

ACTA AGROPHYSICA



WPŁYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA WODOCHŁONNOŚĆ I WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE GLUTENU PSZENICY ZWYCZAJNEJ (*Triticum aestivum* L.)

Antoni Miś

128

Instytut Agrofizyki
im. Bohdana Dobrzańskiego PAN
w Lublinie

Rozprawy i Monografie
2005 (8)

Komitet Redakcyjny

Redaktor Naczelny
Ryszard T. Walczak, czł. koresp. PAN

Zastępca Redaktora Naczelnego
Józef Horabik

Sekretarz Redakcji
Wanda Woźniak

Rada Redakcyjna

Tomasz Brandyk, czł. koresp. PAN – przewodniczący

Ryszard Dębicki
Bohdan Dobrzański
Danuta Drozd
Franciszek Dubert
Tadeusz Filipek
Józef Fornal
Jan Gliński, czł. rzecz. PAN
Grzegorz Józefaciuk
Eugeniusz Kamiński
Andrzej Kędziora
Tadeusz Kęsik
Krystyna Konstankiewicz
Janusz Laskowski

Jerzy Lipiec
Piotr P. Lewicki
Stanisław Nawrocki, czł. rzecz. PAN
Edward Niedźwiecki
Viliam Novák, Słowacja
Josef Pecen, Czechy
Tadeusz Przybysz
Stanisław Radwan, czł. koresp. PAU
Jan Sielewiesiuk
Witold Stępniewski
Zbigniew Ślipek
Bogusław Szot

Opiniowali do druku

Prof. dr hab. Józef Fornal
Prof. dr hab. Bolesław Styk

Adres redakcji

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, ul. Doświadczalna 4, P.O. Box 201
20-290 Lublin 27, tel. (0-81) 744-50-61, e-mail: editor@demeter.ipan.lublin.pl
<http://www.ipan.lublin.pl>

Praca wykonana w ramach projektu badawczego Nr 3P06T 004 22
finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2002-2004

Publikacja indeksowana przez
Polish Scientific Journals Contents – Life Sci. w sieci Internet
pod adresem <http://www.psjc.icm.edu.pl>

©Copyright by Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, Lublin 2005

ISSN 1234-4125

Wydanie I. Nakład 200 egz. Ark. wyd. 9,8
Skład komputerowy: Wanda Woźniak, Agata Woźniak
Druk: Drukarnia ALF-GRAF, ul. Kościuszki 4, 20-006 Lublin

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	7
2. PRZEGLĄD LITERATURY	7
2.1. Charakterystyka białek glutenowych	7
2.1.1. Wpływ gliadyn i glutenin na właściwości fizyczne glutenu, ciasta i chleba ..	9
2.2. Izolowanie glutenu i metody badania jego właściwości fizycznych	11
2.2.1. Warunki wymywania	11
2.2.2. Pomiar wodochłonności	12
2.2.3. Pomiar właściwości reologicznych	13
2.3. Czynniki oddziałujące na ilość i jakość glutenu	15
2.3.1. Okres wegetacji pszenicy	15
2.3.1.1. Nawożenie roślin	16
2.3.1.2. Rozwój i dojrzewanie ziarniaka	16
2.3.1.3. Porastanie	17
2.3.2. Okres poźniwny	18
2.3.2.1. Suszenie ziarna	18
2.3.2.2. Przechowywanie mąki	19
2.4. Wpływ ilości, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu na jakość ciasta i chleba	20
3. CEL BADAŃ.....	21
4. MATERIAŁ I METODY	24
4.1. Materiał badawczy	24
4.2. Metodyka eksperymentów laboratoryjnych	27
4.2.1. Testy porastania	27
4.2.2. Suszenie ziarna	29
4.2.3. Przechowywanie mąki	29
4.3. Aparatura pomiarowa	31
4.4. Sposób określania wodochłonności glutenu	31
4.4.1. Opis metody i definicje	31
4.4.2. Modyfikacja standardowej procedury	34
4.4.3. Procedura pomiaru wodochłonności	36
4.5. Sposób określania właściwości reologicznych glutenu	38
4.5.1. Charakterystyka testów reologicznych	38
4.5.2. Procedura przeprowadzania testów reologicznych	40
4.6. Oznaczanie wyróżników jakościowych ciasta i chleba	44
4.7. Analiza statystyczna wyników badań	45

5. WYNIKI	46
5.1. Zmienność wyznaczonych wskaźników wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu	46
5.1.1. Wpływ odmian pszenicy, rejonów uprawy i poziomów nawożenia azotowego ...	46
5.1.1.1. Pszenica ozima	46
5.1.1.2. Pszenica jara	50
5.1.2. Wpływ stadium dojrzałości ziarna pszenicy i terminu zbioru	55
5.1.3. Wpływ stopnia porastania	61
5.1.4. Wpływ temperatury suszenia ziarna i jego wilgotności	65
5.1.5. Wpływ czasu przechowywania mąki	72
5.2. Współzależności między badanymi cechami glutenu	76
5.2.1. Rola wydajności i wodochłonności glutenu w kształtowaniu jego właściwości reologicznych	80
5.3. Związki między badanymi cechami glutenu a jakością ciasta i chleba	82
5.3.1. Predykcja wartości wypiekowej ziarna pszenicy	89
6. DYSKUSJA	92
6.1. Ocena metod zastosowanych do pomiaru wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu	92
6.2. Przyczyny różnicowania się badanych właściwości glutenu	97
6.3. Przydatność zaproponowanych wskaźników jakościowych glutenu w ocenie wartości wypiekowej ziarna pszenicy	103
7. WNIOSKI	107
8. PIŚMIENNICTWO	109
9. STRESZCZENIE	118
10. SUMMARY	119

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ:

GLS – ilość glutenu suchego, (%),

WN – zawartość wody niezwiązanej w świeżo wymyтым glutenie, (%),

WZ – zawartość wody związanej w świeżo wymyтым glutenie, (%),

CZ – całkowita zawartość wody w świeżo wymyтым glutenie, (%),

IG – indeks glutenu, (%),

WEG – wskaźnik elastyczności glutenu, (%),

ε_t – odkształcenie całkowite walca glutenu, (-),

U_C – udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu, (%).

1. WSTĘP

Pszenica zwyczajna (*Triticum aestivum* L.) jest jedną z najważniejszych roślin zbożowych w Polsce i świecie. Jej uprawa ukierunkowana jest przede wszystkim na produkcję ziarna konsumpcyjnego przeznaczanego do wyrobu pieczywa [44]. Piekarnicze wykorzystanie pszenicy zawdzięcza przede wszystkim specyficznym właściwościom białek znajdujących się w bielmie ziarniaków. Białka te mają zdolność formowania glutenu w postaci błon lepkosprężystych, które utrzymują właściwą konsystencję i strukturę wyrobionego ciasta podczas jego fermentacji i wypieku, przyczyniając się do wytworzenia gąbczastej tekstury miękkiszu chleba. Drugą bardzo ważną cechą glutenu jest wysoka wodochłonność, oddziałująca korzystnie na wydajność ciasta i chleba.

Podstawowym sposobem określania wartości wypiekowej ziarna pszenicy, czyli jego przydatności do produkcji chleba, jest badanie właściwości fizycznych glutenu wyizolowanego przy pomocy procesu wymywania. Może ono dostarczać wielu użytecznych informacji dotyczących zarówno wodochłonności, jak i właściwości reologicznych testowanego glutenu. Jednakże, w praktyce ocena jakościowa zawężona jest najczęściej do pomiaru rozptywalności bądź indeksu glutenu, a oznaczenia wodochłonności z powodu braku znormalizowanych metod nie są zwykle wykonywane. Taki stan rzeczy sprawia, że dotychczas w stopniu niewystarczającym poznano całokształt zmian, jakim mogą podlegać wodochłonność i właściwości reologiczne glutenu oraz ich rzeczywistą rolę w determinowaniu jakości ciasta i chleba. Występuje wiele czynników i procesów w trakcie uprawy pszenicy, obróbki poźniwej ziarna i jego przetwarzania, których wpływ na różnicowanie się wspomnianych cech glutenu wymaga dogłębniejszego zbadania. Wiedza z tego zakresu mogłaby się przysłużyć dalszemu postępowi technologicznemu w produkcji i przetwórstwie ziarna pszenicy na cele piekarnicze.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Charakterystyka białek glutenowych

Ziarno pszenicy jest rezerwuarem bardzo wielu składników różniących się budową cząsteczkową, właściwościami fizyko-chemicznymi i funkcjonalnymi. Jego sucha masa zawiera 60-70% skrobi, 10-17% białek, 6-9% pentozanów, 3-6% cukrów, 2,5-3,3% celulozy, 2-2,5% tłuszczów i 1,4-2,3% soli mineralnych [44]. Spośród wymienionych składników, białka, ich ilość i skład, wpływają najmocniej na wartość wypiekową ziarna pszenicy.

Białka pszenicy zgodnie z klasyfikacją Osborne'a [111], opartą na ich rozpuszczalności, dzieli się na 4 rodzaje: albuminy (rozpuszczalne w wodzie), globu-

liny (rozpuszczalne w roztworach soli), prolaminy (rozpuszczalne w 70-90% etanolu) i gluteliny (rozpuszczalne w rozcieńczonym kwasie lub zasadzie). Albuminy i globuliny, rozmieszczone we wszystkich częściach anatomicznych ziarniaka, spełniają najczęściej funkcje strukturalne i katalityczne, a jako białka łatwo rozpuszczalne są tracone podczas wymywania glutenu. W skład glutenu wchodzi więc gliadyny i gluteniny, stąd nazywane są również białkami glutenowymi. Gliadyny i gluteniny są zaliczane odpowiednio do dwóch pozostałych rodzajów białek: prolamin i glutelin. Są to typowe białka zapasowe zmagazynowane wyłącznie w bielmie skrobiowym ziarniaka [45].

Gliadyny są białkami zbudowanymi z pojedynczych łańcuchów polipeptydowych, które zgodnie z ich elektroforetyczną mobilnością dzielimy na 4 grupy: α - (najszybsze), β -, γ - i ω -gliadyny (najwolniejsze). Masa cząsteczkowa gliadyn kształtuje się między 30 a 75 kDa. Białka te ogólnie charakteryzują się wysoką zawartością kwasu glutaminowego i proliny oraz niską zawartością lizyny, zaś różnią się między sobą zawartością aminokwasów siarkowych. α -, β - i γ -gliadyny zawierają dużo cysteiny, dzięki czemu mogą formować wewnątrzcząsteczkowe wiązania dwusiarczkowe. Zapobiega to włączaniu się tych białek w polimeryczną strukturę glutenin [106]. ω -gliadyny natomiast są ubogie w aminokwasy siarkowe i wyróżniają się największą hydrofilnością wśród białek glutenowych [38].

Gliadyny są kodowane przez geny następujących loci: Gli-A1, Gli-B1 i Gli-D1 oraz Gli-A2, Gli-B2 i Gli-D2, które są umiejscowione na krótkich ramionach chromosomów, odpowiednio grupy 1 i 6. Ekspresja tych genów skutkuje występowaniem ogromnej różnorodności białek gliadynowych. Separacja gliadyn prowadzona techniką elektroforezy dwuwymiarowej pozwala na ujawnienie aż do 50 różnych komponentów. Każda z odmian pszenicy ma charakterystyczny dla siebie i niepowtarzalny u innych odmian zestaw komponentów białek gliadynowych. Dlatego też badanie składu tych białek jest powszechnie wykorzystywaną metodą identyfikacji odmian pszenicy [153,161].

Gluteniny, w przeciwieństwie do gliadyn, są białkami polimerycznymi, a więc złożonymi z wielu łańcuchów polipeptydowych, które są połączone ze sobą mostkami dwusiarczkowymi, a wiązania wodorowe dodatkowo stabilizują konformację przestrzenną tych białek. Ich masa cząsteczkowa sięga kilkunastu milionów daltonów, stąd gluteniny zaliczane są do największych białek w naturze [162].

W wyniku redukcji wiązań dwusiarczkowych w białkach gluteninowych uzyskuje się szereg podjednostek, które dzieli się na dwie grupy: gluteniny wysokocząsteczkowe (HMW-GS) o masie od 80 do 120 kDa i gluteniny niskocząsteczkowe (LMW-GS) o masie poniżej 70 kDa. Udział podjednostek HMW-GS w gluteninach jest około trzykrotnie mniejszy niż udział LMW-GS [137]. Analiza chromatograficzna glutenin (RP-HPLC) wskazuje, że HMW-GS są mniej hydrofobowe niż LMW-GS.

Gluteniny wysokocząsteczkowe są kodowane przez geny następujących loci: GluA1, Glu B1 i GluD1, umiejscowionych na długich ramionach chromosomów grupy 1. Każdy locus zawiera dwa geny kodujące dwa różne typy HMW-GS: x i y. HMW-GS typu x charakteryzują się wolniejszą mobilnością i większą masą cząsteczkową w porównaniu z HMW-GS typu y. Z uwagi na to, że niektóre geny są „uśpione”, w praktyce jedna odmiana pszenicy może posiadać od 3 do 5 podjednostek HMW-GS [129].

Synteza glutenin niskocząsteczkowych jest kontrolowana przez geny loci: GluA3, Glu B3 i Glu D3, umiejscowionych na krótkich ramionach chromosomów grupy 1. Badania przesiewowe na ogromnej liczbie odmian pszenicy ujawniły 20 różnych bloków LMW-GS, identyfikowanych techniką elektroforezy SDS-PAGE [48].

2.1.1. Wpływ gliadyn i glutenin na właściwości fizyczne glutenu, ciasta i chleba

Białka glutenowe, gliadyny i gluteniny, podczas wyrabiania ciasta z mąki zmieszanej z wodą formują gluten, lepkosprężystą substancję, która spaja ziarna skrobi i pozostałe składniki mąki w jedną całość. Na poziomie cząsteczkowym gluten stanowi przestrzennie ciągłą sieć zbudowaną z łańcuchów polipeptydowych zespolonych ze sobą poprzez poprzeczne wiązania międzycząsteczkowe, z których najważniejsze to wiązania dwusiarczkowe i wodorowe oraz oddziaływania hydrofobowe. Od koncentracji i wytrzymałości tych wiązań zależą bezpośrednio właściwości fizyczne glutenu, od których z kolei zależy w dużej mierze jakość ciasta i chleba [14]. Przyjmuje się, że gluten o wysokiej jakości odznacza się dużą wodochłonnością, elastycznością i zwięzłością, a w interakcji z pozostałymi składnikami mąki daje elastyczne ciasto o długim okresie rozwoju i stałości oraz chleb o dużej objętości z równomiernie porowatym i elastycznym miękiszem.

Na zwiększenie wodochłonności glutenu wpływa zwykle wyższa zawartość białek gliadynowych [16]. Badania Khan'a i in. [66] wykazały, że odmiany pszenicy zawierające podjednostki gluteniny wysokocząsteczkowej (HMW-GS) 2* i 9 odznaczają się wyższą wodochłonnością mąki w porównaniu z odmianami zawierającymi podjednostkę 8.

W kształtowaniu właściwości reologicznych glutenu, gliadyny i gluteniny odgrywają odmienne role. Gliadyny nadają glutenowi właściwości lepkiej cieczy i przyczyniają się do zwiększania jego rozciągliwości. Wyniki licznych badań wykazały istnienie dodatniej korelacji między ilością gliadyn a rozciągliwością glutenu mokrego [72], filmów glutenowych [9] i ciasta [11]. Wzrost zawartości gliadyn wywiera natomiast ujemny wpływ na oporność na rozciąganie glutenu [72] i ciasta [11,95] oraz na elastyczność glutenu [72] i ciasta [39,95]. Badania Weegels'a i in. [156] wykazały ponadto, że dodanie do mąki ekstraktu zawierającego gliadyny przyczynia się do zwiększenia objętości chleba.

Gluteniny natomiast są odpowiedzialne za sprężystość i wytrzymałość glutenu. Wzrost udziału glutenin przyczynia się do zwiększenia oporności ciasta na rozciąganie [11], wydłużenia czasu rozwoju ciasta i wzrostu objętości chleba [85]. Liczne badania ujawniły znacząco większą rolę glutenin wysokocząsteczkowych (HMW-GS), w porównaniu z LMW-GS, w kształtowaniu pożądanych właściwości glutenu oraz ciasta i chleba. Wyższy udział HMW-GS podnosi wytrzymałość ciasta i objętość chleba [51,52,142,152,168].

W poznawaniu roli HMW-GS szczególnie przydatne jest poszukiwanie bezpośredniego powiązania genów kodujących te podjednostki z wyróżnikami wartości wypiekowej pszenicy [13,63,160]. Wyniki badań Beasley'a i in. [10] oraz Uthayakumaran'a i in. [149] wskazują, że obecność podjednostek HMW-GS 5+10, kodowanych przez Glu-D1, w istotnie wyższym stopniu wpływała na poprawę właściwości reologicznych ciasta niż obecność podjednostek 17+18, kodowanych przez Glu-B1, zaś najmniejszy wpływ wywierała podjednostka 1 kodowana przez Glu-A1. Wpływ genów z wymienionych loci na objętość chleba, wyrażoną wysokością bochenka uzyskiwanego w mikroteście wypiekowym, miał charakter bardziej addytywny niż synergiczny. Linie pszenicy zawierające wszystkie trzy loci wyróżniały się największą objętością bochenków, a linie bez tych loci – najniższą.

Niemniej jednak dla uzyskania optymalnych właściwości ciasta i chleba, obecność zarówno glutenin wysoko- jak i niskocząsteczkowych jest nieodzowna [62]. Podobne wnioski, ale dotyczące roli gliadyn i glutenin, uzyskali Inakuma i in. [53] oraz Yoshida i Danno [165]. Stwierdzili oni, że nieobecność jednej z dwóch głównych frakcji białek glutenowych, gliadynowej bądź gluteninowej, skutkowało formowaniem się glutenu i ciasta o złej jakości. Jedynie dzięki odpowiedniej równowadze między ilością tych frakcji ciasto może zatrzymywać pęcherzyki CO₂ podczas fermentacji i wypieku, a chleb uzyskuje zwiększoną objętość i równomiernie porowatą strukturę miększu [68,150].

Obok wzajemnego współdziałania białek glutenowych w kształtowaniu pożądanych właściwości fizycznych glutenu, ciasta i chleba istotną rolę również odgrywają ich interakcje z pozostałymi składnikami, np. z węglowodanami, lipidami i białkami nieglutenowymi. Wykazano, że obecność zwłaszcza lipidów wolnych sprzyja większemu uelastycznieniu błon glutenowych w cieście oraz ułatwia jego rozrost poprzez znaczącą redukcję tarcia między ziarnami skrobi. Dlatego też usuwanie lipidów z mąki lub glutenu prowadzi nieuchronnie do obniżenia objętości chleba i pogorszenia porowatości jego miększu. Szczególnie korzystny wpływ na te wyróżniki wywierają lipidy polarne zaliczane do glikolipidów, a zwłaszcza digalaktozyloglicerole [27,45,110].

2.2. Izolowanie glutenu i metody badania jego właściwości fizycznych

Bezpośrednie metody określania zawartości białek glutenowych w ziarnie pszenicy oraz badania ich właściwości opierają się najczęściej na izolowaniu i testowaniu glutenu mokrego. Ma on postać spójnej, ciągliwej, lepkiej i sprężystej masy przyjmującej barwę od jasnożółtej do szarobrunatnej. Izolowanie glutenu mokrego zwykle przeprowadza się przy pomocy procesu wymywania. W pierwszym etapie tego procesu wyrabia się ciasto z mąki i wody, z którego – w drugim etapie – przy użyciu strumienia wody usuwa się składniki mąki nie wchodzące w skład glutenu, głównie skrobię. Po zakończeniu wymywania wykonuje się usuwanie z wyizolowanego glutenu wody niezaabsorbowanej, najczęściej przy pomocy wirowania. Uzyskana w taki sposób próbka glutenu mokrego jest cennym materiałem badawczym, który podlega ocenie ilościowej i jakościowej, a jej wyniki są podstawowym źródłem informacji na temat wartości wypiekowej testowanego ziarna pszenicy.

W trakcie wymywania gluten absorbuje znaczne ilości wody, przekraczające ponad dwukrotnie jego suchą masę. Gluten mokry nie jest jednorodny pod względem chemicznym. Jego sucha masa składa się w przybliżeniu w 80% z białek, 10% ze skrobi, 8% z tłuszczów oraz z niewielkich ilości soli mineralnych [20]. Badania Grant'a i in. [43] wykazały, że próba usunięcia wszystkich składników niebiałkowych z glutenu mokrego nieuchronnie prowadzi do zniszczenia jego specyficznej struktury.

2.2.1. Warunki wymywania

Wyniki oceny ilościowo-jakościowej glutenu mokrego są miarodajne i porównywalne tylko wtedy, jeśli badane próbki glutenu wymywa się przy zachowaniu identycznych warunków. Sposób jego wymywania, ręczny lub przy pomocy urządzenia, oraz inne warunki tego procesu wpływają w istotny sposób na ilość wymytego glutenu oraz jego skład i właściwości [37].

Spośród nich najistotniejszą rolę odgrywa rodzaj i stężenie roztworu stosowanego do wymywania glutenu. Ellilae [40] porównywał procedurę standardową ICC nr 155 [56], która przewiduje 5 minutowe wymywanie przy użyciu 2% NaCl, z zaproponowaną przez niego, polegającą na wymywaniu najpierw przez 2 minuty przy pomocy 2% NaCl, a następnie przez 3 minuty stosując 0,1% siarczan dodecylo-sodowy (SDS). Zaproponowana procedura wymywania w porównaniu ze standardową umożliwia uzyskiwanie większej ilości glutenu, a wielkość tego przyrostu zależała od odmiany pszenicy. Badania Clements'a [29] wykazały, że stosowanie do wymywania kwasu wersenowego (EDTA) lub roztworu NaCl o wysokim stężeniu (1M) powoduje usuwanie kationów dwuwartościowych zwią-

zanych z glutenem, co przejawia się poprawą jego zdolności do pęcznienia. Stosowanie ekstrakcji tłuszczów z glutenu także przyczynia się do zwiększenia jego wodochłonności, ale zdolność takiego glutenu do formowania ciągliwej i kohezijnej masy ulega znacznemu ograniczeniu [108,127].

Rothkaehl [130] badając czynniki wpływające na zróżnicowanie wyników oznaczania ilości i rozpywalności glutenu wg PN-77/A-74041 wyodrębniła spośród nich najważniejsze, takie jak: typ stosowanego rozdrabniacza laboratoryjnego, skład chemiczny wody wodociągowej, czas odleżenia ciasta pod wodą przed rozpoczęciem wymywania, sposób ugniatania ciasta w trakcie wymywania i czas jego trwania oraz sposób osuszania glutenu.

Miedzy innymi z tych powodów obecnie procedury manualne zastępuje się najczęściej instrumentalnymi, pozwalającymi na pełne zautomatyzowanie procesu wymywania glutenu [117,135], natomiast zamiast wody wodociągowej do wymywania stosuje się 2% wodny roztwór NaCl [56].

2.2.2. Pomiar wodochłonności

Wodochłonność glutenu ocenia się najczęściej w sposób pośredni wykonując oznaczenie wodochłonności mąki. Najpowszechniej do tego celu używany jest farinograf Brabendera, umożliwiający pomiar ilości wody wchłoniętej przez badaną mąkę w trakcie wyrabiania ciasta o konsystencji równej 500 j.B. [16,31, 89,125,128]. Obiektywnie rzecz biorąc, wynik tego pomiaru jest efektem sumowania się wodochłonności poszczególnych składników zawartych w mące, obok białek glutenowych również skrobi, polisacharydów nieskrobiowych, lipidów, domieszki otrąb i innych. Na wodochłonność szczególnie duży wpływ ma uszkodzona mechanicznie skrobia, której obecność wzmacnia zdolności sorpcyjne mąki [121]. Badania Andersson'a i in. [3] i Cleemput'a i in. [28] wskazują, że zmiany wodochłonności mąki mogą być znacznie łatwiej przewidywane, kiedy uwzględniamy zawartość i skład polisacharydów nieskrobiowych, np. arabinoksylianów. Ohm i Chung [110] badając oddziaływanie glikolipidów na wodochłonność mąki stwierdzili ujemny wpływ monogalaktozylodiacyllogliceroli, zaś dodatni digalaktozylodiacyllogliceroli. Z kolei Rao i Rao [126] wykazali, że zwiększanie domieszki otrąb, aż do 20%, przyczynia się do wzrostu wodochłonności mąki. Przytoczone wyniki badań wskazują, że pomiar wodochłonności mąki nie może być uznany za miarodajny wskaźnik wodochłonności glutenu.

W wielu badaniach dotyczących charakteryzowania wodochłonności białek glutenowych używa się metod opartych na ocenie ich nierozpuszczalności i zdolności do hydratacji (pęcznienia). Do tego rodzaju metod należy zaliczyć pomiary liczby sedymentacji dla mąki [7], zdolności absorpcji wody przez gluten [26,108], indeksu pęcznienia glutenu [29,95] oraz indeksu pęcznienia glutenin [154]. Należy

zauważyć, że wartości wymienionych wskaźników bardziej odzwierciedlają skład chemiczny białek glutenowych, zwłaszcza zawartość trudno rozpuszczalnych HMW-GS, a w mniejszym stopniu właściwości sorpcyjne glutenu.

Znacznie prostszy w wykonaniu jest pomiar wodochłonności bazujący na ocenie ilości wody sorpcyjnie związanej przez gluten w trakcie jego wymywania, prowadzonego przy pomocy zautomatyzowanego zestawu pomiarowego Glutomatic [117]. Ilość związanej wody w glutenie odwirowanym, jak wykazały badania Ohm'a i Chung'a [109], jest użytecznym wskaźnikiem zdolności sorpcyjnych białek glutenowych.

Badania mikroskopowe Freeman'a i in. [41] ujawniły, że świeżo wmyty gluten ma strukturę przestrzennej sieci uformowanej przez białka glutenowe. Wolne przestrzenie tej sieci, powstające po wymyciu skrobi są wypełnione wodą, w której mogą znajdować się pojedyncze ziarna skrobi. Występowanie w sieci glutenowej przestrzeni mogących magazynować wodę niezwiązaną potwierdziły również badania Hargreaves'a i in. [50], przeprowadzone z użyciem spektroskopii elektronowego rezonansu spinowego (ESR).

Wyniki przytoczonych badań utwierdzają w przekonaniu, że całościowa ocena wodochłonności glutenu prowadzona w trakcie jego wymywania powinna obejmować nie tylko pomiar zawartości wody sorpcyjnie związanej przez gluten, ale również określanie zawartości wody niezwiązanej, znajdującej się w wolnych przestrzeniach sieci glutenowej. W ten sposób uzyskiwano by informacje nie tylko o właściwościach sorpcyjnych białek glutenowych, ale również o strukturze sieci glutenowej formowanej przez te białka.

2.2.3. Pomiar właściwości reologicznych

Właściwości reologiczne glutenu mokrego mogą być oceniane różnymi metodami. W Polsce najpowszechniej stosowana jest znormalizowana metoda do określania rozpyływalności glutenu (PN-77/A-74041). Jest ona jednakże mało precyzyjna i zarazem czasochłonna [130]. Stąd coraz powszechniej są wykorzystywane mniej uciążliwe, instrumentalne metody testowania jakości glutenu mokrego, chociażby przy pomocy zestawu Glutomatic [115] i glutometru pneumatycznego [135].

W badaniach wykorzystuje się również testy reologiczne, które pozwalają na bardziej obiektywny opis właściwości lepkosprężystych glutenu mokrego. Przeprowadza się je w ściśle zdefiniowanych warunkach, a do interpretacji wyników pomiarowych wykorzystuje się zazwyczaj modele reologiczne, czyli równania opisujące zależności między parametrami reologicznymi, takimi jak: naprężenie, odkształcenie i czas. Parametr czasu ma kluczowe znaczenie w badaniach reologicznych, w szczególności przy stosowaniu testu pełzania i odpężania oraz testu

relaksacji naprężeń, w których wielkość odkształcenia, bądź naprężenia zależy bezpośrednio od czasu trwania tych testów [104].

Testy reologiczne zazwyczaj dzieli się na dwie grupy. Do pierwszej z nich zalicza się testy, podczas których próbka badanego glutenu podlega znacznym deformacjom w wyniku ściskania, rozciągania, bądź ścinania. Miller i Hosene [93] wykorzystując test ściskania oceniali wytrzymałość glutenu witalnego poprzez pomiar wielkości jego odkształcenia. Janssen i in. [59] stosując test jednoosiowego ściskania, przy stałej szybkości deformacji, określali lepkość glutenu uwodnionego. Chang i Ferrari [25] opracowali analizator jakości glutenu (WGQA), rejestrujący siłę użytą do rozciągania nitki glutenu do momentu jej zerwania. Czuchajowska i Smolinski [32], badając teksturę glutenu surowego i gotowanego, określali siłę penetracji wglębika.

Drugą grupę stanowią testy dynamiczne, przeprowadzane przy użyciu wysoko wyspecjalizowanej aparatury, podczas których próbka glutenu mokrego jest poddawana niewielkim odkształceniom, bądź naprężeniom, których wielkość zmienia się sinusoidalnie w czasie z określoną częstotliwością [47]. Na podstawie tych testów wyznacza się najczęściej wartości modułów zachowawczego (G') i stratności (G'') oraz stosunek G''/G' , charakteryzujący ilościowy udział cech lepkich i sprężystych. Wskaźniki te wykorzystywano w licznych badaniach przy opisywaniu lepkosprężystej natury glutenu [37,39,76], roli frakcji gliadynowych i gluteninowych [62, 67] i ich interakcji ze skrobią w cieście [118].

Podział testów reologicznych ze względu na wielkość stosowanych odkształceń jest o tyle istotny, że wskazuje na niszczący bądź nieniszczący charakter oddziaływania tych testów na pierwotną strukturę badanej próbki. Nieniszczącym oddziaływaniem odznaczają się testy przeprowadzane w zakresie małych odkształceń (1-3%), ponieważ nie naruszają ciągłości sieci glutenowej. Dlatego też są one wykorzystywane z sukcesem przy badaniu natywnej struktury glutenu [47]. Niemniej jednak mocno dyskusyjna jest użyteczność tych testów w przewidywaniu zachowania glutenu podczas procesów technologicznych związanych z wyrobem chleba. Wiadomo bowiem, że ciasto chlebowe w trakcie mieszenia podlega bardzo dużym odkształceniom ścinającym, w efekcie których sieć glutenowa jest rozrywana i na nowo reorganizowana. Z kolei podczas fermentacji i wypieku ciasta, błony glutenowe otaczające pęcherzyki gazu rozciągają się do znacznych rozmiarów w miarę trwania tych procesów [34]. Fakty te przemawiają za prawdziwością poglądu, że w ocenie wartości wypiekowej ziarna pszenicy i mąki bardziej miarodajnymi są testy reologiczne przeprowadzane w zakresie dużych odkształceń, gdyż mogą one znacznie dokładniej naśladować warunki poszczególnych procesów technologicznych i badać reakcję glutenu na te procesy. Z tych też względów tego rodzaju testy są intensywnie wykorzystywane w rutynowej ocenie jakości glutenu wykonywanej na potrzeby piekarnictwa.

Przy badaniu właściwości reologicznych glutenu świeżo wymytego, który w odróżnieniu od glutenu mokrego zawiera dodatkowo wodę niezwiązaną, powinno się kłaść szczególnie duży nacisk na zachowywanie ustalonych warunków podczas przeprowadzania etapu wymywania. Pełne zautomatyzowanie tego etapu, o czym wspomniano w rozdziale 2.2.1, skutecznie przeciwdziała powstawaniu błędów pomiarowych. Zagadnieniem nie mniej istotnym jest właściwe zaprojektowanie całego cyklu pomiarowego, rozpoczynając od etapu wymywania, poprzez preparację próbek do badań, a kończąc na etapie testowania jej właściwości fizycznych. Generalnie powinno się skracać do minimum czas trwania poszczególnych etapów, mając na względzie dużą szybkość zjawisk zachodzących w wymywanym glutenie. Potwierdzają to badania Misia [96], które ujawniły istotny wpływ czasu leżakowania, liczonego od momentu wyizolowania glutenu do chwili rozpoczęcia jego testowania, na wynik pomiaru indeksu glutenu. Krótkie cykle pomiarowe są wskazane zwłaszcza przy badaniu zmian w uwodnieniu glutenu i roli wody niezwiązanej w kształtowaniu jego właściwości reologicznych. Uwzględnianie powyższych przesłanek powinno przysłużyć się poprawie czułości metod wykorzystywanych do pomiaru właściwości lepkością glutenu świeżo wymytego.

2.3. Czynniki oddziałujące na ilość i jakość glutenu

Właściwości fizyczne glutenu i jego ilość zmieniają się w zależności od czynników oddziałujących zarówno w okresie wzrostu roślin pszenicy i dojrzewania ziarna, jak i po zbiorze w trakcie jego suszenia, przechowywania i przetwarzania. Wielkość tych zmian zależy nie tylko od czynników zewnętrznych (środowiskowych), ale również od genotypu odmiany pszenicy. Każda odmiana, dysponując niepowtarzalnym zestawem genów kontrolujących syntezę białek glutenowych (rozdz. 2.1), wytwarza inny jakościowo gluten [73]. Należy również mieć na uwadze fakt, że genotyp decyduje także o reakcji odmiany na czynniki zewnętrzne w trakcie wegetacji roślin, poprzez różną ekspresję poszczególnych genów [2], jak i po jej zakończeniu, poprzez skład nagromadzonych w ziarnie substancji zapasowych i czynnych: enzymów, hormonów i inhibitorów [4].

2.3.1. Okres wegetacji pszenicy

Warunki panujące w okresie wegetacji roślin, począwszy od momentu siewu pszenicy, poprzez długi okres wzrostu roślin i przechodzenia ich przez kolejne fazy rozwojowe i stadia dojrzewania ziarna, a zakończone w momencie zbioru pszenicy, z dużą siłą mogą oddziaływać na ostateczną ilość, skład i właściwości funkcjonalne zgromadzonych w ziarnie białek glutenowych.

2.3.1.1. Nawożenie roślin

Pośród czynników środowiskowych oddziałujących w okresie wegetacji pszenicy, nawożenie azotowe najmocniej wpływa na zawartość białek glutenowych w ziarnie. W wyniku zwiększonego nawożenia azotowego wzrasta ilość glutenu oraz zawartość gliadyn, zwłaszcza ω - i γ - typu [33,112,114,123]. Ponadto obserwuje się wzrost udziału białek hydrofilnych kosztem hydrofobowych [159]. W efekcie tych zmian, wytrzymałość mechaniczna glutenu, mierzona indeksem glutenu, spada [1,18,102]. Badania Johansson'a i Svensson'a [61] wykazały, że odmiany pszenicy zawierające podjednostki HMW-GS 5+10 odznaczają się mniejszym osłabieniem wytrzymałości glutenu w wyniku nawożenia azotowego.

Zmienione, na skutek stosowania zwiększonego nawożenia azotowego, właściwości glutenu oddziałują na podwyższenie wodochłonności mąki [8,120], spadek oporności ciasta [123], poprawę właściwości reologicznych ciasta [8,75, 87,90] oraz wzrost objętości chleba [8,22]. Wpływ nawożenia na jakość glutenu jest najkorzystniejszy, kiedy dolistne dożywianie azotem stosuje się w fazie kłoszenia i do połowy stadium dojrzałości młecznej [42,113].

Oprócz nawożenia, na ilość gromadzonych w ziarnie białek glutenowych i ich właściwości wpływają również inne zabiegi agrotechniczne [120], a także rodzaj gleby [151] i warunki pogodowe [92, 144].

2.3.1.2. Rozwój i dojrzewanie ziarniaka

Synteza i gromadzenie białek glutenowych w bielmie rozpoczyna się już na bardzo wczesnych etapach formowania i wzrostu ziarniaka, tj. około 8-11 dnia po zapyleniu, a kończy się w momencie osiągnięcia dojrzałości fizjologicznej, około 36-44 dnia po zapyleniu [19].

W ciągu tego okresu następuje systematyczny przyrost masy białka w ziarniaku. Jednakże zawartość białka ogólnego w suchej masie ziarniaka wykazuje pewne minimum między 14 a 26 dniem po zapyleniu, w zależności od odmiany pszenicy. Natomiast zawartość skrobi i lipidów pozostaje mniej więcej na wyrównanym poziomie [21,60,70].

Podczas formowania bielma ziarniaka, oprócz zmian ilościowych, różnicuje się również skład chemiczny białek. W miarę dojrzewania, zawartość niebiałkowych substancji azotowych oraz udział albumin i globulin systematycznie maleje. Tym zmianom równocześnie towarzyszy stopniowe zwiększanie się zawartości białek gliadynowych i gluteninowych [21,45,70].

W czasie dojrzewania ziarniaka zmienia się również aktywność enzymów. W miarę dojrzewania obniża się znacząco aktywność α -amylazy [91]. Z kolei aktywność endoproteaz stopniowo wzrasta osiągając swoje maksimum około 15

dnia po zapyleniu, które się utrzymuje do momentu uzyskania przez ziarno dojrzałości pełnej [36].

Wyniki badań Blumenthal'a i in. [15] oraz Daniel'a i Triboi'ego [33] wskazują, że zbyt wysoka temperatura ($>35^{\circ}\text{C}$) w okresie rozwoju ziarniaka oddziałuje na pogorszenie właściwości glutenu. W okresie występowania stresu termicznego synteza białek gliadynowych przebiega z większą szybkością niż białek gluteninowych. W efekcie czego w dojrzałym ziarnie jest wyższy stosunek gliadyn do glutenin, który jest główną przyczyną osłabienia wytrzymałości mechanicznej glutenu. Ponadto ze wzrostem temperatury wzrasta udział α -, β - i ω -gliadyn kosztem γ -gliadyn.

2.3.1.3. Porastanie

Porastanie ziarna jest niekorzystnym zjawiskiem indukowanym najczęściej przez warunki pogodowe panujące w okresie żniw, kiedy ziarniaki w łanie pszenicy osiągnęły już dojrzałość pełną. Przedłużające się opady deszczu w tym okresie spowodować mogą nadmierne nawilżenie ziarniaków w kłosie, które następnie zaczynają kiełkować. Zjawisko porastania może wystąpić również na skutek wadliwego przechowywania ziarna po jego zbiorze.

Pierwszym objawem zapoczątkowania procesu porastania jest wzrost aktywności enzymów amylolitycznych i proteolitycznych. Dlatego też stopień porastania jest najczęściej wyrażany aktywnością α -amylazy, chociaż w użyciu są również bardziej subiektywne wizualne metody jego oceny [45]. Wieloletnie badania Rothkaehl [131-133], przeprowadzone na ziarnie pszenicy z plantacji towarowych zlokalizowanych we wszystkich rejonach klimatyczno-glebowych Polski, wykazały, że procentowy udział próbek z porośniętym ziarnem (liczba opadania poniżej 150 s) wynosił w latach zbioru: 2000 – 6,0% (maksymalnie 27,2% w rejonie V), 2002 – 2,6% (7,0% w rejonie III) i 2003 – 4,2 % (19,8 % w rejonie V).

Do produkcji mąki chlebowej może być przeznaczony wyłącznie surowiec zawierający tylko niewielką liczbę ziarniaków porośniętych. W tym przypadku wzrost aktywności enzymów proteolitycznych i α -amylazy do poziomu umiarkowanego wywiera korzystny wpływ na jakość ciasta i chleba, eliminując równocześnie potrzebę stosowania dodatku słodu. Niemniej jednak, jeśli enzymy wykazują bardziej podwyższoną aktywność, wówczas nadmiernie hydrolizują białko i skrobię, co pogarsza właściwości reologiczne ciasta oraz strukturę miększu chleba [83,84,105].

Za hydrolizę białek glutenowych są odpowiedzialne głównie endoproteazy, grupa enzymów syntetyzowanych w warstwie aleuronowej i tarczce zarodkowej, a wydzielanych do bielma skrobiowego. Maksymalna aktywność tych enzymów w kiełkującym ziarnie osiągnięta jest między 5 a 7 dniem po jego nawilżeniu [35,122].

Endoproteazy, katalizując rozszczepianie wiązań peptydowych w białkach gliadynowych i gluteninowych, powodują ich rozkład na krótko łańcuchowe peptydy. W efekcie tych zmian, ilość wymywanego glutenu z ziarna porośniętego spada, a jego konsystencja jest luźna, rozpływająca się [81].

2.3.2. Okres poźniwny

Bezpośrednio po zbiorze, ziarno składowane w magazynach podlega szeregowi zmian biochemicznych nazywanych dojrzewaniem poźniwnym. Charakteryzuje się ono tzw. poceniem się ziarna i wzrostem jego temperatury. Wyższa wilgotność przechowywanego ziarna sprzyja rozwojowi mikroflory, a towarzyszące procesy hydrolizy lipidów skutkują zmianą barwy i zapachu ziarna oraz pogorszeniem jego jakości technologicznej [46,77]. W celu wyeliminowania tych negatywnych skutków najczęściej stosuje się dosuszanie ziarna do wilgotności poniżej 15%. Ziarno przechowywane przy tej wilgotności nie podlega procesom utleniania lipidów przez wiele miesięcy [49]. Ponadto, badania Rothkaehl i Kosiewicz [134] wykazały, że zmiany ilości glutenu mokrego wymywanego z ziarna pszenicy przechowywanego po zbiorze przez trzy miesiące są niewielkie i nie przekraczają 3-4%. Ograniczają się one do pierwszego tygodnia, kiedy ma miejsce zwiększanie się ilości wymywanego glutenu, a następnie w miarę przechowywania obserwuje się stopniowe obniżanie się jego ilości. Z kolei jakość glutenu, mierzona jego rozpuszczalnością, ulega wyraźnej poprawie w okresie dojrzewania poźniwnego, a po około 6-7 tygodniach przechowywania stabilizuje się.

2.3.2.1. Suszenie ziarna

W warunkach klimatycznych Polski, bardzo często istnieje potrzeba dosuszania ziarna bezpośrednio po zbiorze, gdyż jest ono zbyt wilgotne, aby mogło być bezpiecznie przechowywane w dłuższym okresie. Jednakże, suszenie jest tym zabiegiem, który istotnie może zmieniać wartość reprodukcyjną ziarna, a także właściwości chemiczne i funkcjonalne białek glutenowych. Zmiany te są tym rozleglejsze im wyższa jest wilgotność ziarna i temperatura jego suszenia oraz dłuższy czas trwania tego procesu [86,141].

Najczęściej wymienianymi negatywnymi skutkami oddziaływania zbyt wysokich temperatur suszenia ziarna na właściwości białek glutenowych są: pogorszenie ich rozpuszczalności [145,148,166], spadek ilości wymywanego glutenu [86,124,145], nadmierny wzrost wytrzymałości mechanicznej glutenu mokrego [69,145], pogorszenie właściwości reologicznych ciasta [124] oraz zmniejszona objętość wypieczonego chleba [157]. Podstawową przyczyną tych zmian jest tworzenie się w trakcie trwania obróbki termicznej coraz większych agregatów, głównie z białek gluteninowych połączonych ze sobą wiązaniami dwusiarczko-

wymi [80,157]. Postępująca ze wzrostem temperatury denaturacja białek katalitycznych prowadzi do osłabienia aktywności amylolitycznej i proteolitycznej ziarna [138,148].

Suszenie w odpowiednich warunkach, zwłaszcza ziarna o słabym glutenie, może sprzyjać poprawie jego jakości. Ugarcic-Hardi i Hackenberger [148] zauważyli, że suszenie ziarna od wilgotności 20 do 14% w temperaturze 60-70°C powodowało wzrost liczby sedimentacji, wskazujący na poprawę zdolności pęcznienia glutenu. Badania Shi'ego i Zhao'ego [138] ponadto wykazały, że mąka z pszenicy suszonej w temperaturze 80-90°C odznaczała się korzystnymi właściwościami reologicznymi ciasta oraz dobrą wydajnością chleba z miększym równomiernie porowatym i elastycznym.

2.3.2.2. Przechowywanie mąki

Mąkę uzyskaną z przemiału ziarna pszenicy najczęściej przechowuje się przez pewien okres zanim zostanie wykorzystana do celów piekarniczych. W optymalnych warunkach przechowywania jakość mąki ulega znacznej poprawie. Wzrasta wodochłonność mąki, polepszają się właściwości reologiczne ciasta i jego zdolność do retencji gazu oraz zwiększa się objętość chleba [78,155].

Warunki i czas przechowywania mąki wpływają w sposób istotny na charakter i tempo zachodzących w niej procesów chemicznych. Szczególną uwagę w badaniach poświęca się na poznanie procesów utleniania białek glutenowych. W trakcie przechowywania pod wpływem tych procesów postępuje stopniowy spadek zawartości grup sulfhydrylowych (-SH) w wyniku formowania się wiązań dwusiarczkowych [-S-S-] między łańcuchami polipeptydowymi białek glutenowych [164]. Prowadzi to do wzrostu stopnia polimeryzacji białek w miarę wydłużania czasu przechowywania mąki. Szybkość tych procesów znacznie wzrasta, a jego skutki potęgują się, gdy przechowujemy mąkę w podwyższonej temperaturze [24,140,143]. Podobne skutki, jak przy długotrwałym przechowywaniu, można osiągnąć szybciej przez dodanie do świeżo wyprodukowanej mąki substancji utleniających, np. kwasu askorbinowego [94,155].

W wyniku utleniania białek glutenowych zmieniają się nie tylko ich właściwości chemiczne, ale również funkcjonalne. Wydłużanie okresu przechowywania mąki skutkuje stopniowym spadkiem ilości wymywanego glutenu [140,143] oraz wzmocnieniem wytrzymałości ciasta [24,94,119,155]. Wyniki badań różnych autorów, dotyczące wpływu przechowywania na wodochłonność mąki i objętość chleba, wskazują na poprawę tych właściwości [78] lub na ich pogorszenie [140,143]. Należy sądzić, że rozbieżności te wynikały przede wszystkim z dużej różnorodności genetycznej i środowiskowej badanych odmian pszenicy, warunkującej ich odmienne reakcje.

Obok zmian dotyczących białek glutenowych, w trakcie przechowywania mąki obserwuje się łagodne osłabianie aktywności enzymów amylolitycznych i proteolitycznych. Wzrasta też zawartość wolnych kwasów tłuszczowych w mące i postępuje proces jełczenia tłuszczów [49,119,143].

Przytoczona charakterystyka oddziaływań, jakie mają miejsce podczas wegetacji pszenicy oraz w okresie poźniwnym, a które mogą mieć istotny wpływ na ilość i jakość glutenu, dostarcza bogatej wiedzy o ich naturze i powodowanych skutkach. Niemniej jednak, wyraźnie daje się odczuć niedosyt danych literaturowych opisujących wpływ rozważanych czynników i procesów fizjologicznych i technologicznych na różnicowanie się właściwości fizycznych glutenu świeżo wymytego. Po części należy tłumaczyć to faktem, że badania procesów fizjologicznych, zwłaszcza dojrzewania ziarna, były prowadzone najczęściej na pojedynczych ziarniakach. Uzyskiwane ilości glutenu były zbyt skąpe, aby móc przeprowadzić testowanie jego właściwości mechanicznych. Stąd zakres tych badań był zawężony najczęściej do analizy składu chemicznego białek glutenowych. Nie zajmowano się również badaniem zmian jakości glutenu po zakończeniu dojrzewania pszenicy, w następstwie opóźniania terminu jej zbioru. Z kolei w eksperymentach laboratoryjnych związanych z badaniami skutków porastania ziarna, intensywność porastania najczęściej różnicowano zaledwie na kilka stopni, tracąc przez to możliwość poznania całej złożoności zmian, zwłaszcza na jego początkowych etapach. Na potrzebę poszerzenia dotychczasowej wiedzy również wskazują rozbieżności w wynikach badań cytowanych przy omawianiu charakterystyki oddziaływania zabiegów suszenia ziarna i przechowywania mąki na jakość glutenu.

2.4. Wpływ ilości, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu na jakość ciasta i chleba

Gluten odgrywa najważniejszą rolę w procesach technologicznych związanych z wyrabianiem ciasta i wypiekiem chleba. Wyrabianie ciasta odbywa się w warunkach niedoboru wody, której ilość nie pozwala na pełną hydratację wszystkich składników mąki, gluten musi o nią konkurować z pozostałymi składnikami. W miarę wydłużania czasu wyrabiania ciasta nasila się przechodzenie wody z fazy niebiałkowej do glutenowej [79].

Wzrost ilości glutenu wpływa korzystnie na wiele cech ciasta i chleba. Przede wszystkim zwiększa się wodochłonność mąki [89,109,125,128], co wpływa na przyrost wydajności ciasta i chleba. Ponadto wydłuża się czas rozwoju ciasta, zwiększa się objętość i elastyczność chleba oraz spowalnia się jego czerstwienie [12,23,31,158].

Obok ilości glutenu, również różnice w jego wodochłonności i właściwościach reologicznych oddziałują na jakość ciasta i chleba. Badania Keya'ego i Hadziyev'a [65] i Matuz'a i in. [89] wykazały, że wyższa wodochłonność mąki, jako pośrednia miara wodochłonności glutenu, wpływa na wzrost oporności ciasta na odkształcanie oraz wydłużenie jego stałości. Nie wykryto natomiast korelacji wodochłonności mąki z objętością chleba i teksturą jego mięksiszu, a potwierdzono jedynie jej ujemny wpływ na wytrzymałość mięksiszu chleba [89,167]. W dotychczasowych badaniach zbyt mało uwagi poświęcano na poznanie związków łączących wodochłonność glutenu mierzoną w sposób bezpośredni, np. podczas jego wymywania, z kształtowaniem się właściwości ciasta i chleba. Ohm i Chung [109], badając użyteczność pomiaru ilości wody związanej w glutenie mokrym, wykazali jedynie istnienie dodatniej korelacji tego parametru z oznaczaną miksograficznie wodochłonnością mąki.

Liczniesze są natomiast publikacje, których autorzy opisują związki niektórych wskaźników reologicznych glutenu z wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba. Chang i Ferrari [25] stwierdzili, że maksymalna oporność nitki glutenu na rozciąganie oraz wartość energii użytej w tym cieście są ściśle powiązane z ekstensograficznymi wyróżnikami ciasta. Dodatnie korelacje również odkryto między indeksem glutenu a opornością ciasta na rozciąganie i energią ciasta [30,63]. Wyniki testu rozciągania glutenu, jak wskazują badania Kiefer'a i in. [71], mogą być również użyteczne przy prognozowaniu objętości chleba, a pewność tej predykcji znacznie się zwiększa, kiedy równocześnie uwzględnia się zawartość białka w mące. W przypadku indeksu glutenu, badania Perten'a [116] wskazują na brak jego związku z objętością chleba, natomiast Schoeggl i Werteker [136] wykazali istnienie dodatniej korelacji między tymi wskaźnikami. Ponadto, Armero i Collar [5] uznali indeks glutenu za dobry wskaźnik zwięzłości mięksiszu świeżego chleba, a także szybkości jego czerstwienia.

3. CEL BADAŃ

Wodochłonność i właściwości reologiczne glutenu, jak wynika z przeglądu literatury, są kształtowane przede wszystkim przez właściwości białek glutenowych, których zróżnicowanie jest wypadkową oddziaływania genotypu pszenicy i czynników zewnętrznych podczas wegetacji roślin, obróbki poźniwej ziarna i jego przetwarzania. W świeżo wymyтым glutenie białka te, w zależności od ich właściwości, tworzą mniej lub bardziej zwartą sieć, w której wolne przestrzenie, powstające po wymyciu skrobi, wypełniają się wodą niezwiązaną. Można z dużym prawdopodobieństwem postawić tezę, że sieć luźniejsza, charakteryzująca się

większą sumaryczną objętością wolnych przestrzeni, będzie miała zdolność magazynowania proporcjonalnie większych ilości wody niezwiązanej. Dlatego też, zawartość wody niezwiązanej w glutenie świeżo wymyтым może być obiektywną miarą rozluźnienia jego struktury. Z kolei stopień rozluźnienia sieci glutenowej może istotnie wpływać na kształtowanie się właściwości reologicznych glutenu i przez co determinować również zachowanie ciasta chlebowego podczas jego wyrabiania i wypieku. Z tych względów pomiar zawartości wody niezwiązanej może być miarodajnym wskaźnikiem wartości wypiekowej pszenicy.

Jak wynika z literatury przedmiotu, zagadnienie wykorzystywania pomiaru zawartości wody niezwiązanej w ocenie jakościowej glutenu pszenicy nie było dotychczas podejmowane. Badania nad wodochłonnością były skoncentrowane głównie na ocenie zdolności glutenu do sorpcyjnego wiązania wody. Stąd też rzeczywiste znaczenie proponowanego wskaźnika jakości glutenu nie zostało jeszcze określone.

Wskazane są więc nowe badania, w których przeanalizuje się źródła i zakresy kształtowania się wodochłonności glutenu, w oparciu o proponowane pomiary zawartości wody niezwiązanej i związanej w świeżo wymyтым glutenie, oraz określili się przydatność tych pomiarów w ocenie właściwości reologicznych glutenu i ciasta oraz jakości chleba. W analizie źródeł różnicowania się właściwości glutenu powinno się uwzględnić większość czynników i procesów istotnych w technologii produkcji i przetwórstwa pszenicy na cele piekarnicze. Do nich z pewnością można zaliczyć: dobór odmian pszenicy, warunki uprawy, a w szczególności nawożenie roślin, oraz przebieg procesów fizjologicznych związanych z dojrzewaniem i ewentualnym porastaniem ziarna. W okresie poźniwym nie mniej istotne są warunki dosuszania ziarna pszenicy i przechowywania mąki. Zbadanie wpływu tych czynników i procesów na różnicowanie się struktury sieci glutenowej, właściwości sorpcyjnych i reologicznych glutenu może dostarczyć, obok cennej wiedzy poznawczej, również wielu praktycznych wniosków ukazujących nowe możliwości w podnoszeniu efektywności produkcji i przetwórstwa pszenicy. Z kolei analiza korelacji między proponowanymi wskaźnikami jakości glutenu a uznanymi wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba pozwoli na lepsze zrozumienie roli omawianych cech glutenu w procesach wyrobu ciasta chlebowego i jego wypieku. Na tej podstawie określili się możliwości wykorzystywania proponowanych pomiarów wodochłonności i właściwości reologicznych w praktyce rolniczej, a zwłaszcza do monitorowania skutków poszczególnych procesów i prognozowania wartości wypiekowej ziarna pszenicy.

Innym ważnym zagadnieniem jest wybór odpowiednich metod do badania wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu świeżo wymytego. Z przeglądu literatury wynika, że wysoce czułe w tego typu badaniach są metody o krótkich

cyklach pomiarowych, umożliwiające uchwycenie szybko zachodzących zmian w uwodnieniu wymytego glutenu. Takie zalety posiada standardowa metoda ICC nr 155, powszechnie wykorzystywana do oznaczania ilości glutenu mokrego i charakteryzowania jego właściwości reologicznych przy pomocy indeksu glutenu. Procedurę tej metody można łatwo zmodyfikować, czyniąc ją równocześnie przydatną do pomiaru zawartości obu rodzajów wody w świeżo w wymytm glutenie. Ponadto, uzasadnione jest wzbogacenie standardowej oceny poprzez opracowanie nowych testów reologicznych, które umożliwią bardziej kompleksowe badanie zmian właściwości lepkością glutenu pod wpływem wybranych czynników.

Mając na uwadze powyższe przesłanki podjęto badania, których głównym celem było określenie zakresu i charakteru zmian zawartości wody niezwiązanej i związanej, a także właściwości reologicznych glutenu, pod wpływem wybranych czynników oraz powiązanie tych cech glutenu z kształtowaniem się jakości ciasta i chleba. W ramach realizacji tego celu podjęto się:

- modyfikacji standardowej procedury ICC nr 155 dla potrzeb pomiaru zawartości wody niezwiązanej i związanej w glutenie świeżo wymytm,
- opracowania testów wytlaczania i pelzania do oceny właściwości reologicznych glutenu,
- oceny wpływu czynników o charakterze genotypowym (odmian i form pszenicy) i środowiskowym (poziomów nawożenia azotowego i rejonów uprawy) oraz procesów fizjologicznych (dojrzwania i porastania ziarna) i zabiegów technologicznych (suszenia ziarna i przechowywania maki) na badane cechy glutenu,
- określenia roli wody niezwiązanej i związanej w kształtowaniu właściwości reologicznych glutenu,
- scharakteryzowania związków między wodochłonnością i właściwościami reologicznymi glutenu a jakością ciasta i chleba.

4. MATERIAŁ I METODY

4.1. Materiał badawczy

W badaniach, stosownie do założonych celów, wykorzystano próby ziarna pszenicy pochodzące z dwóch różnych doświadczeń polowych.

Przy ocenie wpływu czynników genotypowych i środowiskowych w okresie wegetacji roślin na wodochłonność i właściwości reologiczne glutenu oraz przy określaniu związków między badanymi cechami glutenu a jakością ciasta i chleba wykorzystano próby ziarna pszenicy ozimej i jarej pochodzące z jednorocznych doświadczeń polowych COBORU założonych w sezonie wegetacyjnym 1999/2000 w siedmiu stacjach doświadczalnych oceny odmian (SDOO) rozmieszczonych w różnych rejonach klimatyczno-glebowych Polski (rys. 1).



Rys. 1. Rozmieszczenie miejscowości (SDOO), z których pochodziły badane próby ziarna pszenicy, na tle rejonów klimatyczno-glebowych Polski

Fig. 1. The position of localities (SDOO) from which studied wheat grain samples were taken, within the climatic-soil regions of Poland

Próby pszenicy ozimej dwóch odmian: Kobra i Korweta pobrano z 4 miejscowości: Kościelna Wieś, Lubinicko, Tarnów Śląski i Tomaszów Bolesławiecki, znajdujących się w dwóch rejonach, III i V. Zaś próby pszenicy jarej reprezentowanej przez odmiany Helia i Jasna pochodziły z 4 miejscowości: Radostowo, Śrem Wójtostwo, Tarnów Śląski i Pawłowice, rozmieszczonych w czterech różnych rejonach: I, III, V i VI. Ponadto, warunki wzrostu roślin były różnicowane poprzez stosowanie dwóch poziomów mineralnego nawożenia azotowego (tab. 1). Wyższy poziom nawożenia uzyskiwano poprzez zwiększenie dawki azotu o $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ w stosunku do niższego poziomu. Przy ustalaniu optymalnych dawek nawożenia mineralnego składnikami NPK kierowano się ich zasobnością w glebie oraz rodzajem przedplonu. Z tych względów zastosowane poziomy nawożenia NPK, jak wynika z tabeli 1, różniły się między poszczególnymi miejscowościami.

Tabela 1. Zastosowane dawki mineralnego nawożenia ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

Table 1. Applied doses of mineral fertilization (kg ha^{-1})

Rodzaj dawki Kind of dose	Pszenica ozima – Winter wheat				Pszenica jara – Spring wheat			
	K*	L	T	To	R	Ś	T	P
N – niższa – lower	80	100	110	120	80	50	100	70
N – wyższa – higher	120	140	150	160	120	90	140	110
P ₂ O ₅	60	60	64	60	40	91	60	80
K ₂ O	90	90	104	90	78	131	90	120

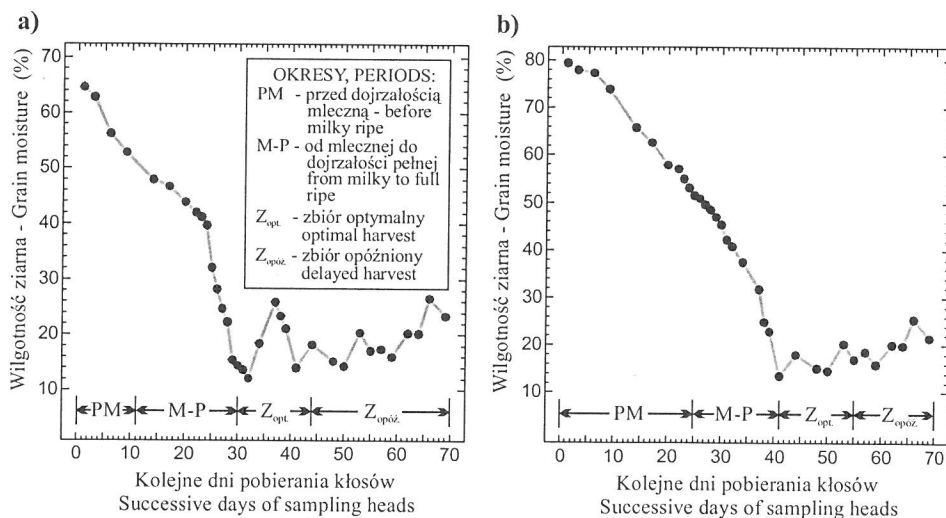
* – Miejscowości – Localities: K – Kościelna Wieś, L – Lubinicko, T – Tarnów Śląski, To – Tomaszów Bolesławiecki, R – Radostowo, Ś – Śrem Wójtostwo, P – Pawłowice.

Przy badaniu wpływu procesów fizjologicznych i technologicznych na oceniane właściwości glutenu wykorzystano kłosa pszenicy i ziarno pochodzące ze zbioru w roku 1998 na polach produkcyjnych Rolniczego Zakładu Doświadczalnego AR w Felinie k/Lublina. Badaniami tymi objęto tylko dwie odmiany pszenicy, które istotnie różniły się właściwościami glutenu. Ziarno pszenicy ozimej odmiany Roma charakteryzowało się wyraźnie gorszą jakością wymywanego glutenu, w porównaniu z ziarnem pszenicy jarej odmiany Igna. Na podstawie wyników doświadczeń polowych COBORU w latach 1997-1999 [64,82], odmiana Roma została zaklasyfikowana do grupy jakościowej B-C (pszenica chlebowo-paszowa), natomiast odmiana Igna – do grupy A (pszenica jakościowa). Ograniczenie liczby odmian wynikało z założonego celu tych badań, w których większy nacisk położono na poznanie mechanizmów oddziaływania poszczególnych procesów na właściwości glutenu niż na wykonanie pełniejszej charakterystyki zrejonizowanych w Polsce odmian pszenicy. Dzięki takiemu podejściu, możliwe było

dokładniejsze prześledzenie, krok po kroku, całego zakresu zmian jakim może podlegać gluten w wyniku przebiegu badanych procesów.

W celu określenia wpływu stadium dojrzałości ziarna pszenicy i opóźniania terminu zbioru, założono specjalny eksperyment polowy na wykłoszonych łanach pszenicy. W łanach obu odmian, położonych po sąsiedzku, wydzielono dwa poletka o wymiarach 10 x 10 m, w obrębie których wytyczono mikropoletka (0,6 x 0,6 m). Do pomiarów pobierano kłosy z 4 losowo wybieranych mikropoletek. Pierwszym dniem pobierania kłosów obu odmian był 24 czerwca a ostatnim 31 sierpnia 1998 roku. Kłosy były ścinane zawsze w godzinach od 13 do 15 z wyjątkiem dni, w których wystąpiły opady powodujące nadmierne nawilżenie kłosów.

Bezpośrednio po ścięciu kłosów, wyluskiwano ziarniaki z 5 kłosów i oznaczano aktualną wilgotność ziarna (metodą suszarkową – 105°C, przez 24h). Na podstawie tej wilgotności wyznaczono odpowiednie fazy dojrzałości ziarniaków (rys. 2). Za początek dojrzałości mleczonej uznano moment, kiedy wilgotności ziarna spadła poniżej 51,5% – a za dojrzałość pełną, gdy wilgotność spadła poniżej 15%. Czas od dojrzałości mleczonej do pełnej był różny u odmian Roma i Igna i wynosił odpowiednio 19 oraz 16 dni. Za okres optymalnego zbioru uznano 14 dni liczone od dnia osiągnięcia dojrzałości pełnej, natomiast dni następne określono mianem zbioru opóźnionego.



Rys. 2. Zmiany wilgotności ziarna w czasie dojrzwania i zbioru pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b)

Fig. 2. Changes in moisture content of grain during ripening and harvest of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b)

Pozostałe kłosy luźno rozkładano i pozostawiano w pomieszczeniu magazynowym w celu doprowadzenia ziarna do wilgotności równoważnej (około 11-12%). Po upływie 3 miesięcy ziarno zostało ręcznie wydzielone z kłosów i oczyszczone przy użyciu separatora ziarna SZD (ZBPP, Bydgoszcz). W celu oszacowania plonu glutenu w zależności od stadium dojrzałości pszenicy i terminu jej zbioru określono dla każdej z odmian przeciętną obsadę kłosów na 1 ha oraz plon ziarna z 1 kłosa dla wszystkich dni obserwacji.

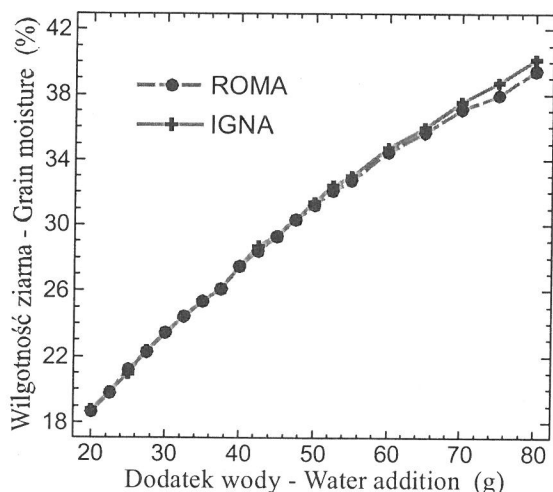
W eksperymentach laboratoryjnych, mających na celu określenie wpływu procesów porostania i suszenia ziarna oraz przechowywania mąki na właściwości glutenu, materiałem badawczym było wyłącznie ziarno w pełni dojrzałe, zebrane kombajnem w optymalnym terminie z łanów pszenicy badanych odmian. Przed rozpoczęciem eksperymentów ziarno oczyszczono z zanieczyszczeń i pośladu (frakcji ziarna o grubości poniżej 1,6 mm) przy pomocy wspomnianego separatora SZD i poddano leżakowaniu w celu wyrównania jego wilgotności.

4.2. Metodyka eksperymentów laboratoryjnych

Eksperymenty laboratoryjne opisane w tym rozdziale przeprowadzano w pomieszczeniach termostatowanych, w których temperatura powietrza była utrzymywana na poziomie $22,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. W identycznych warunkach temperaturowych były również wykonywane pomiary wodorochłonności i właściwości reologicznych glutenu. Ponadto, ściśle przestrzegano aby temperatura wody destylowanej, używanej do nawilżania ziarna (testy porostania i suszenia), oraz temperatura 2% wodnego roztworu NaCl, stosowanego do wymywania glutenu i podczas wykonywania testów reologicznych, były ustabilizowane na tym samym poziomie ($22,5 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$).

4.2.1. Testy porostania

Testy porostania przeprowadzono według następującej procedury. Na tacy plastikowej, o głębokości 2 cm, umieszczano dwie warstwy bibuły filtracyjnej o wymiarach 38 x 28 cm każda. Następnie, odważoną próbkę ziarna ($120 \pm 0,1$ g) o stałej wilgotności ($11,5 \pm 0,5\%$) rozkładano równomiernie na powierzchni bibuły ograniczonej ściankami ramki (32 x 23 cm). Ramkę usuwano, a uformowaną monowarstwę ziarna przykrywano dwoma kolejnymi warstwami bibuły filtracyjnej. Chcąc naśladować warunki porostania pszenicy w łanie, stosunek masy bibuły (4 warstwy) do masy ziarna był zgodny z proporcją masy plew do ziarna w dojrzałym kłosie pszenicy (1:4).



Rys. 3. Wpływ wielkości dodatku wody stosowanej w teście porastania pszenicy odmian Roma i Igna na wilgotność ziarna
Fig. 3. Effect of the amount of water addition applied in test for sprouting wheat of cultivars Roma and Igna on moisture content of grain

Dodatek wody destylowanej, odmierzony z dokładnością do 0,05 g, był aplikowany bezpośrednio na powierzchnię bibuły, a tacę natychmiast przykrywano pokrywą. Pomiędzy pokrywą a krawędzią tacy pozostawiano szczelinę (1,2 mm) dla zapewnienia wentylacji podczas trwania testu. Za początek testu porastania przyjmowano moment dodania wody. Czas trwania testu był stały i wynosił 72 h (3 dni). Wyboru tego okresu dokonano na podstawie danych literaturowych [81,107,139], które wskazują, że przyjęty czas porastania jest wystarczająco długi, aby spowodować znaczące zmiany we właściwościach glutenu.

Po zakończeniu testu porastania, określano wilgotność ziarna na podstawie przyrostu jego masy. Następnie, ziarno luźno rozkładano na suchej bibule, co prowadziło do powolnego spadku jego wilgotności do początkowego poziomu (11,5%). Po zsypaniu do papierowych opakowań ziarno przechowywano przez okres 3 miesięcy zanim rozpoczęto pomiary cech glutenu.

Wykorzystując powyżej opisaną procedurę, zbadano wpływ stopnia porośnięcia ziarna pszenicy, modelowanego poprzez stopniowe zwiększanie wielkości dodatku wody w teście porastania od 20 do 80 g, na kształtowanie się badanych właściwości reologicznych glutenu. W szczególności skoncentrowano się na uchwyceniu skutków porastania w fazie inicjowania się tego procesu, kiedy nie obserwuje się jeszcze zewnętrznych oznak porastania ziarna.

Z tych względów, wielkość dodatku wody w zakresie od 20 do 55 g różnicowano skokowo co 2,5 g, a w zakresie od 55 do 80 g – co 5 g. Jak pokazano na rysunku 3, zastosowane dodatki wody (20 poziomów) różnicowały wilgotność ziarna badanych odmian pszenicy od 18,6 do 40,2% i warunkowały równocześnie szerokie zróżnicowanie stopnia jego porośnięcia.

Zmiany aktywności α -amylazy w ziarnie poddanym tym testom oceniono poprzez pomiar wartości liczby opadania, zgodnie ze standardem ICC nr 107/1 [57], oraz obserwując pojawianie się morfologicznych symptomów porastania.

4.2.2. Suszenie ziarna

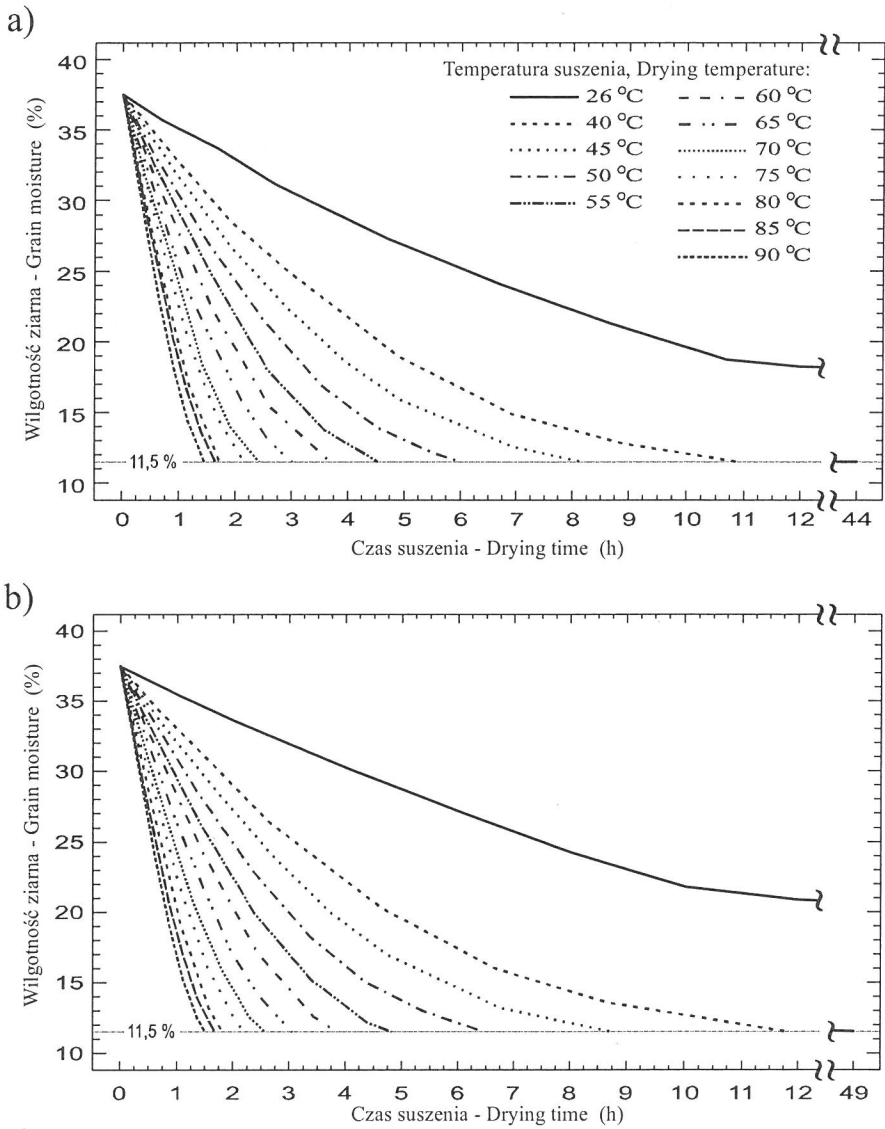
Przy badaniu wpływu suszenia ziarna na właściwości glutenu różnicowano wilgotność suszonego ziarna i temperaturę suszenia. Próbkę ziarna, o wilgotności początkowej 11,5%, nawilżano do wilgotności 15, 18,3, 24,1, 29,2, 33,6 i 37,5%. W tym celu 60-gramowe próbki ziarna wraz z dodatkiem wody destylowanej, wynoszącym odpowiednio 2,5, 5, 10, 15, 20 i 25 g, umieszczano w bidonach o pojemności 0,5 dm³, które pozostawiano w mieszkadle laboratoryjnym (10 obrotów/minutę) na 24 godziny.

Po zakończeniu nawilżania, próbki rozsypywano na sitkach i umieszczano w suszarce Brabendera, typ 890 100. Suszenie ziarna odbywało się przy następujących temperaturach powietrza: 26°C (minimalna dla danego typu suszarki i warunków otoczenia), 40°C i kolejne temperatury z krokiem co 5°C do 90°C. Stosowanie wyższych temperatur stanowiło barierę uniemożliwiającą prawidłowy przebieg izolowania glutenu. Proces suszenia przerywano kiedy wilgotność ziarna osiągała 11,5% (wilgotność początkowa). Czas jego trwania ustalano na podstawie krzywych suszenia wyznaczonych oddzielnie dla każdej z badanych odmian (rys. 4). Czas suszenia, w zależności od wilgotności ziarna i temperatury, wahał się od 20 minut do około 49h (przy temperaturze suszenia 26°C). Po zakończeniu suszenia, próbki ziarna schładzano, a następnie poddawano leżakowaniu przez okres 3 miesięcy.

4.2.3. Przechowywanie mąki

Przechowywaniu poddawano mlewo pełnoziarnowe, o ustabilizowanej wilgotności ($11,5 \pm 0,5\%$), pochodzące z przemiału ziarna w młynku laboratoryjnym (Lab Mill 3100, firmy Falling Number AB, Huddinge, Szwecja). Bijaki tego młynka poruszając się z dużą prędkością (ok. 17 tys. obrotów na minutę) rozdrabniają i przetłaczają próbkę przez sito o otworach 0,8 mm. Dzięki czemu uzyskane mlewo charakteryzuje się jednorodną wielkością cząstek. Przez cały okres przechowywania mlewo znajdowało się w hermetycznych pojemnikach, co zapobiegało zmianom jego wilgotności.

Próbki mlewa do analiz pobierano w odstępach dwutygodniowych do 12 tygodnia włącznie oraz dodatkowo po 18 i 32 tygodniach przechowywania. Podczas pobierania mlewa, całą zawartość pojemnika mieszano w celu równomiernego napowietrzenia. Miało to istotne znaczenie dla podtrzymywania zachodzących procesów utleniania w trakcie przechowywania.



Rys. 4. Krzywe suszenia ziarna pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b)
Fig. 4. Drying curves of wheat grain for cultivars Roma (a) and Igna (b)

4.3. Aparatura pomiarowa

Do wmywania glutenu z młewa pełnoziarnowego wykorzystano glutownik Glutomatic 2200 firmy Perten Instruments AB, Huddinge, Szwecja. Zasadniczym elementem tego urządzenia jest komora wmywająca, składająca się z plastikowego pierścienia i perforowanego denka, na którym znajduje się sitko, o kalibrowanych otworach. Wewnątrz tej komory, próbka młewa wraz z niewielkim dodatkiem wodnego roztworu NaCl jest mieszana przy pomocy ramion mieszadła. W pierwszych etapach jest formowane ciasto, a podczas dalszego jego wyrabiania, prowadzonego już pod strumieniem wspomnianego roztworu, przebiega proces wmywania glutenu. Zastosowana kalibracja odległości między sitem a ramionami mieszadła, jego prędkości obrotowej i wielkości przepływu wody oraz czasu trwania poszczególnych operacji jest gwarancją wysokiej powtarzalności i porównywalności uzyskanych wyników.

Testy wirowania świeżo wymytego glutenu przeprowadzono przy pomocy wirówki Centrifuge 2015 tej samej firmy. Elementem pomiarowym tej wirówki jest specjalna kasetka plastikowa wyposażona w metalowe sito o otworach 0,5 mm. Próbkę glutenu umieszczona na tym sicie jest poddawana wirowaniu przy stałej prędkości obrotowej wynoszącej $6000 \pm 5 \text{ min}^{-1}$. Podczas wirowania, w wyniku oddziaływania siły odśrodkowej ($\sim 2000 \times g$), testowana próbka przetwarzana jest przez otwory w sicie i równocześnie wyciskana jest z niej woda niezwiązana przez gluten. Precyzyjna konstrukcja kasetki oraz automatyczna kontrola prędkości obrotowej i czasu trwania testu wirowania pozwalają z zadowalającą dokładnością przeprowadzać zarówno oznaczanie indeksu glutenu, jak również pomiary ilości wody niezwiązanej w glutenie świeżo wymitym.

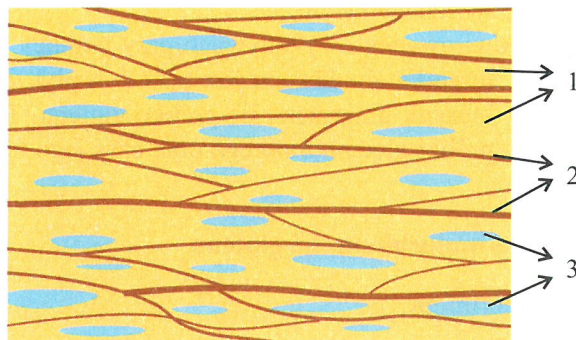
Suszenie glutenu odwirowanego wykonywano przy pomocy suszarki Glutork 2020 tej samej firmy. Suszarka zbudowana jest z dwóch płyt grzejnych, pokrytych teflonem, między którymi umieszcza się próbkę glutenu. Temperatura tych płyt w trakcie suszenia próbki glutenu mokrego oraz czas jego trwania są kontrolowane elektronicznie.

4.4. Sposób określania wodochłonności glutenu

4.4.1. Opis metody i definicje

Proponowana metoda pomiaru wodochłonności opiera się na ocenie ilości wody wchłoniętej przez gluten w trakcie procesu wmywania, prowadzonego zgodnie ze standardową procedurą [56]. Przy zachowywaniu jednakowych warunków tego procesu różnice w ilości wody zmagazynowanej w wymitym glutenie zależą wyłącznie od jego wodochłonności.

Istota tego pomiaru sprowadza się do rozróżnienia w glutenie świeżo wymyтым, przy pomocy testu wirowania, dwóch rodzajów wody: niezwiązanej i związanej. W wyniku wirowania, z glutenu usuwana jest woda niezwiązana, a pozostaje w nim woda związana. Przyjęte rozróżnienie znajduje uzasadnienie w specyficznej strukturze glutenu świeżo wymytego [41]. Ma ona postać przestrzennej sieci (rys. 5), zbudowanej głównie z białek gliadynowych i gluteninowych, której wolne przestrzenie wypełnione są wodą łatwo usuwalną, np. pod wpływem wirowania. Właśnie ten rodzaj wody obecnej w glutenie przyjęto określać terminem „woda niezwiązana”. Za obiektywny wskaźnik zawartości wody niezwiązanej (*WN*) uznano stosunek masy wody traconej wskutek wirowania glutenu świeżo wymytego do jego masy początkowej, wyrażany w procentach. Z kolei wodę sorpcyjnie związaną przez białkowe i niebiałkowe składniki zespolone w sieci glutenowej, a zarazem wodę nie usuwalną w wyniku wirowania, przyjęto nazywać terminem „woda związana”. Zawartość wody związanej (*WZ*) przyjęto określać stosunkiem masy wody traconej w wyniku suszenia glutenu odwirowanego do masy początkowej glutenu świeżo wymytego, wyrażanego w procentach. Sumę zawartości wody niezwiązanej (*WN*) i zawartości wody związanej (*WZ*) nazwano całkowitą zawartością wody (*CZ*), a to, co pozostało z glutenu świeżo wymytego po jego wirowaniu i suszeniu nazwano glutenem suchym (rys. 6). Ilość glutenu suchego (*GLS*) przyjęto wyrażać procentowym stosunkiem masy glutenu suchego do masy próbki miewa o wilgotności 14%, z której wyizolowano ten gluten. Przy pomocy wskaźnika *GLS* charakteryzowano wydajność glutenu, czyli ilość glutenu, jaką uzyskiwano z jednostki masy testowanego ziarna pszenicy.

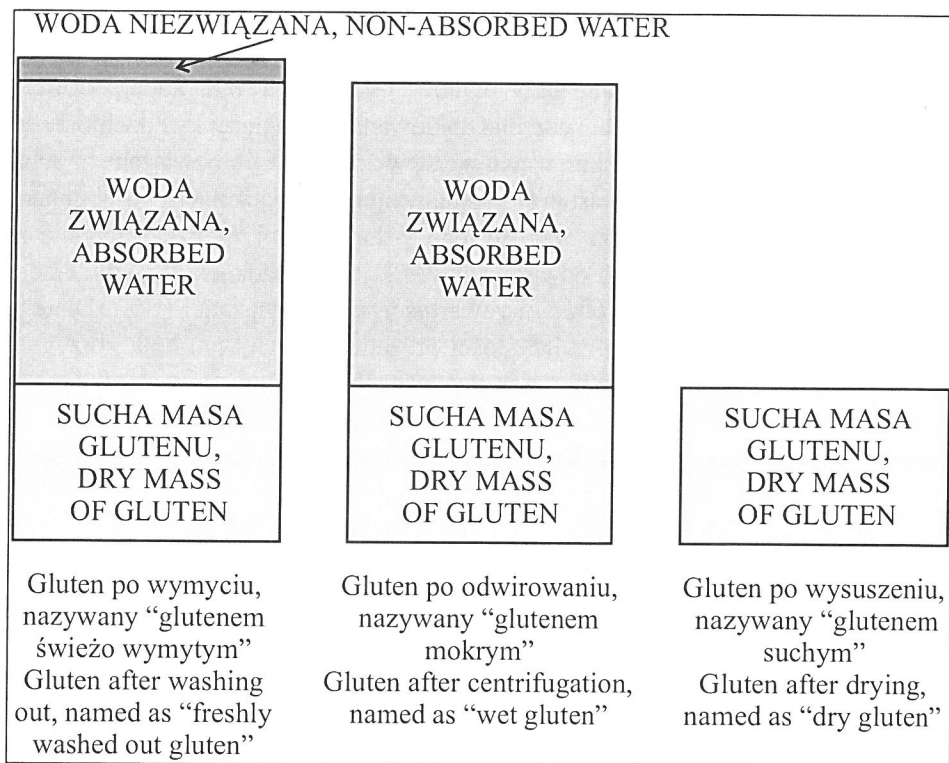


Rys. 5. Proponowany model struktury glutenu świeżo wymytego: 1 – gliadyny, 2 – gluteniny, frakcje 1 i 2 zawierają wodę związaną, 3 – woda niezwiązana

Fig. 5. Proposed model for structure of freshly washed out gluten: 1 – gliadins, 2 – glutenins, fractions 1 and 2 contain absorbed water, 3 – non-absorbed water

Zgodnie z przyjętymi definicjami, świeżo wymyty gluten składa się z 3 następujących elementów: glutenu suchego, wody niezwiązanej i wody związanej (rys. 6), charakteryzowanych odpowiednio przy pomocy *GLS*, *WN* i *WZ*. Zaproponowane wskaźniki umożliwiają całkowicie odrębne traktowanie wydajności i wodochłonności glutenu, ponieważ cechy te w takim ujęciu nie są w żaden sposób powiązane ze sobą. Ta odrębność zaciera się natomiast przy posługiwaniu się wskaźnikiem ilości glutenu mokrego. Wiadomo bowiem, że wartość tego wskaźnika, określanego zgodnie ze standardem ICC nr 155 po jego odwirowaniu [56], jest wypadkową dwóch składowych: ilości glutenu suchego (*GLS*) i zawartości wody związanej (*WZ*). Dlatego też dla zachowania większej przejrzystości prezentowanych wyników zrezygnowano z podawania charakterystyki ilości glutenu mokrego. Dane dotyczące różnicowania się tego wskaźnika pod wpływem niektórych z badanych czynników są dostępne we wcześniej opublikowanych pracach autora [97,98,100,101]. Dla jasności, wyniki badań opisanych w tych pracach, po ich uporządkowaniu przez zastosowanie jednolitych miar wydajności i wodochłonności glutenu, a także po ich uzupełnieniu o nowe, niepublikowane jeszcze wyniki pomiarów wykonanych przy użyciu opracowanych przez autora testów reologicznych, zostały włączone do rozdziału 5.1 niniejszej monografii.

Oczywiste jest, że przyjęty wskaźnik wydajności glutenu (*GLS*) jest nie tylko miarą zawartości białek glutenowych w ziarnie pszenicy, ale również właściwości tych białek i innych składników tego ziarna oddziałujących w procesie wymywania na przebieg formowania się glutenu i jego izolowania. Modyfikując te właściwości, np. poprzez stosowanie zabiegu suszenia ziarna, wpływa się na wzrost bądź spadek wydajności glutenu. Z kolei zawartość wody niezwiązanej (*WN*) w glutenie świeżo wymytym bezpośrednio zależy przede wszystkim od budowy sieci glutenowej, a zwłaszcza od rozmiarów i gęstości rozmieszczenia w niej wolnych przestrzeni. Gluten formujący sieć o luźniejszej strukturze, a więc zawierającą więcej wolnych przestrzeni, będzie miał zdolność zatrzymywania w trakcie procesu wymywania większych ilości wody niezwiązanej w porównaniu z glutenem o bardziej zwartej strukturze. Stąd też pomiary wskaźnika wodochłonności *WN* wykorzystano przede wszystkim do charakteryzowania zmian stopnia rozluźnienia struktury wymytego glutenu. Odmienne niż w przypadku wskaźnika wodochłonności *WZ*, którego pomiary wykonywano dla określenia właściwości sorpcyjnych glutenu.



Rys. 6. Zróżnicowanie modelowego składu glutenu w zależności od etapu procedury jego oznaczania
Fig. 6. Differentiation of model composition of gluten in relation to procedure stage of its determination

4.4.2. Modyfikacja standardowej procedury

Pomiary zaproponowanych przez autora wskaźników wodochłonności glutenu (*WN*, *WZ* i *CZ*) oraz jego wydajności (*GLS*), których definicje podano w rozdziale 4.4.1, przeprowadzono wykorzystując w tym celu standardową procedurę oznaczania ilości i jakości glutenu mokrego opisaną w normie ICC nr 155 [56]. Podstawową zaletą tej procedury jest jej pełne oprzyrządowanie w postaci zestawu urządzeń pomiarowych do wymywania, wirowania i suszenia glutenu, które opisano w rozdziale 4.3.

Zgodnie z normą ICC nr 155, procedura oznaczania ilości i jakości glutenu składa się z dwóch kolejnych etapów: wymywania i wirowania. Etap wirowania służy zarówno do usunięcia wody niezwiązanej z próbki wymytego glutenu, jak również do testowania jego jakości metodą opracowaną przez Pertena [115]. Po zakończeniu wirowania wykonuje się ważenie tej części próbki, która przeszła

przez otwory sitka pomiarowego, a następnie całości próbki. Na tej podstawie określa się ilość glutenu mokrego oraz wartość indeksu glutenu, przyjmowanego za wskaźnik jego jakości.

Norma ta nie przewiduje natomiast wykonywania pomiarów ilości glutenu suchego oraz zawartości wody niezwiązanej i związanej. Aby móc je wykonywać, standardowa procedura została zmodyfikowana poprzez wprowadzenie do niej trzech dodatkowych etapów pomiarowych: (1) ważenia próbki glutenu świeżo wymytego, (2) sporządzania stałej odważki glutenu do wirowania i (3) suszenia glutenu odwirowanego.

Pierwszy z tych etapów służy do określenia początkowej masy próbki glutenu, bezpośrednio po wymyciu, a przed wirowaniem. Na podstawie tego parametru jest obliczany wskaźnik wydajności glutenu (*GLS*).

Sporządzanie stałej odważki ma na celu zabezpieczenie jednakowych warunków podczas usuwania wody niezwiązanej i związanej oraz testowania właściwości reologicznych glutenu. Występowanie dużego zróżnicowania pszenicy pod względem wydajności glutenu skutkuje tym, że masa glutenu wymytego przy pomocy standardowej procedury może kształtować się w szerokich przedziałach, od 1,5 do 4 gramów. Podczas wirowania próbka wymytego glutenu generuje siłę odśrodkową, która przy stałej prędkości obrotowej i stałym promieniu obrotu jest wprost proporcjonalna do masy tej próbki. Wartość siły odśrodkowej bezpośrednio oddziałuje na zachowanie próbki poprzez zmianę szybkości jej przetłaczania przez otwory sitka pomiarowego, a także szybkości utraty wody niezwiązanej. Jednakże, przy bardzo szerokim zróżnicowaniu siły odśrodkowej, liniowość reakcji próbki na jej działanie nie zawsze może być spełniona. Badania własne autora [96] wykazały, że zmniejszanie masy próbki glutenu, zwłaszcza poniżej 2 g, wpływało bardzo mocno na wzrost wartości indeksu glutenu. Zachowywanie stałej odważki jest również ważne dla precyzji pomiaru zawartości wody niezwiązanej i związanej, gdyż ujednolica przebieg zjawiska parowania wody. Wiadomo bowiem, że procentowy ubytek wody w jednostce czasu, przy stałych warunkach zewnętrznych, jest proporcjonalny do stosunku pola powierzchni próbki glutenu, która ma kształt kuli, do jej masy. Stąd ubytek ten w wyniku parowania w trakcie etapu wirowania glutenu, czy etapu jego suszenia będzie większy w przypadku próbki o mniejszej masie. Z tych też względów przy dużych różnicach w masie próbki wymytego glutenu zostanie zakłócona poprawność metodyczna oznaczania wskaźników wodochłonności *WN* i *WZ*. Powyższe przesłanki wskazują na celowość sporządzania stałej odważki glutenu. Wielkość odważki przyjęto na poziomie $2,1 \pm 0,05$ g glutenu świeżo wymytego. Większość uprawianych w Polsce odmian pszenicy pozwala na wymywanie próbek glutenu o masie zazwyczaj wyższej niż przyjęta odważka. Dlatego też, proponowany sposób preparowania stałej odważki jest

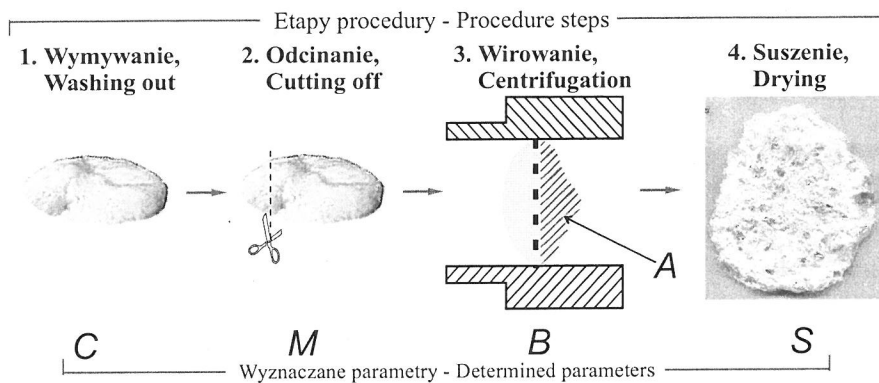
prosty i sprowadza się najczęściej do odcinania nadmiaru glutenu. W rzadkich przypadkach niedoboru glutenu, żadaną wielkość odważki uzyskuje się przez dodanie części glutenu z drugiej próbki wyizolowanej w równoległym procesie wymywania. Prowadzenie tego procesu w dwóch równoległych cyklach umożliwia większość obecnie stosowanych glutowników.

Trzecim etapem wprowadzonym do standardowej procedury jest suszenie. Służy ono do usuwania z glutenu odwirowanego wody związanej, a tym samym umożliwia określenie jej zawartości (WZ), a także ilości glutenu suchego (GLS).

4.4.3. Procedura pomiaru wodochłonności

Przebieg etapów procedury oznaczania wodochłonności glutenu zilustrowano na rysunku 7. Bezpośrednio przed planowanymi oznaczeniami, badane próbki ziarna pszenicy mielono na Lab Mill 3100, opisanym w rozdziale 4.2.3, a mlewo pełnoziarnowe umieszczano w hermetycznych pojemnikach i określano jego wilgotność (w_m) metodą suszarkową (130°C , przez 2h). Każdorazowo do wymywania glutenu odważano $10 \pm 0,01$ g mlewa (m_m) i przenoszono je do komory wymywającej, wyposażonej w sito o otworach $88\ \mu\text{m}$. Po wyrównaniu powierzchni próbki mlewa, dodawano $4,8\ \text{cm}^3$ wodnego, 2% roztworu NaCl, a następnie mocowano komorę w uchwytach aparatu Glutomatic 2200 i uruchamiano automatyczny cykl pracy. W pierwszych 20 sekundach odbywało się wyrabianie ciasta, a w następnych 2 minutach przebiegał etap wymywania przy użyciu roztworu NaCl dozowanego automatycznie ($55\ \text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$). Po zakończeniu tego etapu, częściowo wymyty gluten przenoszono przy pomocy strumienia wody bieżącej do drugiej komory z sitem o większych otworach – $840\ \mu\text{m}$. Zamiana komór wymywających umożliwiała usunięcie z glutenu fragmentów okrywy ziarniaków (otrąb) w trakcie dalszego wymywania. Po zamocowaniu tej komory w aparacie, wymywanie było kontynuowane przez kolejne 3 minuty, a po jego zakończeniu, wymyty gluten przenoszono w całości na wagę i odczytywano jego masę (C).

Po odcięciu nadmiaru glutenu (rys. 7), preparowano kulkę o masie $2,1 \pm 0,05$ g (M) i umieszczano ją na sitku kasetki mocowanej w bębnie wirówki Centrifuge 2015. Czas wirowania wynosił 1 minutę. Po zakończeniu wirowania, odcinano tę część glutenu, która przeszła przez otwory sitka kasetki i określano jej masę (A). Następnie wyjmowano drugą część glutenu pozostającą po przeciwnej stronie sitka i ważono ją razem z pierwszą częścią glutenu (B). Po zespoleniu tych części w jedną kulkę glutenu, umieszczano ją centrycznie między płytami grzejnymi suszarki Glutork 2020. Gluten suszono w temperaturze 150°C , a czas jego trwania wynosił 4 minuty. Po zakończeniu suszenia określano masę glutenu suchego (S). Pomiary masy glutenu na poszczególnych etapach procedury (parametry C, M, A, B i S) były wykonywane z dokładnością do $0,01$ g.



Rys. 7. Kolejne etapy procedury oznaczania wodochłonności glutenu

Fig. 7. Successive steps of the procedure for determining gluten water absorption

Opierając się na zmierzonych wartościach parametrów M , B i S , które oznaczają:

M – masę próbki glutenu poddanego wirowaniu (g),

B – masę próbki glutenu po wirowaniu (g),

S – masę próbki glutenu po jego wysuszeniu (g),

wyznaczono następujące wskaźniki wodochłonności glutenu:

- zawartość wody niezwiązanej w glutenie świeżo wymyтым (WN), zgodnie ze wzorem:

$$WN = 100 \cdot (M - B) / M, (\%), \quad (1)$$

- zawartość wody związanej w glutenie świeżo wymyтым (WZ), zgodnie ze wzorem:

$$WZ = 100 \cdot (B - S) / M, (\%), \quad (2)$$

- całkowitą zawartość wody w glutenie świeżo wymyтым (CZ), zgodnie ze wzorem:

$$CZ = WN + WZ = 100 \cdot (M - S) / M, (\%). \quad (3)$$

Ponadto, na podstawie wartości parametrów C , m_m , w_m , w_b , które oznaczają:

C – masę całkowitą glutenu świeżo wymytego (g),

m_m – masę próbki mlewa, z której wymywano gluten (g),

w_m – wilgotność mlewa (%),

w_b – przyjętą wilgotność bazową mlewa (%),

wyznaczono ilość glutenu suchego wymywanego z mlewa przy $w_b = 14\%$ (GLS), zgodnie ze wzorem:

$$GLS = C \cdot (100 - CZ) \cdot (100 - w_b) / ((100 - w_m) \cdot m_m), (\%). \quad (4)$$

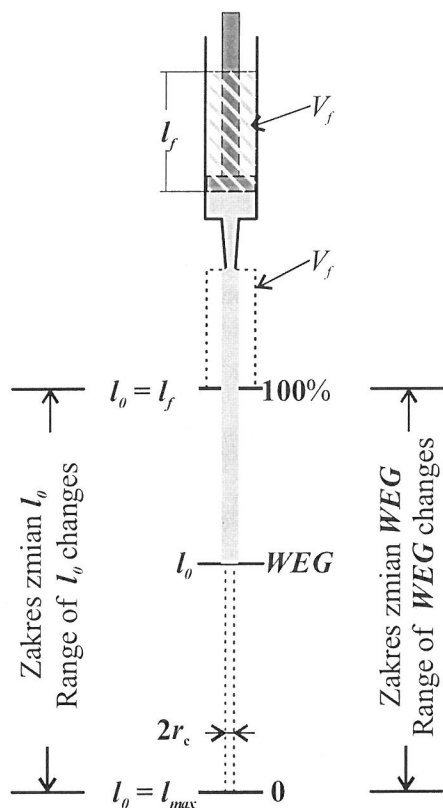
4.5. Sposób określania właściwości reologicznych glutenu

4.5.1. Charakterystyka testów reologicznych

W badaniach właściwości reologicznych glutenu mokrego wykorzystano test wirowania, będący standardem ICC nr 155 [56], oraz nowo opracowane przez autora testy wytłaczania i pełzania. Sposób przeprowadzania testu wirowania został opisany w rozdziale 4.4.2. Polega on na poddawaniu próbki glutenu świeżo wymytego wirowaniu, a wytworzona w jego wyniku siła odśrodkowa wymusza przechodzenie jej przez otwory sita pomiarowego (rys. 7) Wyznaczony na tej podstawie indeks glutenu (IG) wyraża w procentach wagowych udział tej części próbki glutenu, która pozostaje na sicie pomiarowym po zakończeniu wirowania. Zatem, wartość IG jest proporcjonalna do oporu jaki stawia gluten podczas wytłaczania przez otwory tego sita. Stąd wyższy indeks oznacza, że testowany gluten jest mocniejszy i bardziej zwięzły.

Istota opracowanego testu wytłaczania polega na poddawaniu próbki glutenu mokrego odkształceniom w wyniku wytłaczania jej przez otwór wylotowy strzykawki, którego pole przekroju jest kilkunastokrotnie mniejsze od pola przekroju cylindra strzykawki. W wyniku wytłaczania próbka przyjmuje postać walca, którego pokrój może być mniej lub bardziej wydłużony w zależności od właściwości lepkosprężystych glutenu. Im krótszy i zarazem grubszy jest ten walec, tym testowany gluten jest bardziej elastyczny, a więc odporniejszy na odkształcenia, jakie występują podczas testu wytłaczania. Jak pokazano na rysunku 8, przy wyznaczaniu wskaźnika elastyczności glutenu (WEG), obok pomiaru długości wytłoczonego walca (l_0), uwzględnia się również hipotetyczną długość tego walca (l_{max}) przy zerowej elastyczności glutenu. Przy założeniu, że gluten jest nieściśliwy, wartość l_{max} oblicza się przez podzielenie objętości wytłoczonego glutenu (V_f) przez pole przekroju otworu wylotowego strzykawki (πr_c^2). Wartość WEG otrzymuje się przez dopełnienie stosunku tych dwóch parametrów, l_0 do l_{max} , i wyrażenie go w procentach. Stąd przy całkowitej utracie elastyczności przez gluten, wskaźnik ten przyjmuje wartość 0%, a w przypadku glutenu idealnie elastycznego – wartość 100% (rys. 8).

Przy pomocy testu pełzania określa się rozciągliwość walca glutenu mokrego uformowanego wyniku wytłaczania. W tym celu walec ten poddaje się swobodnemu zwisaniu, w efekcie czego rozciąga się on pod własnym ciężarem. W trakcie pełzania walca rejestruje się przyrosty jego długości. Po ustalonym czasie etap pełzania przerywa się poprzez odcięcie i zanurzenie walca glutenu w wodnym roztworze NaCl. Następuje etap odprężania, po zakończeniu którego określa się ponownie długość tego walca.



Rys. 8. Ilustracja zależności wskaźnika elastyczności glutenu (WEG) od długości wytłoczonego walca glutenu (l_0); l_f – skok tłoka, V_f – objętość wytłoczonego glutenu, r_c – promień otworu wylotowego strzykawki, $l_{max} = (V_f / \pi r_c^2)$

Fig. 8. Illustration of relation of the gluten elasticity index (WEG) to the length of extruded gluten cylinder (l_0); l_f – piston travel, V_f – volume of extruded gluten, r_c – radius of syringe outlet, $l_{max} = (V_f / \pi r_c^2)$

Zarejestrowane zmiany w długości walca w czasie pełzania i odprężania umożliwiają wyznaczenie wskaźników reologicznych, takich jak: wielkość odkształcenia całkowitego walca glutenu w cieście pełzania (ϵ_t) i udział lepkiego płynięcia w jego odkształceniu wyrażony w procentach (U_C). Wartość ϵ_t oblicza się ze stosunku przyrostu długości walca glutenu, spowodowanego pełzaniem, do jego długości początkowej. Wyraża ona zdolność walca glutenu do wydłużania się w wyniku sumowania się wszystkich składowych odkształceń występujących podczas pełzania. Stąd wyższa wartość ϵ_t oznacza, że testowany gluten jest bardziej rozciągliwy.

Z kolei wartość U_C wskazuje, jak duża część odkształcenia całkowitego (ϵ_t) jest nieodwracalna, stanowiąca efekt lepkiego płynięcia glutenu w trakcie pełzania. Dopełnieniem wartości U_C do 100% jest wielkość udziału odkształcenia odwracalnego, które zanika podczas odprężania w wyniku nawrotu sprężystego i lepkosprężystego. Malejący udział lepkiego płynięcia wskazuje równocześnie na

wzrastającą sprężystość glutenu. Z tego względu, charakteryzowanie lepko-sprężystych właściwości glutenu zawężono w tej pracy do opisu zmian wskaźnika U_C , które w prosty sposób pokazują kształtowanie się tych dwóch wzajemnie uzupełniających się cech reologicznych glutenu.

4.5.2. Procedura przeprowadzania testów reologicznych

Testy wirowania i pomiary indeksu glutenu wykonywano równocześnie z oznaczeniami wodochłonności, zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 4.4.3. Zmierzone wartości parametrów A i B (rys. 7), oznaczające:

A – masę tej części próbki glutenu, która przeszła przez otwory sita pomiarowego (g),

B – masę całkowitą obu części próbki glutenu, znajdujących się pod i na sicie pomiarowym (g),

wykorzystano do obliczenia wartości indeksu glutenu (IG), zgodnie ze wzorem:

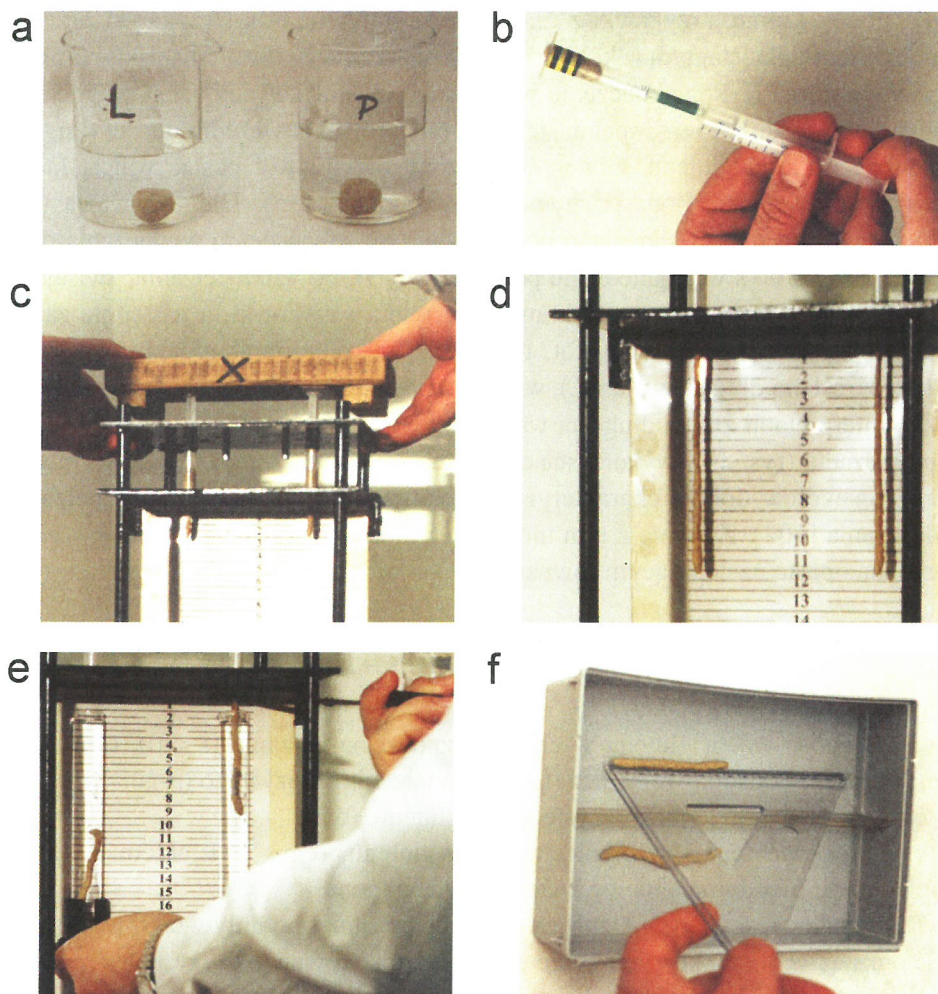
$$IG = 100 \cdot (B - A) / B, (\%) \quad (5)$$

Sposób przeprowadzania testów wytłaczania oraz pełzania zilustrowano na fotografii 1.

Do wytłaczania próbki glutenu i formowania z niej walca wykorzystywano strzykawkę plastikową (LZF „Polfa”, Lublin), o pojemności 2 cm^3 , z otworem wylotowym o długości 11 mm i średnicy 2,4 mm. Stosunek pola przekroju otworu wylotowego do pola przekroju cylindra strzykawki wynosił 1:14.

Strzykawkę mocowano w pozycji pionowej na statywie, który wyposażono w ekran z podziałką do odczytu długości zwisającego walca glutenu (fot. 1d). W celu poprawy precyzji odczytu długości, na ekran kierowano prostopadłą wiązkę światła. Uzyskiwano w ten sposób wierny obraz walca glutenu bezpośrednio na ekranie z podziałką.

Testom poddawano próbki glutenu mokrego, które wymywano i odwirowywano zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 4.4.3. Przed rozpoczęciem testu próbkę glutenu o masie 1,93 g, uformowaną ręcznie w postaci kulki, zanurzano w solance (2% wodny roztwór NaCl) na 10 minut w celu ustabilizowania jej temperatury (fot. 1a). Następnie wskutek wytwarzanego podciśnienia w strzykawce, kulkę glutenu wciągano do jej wnętrza i tłokiem przesuwano ją w kierunku otworu wylotowego (fot. 1b). Z podziałki strzykawki odczytywano objętość próbki glutenu, z dokładnością do $0,05 \text{ cm}^3$.



Fot. 1. Etapy przeprowadzania testów wytlaczania i pelzania walca glutenu mokrego: (a) próbki glutenu przygotowane do badań, (b) umieszczenie glutenu w strzykawce, (c) wytłaczanie glutenu i formowanie walca, (d) pelzanie walca glutenu pod własnym ciężarem i odczyt zmian jego długości, (e) koniec etapu pelzania; odcięcie i zanurzenie walca glutenu w solance, (f) etap odprężania, przy końcu którego odczytuje się długość walca

Photo. 1. Stages of the extrusion and creep tests for the wet gluten cylinder: (a) gluten samples prepared for testing, (b) pouring gluten into syringe, (c) gluten extrusion and cylinder forming, (d) gravity creep of the gluten cylinder and readout of changes in its length, (e) end of the creep stage; gluten cylinder cutting off and dipping in NaCl solution, (f) the recovery stage, at the end of which the length of gluten cylinder is read

Po umieszczeniu strzykawki z glutenem na statywie, tłok strzykawki przesuwano ruchem jednostajnym (około $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) poprzez wywieranie nacisku na płytę dociskową (fot. 1c). Po zakończeniu wytłaczania, w strzykawce pozostawała część próbki o objętości $0,3 \text{ cm}^3$, spełniająca rolę miejsca zakotwiczenia dla tej drugiej, wytłoczonej części glutenu. Gluten wytłoczony przyjmował postać walca, który zwisając rozciągał się pod własnym obciążeniem (fot. 1d). Długość walca (l_c), z dokładnością do 1mm, określano bezpośrednio po zakończeniu wytłaczania oraz w odstępach co 60 s w trakcie etapu pełzania (rys. 9). Po 420 s pełzania, zwisający walec glutenu odcinano równo z krawędzią wylotu strzykawki, a następnie zanurzano go w cylindrze z solanką (fot. 1e). Po okresie odprężania glutenu w solance (420 s) określano długość walca (l_r), w sposób pokazany na fotografii 1f.

Do interpretacji zmian długości walca glutenu (l_c), zarejestrowanych w trakcie etapu pełzania (rys. 10), wykorzystano 4-elementowy model reologiczny Burgersa, który szczególnie dobrze charakteryzuje zachowanie się ciała w trakcie pełzania i odprężania [104]. Zgodnie z tym modelem zmiany parametru l_c w funkcji czasu (t) można opisać następującym równaniem:

$$l_c(t) = a + b \cdot (1 - \exp(-t / T_{ret})) + c \cdot t, \quad (\text{cm}), \quad (6)$$

gdzie:

a – długość walca glutenu w chwili rozpoczęcia pełzania ($t = 0$), (cm), jest sumą długości początkowej walca (l_0) i odkształcenia sprężystego ($a-l_0$),

b – odkształcenie lepkosprężyste walca glutenu, (cm),

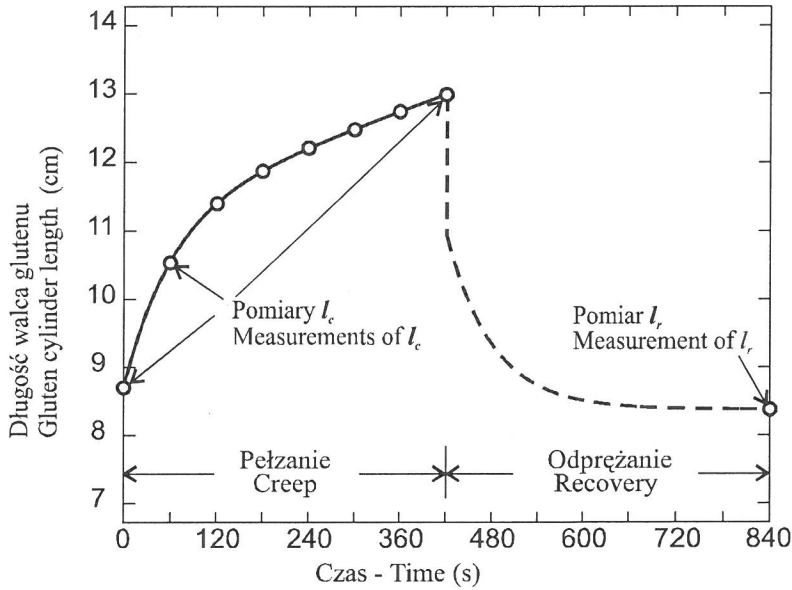
c – prędkość lepkiego płynięcia walca glutenu, ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$). Efektem lepkiego płynięcia jest nieodwracalne wydłużenie walca glutenu,

T_{ret} – stała czasowa, (s). Oznacza ona czas pełzania, po upływie którego wielkość odkształcenia lepkosprężystego osiąga wartość równą $b \cdot (1-1/e)$.

Współczynniki determinacji R^2 , opisujące stopień dopasowania równania (6) do uzyskanych danych pomiarowych, były bardzo wysokie, powyżej 0,99, a wyznaczone parametry tego równania (a , b , c) charakteryzowały się niskimi błędami estymacji. Długość początkową walca glutenu (l_0) wyznaczano stosując wzór:

$$l_0 = l_r - 420 \cdot c, \quad (\text{cm}), \quad (7)$$

gdzie: l_r – długości walca po odprężeniu, (cm), 420 – czas trwania pełzania, (s).



Rys. 9. Typowa krzywa pełzania i odpężania walca glutenu mokrego wraz z punktami pomiarowymi, które uwzględniono przy wyznaczaniu wskaźników reologicznych

Fig. 9. Typical creep and recovery curve for wet gluten cylinder with measurement points which were taken when determining the rheological indices

Posiłkując się długością początkową l_0 i parametrami równania (6), wyznaczono następujące wskaźniki właściwości reologicznych glutenu:

- wskaźnik elastyczności glutenu (WEG), według wzoru:

$$WEG = 100 \cdot (1 - (l_0 - l_f) / (l_{max} - l_f)), \text{ gdy } l_f < l_{max}, (\%), \quad (8)$$

gdzie: l_f – skok tłoka, (cm), $l_{max} = (V_f / \pi r_c^2)$, (cm), V_f – objętość wytłoczonego glutenu, (cm^3), r_c – promień otworu wylotowego strzykawki, (cm),

- odkształcenie całkowite walca glutenu (ε_t), według wzoru;

$$\varepsilon_t = (a + b + 420 \cdot c - l_0) / l_0, (-), \quad (9)$$

- udział lepkości płynięcia (U_C), według wzoru

$$U_C = 100 \cdot 420 \cdot c / (l_0 \cdot \varepsilon_t), (\%), \quad (10)$$

Pomiary wskaźników wydajności (GLS) i wodochłonności glutenu (WN , WZ i CZ) oraz jego właściwości reologicznych (IG , WEG , ε_t i U_C), których procedurę opisano w rozdziałach 4.4.3 i 4.5.2, były wykonywane w 4 powtórzeniach.

Urządzenia pomiarowe stosowane do wymywania i wirowania glutenu (rozdział 4.3), są przystosowane do równoczesnego prowadzenia dwóch równoległych cykli pomiarowych. Z tych względów, ocenę wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych wykonywano poddając dwie próbki mlewa jednoczesnemu wymywaniu, bądź dwie próbki wymytego glutenu - jednoczesnemu wirowaniu, a także wytłaczaniu i pelżaniu, co pokazano na fotografii 1. Taki sposób prowadzenia pomiarów ponadto ułatwiał kontrolowanie poprawności ich przebiegu i ewentualnie podejmowanie decyzji o ich powtórzeniu w przypadku wystąpienia grubych błędów. W nielicznych przypadkach, kiedy masa świeżo wymytego glutenu była zbyt niska (poniżej 2,05 g), aby przeprowadzić test wirowania, bądź masa glutenu po wirowaniu wynosiła mniej niż 1,93 g, co zakłada opracowana procedura testów wytłaczania i pelżania, wspomniane testy przeprowadzano tylko na jednej próbce glutenu, której niedobór masy uzupełniano poprzez dodanie odpowiedniej ilości glutenu z drugiej, równoległej próbki. Z tego powodu, cykle pomiarowe związane z wymywaniem i testowaniem jakości glutenu powtarzano do momentu uzyskania 4 pojedynczych wyników (powtórzeń) dla każdej kombinacji eksperymentalnej.

4.6. Oznaczanie wyróżników jakościowych ciasta i chleba

Próby ziarna pszenicy pochodzące z doświadczeń polowych COBORU, omówionych w rozdziale 4.1., oceniono pod kątem ich wartości wypiekowej poprzez wykonanie oznaczeń właściwości reologicznych ciasta i przeprowadzenie próbnego wypieku laboratoryjnego chleba. Tę ocenę przeprowadzono w Laboratorium Chemiczno-Technologicznym SDOO w Słupi Wielkiej. Przemiał badanych prób przeprowadzono na ziarnie kondycjonowanym o wilgotności od 14,5 do 17,5% (zależnie od szklistości ziarna), przy użyciu młyna laboratoryjnego firmy Bulher typu MLU-202.

Właściwości reologiczne ciasta oznaczono przy pomocy dwóch standardowych metod: farinograficznej i ekstensograficznej. Do tych oznaczeń stosowano mąkę o stałym 70% wyciągu. Metodą farinograficzną, zgodnie ze standardem ICC nr 115/1 [55], określono wodochłonność mąki, czasy rozwoju i stałości ciasta, jego rozmięczenie oraz wartość walorymetryczną. Za wynik pomiaru wodochłonności przyjmowano procentowy stosunek masy wody wchłoniętej przez mąkę i potrzebnej do wytworzenia ciasta o konsystencji równiej 500 j.B. do masy mąki o wilgotności 14%. Pomiar czasu rozwoju ciasta rozpoczynano z chwilą dodania wody do mąki, a kończono w momencie osiągnięcia przez ciasto maksymalnej konsystencji. Czas stałości ciasta liczono od momentu, kiedy krzywa górnym swym zarysem osiągnęła na farinogramie wartość 500 j.B., do momentu, kiedy ta krzywa opadając ponownie zetknęła się górnym swym zarysem z linią odpowia-

dającą wartości 500 j.B. Rozmiękczenie ciasta wyrażane w j.B. oznaczało spadek konsystencji ciasta mierzony po upływie 12 minut, licząc od chwili zakończenia rozwoju ciasta. Przy wyznaczaniu wartości walorymetrycznej, zwanej również wartością mieszkankową, korzystano z walorymetru, odczytując jej wynik w punkcie odpowiadającym 12 minutom odmierzonym od momentu zakończenia rozwoju ciasta. Przy pomocy ekstensografu, zgodnie ze standardem ICC nr 114/1 [54], określono energię ciasta oraz liczbę stosunkową. „Energia ciasta”, rozumianą jako pracę zużytą na zerwanie wałka ciasta, wyrażano wielkością pola pod krzywą wykreśloną na ekstensogramie. Z kolei „liczbę stosunkową” definiuje się jako stosunek oporu na zrywanie do rozciągliwości ciasta. Wartość oporu ciasta na zrywanie, wyrażaną w j.B., odczytywano z ekstensogramu w punkcie odległym o 50 mm od punktu odpowiadającego początkowi zrywania. Za rozciągliwość ciasta przyjmowano odległość w milimetrach między punktami na ekstensogramie, oznaczającymi rozpoczęcie zrywania i moment zerwania wałka ciasta.

Do próbnych wypieków stosowano mąkę o liczbie opadania prowadzonej do poziomu 220 s, przy pomocy dodatku słodu jęczmiennego. Przy wyrabianiu ciasta wykorzystywano miesiarkę wysokoobrotową (1400 obrotów na minutę). Czasy trwania I i II fazy fermentacji ciasta wynosiły po 30 minut. Rozrost kęsów ciasta w foremkach prowadzono do momentu osiągnięcia przez nie tak zwanej dojrzałości piecowej. Następnie foremki z ciastem wkładano do pieca nagrzanego do temperatury 230°C i prowadzono wypiek przez 30 minut. Oceniając jakość wypieczonych chlebków określono wydajność chleba, wyrażającą procentowy stosunek masy pieczywa do masy użytej mąki o wilgotności 14%, oraz objętość chleba uzyskaną ze 100 g mąki i bonitację pieczywa. Przy obliczaniu bonitacji, nazywanej również liczbą wartości pieczywa, uwzględniano współczynnik objętości chleba, współczynnik porowatości miękiszu według Dallmana oraz jakość miękiszu chleba, oceniając strukturę miękiszu, jego elastyczność oraz równomierność porów [74].

4.7. Analiza statystyczna wyników badań

Do zbadania siły wpływu czynników analizowanych w ramach przeprowadzonych doświadczeń polowych (rozdział 4.1) i eksperymentów laboratoryjnych (rozdział 4.2) na zmianę właściwości glutenu, wyniki pomiarów wskaźników wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych, wykonanych zgodnie z procedurami opisanymi w rozdziałach 4.4.3 i 4.5.2, poddano analizie wariancji i wyznaczono 95% przedziały ufności dla średnich (NIR).

Współzależności pomiędzy wyznaczonymi wskaźnikami właściwości glutenu oraz ich związki z wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba (rozdział 4.6) scharakteryzowano określając współczynniki korelacji liniowej (r) i ich poziomy

istotności (α). W tabelach zamieszczono jedynie współczynniki korelacji, dla których $\alpha < 0,05$.

Do poszukiwania zależności empirycznych pomiędzy właściwościami reologicznymi glutenu a zmianami jego wydajności i wodochłonności oraz pomiędzy jakością ciasta i chleba a analizowanymi właściwościami glutenu wykorzystano metodę analizy regresji liniowej wielu zmiennych. Metoda ta umożliwiła wybór tylko tych wskaźników właściwości glutenu, które we współdziałaniu ze sobą przyczyniały się do wyjaśniania zmienność prognozowanego wyróżnika jakościowego w istotnie wyższym stopniu niż pojedynczo. Stopień dopasowania wyznaczonych równań regresji do danych pomiarowych oceniono określając współczynniki determinacji R^2 . W obrębie każdego równania regresji, wskaźniki właściwości glutenu uporządkowano według malejącej wielkości ich wpływu ocenionej wartością funkcji t-Studenta.

5. WYNIKI

5.1. Zmienność wyznaczonych wskaźników wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu

W tym rozdziale omówiono wpływ wybranych czynników genotypowo-środowiskowych wzrostu roślin oraz procesów fizjologicznych i technologicznych na zmianę wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu.

5.1.1. Wpływ odmian pszenicy, rejonów uprawy i poziomów nawożenia azotowego

Przy ocenie wpływu czynników genotypowo-środowiskowych w okresie wegetacji roślin na kształtowanie się właściwości glutenu posłużono się trójczynnikiem analizą wariancji wykonaną oddzielnie dla obu form pszenicy. Analizowanymi czynnikami były odmiany pszenicy (2), miejscowości uprawy (4) i poziomy nawożenia azotowego (2). Siłę wpływu tych czynników na wariancję wskaźników wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu oceniono na podstawie wartości funkcji F-Snedekora, które zestawiono w tabelach 2 i 3.

5.1.1.1. Pszenica ozima

Spośród analizowanych wskaźników (tab. 2), ilość glutenu suchego (*GLS*) różniowała się pod wpływem badanych czynników najmocniej. Na zróżnicowanie tego wskaźnika zdecydowanie większy wpływ miały poziomy nawożenia azotowego

i rejonu uprawy (miejscowości) niż odmiany pszenicy. Wzrost nawożenia azotowego powodował przyrost ilości glutenu suchego średnio o 0,9% (rys. 10a). Najkorzystniejsze warunki środowiskowe, sprzyjające zwiększaniu wydajności glutenu (*GLS*) wystąpiły w miejscowości Tomaszów Bolesławiecki (rejon V).

Zawartość wody niezwiązanej w wymywanym glutenie (*WN*) wahała się między 1,3 i 4,6% (rys. 10b), a głównym źródłem jej zmienności były odmiany (tab. 2). Średnia *WN* dla odmiany Korweta (1,8%) była zdecydowanie niższa niż dla odmiany Kobra (3,2%). Rejonu uprawy również wpływały na zróżnicowanie tej cechy. Pszenica uprawiana w miejscowości Kościelna Wieś (rejon III), w porównaniu z pozostałymi, charakteryzowała się istotnie niższą średnią *WN* (1,8%). Stosowane dawki nawożenia azotowego nie różnicowały istotnie wartości *WN*. Interakcje występujące między czynnikami: odmiany i miejscowości, wpływały na wariancję *WN* najmocniej.

Zawartość wody związanej w wymywanym glutenie (*WZ*) kształtowała się w przedziale od 62,8 do 65,6% (rys. 10c) i, podobnie jak *WN*, podlegała większym zmianom pod wpływem odmian i miejscowości oraz interakcji tych czynników (tab. 2). Jednakże, w porównaniu z *WN*, wystąpiło odwrotne uporządkowanie odmian i miejscowości pod względem średnich wartości *WZ*.

Całkowita zawartość wody w wymywanym glutenie (*CZ*) różnicowała się w węższym przedziale, w porównaniu z *WN* i *WZ*, od 66,1 do 67,5% (rys. 10d). Odmiany pszenicy ozimej nie różniły się istotnie tą cechą glutenu (tab. 2).

Zmienność indeksu glutenu (*IG*), podobnie jak wskaźników *WN* i *WZ*, w przeważającym stopniu była warunkowana genotypem badanych odmian (tab. 2). Wyraźnie słabiej na zmiany *IG* oddziaływały czynniki środowiskowe, a zwłaszcza nawożenie azotowe. Odmiana Korweta, o wyraźnie wyższym *IG* w porównaniu z odmianą Kobra, była wyjątkowo niepodatna na oddziaływania rejonów uprawy i poziomów nawożenia, w efekcie czego zmienność *IG* w obrębie tej odmiany ograniczała się do bardzo wąskiego przedziału między 88,5 a 93,5 % (rys. 11a).

Wartości wskaźnika elastyczności glutenu (*WEG*) kształtowały się w przedziale od 89,5 do 92,1% (rys. 11b), a główną przyczyną wariancji tego wskaźnika były poziomy nawożenia azotowego (tab. 2). Zwiększone nawożenie przyczyniało się do wzrostu elastyczności glutenu. Największe przyrosty *WEG* odnotowano dla miejscowości Kościelna Wieś (średnio o 2,2%) i Lubinicko (o 0,8%), zlokalizowanych w rejonie III.

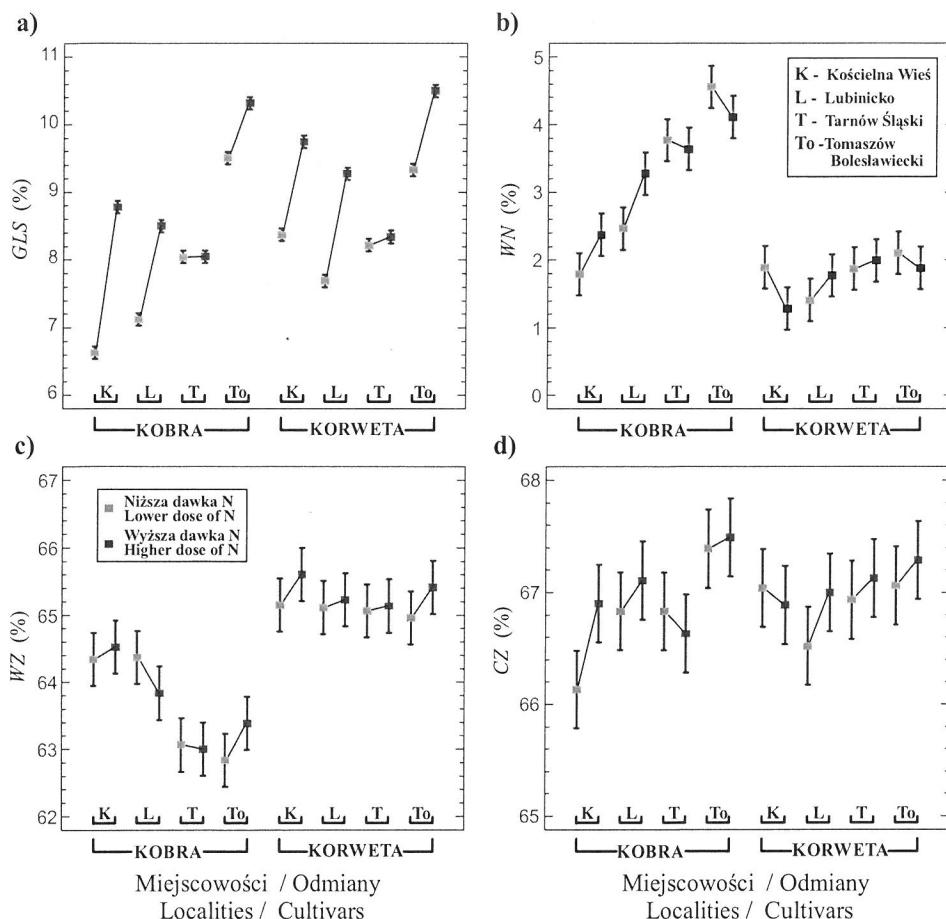
Tabela 2. Wartości funkcji F-Snedekora otrzymane w analizie wariancji wskaźników wydajności (*GLS*), wodochłonności (*WN*, *WZ* i *CZ*) i właściwości reologicznych (*IG*, *WEG*, ε_t i U_C) glutenu pszenicy ozimej

Table 2. Values of the F-Snedekor function obtained in the variance analysis of indices of quantity (*GLS*), water absorption (*WN*, *WZ* and *CZ*) and rheological properties (*IG*, *WEG*, ε_t and U_C) of winter wheat gluten

Źródła wariancji Variance sources	<i>GLS</i>	<i>WN</i>	<i>WZ</i>	<i>CZ</i>	<i>IG</i>	<i>WEG</i>	ε_t	U_C
Czynniki: Factors:								
Odmiany Cultivars (A)	608,2 **	359,2 **	242,9 **	0,6 –	840,6 **	3,8 –	193,2 **	3,2 –
Miejscowości Localities (B)	1369,3 **	58,3 **	16,5 **	8,2 **	135,7 **	5,5 *	57,6 **	1,8 –
Nawożenie Fertilization (C)	2198,0 **	0,6 –	2,4 –	6,0 *	6,3 *	41,7 **	7,3 *	18,9 **
Interakcje: Interactions:								
A x B	167,6 **	25,4 **	9,8 **	4,3 *	125,7 **	2,3 –	33,8 **	2,5 –
A x C	0,3 –	3,5 –	1,5 –	0,1 –	6,6 *	0,4 –	7,0 *	1,7 –
B x C	264,0 **	6,1 *	2,6 –	0,9 –	21,8 **	14,4 **	18,1 **	5,0 *
A x B x C	31,3 **	4,8 *	0,6 –	2,9 *	11,6 **	5,1 *	9,3 **	0,2 –

** – $P \leq 0,001$, * – $P \leq 0,05$, – – nieistotne – not significant.

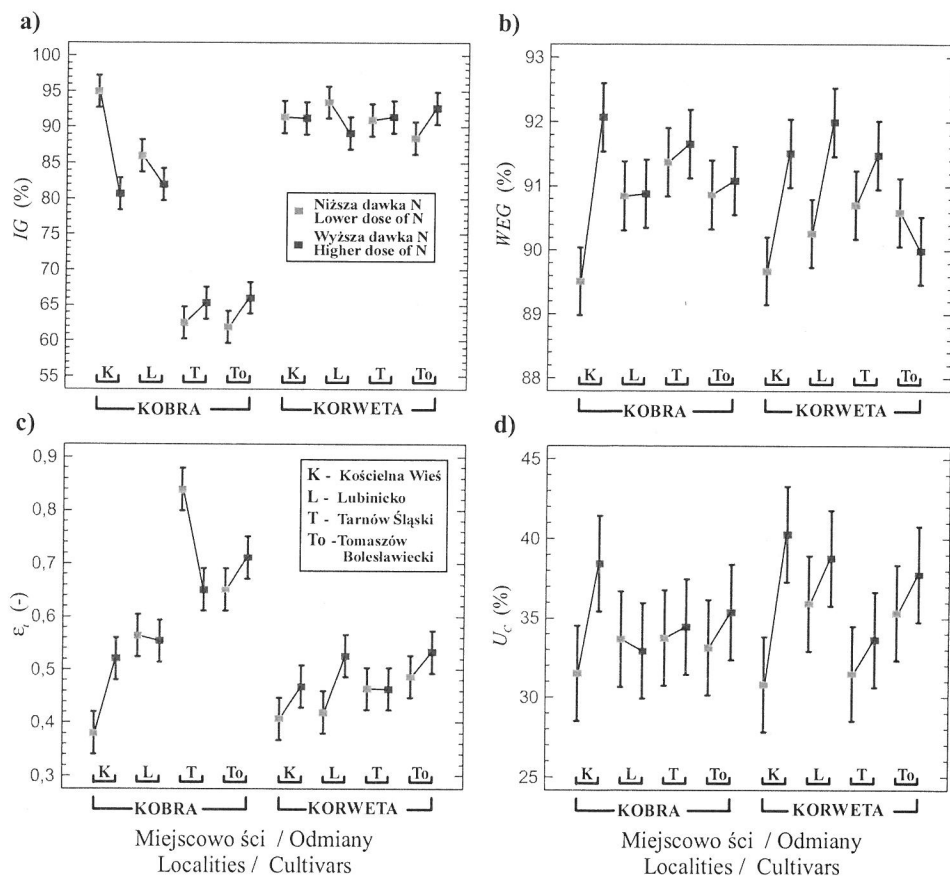
Wartości odkształcenia całkowitego walca glutenu w cieście pełzania (ε_t) zawierały się w przedziale od 0,38 do 0,84 (rys. 11c). Najmocniej na zmienność ε_t wpływały odmiany pszenicy. Odmiana Korweta charakteryzowała się istotnie mniejszą rozciągliwością glutenu (0,47) w porównaniu z odmianą Kobra (0,61). W nieco mniejszym stopniu na wariancję tej cechy wpływały miejscowości uprawy, a najsłabiej – nawożenie azotowe. Spośród efektów interakcyjnych najmocniejsze okazały się te między odmianami i miejscowościami.



Rys. 10. Wpływ poziomów nawożenia azotowego, miejscowości i odmian pszenicy ozimej na ilość glutenu suchego – GLS (a), zawartość wody niezwiązanej – WN (b), zawartość wody związanej – WZ (c) i całkowitą zawartość wody w glutenie – CZ (d)

Fig. 10. Effects of nitrogen fertilization levels, localities and cultivars of winter wheat on dry gluten content – GLS (a), non-absorbed water content – WN (b), absorbed water content – WZ (c), and total water content in gluten – CZ (d)

Zakres zmienności udziału lepkiego płynięcia (U_C) wynosił od 30,8 do 40,3% i wynikał głównie z oddziaływania poziomów nawożenia (rys. 11d). Wzrost nawożenia wpływał na większą rozciągliwość glutenu poprzez podwyższanie udziału lepkiego płynięcia (U_C), średnio o 3,2%. Największe przyrosty U_C (o 8,1%) odnotowano dla miejscowości Kościelna Wieś.



Rys. 11. Wpływ poziomów nawożenia azotowego, miejscowości i odmian pszenicy ozimej na indeks glutenu – IG (a), wskaźnik elastyczności glutenu – WEG (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ϵ_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_c (d)

Fig. 11. Effect of nitrogen fertilization levels, localities and cultivars of winter wheat on gluten index – IG (a), gluten elasticity index – WEG (b), total strain of gluten cylinder – ϵ_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_c (d)

5.1.1.2. Pszenica jara

Zakres zmian GLS dla pszenicy jarej był większy niż dla ozimej i mieścił się w przedziale od 6,3 do 13,4% (rys. 12a), przy czym analiza wariancji (tab. 3) wykazała istnienie podobnych przyczyn różnicowania się ilości glutenu. Największy przyrost GLS pod wpływem wzrostu dawki azotu odnotowano dla miejscowości Radostowo, który wynosił średnio 2,8%. Pszenica uprawiana na południu Polski (Pawłowice) odznaczała się najwyższą wydajnością glutenu.

Wartości *WN* kształtowały się w podobnym zakresie, jak u pszenicy ozimej, między 1,3 i 5% (rys. 12b), i również przy podobnym wpływie badanych czynników (tab. 3). Odmiana Jasna, w porównaniu z odmianą Helia, wyróżniała się zdecydowanie niższymi wartościami *WN*, średnio o 1,5%. Dla miejscowości Śrem Wójtostwo odnotowano najniższą średnią *WN*, równą 2%. Nawożenie azotowe, jako samodzielny czynnik, nie wpływało na zmianę *WN*. Natomiast czynnik ten w interakcji z pozostałymi, a szczególnie z odmianami istotnie różnicował tę cechę glutenu.

Wartości *WZ* pszenicy jarej, w porównaniu z ozimą, zmieniały się w szerszym przedziale od 60,7 do 65% (rys. 12c). Ponadto, wystąpił zdecydowanie większy wpływ nawożenia i miejscowości. Szczególnie mocne oddziaływanie nawożenia na wzrost wartości *WZ* odnotowano dla miejscowości Radostowo, średnio o 2,6%. Uprawiana w tej miejscowości pszenica odmiany Jasna przy niższym poziomie nawożenia charakteryzowała się wyjątkowo niską wartością *WZ*, przy jednocześnie krańcowo wysokiej, jak dla tej odmiany, wartości *WN*.

Pszenica jara, w porównaniu z ozimą, odznaczała się również większą zmiennością *CZ*, a jej wartości mieściły się między 65,4 a 68,3 % (rys. 12d). Analiza wariancji (tab. 3) wykazała istotny wpływ wszystkich badanych czynników. Średnie wartości dla odmian Helia i Jasna wyniosły odpowiednio 67,4 i 66,1%. Podobny zakres średnich wartości uzyskano dla badanych miejscowości. Wyższa dawka nawożenia azotowego przyczyniała się do istotnego wzrostu *CZ*, średnio o 0,4%.

Wartości *IG* mieściły się w podobnie szerokim przedziale, jak dla pszenicy ozimej, od 56,6 do 98,4% (rys. 13a), a do ich zmienności przyczyniały się istotnie wszystkie badane czynniki (tab. 3). Średnie wartości *IG* dla miejscowości zlokalizowanych na południu Polski (rejon V i VI) były zdecydowanie niższe od średnich dla pozostałych miejscowości. Jak już wspomniano przy omawianiu wariancji *GLS*, południowe rejonu Polski wpływały na poprawę wydajności glutenu, jednakże wytrzymałość mechaniczna takiego glutenu ulegała znacznemu osłabieniu. Odnotowane dla rejonów V i VI spadki *IG* dochodziły do 25% i dotyczyły zwłaszcza odmiany Helia. Również zwiększone nawożenie azotowe przyczyniało się do istotnego spadku wartości *IG*, średnio o 4,5%.

Wartości *WEG* mieściły się w przedziale od 85,5 do 93,9% (rys. 13b). Analiza wariancji (tab. 3) ujawniła największe zróżnicowanie wartości *WEG* w wyniku oddziaływania rejonów uprawy (miejscowości). Średnia wartość *WEG* dla miejscowości Radostowo (89,8%) była istotnie niższa od tych dla pozostałych miejscowości, o co najmniej 2,6%. Odmiana Helia, w porównaniu z odmianą Jasna, odznaczała się bardziej elastycznym glutenem. Wzrost dawki azotu oddziaływał korzystnie podnosząc wartość *WEG*, średnio o 1,2%. Największe efekty interakcyjne dla tego wskaźnika wyniknęły ze współdziałania czynników: miejscowości uprawy i poziomów nawożenia. Dla miejscowości Radostowo stwierdzono największy wpływ nawożenia na przyrost *WEG*, średnio o 3,7%.

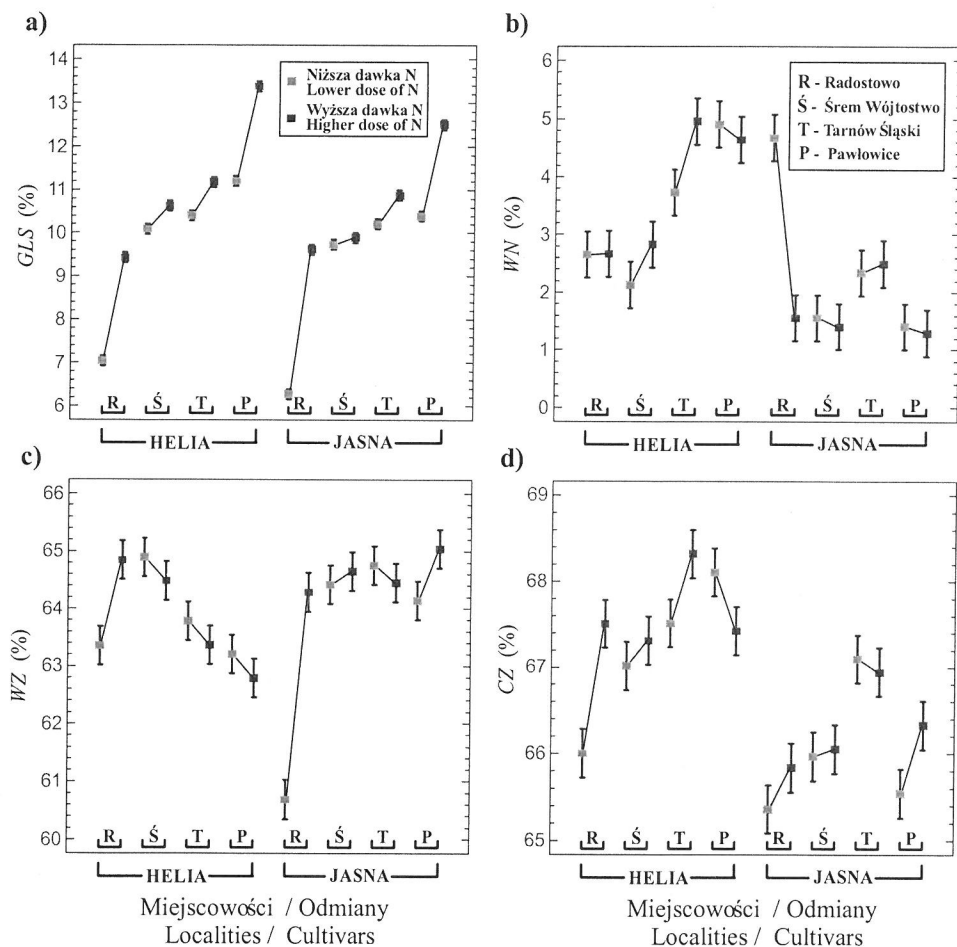
Tabela 3. Wartości funkcji F-Snedekora otrzymane w analizie wariancji wskaźników wydajności (*GLS*), wodochłonności (*WN*, *WZ* i *CZ*) i właściwości reologicznych (*IG*, *WEG*, ε_t i U_C) glutenu pszenicy jarej

Table 3. Values of the F-Snedecor function obtained in the variance analysis of indices of quantity (*GLS*), water absorption (*WN*, *WZ* and *CZ*) and rheological properties (*IG*, *WEG*, ε_t and U_C) of spring wheat gluten

Źródła wariancji Variance sources	<i>GLS</i>	<i>WN</i>	<i>WZ</i>	<i>CZ</i>	<i>IG</i>	<i>WEG</i>	ε_t	U_C
Czynniki: Factors:								
Odmiany Cultivars (A)	277,2 **	218,9 **	6,6 *	325,9 **	1463,9 **	68,6 **	792,9 **	48,4 **
Miejscowości Localities (B)	2982,7 **	36,6 **	43,5 **	60,4 **	453,3 **	87,2 **	296,8 **	15,1 **
Nawożenie Fertilization (C)	2755,9 **	3,8 –	48,6 **	31,2 **	107,1 **	63,7 **	87,4 **	5,0 *
Interakcje: Interactions:								
A x B	22,5 **	66,8 **	71,9 **	8,2 **	105,5 **	20,9 **	42,0 **	3,3 *
A x C	3,3 –	38,0 **	39,2 **	1,7 –	46,6 **	6,2 *	49,7 **	2,0 –
B x C	419,6 **	24,0 **	63,1 **	8,9 **	21,4 **	31,1 **	8,3 **	3,1 *
A x B x C	26,0 **	12,0 **	6,7 **	17,3 **	17,3 **	9,1 **	13,0 **	4,2 *

** – $P \leq 0,001$, * – $P \leq 0,05$, – – nieistotne – not significant.

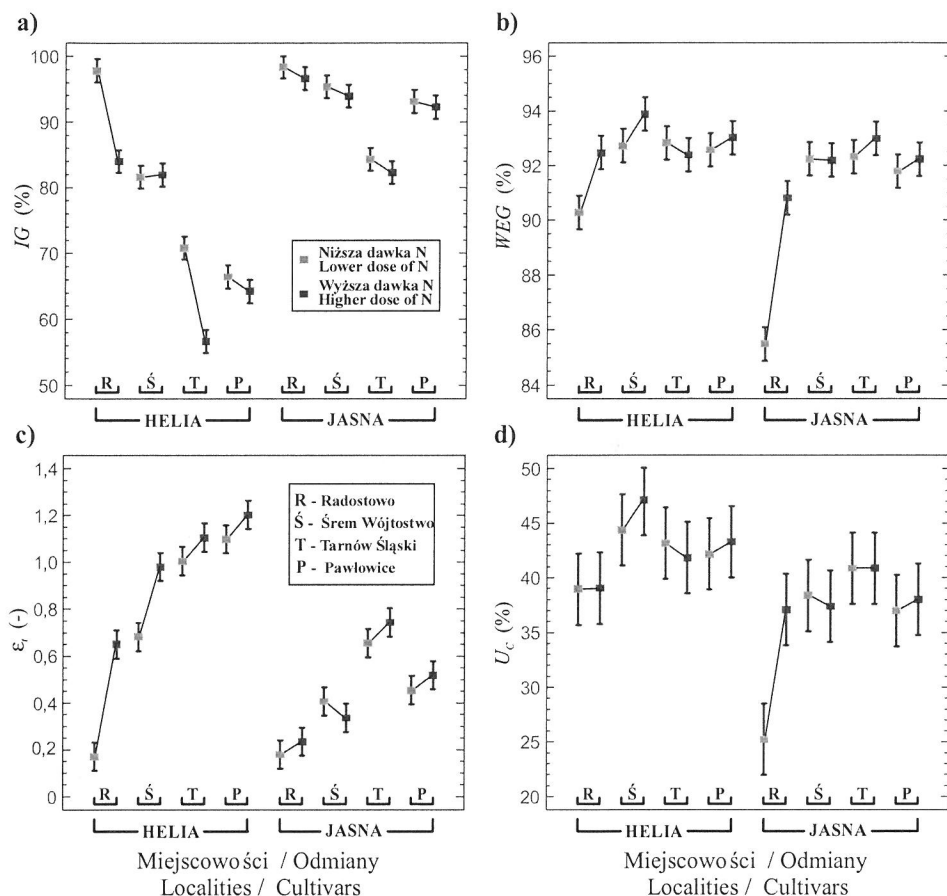
W porównaniu z pszenicą ozimą, wartości ε_t kształtowały się w znacznie szerszym przedziale, od 0,17 do 1,20 (rys. 13c). Stwierdzono podobne uporządkowanie badanych czynników pod względem siły ich oddziaływania na wariancję tego wskaźnika (tab. 3). Odmiany oddziaływały najmocniej, ich średnie ε_t wyniosły 0,44 (Jasna) i 0,86 (Helia). Pszenica uprawiana w miejscowości Radostowo, w porównaniu z pozostałymi miejscowościami, charakteryzowała się wyjątkowo mało rozciągliwym glutenem. Najslabiej na wariancję ε_t oddziaływały poziomy nawożenia azotowego. Wzrost nawożenia powodował przyrost ε_t średnio o 0,14. Odmiana Helia odznaczała się znacznie wyższymi przyrostami rozciągliwości glutenu w reakcji na zwiększone nawożenie.



Rys. 12. Wpływ poziomów nawożenia azotowego, miejscowości i odmian pszenicy jarej na ilość glutenu suchego – *GLS* (a), zawartość wody niezwiązanej – *WN* (b), zawartość wody związanej – *WZ* (c) i całkowitą zawartość wody w glutenie – *CZ* (d)

Fig. 12. Effects of nitrogen fertilization levels, localities and cultivars of spring wheat on dry gluten content – *GLS* (a), non-absorbed water content – *WN* (b), absorbed water content – *WZ* (c), and total water content in gluten – *CZ* (d)

Wartości U_C podlegały wyraźnie większym zmianom pod wpływem odmian i miejscowości uprawy niż poziomów nawożenia (rys. 13d). Odmiana Helia odznaczała się istotnie wyższym udziałem lepkiego płynięcia (42,5%) w porównaniu z odmianą Jasna (36,8%). Średnia wartość U_C dla miejscowości Radostowo (35,1%) była istotnie niższa od tych dla pozostałych miejscowości, o co najmniej 5%.



Rys. 13. Wpływ poziomów nawożenia azotowego, miejscowości i odmian pszenicy jarej na indeks glutenu – IG (a), wskaźnik elastyczności glutenu – WEG (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ε_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_c (d)

Fig. 13. Effect of nitrogen fertilization levels, localities and cultivars of spring wheat on gluten index – IG (a), gluten elasticity index – WEG (b), total strain of gluten cylinder – ε_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_c (d)

Otrzymane wyniki badań wskazują na dominujący wpływ genetycznych uwarunkowań na kształtowanie się zmienności ocenianych cech glutenu. Odmiany pszenicy Korweta i Jasna, w porównaniu z dwiema pozostałymi, Kobra i Helia, miały gluten o większej wodochłonności, wskazują na to wyższe zawartości wody związanej (WZ), a jego struktura była bardziej zwarta, przez co świeżo wymyty gluten magazynował znacznie mniejsze ilości wody niezwiązanej (WN). Odmiany Korweta i Jasna ponadto odznaczały się glutenem mechanicznie wytrzymalszym,

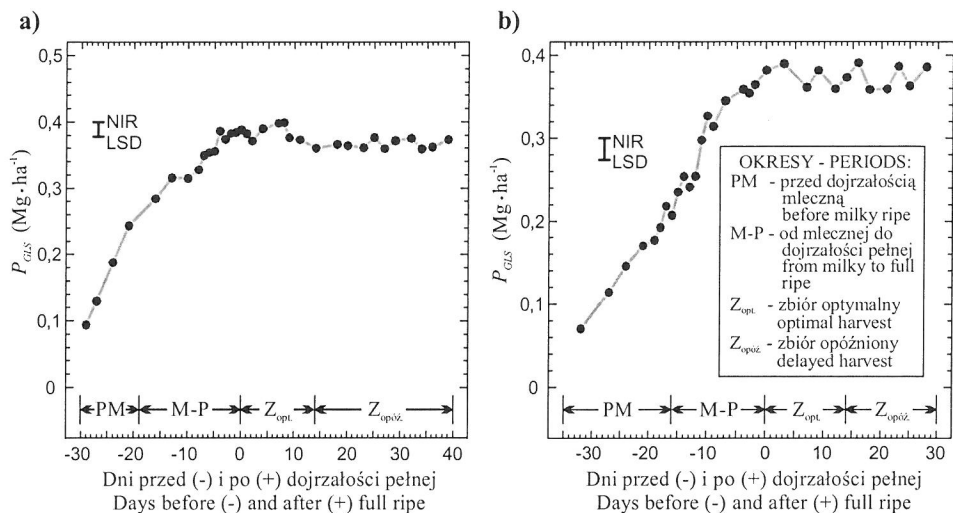
o czym świadczy wyższy indeks glutenu (*IG*) i niewielkie odkształcenie walca glutenu w teście pelzania (ε_t). Przytoczone fakty wskazują, że Korweta i Jasna są odmianami lepszymi pod względem jakości glutenu od odmian Kobra i Helia. Różnice warunkowane genetycznie przejawiały się również w tym, że odmiany lepsze jakościowo charakteryzowały się mniejszą zmiennością przytoczonych cech glutenu pod wpływem badanych czynników środowiskowych.

5.1.2. Wpływ stadium dojrzałości ziarna pszenicy i terminu zbioru

Badanie zmian ilości wymywanego glutenu (rys. 14 i 15), jak również jego właściwości (rys. 16-20), rozpoczęto na ziarnie pochodzącym z kłosów zbieranych we wczesnych etapach formowania ziarniaka, począwszy od 29 lub 32 dnia przed dojrzałością pełną ziarna pszenicy, odpowiednio u odmian Roma i Igna. Gluten mokry odpowiadający tym etapom charakteryzował się ciągliwą, lejącą się konsystencją i dlatego bardzo łatwo przechodził przez sito w komorze wymywającej, zaś jego barwa była jasno ceglasta. Około 24 dnia przed dojrzałością pełną, u obu odmian, barwa ta zmieniała się w kremową, charakterystyczną dla glutenu wymywanego z ziarna dojrzałego.

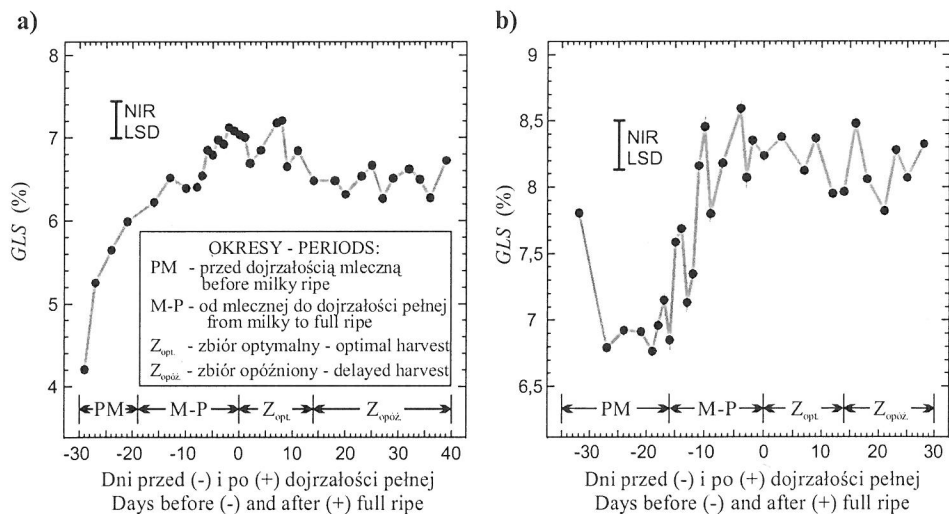
Jak pokazano na rysunku 14a i b, plon glutenu suchego w przeliczeniu na 1 ha z każdym kolejnym dniem wzrostu i dojrzewania pszenicy zwiększał się aż do momentu zakończenia dojrzewania. W analogicznym okresie wzrastała również ilość wymywanego glutenu z ziarna (rys. 15a i b). U odmiany Roma ilość glutenu suchego (*GLS*) wzrastała z 4,2 do 7,1%. Inny przebieg zmian *GLS* odnotowano dla odmiany Igna. Ilość glutenu suchego początkowo obniżała się z 7,8 do 6,8%, a przez następne 10 dni pozostawała na tym samym poziomie. Z początkiem fazy dojrzałości młecznej rozpoczął się wzrost *GLS*, który trwał do momentu osiągnięcia przez ziarno dojrzałości pełnej. Po zakończeniu dojrzewania, w miarę opóźniania zbioru pszenicy następował powolny spadek *GLS*, wyraźniej zarysowany u odmiany Roma (o około 0,5%).

W wyniku dojrzewania i opóźniania zbioru pszenicy zmieniała się również wodochłonność glutenu (rys. 16a i b). W okresie przed dojrzałością młeczną, zawartość wody niezwiązanej (*WN*) wraz z postępującym rozwojem ziarniaka szybko spadała z 40,6 do 6,3% i z 28,7 do 2,6%, odpowiednio u odmian Roma i Igna. W tym samym czasie zawartość wody związanej (*WZ*) równie szybko rosła, odpowiednio z około 40 do 62% i z 48 do 64% (rys. 17a i b). W przypadku odmiany Igna, wskaźnik *WN* nie podlegał dalszym istotnym zmianom w następstwie dojrzewania pszenicy i opóźniania terminu jej zbioru. Jedynie wystąpił nieznaczny wzrost *WZ*, o około 1%, w okresie dojrzewania, a opóźnianie terminu zbioru nie wywierało już żadnego wpływu na tę cechę glutenu.



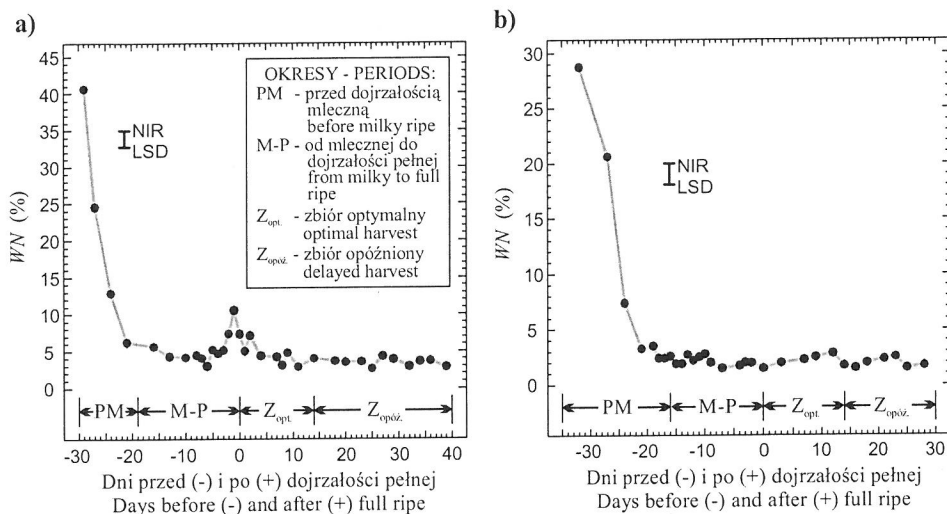
Rys. 14. Wpływ stadium dojrzałości i terminu zbioru pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na plon glutenu suchego – P_{GLS}

Fig. 14. Effect of ripeness stage and harvest date of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b) on yield of dry gluten – P_{GLS}



Rys. 15. Wpływ stadium dojrzałości i terminu zbioru pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na ilość glutenu suchego – GLS

Fig. 15. Effect of ripeness stage and harvest date of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b) on dry gluten content – GLS



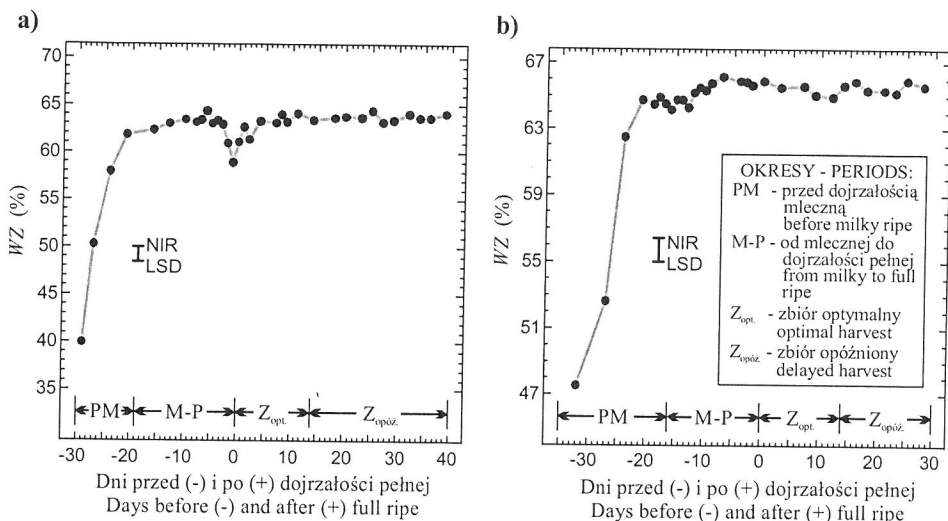
Rys. 16. Wpływ stadium dojrzałości i terminu zbioru pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na zawartość wody niezwiązanej w glutenie – WN

Fig. 16. Effect of ripeness stage and harvest date of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b) on the non-absorbed water content in gluten – WN

U odmiany Roma, kilka dni przed dojrzałością pełną zawartość wody niezwiązanej zaczęła najpierw rosnąć, osiągając wartość 10,6%, a po uzyskaniu przez ziarno dojrzałości pełnej rozpoczął się jej spadek (rys. 16a). Odwrotnym zmianom w analizowanym okresie podlegała zawartość wody związanej (rys. 17a). Zmiany WN i WZ zostały zahamowane dopiero w okresie zbioru opóźnionego, a ich wartości ustabilizowały się odpowiednio na poziomach około 3,5 i 64%.

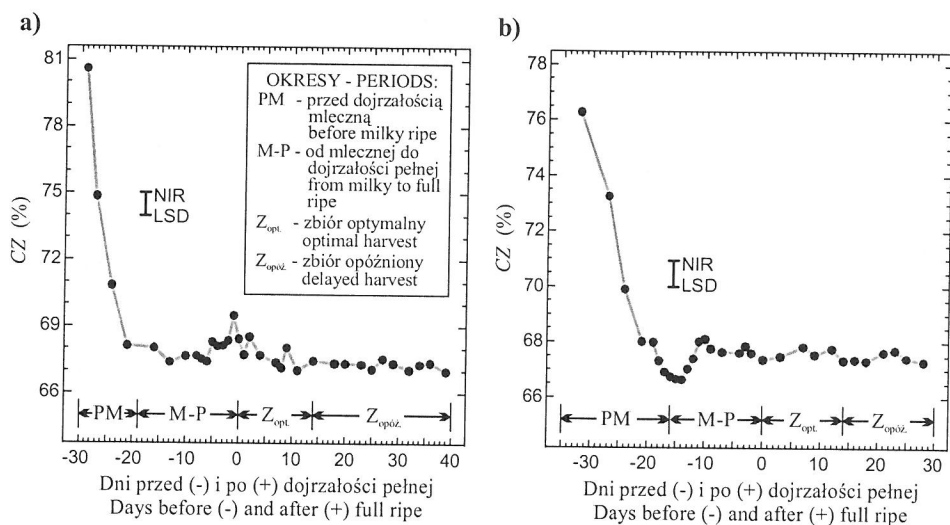
U obu badanych odmian, całkowita zawartość wody w wymywanym glutenie (rys. 18a i b) w okresie wzrostu i dojrzewania ziarniaka pszenicy zmieniała się w podobny sposób jak wartości WN. W okresie zbioru opóźnionego wartości CZ dla obu odmian ustabilizowały się na zbliżonym poziomie (około 67%).

Przebieg zmian właściwości reologicznych glutenu w zależności od stadium dojrzałości ziarna i terminu zbioru pszenicy przedstawiono na rysunkach 19 i 20, odpowiednio dla odmian Roma i Igna. W okresie przed dojrzałością mleczną, z każdym dniem wzrostu ziarniaka, następowało szybkie wzmacnianie i uelastycznianie glutenu (wzrost IG i WEG), kosztem stopniowej utraty rozciągliwości (spadek ε_t i U_C). W okresie od dojrzałości mleczonej do pełnej następowało odwrócenie tendencji zmian większości wskaźników reologicznych, z wyjątkiem WEG , który wskazywał na dalszy wzrost elastyczności glutenu. W tym okresie gluten stawał się bardziej rozciągliwy i płynny (wzrost ε_t i U_C), tracąc równocześnie zwięzłość (IG). Spadki indeksu glutenu były zauważalne szczególnie u odmiany Roma.



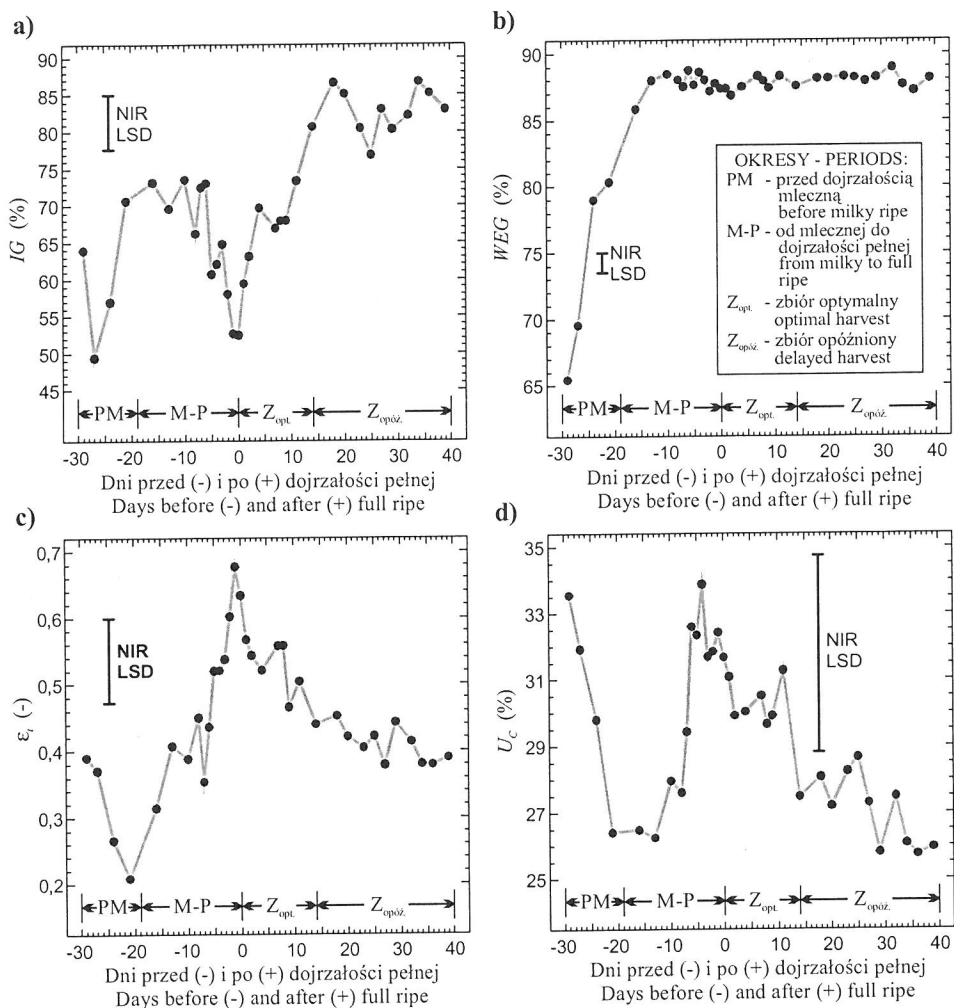
Rys. 17. Wpływ stadium dojrzałości i terminu zbioru pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na zawartość wody związanej w glutenie – WZ

Fig. 17. Effect of ripeness stage and harvest date of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b) on the absorbed water content in gluten – WZ



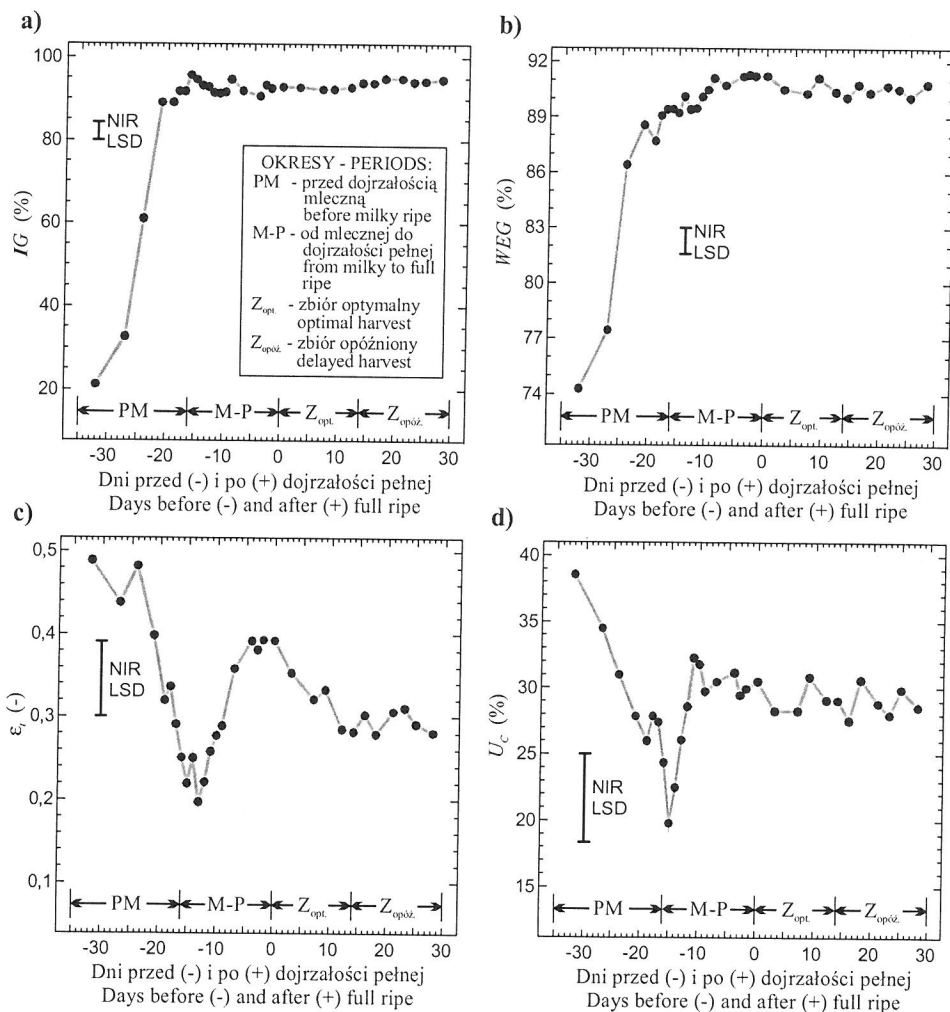
Rys. 18. Wpływ stadium dojrzałości i terminu zbioru pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na całkowitą zawartość wody w glutenie – CZ

Fig. 18. Effect of ripeness stage and harvest date of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b) on the total water content in gluten – CZ



Rys. 19. Wpływ stadium dojrzałości i terminu zbioru pszenicy odmiany Roma na indeks glutenu – IG (a), wskaźnik elastyczności glutenu – WEG (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ϵ_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_C (d)

Fig. 19. Effect of ripeness stage and harvest date of wheat of cultivar Roma on gluten index – IG (a), gluten elasticity index – WEG (b), total strain of gluten cylinder – ϵ_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_C (d)



Rys. 20. Wpływ stadium dojrzałości i terminu zbioru pszenicy odmiany Igna na indeks glutenu – IG (a), wskaźnik elastyczności glutenu – WEG (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ε_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_c (d)

Fig. 20. Effect of ripeness stage and harvest date of wheat of cultivar Igna on gluten index – IG (a), gluten elasticity index – WEG (b), total strain of gluten cylinder – ε_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_c (d)

Z chwilą zakończenia dojrzwania u odmiany Roma rozpoczął się ponowny stopniowy wzrost IG oraz spadek ε_t i U_c w miarę opóźniania zbioru pszenicy. Wskaźnik WEG w porównaniu z pozostałymi podlegał wyraźnie mniejszym

zmianom w tym okresie. Spowolnienie tempa zmian wszystkich badanych cech reologicznych nastąpiło w okresie zbioru opóźnionego.

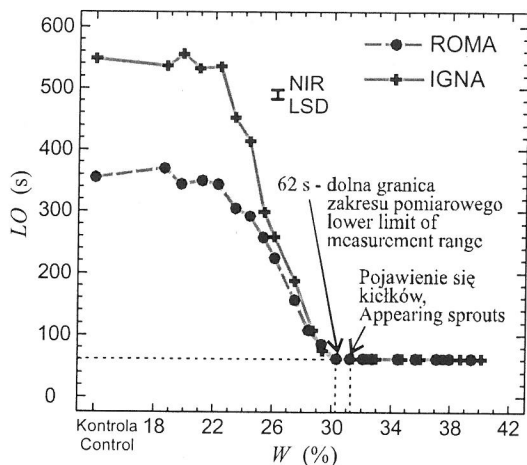
U odmiany Igna w okresie po dojrzałości pełnej, wartości większości wskaźników reologicznych nie podlegały istotnym zmianom. Opóźnianie terminu zbioru wpływało głównie na zmniejszenie rozciągliwości glutenu, mierzone spadkiem ε_t .

U obu badanych odmian, w trakcie wzrostu i dojrzewania ziarna pszenicy, łatwo można zauważyć występowanie odwrotnej zależności pomiędzy wytrzymałością mechaniczną glutenu a zawartością w nim wody niezwiązanej (WN). Tak więc w okresach, w których gluten tracił zdolność magazynowania większych ilości wody niezwiązanej na skutek postępującej poprawy zawartości jego struktury, równocześnie stawał się bardziej wytrzymały mechanicznie. Potwierdza to istotne znaczenie pomiaru zawartości wody niezwiązanej (WN) w przewidywaniu stopnia rozluźnienia struktury wymywanego glutenu. Odwrotną rolę w kształtowaniu właściwości reologicznych wymytego glutenu odgrywała woda związana. W okresie formowania i dojrzewania ziarniaka, gluten podlegając zmianom, które poprawiały jego zdolności sorpcyjne (wzrost WZ), równocześnie stawał się mocniejszy mechanicznie.

Na podkreślenie również zasługuje zaobserwowane zjawisko odmiennego kształtowania się rozciągliwości glutenu (ε_t i U_C) w okresach przed i od dojrzałości mleczej. W okresie przed dojrzałością mleczną, zmiany związane ze wzrostem ziarniaka przejawiały się w stopniowej utracie rozciągliwości glutenu, z kolei zmiany zachodzące z chwilą rozpoczęcia się jego dojrzewania czyniły ten gluten bardziej rozciągliwym. Występowanie ostrego rozgraniczenia między tymi fazami rozwojowymi stwarza możliwość wykorzystywania pomiarów wskaźników ε_t i U_C do bardziej precyzyjnego określania momentu rozpoczynania się procesu dojrzewania ziarna pszenicy.

5.1.3. Wpływ stopnia porastania

W zastosowanym teście porastania, nawilżanie ziarna pszenicy do wilgotności 22,4% nie inicjowało żadnych istotnych zmian aktywności enzymu α -amylazy (rys. 21). Pod wpływem intensywniejszego nawilżania, w uwodnionych tkankach ziarniaków następowało zapoczątkowanie procesu porastania w postaci wzrostu aktywności α -amylazy (spadku liczby opadania). Przy wilgotności ziarna około 30% aktywność tego enzymu była na tyle wysoka, że liczba opadania spadła do wartości granicznej – 62 s. Pierwsze objawy kiełkowania ziarniaków uwidoczniły się dopiero, gdy ich wilgotność przekroczyła 31%, a dalsze jej zwiększanie intensyfikowało wzrost kiełków.



Rys. 21. Wpływ wilgotności ziarna pszenicy odmian Roma i Igna poddawanego porastaniu – W na liczbę opadania – LO

Fig. 21. Effect of moisture content of wheat grain of cultivars Roma and Igna subjected to sprouting – W on falling number – LO

wały na niezmiennych, względem kontroli, poziomach, które wynosiły odpowiednio 4,1 i 1,2%. Porastanie przy intensywniejszym nawilżaniu przyczyniało się do istotnego wzrostu WN , której maksymalne wartości u badanych odmian wyniosły odpowiednio 13,9 i 9,6%.

Inny charakter miał przebieg zmian zawartości wody związanej w zależności od intensywności porastania ziarna pszenicy (rys. 22c). Początkowo, ze wzrostem wilgotności porastanego ziarna, zdolności glutenu do sorpcyjnego wiązania wody nie zmieniały się (Roma) bądź ulegały łagodnej poprawie (Igna). Następnie, w wyniku intensyfikacji porastania, wystąpiło stopniowe pogarszanie się właściwości sorpcyjnych glutenu. Zawartości wody związanej u odmian Roma i Igna obniżyły się odpowiednio z 63,7 i 66,8% do 55,1% i 59%. Pierwsze istotne spadki wartości WZ , odnoszone do kontroli, wystąpiły, kiedy wilgotność ziarna badanych odmian przekroczyła odpowiednio 28,4 i 34,7%.

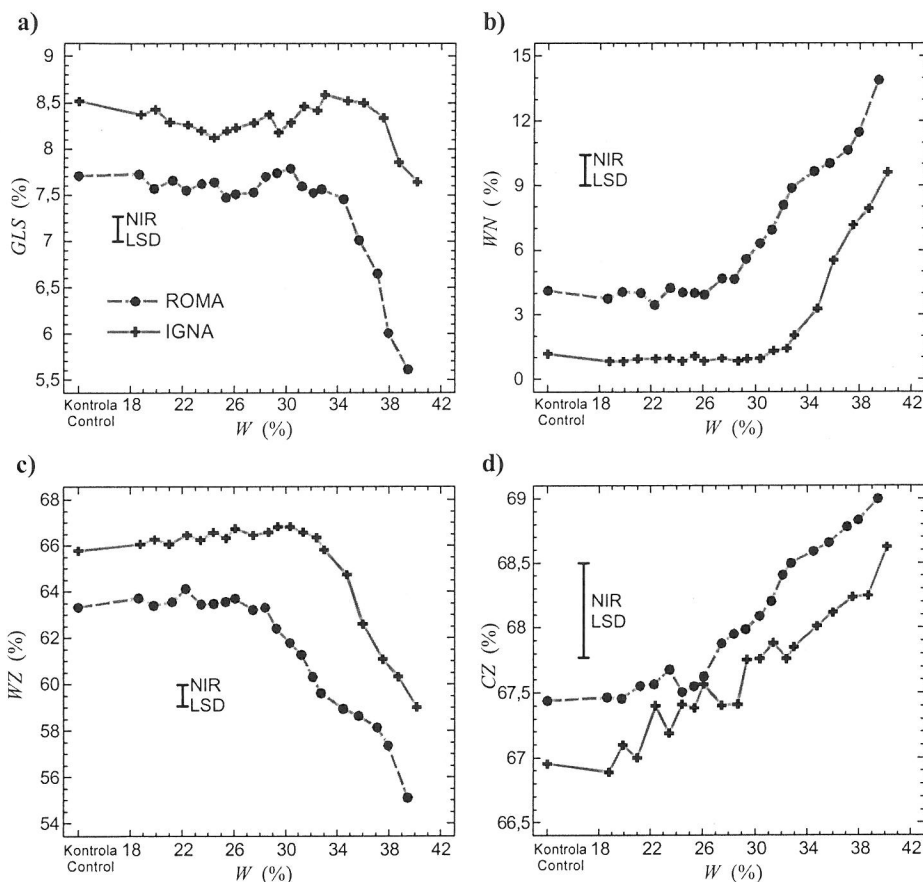
W porównaniu z WN i WZ , porastanie wpływało znacznie słabiej na różnicowanie się całkowitej zawartości wody w wymywanym glutenie (rys. 22d). Odotowano łagodny wzrost CZ , o około 1,5% dla obu badanych odmian, w miarę zwiększania wilgotności porastanego ziarna.

Właściwości reologiczne glutenu (rys. 23), podobnie jak jego wodochłonność, nie podlegały istotnym zmianom przy stosowaniu mniej intensywnego nawilżania ziarna pszenicy. Pierwsze oznaki istotnego pogorszenia się właściwości reologicznych glutenu

W wyniku procesu porastania, prowadzonego przy niższych wilgotnościach ziarna, ilość wymywanego glutenu (rys. 22a) najpierw obniżała się łagodnie, a następnie rosła. Maksymalne wartości GLS wystąpiły u odmian Roma i Igna przy różnych wilgotnościach porastanego ziarna, wynoszących odpowiednio 30 i 33%. Prowadzenie porastania, przy dalszym zwiększaniu wilgotności ziarna, powodowało już stopniowe obniżanie GLS dla badanych odmian, odpowiednio z 7,8 i 8,6% do 5,6 i 7,6%.

Zawartości wody niezwiązanej w wymywanym glutenie (rys. 22b), przy nawilżaniu ziarna aż do wilgotności 28,4 i 33%, odpowiednio u odmian Roma i Igna, pozosta-

u odmian Roma i Igna wystąpiły przy wilgotności ziarna odpowiednio 28,4 i 32,4%. Przejawiały się one w obniżeniu IG i WEG oraz we wzroście ε_r . Większa rozciągliwość walca glutenu wynikała przede wszystkim z utraty sprężystości (wzrost U_C) na skutek hydrolitycznego upłynniania białek glutenowych w procesie porastania.

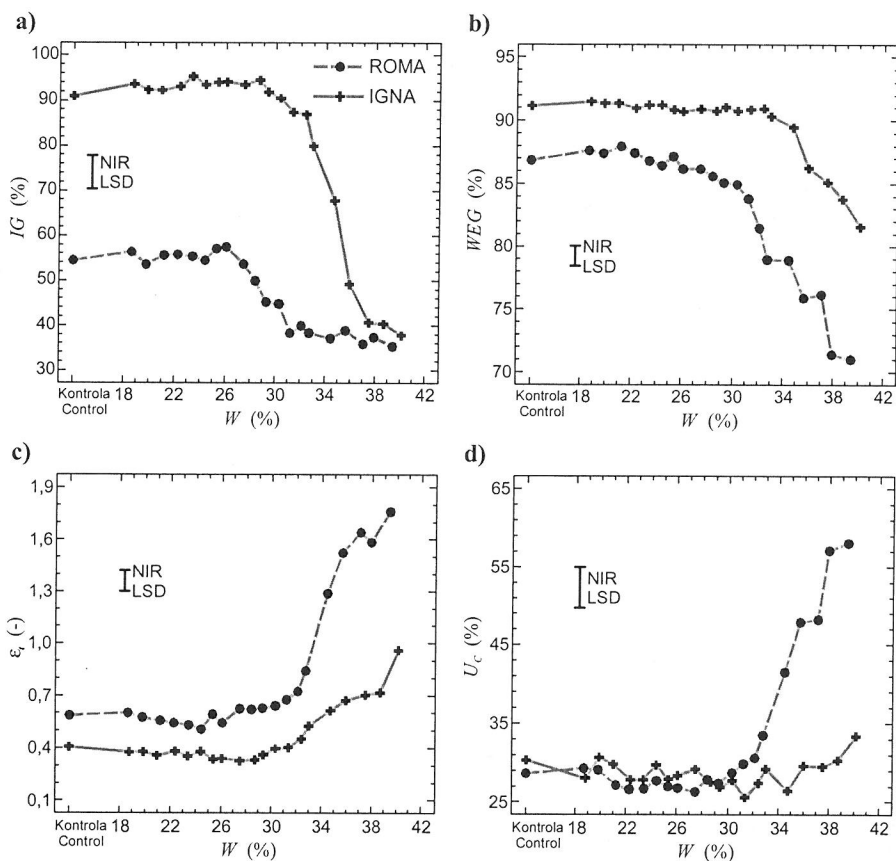


Rys. 22. Wpływ wilgotności ziarna pszenicy odmian Roma i Igna poddawanego porastaniu – W na ilość glutenu suchego – GLS (a), zawartość wody niezwiązanej – WN (a), zawartość wody związanej – WZ (c) i całkowitą zawartość wody w glutenie – CZ (d)

Fig. 22. Effect of moisture content of wheat grain of cultivars Roma and Igna subjected to sprouting – W on dry gluten content – GLS (a), non-absorbed water content – WN (b), absorbed water content – WZ (c), and total water content in gluten – CZ (d)

Należy zauważyć, że zmiany właściwości reologicznych glutenu przebiegały równolegle z opisanymi wcześniej zmianami jego wydajności i wodochłonności. Osłabianiu wytrzymałości mechanicznej glutenu, w wyniku porastania ziarna pszenicy,

towarzyszyły zmniejszająca się ilość wymywanego glutenu (*GLS*) i pogarszająca się jego zdolność do absorpcji wody (*WZ*) oraz nasilająca się retencja wody niezwiązanej w wymywanym glutenie (*WN*). Wskazuje to, że przebiegająca podczas porostania hydroliza białek glutenowych skutkuje nie tylko mniejszą ich wodochłonnością, ale również formowaniem się luźniejszej struktury glutenu, która odznacza się zarazem mniej korzystnymi właściwościami reologicznymi.



Rys. 23. Wpływ wilgotności ziarna – *W* pszenicy odmian Roma i Igna w teście porastania na indeks glutenu – *IG* (a), wskaźnik elastyczności glutenu – *WEG* (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ϵ_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_c (d).

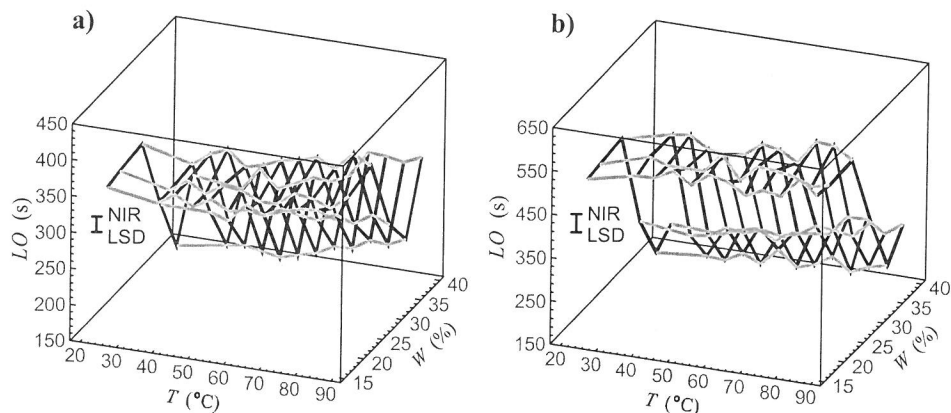
Fig. 23. Effect of grain moisture content – *W* of wheat cultivars Roma and Igna in the sprouting test on gluten index – *IG* (a), gluten elasticity index – *WEG* (b), total strain of gluten cylinder – ϵ_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_c (d).

Jednakże, można wyróżnić zakres wilgotności ziarna, między 23,4 a 31,4%, który z jednej strony warunkował już zapoczątkowanie procesu porastania, świadczy o tym liczba opadania poniżej 150 s, ale z drugiej strony porastanie to nie wpływało jeszcze na obniżenie ilości wymywanego glutenu i jego jakości. W przypadku odmiany Igna porastanie przy tym zakresie aktywności α -amylazy sprawiało, że gluten wyróżniał się maksymalną wydajnością (*GLS*) i wodochłonnością (*WZ*), zachowując równocześnie korzystne właściwości reologiczne.

5.1.4. Wpływ temperatury suszenia ziarna i jego wilgotności

Proces suszenia prowadzono na ziarnie, które wcześniej poddawano zabiegowi nawilżania w celu szerokiego zróżnicowania jego wilgotności. Jednym z możliwych skutków nawilżania ziarna do wilgotności wyższej niż 22,4%, jak wykazano w rozdziale 5.1.3, może być podwyższona aktywność enzymów amylolitycznych. Z tych względów, na próbkach nawilżanego ziarna po ich wysuszeniu wykonano również oznaczanie liczby opadania (rys. 24). Uzyskane wyniki wskazują, że istotne spadki liczby opadania wystąpiły dopiero przy nawilżaniu ziarna do wilgotności w zakresie od 29,2 do 37,5%, zaś jej minimalne wartości kształtowały się znacznie powyżej wartości granicznej (150 s) przyjmowanej dla ziarna porośniętego. Należy zauważyć, że ziarno nawilżane do wilgotności 37,5%, w porównaniu z tym nawilżonym do wilgotności 33,6%, odznaczało się znacznie mniejszą aktywnością α -amylazy. Zastosowanie najwyższej dawki wody do nawilżania spowodowało prawdopodobnie ograniczenie dostępu powietrza niezbędnego do oddychania tkanek ziarniaka i co mogło być jedną z przyczyn hamowania rozbudzonej aktywności enzymów amylolitycznych. Wzrost temperatury podczas suszenia ziarna wpływał na dalsze nieznaczne obniżanie aktywności tych enzymów.

Dla ułatwienia charakterystyki oddziaływania temperatury suszenia i wilgotności ziarna na kształtowanie się badanych właściwości glutenu wyznaczono tzw. temperaturę dopuszczalną (tab. 4). Suszenie ziarna przy tej temperaturze nie powodowało jeszcze istotnych zmian we właściwościach glutenu, w odniesieniu do skutków łagodnego suszenia (26°C). Wartość temperatury dopuszczalnej była zależna najmocniej od wilgotności suszonego ziarna, a znacznie słabiej – od odmiany pszenicy i ocenianej cechy glutenu. Jak wynika z tabeli 4, suszenie ziarna o najniższej wilgotności (15%), pomimo stosowania temperatur z szerokiego zakresu (od 26 do 90°C), objawiało brakiem istotnego zróżnicowania większości badanych cech glutenu. Potwierdza to znaną prawidłowość, że skutki oddziaływania temperatury na jakość ziarna maleją w miarę jak obniża się jego wilgotność.



Rys. 24. Wpływ temperatury suszenia – T i wilgotności ziarna – W pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na liczbę opadania – LO

Fig. 24. Effect of drying temperature – T and grain moisture content – W of wheat cultivars Roma (a) and Igna (b) on falling number – LO

Przy suszeniu ziarna pszenicy w zakresie temperatur dopuszczalnych, wraz ze wzrostem wilgotności ziarna z 24,1 do 37,5 % zwiększała się ilość wymywanego glutenu (rys. 25). Przy czym, wartości GLS dla ziarna nawilżanego do niższych wilgotności (15,0 i 18,3%) kształtowały się na poziomach nieco wyższych niż dla ziarna nawilżanego do wilgotności 24,1%. Pierwsze istotne zmiany w wydajności glutenu pod wpływem suszenia ziarna o wilgotności 37,5% wystąpiły już gdy temperatura przekroczyła 50°C (Igna). Przy suszeniu ziarna o niższej wilgotności, istotne spadki w ilości wymywanego glutenu pojawiały się przy oddziaływaniu znacznie wyższych temperatur. Stąd odnotowane spadki wydajności glutenu, w wyniku stosowania maksymalnej temperatury (90°C), były tym większe, im wyższa była wilgotność suszonego ziarna. Odmiana Igna, w porównaniu z odmianą Roma, charakteryzowała się glutenem bardziej wrażliwym na tego rodzaju negatywne skutki.

Przebieg zmian zawartości wody niezwiązanej w wymywanym glutenie pod wpływem zastosowanego nawilżania i suszenia ziarna zależał przede wszystkim od odmiany pszenicy (rys. 26). W przypadku odmiany Roma (rys. 26a), zabieg nawilżania ziarna i suszenia go w temperaturze dopuszczalnej, przyczyniał się do bardziej wyraźnego przyrostu wartości WN , z około 3 do 9%. W miarę podwyższania temperatury, wielkość retencji wody niezwiązanej w glutenie zaczynała stopniowo zmniejszać się. Przy temperaturze 85°C rejestrowano minimalne wartości WN , które wahały się od 1,2 do 2,1%, i były one proporcjonalne do wilgotności suszonego ziarna.

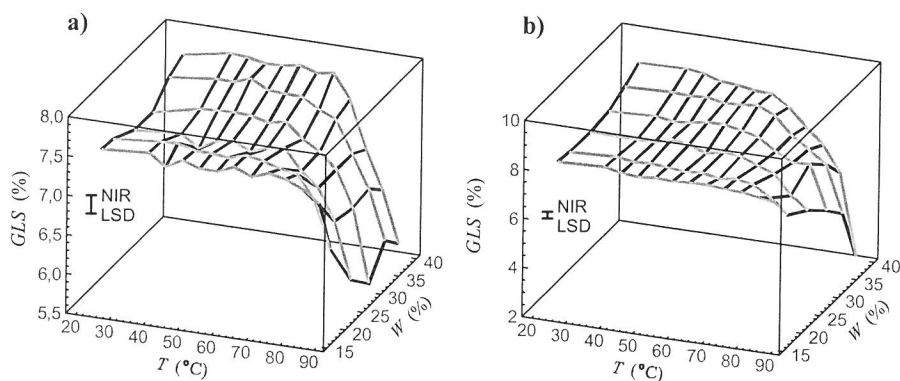
Tabela 4. Wartości dopuszczalnej temperatury suszenia w zależności od ocenianego wskaźnika jakościowego glutenu, odmiany pszenicy i wilgotności ziarna (°C)

Table 4. Values of the allowable drying temperature in relation to evaluated qualitative index, wheat cultivars and grain moisture content (°C)

Wilgotność ziarna Grain moisture content (%)	Wskaźniki jakościowe glutenu – Qualitative indices of gluten							
	<i>GLS</i>	<i>WN</i>	<i>WZ</i>	<i>CZ</i>	<i>IG</i>	<i>WEG</i>	ε_t	U_c
Odmiana – Cultivar ROMA								
15,0	85	– ^a	–	–	85	–	80	85
18,3	80	80	85	–	80	–	75	85
24,1	75	75	80	–	70	–	80	75
29,2	75	70	75	80	65	85	75	75
33,6	75	50	50	65	60	70	75	70
37,5	70	45	50	65	55	65	60	65
Odmiana – Cultivar IGNA								
15,0	85	–	–	–	–	–	–	80
18,3	80	–	80	80	70	–	–	80
24,1	70	80	75	80	70	80	–	70
29,2	70	80	70	75	70	75	70	75
33,6	70	80	70	65	60	70	60	75
37,5	50	55	70	70	45	75	60	65

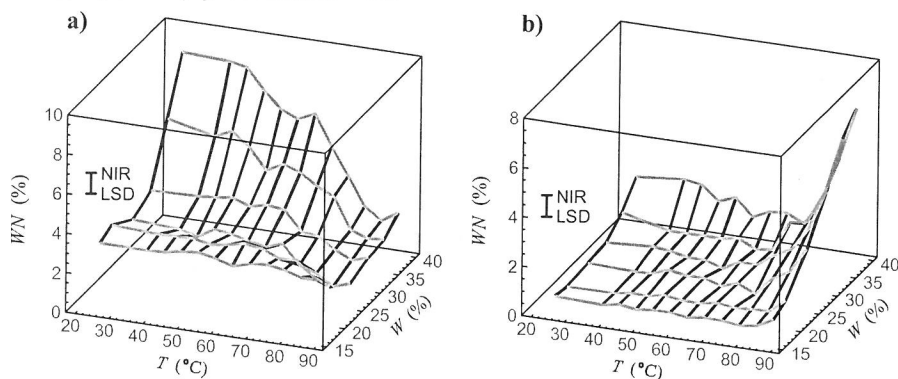
^a – brak istotnych różnic – lack of significant differences.

W przypadku odmiany Igna (rys. 26b), zabieg nawilżania w szerokim przedziale wilgotności ziarna (od 15 do 33,6%), przy równoczesnym stosowaniu dopuszczalnej temperatury suszenia, nie wpływał istotnie na różnicowanie wartości *WN*. Dopiero nawilżanie ziarna do wilgotności 37,5% spowodowało wyraźny wzrost *WN*, z około 1 do 2,5%. Z kolei wzrost temperatury suszenia przyczyniał się do łagodnego obniżania się *WN*. Z chwilą, gdy temperatura przekroczyła 70-75°C rozpoczął się szybki wzrost retencji wody niezwiązanej w wymywanym glutenie. Maksymalne wartości *WN* kształtowały się od 1,2 do 6,5% i były proporcjonalne do wilgotności suszonego ziarna. Ten znaczny wzrost *WN* można powiązać z faktem, że gluten pochodzący z ziarna suszonego w temperaturze 80-90°C odznaczał się brakiem spójności, a próbka wymytego glutenu składała się z oddzielnych fragmentów (grudek) nasączonych wodą łatwo usuwalną podczas wirowania.



Rys. 25. Wpływ temperatury suszenia – T i wilgotności ziarna – W pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na ilość glutenu suchego – GLS

Fig. 25. Effect of drying temperature – T and grain moisture content – W of wheat cultivars Roma (a) and Igna (b) on dry gluten content – GLS



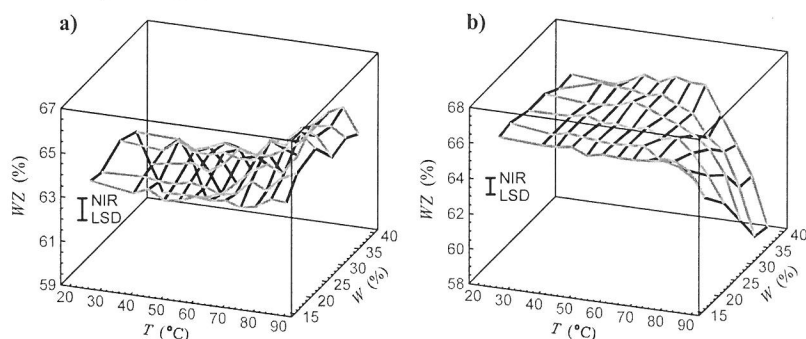
Rys. 26. Wpływ temperatury suszenia – T i wilgotności ziarna – W pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na zawartość wody niezwiązanej w glutenie – WN

Fig. 26. Effect of drying temperature – T and grain moisture content – W of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b) on non-absorbed water content in gluten – WN

W porównaniu z WN , zawartość wody związanej w wymywanym glutenie, pod wpływem nawilżania i suszenia ziarna, podlegała odwrotnym zmianom (rys. 27). Nawilżanie ziarna pszenicy odmiany Roma (rys. 27a) do wilgotności w zakresie od 33,6 do 37,5%, w odniesieniu do pozostałych poziomów nawilżania, przyczyniało się do istotnego pogarszania właściwości sorpcyjnych glutenu. W efekcie wartość WZ obniżała z około 64 do 60%. Z kolei wzrost temperatury suszenia, aż do 85 $^{\circ}\text{C}$, wpływał na poprawę omawianych właściwości. Maksymalne zawartości wody związanej wynosiły od 64,1 do 65,7%, a wielkość przyrostu WZ była z reguły tym większa im wyższa była wilgotność suszonego ziarna.

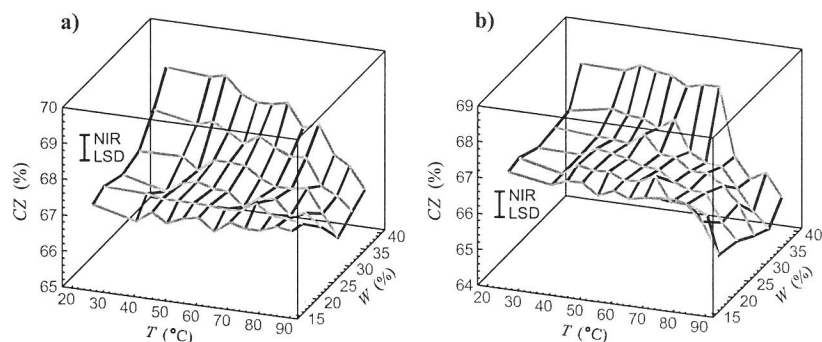
W przypadku odmiany Igna (rys. 27b), zastosowanie zabiegu nawilżania ziarna i suszenia go w zakresie temperatur dopuszczalnych nie wpływało istotnie na różnicowanie się zawartości wody związanej w wymywanym glutenie. Jednakże stosowanie wyższych temperatur suszenia ziarna (powyżej 70°C) przyczyniało się do pogarszania właściwości sorpcyjnych glutenu, tym mocniej im bardziej wilgotne ziarno poddawano suszeniu. Minimalne wartości WZ mieściły się w przedziale od 58,7 do 65,5%.

Całkowita zawartość wody w wymywanym glutenie (rys. 28), w wyniku stosowanego nawilżania i suszenia ziarna, zmieniała się w podobny sposób u obu badanych odmian. CZ wzrastała w wyniku intensywniejszego nawilżania ziarna, a obniżała się pod wpływem wzrostu temperatury suszenia.



Rys. 27. Wpływ temperatury suszenia – T i wilgotności ziarna – W pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na zawartość wody związanej w glutenie – WZ

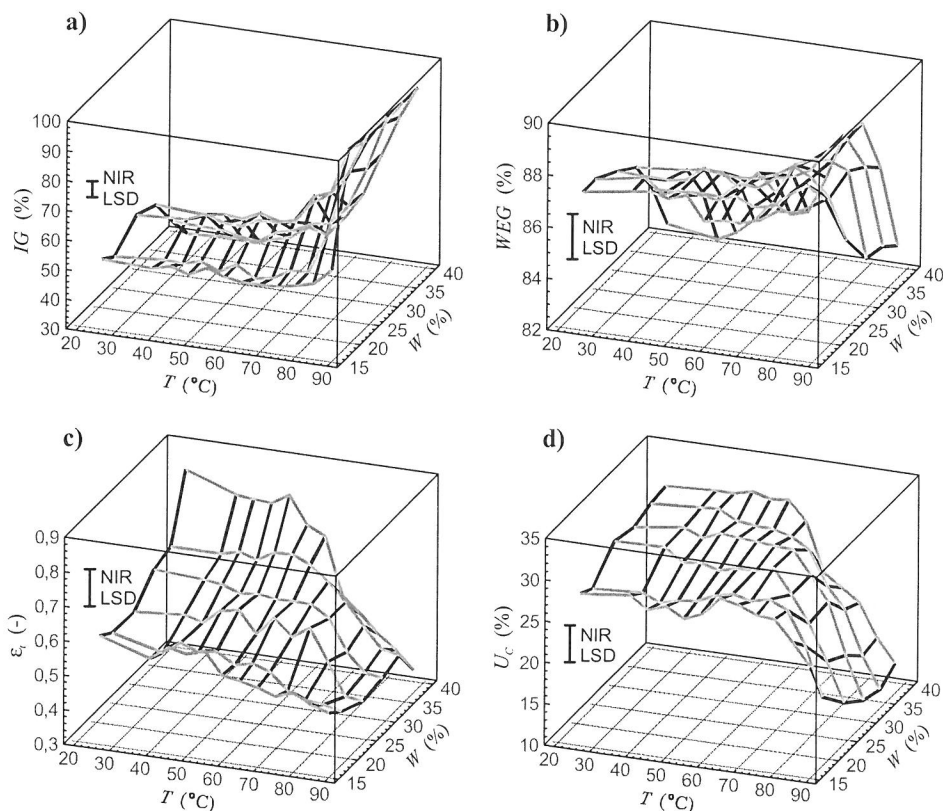
Fig. 27. Effect of drying temperature – T and grain moisture content – W of wheat of cultivars Roma (a) and Igna (b) on absorbed water content in gluten – WZ



Rys. 28. Wpływ temperatury suszenia – T i wilgotności ziarna – W pszenicy odmian Roma (a) i Igna (b) na całkowitą zawartość wody w glutenie – CZ

Fig. 28. Effect of drying temperature – T and grain moisture content – W of wheat cultivars Roma (a) and Igna (b) on total water content in gluten – CZ

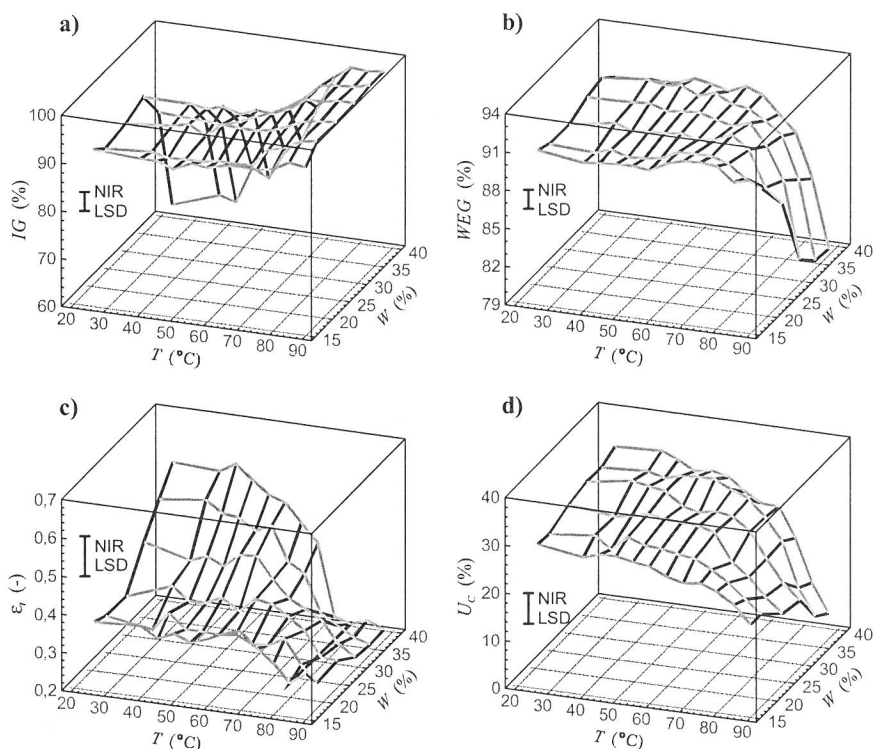
Wpływ zastosowanego nawilżania i suszenia ziarna na zmianę właściwości reologicznych wymywanego glutenu przedstawiono na rysunkach 29 i 30. Wzrost wilgotności ziarna, suszonego w zakresie temperatur dopuszczalnych, powodował osłabianie wytrzymałości mechanicznej wymywanego glutenu. Towarzyszyło mu wyraźne obniżanie się wartości IG i WEG , oraz znaczący wzrost ε_t . Zmiany te były mocno zarysowane zwłaszcza u odmiany Roma (rys. 29). Spośród wskaźników, najbardziej czułym w wykrywaniu zmian właściwości reologicznych glutenu, wskutek oddziaływania temperatury suszenia, okazał się indeks glutenu. Wyznaczone na podstawie tego wskaźnika temperatury dopuszczalne były najniższe (tab. 4).



Rys. 29. Wpływ temperatury suszenia – T i wilgotności ziarna – W pszenicy odmiany Roma na indeks glutenu – IG (a), wskaźnik elastyczności glutenu – WEG (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ε_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_c (d)

Fig. 29. Effect of drying temperature – T and grain moisture content – W of wheat of cultivar Roma on gluten index – IG (a), gluten elasticity index – WEG (b), total strain of gluten cylinder – ε_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_c (d)

Stosowanie przy suszeniu ziarna wyższych temperatur niż dopuszczalne przyczyniało się do znacznego wzrostu zwięzłości i sztywności wymywanego glutenu. W efekcie indeks glutenu (IG) stopniowo wzrastał, a jednocześnie wartości pozostałych wskaźników reologicznych (WEG , ε_t i U_C) malały. U odmiany Roma (rys. 29b), przebieg zmian WEG wyróżniał się charakterystycznym maksimum występującym przy 80°C . Oznacza to, że suszenie ziarna, zwłaszcza tego intensywniej nawilżonego, w temperaturach poniżej 80°C oddziałuje na poprawę elastyczności glutenu (WEG), natomiast suszenie w temperaturach wyższych (powyżej 80°C) skutkuje już pogarszaniem się tej cechy. Opisane zależności mają potencjalnie dużą wartość praktyczną, gdyż wskazują na możliwość poprawiania niskiej jakości wypiekowej ziarna pszenicy poprzez odpowiednio przeprowadzany zabieg suszenia.



Rys. 30. Wpływ temperatury suszenia – T i wilgotności ziarna – W pszenicy odmiany Igna na indeks glutenu – IG (a), wskaźnik elastyczności glutenu – WEG (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ε_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_C (d)

Fig. 30. Effect of drying temperature – T and grain moisture content – W of wheat cultivar Igna on gluten index – IG (a), gluten elasticity index – WEG (b), total strain of gluten cylinder – ε_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_C (d)

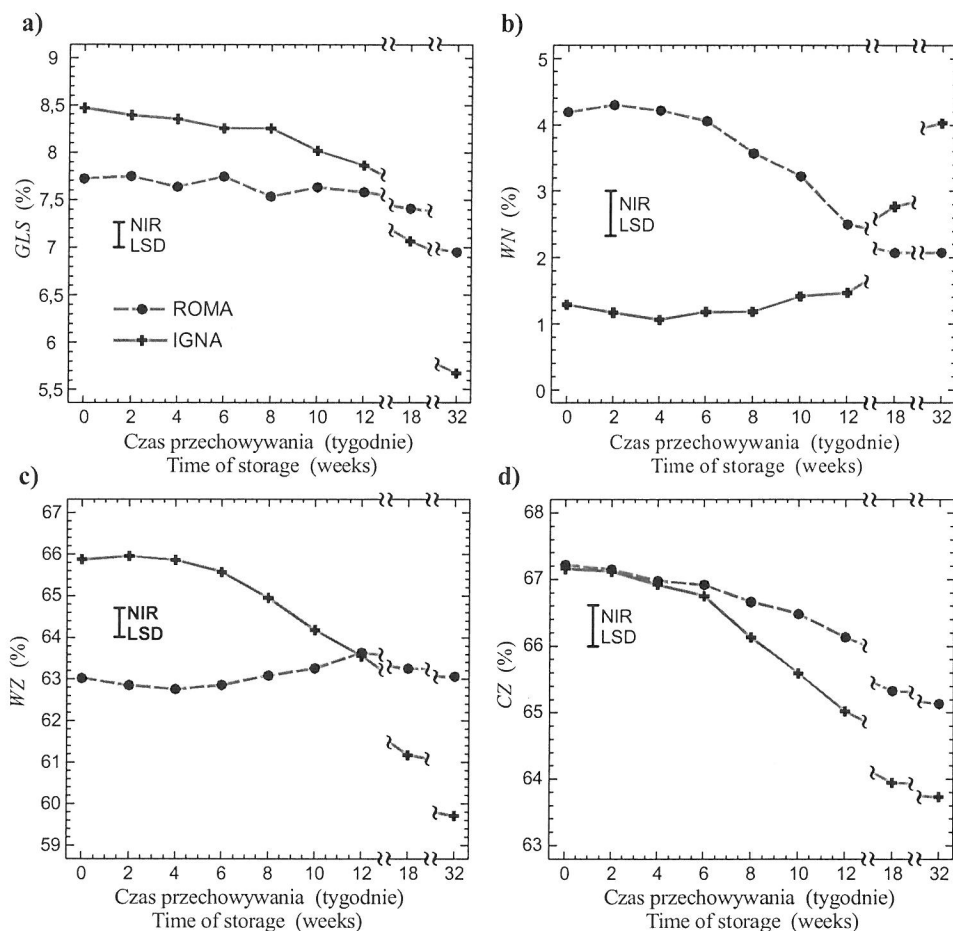
Podsumowując prezentowane wyniki można stwierdzić, że zastosowane zabiegi nawilżania i suszenia ziarna zmieniają istotnie te jego właściwości, które są odpowiedzialne za różnicowanie się wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu. Odmiana Roma odznaczała się wyższą zawartością wody niezwiązanej w glutenie, która zwiększała się kilkakrotnie w wyniku stosowania zabiegu nawilżania ziarna. Zabieg suszenia, wraz ze wzrostem temperatury, powodował stopniowe zmniejszanie się zawartości wody niezwiązanej. Zmiany jej zawartości można łatwo powiązać z kształtowaniem się właściwości reologicznych glutenu. W wyniku nawilżania ziarna i łagodnego suszenia wzrastała zawartość wody niezwiązanej, wskazując na rozluźnianie się sieci glutenowej, a wytrzymałość mechaniczna glutenu obniżała się. Z kolei pod wpływem wzrostu temperatury suszenia, zawartość wody niezwiązanej obniżała się, a więc sieć glutenowa stawała się bardziej zwarta, w efekcie czego wytrzymałość mechaniczna glutenu wzrastała. Druga z badanych odmian (Igna) posiadała gluten o wyraźnie niższej zawartości wody niezwiązanej, a więc o bardziej zwartej strukturze, podlegającej mniejszym zmianom w wyniku stosowania zabiegu nawilżania ziarna. Z tego powodu odmiana Igna, w porównaniu z odmianą Roma, charakteryzowała się ogólnie wyższą wytrzymałością mechaniczną glutenu. Wyróżniała się ona ponadto wyższą zawartością wody związanej, która nie podlegała istotnym zmianom pod wpływem nawilżania ziarna. W miarę wzrostu temperatury suszenia występował stopniowy spadek zawartości wody związanej, przy równoczesnym wzroście zwięzłości glutenu (*IG*) i utracie przez niego elastyczności (*WEG*) i rozciągliwości (ϵ_r). U odmiany Roma, zawartość wody związanej w wymywanym glutenie podlegała znacznemu obniżeniu pod wpływem zabiegu nawilżania ziarna, zaś podwyższanie temperatury suszenia wpływało na jej wzrost i równoczesną poprawę elastyczności glutenu (*WEG*).

5.1.5. Wpływ czasu przechowywania mąki

Wydłużanie okresu przechowywania mlewa pełnoziarnowego wpływało na stopniowe obniżanie wydajności glutenu (rys. 31a). W wyniku 32 tygodniowego przechowywania, wartości *GLS* spadały z 7,7 do 7,0%, dla odmiany Roma, i z 8,5 do 5,7%, dla odmiany Igna. Wskazuje to, że w trakcie przechowywania znacznie większym zmianom pod względem wydajności glutenu podlegała mąka uzyskana z przemiału ziarna odmiany Igna. Ponadto, pierwsze istotne zmiany *GLS*, dla tej odmiany, pojawiły się po znacznie krótszym okresie przechowywania, po 10 tygodniach, podczas gdy u odmiany Roma wystąpiły one dopiero po 18 tygodniach.

Zmiany wodochłonności glutenu, podobnie jak zmiany *GLS*, nie były zauważalne przed upływem pewnego okresu przechowywania mąki. W przypadku

zawartości wody niezwiązanej (rys. 31b), okres ten u odmiany Igna wynosił 12 tygodni i był dwukrotnie dłuższy niż u odmiany Roma (6 tygodni). Charakter zmian *WN* przy dłuższym okresie przechowywania mąki zależał od odmiany pszenicy. U odmiany o słabym glutenie (Roma), w miarę wydłużania tego okresu, zawartość wody niezwiązanej w wmywanym glutenie obniżała się (z 4,2 do 2,1%), zaś u odmiany o mocnym glutenie (Igna) – wzrastała (z 1,2 do 4,0%).



Rys. 31. Wpływ czasu przechowywania mąki pełnoziarnowej z pszenicy odmian odmian Roma i Igna na ilość glutenu suchego – *GLS* (a), zawartość wody niezwiązanej – *WN* (a), zawartość wody związanej – *WZ* (c) i całkowitą zawartość wody w glutenie – *CZ* (d)

Fig. 31. Effect of time of storage of whole wheat flour of cultivars Roma and Igna on dry gluten content – *GLS* (a), non-absorbed water content – *WN* (b), absorbed water content – *WZ* (c), and total water content in gluten – *CZ* (d)

Istotne zmiany w zawartości wody związanej (WZ) w trakcie przechowywania mąki wystąpiły tylko u odmiany Igna (rys. 31c). Wraz ze wzrostem czasu przechowywania malała zdolność glutenu do sorpcyjnego wiązania wody. WZ obniżała się z 65,8%, na początku przechowywania, do 59,7% po 32 tygodniach jego trwania. Pierwsze istotne jej spadki wystąpiły już po 8 tygodniach przechowywania mąki.

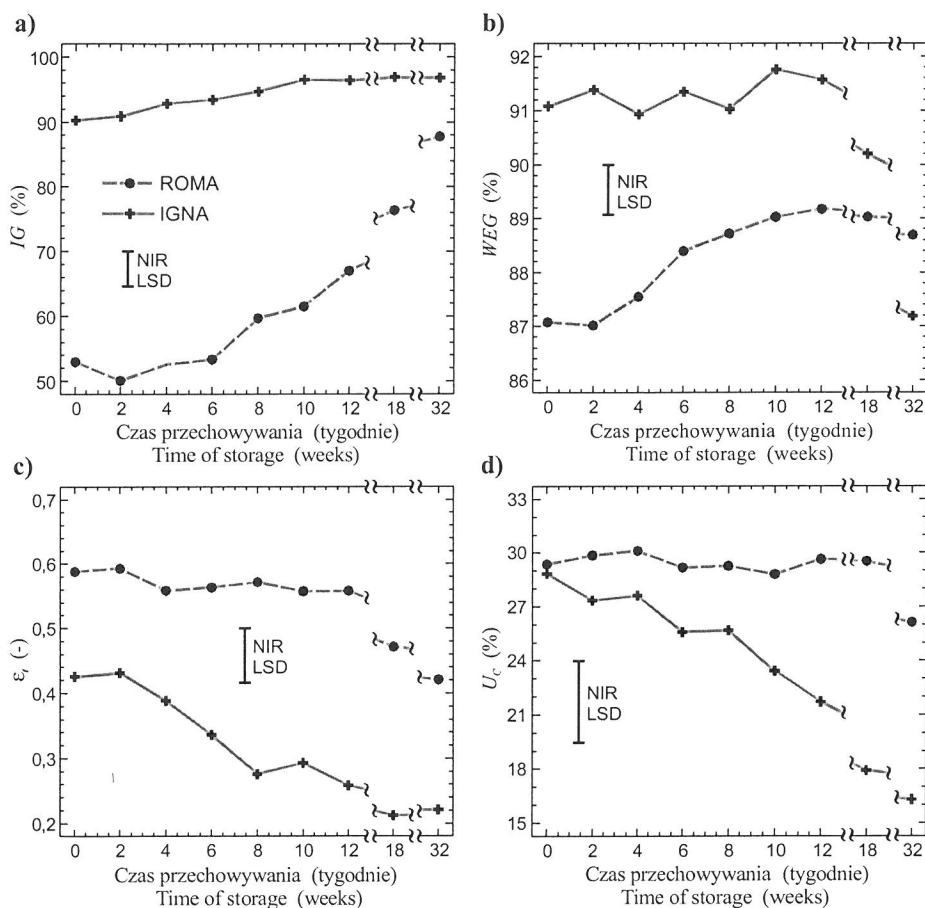
Niemniej jednak całkowita zawartość wody w wymywanym glutenie, dla obu odmian, malała w trakcie przechowywania mąki (rys. 31d). Po 32 tygodniach przechowywania, jej zawartość zmniejszyła się o 2,1 i 3,4% odpowiednio dla odmian Roma i Igna. Przy czym dla obu odmian na początku przechowywania całkowita zawartość wody była na zbliżonym poziomie – około 67%.

Czas przechowywania mąki również oddziałował na właściwości reologiczne wymywanego glutenu (rys. 32). Indeks glutenu wzrastał w miarę wydłużania okresu przechowywania mąki. Największy wzrost *IG* odnotowano dla odmiany o słabszym glutenie (Roma), z 53%, na początku przechowywania, do 87% po 32 tygodniach jego trwania. Dla odmiany Igna indeks glutenu wzrastał odpowiednio z 90 do 97%. Pierwsze istotne przyrosty wartości indeksu glutenu pojawiły się po 8 i 10 tygodniach przechowywania mąki, odpowiednio dla odmian Roma i Igna.

Podobnie, zakresy zmian *WEG*, ε_t i U_C zależały również od odmiany pszenicy (rys. 32). U odmiany Roma, w skutek wydłużania przechowywania mąki, aż do 12. tygodnia, gluten stawał się coraz bardziej elastyczny (*WEG*), równocześnie zachowując swoją rozciągliwość (ε_t) i płynność (U_C) na niezmiennym poziomie. Z kolei w przypadku odmiany Igna, odnotowano wyraźne obniżanie się ε_t i U_C , zaś zmiany *WEG* były nieistotne. Przechowywanie mąki powyżej 12 tygodni wpływało już na pogorszenie elastyczności glutenu, szczególnie wyraźnie u odmiany Igna (spadek *WEG* z 91,7 do 87,2%), oraz na zapoczątkowanie (Roma) lub dalsze pogłębianie (Igna) spadku rozciągliwości (ε_t) i zdolności glutenu do lepkiego płynięcia (U_C).

Otrzymane wyniki wskazują, że skutki przechowywania mąki zależą od genotypu odmiany pszenicy, z ziarna której ją wyprodukowano. Przechowywanie mąki charakteryzującej się mocnym gluteniem (Igna) istotnie obniżało właściwości sorpcyjne takiego glutenu, wartość WZ wyraźnie spadała, a ponadto dłuższe przechowywanie sprawiało, że wymywany gluten nabywał zdolności do magazynowania większych ilości wody niezwiązanej (WN). Przechowywanie mąki o słabym glutenie (Roma) wpływało natomiast na stopniowe zmniejszanie się zawartości wody niezwiązanej, wskazując na poprawę zwartości struktury wymywanego glutenu. Równocześnie gluten ten nie tracił zdolności sorpcyjnego wiązania wody (WZ). Niemniej jednak, u obu badanych odmian wydłużanie przechowywania mąki powodowało jednokierunkowe zmiany polegające na wzmacnianiu wytrzymałości mechanicznej glutenu oraz obniżaniu jego wydajności

(GLS) i całkowitej zawartości wody (CZ). Przy czym, wspomniany wzrost wytrzymałości u badanych odmian wiązał się z innym rodzajem zmian w wodochłonności glutenu. Dla odmiany Roma, przy braku istotnych zmian w zawartości wody związanej, wytrzymałość mechaniczna glutenu rosła wraz ze spadkiem zawartości wody niezwiązanej, a więc z poprawą zwartości jego struktury. Natomiast u odmiany Igna, wzrost wytrzymałości postępował wraz z pogarszaniem się właściwości sorpcyjnych glutenu (spadkiem WZ).



Rys. 32. Wpływ czasu przechowywania maki całoziarnowej z pszenicy odmian Roma i Igna na indeks glutenu – IG (a), wskaźnik elastyczności glutenu – WEG (b), odkształcenie całkowite walca glutenu – ϵ_t (c) i udział lepkiego płynięcia w odkształceniu walca glutenu – U_C (d)

Fig. 32. Effect of time of storage of whole wheat flour of cultivars Roma and Igna on gluten index – IG (a), gluten elasticity index – WEG (b), total strain of gluten cylinder – ϵ_t (c), and viscous flow share in strain of the gluten cylinder – U_C (d)

5.2. Współzależności między badanymi cechami glutenu

Analizę związków między zaproponowanymi wskaźnikami wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu oparto na wynikach ich pomiarów, których charakterystykę zmienności omówiono w rozdziałach 5.1.1.1 i 5.1.1.2. Wyznaczone współczynniki korelacji (tab. 5, 6, i 7) wskazują na występowanie w obrębie pszenicy ozimej zdecydowanie słabszych związków między badanymi cechami glutenu niż u formy jarej. Pszenica jara, co należy przypomnieć, charakteryzowała się większym zróżnicowaniem wskaźników właściwości reologicznych. Niemniej jednak, charakter większości związków był podobny dla obu form pszenicy.

Tabela 5. Współczynniki korelacji liniowej (r) i poziomy ich istotności (α) wyznaczone dla związków między wskaźnikami wydajności (GLS), wodochłonności (WN , WZ i CZ) i właściwości reologicznych (IG , WEG , ε_t i U_C) glutenu pszenicy ozimej ($n = 16$)

Table 5. Correlation coefficients (r) and significance levels (α) determined for relationships between indices of quantity (GLS), water absorption (WN , WZ and CZ), and rheological properties (IG , WEG , ε_t and U_C) of winter wheat gluten ($n = 16$)

Wskaźniki Indices		WN	WZ	CZ	IG	WEG	ε_t	U_C
GLS	r	– ^a	–	0,806	–	–	–	0,566
	α			0,000				0,022
WN	r		–0,946	–	–0,948	–	0,837	–
	α		0,000		0,000		0,000	
WZ	r			–	0,921	–	–0,782	–
	α				0,000		0,000	
CZ	r				–	–	–	–
	α							
IG	r					–	–0,903	–
	α						0,000	
WEG	r							0,535
	α							0,033
ε_t	r							–
	α							

^a – brak związku – lack of relationship.

Korelacje występujące między wskaźnikiem wydajności a pozostałymi (tab. 5, 6 i 7) wskazują, że wartość GLS jest nie tylko obiektywną miarą zawartości białek glutenowych w ziarnie pszenicy i ich ekstraktywności, ale również

wskaźnikiem, na podstawie którego można wstępnie przewidywać wodorochłonność i właściwości reologiczne glutenu. Wraz ze wzrostem wydajności glutenu zwiększała się całkowita zawartość wody (*CZ*), a indeks glutenu (*IG*) obniżał się. Gluten stawał się bardziej elastyczny (*WEG*), a zarazem bardziej rozciągliwy (ε_t) w wyniku lepkiego płynięcia (U_C).

Tabela 6. Współczynniki korelacji liniowej (*r*) i poziomy ich istotności (α) wyznaczone dla związków między wskaźnikami wydajności (*GLS*), wodorochłonności (*WN*, *WZ* i *CZ*) i właściwości reologicznych (*IG*, *WEG*, ε_t i U_C) glutenu pszenicy jarej (*n* = 16)

Table 6. Correlation coefficients (*r*) and significance levels (α) determined for relationships between indices of quantity (*GLS*), water absorption (*WN*, *WZ* and *CZ*), and rheological properties (*IG*, *WEG*, ε_t and U_C) of spring wheat gluten (*n* = 16)

Wskaźniki Indices		<i>WN</i>	<i>WZ</i>	<i>CZ</i>	<i>IG</i>	<i>WEG</i>	ε_t	U_C
<i>GLS</i>	<i>r</i>	– ^a	–	0,536	–0,609	0,758	0,714	0,625
	α			0,032	0,012	0,001	0,002	0,010
<i>WN</i>	<i>r</i>		–0,737	0,579	–0,710		0,597	
	α		0,001	0,019	0,002	–	0,015	–
<i>WZ</i>	<i>r</i>					0,737		0,547
	α			–	–	0,001	–	0,028
<i>CZ</i>	<i>r</i>				–0,916	0,610	0,902	0,711
	α				0,000	0,012	0,000	0,002
<i>IG</i>	<i>r</i>					–0,500	–0,946	–0,605
	α					0,049	0,000	0,013
<i>WEG</i>	<i>r</i>						0,638	0,909
	α						0,008	0,000
ε_t	<i>r</i>							0,720
	α							0,002

^a – brak związku – lack of relationship.

Wskaźniki wodorochłonności glutenu *WN* i *WZ* były ze sobą ujemnie skorelowane. Oznacza to, że gluten magazynujący większe ilości wody niezwiązanej (*WN*), a więc posiadający luźniejszą sieć glutenową, absorbował mniejsze ilości wody związanej (*WZ*). Niemniej jednak, całkowita zawartość wody w wymywanym glutenie (*CZ*) rosła równocześnie ze wzrostem zawartości wody niezwiązanej.

Jak pokazano na wykresie (rys. 33a), wzrost *WN* wpływał na osłabienie wytrzymałości mechanicznej wymywanego glutenu, powodując spadek *IG*. Przyczyny tego osłabienia należy wiązać przede wszystkim ze wzrostem stopnia rozluźnienia sieci glutenowej, którego miarodajnym wskaźnikiem jest zawartość

wody niezwiązanej. Stąd, nawet po usunięciu wody niezwiązanej z glutenu, większe rozluźnienie jego struktury oddziaływało niekorzystnie na kształtowanie się właściwości reologicznych ocenianych przy pomocy testu pełzania, zwiększając wielkość całkowitego odkształcenia walca glutenu (ε_t). Przejawy tego wpływu były odzwierciedlone również w dodatnich korelacjach wskaźników reologicznych (ε_t , WEG i U_C) z całkowitą zawartością wody w glutenie (CZ).

Tabela 7. Współczynniki korelacji liniowej (r) i poziomy ich istotności (α) wyznaczone dla związków między wskaźnikami wydajności (GLS), wodochłonności (WN , WZ i CZ) i właściwości reologicznych (IG , WEG , ε_t i U_C) glutenu pszenicy ozimej i jarej razem ($n = 32$)

Table 7. Correlation coefficients (r) and significance levels (α) determined for relationships between indices of quantity (GLS), water absorption (WN , WZ and CZ), and rheological properties (IG , WEG , ε_t and U_C) of gluten of winter and spring wheat together ($n = 32$)

Wskaźniki Indices		WN	WZ	CZ	IG	WEG	ε_t	U_C
GLS	r	– ^a	–	0,435	–0,378	0,690	0,630	0,708
	α			0,013	0,033	0,000	0,000	0,000
WN	r		–0,819	0,490	–0,793		0,626	–
	α		0,000	0,004	0,000	–	0,000	
WZ	r				0,441	0,354		
	α			–	0,012	0,047	–	–
CZ	r				–0,706	0,479	0,785	0,434
	α				0,000	0,006	0,000	0,013
IG	r					–0,411	–0,833	
	α					0,019	0,000	–
WEG	r						0,637	0,839
	α						0,000	0,000
ε_t	r							0,606
	α							0,000

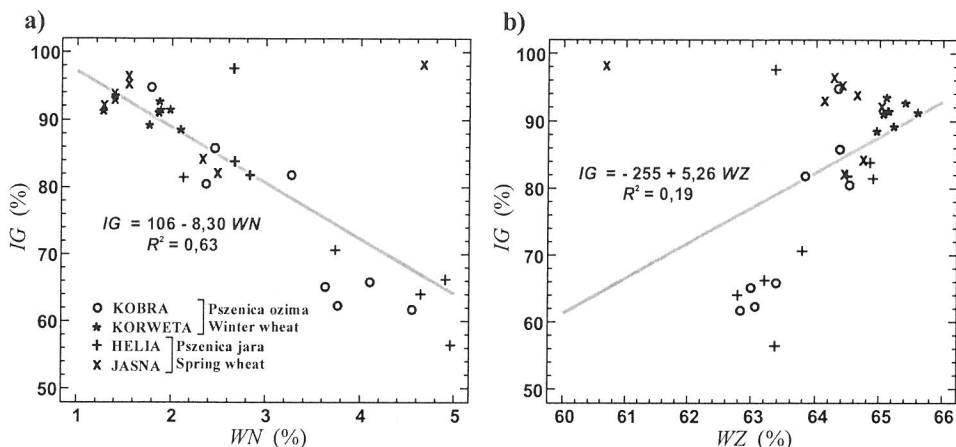
^a – brak związku – lack of relationship.

W porównaniu z wodą niezwiązaną, obecność wody związanej w glutenie (WZ) wpływała korzystnie na jego właściwości reologiczne. Wyższa zawartość wody związanej sprzyjała wzmacnianiu i uelastycznianiu glutenu, czego wyrazem były dodatnie współczynniki korelacji WZ z IG i WZ z WEG , a ujemne – WZ z ε_t (tab. 5, 6 i 7, rys. 33b).

Istnienie podobnych zależności między wskaźnikami wodochłonności WN i WZ a wskaźnikami właściwości reologicznych glutenu zostało również zauważone przy analizowaniu zmian wartości tych wskaźników pod wpływem dojrze-

wania, porastania i suszenia ziarna pszenicy oraz przechowywania mąki (rozdziały 5.1.2, 5.1.3, 5.1.4 i 5.1.5).

Indeks glutenu był najsilniej skorelowany z wielkością odkształcenia całkowitego (ε_t), a znacznie słabiej ze wskaźnikiem elastyczności (WEG). Ujemne korelacje między nimi oznaczają, że gluten stawiający większy opór przetwarzania w cieście wirowania (wyższy IG) jest równocześnie mniej rozciągliwy w cieście pełzania (niższe ε_t) i mniej elastyczny, a więc ulegający większym odkształceniom trwałym w cieście wytłaczania (niższy WEG). U pszenicy jarej wzrostowi IG towarzyszyło ponadto zmniejszanie się udziału lepkiego płynięcia (U_C).



Rys. 33. Związki między zawartością wody niezwiązanej – WN (a) i związanej – WZ (b) w wymywanym glutenie a indeksem glutenu – IG

Fig. 33. Relationships between content of non-absorbed water – WN (a) and absorbed water – WZ (b) in washed out gluten and gluten index – IG

Elastyczność (WEG) była dodatnio skorelowana z rozciągliwością glutenu (ε_t) i jego zdolnością lepkiego płynięcia (U_C). Również dodatnia korelacja wystąpiła między ε_t i U_C . Może to świadczyć, że gluten zachowuje swoją wysoką elastyczność nawet wtedy, kiedy odznacza się w miarę dużą rozciągliwością i płynnością. Należy zauważyć, że omawiane zależności mogą występować jedynie przy pewnych określonych zakresach zmienności korelowanych ze sobą wskaźników. Wiadomo bowiem, że zarówno gluten nierozciągliwy (tzw. krótki), jak również gluten nadmiernie upłynniony (tzw. lejący się) są nieprzydatne w piekarnictwie.

Scharakteryzowane powyżej korelacje wskazują na duże znaczenie zaproponowanych przez autora wskaźników wodochłonności WN i WZ w ocenie jakości glutenu. Szczególnie cenny jest pomiar zawartości wody niezwiązanej w świeżo wymyтым glutenie. Na jego podstawie można łatwo oceniać stopień rozluźnienia struktury glutenu, a także przewidywać jego właściwości reologiczne.

5.2.1. Rola wydajności i wodochłonności glutenu w kształtowaniu jego właściwości reologicznych

Zaprezentowana charakterystyka związków występujących między badanymi cechami glutenu (rozdział 5.2) wskazuje, że pomiary wydajności i wodochłonności wymywanego glutenu mogą dostarczać również wstępnych informacji na temat jego właściwości reologicznych. Aby bardziej obiektywnie ocenić użyteczność tych pomiarów, wyznaczono równania regresji liniowej wielu zmiennych, opisujące empiryczne zależności między wskaźnikami wydajności (*GLS*) i wodochłonności glutenu (*WN*, *WZ* i *CZ*) a jego wskaźnikami reologicznymi (tab. 8).

Stopień dopasowania wyznaczonych zależności, oceniony współczynnikiem determinacji R^2 , był znacznie gorszy w przypadku pszenicy ozimej. Wynikać to mogło po części, o czym już wspomniano, z wystąpienia w obrębie tej formy pszenicy słabszych związków między badanymi cechami (rozdział 5.2) i słabszego zróżnicowania wskaźników reologicznych (rozdz. 5.1.1).

Najlepiej dopasowanymi były zależności opisujące zmienność takich wskaźników reologicznych, jak: *IG* i ε_t (tab. 8), a odpowiadające im wartości R^2 mieściły się w przedziale między 0,70 a 0,95. Równania omawianych zależności wskazują, że zawartość wody niezwiązanej (*WN*) w wymywanym glutenie ma dominujący wpływ na osłabianie jego wytrzymałości (*IG*) oraz wzrost rozciągliwości (ε_t). Mniejsze znaczenie przy prognozowaniu *IG* i ε_t posiadały pomiary wydajności (*GLS*) i zawartości wody związanej (*WZ*).

Analizując równania regresji pod względem miana współczynników należy zauważyć, że zdolności sorpcyjne glutenu (*WZ*) we współdziałaniu z cechami wyrażanymi przez wskaźniki *WN* i *GLS* wpływały ujemnie na zwięźłość glutenu (*IG*). Choć zawartość wody związanej rozpatrywana jako samodzielna cecha oddziaływała odwrotnie na kształtowanie się indeksu glutenu, na co wskazują dodatnie współczynniki korelacji między *WZ* i *IG* (tab. 5, 6 i 7).

Zmienność wskaźnika elastyczności glutenu (*WEG*) była przewidywana najdokładniej na podstawie pomiarów zawartości wody związanej (*WZ*) i równoczesnym uwzględnianiu zawartości wody niezwiązanej i wydajności glutenu. Przy prognozowaniu wielkości udziału lepkiego płynięcia (U_C) najlepsze dopasowanie uzyskiwano, kiedy równania regresji obejmowały pary wskaźników *CZ* z *WZ* oraz *GLS* z *CZ*.

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że wydajność i wodochłonność glutenu odgrywają istotną rolę w kształtowaniu jego właściwości reologicznych. Zaproponowane przez autora wskaźniki wodochłonności pozwalają na przeprowadzanie bardziej wszechstronnej oceny jakości glutenu pszenicy.

Tabela. 8. Równania empirycznych zależności wskaźników reologicznych glutenu od jego wydajności (*GLS*) i wodochłonności (*WN*, *WZ* i *CZ*)
Table 8. Equations for empirical dependences of rheological indices of gluten on its quantity (*GLS*) and water absorption (*WN*, *WZ* and *CZ*)

Wskaźniki reologiczne glutenu Gluten rheological indices	Pszenica ozima – Winter wheat (n = 16)		Pszenica jara – Spring wheat (n = 16)		Pszenica ozima i jara razem Winter and spring wheat together (n = 32)	
	Równanie – Equation	R ² ^a	Równanie – Equation	R ²	Równanie – Equation	R ²
<i>IG</i>	111 – 11,2 <i>WN</i>	0,90	612 – 11,3 <i>WN</i> – 7,37 <i>WZ</i> – 2,42 <i>GLS</i>	0,95	606 – 13,7 <i>WN</i> – 7,57 <i>WZ</i>	0,76
<i>WEG</i>	– ^b	–	–22,6 + 1,70 <i>WZ</i> + 0,739 <i>WN</i> + 0,382 <i>GLS</i>	0,89	60,6 + 0,613 <i>GLS</i> + 0,390 <i>WZ</i>	0,55
<i>ε_t</i>	0,29 + 0,0999 <i>GLS</i>	0,70	–13,1 + 0,265 <i>WN</i> + 0,087 <i>GLS</i> + 0,190 <i>WZ</i>	0,93	–11,5 + 0,248 <i>WN</i> + 0,0631 <i>GLS</i> + 0,169 <i>WZ</i>	0,81
<i>U_C</i>	497 + 3,29 <i>GLS</i> – 7,33 <i>CZ</i>	0,59	–321 + 3,45 <i>CZ</i> + 2,04 <i>WZ</i>	0,72	18,3 + 2,01 <i>GLS</i>	0,50

^a – współczynnik determinacji – coefficient of determination, ^b – brak zależności – lack of the relation.

5.3. Związki między badanymi cechami glutenu a jakością ciasta i chleba

Charakterystykę zmienności wyróżników jakościowych ciasta i chleba oznaczonych na próbach ziarna pszenicy ozimej i jarej, pochodzących z doświadczeń polowych COBORU, zamieszczono w tabeli 9. Wartości wyróżników określonych metodą farinograficzną wskazują na wysoką wodochłonność mąki i dobre właściwości reologiczne ciasta oraz na ich mocne zróżnicowanie między badanymi próbami. Wartości liczby stosunkowej i energii ciasta, określone metodą ekstensograficzną, świadczą, że ciasto stawiało duży opór podczas jego rozciągania. Wyniki próbnego wypieku również potwierdzają dobrą wartość wypiekową ziarna pszenicy badanych prób, lecz charakteryzujących się małym zróżnicowaniem objętości i bonitacji chleba.

Pszenica ozima, w porównaniu z formą jarą, charakteryzowała się wyraźnie niższą wodochłonnością mąki, średnio o 6%, i gorszymi właściwościami reologicznymi ciasta. Odnaczała się krótszymi okresami rozwoju ciasta, średnio o ponad 2 minuty, i jego stałości, o 6 minut, oraz większym rozmiękczeniem ciasta, o 36 j.B. Ponadto charakteryzowała się mniejszym oporem ciasta w teście zrywania, energia ciasta była mniejsza średnio o 21 cm², przy równocześnie podobnym jak u pszenicy jarej stosunkiem oporu ciasta na zrywanie do jego rozciągliwości (liczba stosunkowa). U pszenicy ozimej stwierdzono większą zmienność wodochłonności mąki i rozmiękczenia ciasta, a u pszenicy jarej – rozwoju ciasta i liczby stosunkowej.

Wspomniane różnice w wodochłonności mąki między formami pszenicy zostały również odzwierciedlone w kształtowaniu się wydajności chleba. Dla pszenicy ozimej była ona niższa średnio o 6%. Pomimo zdecydowanie gorszych właściwości reologicznych ciasta, pszenica ozima jednakże charakteryzowała się większą objętością i lepszą jakością chleba. Objętość była wyższa średnio o 13 cm³/100g, a bonitacja chleba – o 8 punktów. Wyróżniki te u obu form pszenicy charakteryzowały się podobną zmiennością.

Opierając się na wartościach wyróżników jakościowych ciasta i chleba określono ich związki z wyznaczonymi wskaźnikami wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu. Wartości współczynników korelacji, prezentowane w tabelach 10, 11 i 12, pokazują znaczne różnice zarówno w sile, jak i w liczbie związków w zależności od formy pszenicy.

W obrębie pszenicy ozimej (tab. 10) potwierdzono występowanie mniejszej liczby związków i o słabszej sile. Wyjątek stanowią równie mocne, jak u pszenicy jarej, związki między ilością glutenu suchego a właściwościami reologicznymi ciasta. Wskazują one, że wzrost zawartości glutenu wpływał na poprawę prawie wszystkich wyróżników farinograficznych i ekstensograficznych ciasta.

Tabela 9. Charakterystyka zmienności wyróżników jakościowych ciasta i chleba oznaczonych na badanych próbach ziarna pszenicy ozimej i jarej
Table 9. Characteristic of variability in qualitative indices of dough and bread determined on grain samples of winter and spring wheat

Wyróżniki jakościowe ciasta i chleba Qualitative indices of dough and bread	Pszennica ozima – Winter wheat (n = 16)				Pszennica jara – Spring wheat (n = 16)			
	Średnie Means	S ^a	Min. ^b	Maks. ^c Max.	Średnie Means	S	Min.	Maks. Max.
Wodochłonność mąki Water absorption (%)	58,7	2,8	53,7	62,8	65,0	1,5	62,4	67,6
Rozwój ciasta Development time (min.)	2,1	0,5	1,5	3,0	4,5	1,8	1,5	8,0
Stołość ciasta Dough stability (min.)	6,6	4,2	2,5	20,0	12,6	5,9	2,0	21,0
Rozmięczenie ciasta Degree of softening (j.B.)	86,3	29,0	30	125	50,0	16,0	25	80
Wartość walorymetryczna Valorimetric index (skala 0-100)	47,1	7,4	36	63	63,8	8,6	46	77
Liczba stosunkowa Ratio (–)	1,53	0,39	0,94	2,26	1,62	0,77	0,87	3,80
Energia ciasta Area under curve (cm ²)	70,1	15,4	47,0	97,4	91,2	17,4	68,4	128,4
Wydajność chleba Bread yield (%)	143,6	2,7	138,9	147,2	149,8	2,1	146,8	152,7
Objętość chleba Loaf volume (cm ³ /100 g)	592,8	19,5	564,0	626,6	579,9	24,1	530,6	624,6
Bonitacja chleba Bread score (punkty)	128,9	14,6	107	158	120,9	13,2	97	143

^a – Odchylenie standardowe – Standard deviation, ^b – wartości minimalne – minimum values, ^c – wartości maksymalne – maximum values.

Wskaźnik wodochłonności glutenu WN istotnie korelował jedynie z objętością chleba ($r = 0,56$). Drugi wskaźnik wodochłonności WZ był powiązany z większą liczbą wyróżników jakościowych ciasta. Korelował on z wodochłonnością mąki ($r = 0,62$), rozmiękczeniem ciasta ($r = -0,62$), wartością walorymetryczną ($r = 0,50$) oraz wydajnością chleba ($r = 0,55$). Podobnie korzystne związki wystąpiły między całkowitą zawartością wody (CZ) w wymywanym glutenie a czasem rozwoju ciasta, wartością walorymetryczną, energią ciasta i bonitacją chleba. Wskaźnik reologiczny ε_t nie był istotnie skorelowany z żadnym z porównywanych wyróżników jakościowych ciasta i chleba. Z kolei wskaźniki IG i WEG były skorelowane jedynie z objętością chleba, a U_C z wyróżnikami farinograficznymi ciasta.

W obrębie pszenicy jarej (tab.11) analiza korelacji wykazała, że zawartość glutenu (GLS) wpływała korzystnie na wydłużenie rozwoju ciasta i podniesienie wartości walorymetrycznej, ocenianych farinograficznie, natomiast niekorzystnie na obniżenie liczby stosunkowej, wyznaczanej ekstensograficznie. Mimo to, z ciasta o wyższej zawartości glutenu uzyskiwano chleb o większej objętości ($r = 0,75$) i lepszej bonitacji ($r = 0,72$). Zawartość wody niezwiązanej w wymywanym glutenie istotnie korelowała z wieloma wyróżnikami, takimi jak: rozmiękczenie ($r = 0,73$) i stałość ciasta ($r = -0,72$), wodochłonność mąki ($r = 0,66$), energia ciasta ($r = -0,55$) oraz wydajność chleba ($r = 0,51$). Natomiast w przypadku zawartości wody związanej, potwierdzono istnienie jej związków tylko z rozmiękczeniem ($r = -0,72$) i stałością ciasta ($r = 0,68$). Całkowita zawartość wody w wymywanym glutenie była skorelowana dodatnio z wodochłonnością mąki, a ujemnie – z liczbą stosunkową i energią ciasta.

Dla pszenicy jarej stwierdzono występowanie znacznie większej liczby związków między właściwościami reologicznymi glutenu a porównywanymi właściwościami ciasta i chleba. Z charakteru tych związków wynika, że większa zwężłość glutenu (IG) sprzyjała podwyższaniu liczby stosunkowej i energii ciasta, oraz oddziaływała ujemnie na wodochłonność mąki i objętość chleba. Odwrotnym oddziaływaniem charakteryzowały się cechy glutenu oceniane przy pomocy WEG , ε_t i U_C . Wpływały one na wzrost objętości i bonitacji chleba oraz na poprawę właściwości reologicznych ciasta ocenianych farinograficznie, a na pogorszenie jego właściwości ocenianych ekstensograficznie.

Współczynniki korelacji zaprezentowane w tabelach 10 i 11 wskazują, że cechy glutenu charakteryzowane wskaźnikami WN i WZ , przyczyniając się do wzrostu wodochłonności mąki oraz wydajności i objętości chleba, oddziałują w odmienny sposób na kształtowanie się właściwości reologicznych ciasta. Jakość ciasta pogarsza gluten formujący luźniejszą sieć glutenową, która nadaje mu zdolność magazynowania większych ilości wody niezwiązanej (WN), zaś na poprawę jego jakości wpływa gluten, który odznacza się lepszymi zdolnościami sorpcyjnego

wiązania wody (WZ). Jednakże, dla pszenicy ozimej i jarej razem (tab. 12) nie potwierdzono istnienia tego rodzaju związków, z wyjątkiem występującego między WN a stałością ciasta ($r = -0,36$). Może to wskazywać na pewne odrębności między formami pszenicy, których wyrazem jest tłumienie siły związków stwierdzonych w obrębie obu form rozpatrywanych oddzielnie. Niemniej jednak wykryto związki między całkowitą zawartością wody (CZ) a liczbą stosunkową ($r = -0,54$) oraz objętością ($r = 0,46$) i bonitacją chleba ($r = 0,43$). Wskazują one, że gluten odznaczający się wyższą wodochłonnością (CZ) zwiększa rozciągliwość ciasta, a podczas wypieku ułatwia wyrastanie ciasta i formowanie się jakościowo lepszego miększu chleba.

Między wskaźnikami reologicznymi glutenu a wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba wystąpiły podobne związki w obrębie pszenicy ozimej i jarej razem (tab. 12), jak w przypadku obu form pszenicy rozpatrywanych oddzielnie. Stwierdzono, że wzrost wartości wskaźników wyznaczanych w testach wytłaczania (WEG) i pełzania (ε_t i U_C) wiązał się z wyższą wodochłonnością mąki i jej wartością walorymetryczną, dłuższym rozwojem i stałością ciasta oraz mniejszym rozmiękczeniem, a więc z poprawą wyróżników reologicznych ciasta oznaczanych farinograficznie. Ponadto wskaźniki WEG , ε_t i U_C były skorelowane dodatkowo z objętością i bonitacją chleba, a ujemnie z liczbą stosunkową oznaczaną ekstensograficznie. Indeks glutenu (IG) wyznaczany w teście wirowania był powiązany ze wspomnianymi wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba w odmienny sposób. Korelował on dodatnio z liczbą stosunkową i energią ciasta, a ujemnie z objętością i bonitacją chleba.

Wyróżniki farinograficzne, w odróżnieniu od wyróżników ekstensograficznych, były wyraźnie słabiej skorelowane ze wskaźnikami wyznaczonymi przy pomocy testu pełzania, zwłaszcza z ε_t . Tłumaczyć to można tym, że farinograficzna ocena właściwości ciasta odbywa się podczas jego wyrabiania, podczas gdy testowanie ekstensograficzne, polegające na rozciąganiu wałka ciasta, jest bardziej zbliżone w swej naturze do testu pełzania walca glutenu, który w trakcie zwisania ulega rozciąganiu. Wiadomo bowiem, że zbieżność wyników można uzyskać łatwiej, gdy właściwości ciasta i glutenu są badane w podobny sposób.

Analizując związki występujące między badanymi właściwościami glutenu a jakością chleba (tab. 12) można stwierdzić, że intensywne wyrastanie ciasta, skutkujące dużym przyrostem objętości chleba, miało miejsce gdy gluten odznaczał się mniejszą zwężnością (IG) oraz większą wodochłonnością (CZ), rozciągliwością (ε_t) i elastycznością (WEG). Gluten o takich właściwościach przyczyniał się również do formowania miększu chleba o lepszej jakości.

Tabela 10. Współczynniki korelacji liniowej (r) i poziomy istotności (α) wyznaczone dla związków wydajności (GLS), wodochłonności (WN, WZ i CZ) i właściwości reologicznych (IG, WEG, ε_t i U_C) glutenu pszenicy ozimej z wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba ($n = 16$)

Table 10. Correlation coefficients (r) and significance levels (α) determined for relationships of indices of quantity (GLS), water absorption (WN, WZ and CZ), and rheological properties (IG, WEG, ε_t and U_C) of winter wheat gluten to qualitative indices of dough and bread ($n = 16$).

Wyróżniki Indices		GLS	WN	WZ	CZ	IG	WEG	ε_t	U_C
Wodochłonność mąki	r	— ^a	—	0,621	—	—	—	—	—
Water absorption	α			0,010					
Rozwój ciasta	r	0,861	—	—	0,592	—	—	—	0,590
Development time	α	0,000			0,016				0,016
Stołość ciasta	r	0,752	—	—	—	—	—	—	0,564
Dough stability	α	0,001							0,023
Rozmiękczenie ciasta – Degree of softening	r	–0,746	—	–0,622	—	—	—	—	–0,626
	α	0,001		0,010					0,010
Wartość walorymetryczna	r	0,823	—	0,502	0,553	—	—	—	0,590
Valorimetric index	α	0,000		0,048	0,026				0,000
Liczba stosunkowa	r	0,512	—	—	—	—	—	—	—
Ratio	α	0,043							
Energia ciasta	r	0,798	—	—	0,578	—	—	—	—
Area under curve	α	0,000			0,019				
Wydajność chleba	r	—	—	0,549	—	—	—	—	—
Bread yield	α			0,028					
Objętość chleba	r	—	0,555	—	—	–0,525	0,539	—	—
Loaf volume	α		0,026			0,037	0,031		
Bonitacja chleba	r	—	—	—	0,513	—	—	—	—
Bread score	α				0,042				

^a – brak związku – lack of relationship.

Tabela 11. Współczynniki korelacji liniowej (r) i poziomy istotności (α) wyznaczone dla związków wydajności (GLS), wodochłonności (WN, WZ i CZ) i właściwości reologicznych (IG, WEG, ε_t i U_C) glutenu pszenicy jarej z wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba ($n = 16$)

Table 11. Correlation coefficients (r) and significance levels (α) determined for relationships of indices of quantity (GLS), water absorption (WN, WZ and CZ), and rheological properties (IG, WEG, ε_t and U_C) of spring wheat gluten to qualitative indices of dough and bread ($n = 16$)

Wyróżniki Indices		GLS	WN	WZ	CZ	IG	WEG	ε_t	U_C
Wodochłonność mąki	r	— ^a	0,657	—	0,778	−0,747	—	0,664	—
Water absorption	α		0,006		0,000	0,001		0,005	
Rozwój ciasta	r	0,734	—	—	—	—	0,649	0,506	0,505
Development time	α	0,001					0,007	0,046	0,046
Stołość ciasta	r	—	−0,724	0,678	—	—	—	—	—
Dough stability	α		0,002	0,004					
Rozmiękczenie ciasta	r	—	0,731	−0,722	—	—	—	—	—
Degree of softening	α		0,001	0,002					
Wartość walorymetryczna	r	0,758	—	—	—	—	0,704	0,506	0,557
Valorimetric index	α	0,001					0,002	0,046	0,025
Liczba stosunkowa	r	−0,750	—	—	−0,680	0,679	−0,876	−0,766	−0,896
Ratio	α	0,008			0,004	0,004	0,000	0,001	0,000
Energia ciasta	r	—	−0,550	—	−0,652	0,656	—	−0,667	—
Area under curve	α		0,027		0,006	0,006		0,005	
Wydajność chleba	r	—	0,506	—	—	—	—	—	—
Bread yield	α		0,045						
Objętość chleba	r	0,750	—	—	—	−0,577	0,638	0,606	0,628
Loaf volume	α	0,001				0,019	0,008	0,013	0,009
Bonitacja chleba	r	0,716	—	—	—	—	0,628	0,574	0,642
Bread score	α	0,002					0,009	0,020	0,007

^a — brak związku — lack of relationship.

Tabela 12. Współczynniki korelacji liniowej (r) i poziomy istotności (α) wyznaczone dla związków wydajności (GLS), wodochłonności (WN , WZ i CZ) i właściwości reologicznych (IG , WEG , ε_t i U_C) glutenu pszenicy ozimej i jarej razem z wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba ($n = 32$)

Table 12. Correlation coefficients (r) and significance levels (α) determined for relationships of indices of quantity (GLS), water absorption (WN , WZ and CZ) and rheological properties (IG , WEG , ε_t and U_C) of gluten of winter and spring wheat together to qualitative indices of dough and bread ($n = 32$)

Wyróżniki jakościowe		GLS	WN	WZ	CZ	IG	WEG	ε_t	U_C
Wodochłonność mąki	r	0,544					0,365		0,590
Water absorption	α	0,001	–	–	–	–	0,040	–	0,000
Rozwój ciasta	r	0,792					0,621	0,469	0,676
Development time	α	0,000	–	–	–	–	0,000	0,007	0,000
Stołość ciasta	r	0,656	–0,364				0,383		0,432
Dough stability	α	0,000	0,041	–	–	–	0,031	–	0,014
Rozmiękczenie ciasta	r	–0,672							–0,556
Degree of softening	α	0,000	–	–	–	–	–	–	0,001
Wartość walorymetryczna	r	0,813					0,544	0,369	0,713
Valorimetric index	α	0,000	–	–	–	–	0,001	0,038	0,000
Liczba stosunkowa	r	–0,350			–0,539	0,560	–0,706	–0,649	–0,468
Ratio	α	0,049	–	–	0,002	0,001	0,000	0,000	0,007
Energia ciasta	r	0,423				0,420			
Area under curve	α	0,016	–	–	–	0,017	–	–	–
Wydajność chleba	r	0,458							0,419
Bread yield	α	0,008	–	–	–	–	–	–	0,017
Objętość chleba	r	0,382			0,462	–0,538	0,434	0,414	
Loaf volume	α	0,031	–	–	0,008	0,002	0,013	0,019	–
Bonitacja chleba	r				0,433	–0,428	0,382		
Bread score	α	–	–	–	0,013	0,014	0,031	–	–

^a – brak związku – lack of relationship.

5.3.1. Predykcja wartości wypiekowej ziarna pszenicy

Równania empirycznych zależności wyróżników jakościowych ciasta i chleba od badanych cech glutenu zestawiono w tabelach 13 i 14. Aby uwypuklić znaczenie pomiaru wskaźników wydajności i wodochłonności glutenu w przewidywaniu właściwości ciasta i chleba, w tabeli 13 zamieszczono równania regresji opisujące charakter współdziałania między tymi wskaźnikami. W tabeli 14 przedstawiono równania regresji wyznaczone z uwzględnieniem wszystkich badanych wskaźników jakościowych glutenu. Takie podejście umożliwiało znajdowanie, wewnątrz wyodrębnionych grup wskaźników, korzystnego współdziałania cech glutenu lub jego braku, a tym samym ocenę przydatności pomiaru tych cech w prognozowaniu potencjalnej wartości wypiekowej ziarna pszenicy.

Analiza regresji (tab.13) ujawniła takie korzystne współdziałanie między wydajnością (*GLS*) i wodochłonnością glutenu (*WN*, *WZ* i *CZ*) przy prognozowaniu właściwości reologicznych ciasta. Najwyższymi współczynnikami determinacji R^2 charakteryzowały się równania opisujące zmienność takich wyróżników reologicznych ciasta, jak: stałość i rozmięczenie ciasta, wartość walorymetryczna oraz energia ciasta. Z charakteru tych równań wynika, że ilość glutenu (*GLS*) oddziałuje najczęściej pozytywnie na właściwości reologiczne ciasta, w przeciwieństwie do wodochłonności glutenu (*WN*, *WZ* i *CZ*), która je pogarsza. Jedynie w obrębie pszenicy ozimej, właściwości sorpcyjne glutenu (*WZ*), we współdziałaniu z jego wydajnością (*GLS*), wpływały na wzrost energii ciasta.

Prognozowanie cech jakościowych chleba, przy braku współdziałania między wydajnością i wodochłonnością glutenu, opierało się tylko na jednym ze wskaźników wodochłonności bądź wydajności, stąd obarczone było znacznym błędem (niskie R^2).

Dopasowanie omawianych zależności (tab. 14) znacząco wzrosło, gdy do ich wyznaczenia wykorzystano, obok wskaźników wydajności i wodochłonności, również wskaźniki reologiczne glutenu (*IG*, *WEG*, ε_t i U_C). Dotyczyło to zwłaszcza równań opisujących zmienność wyróżników ekstensograficznych, liczby stosunkowej i energii ciasta. Równania te wskazują na występowanie wyjątkowo mocnego współdziałania wydajności (*GLS*) ze zwięzłością (*IG*) oraz z pozostałymi cechami reologicznymi glutenu (U_C , *WEG* i ε_t), a znacznie słabszego – z wodochłonnością (*WZ*).

Przy opisywaniu zmienności wyróżników farinograficznych dużo większe znaczenie miało włączanie do równań wskaźników wodochłonności, zwłaszcza *CZ*, wraz ze wskaźnikami reologicznymi glutenu, głównie z U_C , ε_t i *WEG*. Najwyższym dopasowaniem (R^2) charakteryzowały się zależności empiryczne do prognozowania rozmięczenia i stałości ciasta oraz wartości walorymetrycznej.

Tabela 13. Równania empirycznych zależności wyróżników jakościowych ciasta i chleba od wydajności (*GLS*) i wodochłonności glutenu (*WN*, *WZ* i *CZ*)
Table 13. Equations for empirical dependences of qualitative indices of dough and bread on quantity (*GLS*) and water absorption of gluten (*WN*, *WZ* and *CZ*)

Wyróżniki jakościowe Qualitative indices	Pszennica ozima – Winter wheat (n = 16)			Pszennica jara – Spring wheat (n = 16)			Pszennica ozima i jara razem Winter and spring wheat together (n = 32)		
	Równania – Equations	R ²		Równania – Equations	R ²		Równania – Equations	R ²	
Wodochłonność mąki Water absorption	-59,9 + 1,84 <i>WZ</i>	0,39		0,59 + 1,29 <i>WN</i> + 0,950 <i>WZ</i>	0,67		49,7 + 1,30 <i>GLS</i>	0,30	
Rozwój ciasta Development time	-1,48 + 0,409 <i>GLS</i>	0,74		-3,21 + 0,754 <i>GLS</i>	0,54		37,3 + 0,989 <i>GLS</i> - 0,649 <i>CZ</i>	0,68	
Stalność ciasta Dough stability	-18,7 + 2,92 <i>GLS</i>	0,57		5,16 - 3,27 <i>WN</i> + 1,64 <i>GLS</i>	0,75		205 + 3,15 <i>GLS</i> - 4,77 <i>WN</i> - 3,30 <i>WZ</i>	0,73	
Rozmiękczenie ciasta Degree of softening	242 - 22,6 <i>GLS</i> + 16,0 <i>WN</i>	0,86		72,6 + 8,98 <i>WN</i> - 4,72 <i>GLS</i>	0,79		166 - 13,3 <i>GLS</i> + 10,1 <i>WN</i>	0,61	
Wartość walorimetryczna Valorimetric index	1,90 + 6,13 <i>GLS</i> - 3,11 <i>WN</i>	0,86		25,2 + 3,79 <i>GLS</i>	0,57		278 + 6,61 <i>GLS</i> - 4,26 <i>CZ</i>	0,71	
Liczba stosunkowa Ratio	-0,09 + 0,187 <i>GLS</i>	0,26		26,1 - 0,241 <i>GLS</i> - 0,330 <i>CZ</i>	0,67		33,5 - 0,478 <i>CZ</i>	0,29	
Energia ciasta Area under curve	-413 + 10,8 <i>GLS</i> + 6,04 <i>WZ</i>	0,77		739 - 12,9 <i>WN</i> - 9,56 <i>WZ</i>	0,47		1239 + 8,48 <i>GLS</i> - 18,5 <i>CZ</i>	0,52	
Wydajność chleba Bread yield	40,4 + 1,60 <i>WZ</i>	0,30		147 + 0,807 <i>WN</i>	0,26		136 + 1,13 <i>GLS</i>	0,21	
Objętość chleba Loaf volume	566 + 10,6 <i>WN</i>	0,31		473 + 10,5 <i>GLS</i>	0,56		-436 + 15,3 <i>CZ</i>	0,21	
Bonitacja chleba Bread score	-1370 + 22,4 <i>CZ</i>	0,26		65,1 + 5,48 <i>GLS</i>	0,51		-480 + 9,05 <i>CZ</i>	0,19	

Tabela 14. Równania empirycznych zależności wyróżników jakościowych ciasta i chleba od wydajności (*GLS*), wodochłonności (*WN*, *WZ* i *CZ*) i właściwości reologicznych glutenu (*IG*, *WEG*, ϵ_t i U_C)
Table 14. Equations for empirical dependences of qualitative indices of dough and bread on quantity (*GLS*), water absorption (*WN*, *WZ* and *CZ*) and rheological properties of gluten (*IG*, *WEG*, ϵ_t and U_C)

Wyróżniki jakościowe Qualitative indices	Pszenvica ozima – Winter wheat (n = 16)		Pszenvica jara – Spring wheat (n = 16)		Pszenvica ozima i jara razem Winter and spring wheat together (n = 32)	
	Równania – Equations	R ²	Równania – Equations	R ²	Równania – Equations	R ²
Wodochłonność maki Water absorption	$-383 + 7,66 \text{ WZ}$ $-0,455 \text{ IG} - 0,409 \text{ U}_C$	0,76	$-0,59 + 1,29 \text{ WN}$ $+0,950 \text{ WZ}$	0,67	$43,5 + 0,494 \text{ U}_C$	0,35
Rozwój ciasta Development time	$-1,10 + 0,445 \text{ GLS}$ $-1,26 \epsilon_t$	0,83	$-3,21 + 0,754 \text{ GLS}$	0,54	$43,3 + 0,773 \text{ GLS}$ $-0,773 \text{ CZ} + 0,118 \text{ U}_C$	0,72
Stalność ciasta Dough stability	$246 - 3,16 \text{ WEG}$ $+ 2,24 \text{ GLS} + 0,822 \text{ U}_C$	0,83	$14,1 - 3,26 \text{ WN}$ $+ 2,36 \text{ GLS} - 0,410 \text{ U}_C$	0,82	$205 + 3,15 \text{ GLS}$ $- 4,77 \text{ WN} - 3,30 \text{ WZ}$	0,73
Rozmiękzenie ciasta Degree of softening	$2252 - 52,3 \text{ CZ} - 7,03 \text{ U}_C$ $+ 17,1 \text{ WEG} + 10,6 \text{ WN}$	0,88	$-56,7 + 17,6 \text{ WN}$ $- 59,5 \epsilon_t + 2,41 \text{ U}_C$	0,82	$-364 - 16,7 \text{ GLS} + 78,6 \epsilon_t$ $- 4,23 \text{ U}_C + 7,66 \text{ WEG}$	0,82
Wartość walorymetryczna Valorimetric index	$-468 + 2,14 \text{ U}_C + 14,2 \text{ CZ}$ $- 5,49 \text{ WEG} - 14,0 \epsilon_t$	0,94	$25,2 + 3,79 \text{ GLS}$	0,57	$122 + 5,49 \text{ GLS} + 0,459 \text{ IG}$ $+ 0,953 \text{ U}_C - 2,99 \text{ WZ}$	0,84
Liczba stosunkowa Ratio	$33,1 + 0,372 \text{ GLS}$ $+ 0,0628 \text{ IG} - 0,621 \text{ WZ}$	0,65	$7,47 - 0,112 \text{ U}_C$ $- 0,138 \text{ GLS}$	0,86	$26,4 - 0,281 \text{ WEG}$ $- 1,10 \epsilon_t + 0,163 \text{ GLS}$	0,65
Energia ciasta Area under curve	$-84,6 + 12,5 \text{ GLS}$ $+ 0,558 \text{ IG}$	0,82	$-62,3 + 1,25 \text{ IG}$ $+ 4,77 \text{ GLS}$	0,57	$418 - 88,4 \epsilon_t + 11,8 \text{ GLS}$ $- 7,00 \text{ WZ} + 1,44 \text{ U}_C$	0,81
Wydajność chleba Bread yield	$-120 + 3,90 \text{ WZ} + 22,6 \epsilon_t$	0,70	$148 + 0,807 \text{ WN}$	0,26	$13,6 + 1,13 \text{ GLS}$	0,21
Objętość chleba Loaf volume	$-902 + 24,1 \text{ WN} + 16,3 \text{ WEG}$ $- 175 \epsilon_t + 5,21 \text{ GLS}$	0,81	$473 + 105 \text{ GLS}$	0,56	$757 - 1,73 \text{ IG}$ $- 9,90 \text{ WN}$	0,39
Bonitacja chleba Bread score	$-1370 + 22,4 \text{ CZ}$	0,26	$65,1 + 5,48 \text{ GLS}$	0,51	$-480 + 9,05 \text{ CZ}$	0,19

Niższymi wartościami R^2 (od 0,35 do 0,76) odznaczały się równania regresji wodochłonności mąki. Z postaci równań regresji wyróżników farinograficznych i ekstensograficznych wynika, że we współdziałaniu różnych cech glutenu, te wyrażane przy pomocy wskaźników *GLS*, *IG*, i *CZ* wpływały na poprawę właściwości reologicznych ciasta, zaś cechy wrażane wskaźnikami ϵ_r , *WEG*, *WN* i *WZ* – na ich pogorszenie.

Z wyraźnie mniejszą dokładnością były przewidywane wyniki próbnego wypieku (tab. 14). Zwłaszcza prognozowanie bonitacji chleba mogło opierać się na wykorzystaniu tylko jednego wskaźnika, *CZ* bądź *GLS*. Niemniej jednak, przy poszukiwaniu równania opisującego zmiany wydajności chleba dla pszenicy ozimej pomocne okazało się współdziałanie między właściwościami sorpcyjnymi (*WZ*) a rozciągliwością glutenu (ϵ_r). Z kolei przy wyznaczaniu zależności do prognozowania objętości chleba wykorzystano współdziałanie między zawartością wody niezwiązanej (*WN*) a elastycznością (*WEG*), rozciągliwością (ϵ_r) i wydajnością glutenu (pszenica ozima) oraz między zawartością wody niezwiązanej a indeksem glutenu (pszenica ozima i jara razem). W efekcie czego wydajność i objętość chleba były znacznie pewniej przewidywane (wyższe R^2) niż jego bonitacja.

6. DYSKUSJA

6.1. Ocena metod zastosowanych do pomiaru wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu

Przedstawione wyniki badań wskazują, że wprowadzone modyfikacje do standardowej procedury testowania właściwości fizycznych glutenu świeżo wymytego oraz opracowane testy reologiczne pozwalają w łatwy sposób uzyskać dodatkowe, istotne informacje o jego wodochłonności i właściwościach reologicznych, które są wysoce użyteczne przy ocenie wartości wypiekowej pszenicy. Wprowadzone modyfikacje znacznie rozszerzają zakres oceny jakościowej glutenu, umożliwiając analizowanie stanu jego uwodnienia bezpośrednio po wymyciu. Wykonywane w tym celu pomiary zawartości wody sorpcyjnie związanej oraz wody niezwiązanej, znajdującej się w wolnych przestrzeniach sieci glutenowej, dostarczają danych nie tylko o wodochłonności glutenu, ale również na temat stopnia rozluźnienia jego struktury. Dotychczas z tego źródła użytecznej wiedzy nie w pełni korzystano.

Podstawowym wymogiem stawianym przy wykonywaniu pomiarów zawartości obu rodzajów wody jest konieczność stosowania glutowników do wymywania glutenu. Urządzenia te zabezpieczając jednakowe warunki tego procesu umożliwiają jednocześnie miarodajne testowanie różnic w wodochłonności glutenu. Z tego względu ręczne procedury wymywania należy uznać jako mało przydatne, zwłaszcza do pomiaru zawartości wody niezwiązanej.

Do oszacowania zawartości wody niezwiązanej (*WN*) wykorzystuje się test wirowania, ten sam co przy oznaczaniu ilości glutenu mokrego [56], natomiast zawartość wody związanej (*WZ*) określa się wykonując suszenie glutenu mokrego. Zgodnie z opracowaną procedurą, wodę niezwiązaną definiuje się również jako wodę znajdującą się w glutenie bezpośrednio po jego wymyciu i usuwalną pod wpływem wirowania. Ściśle rzecz biorąc, w wyniku wirowania z glutenu usuwany jest wodny roztwór NaCl, stosowany do wymywania, i zawierający niewielkie ilości składników rozpuszczalnych, np. albumin i globulin oraz nierozuszczalnych, np. ziaren skrobi. Z kolei zawartość wody związanej, z uwagi na sposób jej usuwania, wyraża ilość wody znajdującej się w glutenie bezpośrednio po wymyciu, nie zawierającej innych składników i nieusuwalnej pod wpływem wirowania, a odparowywanej w wyniku suszenia.

Dokładność, z jaką mogą być wykonywane pomiary zaproponowanych wskaźników wodochłonności *WN* i *WZ* zależy od klasy urządzeń pomiarowych stosowanych zarówno do wymywania glutenu, jak i do usuwania z niego wody niezwiązanej i związanej, a także od precyzji ważenia próbki glutenu na poszczególnych etapach opracowanej procedury. W przeprowadzonych badaniach stosowano urządzenia pomiarowe spełniające wymagania stawiane przez normę europejską [56]. Zgodnie z zalecaną przez tę normę dokładnością wykonywano również pomiary masy próbki glutenu. W rezultacie uzyskana dokładność pomiaru wskaźników wodochłonności *WN* i *WZ*, oceniona na podstawie wielkości 95% przedziałów ufności dla ich średnich (*NIR*), była wystarczająca dla statystycznego potwierdzenia istotnego różnicowania się wartości tych wskaźników pod wpływem badanych czynników i procesów. Jak zaprezentowano na wykresach zamieszczonych w pracy, przedziały *NIR* były co najmniej kilkakrotnie, a niekiedy aż kilkunastokrotnie mniejsze od szerokości zakresów, w jakich kształtowały się zawartości wody niezwiązanej i związanej. Oznacza to, że błąd eksperymentalny był niewielki w stosunku do wariancji *WN* i *WZ* wynikającej z rzeczywistego zróżnicowania wodochłonności glutenu. Niemniej jednak, możliwy jest do osiągnięcia dalszy przyrost dokładności pomiaru tych wskaźników poprzez określanie masy próbki glutenu z jeszcze większą precyzją niż to zakłada wspomniana norma.

Pod względem nakładu pracy pomiary zawartości wody niezwiązanej i związanej nie są uciążliwe i czasochłonne. Mogą być one wykonywane równocześnie ze standardowym oznaczaniem ilości i indeksu glutenu [56]. Wymagają jedynie wprowadzenia do standardowej procedury trzech etapów: (1) rejestracji masy glutenu świeżo wymytego, (2) sporządzania stałej odważki glutenu do wirowania i (3) suszenia glutenu odwirowanego. Przedstawione zalety stwarzają szansę na szybkie upowszechnienie zaproponowanej metody pomiaru wodochłonności w la-

boratoriach wykonujących rutynową ocenę ilości i jakości glutenu mokrego, nie tylko przy pomocy zestawu pomiarowego Glutomatic, ale również innych urządzeń dostępnych na polskim rynku [135].

Wysoka przydatność pomiaru zawartości wody niezwiązanej (*WN*) do badania fizycznych właściwości glutenu świeżo wymytego wynika przede wszystkim z występowania ścisłego związku między tym wskaźnikiem wodorochłonności a właściwościami mechanicznymi sieci glutenowej. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują bowiem, że gluten magazynujący więcej wody niezwiązanej ma bardziej rozluźnioną strukturę sieci, która zarazem jest słabsza mechanicznie. Oznacza to, że rodzaj struktury sieci glutenowej nie tylko decyduje o możliwościach retencjonowania wody niezwiązanej przez wymywany gluten, ale również determinuje zachowanie takiego glutenu w trakcie testów reologicznych. Należy podkreślić, że obok rodzaju struktury sieci glutenowej, decydujący wpływ na jej mechaniczną wytrzymałość ma również skład i właściwości chemiczne składników strukturalnych, glutenin i gliadyn, oraz substancji wypełniających tę sieć, np. lipidów. Słuszność tej tezy potwierdzają wyniki badań cytowanych w rozdziale 2.1.1.

Niemniej jednak, podczas testów reologicznych prowadzonych z udziałem glutenu świeżo wymytego istotną rolę odgrywa także sama obecność wody niezwiązanej w wolnych przestrzeniach sieci glutenowej. Woda ta rozgranicza poszczególne pasma sieci glutenowej i przez to ułatwia ich wzajemne przemieszczanie się. W efekcie próbka testowanego glutenu stawia wyraźnie mniejszy opór podczas jej odkształcania.

Równie wysoką użytecznością przy badaniu właściwości fizycznych glutenu świeżo wymytego odznacza się pomiar zawartości wody związanej (*WZ*). Z przeglądu literatury wynika, że zdolność glutenu do sorpcyjnego wiązania wody zależy przede wszystkim od składu chemicznego białek glutenowych budujących sieć glutenową oraz innych składników trwale z nią zespolonych. Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na możliwość wykorzystania pomiaru zawartości wody związanej w wymywanym glutenie (*WZ*) również do przewidywania jego właściwości reologicznych. Stwierdzono bowiem, że obecność wody związanej sorpcyjnie przez gluten korzystnie oddziałuje na mechaniczne właściwości sieci glutenowej. Wyższa zawartość wody związanej czyni tę sieć zarazem bardziej wytrzymałą i elastyczną. Oznacza to, że woda związana, w porównaniu z wodą niezwiązaną, pełni skrajnie odmienną funkcję w kształtowaniu właściwości reologicznych glutenu.

W przeprowadzonych badaniach śledzenie całokształtu zmian we właściwościach lepkością glutenu, zachodzących m.in. w wyniku różnicowania się jego wodorochłonności (*WN* i *WZ*), było możliwe dzięki wykorzystaniu różnych, ale wzajemnie się uzupełniających metod testowania właściwości reologicznych,

zarówno standardowych (test wirowania), jak i nowo opracowanych (testy wytłaczania i pełzania). Test wirowania stosowany przy oznaczaniu indeksu glutenu (Standard ICC nr 155) został ulepszony poprzez stosowanie stałej odważki próbki glutenu świeżo wymytego. Unikano w ten sposób różnicowania siły odśrodkowej oddziałującej na tę próbkę w trakcie jej przetłaczania przez otwory sitka pomiarowego. Badania Misia [96] wskazują, że zabieg odcinania części próbki glutenu, wykonywany w celu sporządzenia odważki, nie ma wpływu na wynik pomiaru indeksu glutenu. Inne badania autora [99], związane z metodycznymi aspektami oceny właściwości reologicznych glutenu przy pomocy testów wytłaczania i pełzania, umożliwiły wybór najodpowiedniejszych warunków do przeprowadzania tego rodzaju testów.

Testy wytłaczania i pełzania były przeprowadzane na glutenie mokrym odwirowanym, a więc pozbawionym wody niezwiązanej, w przeciwieństwie do testu wirowania przeprowadzanego na glutenie świeżo wymytym zawierającym jeszcze wodę niezwiązaną, która dopiero w jego trakcie jest usuwana. Omawiane różnice metodyczne umożliwiły porównywanie właściwości reologicznych glutenu przed i po usunięciu z niego wody niezwiązanej i tym samym na określenie jej roli. Stwierdzono, że zabieg usuwania wody niezwiązanej z glutenu nie zmieniał istotnie jego właściwości mechanicznych. Gluten magazynujący więcej wody niezwiązanej był słabszy mechanicznie nawet wtedy, gdy jej już nie zawierał. Tak więc wyższa zawartość w glutenie świeżo wymytym wody niezwiązanej wskazuje, że w jego strukturze znajdują się rozleglejsze wolne przestrzenie uformowane przez luźniejszą sieć glutenową i przez co słabszą mechanicznie. Stąd pomiar zawartości wody niezwiązanej może być również uznany za obiektywny wskaźnik stopnia rozluźnienia struktury sieci glutenowej, której dominująca rola w kształtowaniu mechanicznych właściwości glutenu została potwierdzona wynikami niniejszych badań.

Zastosowane testy do badania właściwości reologicznych różniły się również rodzajem dominujących odkształceń jakim poddawano testowaną próbkę glutenu. Próbką ta w testach wirowania i wytłaczania podlegała głównie odkształceniom typu ścinanie, a w teście pełzania – rozciąganiu. Tego rodzaju odkształcenia dominują także w procesach technologicznych, związanych z wyrabianiem ciasta oraz jego fermentacją i wypiekiem, w których rola glutenu jest bezsporna [14].

Do charakteryzowania zachowania próbki glutenu podczas testów reologicznych wykorzystywano różne miary (wskaźniki). Przy pomocy testu wytłaczania wyznaczano wskaźnik elastyczności glutenu (*WEG*), który wyraża odporność próbki glutenu na trwałe odkształcenia przy stałej szybkości jej wytłaczania. W odróżnieniu, w teście wirowania badano oporność tej próbki na wytłaczanie przy stałym jej obciążeniu i wyrażano ją indeksem glutenu (*IG*). Z kolei przy pomocy testu pełzania oceniano rozciągliwość i zdolność glutenu do lepkiego

płynięcia, które wyrażano odpowiednio wielkością odkształcenia całkowitego walca (ε_t) i udziałem w jego odkształceniu lepkiego płynięcia (U_C) przy stałym czasie pełzania.

Duża różnorodność zastosowanych w badaniach metod i wskaźników sprawiała, że wyciągane wnioski często jawiły się jako sprzeczne. Tego rodzaju rozbieżności uzyskano między wynikami z testów wytłaczania i pełzania. Wskazują one, że większą elastyczność (test wytłaczania) posiadał gluten o większej zdolności do lepkiego płynięcia (test pełzania). Można je tłumaczyć faktem, że szkielet sieci glutenowej tworzą dwie, zespolone ze sobą w różnych proporcjach i o różnych właściwościach, frakcje: kleista (gliadyny) i włóknista (gluteniny), nadające glutenowi odpowiednio właściwość lepkiego płynięcia i elastyczność. Powszechnie wiadomo, że wyższa płynność glutenu (U_C) wydatnie zmniejsza opór struktur włóknistych podczas jego wytłaczania, przyczyniając się tym samym do mniejszego ich uszkodzania, przez co wytłoczona próbka glutenu w większym stopniu odzyskuje pierwotne wymiary (WEG).

Z drugiej strony duża różnorodność zastosowanych metod pomiarowych i wskaźników reologicznych ułatwiła pełniejszy opis właściwości lepko-sprężystych glutenu oraz ich uwarunkowań i wpływu na jakość ciasta i chleba. Ocena właściwości mechanicznych glutenu zawężona jedynie do pomiaru standardowego wskaźnika (IG) nie pozwalała uchwycić wszystkich istotnych zmian jakim podlegał gluten w wyniku oddziaływania badanych procesów fizjologicznych i technologicznych. Dla przykładu, analizując przy pomocy indeksu glutenu skutki suszenia ziarna stwierdzono jednoznaczny wzrost zwięźłości struktury wy-mywanego glutenu w miarę podwyższania temperatury suszenia. Jednakże, dodatkowa ocena tych skutków wykonana w oparciu o zaproponowane wskaźniki reologiczne umożliwiła również obserwację zjawiska poprawy elastyczności glutenu (WEG) i jego wodochłonności (WZ). Wystąpiło ono przy suszeniu ziarna o niskiej jakości (IG), w trakcie którego stosowano temperatury rzędu 80°C. Dokonana obserwacja ma również dużą wartość dla producentów i przetwórców ziarna pszenicy, gdyż ukazuje ona nowe możliwości w poprawianiu jakości wypiekowej tego cennego surowca.

Podstawową zaletą opracowanych testów wytłaczania i pełzania jest duża łatwość w ich wdrożeniu do praktyki. Nie wymagają bowiem zakupu żadnych kosztownych narzędzi pomiarowych i nie są uciążliwe pod względem pracochłonności. Ponadto istnieje możliwość wprowadzania różnego rodzaju modyfikacji upraszczających procedurę tych testów i sposobu wyznaczania wskaźników reologicznych. Jedną z takich modyfikacji, która eliminuje konieczność wykorzystywania metod analizy regresji nieliniowej przy poszukiwaniu parametrów równania opisującego pełzanie walca glutenu, można zasugerować już teraz. Długość początkową walca (l_0) można by wyznaczać poprzez bezpośredni pomiar

jego długości po zakończeniu testu wytłaczania. W tym celu, podczas wytłaczania należałoby zanurzać wylot strzykawki w cieczy, np. w solance, pod względem gęstości zbliżonej do glutenu. Ciecz ta minimalizując ciężenie walca glutenu zapobiegałaby jego odkształcaniu. Dla dalszego uproszczenia procedury, można zrezygnować z rejestrowania zmian długości walca w trakcie pełzania, wykonując jedynie raz odczyt długości walca przy końcu tego etapu. Znając długość początkową walca glutenu (l_0) oraz długości tego walca po zakończeniu etapów pełzania (l_c) i odprężania (l_r) można łatwo wyznaczyć wartości wszystkich zaproponowanych wskaźników reologicznych (WEG , ε_t i U_C). Przytoczona modyfikacja czyniłaby opracowane testy wytłaczania i pełzania jeszcze bardziej przydatnymi do ich upowszechnienia w rutynowej ocenie jakości glutenu.

6.2. Przyczyny różnicowania się badanych właściwości glutenu

Badania przeprowadzone z wykorzystaniem zmodyfikowanych i nowo opracowanych procedur pomiarowych umożliwiły obiektywne prześledzenie zmian ilościowych i jakościowych glutenu, będących wynikiem oddziaływania poszczególnych czynników i procesów podczas wegetacji roślin, obróbki poźniwej ziarna pszenicy i jego przetwarzania. Wyniki tych badań mają dużą wartość poznawczą, ponieważ opisują przebieg kształtowania się dotychczas nie badanych właściwości świeżo wymytego glutenu. Po raz pierwszy przy pomocy pomiaru zawartości wody niezwiązanej (WN) scharakteryzowano zmiany w strukturze sieci glutenowej zachodzące pod wpływem badanych czynników i procesów, na tle różnicowania się właściwości reologicznych glutenu.

Chronologicznie pierwotnymi źródłami różnicowania się właściwości glutenu są czynniki oddziałujące w okresie wegetacji roślin. W prezentowanych badaniach przeanalizowano spośród tych czynników, te najistotniejsze, takie jak: odmiany pszenicy, poziomy nawożenia azotowego i rejony uprawy (miejscowości). Wykazano, że oceniane odmiany pszenicy różniły się najmocniej między sobą pod względem zawartości wody niezwiązanej w wymywanym glutenie (WN) oraz jego zwięzłości (IG) i rozciągliwości (ε_t). Wskazuje to, że formowanie sieci glutenowej i jej stopień rozluźnienia (WN) oraz niektóre właściwości mechaniczne (IG i ε_t) są warunkowane przede wszystkim genetycznie. Z tego względu wskaźniki WN , IG i ε_t mogą być wartościowe dla hodowli pszenicy, gdyż ułatwiałyby one selekcję nowych odmian o bardziej korzystnych właściwościach glutenu. Czynniki środowiskowe, rejony uprawy pszenicy i poziomy nawożenia azotowego, wpływały najsilniej na różnicowanie się ilości glutenu (GLS) i jego elastyczności (WEG). Najmniej wrażliwą na zmiany zarówno pod wpływem czynników genotypowych, jak i środowiskowych okazała się cecha wyrażająca zdolność glutenu do lepkiego płynięcia (U_C).

Odmiany pszenicy o glutenie bardziej zwężym (Korweta i Jasna) charakteryzowały się zazwyczaj mniejszą wrażliwością na zmiany jego wodochłonności i właściwości reologicznych w wyniku oddziaływania czynników środowiskowych (miejscowości i poziomów nawożenia). Otrzymane wyniki, z uwagi na występowanie ujemnej korelacji zwężności glutenu (*IG*) z jego ilością (*GLS*), pokrywają się również z badaniami Teama'ego i in. [146], którzy wykazali, że na oddziaływanie warunków uprawy są bardziej wrażliwe odmiany odznaczające wyższymi ilościami glutenu.

Stwierdzono występowanie pewnej prawidłowości w kształtowaniu się właściwości glutenu w zależności od położenia geograficznego rejonu (miejscowości) uprawy pszenicy, szczególnie wyraźnie u formy jarej. Warunki środowiskowe miejscowości Radostowo, znajdującej się na północy Polski (rejon I), wpływały na gromadzenie się w ziarnie mniejszych ilości białek glutenowych (*GLS*), jednakże białka te formowały bardziej zwężły gluten (o wyższym *IG*). Z kolei warunki wegetacji panujące w miejscowościach zlokalizowanych na południu Polski (rejony V i VI) korzystnie oddziaływały na wydajność glutenu (*GLS*), lecz niekorzystnie wpływały na jego jakość. Obniżała się zdolność absorpcji wody przez gluten (*WZ*), a jego struktura rozluźniała się (*WN*), stając się słabsza mechanicznie (*IG*) i podatniejsza na rozciąganie (ϵ_r). Jedną z możliwych przyczyn takiego kształtowania się wydajności i jakości glutenu, mogą być różnice w wielkościach opadów i nasłonecznienia między badanymi rejonami uprawy, co również sugerują wyniki badań Mikhaylenko'ego i in. [92].

Nawożenie azotowe oddziaływało głównie poprzez podwyższanie ilości glutenu (*GLS*). Wykazano, że czynnik ten nie wpływał na wielkość retencji wody niezwiązanej przez gluten (*WN*), a więc i na stopień rozluźnienia jego struktury. Zwiększone nawożenie oddziaływało natomiast istotnie na wzrost zawartości wody związanej (*WZ*) i całkowitej (*CZ*) oraz zwiększenie elastyczności (*WEG*), rozciągliwości (ϵ_r) i zdolności glutenu do lepkiego płynięcia (*UC*). Również zwężność glutenu, oceniona przy pomocy indeksu glutenu (*IG*), obniżała się pod wpływem nawożenia azotowego. O istnieniu negatywnego oddziaływania zwiększonego nawożenia azotowego na wytrzymałość mechaniczną glutenu donosiły wcześniejsze liczne badania, zamieszczone w przeglądzie literatury (rozdz. 2.3.1.1). Występowanie tego rodzaju oddziaływań jednakże nie dostarcza argumentu do podważania dominującej roli genetycznego warunkowania jakości glutenu [73]. Dowodzi ono jedynie istnienia wpływu czynników zewnętrznych (środowiskowych) na stopień ekspresji poszczególnych genów w genomie pszenicy, odpowiedzialnych za syntezę białek glutenowych. Pod wpływem zwiększonego nawożenia azotowego wzrasta intensywność syntezy gliadyn kosztem glutenin [33], a podwyższona zawartość białek gliadynowych w glutenie może być jednym z istotniejszych źródeł osłabiania jego wytrzymałości mechanicznej.

Niemniej jednak, należy podkreślić także pozytywny aspekt nawożenia azotowego. Zwiększone nawożenie podnosiło bowiem wodochłonność (WZ i CZ) i elastyczność glutenu (WEG), na co również zwracały uwagę badania Ayoub'a i in. [8], Cacak-Pietrzak i in. [22], Kłupczyńskiego i Ralcewicz [75] i Podolskiej i Stankowskiego [120], które ponadto ukazywały pozytywny wpływ takiego glutenu na właściwości reologiczne ciasta i objętość chleba.

Spośród badanych procesów fizjologicznych i technologicznych, stadia dojrzalności ziarna pszenicy wpływały na różnicowanie się właściwości glutenu najmocniej. Gluteny izolowane z niedojrzałego ziarna, zebranego jeszcze w okresie przed dojrzalnością mleczną, miały nadmiernie rozluźnioną strukturę z licznymi w sieci glutenowej przestrzeniami magazynującymi duże ilości wody niezwiązanej. Wskazują na to bardzo wysokie wartości WN , wynoszące nawet 40%. W kolejnych dniach tego okresu białka glutenowe nabywały zdolność formowania coraz bardziej zwięzłych sieci glutenowych. W efekcie czego izolowano gluten o mniejszej zawartości wody niezwiązanej, a zarazem elastyczniejszy (WEG) i silniejszy mechanicznie (wzrost IG i spadek ε_t i U_C) oraz zawierający więcej wody związanej (WZ).

W okresie od dojrzalności mlecznej do pełnej następował dalszy wzrost elastyczności glutenu (WEG), jednakże jego rozciągliwość (ε_t i U_C) zaczęła wzrastać. Oznacza to, że zachodzące w tym okresie różnicowanie się składu chemicznego bielma ziarniaka [21,45,70] sprzyja nie tylko uelastycznianiu sieci glutenowej, ale również większej jej rozciągliwości.

Stwierdzono ponadto, że właściwości glutenu nawet po zakończeniu dojrzewania ziarna mogą dalej podlegać zmianom. W wyniku opóźniania terminu zbioru pszenicy, gluten stopniowo wzmacniał się (IG) i tracił rozciągliwość, dotyczyło to szczególnie odmiany o słabszym mechanicznie glutenie (Roma). Zmiany te prawdopodobnie wynikają z powolnego wzrostu stopnia polimeryzacji glutenin w miarę starzenia się ziarna [163].

Badania przeprowadzone z wykorzystaniem laboratoryjnego testu porastania ziarna pszenicy wskazują, że porastanie w początkowej fazie wpływało na poprawę zdolności glutenu do sorpcyjnego wiązania wody (WZ). Dostrzega się tu pewną analogię z wynikami otrzymanymi przez Bombara'ego i in. [17], którzy badali właściwości sorpcyjne białek mąki pszennej w zależności od stopnia ich hydrolizy przez dodatek enzymów proteolitycznych. Maksymalną wodochłonność białek obserwowali oni przy umiarkowanym stopniu hydrolizy.

Gdy intensywność porastania przekroczyła pewien poziom, który był różny dla badanych odmian pszenicy, w wymywanym glutenie obniżała się zawartość wody związanej, a równocześnie wzrastała zawartość wody niezwiązanej w wolnych przestrzeniach sieci glutenowej, która rozluźniając się stawiała się bardziej

rozciągliwa (wzrost ε_r i U_C) oraz traciła wytrzymałość mechaniczną (spadek IG) i elastyczność (spadek WEG). Stwierdzono większą odporność na te negatywne skutki odmiany Igna, o lepszym jakościowo glutenie, tj. o wyższej zawartości wody związanej i silniejszym mechanicznie, niż odmiany Roma. Toma i Moraru [147] powiązali tę większą odporność z wolniejszym rozkładem frakcji gluteninowej pod wpływem porastania.

Przeprowadzona analiza skutków porastania wykazała jednoznacznie, że z ziarna porośniętego w niewielkim stopniu, o liczbie opadania od 65 do 150 s, można nadal wymywać nie mniejsze ilości glutenu i o nie gorszej jakości, a nawet o zwiększonej wodochłonności (WZ), niż z ziarna nie poddanego porastaniu. Do podobnych wniosków doszli Malkki i in. [88], badając partie ziarna pszenicy nieprzydatne do celów piekarniczych ze względu na zbyt niską liczbę opadania. Fakty te wskazują na możliwość wykorzystywania takiego ziarna do produkcji glutenu witalnego, powszechnie stosowanego w piekarnictwie. Ten rodzaj wykorzystania mógłby dotyczyć szczególnie odmian pszenicy o wysokiej wydajności i jakości glutenu.

Do modelowania porastania wykorzystywano długotrwały (trzydobowy) zabieg nawilżania ziarna pszenicy między warstwami bibuły o różnym stopniu nasączenia wodą, dobrze naśladujący warunki tzw. polowego porastania. Warstwy bibuły spełniały podobną funkcję jak plewy i plewki w dojrzałym kłosie, ilość wody użytej do zwilżenia bibuły odwzorowywała wielkość opadu deszczu, a szczelina wentylacyjna umożliwiała oddychanie kielkującym ziarniakom. Specyfiką tego zabiegu było to, że dominujący kierunek przemieszczania wody ograniczał się do strefy bezpośredniego kontaktu bibuły z powierzchnią ziarniaka. Z uwagi, że pole tego kontaktu było niewielkie, wilgotność ziarna wzrastała łagodnie. Odmiennym przebiegiem charakteryzował się zabieg nawilżania zastosowany do różnicowania wilgotności ziarna poddanego testowi suszenia. Próbkę ziarna z określonym dodatkiem wody umieszczano na 24 godziny w hermetycznym pojemniku poruszonym ruchem obrotowym. Wymuszano w ten sposób równomierne zwilżenie całej powierzchni ziarniaka, przez co w jednostce czasu znacznie większa ilość wody wnikała do jego wnętrza, powodując bardzo szybki przyrost wilgotności ziarna.

Omawiane zabiegi nawilżania należy ocenić również pod kątem ich wpływu na aktywność enzymatyczną ziarna i właściwości glutenu. Stwierdzono, że nawilżanie mniej intensywne a dłuższe (test porastania) powoduje zapoczątkowanie aktywności α -amylazy przy niższej wilgotności ziarna w porównaniu z zabiegiem bardziej intensywnym, ale krócej trwającym (test suszenia). Również ułatwiony dostęp powietrza w trakcie nawilżania (test porastania) wpływał na większy przyrost aktywności tego enzymu niż w przypadku jego braku (test suszenia). Zmiany właściwości fizycznych glutenu w wyniku nawilżania były nie-

istotne, o ile zabieg ten nie powodował rozbudzenia aktywności enzymatycznej ziarna. Intensywniejsze nawilżanie, powyżej 29% wilgotności ziarna (test suszenia), skutkowało wzrostem aktywności enzymatycznej, która jednakże mieściła się całkowicie w granicach dopuszczalnych dla ziarna nieporośniętego (liczba opadania nie spadała poniżej 180 s). Mimo to w następstwie nawilżania wystąpiły zmiany w wodochłonności i właściwościach reologicznych glutenu podobne do skutków porastania. Wzrastała zawartość wody niezwiązanej (*WN*), wskazując na rozluźnianie sieci glutenowej, której wytrzymałość mechaniczna (*IG*) ulegała obniżeniu, kosztem większej jej rozciągliwości (ϵ_r). Wcześniejsze badania Misia i Grundasa [102] wskazują, że zabiegi nawilżania o innym przebiegu i prowadzone dla potrzeb przedprzemiałowego kondycjonowania ziarna pszenicy, mogą oddziaływać na właściwości glutenu także korzystnie. W następstwie sześciogodzinnego nawilżania ziarna i łagodnego suszenia stwierdzili oni istotną poprawę struktury wymywanego glutenu, która stawała się bardziej zwarta i wytrzymała (wzrost *IG*).

Przeprowadzona analiza wpływu suszenia ziarna i przechowywania mąki na wodochłonność i właściwości reologiczne glutenu wykazała pewne podobieństwa tych procesów pod względem powodowanych przez nie skutków. Pod wpływem wzrostu temperatury suszenia, jak również w wyniku wydłużania przechowywania, obniżała się całkowita zawartość wody w wymywanym glutenie (*CZ*), a jego wytrzymałość mechaniczna (*IG*) ulegała wzmocnieniu. Różnice między badanymi odmianami pszenicy przejawiały się w tym, że suszenie w temperaturze do 85°C ziarna o słabszym glutenie (odmiana Roma) wpływało ponadto na poprawę zdolności sorpcyjnych glutenu (wzrost *WZ*) oraz jego elastyczności (wzrost *WEG*). Wykrycie tych korzystnych zmian rzuca nowe światło na wyniki badań innych autorów, ukazujących pozytywny wpływ suszenia ziarna na wzrost liczby sedimentacji [148], poprawę właściwości reologicznych ciasta i jakości miększu chleba [138] oraz zwiększenie ilości glutenu mokrego [141]. Z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że wszystkie przytoczone korzystne zmiany mogły mieć swoje źródło w podwyższonej, w wyniku suszenia ziarna, wodochłonności i elastyczności glutenu.

Te korzystne zmiany właściwości glutenu w ogóle nie wystąpiły w przypadku suszenia ziarna o mocnym glutenie (odmiana Igna). W konsekwencji mocny gluten stawał się nadmiernie zwęzły, a tym samym nieprzydatny do celów piekarniczych. Jedną z przyczyn stwierdzonych różnic odmianowych, jak wskazują badania Autran'a i in. [6], może być zróżnicowana zdolność poszcze-gólnych frakcji białek glutenowych do agregacji pod wpływem obróbki termicznej. Na tego typu modyfikacje są wyjątkowo wrażliwe gluteniny, a bardzo odporne – ω -gliadyny. Pszenice jakościowo dobre, w porównaniu ze złymi, odznaczają się zazwyczaj

wyższymi udziałami frakcji gluteninowych, co tłumaczy większą podatność ich białek na modyfikacje termiczne.

Odmienne reakcje badanych odmian zarysowały się również w trakcie przechowywania mąki. Stwierdzono, że mąka o mocnym glutenie (odmiana Igna) odznaczała się mniejszą przydatnością do dłuższego przechowywania. Niekorzystnymi skutkami były bowiem obniżona wodochłonność glutenu (WZ) oraz jego nadmierna zwięźłość (IG) i brak rozciągliwości (ϵ_t i U_C). Z kolei wiele korzyści wypływało z przechowywania mąki o słabym glutenie (odmiana Roma). Gluten taki nie zatracając zdolności wiązania wody (WZ), wzmacniał się znacznie (IG), poprawiając równocześnie swoją elastyczność (WEG).

Dla pełniejszej interpretacji przyczyn występowania powyższych zależności należy nadmienić, że zastosowane warunki przechowywania mąki pełnoziarnistej, z uwagi na niską jej wilgotność (11,5%), sprawiały, że dominującym procesem, zachodzącym w czasie przechowywania, było utlenianie składników białkowych mąki. W wyniku utleniania, łańcuchy polipeptydowe białek glutenowych zespalały się coraz mocniej ze sobą, głównie poprzez tworzące się wiązania dwusiarczkowe [164]. W rezultacie wymywany gluten u obu odmian, w miarę wydłużania przechowywania mąki, był coraz bardziej zwięźły (wzrost IG). Jednakże, dodatkowe wiązania między łańcuchami polipeptydowymi, zwłaszcza w glutenie o zwięźłej strukturze (odmiana Igna), powodowały ograniczanie jego rozciągliwości (ϵ_t) i zdolności lepkiego płynięcia (U_C), a właściwości sorpcyjne (WZ) tak zmodyfikowanych białek glutenowych ulegały znacznemu osłabieniu. W przypadku słabego glutenu, o rozluźnionej strukturze (odmiana Roma), te dodatkowe wiązania nie ograniczały jego rozciągliwości (ϵ_t) i przyczyniały się do większego jego uelastycznienia (WEG), a wynikiłe zmiany w konformacji białek glutenowych nie były na tyle istotne, aby wpływać na pogorszenie wodochłonności (WZ) tych białek.

Niewątpliwie, na opisywane odmienne reakcje badanych odmian mogły mieć wpływ różnice w składzie chemicznym mąki i w reaktywności poszczególnych jej składników. Jak już wspomniano, mąka o mocnym glutenie zawiera zazwyczaj więcej glutenin niż ta o słabym glutenie. Z uwagi na wysoką reaktywność tej frakcji [6], mąka o mocnym glutenie może podlegać bardziej znaczącym modyfikacjom. Pod ich wpływem właściwości sorpcyjne i reologiczne glutenu z optymalnych zmieniają się na mniej korzystne, pogarszając przydatność piekarniczą takiego glutenu. Należy zauważyć, że mogły zaistnieć również inne źródła kształtowania się odmiennych reakcji badanych odmian, wiążących się chociażby z różnicami w aktywności enzymatycznej mąki, które bezpośrednio oddziałują na szybkość przemian substancji białkowych, jak i niebiałkowych zawartych w przechowywanej mące. W modyfikowaniu właściwości glutenu szczególnie istotną rolę odgrywają przemiany z udziałem lipidów wolnych [27].

Występowanie odmiennych predyspozycji poszczególnych odmian pszenicy pod względem przydatności przechowalniczej mąki, mogło być również jedną z istotniejszych przyczyn rozbieżności zasygnalizowanych w rozdziale 2.3.2.2, a dotyczących wpływu przechowywania mąki na jej wodochłonność i objętość chleba. Dodatni wpływ na te cechy technologiczne potwierdzały badania Kotancilar'a i in. [78], natomiast badania Srivastava'ego i Rao'ego [140] i Sur'a i in. [143] ujawniały niekorzystne zmiany tych cech pod wpływem przechowywania.

Zaprezentowane wyniki badań są szczególnie cenne dla technologów zajmujących się suszarnictwem ziarna pszenicy oraz przechowalnictwem mąki. Wskazują one bowiem na potrzebę uwzględniania różnic jakościowych surowca przy ustalaniu optymalnych warunków suszenia ziarna pszenicy i przechowywania mąki. Ponadto, ukazują nowe możliwości modelowania jakości wypiekowej ziarna i mąki poprzez właściwe, dostosowane do jakości obrabianego surowca, sterowanie przebiegiem tych procesów. W celu uzyskania istotnej poprawy jakości wypiekowej surowca o słabym glutenie wskazane jest stosowanie wyższych temperatur suszenia ziarna, jak również dłuższych okresów przechowywania mąki. Realizacja tego przedsięwzięcia w praktyce wymagałaby jednakże stosowania czułych narzędzi zarówno do rozróżniania jakości surowca, jak również i monitorowania skutków procesów technologicznych. Szczególnie przydatny do takich zastosowań, co potwierdzają przedstawione wyniki, jest zaproponowany przez autora pracy sposób testowania glutenu świeżo wymytego.

6.3. Przydatność zaproponowanych wskaźników jakościowych glutenu w ocenie wartości wypiekowej ziarna pszenicy

Przeprowadzenie w ramach prezentowanych badań charakterystyki związków występujących między zaproponowanymi wskaźnikami wydajności, wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu a standardowymi wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba dostarczyło wiele danych użytecznych przy wyjaśnianiu rzeczywistej roli ocenianych cech glutenu w procesach wyrobu ciasta chlebowego i jego wypieku, wskazujących na wysoką przydatność zaproponowanych wskaźników jakościowych glutenu do oceny wartości wypiekowej pszenicy.

W przeprowadzonych badaniach za miarę wydajności glutenu przyjęto ilość glutenu suchego (*GLS*), a pominięto charakterystykę ilości glutenu mokrego nie chcąc zamazywać różnic między wydajnością a wodochłonnością glutenu. Takie podejście również znacznie ułatwiło interpretację otrzymanych związków między wydajnością glutenu a wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba.

Prezentowane badania, podobnie jak wyniki badań szeroko cytowanych w przeglądzie literatury, potwierdziły korzystny i silny wpływ glutenu na właści-

wości reologiczne ciasta oceniane przy pomocy farinografu i ekstensografu. Jedynie dla pszenicy jarej stwierdzono spadek liczby stosunkowej, wskazujący na mniejszą oporność ciasta na rozciąganie, wraz ze wzrostem ilości glutenu (*GLS*). Może on wynikać z potwierdzonego faktu, że równocześnie z większą wydajnością, gluten miał mniejszą wytrzymałość mechaniczną (*IG*, ε_t i U_C). Opierając się na wynikach badań Daniel'a i Triboi'ego [33], Ivanov'a i in. [58] i Prieto'ego i in. [123] można przypuszczać, że jedną z przyczyn osłabienia wytrzymałości glutenu mogła być podwyższona zawartość białek gliadynowych, często towarzysząca zwiększonej wydajności glutenu. Niemniej jednak, wzrost ilości glutenu, o obniżonej wytrzymałości, wpływał wyraźnie na zwiększenie objętości chleba i poprawę jego jakości. Należy zauważyć, że takie korzystne oddziaływanie cechy wydajności (*GLS*) na zachowanie się ciasta podczas testu wypiekowego nie wystąpiło u pszenicy ozimej, u której, w odróżnieniu od formy jarej, nie potwierdzono osłabiającego wpływu tej cechy na wytrzymałość mechaniczną glutenu i ciasta. Oznacza to, że zwiększanie ilości glutenu nie zawsze przynosi pozytywny efekt w postaci wzrostu objętości i bonitacji chleba. Z tych względów należy uznać za niewystarczająco wiarygodne prognozowanie przydatności wypiekowej ziarna pszenicy, bazujące wyłącznie na ocenie wydajności glutenu (*GLS*).

Z wydajnością glutenu była dodatnio skorelowana całkowita zawartość wody w świeżo wymyтым glutenie (*CZ*). Wyższa wodochłonność glutenu, jak wskazują badania Bojnanskiej [16], może wynikać z większego udziału białek gliadynowych, a zwłaszcza wysoce hydrofilnych ω -gliadyn, które równocześnie mogą osłabiać jego wytrzymałość mechaniczną. Wskazują na to również otrzymane dla pszenicy jarej zależności między *CZ* a wyróżnikami ekstensograficznymi ciasta. Jednakże u formy ozimej, przy braku osłabiającego wpływu *CZ* na wytrzymałość glutenu, cecha ta oddziaływała na wydłużenie czasu rozwoju i zwiększenie energii ciasta oraz poprawę wartości walorymetrycznej i bonitacji chleba.

Znacznie istotniejszych danych dla wyjaśnienia roli wodochłonności glutenu w kształtowaniu właściwości ciasta i chleba dostarczyła analiza otrzymanych związków z dwoma pozostałymi jej wskaźnikami *WN* i *WZ*. Wynika z niej, że gluten o podwyższonej zdolności magazynowania wody niezwiązanej (*WN*) wpływał na formowanie się ciasta o mniejszej stałości i energii oraz o większym rozmiękczeniu. Z uwagi na nieobecność tego rodzaju wody w procesie wyrabiania ciasta, bezpośredni wpływ na pogorszenie jego właściwości należy raczej wiązać z tworzeniem się w cieście bardziej rozluźnionej sieci glutenowej, której miarodajnym wskaźnikiem, jak już niejednokrotnie wspomniano, jest podwyższona zawartość wody niezwiązanej w wymywanym glutenie.

Odmienne kształtowanie się właściwości reologicznych ciasta stwierdzono w przypadku oddziaływania wodochłonności glutenu ocenianej na podstawie pomiaru zawartości wody związanej (WZ). Gluten wiążący sorpcyjnie większe ilości wody (WZ), a zarazem będący mechanicznie mocniejszy, wpływał na formowanie się ciasta o lepszych właściwościach reologicznych. Spadał stopień rozmiękczenia ciasta, a wzrastała jego stałość i wartość walorymetryczna. Do podobnych wniosków doszli Keya i Hadziyev [65] i Matuz i in. [89], badając powiązania między wodochłonnością mąki, pośrednim wskaźnikiem wodochłonności glutenu, a właściwościami reologicznymi ciasta. Jednakże, oprócz wpływu właściwości sorpcyjnych glutenu (WZ) na poprawę wydajności chleba, wyniki przeprowadzonych badań wskazują na brak związku tej cechy glutenu z objętością chleba i jakością jego miękiszu (bonitacją), co pokrywa się z wynikami badań Matuz'a i in. [89] i Zghal'a i in. [167].

Interpretując słabsze związki wskaźników wodochłonności WN i WZ , a także wskaźników reologicznych glutenu z wyróżnikami jakościowymi chleba należy zauważyć, że ich prawdopodobnym źródłem mogą być modyfikacje termiczne glutenu i innych składników ciasta zachodzące na etapie wypieku. Modyfikacje termiczne mogą zmieniać właściwości mechaniczne ciasta na tyle istotnie, że przewidywanie jego zachowania w procesie wypieku na podstawie pomiarów wykonanych na glutenie surowym staje się znacznie utrudnione. Teza ta znajduje potwierdzenie w występowaniu dodatniej korelacji między WN a objętością chleba, wskazującej, że podczas wypieku ciasta luźniejsza sieć glutenowa, a tym samym słabsza mechanicznie, podlega takim modyfikacjom, w efekcie których umożliwia ona lepsze wyrastanie bochenka chleba. Chcąc poznawać bliżej tego rodzaju modyfikacje wskazane jest opracowanie nowego typu metod przystosowanych do badania właściwości mechanicznych glutenu podczas obróbki termicznej prowadzonej w warunkach zbliżonych do wypieku chleba [103].

Przeprowadzona analiza korelacji badanych wskaźników reologicznych glutenu z wyróżnikami jakościowymi ciasta wykazała, że gluten bardziej rozciągliwy (ϵ_r , U_C) i elastyczny (WEG) przyczyniał się do kształtowania bardziej korzystnych właściwości ciasta ocenianych farinograficznie. Z kolei te cechy glutenu były ujemnie skorelowane z liczbą stosunkową i energią ciasta, w odróżnieniu od zwięzłości glutenu (IG), z którą wyróżniki ekstensograficzne były dodatnio skorelowane. Wyniki te mogą oznaczać, że w procesie wyrabiania ciasta (metoda farinograficzna) są korzystniejsze takie cechy glutenu, jak: większa rozciągliwość (ϵ_r , U_C) i elastyczność (WEG), natomiast podczas testu rozciągania już uformowanego ciasta (metoda ekstensograficzna) istotniejszą rolę odgrywa zwięzłość glutenu (IG), decydująca o większej oporności ciasta na odkształcenia.

Badając korelacje wskaźników reologicznych glutenu z wyróżnikami wyznaczonymi na podstawie próbnego wypieku stwierdzono, że większa elastyczność (*WEG*) i rozciągliwość glutenu (ϵ_t i U_C), odwrotnie niż jego zwięzłość (*IG*), przyczyniały się do wzrostu objętości bochenków chleba i poprawiały jakość ich miękiszu. Odnotowana ujemna korelacja między indeksem glutenu a objętością chleba stoi w sprzeczności z ogólnie panującym poglądem, że większa zwięzłość glutenu, warunkowana zazwyczaj wyższą zawartością w nim wysokocząsteczkowych glutenin, oznacza lepszą jego jakość. Dodatni wpływ tych białek, nie tylko na właściwości mechaniczne glutenu i ciasta, ale także na objętość i jakość chleba potwierdzały liczne badania [5,10,51,52,160]. Z kolei wyniki badań Inakuma'ego i in. [53], Janssen'a i in. [59], Jood'a i in. [62] i Khatkar'a i in. [67] wskazywały, że wysoka jakość glutenu bardziej wiąże się z optymalną proporcją glutenin do gliadyn, czy też glutenin wysokocząsteczkowych do niskocząsteczkowych. Znane są również badania, których wyniki dowiodły, że objętość chleba może być polepszana poprzez wzrost zawartości białek gliadynowych, stosując ich dodatek do mąki [156] bądź w wyniku zwiększonego nawożenia azotowego roślin [114, 123]. Słuszność tego ostatniego poglądu mogą potwierdzać również prezentowane badania autora, w których powiązано wzrost objętości chleba z osłabianiem się wytrzymałości mechanicznej glutenu. Właśnie jedną z prawdopodobnych przyczyn odnotowanego osłabiania się glutenu mógł być zwiększający się udział białek gliadynowych. Niemniej jednak z całą stanowczością należy podkreślić, że gluten zarówno zbyt zwięzły, jak również za bardzo rozmiękczony nie będzie właściwie odgrywał swojej roli w procesie wyrabiania ciasta i wypieku. Dopiero optymalne właściwości fizyczne glutenu w połączeniu z odpowiednią jego ilością warunkują najlepszą jakość ciasta i chleba. Stąd bez wątpienia optymalizującym działaniem będzie zwiększanie zawartości glutenin wysokocząsteczkowych w glutenie słabym, zaś w przypadku glutenu bardzo zwięzłego takim działaniem będzie zwiększanie w nim zawartości gliadyn.

Podsumowując charakterystykę związków między rozpatrywanymi cechami glutenu, ciasta i chleba można stwierdzić, że wykorzystanie w przeprowadzonych badaniach zaproponowanego sposobu pomiaru wodorochłonności i właściwości reologicznych pozwoliło na lepsze poznanie roli glutenu i poszczególnych jego cech w procesach wyrabiania ciasta i wypieku oraz potwierdzenie wysokiej użyteczności zaproponowanych wskaźników jakościowych glutenu w ocenie wartości wypiekowej ziarna pszenicy. Szczególnie cenne dla tej oceny okazało się prognozowanie oparte na równoczesnym analizowaniu różnych cech jakościowych, zarówno stopnia rozluźnienia struktury wymytego glutenu (*WN*), jak również jego właściwości sorpcyjnych (*WZ*) i lepkością (*IG*, *WEG*, ϵ_t i U_C) oraz na łączeniu tej analizy z oceną jego ilości (*GLS*). Wzbogacenie oceny ilościowej glutenu o dodatkowe pomiary zaproponowanych przez autora wskaźników jakościowych uczyni określanie wartości wypiekowej pszenicy bardziej obiektywne.

7. WNIOSKI

1. Zastosowanie zmodyfikowanych i nowo opracowanych procedur do testowania wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu pszenicy umożliwiło przeprowadzenie obiektywnej i wszechstronnej analizy zmian tych właściwości pod wpływem badanych czynników i procesów oraz roli glutenu w kształtowaniu jakości ciasta i chleba.

2. Uwzględnienie w ocenie wodochłonności, obok zawartości wody sorpcyjnie związanej (WZ) przez gluten w trakcie jego wymywania, również zawartości wody niezwiązanej (WN), znajdującej się w wolnych przestrzeniach sieci glutenowej, pozwoliło na lepsze poznanie przyczyn i skutków rozluźniania się struktury tej sieci.

3. Wykorzystanie testów wytłaczania i pełzania do oceny skutków oddziaływania badanych czynników i procesów umożliwiło zarejestrowanie istotnych zmian we właściwościach reologicznych glutenu, które nie były wyczuwalne przy pomocy metody standardowej (IG). Wykazano wysoką przydatność tych testów do monitorowania procesów suszenia ziarna i przechowywania mąki.

4. Zakres i charakter zmian przyjętych w pracy wskaźników wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu pod wpływem wybranych czynników środowiskowych wzrostu roślin oraz procesów fizjologicznych i technologicznych był w przeważającym stopniu determinowany genotypem odmiany pszenicy.

5. Zwiększone nawożenie azotowe powodowało osłabienie wytrzymałości mechanicznej glutenu. Obniżał się indeks glutenu (IG) oraz wzrastało odkształcenie całkowite walca glutenu (ϵ) i udział lepkiego płynięcia (U_C). Z drugiej strony czynnik ten wpływał na poprawę wodochłonności (WZ) i elastyczności glutenu (WEG).

6. Największy wpływ na wodochłonność i właściwości reologiczne glutenu wywierał okres wzrostu ziarniaka, do osiągnięcia dojrzałości mleczej. Okres dojrzewania ziarna wpływał głównie na poprawę rozciągliwości glutenu (ϵ_t), zaś opóźnianie terminu zbioru prowadziło do jej spadku oraz wzrostu indeksu glutenu.

7. Porastanie ziarna, jak również intensywne nawilżanie ziarna wpływało na rozluźnianie struktury wymywanego glutenu. Wzrastała zawartość wody niezwiązanej i rozciągliwość glutenu, a obniżała się elastyczność i indeks glutenu. Natomiast odwrotne zmiany we właściwościach glutenu powodowało podwyższanie temperatury suszenia ziarna.

8. Proces porastania w początkowej fazie wpływał na wzrost zdolności sorpcyjnych glutenu (WZ). Równie korzystnie na wodochłonność, a także na elastyczność glutenu oddziaływało suszenie ziarna o słabym glutenie.

9. Wydłużanie przechowywania mąki o słabym glutenie przyczyniało się do poprawy jego jakości. Obniżała się zawartość wody niezwiązanej oraz wzrastał indeks glutenu i wskaźnik jego elastyczności. Mąka o mocnym glutenie charakte-

ryzowała się niską przydatnością przechowalniczą z powodu szybkiej utraty przez gluten zdolności sorpcyjnych i elastyczności, a także nadmiernej jego zwięzłości.

10. Wskaźniki wodochłonności WN i WZ były przeciwstawnie skorelowane z kształtowaniem się właściwości reologicznych glutenu. Wzrost WN wpływał na obniżenie wytrzymałości mechanicznej glutenu (IG) i zwiększenie jego rozciągliwości (ϵ_t). Natomiast wzrost WZ sprzyjał wzmacnianiu się glutenu (IG) i poprawie jego elastyczności (WEG).

11. Gluten o luźniejszej strukturze, mający zdolność magazynowania większych ilości wody niezwiązanej (WN), pogarszał jakość ciasta chlebowego. Zwiększał rozmięczenie ciasta oraz obniżał jego stałość i energię. Gluten o podwyższonych zdolnościach sorpcyjnego wiązania wody (WZ) wpływał natomiast na poprawę jakości ciasta. Wzrastała wartość walorymetryczna i stałość ciasta oraz zmniejszało się jego rozmięczenie.

12. Gluten charakteryzujący się wyższą całkowitą zawartością wody (CZ) nadawał ciastu większą rozciągliwość, obniżając liczbę stosunkową, co podczas wypieku przekładało się na podwyższoną objętość i bonitację chleba.

13. Właściwości reologiczne glutenu, charakteryzowane przy pomocy WEG , ϵ_t i U_C , wpływały korzystnie na właściwości ciasta oceniane przy pomocy farinografu, wydłużając rozwój i stałość ciasta oraz poprawiając wartość walorymetryczną, a niekorzystnie na cechy ciasta oceniane przy pomocy ekstensografu, obniżając liczbę stosunkową i energię ciasta.

14. Wyższa elastyczność (WEG) i rozciągliwość glutenu (ϵ_t i U_C) oraz niższa jego zwięzłość (IG) wpływały na formowanie się podczas wypieku bochenka o większej objętości i lepszej jakości miększu.

15. Przedstawiona charakterystyka wodochłonności i właściwości reologicznych glutenu oraz czynników i procesów na nie oddziałujących, a także związków tych cech z jakością ciasta i chleba, wskazuje na użyteczność zaproponowanego sposobu testowania właściwości fizycznych glutenu świeżo wymytego, jako czułego narzędzia, w monitorowaniu skutków procesów fizjologicznych i technologicznych oraz w ocenie wartości wypiekowej ziarna pszenicy.

8. PIŚMIENNICTWO

1. **Achremowicz B., Borkowska H., Styk B., Grundas S.:** Wpływ nawożenia azotowego na jakość glutenu pszenicy jarej. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 193, 29-34, 1995.
2. **Altenbach S.B., Kothari K.M., Lieu D.:** Environmental conditions during wheat grain development alter temporal regulation of major gluten genes. *Cereal Chemistry*, 79, 279-285, 2002.
3. **Andersson R., Hamalainen M., Aman P.:** Predictive modelling of the bread-making performance and dough properties of wheat. *Journal of Cereal Science*, 20, 129-138, 1994.
4. **Appleford N.E.J., Lenton J.R.:** Hormonal regulation of alpha-amylase gene expression in germinating wheat (*Triticum aestivum*) grains. *Physiologia Plantarum*, 100, 534-542, 1997.
5. **Armero E., Collar C.:** Crumb firming kinetics of wheat breads with anti-staling additives. *Journal of Cereal Science*, 28, 165-174, 1998.
6. **Autran J.C., Ait-Mouh O., Feillet P.:** Thermal modification of gluten as related to end-use properties. In: *Wheat is unique*, ed. Y. Pomeranz, AACC, St. Paul, 563-593, 1989.
7. **Axford D.W.E., McDermott E.E., Redman D.G.:** Note on the sodium dodecyl sulfate test of breadmaking quality; Comparison with Pelshenke and Zeleny tests. *Cereal Chemistry*, 6, 582-584, 1979.
8. **Ayoub M., Guertin S., Fregeau-Reid J., Smith D.L.:** Nitrogen fertilizer effect on breadmaking quality of hard red spring wheat in eastern Canada. *Crop Science*, 34, 1346-1352, 1994.
9. **Balla A., Blecker C., Razafindralambo H., Paquot H.:** Interfacial properties of wheat gluten films from flours with different breadmaking qualities (in French). *Sciences des Aliments*, 17, 271-278, 1997.
10. **Beasley H.L., Uthayakumaran S., Stoddard F.L., Partridge S.J., Daqiq L., Chong P., Bekes F.:** Synergistic and additive effects of three high molecular weight glutenin subunit loci. II. Effects on wheat dough functionality and end-use quality. *Cereal Chemistry*, 79, 301-307, 2002.
11. **Berot S., Chiron H., Nicolas M., Gautier S., Godon B., Papineau Y.:** Pilot scale preparation of wheat gluten protein fractions. II. Technological properties of the fractions. *International Journal of Food Science and Technology*, 31, 77-83, 1996.
12. **Bhattacharya M.:** Slit rheometer studies of wheat flour dough. *Journal of texture Studies*, 24, 391-409, 1993.
13. **Bichoński A., Stachowicz M.:** Powiązanie białek gliadynowych i gluteninowych z wybranymi cechami technologicznymi rodów i odmian pszenicy ozimej. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 208, 43-47, 1998.
14. **Bloksma A. H., Bushuk W.:** Rheology and chemistry of dough. In: *Wheat: Chemistry and technology*, Vol. II, Ed. Y. Pomeranz, AACC Inc., St. Paul, MN, 131-217, 1988.
15. **Blumenthal C.S., Barlow E.W.R., Wrigley C.W.:** Growth environment and wheat quality: the effect of heat stress on dough properties and gluten proteins. *Journal of Cereal Science*, 18, 3-21, 1993.
16. **Bojnanska T.:** Protein fractions in relation to selected quality traits of winter wheat (in Slovakian). *Rostlinna Vyroba*, 42, 205-209, 1996.
17. **Bombara N., Anon M.C., Pilosof A.M.R.:** Functional properties of protease modified wheat flours. *Food Science and Technology*, 30, 441-447, 1997.
18. **Borkowska H., Grundas S., Styk B.:** Influence of nitrogen fertilisation of winter wheat on its gluten quality. *International Agrophysics*, 13, 333-335, 1999.
19. **Briarty L.G., Hughes C.E., Evers A.D.:** The developing endosperm of wheat – A stereological analysis. *Annals of Botany*, 44, 641-658, 1979.

20. **Bushuk W., Wadhawan C.:** Wheat gluten is good not only for breadmaking. In: Wheat is unique. Ed. Y. Pomeranz, AACC, St. Paul, MN, 263-275, 1989.
21. **Bushuk W., Wrigley C.W.:** Glutenin in developing wheat grain. *Cereal Chemistry*, 48, 448-455, 1971.
22. **Cacak-Pietrzak G., Ceglińska A., Haber T., Sęk M.:** Wpływ nawożenia azotowego na wartość technologiczną wybranych odmian pszenicy ozimej. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 7, 23-26, 1998.
23. **Callejo M.J., Gil M.J., Rodriguez G., Ruiz M.V.:** Effect of gluten addition and storage time on white pan bread quality: instrumental evaluation. *Zeitschrift fur Lebensmittel Untersuchung und Forchung A*, 208, 27-32, 1999.
24. **Cenkowski S., Dexter J.E., Scanlon M.G.:** Mechanical compaction of flour: the effect of storage temperature in dough rheological properties. *Canadian Agricultural Engineering*, 42, 33-41, 2000.
25. **Chang Y.K., Ferrari M.C.:** A new apparatus for the evaluation of rheological properties of wheat gluten. *Acta Alimentaria*, 29, 169-179, 2000.
26. **Cherian G., Chinachoti P.:** Action of oxidants on water sorption, (²H) nuclear magnetic resonance mobility and glass transition behaviour of gluten. *Cereal Chemistry*, 74, 312-317, 1997.
27. **Chung O.K.:** Functional significance of wheat lipids. In: Wheat is unique, ed Y. Pomeranz, AACC, St. Paul, 341-368, 1989.
28. **Cleemput G., Roels S.P., Van Oort M., Grobet P.J., Delcour J.A.:** Heterogeneity in the structure of water-soluble arabinoxylans in European wheat flours of variable bread-making quality. *Cereal Chemistry*, 70, 324-329, 1993.
29. **Clements R.L.:** Effects of metal-complexing agents on water binding by gluten. *Cereal Chemistry*, 69, 315-320, 1992.
30. **Curic D., Karlovic D., Tusak D., Petrovic B., Dugum J.:** Gluten as a standard of wheat flour quality. *Food Technology and Biotechnology*, 39, 353-361, 2001.
31. **Czuchajowska Z., Paszczyńska B.:** Is wet gluten good for baking? *Cereal chemistry*, 73 (4), 483-489, 1996.
32. **Czuchajowska Z., Smolinski S.:** Instrumental measurements of raw and cooked gluten texture. *Cereal Foods World*, 42, 526-532, 1997.
33. **Daniel C., Triboi E.:** Effect of temperature and nitrogen nutrition on the grain composition of winter wheat: effects on gliadin content and composition. *Journal of Cereal Science*, 32, 45-56, 2000.
34. **Dobraszczyk B.J.:** The physics of baking: rheological and polymer molecular structure-function relationships in breadmaking. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 12/53, 24-31, 2003.
35. **Dominquez F., Cejudo F.J.:** Pattern of endoproteolysis following wheat grain germination. *Physiologia Plantarum*, 95, 253-259, 1995.
36. **Dominquez F., Cejudo F.J.:** Characterization of the endoproteases appearing during wheat grain development. *Plant Physiology*, 112, 1211-1217, 1996.
37. **Dreese P.C., Hoseney R.C.:** The effect of water-extracted solubles from gluten on its baking and rheological properties. *Cereal Chemistry*, 67, 400-404, 1990.
38. **Dupont F.M., Vensel W.H., Chan R., Kasarda D.D.:** Characterization of the 1B-type ω-gliadins from *Triticum aestivum* cultivar Butte. *Cereal Chemistry*, 77, 607-614, 2000.

39. **Eliasson A.C., Lundh G.:** Rheological and interfacial behaviour of some wheat protein fractions. *Journal of Texture Studies*, 20, 431-441, 1989.
40. **Ellilae M.:** Chemical modification of the gluten washing procedure. *Proceedings from ICC'89 Symposium*, June 13-15, Lahti, Finland, 173-184, 1989.
41. **Freeman, T.P., Shelton, D.R., Bjerke, J.M., Skierkowski, K.:** The ultrastructure of wheat gluten: Variation related to sample preparation. *Cereal Chemistry*, 68, 492-498, 1991.
42. **Gianibelli M.C., Sarandon S.J.:** Effect of late nitrogen fertilization on the gluten content and technological quality of bread wheat (*Triticum aestivum* L.). In "Gluten proteins", ed. Bushuk W., Tkachuk R., AACC, St. Paul, MN, 755-764, 1991.
43. **Grant A., Belton P.S., Colquhoun I.J., Parker M.L., Plijter J.J., Shewry P.R., Tatham A.S., Wellner N.:** Effects of temperature on sorption of water by gluten determined using deuterium nuclear magnetic resonance. *Cereal Chemistry*, 76, 219-226, 1999.
44. **Grundas S.:** Wheat. In: *Encyclopaedia of Food Science, Food Technology and Nutrition*. Academic Press Inc., London, 4875-4881, 1993.
45. **Grzesiuk S., Kulka K.:** *Biologia ziarniaków zbóż*. PWN, Warszawa, 1988.
46. **Gudaczewski W., Fornal L., Kobosko A.:** Jakość technologiczna ziarna pszenicy przechowywanej w warunkach wysokiej wilgotności. Cz. I. Jakość technologiczna. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 5, 27-30, 1999.
47. **Gunasekaran S., Ak M.M.:** Dynamic oscillatory shear testing of foods – selected applications. *Trends in Food Science and Technology*, 11, 155-127, 2000.
48. **Gupta R.B., Shepherd K.W.:** Two-step one-dimensional SDS-PAGE analysis of LMW subunits of glutenin. I. Variation and genetic control of subunits in hexaploid wheats. *Theoretical and Applied Genetics*, 80, 65-74, 1990.
49. **Hansen L., Rose M.S.:** Sensory acceptability is inversely related to development of fat rancidity in bread made from stored flour. *Journal of the American Dietetic Association*, 96, 792-793, 1996.
50. **Hargreaves J., Popineau Y., Marion D., Lefebvre J., Meste M.:** Gluten viscoelasticity is not lipid-mediated. A rheological and molecular flexibility study on lipid and non-prolamin protein depleted gluteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43, 1170-1176, 1995.
51. **Huang D.Y., Khan K.:** Quantitative determination of high molecular weight glutenin subunits of hard red spring wheat by SDS-PAGE. I. Quantitative effects of total amounts on breeding quality characteristics. *Cereal Chemistry*, 74, 781-785, 1997.
52. **Huang D.Y., Khan K.:** Quantitative determination of high molecular weight glutenin subunits of hard red spring wheat by SDS-PAGE. II. Quantitative effects of individual subunits on breeding quality characteristics. *Cereal Chemistry*, 74, 786-790, 1997.
53. **Inakuma T., Aibara S., Morita Y.:** The role of glutenin and gliadin in physical dough properties of wheat flour. Comparison of farinograph properties of durum and bread wheat flours (in Japanese). *Journal of Japanese Society of Food Science and Technology*, 36, 437-447, 1989.
54. International Association for Cereal Science and Technology: ICC Standard No. 114/1. Method for using the Brabender Extensograph. 1992.
55. International Association for Cereal Science and Technology: ICC Standard No. 115/1. Method for using the Brabender Farinograph. 1992.
56. International Association for Cereal Science and Technology: ICC Standard No. 155. Determination of wet gluten quantity and quality (Gluten index ac. to Perten) of whole wheat meal and wheat flour (*Triticum aestivum*). 1994.

57. International Association for Cereal Science and Technology: ICC Standard No. 107/1. Determination of the "Falling Number" according to Hagberg – Perten as a measure of the degree of alpha-amylase activity in grain and flour. 1995.
58. **Ivanov P., Todrov I., Stoeva I., Ivanova I.:** Storage proteins characterization of a group of new Bulgarian high breadmaking quality wheat lines. *Cereal Research Communications*, 26, 447-454, 1998.
59. **Janssen A.M., Vliet T., Vereijken J.M.:** Rheological behaviour of wheat glutens at small and large deformations. Comparisons of two glutens differing in breadmaking potential. *Journal of Cereal Science*, 23, 19-31, 1996.
60. **Jennings A.C., Morton R.K.:** Changes in carbohydrate, protein and non-protein nitrogenous compounds of developing wheat grain. *Australian Journal of Biological Science*, 16, 318-331, 1963.
61. **Johansson E., Svensson G.:** Influence of yearly weather variation and fertilizer rate on bread-making quality in Swedish grown wheats containing HMW glutenin subunits 2+12 or 5+10 cultivated during the period 1990-96. *Journal of Agriculture Science*, 132, 13-22, 1999.
62. **Jood S., Schofield J.D., Tsiami A.A., Bollecker S.:** Effect of composition of glutenin subfractions on rheological properties of wheat. *Journal of Food Biochemistry*, 24, 275-298, 2000.
63. **Jurkovic Z., Sudar R., Drezner G., Horvat D.:** The HMW glutenin subunit composition of OS wheat cultivars and their relation with bread-making quality. *Cereal Research Communications*, 28, 271-277, 2000.
64. **Kaczyński L.:** Pszenica ozima. Syntezy Wyników Doświadczeń Odmianowych, COBORU, 1163, 9-34, 1999.
65. **Keya E.L., Hadiyev H.:** Implications of starch water binding capacity and affinity for gluten in dough rheological behaviour. *Proceedings from ICC'89 Symposium*, June 13-15, Lahti, Finland, 347-354, 1989.
66. **Khan K., Tamminga G., Lukow O.:** The effect of wheat flour proteins on mixing and baking – correlations with protein fractions and high molecular weight glutenin subunit composition by gel electrophoresis. *Cereal Chemistry*, 66, 391-396, 1989.
67. **Khatkar B.S., Bell A.E., Schofield J.D.:** The dynamic rheological properties of glutens and gluten sub-fractions from wheats of good and poor breadmaking quality. *Journal of Cereal Science*, 22, 29-44, 1995.
68. **Khatkar B.S., Schofield J.D.:** Molecular and physico-chemical basis of breadmaking-properties of wheat gluten proteins: a critical appraisal. *Journal of Food Science and Technology, India*, 34, 85-102, 1997.
69. **Kieffer R., Kim J.J., Belitz H.D.:** Heating of wheat. II. Rheological and baking behaviour and changes in Osborne fractions (in German). *Zeitschrift fur Lebensmittel Untersuchung und Forschung*, 196, 526-531, 1993.
70. **Kieffer R., Stempfl C., Haas S., Kim J.J., Belitz H.D.:** Wheat during maturation: constituents, rheological and baking properties (in German). *Zeitschrift fur Lebensmittel Untersuchung und Forschung*, 187, 339-346, 1988.
71. **Kieffer R., Wieser H., Henderson M.H., Graveland A.:** Correlations of the breadmaking performance of wheat flour with rheological measurements on a micro-scale. *Journal of Cereal Science*, 27, 53-60, 1998.

72. **Kim J.J., Kieffer R., Belitz H.D.:** Rheological properties of reconstituted wheat glens containing differing properties of prolamin fractions from non-wheat cereals (in German). *Zeitschrift fur Lebensmittel Untersuchung und Forschung*, 186, 16-21, 1988.
73. **Klockiewicz-Kamińska E.:** Odmiany gwarancją jakości. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 6, 10-11 i 28, 2001.
74. **Klockiewicz-Kamińska E., Brzeziński W.J.:** Metoda oceny i klasyfikacji jakościowej odmian pszenicy. *Wiadomości Odmianoznawcze*, z. 67, COBORU, Słupia Wielka, 1997.
75. **Kłupczyński Z., Ralcewicz M.:** Wpływ nawożenia azotem na plon i wartość technologiczną wybranych odmian pszenicy ozimej. *Roczniki AR Poznań, Rolnictwo*, 52, 17-24, 1998.
76. **Kokelaar J.J., Vliet T., Prins A.:** Strain hardening properties and extensibility of flour and gluten doughs in relation to breadmaking performance. *Journal of Cereal Science*, 24, 199-214, 1996.
77. **Konopka I., Rotkiewicz D.:** Jakość technologiczna ziarna pszenicy przechowywanej w warunkach wysokiej wilgotności. Cz. II. Przemiany lipidów a cechy reologiczne ciasta. *Przegląd Zbożowo-Młynarski*, 5, 31-32, 1999.
78. **Kotancilar H.G., Celik I., Ertugay Z., Elgun A.:** An investigation on chemical alterations of the flours stored with different packaging materials with and without ingredients (in Turkish). *Gida*, 22, 59-65, 1997.
79. **Larsson H., Eliasson A.C.:** Phase separation of wheat flour dough studied by ultracentrifugation and stress relaxation. II. Influence of mixing time, ascorbic acid and lipids. *Cereal Chemistry*, 73, 25-31, 1996.
80. **Lavelli V., Guerrieri N., Cerletti P.:** Controlled reduction study of modifications induced by gradual heating in gluten proteins. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44, 2549-2555, 1996.
81. **Leelavathi K., Vetrmani R., Rao P.H.:** Changes in the functional characteristics of wheat during soaking and subsequent germination. *Journal of Food Science and Technology, India*, 27, 349-354, 1990.
82. **Lewandowska B.:** Pszenica jara. Syntezy Wyników Doświadczeń Odmianowych, COBORU, z. 1160, 9-30, 1999.
83. **Lorenz K., Roewe-Smith P., Kulp K., Bates L.:** Preharvest sprouting of winter wheat. II. Amino acid composition and functionality of flour and flour fractions. *Cereal Chemistry*, 60, 360-366, 1983.
84. **Lukow O.M., Bushuk W.:** Influence of germination on wheat quality. I. Functional (breadmaking) and biochemical properties. *Cereal Chemistry*, 61, 336-339, 1984.
85. **Lundh G., Mac Ritchie F.:** Size exclusion HPLC characterization of gluten protein fractions varying in breadmaking potential. *Journal of Cereal Science*, 10, 247-253, 1989.
86. **Lu D., Kawamura S., Itoh K.:** Fundamental studies on the post-Harvest process of high moisture content wheat (Part 1). First-step drying of high moisture content wheat (in Japanese). *Memoirs of the Faculty of Agriculture, Hokkaido University*, 21, 1-9, 1998.
87. **Luo C., Branlard G., Griffin W.B., McNeil D.L.:** The effect of nitrogen and sulphur fertilisation and their interaction with genotype on wheat glutenins and quality parameters. *Journal of Cereal Science*, 31, 185-194, 2000.
88. **Malkki Y., Sorvaniemi J., Myllymaki O., Peuhkuri J., Pessa E.:** Wheat fractionation and utilization. In: *Wheat is unique*, ed. Y. Pomeranz, AACC, St. Paul, 457-466, 1989.
89. **Matuz J., Markovics E., Acs E., Veba A.:** Study of relationships between the technological quality characters of flour of winter wheat cultivars (in Hungarian). *Novenytermeles*, 48, 243-253, 1999.

90. **Micelli F., Martin M. Zerbi G.:** Yield, quality and nitrogen efficiency in winter wheat fertilized with increasing N levels at different times. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 168, 337-344, 1992.
91. **Michalik I., Petovsky P.:** Dynamics of the activity of some hydrolytic enzymes and the trypsin inhibitor in winter wheat grain during maturation. *Acta Fytotechnica*, 52, 5-18, 1997.
92. **Mikhaylenko G.G., Czuchajowska Z., Baik B.K., Kidwell K.K.:** Environmental influences on flour composition, dough rheology and baking quality of spring wheat. *Cereal Chemistry*, 77, 507-511, 2000.
93. **Miller K.A., Hoseney R.C.:** Evaluating vital wheat gluten quality. *Cereal Foods World*, 41, 412-416, 1996.
94. **Miller K.A., Hoseney R.C.:** Effect of oxidation on the dynamic rheological properties of wheat flour water doughs. *Cereal Chemistry*, 76, 100-104, 1999.
95. **Mimouni B., Robin J.M., Azanza J.L., Raymond J.:** Wheat flour properties: isolation and functionality of gliadin and HMW glutenin enriched fractions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 78, 423-428, 1998.
96. **Miś A.:** Some methodological aspects of determining wet gluten quality by the glutomatic method. *International Agrophysics*, 14, 263-267, 2000.
97. **Miś A.:** Wpływ stadium dojrzałości ziarna pszenicy i terminu zbioru na właściwości glutenu mokrego. *Acta Agrophysica*, 37, 131-144, 2000.
98. **Miś A.:** Wpływ temperatury suszenia ziarna pszenicy i jego wilgotności na właściwości fizyczne glutenu mokrego. *Acta Agrophysics*, 46, 115-125, 2001.
99. **Miś A.:** Ocena właściwości reologicznych glutenu mokrego przy pomocy testu pełzania. *Acta Agrophysica*, 46, 127-144, 2001.
100. **Miś A.:** Changes in water absorption of gluten as a result of sprouting of wheat grain. *International Agrophysics*, 17, 25-30, 2003.
101. **Miś A.:** Influence of the storage of wheat flour on the physical properties of gluten. *International Agrophysics*, 17, 71-75, 2003.
102. **Miś A., Grundas S.:** Influence of wheat N-fertilisation and grain moistening on the physical properties of wet gluten. *International Agrophysics*, 15, 31-35, 2001.
103. **Miś A., Rusinek R.:** Pomiar właściwości mechanicznych błon glutenowych podczas obróbki termicznej. *Acta Agrophysica*, 4(2), 419-429, 2004.
104. **Mohsenin N. N.:** Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach Science Publishers, 1970.
105. **Morad M.M., Rubenthaler G.L.:** Germination of soft white Wheat and its effect in flour fractions, breadmaking, and crumb firmness. *Cereal Chemistry*, 60, 413-417, 1983.
106. **Muller S., Wieser H.:** The location of disulphide bonds in monomeric γ -gliadins. *Journal of Cereal Science*, 26, 169-176, 1997.
107. **Nakatsu S.:** Effects of wetting treatment period and moisture content on water uptake by wheat grain during germination and alpha-amylase activity. *Japanese Journal of Crop Science*, 67, 165-169, 1998.
108. **Nierle W., Kersting H.J., Buermann I.:** Changes of physical properties of wheat gluten and starch as a function of removing some attending substances. *Starch/Stärke*, 50, 493-499, 1998.
109. **Ohm J.B., Chung O.K.:** Gluten, pasting and mixograph parameters of hard winter wheat flours in relation to breadmaking. *Cereal Chemistry*, 76, 606-613, 1999.

110. **Ohm J.B., Chung O.K.:** Relationships of free lipids with quality factors in hard winter wheat flours. *Cereal Chemistry*, 79, 274-278, 2002.
111. **Osborne T.B.:** The protein of the wheat kernel. Publication No. 84. Carnegie Institute, Washington, DC, 1907.
112. **Pechanek U., Karger A., Groeger S., Charvat B., Schoeggel G., Lelley T.:** Effect of nitrogen fertilization on quantity of flour protein components, dough properties and breadmaking quality of wheat. *Cereal Chemistry*, 74, 800-805, 1997.
113. **Peltonen J.:** Ear developmental stage used for timing supplemental nitrogen application to spring wheat. *Crop Science*, 32, 1029-1033, 1992.
114. **Peltonen J., Virtanen A.:** Effect of nitrogen fertilizers differing in release characteristics on the quantity of storage proteins in wheat. *Cereal Chemistry*, 71, 1-5, 1994.
115. **Perten H.:** Rapid measurement of wet gluten quality by the gluten index. *Cereal Foods World*, 35, 401-405, 1990.
116. **Perten H.:** Gluten index – a rapid method for measuring wet gluten characteristics. Proceedings from ICC'89 Symposium, June 13-15, Lahti, Finland, 1989.
117. **Perten J.:** Glutomatic System 4 + 2 – a new rapid performance test to classify wheat for suitable end use (in German). *Getreide, Mehl und Brot*, 49, 349-351, 1995.
118. **Petrofsky K.E., Hoseney R.C.:** Rheological properties of dough made with starch and gluten from several cereal sources. *Cereal Chemistry*, 72, 53-58, 1995.
119. **Pirozi M.R., Germani R.:** Effect of storage on the technological properties of the flour of wheat cultivars grown in Brazil (in Portuguese). *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 41, 155-169, 1998.
120. **Podolska G., Stankowski S.:** Plonowanie i jakość ziarna pszenicy w zależności od gęstości siewu i dawki nawożenia azotem. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 218 i 219, 127-136, 2001.
121. **Pomeranz Y.:** Composition and functionality of wheat flour components. In: *Wheat: Chemistry and Technology*, Vol. II, Ed. Y. Pomeranz, AACC Inc., St. Paul, MN, 219-370, 1988.
122. **Preston K.R., Dexter J.E., Kruger J.E.:** Relationship of exoproteolytic and endoproteolytic activity to storage protein hydrolysis in germinating durum and hard red spring wheat. *Cereal Chemistry*, 55, 877-888, 1978.
123. **Prieto J.A., Kelfkens M., Weegels P.L., Hamer R.J.:** Variations in the gliadin pattern of flour and isolated gluten on nitrogen application. Implications for baking potential and rheological properties. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und Forschung*, 194, 337-343, 1992.
124. **Ragasits I.:** Effect of drying on the baking quality of wheat. *Cereal Research Communications*, 21, 87-92, 1993.
125. **Ragasits I., Nemeth I.:** Effect of potassium fertilization on the yield and baking quality of wheat. *Acta Agronomica Hungarica*, 42, 311-314, 1993.
126. **Rao P.H., Rao H.M.:** Effect of incorporating wheat bran on the rheological characteristics and bread making quality of flour. *Journal of Food Science and Technology – India*, 28, 92-97, 1991.
127. **Robertson G.H., Cao T.:** Substitution of concentrated ethanol for water in the laboratory washing fractionation of protein and starch from hydrated wheat flour. *Cereal Chemistry*, 75, 508-513, 1998.
128. **Roels S.P., Sindic M., Deroanne C., Delcour J.A.:** Protein composition and agglomeration tendency of gluten isolated from European wheats (*Triticum aestivum* L.) in a batter system. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 1344-1349, 1998.
129. **Rogers W.J., Payne P.I., Seekings J.A., Sayers E.J.:** Effect on breadmaking quality of x-type and y-type high molecular weight subunits of glutenin. *Journal of Cereal Science*, 14, 209-221, 1991.

130. **Rothkaehl J.:** Analiza przyczyn powstawania błędów przy wykonywaniu oznaczania ilości i rozpuszczalności glutenu według normy PN-77/A-74041 "Ziarno zbóż i przetwory zbożowe – Oznaczanie ilości i jakości glutenu". Przegląd Zbożowo-Młynarski, 12, 29-32, 1998.
131. **Rothkaehl J.:** Ocena podstawowych cech technologicznych ziarna pszenicy ze zbiorów 2000 roku. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 1, 2-7, 2001.
132. **Rothkaehl J.:** Ocena podstawowych cech technologicznych ziarna pszenicy ze zbiorów 2002 roku. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 1, 12-16, 2003.
133. **Rothkaehl J.:** Ocena podstawowych cech technologicznych ziarna pszenicy ze zbiorów 2003 roku. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 1, 8-12, 2004.
134. **Rothkaehl J., Kosiewicz D.:** Wpływ warunków i czasu przechowywania w okresie dojrzewania późniwego na zmiany ilości i jakości glutenu w ziarnie pszenicy. Przegląd Zbożowo-Młynarski, 12, 25-29, 1998.
135. **Sadkiewicz K., Sadkiewicz J.:** Urządzenia pomiarowo-badawcze dla przetwórstwa zbożowo-mącznego. Wydawnictwa Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej, Bydgoszcz, 1998.
136. **Schoeggl G., Werteker M.:** Determination of wheat protein quality with the gluten index (in German). Allgemeiner Muehlen Markt, 96, 279-282, 1995.
137. **Shewry P.R., Halford N.G., Tatham A.S.:** The high molecular weight subunits of wheat glutenin. Journal of Cereal Science, 15, 105-120, 1992.
138. **Shi Y.S., Zhao Y.M.:** Variations in baking characteristics of wheat treated by heat (in Chinese). Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 11, 5-11, 1996.
139. **Singh H., Singh N., Kaur L., Saxena S.K.:** Effect of sprouting conditions on functional and dynamic rheological properties of wheat. Journal of Food Engineering, 47, 23-29, 2001.
140. **Srivastava A.K., Rao P.H.:** Changes in the pasting, rheological and baking qualities of flour during short term storage. Journal of Food Science and Technology, India, 28, 153-156, 1991.
141. **Strutyńska K.:** Podstawy suszarnictwa zbóż. W: Suszarnie i urządzenia do aktywnego wietrzenia. WNT, Warszawa, 71-129, 1972.
142. **Subda H.:** Assessment of chemical composition of flour and its effect on baking characteristics of wheat. Polish Journal of Food and Nutrition Science, 42, 15-21, 1992.
143. **Sur R., Nagi H.P.S., Sharma S., Sekhon K.S.:** Storage changes in the quality of sound and sprouted flour. Plant Food for Human Nutrition, 44, 35-44, 1993.
144. **Tanacs L., Matuz J., Gero L., Kovacs K.:** Effect of NPK fertiliser application and year on the valorigraphic quality of wheat cultivars (in Hungarian). Novenytermeles, 43, 195-203, 1994.
145. **Taylor J.R.N., Blyth M.E., Snyman E., Randall P.G.:** Evaluation of simple methods for the detection of heat damage in wheat. South African Journal of Food Science and Nutrition, 8, 96-101, 1996.
146. **Teama E.A., Dawood R.A., Kheiralla K.A.:** Quality response of some spring wheat cultivars to different nitrogen fertilizer rates. Assiut Journal of Agricultural Sciences, 24, 137-161, 1993.
147. **Toma Z.G., Moraru K.V.:** Composition of proteins in germinating grain of different varieties winter bread wheat (in Russian). Buletinul Academiei de Stiinte a Republicii Moldova, Stiinte Biologice si Chemiche, 1, 14-17, 1993.
148. **Ugarcic-Hardi Z., Hackenberger D.:** Influence of drying temperature on chemical composition of certain Croatian winter wheats. Acta Alimentaria, 30, 145-157, 2001.
149. **Uthayakumaran S., Beasley H.L., Stoddard F.L., Keentok M., Phan-Thien N., Tanner R.I., Bekes F.:** Synergistic and additive effects of three high molecular weight glutenin subunit loci. I. Effects on wheat dough rheology. Cereal Chemistry, 79, 294-300, 2002.

150. **Uthayakumaran S., Gras P.W., Stoddard F.L., Bekes F.:** Effect of varying protein content and glutenin-to-gliadin ratio on the functional properties of wheat dough. *Cereal Chemistry*, 76, 389-394, 1999.
151. **Vrkoc F., Vach M., Skala J.:** The effect of growing methods, sites and years on the nutrient content and baking quality of winter wheat grain (in Czech). *Rostlinna Vyroba*, 41, 315-319, 1995.
152. **Verbruggen I.M., Veraverbeke W.S., Delcour J.A.:** Significance of LMW-GS and HMW-GS for dough extensibility: 'addition' versus 'incorporation' protocols. *Journal of Cereal Science*, 33, 253-260, 2001.
153. **Waga J.:** Polimorfizm białek gliadynowych i gluteninowych a jakość pszenicy ozimej (*Triticum aestivum* L.). *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 204, 205-218, 1997.
154. **Wang C., Kovacs M.I.P.:** Swelling index of glutenin test. I. Method and comparison with sedimentation, gel-protein, and insoluble glutenin tests. *Cereal Chemistry*, 79, 183-189, 2002.
155. **Wang L.F., Flores R.A.:** The effect of storage on flour quality and baking performance. *Food Reviews International*, 15, 215-234, 1999.
156. **Weegels P.L., Marseille J.P., Bosveld P., Hamer R.J.:** Large-scale separation of gliadins and their bread-making quality. *Journal of Cereal Science*, 20, 253-264, 1994.
157. **Weegels P.L., Verhoek J.A., Groot A.M.G., Hamer R.J.:** Effects on gluten of heating at different moisture contents. I. Changes in functional properties. *Journal of Cereal Science*, 19, 31-38, 1994.
158. **Weipert D., Zwingelberg H.:** Utilization of dried gluten in the milling industry (in German). *Getreide, Mehl und Brot*, 46, 36-42, 1992.
159. **Wieser H., Seilmeier W.:** The influence of nitrogen fertilization on quantities and proportions of different protein types in wheat flour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 76, 49-55, 1998.
160. **Wieser H., Zimmermann G.:** Importance of amounts and proportions of high molecular weight subunits of glutenin for wheat quality. *European Food Research and Technology*, 210, 324-330, 2000.
161. **Wrigley C.W.:** Protein mapping by combined gel electrofocusing and electrophoresis: Application to the study of genotypic variants in wheat gliadins. *Biochemical Genetics*, 4, 509-516, 1970.
162. **Wrigley C.W.:** Giant proteins with flour power. *Nature*, 381, 738-739, 1996.
163. **Wrigley C.W., Bekes F.:** Glutenin-protein formation during the continuum from anthesis to processing. *Cereal Foods World*, 44, 562-565, 1999.
164. **Yoneyama T., Suzuki I., Murohashi M.:** Natural maturing of wheat flour. I. Changes in some components and in Farinograph and Extensigraph properties. *Cereal Chemistry*, 47, 19-26, 1970.
165. **Yoshida C., Danno G.:** Effect of water soluble fraction on the viscoelasticity of wheat gluten. *Agricultural and Biological Chemistry*, 53, 121-128, 1989.
166. **Zamponi R.A., Giner S.A., Lupano C.E., Anon M.C.:** Effect of heat on thermal and functional properties of wheat. *Journal of Cereal Science*, 12, 279-287, 1990.
167. **Zghal M.C., Scanlon M.G., Sapirstein H.D.:** Effects of flour strength, baking absorption and processing conditions on structure and mechanical properties of bread crumb. *Cereal Chemistry*, 78, 1-7, 2001.
168. **Żmijewski M., Subda H., Kowalska M., Korczak B., Czubaszek A., Karolini-Skaradzinska Z.:** Skład chemiczny i wartość wypiekowa ziarna oraz mąki odmian pszenicy jarej. Część II. Wartość wypiekowa. *Biuletyn Instytutu Hodowli i Aklimatyzacji Roślin*, 212, 71-79, 1999.

9. STRESZCZENIE

W przeprowadzonych badaniach dokonano oceny wodochłonności na podstawie ilości wody zmagazynowanej przez gluten podczas jego standardowego wymywania. Zgodnie z zaproponowaną procedurą określano zawartość w świeżo wymyтым glutenie wody niezwiązanej (WN), traconej pod wpływem wirowania, i wody związanej (WZ), która pozostaje w glutenie po wirowaniu. Właściwości reologiczne wymytego glutenu oceniono przy pomocy testu standardowego, określając indeks glutenu (IG) oraz nowo opracowanych testów wytłaczania i pełzania, wyznaczając wskaźnik elastyczności glutenu (WEG), odkształcenie całkowite walca glutenu (ϵ_t) i udział w jego odkształcaniu lepkiego płynięcia (U_C).

Wykorzystując próby ziarna z doświadczeń polowych COBORU, oceniono wpływ form i odmian pszenicy, poziomów nawożenia azotowego oraz rejonów uprawy na kształtowanie się badanych cech glutenu oraz ich związki z wyróżnikami jakościowymi ciasta i chleba. Przy badaniu zmian właściwości glutenu w wyniku przebiegu procesów fizjologicznych i technologicznych, takich jak: dojrzewanie, porastanie i suszenie ziarna oraz przechowywanie mąki, materiał badawczy stanowiły kłosa pszenicy, zbierane przy różnych stadiach dojrzałości ziarna, oraz próby ziarna i mlewa, poddane zabiegom w eksperymentach laboratoryjnych.

Otrzymane wyniki wykazały, że wskaźniki wodochłonności WN i WZ były kształtowane przede wszystkim pod wpływem genotypu odmiany pszenicy, jedynie w obrębie formy jarej zawartość wody związanej zależała zdecydowanie mocniej od poziomu nawożenia i rejonu uprawy. W miarę dojrzewania ziarna, postępowało równoczesne obniżanie WN i wzrost WZ . Odwrotne zmiany tych wskaźników występowały pod wpływem porastania ziarna, a także w wyniku intensywnego nawilżania ziarna i łagodnego suszenia. Stosowanie wyższych temperatur suszenia ziarna, jak również dłuższe przechowywanie mąki, skutkowało obniżaniem się całkowitej zawartości wody ($WN+WZ$) w wymywanym glutenie i wzrostem jego wytrzymałości mechanicznej (IG).

Oddziaływanie WN i WZ na właściwości reologiczne glutenu oraz ciasta było odmienne. Wzrost zawartości wody niezwiązanej wpływał na mechaniczne osłabienie glutenu, powodując spadek IG oraz zwiększenie ϵ_t , a także pogarszał właściwości reologiczne ciasta, przyczyniając się do większego rozmiękczenia oraz mniejszej stałości i energii ciasta. Natomiast wyższa zawartość wody związanej sprzyjała wzmocnieniu się glutenu (IG) i poprawie jego elastyczności (WEG), oddziałując również korzystnie na szereg wyróżników farinograficznych ciasta. Badając charakter oddziaływania badanych cech glutenu podczas wypieku chleba wykazano, że wyższa wodochłonność ($WN+WZ$), elastyczność (WEG)

i rozciągliwość glutenu (ϵ , U_C) oraz niższy IG sprzyjają formowaniu się bochenka o większej objętości i lepszej teksturze miękiszu.

Słowa kluczowe: pszenica, czynniki wzrostu roślin, stadia dojrzałości, porastanie, suszenie ziarna, przechowywanie mąki, wymywanie, gluten, metody pomiaru, wodochłonność, właściwości reologiczne, wartość wypiekowa, Glutomatic

10. SUMMARY

INFLUENCE OF CHOSEN FACTORS ON WATER ABSORPTION AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF GLUTEN OF BREAD WHEAT (*Triticum aestivum* L.)

In the conducted investigations, water absorption was evaluated on the basis of the amount of water stored by gluten during its standard washing out. According to the proposed procedure, contents in freshly washed out gluten of non-absorbed water (WN), water lost under centrifugation, and absorbed water (WZ) which stays in gluten after centrifugation, were determined. Rheological properties of washed out gluten were estimated by the standard test, measuring the gluten index (IG), as well as by newly worked out tests of extrusion and creep, determining the gluten elasticity index (WEG), the total strain of gluten cylinder (ϵ_t), and the percentage in the strain of viscous flow (U_C).

Basing on grain samples from the COBORU field experiences, the influence of wheat forms and cultivars, nitrogen fertilization levels and growing regions on the variance of studied gluten indices as well as their relationships to qualitative indices of dough and bread were evaluated. When studying the gluten changes as a result of the effect of physiological and technological processes, such as: ripening, sprouting and drying of grain, as well as flour storage, the material studied was comprised of wheat ears, taken at different grain ripeness stages, and grain and whole meal samples, treated in laboratory experiments.

The obtained results showed that water absorption indices WN and WZ were differentiated first of all by the genotype of the wheat cultivars, only within the spring form the content of absorbed water depended decidedly stronger on the fertilization level and the growing region. As a result of grain ripening, a decrease of WN and an increase of WZ proceeded simultaneously. Opposite changes of these indices took place when the sprouting of grain intensified, and also as a result of intensive moistening and gentle drying of kernels. Higher drying temperatures as well as longer flour storage periods resulted in decreasing of the total water content ($WN+WZ$) in washed out gluten and increasing of its mechanical strength (IG).

The influence of *WN* and *WZ* on the rheological properties of gluten and bread dough was different. The increase in content of non-absorbed water influenced mechanical weakness of gluten, causing *IG* decrease and ε_t increase. Additionally, it worsened the dough rheological properties, contributing to stronger softening as well as lower stability and tensile strength of the dough. Whereas higher content of absorbed water caused strengthening of gluten (*IG*) and an improvement in its elasticity (*WEG*), and also had a favourable effect on many farinograph indices of dough. Studying the character of the effect of gluten features during the baking process, it was shown that higher total water content (*WN+WZ*), elasticity (*WEG*) and extensibility of gluten (ε_t , U_C), as well as lower *IG*, contributed to the formation of bread loaves of larger volume and enhanced crumb.

Keywords: wheat, plant growth factors, ripeness stages, sprouting, grain drying, flour storage, washing out, gluten, measuring methods, water absorption, rheological properties, baking value, Glutomatic

Adres Autora:

Antoni Miś

Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN

ul. Doświadczalna 4

20-290 Lublin

tel. (081) 74 450 61

e-mail: a.mis@demeter.ipan.lublin.pl