (Cr)																	0,14	-0,04	**0,43**	-0,29	**0,75**	**0,82**	**0,89**
Molibden (Mo)																		-0,067	0,391	-0,219	0,054	0,076	0,344
Fluor (F)																			0,28	**0,42**	-0,35	-0,09	-0,11
Selen (Se)																				0,05	0,21	0,12	**0,42**
Nikiel (Ni)																					-0,27	-0,20	-0,28
Kobalt (Co)																						**0,84**	**0,79**
Wanad (V)																							**0,81**
Wolfram (W)																							-

Objaśnienia: istotne przy α = 0,05: r = **0,406**, istotne przy α = 0,01: r **= 0,51**

Tabela 25A. Sumy opadów [mm] w latach 2014-2016 i średnie wieloletnia. Stacja Badawcza w Zamościu

Rok	Dekady	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	III-VIII	I-XII
2014	I			5,2	8,3	6,9	23,8	50,3	36,0	2,0					
	II			10,5	19,3	74,6	12,8	45,4	22,6	19,8					
	III			9,3	5,3	60,1	54,7	50,4	24,0	26,3					
	Suma	25,3	9,9	25,0	32,9	141,6	91,3	146,1	82,8	48,1	34,4	16,5	24,7	519,7	678,6
2015	I			5,0	17,7	28,5	5,0	9,6	2,3	5,2					
	II			15,0	7,1	4,8	17,0	26,4	5,5	17,5					
	III			20,7	1,9	57,8	14,2	24,4	3,5	31,5					
	Suma	34,9	11,9	40,7	26,7	91,1	36,2	60,4	11,3	54,2	34,4	55,1	14,1	266,4	471,0
2016	I			9,0	6,2	8,7	31,5	25,3	10,8	12,2					
	II			17,5	21,4	15,9	28,7	54,2	30,3	25,4					
	III			18,7	24,1	25,3	56,6	35,8	31,7	10,1					
	Suma	30,8	34,8	45,2	51,7	49,9	116,8	115,3	72,8	47,7	59,9	59,7	43,9	451,7	728,5
Średnie wielo-letnie (1971-2011)	I			5,2	14,3	17,8	23,7	30,2	24,4	16,5					
	II			12,6	13,4	18,6	29,2	26,8	19,9	20,1					
	III			8,5	14,7	28,8	25,4	37,3	16,0	18,9					
	Suma	23,8	18,7	26,3	42,3	65,1	78,3	94,3	61,3	52,2	39,8	25,1	24,4	367,5	541,4

Tabela 26A. Średia dobowa temperatura powietrza [^{o}C] w latach 2014-2016 i średnia wieloletnia. Stacja Badawcza w Zamościu

Rok	Dekady	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	III-VIII	I-XII
2014	I			3,5	7,6	11,4	17,4	19,5	23,0	16,5					
	II			5,8	8,8	13,4	15,6	20,5	18,6	16,3					
	III			8,8	14,5	17,8	15,9	22,1	14,6	11,6					
	Średnia	-2,3	-2,1	6,0	10,3	14,2	16,3	20,7	18,7	14,8	9,5	4,2	-0,3	2646	3371
2015	I			4,1	4,5	13,0	18,6	20,6	24,1	16,4					
	II			5,0	9,5	13,2	17,6	18,6	22,0	18,8					
	III			5,3	11,9	14,6	16,8	24	20,8	12,7					
	Średnia	-0,9	-1,7	5,1	8,6	13,6	17,7	21,1	22,3	16,0	7,7	5,7	-1,2	2713	3489
2016	I			4,1	11,3	13,2	16,1	18,7	19,6	18,9					
	II			4,7	11,1	11,5	18,3	19,1	16,2	16,6					
	III			5,6	8,1	18,1	22,4	21,3	18,8	12,7					
	Średnia	-3,0	-4,0	4,8	10,2	14,3	18,9	19,7	18,2	16,1	7,5	3,3	-0,4	2639	3235
Średnie wielo-letnie (1971-2011)	I			0,5	7,1	12,6	16,7	17,8	19,0	15,1					
	II			1,3	7,5	14,6	17,1	19,1	18,2	12,8					
	III			3,3	10,3	15,3	17,3	19,3	16,6	11,5					
	Średnia	-3,4	-2,4	1,8	8,3	14,1	17,1	18,7	17,9	13,1	7,5	2,8	-1,5	2392	2882

Tabela 27A. Współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa w latach 2014-2016 i średni z wieloletniej (obliczono na podstawie danych zawartych w tabelach 25A i 26A)

Rok	Dekady	III	IV	V	VI	VII	VIII	IV-V	IV-VI	VI-VII	III-VIII
2014	I	1,49	1,09	0,61	1,37	2,58	1,57				
	II	1,81	2,19	5,57	0,82	2,21	1,22				
	III	0,96	0,37	3,07	3,44	2,07	1,49				
	Średnia	1,32	1,06	3,19	1,87	2,27	1,44	2,32	2,14	2,10	1,96
2015	I	1,22	3,93	2,19	0,27	0,47	0,10				
	II	3,00	0,75	0,36	0,97	1,42	0,25				
	III	3,55	0,16	3,60	0,85	0,92	0,15				
	Średnia	2,73	1,03	2,16	0,68	0,92	0,16	1,73	1,27	0,81	0,98
2016	I	2,20	0,55	0,66	1,96	1,35	0,55				
	II	3,72	1,93	1,38	1,57	2,84	1,87				
	III	3,04	2,98	1,27	2,53	1,53	1,53				
	Średnia	3,02	1,70	1,12	2,06	1,88	1,29	1,35	1,66	1,97	1,71
Średnio z wielo-lecia (1971-2011)	I	10,40	2,01	1,41	1,42	1,70	1,29				
	II	9,69	1,78	1,27	1,71	1,40	1,10				
	III	2,34	1,43	1,71	1,47	1,76	0,88				
	Średnia	4,85	1,70	1,48	1,53	1,62	1,11	1,56	1,55	1,58	1,54