

PIOTR KOŁODZIEJCZYK, JAN MICHNIEWICZ

**WARTOŚĆ ŻYWIENIOWA ORAZ STRAWNOŚĆ I ZDOLNOŚĆ DO  
FERMENTACJI PRZY UDZIALE MIKROFLORY JELITOWEJ  
CZŁOWIEKA *IN VITRO* WYSOKOBŁONNIKOWYCH PRODUKTÓW  
ŻYTNICH**

Streszczenie

Celem pracy było porównanie wartości żywieniowej trzech produktów żytnich o zróżnicowanej zawartości błonnika pokarmowego oraz ich strawności i zdolności do fermentacji *in vitro*. W produkcie wysokobłonnikowym otrzymanym z przemiału ziarna żyta, w żytnim chlebie razowym i w chlebie z 40-procentowym udziałem mieszanki wysokobłonnikowego produktu z frakcją bogatą w błonnik rozpuszczalny (uzyskaną podczas wytwarzania tego produktu) oznaczono zawartość podstawowych składników chemicznych ze szczególnym uwzględnieniem błonnika pokarmowego i jego składników: arabinoksylianów,  $\beta$ -glukanów i fruktanów. Zbadano także strawność *in vitro* skrobi i wybranych składników odżywczych oraz podatność na fermentację *in vitro* niestrawionych składników błonnika. Stwierdzono, że badane produkty istotnie różniły się wartością żywieniową, zwłaszcza zawartością błonnika i jego składników oraz węglowodanów przyswajalnych, w tym szybko przyswajalnej skrobi. Wykazano ponadto, że produkty różniły się istotnie pod względem strawności ogółem składników pokarmowych wchodzących w skład ich suchej masy. Najniższą strawnością charakteryzował się produkt wysokobłonnikowy, najwyższą natomiast – chleb żytni razowy. W doświadczeniach *in vitro* dotyczących zdolności do fermentacji niestrawionych składników błonnika stwierdzono, że najbardziej podatne na działanie mikroflory jelitowej człowieka są fruktany i  $\beta$ -glukany, które w całości uległy fermentacji we wszystkich produktach, a najbardziej odporne na działanie enzymatyczne bakterii fekalnych były arabinoksyliany. Na podstawie przeprowadzonych badań *in vitro* porównano stopień wykorzystania błonnika pokarmowego i jego składników przez organizm człowieka, obliczony dla trzech różnych ilościowo porcji badanych produktów, które całkowicie pokrywają dobową dawkę błonnika rekomendowaną przez EFSA. Wykazano, że zarówno fruktany, jak i  $\beta$ -glukany zawarte w badanych produktach zostały całkowicie wykorzystane przez organizm, natomiast błonnik ogółem i arabinoksyliany tylko w pewnej części.

**Słowa kluczowe:** wysokobłonnikowe produkty żytnie, błonnik pokarmowy, wzbogacanie chleba, wartość żywieniowa, strawność *in vitro*, podatność na fermentację *in vitro*

---

Mgr inż. P. Kołodziejczyk, prof. dr hab. J. Michniewicz, Instytut Technologii Żywności Pochodzenia Roślinnego, Wydz. Nauk o Żywności i Żywieniu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Wojska Polskiego 31, 60-624 Poznań. Kontakt: jan.michniewicz@up.poznan.pl

## Wprowadzenie

Wzrost zachorowalności na przewlekłe choroby niezakaźne (*Non-Communicable Diseases* – NCDs) stwarza konieczność zmiany modelu odżywiania i powoduje zwiększenie popytu na naturalne produkty żywnościowe o korzystnym wpływie na organizm. Na szczególną uwagę zasługują przetwory zbożowe, które nadal stanowią istotny składnik codziennej diety [13]. Są one głównym źródłem błonnika pokarmowego (DF), którego prozdrowotna rola jest powszechnie znana i dobrze udokumentowana w wielu opracowaniach naukowych oraz badaniach klinicznych i epidemiologicznych [2, 5, 13, 18, 21]. Wykazano w nich ścisły związek między stanem zdrowia wysoko rozwiniętych społeczeństw a poziomem spożycia produktów zbożowych bogatych w DF. Na podstawie dotychczasowej wiedzy na ten temat eksperci EFSA (*European Food Safety Authority*) opracowali zalecenia dotyczące minimalnej dawki dobowego spożycia tego składnika, który dla zdrowej osoby dorosłej wynosi 25 g lub 3 g na 1 MJ energii dostarczanej wraz z pożywieniem [5]. Przy ocenie wpływu wysokobłonnikowych produktów zbożowych na zdrowie człowieka ważnym wskaźnikiem jest stopień wykorzystania przez organizm DF i jego składników. Z uwagi na trudności w badaniu procesów metabolicznych w układzie pokarmowym człowieka *in vivo* rozwinięto liczne modele umożliwiające monitoring trawienia i wchłaniania składników pokarmowych w warunkach *in vitro* [15].

Celem pracy była ocena wartości żywieniowej produktów żytnich o zróżnicowanej zawartości DF i różnym stopniu przetworzenia, z uwzględnieniem ich strawności oraz zdolności do fermentacji niestrawionych składników DF przy udziale mikroflory jelitowej człowieka w doświadczeniach *in vitro*.

## Material i metody badań

Do badań użyto trzech produktów żytnich: produktu wysokobłonnikowego, chleba razowego i chleba razowego wzbogaconego mieszanką wysokobłonnikowego produktu z frakcją bogatą w błonnik rozpuszczalny, uzyskaną podczas wytwarzania tego produktu. Produkt wysokobłonnikowy otrzymano w skali laboratoryjnej metodą frakcjonowania ziarna żyta odmiany ‘Visello’ na sucho. Metoda ta polegała na wielokrotnym rozdrabnianiu ziarna w laboratoryjnych młynach: walcowym Quadrumat Senior (Brabender GmbH, Niemcy) oraz kulowym (Łódzkie Zakłady Budowy Maszyn, Polska) w celu uzyskania produktów przemiału o możliwie najdrobniejszej granulacji. Otrzymane produkty wielokrotnie sortowano na sitach w celu stopniowego zwiększania, w kolejno otrzymywanych frakcjach, zewnętrznych części anatomicznych ziarna bogatych w DF. Cel ten osiągnięto odrzucając kolejno frakcje drobne zawierające głównie cząstki bielma o wielkości poniżej 50 µm zasobne w skrobię. Zastosowanie tej metody pozwoliło na otrzymanie produktu końcowego (WBP) o wielkości cząstek

powyżej 125  $\mu\text{m}$  z wydajnością 25,6 % masy ziarna. W procesie wytwarzania WBP pozyskiwano również uboczną frakcją o wielkości cząstek 80 ÷ 125  $\mu\text{m}$  z wydajnością 11,2 % masy surowca, która charakteryzowała się dużą zawartością błonnika rozpuszczalnego. Zmieszano ją z WBP w stosunku 1 : 2, a otrzymaną mieszankę użyto w ilości 40 % jako zamiennik mąki do wypieku chleba. Żytni chleb razowy (CH0), jak i chleb wzbogacony (CH40) otrzymano czterofazową metodą przygotowania ciasta na kwasie, tzw. metodą detmoldzką, z laboratoryjnego wypieku [17]. Podstawowym surowcem do produkcji obu chlebów była żytnia mąka handlowa typu 2000 (Bio Babalscy, Polska), którą zakupiono w jednym z supermarketów w Poznaniu. Chleby poddano ocenie sensorycznej przez zespół sześciu przeszkolonych osób za pomocą 20-punktowej metody opracowanej przez Arbeitsgemeinschaft Getreideforschung w Detmoldzie (Niemcy) [20].

W WBP oraz CH0 i CH40 oznaczano zawartość podstawowych składników chemicznych ze szczególnym uwzględnieniem DF i jego głównych komponentów. W ramach oceny składu chemicznego oznaczano zawartość: suchej masy, składników mineralnych w postaci popiołu, białka, lipidów i skrobi standardowymi metodami. Suchą masę oznaczano metodą ICC Standard Nr 110 [10], popiół – metodą ICC Standard Nr 104 [10], białko ogółem – metodą Kjeldahla według AACC Method 46-08 [1], lipidy – metodą Soxhleta według AACC Method 30-10 [1], a skrobię (TS) według AACC Method 76-13 [1]. Frakcje: rozpuszczalną (SDF) i nierozpuszczalną błonnika pokarmowego (IDF) oznaczano metodą AACC Method 32-07 [1], a ilość błonnika ogółem (TDF) obliczano, sumując zawartości SDF i IDF [1]. Zawartość podstawowych składników DF: arabinoksylianów (AX) i  $\beta$ -glukanów (BG) ogółem oraz fruktanów (FRU) oznaczano odpowiednio: według Hashimoto i wsp. [9], ICC Standard Nr 168 [10] oraz AACC Method 32-32 [1]. Z kolei zawartość cukrów redukujących ogółem oznaczano kolorymetrycznie metodą polegającą na redukcji kwasu 3,5 dinitrosalicylowego [19]. Zawartość sacharydów przyswajalnych ogółem obliczano z różnicy między sumą zawartości skrobi (TS) i cukrów redukujących ogółem a zawartością skrobi odpornej. Wszystkie oznaczenia wykonano w trzech powtórzeniach.

Strawność *in vitro* skrobi w WBP, CH0 i CH40 oznaczano metodą opracowaną przez Englysta i wsp. [6]. Oznaczano zawartość glukozy ogółem (TG) i glukozy wolnej (FG), jak również szybko przyswajanej glukozy (RAG), tj. uwalnianej po 20 min hydrolizy oraz wolno przyswajanej (SAG), tj. uwalnianej po 120 min. Na tej podstawie obliczano zawartość skrobi szybko i wolno przyswajalnej (RDS i SDS) oraz skrobi odpornej (RS).

Strawność *in vitro* składników odżywczych w WBP, CH0 i CH40 oznaczano według Aura i wsp. [3]. Metoda polegała na trójstopniowej hydrolizie enzymatycznej badanych składników w warunkach symulujących procesy trawienne w górnych odcinkach przewodu pokarmowego człowieka (jama ustna, żołądek, dwunastnica i jelito

cznie). Na pierwszym etapie badane produkty poddano 5-minutowej hydrolizie przy udziale  $\alpha$ -amylazy ślinowej, na drugim – 2-godzinnemu trawieniu za pomocą pepsyny, natomiast na trzecim – 3-godzinnemu działaniu mieszaniny pankreatyny, żółci i mucyny. Po 305 min trawienia próbki poddawano 24-godzinnej dializie w workach dializacyjnych o punkcie odcięcia cutt-out 12 400 Da. Dializę prowadzono w wodzie dejonizowanej przy 6-krotnej jej wymianie. Niestrawione pozostałości produktów liofilizowano, po czym rozdrabniano. We wszystkich liofilizatach oznaczano zawartość suchej masy, białka, TS, frakcji SDF i IDF oraz AX, BG i FRU według wyżej opisanych metod analitycznych.

Produkty po trawieniu enzymatycznym poddawano fermentacji *in vitro* w warunkach beztlenowych z udziałem mikroflory jelitowej człowieka według metody, którą opisali Karppinen i wsp. [11, 12]. Materiał do przygotowania inokulum pochodził od trzech zdrowych osób, które przez 3 miesiące poprzedzające badania nie przyjmowały antybiotyków. Świeżo zebrany kał zmieszano z buforem fosforanowo-węglanowym (pH 8,0) w stosunku 1 : 1, po czym otrzymaną zawiesinę homogenizowano, przecierało przez sito o wymiarach oczek 1 mm i zamrażano w temp. -70 °C. Przed zaszczepieniem próbek zawiesinę rozmrażano i rozcieńczano w takiej objętości buforu, aby stężenie końcowe kału w inokulum wynosiło 20,8 % (m/m). Wszystkie czynności związane z przygotowaniem inokulum przeprowadzono w atmosferze azotu.

Do próbek badanych produktów po trawieniu, zawierających 100 mg suchej masy, dodawano 2 ml buforu, po czym próbki pozostawiano na 16 h w temp. 4 °C w celu hydratacji liofilizatów. Następnie próbki ogrzane do temp. 37 °C zaszczepiano 8 ml inokulum w atmosferze azotu i w szczelnie zamkniętych probówkach poddawano fermentacji przez 24 h w temp. 37 °C w łaźni wodnej z wytrząsaniem (Labo Play typ SWP 22N, Polska). Do każdej serii próbek badanych produktów dołączano próbkę zerową, zawierającą tylko inokulum, z którą postępowano w ten sam sposób jak z próbkami właściwymi. Badaniom poddano również zaszczepione próbki, jak i próbkę zerową niepoddane fermentacji. Próbki te bezpośrednio po dodaniu 8 ml inokulum wychładzano w suchym lodzie, aby zapobiec fermentacji. Wszystkie próbki zamrażano w temp. -20 °C i liofilizowano w liofilizatorze typu FD 1.0 – 60 (Heto-Holten A/S, Dania). W liofilizatach oznaczano zawartość suchej masy oraz TDF, AX, BG i FRU według wyżej opisanych metod. Doświadczenia *in vitro* przeprowadzono w 20 powtórzeniach, aby uzyskać wystarczającą masę próbek do dalszych oznaczeń.

Wyniki opracowano statystycznie za pomocą programu Statistica 9.0 StatSoft. Przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji, a do wyodrębnienia grup wartości średnich, które nie różniły się istotnie, zastosowano test Duncana przy  $p = 0,05$ .

## Wyniki i dyskusja

Badany produkt wysokobłonnikowy (WBP) swoim wyglądem zewnętrznym, tj. barwą, granulacją, sypkością oraz właściwościami smakowo-zapachowymi przypominał otręby żytnie, z tą jednak różnicą, że był drobniejszy niż handlowe otręby znajdujące się na rynku. Na podstawie wyników punktowej oceny sensorycznej obu chlebów wykazano, że zastąpienie mąki żytniej mieszanką WBP z frakcją bogatą w błonnik rozpuszczalny w ilości 40 % wpłynęło tylko w niewielkim stopniu na obniżenie jakości pieczywa. Chleb wzbogacony (CH40) oceniono jako dobry, przypisując mu 17 pkt, natomiast chleb kontrolny (CH0), któremu przypisano 19 pkt – jako bardzo dobry.

Tabela 1. Zawartość składników chemicznych w produktach żytnich [g/100 g produktu]

Table 1. Content of chemical compounds in rye products [g/100 g of product as eaten]

Składnik / Component	WBP	CH0	CH40
Woda / Water	10,7 <sup>a</sup> ± 0,1	44,6 <sup>b</sup> ± 0,1	45,0 <sup>c</sup> ± 0,1
Składniki mineralne (popiół) Mineral components (ash)	4,5 <sup>c</sup> ± 0,1	1,8 <sup>a</sup> ± 0,0	2,2 <sup>b</sup> ± 0,1
Lipidy / Fat	2,7 <sup>b</sup> ± 0,2	1,0 <sup>a</sup> ± 0,1	1,2 <sup>a</sup> ± 0,2
Białko ogółem (N × 6,25) / Protein (N × 6.25)	16,3 <sup>c</sup> ± 0,2	7,1 <sup>a</sup> ± 0,2	7,9 <sup>b</sup> ± 0,1
Sacharydy przyswajalne / Assimilable saccharides	17,0 <sup>a</sup> ± 0,4	31,7 <sup>c</sup> ± 0,3	25,3 <sup>b</sup> ± 0,4
Skrobia ogółem / Total starch (TS)	17,0 <sup>a</sup> ± 0,5	30,6 <sup>c</sup> ± 0,8	23,4 <sup>b</sup> ± 0,3
Cukry redukujące ogółem / Total reducing sugars	1,0 <sup>a</sup> ± 0,2	1,7 <sup>b</sup> ± 0,2	2,3 <sup>c</sup> ± 0,1
Błonnik pokarmowy ogółem / Total dietary fibre (TDF)	40,9 <sup>c</sup> ± 0,3	8,9 <sup>a</sup> ± 0,4	13,1 <sup>b</sup> ± 0,1
- rozpuszczalny / soluble (SDF)	4,3 <sup>c</sup> ± 0,3	2,1 <sup>a</sup> ± 0,2	3,1 <sup>b</sup> ± 0,1
- nierozpuszczalny / insoluble (IDF)	36,6 <sup>c</sup> ± 0,3	6,8 <sup>a</sup> ± 0,3	10,0 <sup>b</sup> ± 0,3
Arabinoksylany ogółem / Total arabinoxylans (AX)	18,9 <sup>c</sup> ± 0,6	4,9 <sup>a</sup> ± 0,1	6,9 <sup>b</sup> ± 0,1
β-glukany ogółem / Total β-glucans (BG)	5,2 <sup>c</sup> ± 0,2	1,2 <sup>a</sup> ± 0,1	1,5 <sup>b</sup> ± 0,1
Fruktany / Fructans (FRU)	5,2 <sup>b</sup> ± 0,3	1,4 <sup>a</sup> ± 0,0	1,5 <sup>a</sup> ± 0,1

Objaśnienia / Explanatory notes:

WBP – wysokobłonnikowy produkt / high-fibre product; CH0 – żytni chleb razowy (chleb kontrolny) / wholemeal rye bread (control bread); CH40 – żytni chleb razowy z 40-procentowym udziałem mieszanki WBP z frakcją bogatą w SDF otrzymywaną podczas wytwarzania tego produktu / wholemeal rye bread with 40 % of blend of WBP and SDF-rich fraction produced while preparing WBP. W tabeli przedstawiono wartości średnie ± odchylenia standardowe / Table shows mean values ± standard deviations; n = 3; a, b, c – wartości średnie w wierszach oznaczone różnymi literami różnią się statystycznie istotnie (p ≤ 0,05) / mean values in rows denoted by different letters differ statistically significantly (p ≤ 0.05).

Badane produkty różniły się istotnie pod względem zawartości zdecydowanej większości oznaczonych składników chemicznych (tab. 1). Największe różnice zaobserwowano między WBP a obydwoimi chlebami. Co prawda CH0 i CH40 różniły się również istotnie pod względem zawartości większości składników pokarmowych, ale dysproporcje między nimi były wyraźnie mniejsze. Analiza ilościowa poszczególnych

składników w 100 g każdego z produktów umożliwiła wykazanie, że wszystkie produkty żytnie, a zwłaszcza WBP, są bogatym źródłem składników mineralnych i białka, a wprowadzenie ich do codziennej diety przyczyni się do zwiększenia pokrycia zapotrzebowania organizmu na szereg niezbędnych mikro- i makroelementów oraz białka roślinnego. Co prawda białko przetworów zbożowych nie odznacza się wysoką wartością biologiczną, ale wartość białek funkcjonalnych pochodzących z peryferyjnych części anatomicznych ziarniaka, które wchodziły głównie w skład WBP oraz w mniejszej ilości – w skład CH40, była wyraźnie wyższa niż białek zapasowych zawartych w jego środkowej części. Zawartość białka w CH0 i CH40 była o ok. połowę mniejsza niż w WBP, ale ze względu na częstotliwość i ilość spożywanego pieczywa wielkości podaży tego składnika nie można pominąć.

Pod względem żywieniowym największą zaletą badanych produktów była mała zawartość węglowodanów przyswajalnych przy jednocześnie dużej zawartości DF w porównaniu z rafinowanymi produktami zbożowymi. W WBP stosunek ilościowy TDF do sacharydów przyswajalnych wynosił 2,4 : 1, natomiast w obu chlebach stosunek ten był odwrotny. W CH40 był on jednak zdecydowanie wyższy w porównaniu z CH0. Stosunki te w przypadku CH40 i CH0 wynosiły odpowiednio: 0,5 : 1 oraz 0,3 : 1. Dysproporcje zawartości TDF między produktami były przede wszystkim powodowane różnicami zawartości IDF. Z kolei ilości frakcji rozpuszczalnej SDF, ważnej pod względem żywieniowym, we wszystkich produktach kształtowały się na wyraźnie niższym poziomie (2,1 ÷ 4,3 g/100 g) niż IDF. WBP zawierał jednak 2-krotnie więcej SDF niż CH0, natomiast chleb wzbogacony zawierał prawie o 50 % więcej tej frakcji błonnika niż chleb kontrolny. Otrzymane wyniki wskazują, że spożycie 4 porcji WBP lub 3,5 kromki CH40 w ciągu dnia w całości pokrywa rekomendowaną przez EFSA dobową dawkę 25 g DF dla osób dorosłych. Zgodnie z wytycznymi US Food and Drug Administration (FDA) z 2017 r. 1 porcja (1 filiżanka) produktów zbożowych, takich jak WBP powinna mieć masę co najmniej 15 g, natomiast jedna kromka chleba o grubości 1 cala (2,54 cm) – 56 g [8]. Na podstawie składu DF badanych produktów wykazano ponadto, że dominującym ilościowo składnikiem DF były arabinoksylany (AX), natomiast w mniejszej ilości występowały fruktany (FRU) i  $\beta$ -glukany (BG), którym przypisuje się szczególną rolę w żywieniu. Obecność FRU i fruktooligosacharydów, zwłaszcza krótkołańcuchowych, jest ważna ze względu na ich właściwości prebiotyczne, natomiast BG są korzystne ze względu na udokumentowaną klinicznie rolę w gospodarce węglowodanowej i lipidowej człowieka [4, 23]. W gospodarce węglowodanowej człowieka kluczowe znaczenie ma skrobia, która stanowi dominujący ilościowo składnik przetworów zbożowych. Charakteryzuje się ona różną wartością żywieniową, determinowaną zawartością RDS i SDS oraz RS w produktach zbożowych. Podstawowe różnice fizjologiczne pomiędzy tymi frakcjami polegają na różnicowanej podatności na trawienie oraz różnej szybkości wchłaniania powstałych pro-

duktów hydrolizy w przewodzie pokarmowym człowieka. RDS jest szybko trawiona i wchłaniana do krwi, co sprawia, że gwałtownie rośnie wartość glikemii poposiłkowej i zwiększa się wyrzut insuliny. Z kolei SDS, jako frakcja wolniej hydrolizowana i trawiona, wpływa stabilizująco na poziom glukozy we krwi oraz zwiększa uczucie sytości [6, 7]. RS natomiast nie jest trawiona i absorbowana w jelicie cienkim, ale może być fermentowana przez mikroflorę jelitową w okrężnicy [24]. Po porównaniu składu frakcyjnego skrobi w badanych produktach wykazano, że największą zawartością frakcji SDS charakteryzował WBP (5,3 g/100 g), której towarzyszyła najmniejsza zawartość RDS (10,7 g/100 g) – tab. 2. W obydwu chlebach zawartość SDS kształtowała się na niższym, ale i podobnym poziomie (1,3 ÷ 2,0 g/100 g), chociaż CH40 zawierał o 6,3 g/100 g mniej frakcji RDS niż CH0. Z kolei WBP zawierał najwięcej RS, podczas gdy w CH0, jak i w CH40 ilości tej frakcji były stosunkowo małe i nie różniły się istotnie. Englyst i wsp. [7] na podstawie analizy 39 różnych produktów żywnościowych o zróżnicowanej zawartości RDS (4,1 ÷ 65,6 g/100 g), z których większość stanowiły przetwory zbożowe, stwierdzili wysoką, statystycznie istotną dodatnią korelację liniową ( $r = 0,728$ ;  $p < 0,001$ ) między zawartością RDS a indeksem glikemicznym.

Tabela 2. Zawartość frakcji skrobi w produktach żywnych oznaczona w doświadczeniu *in vitro* [g/100 g produktu]

Table 2. Content of starch fractions in rye products determined by *in vitro* method [g/100 g of product]

Składnik / Component	WBP	CH0	CH40
Skrobia ogółem / Total starch (TS)	17,0 <sup>a</sup> ± 0,5	30,6 <sup>c</sup> ± 0,8	23,4 <sup>b</sup> ± 0,3
- skrobia szybko przyswajalna (RDS) rapidly digestible starch (RDS)	10,7 <sup>a</sup> ± 0,2	28,0 <sup>c</sup> ± 1,2	21,7 <sup>b</sup> ± 0,3
- skrobia wolno przyswajalna (SDS) slowly digestible starch (SDS)	5,3 <sup>b</sup> ± 0,5	2,0 <sup>a</sup> ± 0,5	1,3 <sup>a</sup> ± 0,3
- skrobia oporna / resistance starch (RS)	1,0 <sup>b</sup> ± 0,2	0,6 <sup>a</sup> ± 0,2	0,4 <sup>a</sup> ± 0,2

Objaśnienia jak pod tab. 1. / Explanatory notes as in Tab. 1.

Ragae i wsp. [16] wykazali występowanie istotnej korelacji liniowej między zawartością RDS a SDF ( $r = -0,613$ ) oraz IDF ( $r = 0,935$ ) w chlebach pszennych wzbogaconych całościarną mąką ze zbóż chlebowych i niechlebowych, celulozą i gumą ksantanową. W diabetologii praktyczną wskazówką doboru odpowiedniej dawki insuliny jest tzw. jednostka chlebowa (wymiennik węglowodanowy – WW). Zgodnie z przyjętą w Polsce definicją 1 WW określa obecność 10 g węglowodanów przyswajalnych w produkcie. Przedstawione wyniki wskazują, że 4 porcje (60 g) WBP lub prawie trzy czwarte kromki CH40 (40 g) i pół kromki CH0 (32 g) zawierają 1 WW.

W celu oceny strawności składników odżywczych znajdujących się w badanych produktach poddano je hydrolizie enzymatycznej w doświadczeniu *in vitro*, symulującym procesy trawienne w górnych odcinkach przewodu pokarmowego człowieka (tab.

3). Z danych tych wynika, że badane produkty istotnie różniły się strawnością ogółem (ang. *overall digestibility*) składników odżywczych wchodzących w skład ich suchej masy. Najniższą wartość zaobserwowano w przypadku WBP (45 %), zaś najwyższą – CH0 (73 %). Strawność ogółem CH40 wynosiła 65 % i była o 8 punktów procentowych (p.p.) niższa niż CH0. Mniejsze różnice między porównywanymi produktami odnotowano w przypadku poszczególnych składników pokarmowych. W WBP, CH0 i CH40 stopień hydrolizy białka był podobny (70 ÷ 77 %), a skrobia w każdym z produktów niemal w całości (94 ÷ 96 %) została strawiona. Z kolei TDF był praktycznie odporny na działanie enzymów trawiennych. Wielkości ubytków TDF w procesie trawienia badanych produktów kształtowały się na podobnym poziomie (ok. 10 %), choć w przypadku frakcji SDF obserwowano większe zmiany niż IDF.

Tabela 3. Zawartość składników chemicznych w produktach żytnich [% s.m.] oraz wielkość ubytków składników po trawieniu *in vitro* [%]

Table 3. Content of chemical components in rye products [% d.m.] and amount of their loss after *in vitro* digestion [%]

Składnik / Component	Składniki po trawieniu Components after digestion			Ubytek po trawieniu Loss after digestion		
	WBP	CH0	CH40	WBP	CH0	CH40
Sucha masa / Dry matter	55,4 <sup>c</sup> ± 0,4	27,2 <sup>a</sup> ± 0,2	35,2 <sup>b</sup> ± 0,5	45	73	65
Białko / Protein (N × 6,25)	9,9 <sup>a</sup> ± 0,2	10,9 <sup>b</sup> ± 0,2	11,0 <sup>b</sup> ± 0,2	70	77	73
Skrobia ogółem / Total starch (TS)	1,5 <sup>a</sup> ± 0,0	13,0 <sup>c</sup> ± 0,6	6,5 <sup>b</sup> ± 0,2	96	94	95
Błonnik pokarmowy ogółem (TDF) Total dietary fibre (TDF)	75,2 <sup>c</sup> ± 1,3	52,8 <sup>a</sup> ± 0,6	61,3 <sup>b</sup> ± 1,2	9	11	9
- rozpuszczalny / soluble (SDF)	7,6 <sup>a</sup> ± 0,2	11,7 <sup>b</sup> ± 0,1	13,7 <sup>c</sup> ± 0,2	13	16	14
- nierozpuszczalny / insoluble (IDF)	67,6 <sup>c</sup> ± 1,2	41,1 <sup>a</sup> ± 0,6	47,6 <sup>b</sup> ± 1,0	9	9	8
Arabinoksylany ogółem (AX) Total arabinoxylans (AX)	32,5 <sup>c</sup> ± 0,9	22,1 <sup>a</sup> ± 0,9	26,1 <sup>b</sup> ± 0,9	15	32	27
β-glukany ogółem (BG) Total β-glucans (BG)	8,1 <sup>a</sup> ± 0,3	5,0 <sup>b</sup> ± 0,1	4,8 <sup>b</sup> ± 0,2	23	37	38
Fruktany / Fructans (FRU)	1,9 <sup>a</sup> ± 0,1	1,9 <sup>a</sup> ± 0,1	1,7 <sup>a</sup> ± 0,1	82	80	78

Objaśnienia jak pod tab. 1. / Explanatory notes as in Tab. 1.

Po porównaniu wielkości ubytków poszczególnych składników DF po trawieniu *in vitro* odnotowano największe ilościowe straty (78 ÷ 82 %) w przypadku FRU, mniejsze – w odniesieniu do BG (23 ÷ 38 %), natomiast najmniejsze – AX (15 ÷ 32 %). W przypadku tych dwóch ostatnich składników wykazano znaczące różnice między WBP a obydwoma chlebami. W badanych chlebach zarówno BG, jak i AX, łatwiej ulegały degradacji niż w WBP. Prawdopodobnie różnice te wynikały z czę-



ściowej defragmentacji cząsteczek tych polisacharydów w czasie przygotowania oraz fermentacji kwasu i ciasta, jak również podczas wypieku.

Odnosząc wyniki tych doświadczeń do ubogiej literatury dotyczącej strawności *in vitro* chleba żytniego oraz nieco większej liczby pozycji dotyczących produktów przemiału żyta, głównie otrąb, generalnie można stwierdzić, że są one zgodne z wynikami innych autorów. Aura i wsp. [3] wykazali, że strawność ogółem żytniego chleba całościarnowego wynosiła 78 %, a stopień hydrolizy jego poszczególnych składników kształtował się na podobnym poziomie, jaki wykazano w badaniach własnych. Z kolei Karppinen i wsp. [11, 12] oraz Nordlund i wsp. [14] stwierdzili, że strawność ogółem składników otrąb żytnich zmienia się w zakresie 55 ÷ 60 %, zaś wielkość ubytku głównego ich komponentu, tj. DF była porównywalna z WBP. Ponadto wymienieni autorzy zaobserwowali, że w procesie trawienia *in vitro* składnikami DF w produktach przemiału ziarna żyta najbardziej podatnymi na depolimeryzację są FRU, natomiast najbardziej opornymi – AX [12].

Badane produkty po trawieniu enzymatycznym poddano kolejnemu doświadczeniu *in vitro* – fermentacji z udziałem mikroflory jelitowej człowieka (tab. 4). Wykazano, że CH0 różnił się podatnością na fermentację składników suchej masy ogółem od CH40 oraz WBP. W CH0 zaobserwowano największy ubytek suchej masy sięgający 21 % wobec 17 ÷ 19 % w WBP i CH40. Przyczyn tych różnic należy upatrywać w odmiennym składzie ilościowo-jakościowym DF w tych produktach. Prawdopodobnie DF obecny w WBP oraz w chlebie wzbogaconym frakcją przemiałową bogatą w zewnętrzne tkanki ziarna zawiera więcej celulozy i ligniny, nieoznaczonych w ramach tych doświadczeń, niż chleb kontrolny. Te komponenty DF nie podlegają bowiem fermentacji w jelicie grubym przez mikroflorę jelitową człowieka [24]. Po porównaniu zdolności do fermentacji oznaczanych składników DF w badanych produktach wykazano, że najbardziej podatne na działanie mikroflory jelitowej człowieka były BG i FRU, które w całości uległy fermentacji. Obecności tych polisacharydów nie stwierdzono również w inokulum. Bardziej odporne na działanie enzymatycznej mikroflory jelitowej były AX, które uległy fermentacji w ilości zaledwie 10 ÷ 11 %. Niewielkie ilości AX, na poziomie 9 %, stwierdzono także w inokulum.

Otrzymane wyniki w pełni pokrywają się z obserwacjami innych autorów, którzy przeanalizowali zmiany zawartości cukrów prostych w uprzednio strawionych otrębach pszennych, żytnich i owsianych po fermentacji *in vitro* przy udziale mikroflory fekalnej człowieka i wykazali, że w największych ilościach i najszybciej fermentują glukoza i fruktoza, w mniejszej skali ksyloza i arabinoza, a w najmniejszej – mannoza, ramnoza i galaktoza [11, 12, 14, 22].

Tabela 4. Zawartość błonnika pokarmowego i jego składników w produktach żywnych wraz z inokulum i inokulum przed i po fermentacji *in vitro* oraz straty tych składników po fermentacjiTable 4. Content of dietary fibre and its components in rye products with inoculum and inoculum alone before and after fermentation *in vitro* and losses of these components after fermentation

Zabieg / Treatment Strata / Loss	Sucha masa Dry matter	Błonnik pokarmowy ogółem Total dietary fibre	Arabinoksylany ogółem Total arabinoxylans	$\beta$ -glukany ogółem Total $\beta$ -glucans	Fruktany Fructans
WBP + inokulum / WBP + inoculum					
Przed fermentacją [% s.m.] Before fermentation [% d.m.]	100	48,6 <sup>d</sup> ± 0,8	15,9 <sup>d</sup> ± 0,4	2,4 <sup>b</sup> ± 0,1	0,6 <sup>a</sup> ± 0,0
Po fermentacji [% s.m.] After fermentation [% d.m.]	82,6 <sup>b</sup> ± 1,4	48,4 <sup>d</sup> ± 0,5	17,3 <sup>c</sup> ± 0,2	ślady traces	ślady traces
Ubytek / Loss [%]	17	18	10	100	100
CH0 + inokulum / CH0 + inoculum					
Przed fermentacją [% s.m.] Before fermentation [% d.m.]	100	42,0 <sup>b</sup> ± 0,4	12,9 <sup>b</sup> ± 0,3	1,5 <sup>a</sup> ± 0,1	0,6 <sup>a</sup> ± 0,0
Po fermentacji [% s.m.] After fermentation [% d.m.]	79,4 <sup>a</sup> ± 0,9	43,0 <sup>b</sup> ± 0,7	14,3 <sup>c</sup> ± 0,2	ślady traces	ślady traces
Ubytek / Loss [%]	21	19	11	100	100
CH40 + inokulum / CH40 + inoculum					
Przed fermentacją [% s.m.] Before fermentation [% d.m.]	100	44,5 <sup>c</sup> ± 0,6	14,0 <sup>c</sup> ± 0,4	1,4 <sup>a</sup> ± 0,1	0,5 <sup>a</sup> ± 0,0
Po fermentacji [% s.m.] After fermentation [% d.m.]	81,5 <sup>b</sup> ± 1,9	44,4 <sup>c</sup> ± 0,5	15,3 <sup>d</sup> ± 0,5	ślady traces	ślady traces
Ubytek / Loss [%]	19	19	11	100	100
Inokulum / Inoculum					
Przed fermentacją [% s.m.] Before fermentation [% d.m.]	100	37,5 <sup>a</sup> ± 0,8	9,0 <sup>a</sup> ± 0,4	ślady traces	ślady traces
Po fermentacji [% s.m.] After fermentation [% d.m.]	96,3 <sup>d</sup> ± 1,0	37,2 <sup>a</sup> ± 0,5	8,7 <sup>a</sup> ± 0,2	ślady traces	ślady traces
Ubytek / Loss [%]	4	4	7	0	0

Objaśnienia / Explanatory notes:

a, b, c, d – wartości średnie w kolumnach oznaczone różnymi literami różnią się statystycznie istotnie ( $p \leq 0,05$ ) / mean values in columns denoted by different letters differ statistically significantly ( $p \leq 0.05$ ).  
Pozostałe objaśnienia jak pod tab. 1. / Other explanatory notes as in Tab. 1.

W jelicie grubym człowieka cukry powstałe po metabolizmie składników DF stanowią cenne substraty dla mikroflory jelitowej do produkcji krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych, jak i do stymulacji wzrostu i aktywności probiotycznych bakterii *Lactobacillus* i *Bifidobacterium* [4, 24]. Wood i wsp. [22] po przebadaniu kinetyki procesu fermentacji *in vitro* BG znajdujących się w strawionych *in vitro* otrębach

pszennych i owsianych, jak i w owsianym preparacie BG wykazali, że we wszystkich tych produktach cała ilość BG została wykorzystana przez mikroflorę jelitową już po 4-godzinnej fermentacji, przy czym szybciej fermentowała ich frakcja rozpuszczalna niż nierozpuszczalna.

Tabela 5. Bilans masowy błonnika i jego składników w porcjach produktów żywnych w czasie trawienia i fermentacji *in vitro* [g/porcja] oraz stopień wykorzystania tych składników [%]

Table 5. Mass balance of dietary fibre and its components in servings of rye products during *in vitro* digestion and fermentation [g/serving] and utilization degree of fibre components [%]

Składnik / Component	4 porcje (60 g) WBP 4 servings (60 g) of WBP	5 kromek (280 g) CH0 5 slices (280 g) of CH0	3,5 kromki (196 g) CH40 3.5 slices (196 g) of CH40			
Przed trawieniem / Before digestion						
Błonnik pokarmowy / Dietary fibre (TDF)	24,5	24,9	25,7			
Arabinoksylany / Arabinoxylans (AX)	11,3	13,7	13,5			
$\beta$ -glukany / $\beta$ -glucans (BG)	3,1	3,4	2,9			
Fruktany / Fructans (FRU)	3,1	3,9	2,9			
Po trawieniu / After digestion						
Błonnik pokarmowy / Dietary fibre (TDF)	22,3	22,3	23,3			
Arabinoksylany / Arabinoxylans (AX)	9,6	9,3	9,9			
$\beta$ -glukany / $\beta$ -glucans (BG)	2,4	2,1	1,8			
Fruktany / Fructans (FRU)	0,6	0,8	0,6			
Po fermentacji / After fermentation						
Błonnik pokarmowy / Dietary fibre (TDF)	14,8	12,7	14,0			
Arabinoksylany / Arabinoxylans (AX)	8,5	7,9	8,5			
$\beta$ -glukany / $\beta$ -glucans (BG)	0	0	0			
Fruktany / Fructans (FRU)	0	0	0			
Różnica między spożytą ilością błonnika i jego składników a ilością pozostałą po fermentacji [g/porcja] oraz stopień wykorzystania tych składników [%] / Difference between consumed amount of dietary fibre and its components and their amount that remained after fermentation [g/serving], and utilization degree of fibre components [%]						
Składnik / Component	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]
Błonnik pokarmowy / Dietary fibre (TDF)	9,7	40	12,3	49	11,6	45
Arabinoksylany / Arabinoxylans (AX)	2,9	25	5,8	42	5,0	37
$\beta$ -glukany / $\beta$ -glucans (BG)	3,1	100	3,4	100	2,9	100
Fruktany / Fructans (FRU)	3,1	100	3,9	100	2,9	100

Objaśnienia jak pod tab. 1. / Explanatory notes as in Tab. 1.

W tab. 5. podsumowano wyniki przeprowadzonych doświadczeń modelowych trawienia enzymatycznego i fermentacji *in vitro* w postaci bilansu masowego TDF

i jego składników w trzech różnych porcjach badanych produktów, które w przypadku danego produktu całkowicie pokrywały dzienną dawkę DF rekomendowaną przez EFSA. Przy obliczeniach sfermentowanych ilości TDF i jego komponentów uwzględniono podatność na fermentację tylko tych ilości składników, które były zawarte w samych produktach, tzn. nie brano pod uwagę ilości składników, które znajdowały się w inokulum. Zarówno BG, jak i FRU zawarte w badanych produktach zostały całkowicie wykorzystane przez organizm, natomiast TDF i AX tylko częściowo (tab. 5). Stopień wykorzystania TDF ( $40 \div 49$  %) był jednak większy niż AX ( $25 \div 42$  %). Z kolei porównanie stopnia wykorzystania TDF i AX znajdujących się w poszczególnych produktach o różnym składzie ilościowo-jakościowym DF wskazuje, że zarówno TDF, jak i AX zawarte w CH0 w największym stopniu (odpowiednio 49 i 42 %) zostały zdegradowane przez enzymy trawienne i uległy fermentacji przy udziale mikroflory jelitowej, a w najmniejszym – w WBP (odpowiednio 40 i 25 %).

### Wnioski

1. Wysokobłonnikowy produkt otrzymany metodą frakcjonowania produktów przemiału ziarna żyta na sucho oraz żytni chleb razowy z 40-procentowym udziałem mieszanki wysokobłonnikowego produktu z frakcją bogatą w błonnik rozpuszczalny, uzyskaną w czasie wytwarzania tego produktu, są wartościowymi żywieniowo źródłami błonnika pokarmowego. Wysokobłonnikowy produkt był ponad 2-krotnie zasobniejszy w błonnik niż surowiec wyjściowy, natomiast wzbogacony chleb bogatszy o 50 % w ten składnik w porównaniu z chlebem bez dodatku.
2. Pod względem żywieniowym największą zaletą wysokobłonnikowego produktu oraz wzbogaconego chleba jest niższa wartość stosunku ilościowego węglowodanów przyswajalnych do błonnika pokarmowego ogółem (odpowiednio 0,4 i 2) w porównaniu z chlebem kontrolnym (3,5). Obniżonym wartościom tego stosunku we wskazanych produktach towarzyszyła wyraźnie mniejsza zawartość szybko przyswajalnej skrobi niż w chlebie bez udziału wysokobłonnikowej mieszanki.
3. W strawionych produktach składnikami błonnika najbardziej podatnymi na działanie mikroflory jelitowej człowieka, w doświadczeniach fermentacji *in vitro*, były fruktany i  $\beta$ -glukany, które w całości uległy fermentacji, a najbardziej odporne na działanie aparatu enzymatycznego bakterii fekalnych były arabinoksylany.
4. W doświadczeniach modelowych *in vitro* stopień wykorzystania błonnika pokarmowego i arabinoksylanów w chlebach, jako produktach zbożowych o wyższym poziomie przetworzenia, był wyższy niż w nisko przetworzonym produkcie wysokobłonnikowym.

*Badania były finansowane ze środków MNiSzW w ramach projektu N N312 21838.*

## Literatura

- [1] AACC Methods: 32-07, 32-10, 32-32, 46-08, 76-13. 10<sup>th</sup> ed. AACC, St. Paul, Minn., 2000.
- [2] Åman P., Andersson A.A.M., Rakha A., Andersson R.: Rye, a healthy cereal full of dietary fiber. *Cereal Foods World* 2010, 55, 231-234.
- [3] Aura A.M., Härkönen H., Fabritius M., Poutanen K.: Development of an *in vitro* enzyme digestion method for removal of starch and protein and assessment of its performance using rye and wheat breads. *J. Cereal Sci.*, 1999, 29, 139-152.
- [4] Bornet F.R.J., Brouns F., Tashiro Y., Duvillie V.: Nutritional aspects of short-chain fructooligosaccharides: Natural occurrence, chemistry, physiology and health implications. *Dig. Liv. Dis.*, 2002, 34 Suppl. 2, S111-S120.
- [5] EFSA: Scientific opinion on dietary reference values for carbohydrates and dietary fibre. *EFSA J.*, 2010, 8 (3), #1462.
- [6] Englyst H.N., Kingman S.M., Cummings J.H.: Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur. J. Clinical Nutr.*, 1992, 46 Suppl. 2, S33-S50.
- [7] Englyst H.N., Veenstra J., Hudson G.J.: Measurement of rapidly available glucose (RAG) in plant foods: A potential *in vitro* predictor of the glycemic response. *Br. J. Nutr.*, 1996, 75, 327-337.
- [8] FDA: Code of Federal Regulations. Title 21 – Food and Drugs. Chapter I – Food and Drug Administration, Department of Health and Human Services. Subchapter B – Food for Human Consumption. Part 101. Food Labeling, Subpart A – General Provisions.
- [9] Hashimoto S., Shogren M.D., Pomeranz Y.: Cereal pentosans: Their estimation and significance. I. Pentosans in wheat and milled wheat products. *Cereal Chem.*, 1987, 64, 30-34.
- [10] ICC Standards: Methods of the International Association for Cereal Chemistry (ICC). ICC Standards 104, 110, 168. ICC, Detmold 1998.
- [11] Karppinen S., Liukkonen K., Aura A.M., Forssell P., Poutanen K.: *In vitro* fermentation of polysaccharides of rye, wheat and oat brans and inulin by human faecal bacteria. *J. Sci. Food Agric.*, 2000, 80, 1469-1476.
- [12] Karppinen S., Kiiliainen K., Liukkonen K., Forssell P., Poutanen K.: Extraction and *in vitro* fermentation of rye bran fractions. *J. Cereal Sci.*, 2001, 34, 269-278.
- [13] Kołodziejczyk P., Michniewicz J.: Ziarno zbóż i produkty zbożowe jako źródła błonnika pokarmowego. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2018, 3 (116), 5-22.
- [14] Nordlund E., Aura A.M., Mattila I., Kössö T., Rouau X., Poutanen K.: Formation of phenolic microbial metabolites and short-chain fatty acid from rye, wheat and oat bran and their fractions in metabolic *in vitro* colon model. *J. Agric. Food Chem.*, 2012, 60, 8134-8145.
- [15] Neumann M., Goderska K., Grajek K., Grajek W.: Modele przewodności pokarmowego *in vitro* do badań nad biodostępnością składników odżywczych. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 2006, 1 (46), 30-45.
- [16] Ragaee S., Guzar I., Dhull N., Seetharaman K.: Effects of fiber addition on antioxidant capacity and nutritional quality of wheat bread. *Food Sci. Technol.*, 2011, 44, 2147-2153.
- [17] Seibel W., Steller W.: Roggen Anbau Vorbereitung. Verl. Markt. Behr's, Hamburg 1988, p. 239.
- [18] Slavin J.: Why whole grains protective: Biological mechanisms. *Proc. Nutr. Soc.*, 2003, 62, 129-134.
- [19] Southgate D.A.T.: Determination of Food Carbohydrates. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier Applied Science, London 1991, p. 232.
- [20] Standardmethoden für Getreide, Mehl und Brot. 5. Auflage. Verl. Moritz Schäfer, Detmold 1994, p. 138.
- [21] Ye E.Q., Chacko S.A., Chou E.I., Kugizaki M., Liu S.: Greater whole-grain intake is associated with lower risk of type 2 diabetes, cardiovascular disease, and weight gain. *J. Nutr.*, 2012, 142, 1304-1313.
- [22] Wood P.J., Arrigoni S., Miller S.S., Amado R.: Fermentability of oat and wheat fraction enriched in  $\beta$ -glucan using human fecal inoculation. *Cereal Chem.*, 2002, 79, 445-454.
- [23] Wood P.J.: Oat and rye  $\beta$ -glucan: Properties and function. *Cereal Chem.*, 2010, 87, 315-330.
- [24] Zhang G., Hamaker B.R.: Cereal carbohydrates and colon health. *Cereal Chem.*, 2010, 87, 331-341.

**NUTRITIONAL VALUE AND *IN VITRO* DIGESTIBILITY OF HIGH-FIBRE RYE PRODUCTS AS WELL AS THEIR *IN VITRO* FERMENTABILITY BY HUMAN FAECAL MICROFLORA**

## S u m m a r y

The objective of the study was to compare the nutritional value of three rye high-fibre products containing varying quantities of dietary fibre as well as their *in vitro* digestibility and fermentability. There were determined the major chemical component, with particular emphasis on the contents of DF and its components: arabinoxylans,  $\beta$ -glucans, and fructans, in a high-fibre product from milled rye, a wholemeal rye bread, and a bread containing 40 % of blend of high-fibre product and soluble fibre-rich fraction (produced while preparing the product). Also, the *in vitro* digestibility of starch and of some selected macronutrients was analyzed as was the *in vitro* fermentability of undigested DF components. It was found that the products analyzed significantly differed in their nutritional quality, especially in the content of dietary fibre and its components as well as in the content of assimilable saccharides including quickly assimilable starch. Moreover, it was determined that the three products significantly differed as regards the overall digestibility of nutrients contained in the dry matter thereof. The high-fibre product was characterized by the lowest digestibility value whereas the wholemeal rye bread – by the highest digestibility value. The *in vitro* experiments on colonic fermentability of undigested components of fibre showed that the response of fructans and  $\beta$ -glucans to the impact of colonic microflora was the strongest since all of them were fermented in all the products, while the arabinoxylans were the most resistant to the enzymatic activity of faecal bacteria. Based on the *in vitro* experiments, the utilization degree was compared of the fibre and its components in human body; the utilization degree was calculated for three quantitatively different servings of the products studied, which fully covered the daily intake of the dietary fibre as recommended by EFSA. It was shown that both the fructans and the  $\beta$ -glucans contained in the products were fully utilized by human body, whereas the total dietary fibre and the arabinoxylans were utilized only partially.

**Key words:** high-fibre rye products, dietary fibre, bread enrichment, nutritional quality, *in vitro* digestibility, *in vitro* fermentability ☒