

Parametry selekcyjne w hodowli nowych odmian pszenicy w aspekcie produkcji żywności funkcjonalnej

Selection parameters in breeding of the new wheat cultivars in the aspect of functional food production

Wioletta Monika Dynkowska , Małgorzata Renata Cyran 

Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Biochemii i Biotechnologii

✉ w.dynkowska@ihar.edu.pl

Ziarno pszenicy, podstawowego zboża chlebowego na świecie, jest ważnym źródłem błonnika pokarmowego i przeciwutleniającego w diecie współczesnego człowieka. Systematyczny wzrost zainteresowania konsumentów żywnością funkcjonalną w Polsce, która może być istotnym elementem profilaktyki i leczenia chorób cywilizacyjnych, zwraca uwagę na potrzebę hodowli polskich odmian pszenicy rekomendowanych do produkcji takiej żywności. Ziarno 46 linii pszenicy ozimej zostało ocenione pod względem lepkości ekstraktu wodnego, zawartości substancji fenolowych oraz ilości i składu błonnika pokarmowego. Stwierdzono niewielką grupę genotypów, które charakteryzowały się wysoką lepkością ekstraktu ziarna, podstawowego parametru warunkującego, między innymi, spadek poziomu glukozy i cholesterolu we krwi po spożyciu produktów zbożowych. Wykazano dodatnią korelację ($r = 0,83$) pomiędzy lepkością ekstraktu ziarna a zawartością arabinoksylianów rozpuszczalnych. Jakkolwiek w wielu przypadkach obserwowano wysoką lepkość ekstraktu ziarna przy niskiej koncentracji arabinoksylianów w ekstrakcie, co wskazywało na nadrzędne znaczenie cech strukturalnych tych polisacharydów w odniesieniu do poziomu lepkości. Szczególnie istotna jest długość łańcucha polisacharydowego (masa cząsteczkowa), którą szacowano pośrednio jako lepkość ekstraktu ziarna przypadającą na jednostkę masy arabinoksylianów rozpuszczalnych. Spośród ocenianych form pszenicy tylko dwie z nich wykazywały wysoką lepkość ekstraktu ziarna oraz wysoką koncentrację związków fenolowych. Genotypy, które łączą w sobie wysoki potencjał lepki i przeciwutleniający oraz charakteryzują się zwiększonym udziałem rozpuszczalnych polisacharydów błonnika pokarmowego, powinny stanowić punkt wyjścia do hodowli nowych odmian pszenicy przeznaczonych do produkcji żywności funkcjonalnej.

Słowa kluczowe: arabinoksyliany błonnika pokarmowego, błonnik pokarmowy, lepkość ekstraktu ziarna, polisacharydy nieskrobiowe, pszenica ozima, związki fenolowe ogółem

Wheat grain, a principal bread cereal in the world, represents a substantial source of dietary fiber and antioxidants in the modern human diet. A recent systematic increase in consumer attention paid to functional food, being an important element in preventing and treatment of civilization diseases, is observed in Poland. This points to a need for the breeding of new wheat cultivars recommended for functional food production. Grains of 46 winter wheat lines were evaluated with respect to their water extract viscosity, total phenolics content and the amount and composition of dietary fiber. A small number of lines were characterized by high grain extract viscosity, a primary factor that controls, among others, a decrease in glucose and cholesterol levels after consumption of cereal-based products. The grain extract viscosity was positively correlated with soluble arabinoxylan content ($r = 0,83$). However, in many cases, high extract viscosity genotypes had markedly lower content of these polysaccharides, indicating paramount importance of their structural characteristics for viscosity level. Especially significant is the length of polysaccharide chain (molecular weight) that was assessed indirectly as grain extract viscosity per unit mass of arabinoxylans. Amongst wheat lines studied, only two of them exhibited both high grain extract viscosity and high concentration of phenolic compounds. Genotypes, combining high viscous potential with high antioxidant capacity as well as increased share of soluble dietary fiber polysaccharides, should represent the starting material for the breeding of new wheat cultivars designed for production of functional food.

Key words: dietary fiber, dietary fiber arabinoxylans, grain extract viscosity, nonstarch polysaccharides, total phenolic components, winter wheat

Wstęp

Gwałtowny skok technologiczny obserwowany na przestrzeni ostatnich lat w wielu gałęziach przemysłu spowodował negatywne zmiany stylu życia ludzi. Nadmierne tempo życia, któremu nieodłącznie towarzyszy napięcie nerwowe, wynikający z nich stres, mała aktywność fizyczna, ponadto nieracjonalne odżywianie a także hałas

i skażenie środowiska są głównym powodem stale rosnącej liczby zachorowań na tzw. choroby cywilizacyjne. Do najważniejszych chorób cywilizacyjnych występujących w Polsce należą choroby układu krążenia (nadciśnienie tętnicze, choroba niedokrwienna serca), cukrzyca, nadwaga i otyłość oraz nowotwory. Stanowią one przyczynę ponad 80% wszystkich zgonów.

Ziarno pszenicy zawiera 12,1-13,8% błonnika pokarmowego, który charakteryzuje się znacznie niższym poziomem frakcji rozpuszczalnej (1,3-2,5%) w odniesieniu do koncentracji tego składnika w ziarnie żyta, jęczmienia i owsa (Knudsen, 1997; Nyman i in., 1984). Błonnik pokarmowy to roślinne składniki żywności, które nie ulegają procesom trawienia w górnych odcinkach przewodu pokarmowego człowieka, a dzięki swoim specyficznym właściwościom fizykochemicznym wpływają na warunki trawienia i absorpcji pozostałych składników (Cummings, 1984; Ikegami i in., 1983; Maina i in., 2021). W dolnych odcinkach przewodu pokarmowego składniki błonnika podlegają degradacji pod wpływem enzymów syntetyzowanych przez zasiedlającą mikroflorę bakteryjną (Cyran i in., 1995; Elia i Cummings, 2007). Pod względem chemicznym błonnik pokarmowy pierwotnie został zdefiniowany jako suma polisacharydów niecelulozowych, głównie arabinoksylianów i β -glukanów, celulozy i ligniny, występujących w roślinnych ścianach komórkowych (Englyst i Cummings, 1984; Fraś i in., 2018).

W ziarnie pszenicy, żyta i pszenżyta dominującymi polisacharydami błonnika pokarmowego są arabinoksyliany, zawierające w łańcuchu głównym reszty ksylozy (β -D-ksylopiranozy) połączone wiązaniami 1 \rightarrow 4 glikozydowymi. Reszty ksylozy mogą zawierać boczne podstawniki arabinozy (α -L-arabinofuranozy) w pozycji O-3 (reszty z jednym podstawnikiem) oraz w pozycji O-2 i O-3 (reszty z dwoma podstawnikami arabinozy) (Izydorczyk i Biliaderis, 1995). Populacje ogólne arabinoksylianów obecne w ziarnie zbóż zbudowane są z licznych podfrakcji o różnych masach cząsteczkowych i różnym stopniu podstawienia głównego łańcucha arabinozą (Cyran i Saulnier, 2012; Izydorczyk i Biliaderis, 1994). Polisacharydy te posiadają zdolność do tworzenia roztworów o wysokiej lepkości przy niewielkim stężeniu, wykazują znaczną wodochłonność, mogą także tworzyć żele w wyniku oksydacyjnego sieciowania w obecności peroksydazy i nadtlenu wodoru (Izydorczyk i in., 1991b).

Jedną z najważniejszych cech produktów zbożowych w kontekście żywności funkcjonalnej jest lepkość ekstraktu, warunkująca ich zdolność do podnoszenia lepkości treści pokarmowej w jelicie cienkim człowieka. Cecha ta jest determinowana głównie zawartością rozpuszczalnych arabinoksylianów (pszenica, żyto) (Cyran i Dynkowska, 2014; Martinant i in., 1999) lub β -glukanów (owies, jęczmień) w ziarnie oraz wielkością ich mas cząsteczkowych (Regand i in., 2011). Należy podkreślić, że zdegradowane polisacharydy błonnika o niskich masach cząsteczkowych nie zapewniają wysokiej lepkości ekstraktu ziarna (Cyran i in., 2012), a tym samym nie mogą kontrolować poziomu lepkości w jelicie cienkim człowieka. Wysoka lepkość treści pokarmowej działa nega-

tywnie na aktywność enzymów trawiennych oraz inicjuje tworzenie lepkiej warstwy przylegającej do błon śluzowych, która fizycznie blokuje wchłanianie substancji odżywczych. Zwiększoną lepkość w świetle jelita cienkiego uważa się za podstawowy element mechanizmu, który prowadzi do obniżenia poziomu cholesterolu i glukozy we krwi a także sorpcji wtórnej kwasów żółciowych po spożyciu produktów zbożowych, co w konsekwencji zmniejsza ryzyko i wspomaga leczenie chorób serca, cukrzycy i otyłości (Chen i in., 2020; Jenkins i in., 1978; 2004; Lu i in., 2004).

Nadprodukcja reaktywnych form tlenu i azotu w organizmie człowieka, określana mianem stresu oksydacyjnego i nitrozacyjnego, jest jedną z głównych przyczyn choroby nowotworowej, potęgowanych napięciem nerwowym, używkami, nieprawidłowym żywieniem oraz skażeniem środowiska. Reaktywne formy tych pierwiastków, występujące głównie w postaci wolnych rodników, uszkadzają tkanki organizmu poprzez degradację podstawowych biopolimerów komórek, DNA, białek i lipidów (Pisoschi i Pop, 2015). Są one także przyczyną wzmoczonego procesu starzenia oraz chorób związanych, między innymi, z nieprawidłowym funkcjonowaniem układu krwionośnego (choroba niedokrwienności serca i cukrzyca) oraz układu nerwowego (choroba Alzheimera i Parkinsona) (Willcox i in., 2004). Ziarno zbóż zawiera szereg substancji wykazujących właściwości przeciwutleniające (Zielinski i in., 2012), wśród których podstawową grupę stanowią związki fenolowe, głównie kwasy fenolowe i dimery kwasu ferulowego (Dynkowska i in., 2015), które mogą chronić tkanki organizmu człowieka przed destrukcją oksydacyjną. W ostatnich latach wykazano, że związki fenolowe w formie związanej estrowo z polimerami ściany komórkowej wykazują silniejsze działanie antyoksydacyjne niż substancje te występujące w formie niezwiązanej (Cyran i in., 2021)

Celem badań była ocena zdolności ziarna wybranych form pszenicy do tworzenia lepkich roztworów, zawartości substancji fenolowych ogółem i składników błonnika pokarmowego oraz wskazanie parametrów selekcyjnych i najlepszych form wyjściowych do hodowli nowych odmian pszenicy odpowiednich do produkcji żywności funkcjonalnej.

Material i metody

Materiałem do badań było dojrzałe ziarno wyselekcjonowanych form pszenicy ozimej (46 linii i jedna odmiana wzorcowa Tonacja, dostarczona z SHR Strzelce) pochodzące z doświadczeń poltekowych ze zbiorów w 2013 roku w stacjach hodowli roślin zlokalizowanych w ośmiu miejscowościach (Strzelce, Polanowice, Antoniny, Nagrodowice, Choryń, Dębina, Laski i Modzurów; (tab. 1).

Tabela 1
Table 1Linie pszenicy użyte w badaniach wraz z lokalizacją
Wheat lines used in study along with the location

Nr No.	Lokalizacja Localization	Linie pszenicy Wheat lines	Ilość Amount
1	SHR Antoniny	AND 462/09, AND 143/10, AND 371/10, AND 479/09, AND 242/10, AND 446/10	6
2	HR Choryń	C 386/10, C 3634/10, C 3739/10	3
3	HR Dębina	DD 139/10, DD 280/10, DD 327/10	3
4	HR Laski	DL 338/10/4/6, DL 414/10, DL 428/10	3
5	HR Modzurów	DM 3927/10, DM 2566/11, DM 3411/12	3
6	HR Nagradowice	NAD 10085, NAD 11017, NAD 11061, NAD 11070, NAD 11099, NAD 11100	6
7	HR Polanowice	POB 0113, POB 0213, POB 0313, POB 0413, POB 0513, POB 0613, POB 0713, POB 0813, POB 0913, POB 1013	10
8	SHR Strzelce	STH 104, STH 121, STH 1140, STH 0167, STH 106, STH 188, STH 1107, STH 1124, STH 1144, STH 0179, STH 160, STH 176, Tonacja (wz.)	13

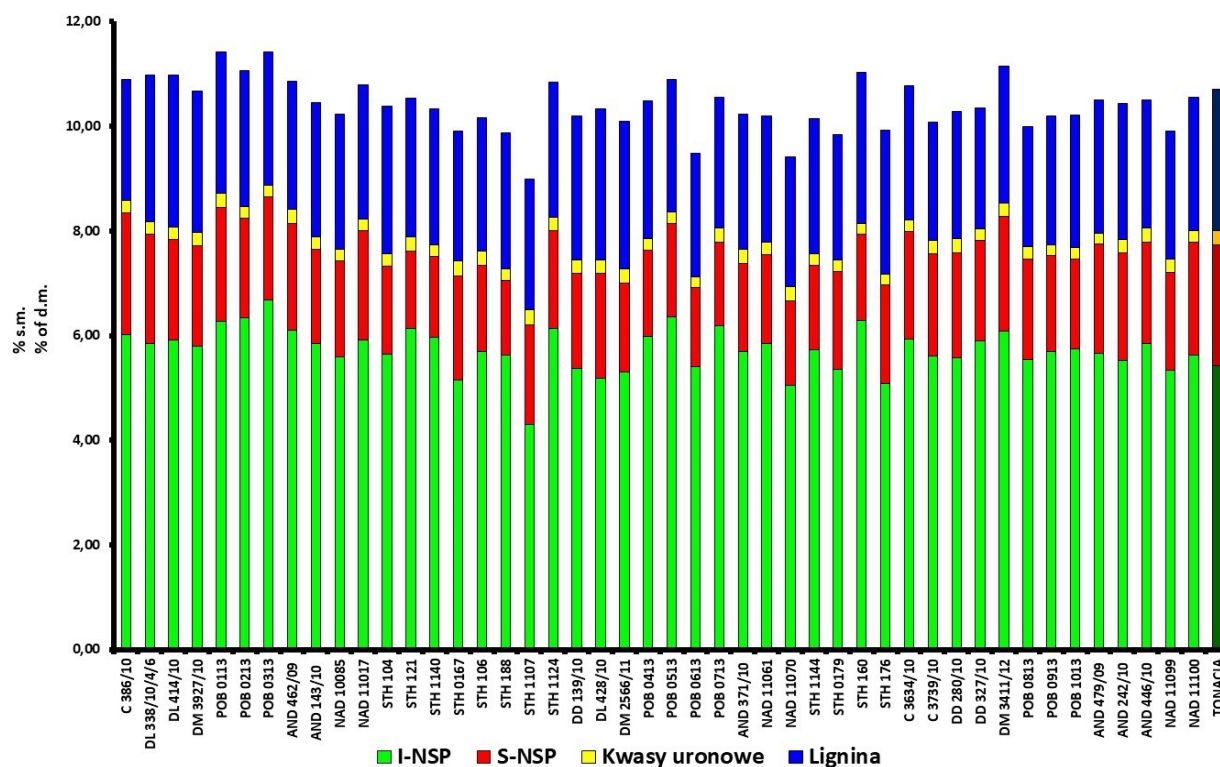
Próby ziarna zostały zmielone przy użyciu młynka laboratoryjnego Cyclotec 1093 firmy FOSS, stosując sito o wielkości oczek 0,5 mm. Pomiar lepkości ekstraktu wodnego ziarna wykonano przy pomocy wiskozymetru Brookfield LVDV-II+ z opcją stożek/płytkę w temperaturze 30°C, stosując do ekstrakcji proporcję naważki próby do ilości wody 1:3 (w/v) (Cyran i Ceglińska, 2011). Zawartość błonnika pokarmowego oznaczano metodą enzymatyczno-chemiczną według Theander i in. (1995), określaną metodą Uppsalską (Uppsala dietary fiber method, AACC method 32-25.01), w której ogólny błonnik pokarmowy jest sumą polisacharydów nieskrobiowych (polisacharydy niecelulozowe + celuloza), kwasów uronowych i ligniny Klasona (TDF = NCP + Celuloza + UA + lignina Klasona). Celulozę i polisacharydy niecelulozowe oznaczano metodą chromatografii gazowej po kompletnym wytrawieniu skrobi i białka, stosując hydrolizę z α -amylazą, amyloglukozydazą i proteazą (Megazyme) i rozdzieleniu frakcji rozpuszczalnej od nierozpuszczalnej. Frakcje polisacharydowe zostały poddane hydrolizie kwasowej a powstałe monosacharydy upochodnione do lotnych octanów alditoli (Englyst i Cummings, 1984). Analizę chromatograficzną wykonano w systemie chromatografii gazowej Agilent (7890A Serie GC Custom), stosując kolumnę kapilarną (DB-23, 30 m, 0,25 mm, i.d., 0,25 μ m f.d.) i wodór jako gaz nośny (Cyran i Dynkowska, 2014). Zawartość arabinoksylianów frakcji rozpuszczalnej błonnika pokarmowego korygowano na obecność arabinozy obecnej w arabinogalaktanach (Izydorczyk i in., 1991a). Ligninę Klasona oznaczano według Theander i in. (1995), metodą grawimetryczną po wytrawieniu prób 12M kwasem siarkowym (VI). Kwasy uronowe analizowano metodą kolorymetryczną Scotta (Scott, 1979), z zastosowaniem 3,5-dimetylofenolu jako chromofora. Związki

fenolowe ogółem oznaczano metodą kolorymetryczną z użyciem odczynnika Folin-Ciocalteu'a (Liyana-Pathirana i Shahidi, 2006) w ekstrakcie metanolowym (Dynkowska i in., 2015). Zawartość suchej masy szacowano na podstawie ubytku masy próby po wysuszeniu w piecu o temperaturze 105°C. Powyższe analizy wykonano w trzech powtórzeniach. Obliczono wartości średnich i odchyłeń standardowych oraz współczynniki zmienności i korelacji liniowej Pearsona.

Wyniki i dyskusja

Zawartość i skład frakcyjny błonnika pokarmowego

Udział błonnika rozpuszczalnego w jego frakcji ogólnej wynosił średnio 17,92% i wahał się od 14,19% do 21,50% (rys. 1). Współczynnik zmienności tego parametru wynosił 10,28%. Bardziej zróżnicowana była ekstrahowalność, czyli procentowy udział arabinoksylianów rozpuszczalnych we frakcji całkowitej tych polisacharydów (CV=15%), które stanowiły średnio 16,22% a zakres zmienności wynosił od 11,85 do 21,89% (tab. 2). Jednak tylko trzy linie, NAD 11017, STH 0167 i STH 1107, charakteryzowały się najwyższym, co najmniej 20% udziałem tych polisacharydów w ich frakcji ogólnej. Z punktu widzenia profilaktyki i leczenia chorób cywilizacyjnych, powszechnie zaleca się zwiększenie dziennego spożycia błonnika pokarmowego nawet do 25–38 g/osobę (Jenkins i in., 2004). Stąd zwiększenie poziomu błonnika ogólnego w ziarnie jest pożądane. Jednak większe znaczenie ma udział frakcji rozpuszczalnej błonnika, z uwagi na różny stopień fermentacji poszczególnych składników błonnika w okrężnicy i korzystny wpływ produktów fermentacji na metabolizm przewodu pokarmowego człowieka (Cummings, 1984; Dynkowska, 2020).



Rys. 1. Zawartość błonnika pokarmowego ogółem (% s.m.), z uwzględnieniem podziału na jego frakcję rozpuszczalną (S-NS), nierozpuszczalną (I-NSP), kwasy uronowe oraz ligninę Klasona.

Fig. 1. The dietary fiber content (% of d.m.) including the division into its soluble fraction (S-NSP), insoluble fraction (I-NSP), uronic acids and Klason lignin.

Rozpuszczalne polisacharydy niecelulozowe ziarna zbóż, głównie arabinoksylany i β -glukany, prawie całkowicie ulegają fermentacji pod wpływem mikroflory zasiedlającej jelito grube. Stopień degradacji bakteryjnej nierozpuszczalnych polisacharydów błonnika jest znacznie niższy i wynosi 15-44% w przypadku całościarnego chleba pszennego oraz 72-85% w przypadku hemicelulozy i celulozy pochodzących z diety składającej się z owoców i warzyw (Southgate i Durbin, 1970). Jest on ściśle powiązany ze strukturą tych polisacharydów i stopniem powiązania z innymi składnikami błonnika. Czysta celuloza mikrokryształiczna, zmielona w młynku kulowym lub traktowana alkalicznie jest degradowana odpowiednio w 9, 13 i 20% (Hsu i Penner, 1989). Lignina jest w niewielkim stopniu fermentowana przez mikroflorę jelitową (0-5%). Stopień lignifikacji materiałów roślinnych jest jednym z głównych czynników utrudniających ich fermentację (Cook i Sellin, 1998).

Stopień fermentacji bakteryjnej błonnika pokarmowego w dolnych odcinkach przewodu pokarmowego człowieka warunkuje ilość powstających krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych (SCFA, short-chain fatty acids), głównych produktów fermentacji błonnika, takich jak kwas octowy, propionowy i masłowy (Cook i Sellin, 1998; Henningsson i in., 2001; Lattimer i Haub, 2010). Kwa-

sy te, szczególnie kwas masłowy, stanowią źródło energii dla komórek nabłonka jelita grubego, ale przed wszystkim wpływają na rozwój jego prawidłowych komórek, kolonocytów, przyczyniając się do eliminacji komórek zdeformowanych, prowadzących do licznych schorzeń układu pokarmowego, między innymi do nowotworów (Cook i Sellin, 1998; Cummings i in., 1987). Kumulacja tych kwasów w jelicie grubym powoduje spadek pH treści pokarmowej, który hamuje rozwój patogenów i bakterii gnilnych, zapewniając rozwój odpowiedniej mikroflory jelitowej. Taka populacja mikroorganizmów bytujących w jelitach jest niezbędna do zapewnienia prawidłowego metabolizmu przewodu pokarmowego człowieka, między innymi poprzez syntezę substancji chroniących przed patogenami, rozkład dostarczanych z pożywieniem toksyn i substancji rakotwórczych, syntezę mikroelementów oraz pozytywny wpływ na budowę końcowego odcinka przewodu pokarmowego (Stachowicz i Kiersztan, 2013).

Zdolność do tworzenia roztworów o wysokiej lepkości i aktywność przeciwutleniająca

Szczególnie ważnym parametrem ziarna zbóż, w kontekście efektów fizjologicznych obserwowanych w organizmie człowieka po spożyciu produktów zbożowych, jest poziom polisacharydów rozpuszczalnych, głównie arabinoksylanów dominujących w ziarnie pszenicy, żyta i pszenżyta.

Tabela 2
Table 2

Zawartość rozpuszczalnej frakcji arabinoksylianów (S-AX; % s.m.), stopień arabinozylacji (Ara/Xyl), ekstrahowalność (%) oraz zawartość tych polimerów w całkowitej frakcji polisacharydów nieskrobiowych (S-AX; % w T-NSP)
The soluble arabinoxylan content (S-AX; % of d.m.), arabinosylation degree (Ara/Xyl), extractability (%) and the amount of these polymers in total non-starch polysaccharides (S-AX; % of TDF)

Nr No.	Nazwa próby Sample	S-AX (% s.m.) S-AX (% of d.m.)	Ara/Xyl	Ekstrahowalność (%) Extractability (%)	S-AX (% w T-NSP) S-AX (% w T-NSP)
1	C 386/10	1,22	0,51	19,15	11,19
2	DL 338/10/4/6	0,99	0,48	16,53	9,00
3	DL 414/10	0,82	0,49	13,95	7,45
4	DM 3927/10	0,84	0,55	14,56	7,85
5	POB 0113	1,04	0,55	16,22	9,12
6	POB 0213	0,83	0,51	13,41	7,48
7	POB 0313	0,89	0,52	13,63	7,81
8	AND 462/09	0,95	0,46	15,55	8,72
9	AND 143/10	0,84	0,52	14,74	8,00
10	NAD 10085	0,97	0,53	17,08	9,51
11	NAD 11017	1,21	0,5	20,00	11,20
12	STH 104	0,8	0,52	14,79	7,69
13	STH 121	0,78	0,53	12,72	7,43
14	STH 1140	0,81	0,48	13,68	7,86
15	STH 0167	1,2	0,49	21,43	12,12
16	STH 106	0,88	0,5	15,15	8,63
17	STH 188	0,66	0,54	11,85	6,67
18	STH 1107	1,04	0,56	21,89	11,56
19	STH 1124	1,02	0,51	16,11	9,44
20	DD 139/10	0,92	0,5	16,49	9,02
21	DL 428/10	1,07	0,49	19,53	10,39
22	DM 2566/11	0,83	0,51	15,40	8,22
23	POB 0413	0,78	0,52	13,00	7,43
24	POB 0513	0,88	0,52	13,71	8,07
25	POB 0613	0,69	0,56	12,59	7,26
26	POB 0713	0,81	0,52	12,84	7,64
27	AND 371/10	0,85	0,53	14,41	8,33
28	NAD 11061	0,89	0,51	14,78	8,73
29	NAD 11070	0,9	0,54	16,82	9,57
30	STH 1144	0,89	0,56	15,19	8,81
31	STH 0179	0,98	0,49	17,47	10,00
32	STH 160	0,85	0,54	13,24	7,73
33	STH 176	1,05	0,56	18,85	10,61
34	C 3634/10	1,22	0,57	18,86	11,30
35	C 3739/10	1,13	0,54	18,56	11,19
36	DD 280/10	1,1	0,57	18,52	10,68
37	DD 327/10	1,05	0,54	16,72	10,10
38	DM 3411/12	1,28	0,52	19,19	11,43
39	POB 0813	1,08	0,48	18,03	10,80
40	POB 0913	0,94	0,52	15,67	9,22
41	POB 1013	0,89	0,53	14,83	8,73
42	AND 479/09	1,15	0,5	18,73	10,95
43	AND 242/10	1,02	0,49	17,26	9,81
44	AND 446/10	0,94	0,45	15,41	8,95
45	NAD 11099	0,9	0,52	16,10	9,09
46	NAD 11100	1,14	0,49	18,63	10,86
47	TONACJA	1,11	0,53	18,94	10,37
	Wartość średnia Mean	0,96	0,52	16,22	9,23
	Odchylenie standardowe Standard deviation	0,15	0,03	2,47	1,42
	Współczynnik zmienności (%) Coefficient of variation (%)	15	5	15	15
	Zakres zmienności Range of variation	0,66–1,28	0,45–0,57	11,85–21,89	6,67–12,12

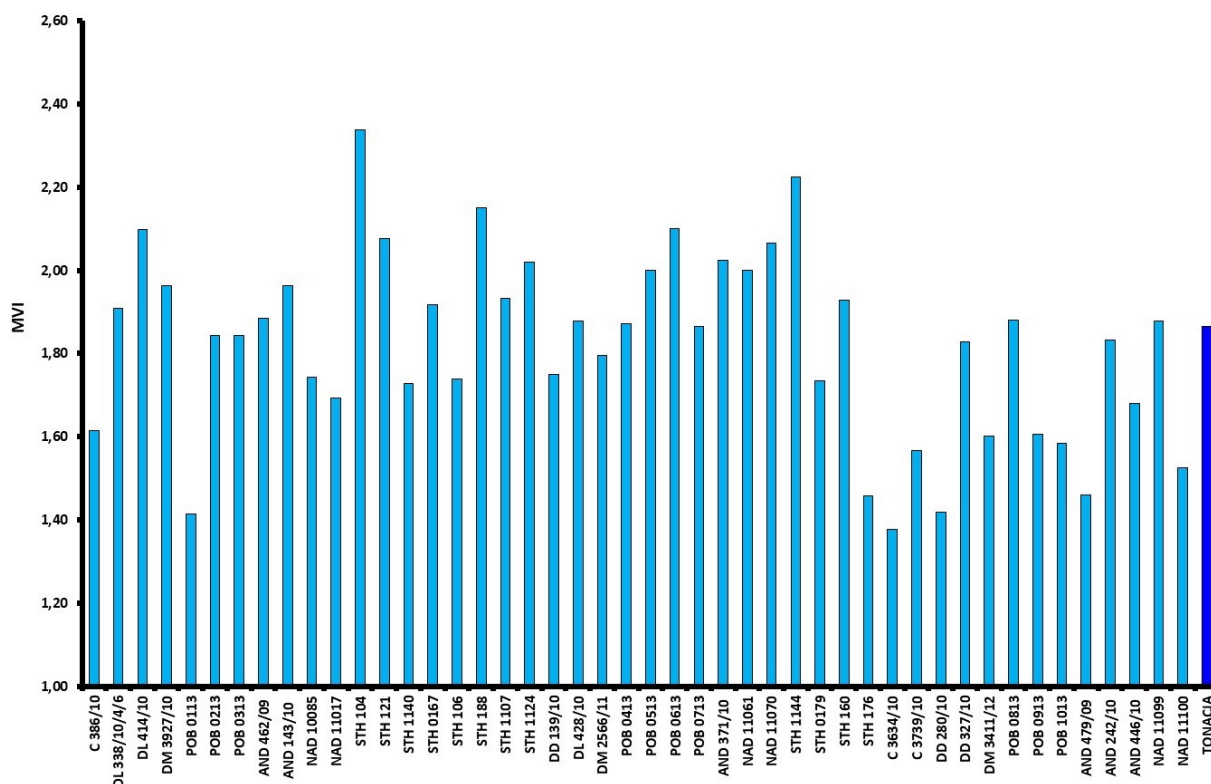
Polisacharydy te nie tylko stanowią podstawowy substrat fermentacji bakteryjnej w dolnych odcinkach przewodu pokarmowego, ale przede wszystkim warunkują wzrost lepkości treści pokarmowej w górnych odcinkach przewodu pokarmowego a w konsekwencji spadek poziomu glukozy i cholesterolu we krwi, niezbędny w profilaktyce i leczeniu chorób serca i cukrzycy (Jenkins i in., 1978; 2004). W badaniach wykazano, że lepkość różnych typów błonnika pokarmowego dodanego do posiłku ludzi jest pozytywnie skorelowana ze spadkiem poziomu glukozy we krwi (Chen i in., 2020; Jenkins i in., 1978).

w górnych odcinkach przewodu pokarmowego a w konsekwencji spadek poziomu glukozy i cholesterolu we krwi, niezbędny w profilaktyce i leczeniu chorób serca i cukrzycy (Jenkins i in., 1978; 2004). W badaniach wykazano, że lepkość różnych typów błonnika pokarmowego dodanego do posiłku ludzi jest pozytywnie skorelowana ze spadkiem poziomu glukozy we krwi (Chen i in., 2020; Jenkins i in., 1978).

Powszechnie uważa się, że wysoka lepkość ekstraktu wodnego ziarna jest proporcjonalna do wzrostu lepkości treści pokarmowej jelita cienie-

go po spożyciu produktów zbożowych. Za tę cechę odpowiedzialna jest zawartość arabinoksylianów frakcji rozpuszczalnej, co w szczególności sposób odzwierciedlone jest w ziarnie żyta (Boros i in., 1993). Zależność wartości lepkości wodnych ekstraktów mąki pszenic od zawartości arabinoksylianów rozpuszczalnych w ziarnie badanych pszenic pokazuje wartość współczynnika korelacji Pearsona $r = 0,83$ (dla $n = 47$; $p = 0,05$). Ekstrahowalność tych polimerów również w dużej mierze decydowała o wartości lepkości ($r = 0,71$).

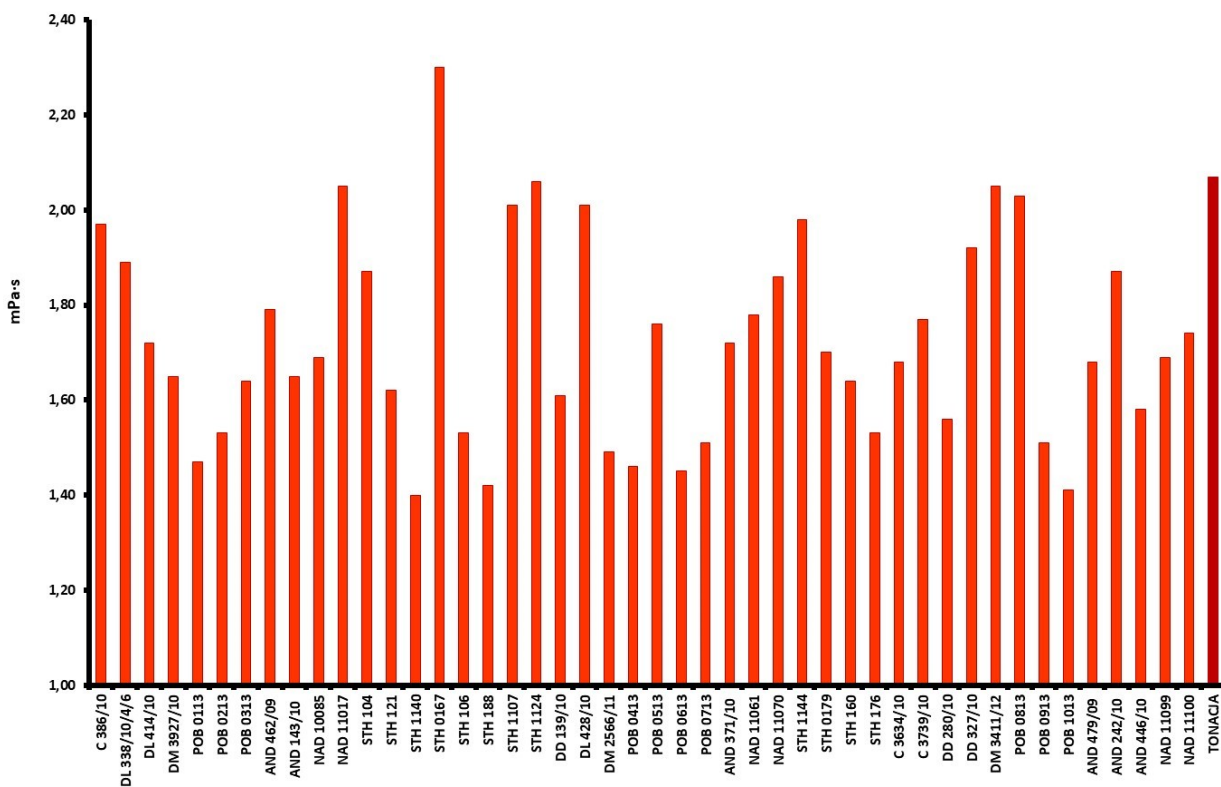
Obliczono indeks masy cząsteczkowej, który wyraża się ilorazem lepkości ekstraktu ziarna do zawartości arabinoksylianów rozpuszczalnych. Określa on lepkość ekstraktu ziarna przypadającą na jednostkę masy arabinoksylianów, której zróżnicowanie pośrednio obrazuje różnice w średniej długości łańcucha tych polisacharydów (średniej masie cząsteczkowej). Wartość tego parametru zmieniała się w zakresie od 1,38 do 2,34 (rys. 2). Najniższą wartość indeksu masy cząsteczkowej wykazała linia C 3634/10 przy równocześnie wysokiej zawartości rozpuszczalnego arabinoksylianu (1,22% s.m.) ale o stosunkowo niskiej lepkości (1,68 mPa·s), w porównaniu z formą wzorcową



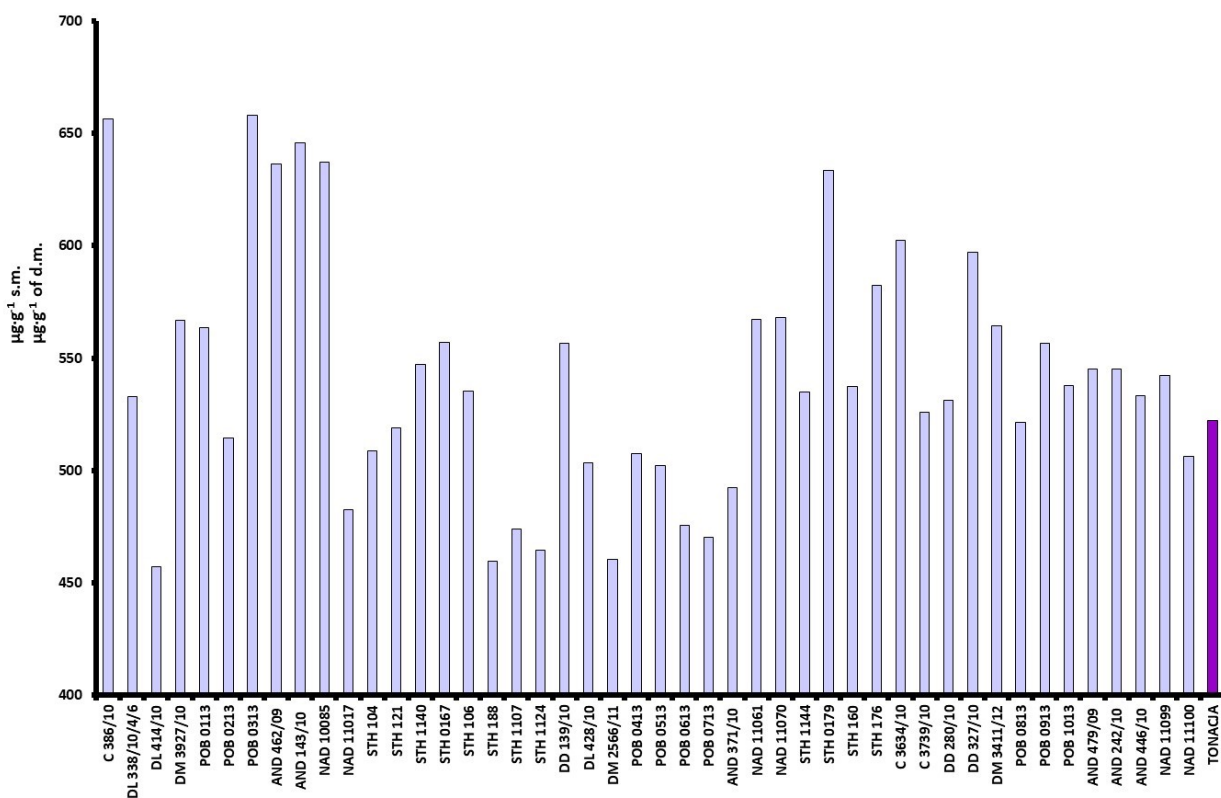
Rys. 2. Indeks masy cząsteczkowej frakcji rozpuszczalnej arabinoksylianów.
Fig. 2. The molecular weight index of soluble fraction of arabinoxylan.

Tonacja (2,07 mPa·s). Taka zależność sugeruje, że forma ta może odznaczać się arabinoksylianem o bardzo niskiej masie cząsteczkowej, lub/ oraz wysoką aktywnością endoksylianazy degradującej arabinoksyliany. Zastosowane w pracy warunki pomiaru lepkości umożliwiają hydrolityczne dzia-

łanie enzymów ziarna (godzinna ekstrakcja rozdrobnionego materiału), które degradują polisacharydy błonnika pokarmowego. Dlatego uzyskane wartości lepkości uwzględniają również wpływ zarówno endoksylianaz endogennych, jak i tych zasocjowanych na powierzchni ziarna, na masę



Rys. 3. Lepkość ekstraktu wodnego (mPa·s).
Fig. 3. Water extract viscosity (mPa·s).



Rys. 4. Zawartość substancji fenolowych (µg·g⁻¹ s.m.).
Fig. 4. Phenolic compounds content (µg·g⁻¹ of d.m.).

cząsteczkową arabinoksylianów obecnych w ekstrakcie (rys. 3). W przypadku linii STH 188 odnotowano wysoką wartość indeksu masy cząsteczkowej, który wynosi 2,15. Forma ta wykazywała się jednak niższą wartością lepkości (1,42 mPa·s) i najniższą zawartością rozpuszczalnego arabinoksylianu (0,66% s.m.).

Zawartość substancji fenolowych w badanych liniach pszenicy ozimej zawierała się w przedziale 457–658 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ s.m. (rys. 4), a współczynnik zmienności tej frakcji związków wynosił 10%. W przypadku ziarna pszenicy głównymi substancjami fenolowymi są kwasy fenolowe, przede wszystkim pochodne kwasu hydroksycynamonowego: kwas ferulowy, p-kumarowy i synapowy, a także dehydrodimery kwasu ferulowego (Hernández i in., 2011), oraz aldehydy, w szczególności wanilina. Mniejszy udział stanowią pochodne kwasu benzoowego (kwas p-hydroksybenzoowy, kawowy, wanilinowy, syringowy). Zawartość kwasu ferulowego w kwasach fenolowych ogółem określono na 70-90% (Żilić, 2016). Jako substancje o działaniu antyoksydacyjnym (Zieliński i in., 2012), związki fenolowe są pożądanym elementem codziennej diety (Mateo Anson i in., 2010). Szczególną ich rolę wykazano w przeciwdziałaniu chorobom układu krwionośnego, oddechowego oraz zapobieganiu otyłości (Dynkowska, 2019; Gammoh i in., 2017).

Polisacharydy niecelulozowe frakcji nierozpuszczalnej błonnika pokarmowego

Pozostałe niecelulozowe polisacharydy błonnika pokarmowego były zbudowane z mannozy, galaktozy i glukozy. W sumie stanowiły one ok. 13,25% tej frakcji. Polisacharydy te stanowią substrat do degradacji bakteryjnej w dolnych odcinkach przewodu pokarmowego człowieka, których produktami są krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe. W przypadku hemiceluloz ziarna pszenicy

i żyta, ich podstawowe jednostki budulcowe, arabinoza i ksyloza są w różnym stopniu degradowane (Cyran i in., 1995). Stopień degradacji ksylozy obecnej w głównym łańcuchu jest wyższy (68-73%), niż arabinozy występującej w postaci bocznych podstawników (48-56%), co odzwierciedla podstawowy mechanizm degradacji bakteryjnej tych polisacharydów, poprzez niepodstawione fragmenty łańcucha ksylanu. Ponadto wyższa koncentracja błonnika pokarmowego w ziarnie wpływa na zwiększony stopień degradacji tych cukrów, co może tłumaczyć wzrost liczby bakterii jelitowych stymulowany wyższą koncentracją substratów do fermentacji w jelicie grubym. Stopień degradacji pozostałych komponentów hemiceluloz, mannozy i galaktozy, wynosi odpowiednio 67-87% i 43-50%. Natomiast hemicelulozy zbudowane z glukozy praktycznie ulegają całkowitej degradacji (99%).

Wnioski

1. Indeks masy cząsteczkowej arabinoksylianów rozpuszczalnych, obliczony na podstawie pomiaru lepkości ekstraktu ziarna i zawartości tych polisacharydów, może być dobrym wskaźnikiem źródeł wysokocząsteczkowych arabinoksylianów.
2. Istnieje konieczność zwrócenia szczególnej uwagi na nieliczne genotypy o pożądanej charakterystyce fizykochemicznej w kontekście produkcji żywności funkcjonalnej, które łączą w sobie (1) wysoką lepkość ekstraktu ziarna, warunkowaną wysoką koncentracją arabinoksylianów rozpuszczalnych o wysokich masach cząsteczkowych, (2) wysoki udział arabinoksylianów rozpuszczalnych we frakcji błonnika pokarmowego oraz (3) wysoką zawartość przeciwutleniaczy.

Podziękowania

Autorki składają serdeczne podziękowania hodowcom ze stacji Hodowli Roślin w Strzelcach, Polanowicach, Antoninach, Nagradowicach, Choryni, Dębinie, Laskach i Modzurowie za udostępnienie ziarna materiałów hodowlanych pszenicy do analiz fizyko-chemicznych.

Literatura

- Boros, D., Marquardt, R. R., Słomiński, B. A., Guenter, W. 1993. Extract viscosity as an indirect assay for water-soluble pentosan content in rye. *Cereal Chemistry*, 70 (5): 575–580.
- Chen, M., Guo, L., Nsor-Atindana, J., H. Goff, D., Zhang, W., Mao, J., Zhong, F. 2020. The effect of viscous soluble dietary fiber on nutrient digestion and metabolic responses I: In vitro digestion process. *Food Hydrocolloids*, 107: 105971, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105971>

Praca została wykonana w ramach Programu Wieloletniego 2015-2020 realizowanego przez IHAR-PIB – "Tworzenie naukowych podstaw postępu biologicznego i ochrona roślinnych zasobów genowych źródłem innowacji i wsparcia zrównoważonego rolnictwa oraz bezpieczeństwa żywnościowego kraju", finansowanego przez Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi z budżetu w roku 2015.

- Cook, S. I., Sellin, J. H. 1998. Review article: short chain fatty acids in health and disease. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 12 (6): 499–507, DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2036.1998.00337.x>
- Cummings, J. H., Pomare, E. W., Branch, H. W. J., Naylor, E., Macfarlane, G. T. 1987. Short chain fatty acids in human large intestine, portal, hepatic and venous blood. *Gut*, 28: 122–123, DOI: <https://doi.org/10.1136/gut.28.10.1221>

- Cummings, J. H. 1984. Constipation, dietary fibre and the control of large bowel function. *Postgraduate Medical Journal*, 60: 811–819, DOI: <https://doi.org/10.1136/pgmj.60.709.811>
- Cyran, M. R., Dynkowska, W. M. 2014. Mode of endosperm and wholemeal arabinoxylans solubilisation during rye breadmaking: Genotypic diversity in the level, substitution degree and macromolecular characteristics. *Food Chemistry*, 145: 356–364, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.07.093>
- Cyran, M. R., Dynkowska, W. M., Ceglińska, A., Bonikowski, R. 2021. Improving rye bread antioxidant capacity by bread-making methodology: Contribution of phosphate-buffered saline- and methanol-soluble phenolic phytochemicals with different molecular profiles. *Journal of Cereal Science*, 100 (5): 103262, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103262>
- Cyran, M. R., Rakowska, M., Wasilewko, J., Buraczewska, L. 1995. Degradation of dietary fibre polysaccharides of rye in the intestinal tract of growing pigs used as a model animal for studying digestion in humans. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 4 (3): 217–227, DOI: <https://doi.org/10.22358/jafs/69795/1995>
- Cyran, M. R., & Saulnier, L. (2012). Macromolecular structure of water-extractable arabinoxylans in endosperm and wholemeal rye breads as factor controlling their extract viscosities. *Food Chemistry*, 131 (2), 667–676, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.054>
- Cyran, M. R., Ceglińska, A. 2011. Genetic variation in the extract viscosity of rye (*Secale cereale* L.) bread made from endosperm and wholemeal flour: impact of high-molecular-weight arabinoxylan, starch and protein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(3), 469–479, DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.4208>
- Cyran, M. R., Ceglińska, A., Kolasińska, I. 2012. Depolymerization degree of water-extractable arabinoxylans in rye bread: characteristics of inbred lines used for breeding of bread cultivars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60 (35): 8720–8730. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf301573v>
- Dynkowska, W. M. 2019. Rye (*Secale cereale* L.) phenolic compounds as health-related factors. *Plant Breeding and Seed Science*, 79: 9–24, DOI: <https://doi.org/10.37317/pbss-2019-0002>
- Dynkowska, W. M. 2020. Rye (*Secale cereale* L.) arabinoxylans: molecular structure, physicochemical properties and their resulting pro-health effects. *Plant Breeding and Seed Science*, 81: 13–32, DOI: <https://doi.org/10.37317/pbss-2020-0002>
- Dynkowska, W. M., Cyran, M. R., Ceglińska, A. 2015. Soluble and cell wall-bound phenolic acids and ferulic acid dehydromers in rye flour and five bread model systems: Insight into mechanisms of improved availability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95 (5): 1103–1115, DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7007>
- Elia, M., Cummings, J.H. 2007. Physiological aspects of energy metabolism and gastrointestinal effects of carbohydrates. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61 (12): Suppl 1: 40–74, DOI: <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602938>
- Englyst, H. N., Cummings, J. H. 1984. Simplified method for the measurement of total non-starch polysaccharides by gas-liquid chromatography of constituent sugars as alditol acetates. *Analyst*, 109 (7): 937–942, DOI: <https://doi.org/10.1039/AN9840900937>
- Fraś, A., Gołębiewska, K., Gołębiewski, D., Boros, D. 2018. Dietary fibre in cereal grains - a review. *Plant Breeding and Seed Science*, 77: 43–53, DOI: <https://doi.org/10.37317/pbss-2018-0004>
- Gammoh, S., Alu'datt, M. H., Alhamad, M. N., Rababah, T., Ereifej, K., Almajwal, A., Ammari, Z., Al. Khateeb, W., Hussein, N. M. 2017. Characterization of phenolic compounds extracted from wheat protein fractions using high-performance liquid chromatography/liquid chromatography mass spectrometry in relation to anti-allergenic, anti-oxidant, anti-hypertension, and anti-diabetic properties. *International Journal of Food Properties*, 20 (10): 2383–2395, DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1238832>
- Henningsson, A., Bjorck, I., Nyman, M. 2001. Short-chain fatty acid formation at fermentation of indigestible carbohydrates. *Scandinavian Journal of Nutrition*, 45: 165–168, DOI: <https://doi.org/10.3402/fnr.v45i0.1801>
- Hernández, L., Afonso, D., Rodríguez, E. M., Díaz, C. 2011. Phenolic compounds in wheat grain cultivars. *Plant Foods for Human Nutrition*, 66 (4): 408–415, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11310-011-0261-1>
- Hsu, J-C., Penner, M. H. 1989. Influence of cellulose structure on its digestibility in the rat. *The Journal of Nutrition*, 119 (6): 872–878, DOI: <https://doi.org/10.1093/jn/119.6.872>
- Ikegami, S., Tsuchihashi, N., Nagayama, S., Harada, H., Nishide, E., Innami, S. 1983. Effect of indigestible polysaccharides on function of digestion and absorption in rats. *Japan Society of Nutrition and Food Science*, 36 (3): 163–168.
- Izydorczyk, M. S., Biliaderis, C. G., Bushuk, W. 1991a. Comparison of the structure and composition of water-soluble pentosans from different wheat varieties. *Cereal Chemistry (USA)*, 68 (2): 139–144.
- Izydorczyk, M. S., Biliaderis, C. G., Bushuk, W. 1991b. Physical properties of water-soluble pentosans from different wheat varieties. *Cereal Chemistry*, 68 (2): 145–150.
- Izydorczyk, M. S., Biliaderis, C. G. 1994. Studies on the structure of wheat-endosperm arabinoxylans. *Carbohydrate Polymers*, 24 (1): 61–71, DOI: [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(94\)90118-X](https://doi.org/10.1016/0144-8617(94)90118-X)
- Izydorczyk, M. S., Biliaderis, C. G. 1995. Cereal arabinoxylans: advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydrate Polymers*, 28: 33–48, DOI: [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0144-8617(95)00077-1)
- Jenkins, D. J. A., Marchie, A., Augustin, L. S. A., Ros, E., Kendall, C. W. C. 2004. Viscous dietary fibre and metabolic effects. *Clinical Nutrition, Supplement*, 1 (2): 39–49, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2004.09.007>
- Jenkins, D. J., Wolever, T. M., Leeds, A. R., Gassull, M. A., Haisman, P., Dilawari, J., Goff, D. V., Metz, G. L., Alberti, K. G. 1978. Dietary fibres, fibre analogues, and glucose tolerance: importance of viscosity. *British Medical Journal*, 1 (6124): 1392–1394, DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.1.6124.1392>
- Knudsen, K. E. B. 1997. Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding. *Animal Feed Science Technology*, 67 (4): 319–338, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(97\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(97)00009-6)
- Lattimer, J. M., Haub, M. D. 2010. Effects of dietary fiber and its components on metabolic health. *Nutrients*, 2 (12): 1266–89, DOI: <https://doi.org/10.3390/nu2121266>
- Liyana-Pathirana, C. M., Shahidi, F. 2006. Importance of insoluble-bound phenolics to antioxidant properties of wheat. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (4): 1256–1264, DOI: <https://doi.org/10.1021/jf052556h>
- Lu, Z. X., Walker, K. Z., Muir, J. G., O'Dea, K. 2004. Arabinoxylan fibre improves metabolic control in people with type II diabetes. *European Journal of Clinical Nutrition*, 58 (4): 621–628, DOI: <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601857>

- Maina, N.H., Rieder, A., De Bondt, Y., Mäkelä-Salmi, N., Sahlström, S., Mattila, O., Lamothe, L.M., Nyström, L., Courtin, C.M., Katina, K., Poutanen, K. 2021. Process-induced changes in the quantity and characteristics of grain dietary fiber. *Foods*, 10: 2566, DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10112566>
- Martinant, J. P., Billot, A., Bouguennec, A., Charmet, G., Saulnier, L., Branlard, G. 1999. Genetic and environmental variations in water-extractable arabinoxylans content and flour extract viscosity. *Journal of Cereal Science*, 30 (1): 45–48, DOI: <https://doi.org/10.1006/j.crs.1998.0259>
- Mateo Anson, N., Havenaar, R., Bast, A., Haenen, G. R. M. M. 2010. Antioxidant and anti-inflammatory capacity of bioaccessible compounds from wheat fractions after gastrointestinal digestion. *Journal of Cereal Science*, 51 (1): 110–114, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.10.005>
- Nyman, M., Siljestrom, M., Pedersen, B., Knudsen, K. E. B., Asp, N.-G., Johansson, C.-G., Eggum, B. O. 1984. Dietary fiber content and composition in six cereals at different extraction rates. *Cereal Chemistry*, 61 (1): 14–19.
- Pisoschi, A. M., Pop, A. 2015. The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 97 (5 June): 55–74, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.04.040>
- Regand, A., Chowdhury, Z., Tosh, S. M., Wolever, T. M. S., Wood, P. 2011. The molecular weight, solubility and viscosity of oat beta-glucan affect human glycemic response by modifying starch digestibility. *Food Chemistry*, 129 (2): 297–304, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.053>
- Scott, R. W. 1979. Colorimetric determination of hexuronic acids in plant materials. *Analytical Chemistry*, 51 (7): 936–941, DOI: <https://doi.org/10.1021/ac50043a036>
- Southgate, D. A. T., Durmin, J. V. G. A. 1970. Calorie conversion factors. An experimental reassessment of the factors used in the calculation of the energy value of human diets. *British Journal of Nutrition*, 24 (2): 517–535, DOI: <https://doi.org/10.1079/bjn19700050>
- Stachowicz, N., Kiersztan, A. 2013. Rola mikroflory jelitowej w patogenezie otyłości i cukrzycy. *Postepy Higieny i Medycyny Doswiadczalnej*, 67: 288–303.
- Theander, O., Aman, P., Westerlund, E., Andersson, R., Pettersson, D. 1995. Total dietary fiber determined as neutral sugar residues, uronic acid residues, and Klason lignin (the Uppsala method): collaborative study. *Journal of AOAC International*, 78 (4): 1030–1044.
- Willcox, J. K., Ash, S. L., Catignani, G. L. 2004. Antioxidants and prevention of chronic disease. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44 (4): 275–295, DOI: <https://doi.org/10.1080/10408690490468489>
- Zielinski, H., Achremowicz, B., Przygodzka, M. 2012. Przewodzenie ziarniaków zbóż. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 1 (80): 5–26.
- Žilić, S. 2016. Phenolic compounds of wheat. Their content, antioxidant capacity and bioaccessibility. *MOJ Food Processing & Technology*, 2 (3): 85–89, DOI: <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2016.02.00037>