

mgr Adrianna Ewa Bojarczuk

**Ocena wpływu przetwarzania i przechowywania produktów
roślinnych na zawartość skrobi opornej oraz wpływ jej spożycia
na gospodarkę węglowodanową u ludzi**

Evaluation of the effects of processing and storage of plant products on the content of
resistant starch and its impact on carbohydrate metabolism in humans

Praca doktorska
Doctoral thesis

*Zrealizowana w Instytucie Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego
im. prof. Wacława Dąbrowskiego – Państwowym Instytucie Badawczym*

Promotor:

Prof. dr hab. inż. Krystian Marszałek
Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. Wacława Dąbrowskiego –
Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Technologii Przetworów Owocowych i Warzywnych

Promotor pomocniczy:

Dr hab. n. o zdr. Danuta Gajewska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Instytut Nauk o Żywieniu Człowieka, Katedra Dietetyki

Recenzenci:

prof. dr hab. Janusz Kapuśniak
Katedra Dietetyki i Badań Żywności
Wydział Nauk Ścisłych, Przyrodniczych i Technicznych
Uniwersytet Jana Długosza w Częstochowie

Prof. Dr hab. Hanna Baranowska
Katedra Fizyki i Biofizyki
Wydział Nauk o Żywności i Żywieniu
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Dr hab. Ewa Lange, prof.SGGW
Katedra Dietetyki
Instytut Nauk o Żywieniu Człowieka
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

Warszawa, 2024

Serdeczne podziękowania dla Profesora Krystiana Marszałka za inspirujące wsparcie i cenne wskazówki, które pomogły mi w rozwoju badawczym. Pańska pasja do nauki oraz umiejętność krytycznego myślenia były dla mnie nieocenione w tej niełatwej drodze.

Dziękuję dr hab. inż. Danucie Gajewskiej za nieustający optymizm i pomoc w trudnościach. Pani zaangażowanie oraz umiejętność dostrzegania detali pomogły mi zrealizować moje plany badawcze.

Dziękuję mojemu Mężowi za nieustającą wiarę we mnie i ogromne pokłady cierpliwości. Dzięki Tobie spełniam kolejne marzenie, a Twoja obecność czyni tę podróż wyjątkową.

Dziękuję mojej rodzinie i przyjaciółom za wybaczenie moich wielu nieobecności i nagle zmiany planów, dziękuję za bezwarunkowe wsparcie i zrozumienie, które były dla mnie nieocenioną siłą w tej podróży.

[strona celowo pozostawiona pusta]

.....*Wawrzane*....., dn. *2.12.2024*.....

Tytuł / stopień naukowy Promotora: prof. dr hab. inż.
Imię i nazwisko Promotora: Krystian Marszałek
Dziedzina naukowa: nauki rolnicze
Dyscyplina naukowa: technologia żywności i żywienia

**Dyrektor Szkoły Doktorskiej
„AgroBioTech PhD”**

Oświadczenie Promotora o przyjęciu rozprawy doktorskiej Pani

Mgr Adrianny Ewy Bojarczuk
(tytuł/stopień / imię i nazwisko Autora rozprawy doktorskiej)

pt.: Ocena wpływu przetwarzania i przechowywania produktów roślinnych na zawartość skrobi opornej oraz wpływ jej spożycia na gospodarkę węglowodanową u ludzi

Jako Promotor przyjmuję niniejszą rozprawę doktorską, która spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023, poz. 742 z późn. zm.) oraz może być skierowana do dalszych etapów związanych z postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora w:

- dziedzinie nauk: nauki rolnicze
- dyscyplinie naukowej: technologia żywności i żywienia

2.12.2024*K. Marszałek*.....
(data i podpis Promotora)

[strona celowo pozostawiona pusta]

Warszawa, dn. 28.11.2024

Tytuł / stopień naukowy Promotora pomocniczego: dr hab. n. med. i n.o zdr.

Imię i nazwisko Promotora pomocniczego: Danuta Gajewska

Dziedzina naukowa: nauki rolnicze/nauki medyczne i nauki o zdrowiu

Dyscyplina naukowa: technologia żywności i żywienia/nauki o zdrowiu

**Dyrektor Szkoły Doktorskiej
„AgroBioTech PhD”**

Oświadczenie Promotora pomocniczego o przyjęciu rozprawy doktorskiej Pani

Mgr Adrianny Ewy Bojarczuk

(tytuł/stopień / imię i nazwisko Autora rozprawy doktorskiej)

pt.: Ocena wpływu przetwarzania i przechowywania produktów roślinnych na zawartość skrobi opornej oraz wpływ jej spożycia na gospodarkę węglowodanową u ludzi

Jako Promotor pomocniczy przyjmuję niniejszą rozprawę doktorską, która spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2023, poz. 742 z późn. zm.) oraz może być skierowana do dalszych etapów związanych z postępowaniem w sprawie nadania stopnia doktora w:

- dziedzinie nauk: nauki rolnicze
- dyscyplinie naukowej: technologia żywności i żywienia / rolnictwo i ogrodnictwo ⁽³⁾

28.11.24 D. Gajewska
.....
(data i podpis Promotora pomocniczego)

[strona celowo pozostawiona pusta]

Oświadczenie Autora rozprawy doktorskiej

Świadoma odpowiedzialności prawnej oświadczam, że rozprawa doktorska przygotowana przeze mnie nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa.

Oświadczam również, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej przedmiotem procedur związanych z uzyskaniem stopnia naukowego w wyższej uczelni lub innej uprawnionej instytucji naukowej.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Data. 02.12.2024,

Podpis autora rozprawy doktorskiej *Adriano Bogniuk*

[strona celowo pozostawiona pusta]

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Streszczenie w języku polskim

Skrobia oporna (ang. resistant starch, RS) jest funkcjonalnym składnikiem żywności, wykazującym wiele korzyści zdrowotnych, jak wpływ na skład mikrobioty jelitowej, czy metabolizm węglowodanów. RS, będąca formą błonnika pokarmowego, nie jest trawiona i wchłaniana w jelicie cienkim, lecz ulega fermentacji bakteryjnej prowadzącej do produkcji krótkołańcuchowych kwasów tłuszczowych (ang. short-chain fatty acids, SCFA) w jelicie grubym. SCFA odgrywają kluczową rolę w procesach metabolicznych i wspierają funkcje jelit, wpływając w korzystny sposób na modulację mikrobioty. Z tego względu RS jest uznawana za istotny składnik wspierający zdrowie metaboliczne, w tym prewencję cukrzycy typu 2. W ramach pracy wykazano, że metoda wysokociśnieniowego przetwarzania żywności (ang. high pressure processing, HPP) skutecznie zastępuje tradycyjne metody termiczne, prowadząc do kleikowania skrobi, co pozwala na zwiększenie poziomu RS po procesie chłodzenia, który z kolei sprzyja procesowi retrogradacji skrobi. Metoda nietermiczna jaką jest HPP pozwala zachować wartość odżywczą produktów, umożliwiając ich przetwarzanie w sposób sprzyjający późniejszemu tworzeniu RS, co ma znaczenie w poprawie jakości żywności. Przeprowadzone badania wykazały, że przechowywanie produktów skrobiowych w warunkach chłodniczych, zarówno po tradycyjnym gotowaniu, jak i po przetwarzaniu HPP, znacząco zwiększało zawartość RS. Przeprowadzone badanie kliniczne wykazało, że spożycie produktów o zwiększonej zawartości RS (na przykładzie makaronu z ciecierzycy), uzyskanej poprzez odpowiednie przechowywanie chłodnicze (4°C, 24h), po wcześniejszym ugotowaniu obniżało glikemię poposiłkową oraz indeks glikemiczny u osób zdrowych. Uzyskane wyniki wskazują, że zwiększenie spożycia RS może mieć istotne korzyści zdrowotne, zwłaszcza w zakresie prewencji zaburzeń metabolizmu węglowodanów. Dodatkowo, proces chłodzenia produktów skrobiowych może być promowany nie tylko z powodu jego korzystnego wpływu na zdrowie, ale także ze względu na aspekt środowiskowy. Chłodnicze przechowywanie pozwala ograniczyć marnowanie żywności, ponieważ umożliwia ponowne wykorzystanie ugotowanych produktów, co przyczynia się do strategii „zero waste”. Niemniej jednak, na podstawie przeprowadzonych badań ankietowych wykazano, że spożycie RS wśród badanej grupy dorosłych Polaków jest niskie, a nasiona roślin strączkowych, mimo iż stanowią bogate źródło RS, dostarczają jedynie 3% całkowitej podaży RS w diecie, co wskazuje na ich niedostateczne spożycie w kontekście potencjalnych korzyści zdrowotnych. Zwiększenie świadomości konsumentów na temat korzyści zdrowotnych wynikających ze spożywania RS oraz promocja metod przechowywania produktów skrobiowych mogą przyczynić się do poprawy zdrowia publicznego i zrównoważonego stylu życia.

Streszczenie w języku angielskim

Resistant starch (RS) is a functional food ingredient that shows many health benefits, such as effects on gut microbiota composition and carbohydrate metabolism. RS, as a form of dietary fiber, is not digested and absorbed in the small intestine, but undergoes bacterial fermentation leading to the production of short-chain fatty acids (SCFAs) in the large intestine. SCFAs play a key role in metabolic processes and support intestinal function by positively modulating the microbiota. For this reason, RS is considered an important component for supporting metabolic health, including the prevention of type 2 diabetes. In this study, it was shown that the high-pressure processing (HPP) method of food processing effectively replaces traditional thermal methods, leading to starch gelatinization, which allows RS to increase after the cooling process, which then promotes the process of starch retrogradation. A non-thermal method such as HPP preserves the nutritional value of products, allowing them to be processed in a way that promotes the subsequent formation of RS, which is important in improving food quality. A study showed that refrigerated storage of starchy products, both after conventional cooking and after HPP processing, significantly increased RS content. A conducted clinical study showed that consumption of products with increased RS content (using chickpea pasta as an example), obtained by appropriate refrigerated storage (4°C, 24h), after previous cooking, reduced postprandial glycemia and glycemic index in healthy subjects. The results indicate that increasing the intake of RS may have important health benefits, especially in the prevention of disorders of carbohydrate metabolism. In addition, the refrigeration process of starchy products can be promoted not only because of its health benefits, but also because of the environmental aspect. Refrigerated storage reduces food waste because it allows cooked products to be reused, which contributes to a zero waste strategy. Nevertheless, based on the survey, it was shown that RS consumption among the surveyed group of Polish adults is low, and that legume seeds, despite being a rich source of RS, provide only 3% of the total RS supply in the diet, indicating their insufficient consumption in terms of potential health benefits. Increasing consumer awareness of the health benefits of consuming RS and promoting starchy storage methods can help improve public health and sustainable lifestyles.

SPIS TREŚCI

WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW	1
1. WYKAZ OPUBLIKOWANYCH ARTYKUŁÓW NAUKOWYCH	3
2. WPROWADZENIE	4
2.1. WĘGLOWODANY W ŻYWIENIU CZŁOWIEKA – SKROBIA.....	4
2.1.1. Skrobia oporna.....	7
2.1.1.1. Definicja i klasyfikacja	7
2.1.1.2. Właściwości fizykochemiczne i zastosowanie technologiczne.....	8
2.1.1.3. Przetwarzanie i przechowywanie produktów skrobiowych - retrogradacja.....	10
2.1.1.4. Korzyści zdrowotne wynikające ze spożywania skrobi opornej	11
Wpływ na gospodarkę węglowodanową.....	11
Wpływ na metabolizm lipidów	12
Wpływ na mikrobiotę i funkcje jelit	12
2.1.1.5. Spożycie w różnych krajach	14
2.1.1.6. Metody przetwarzania i przechowywania produktów skrobiowych	15
Mielenie	15
Gotowanie	16
Podgrzewanie mikrofalowe.....	16
Pieczenie	16
Obróbka cieplno-wilgotnościowa oraz wyżarzanie	17
Autoklawowanie.....	17
Przetwarzanie wysokociśnieniowe (HPP).....	17
Fermentacja.....	19
Chłodzenie	19
3. CEL I HIPOTEZY BADAWCZE	21
3.1. CELE BADAŃ.....	21
3.2. HIPOTEZY BADAWCZE	21
4. ZAKRES PRACY.....	21
5. MATERIAŁ I METODY BADAWCZE	23
5.1. ZADANIA BADAWCZE NR. 1- 4:	23
5.2. ZADANIE BADAWCZE NR. 5:	25
5.3. ZADANIE BADAWCZE NR. 6:	26

6.	MATERIAŁY OPUBLIKOWANE.....	28
6.1.	[P1] HEALTH BENEFITS OF RESISTANT STARCH: A REVIEW OF THE LITERATURE	28
6.2.	[P2] APPLICATION OF HIGH HYDROSTATIC PRESSURES AND REFRIGERATED STORAGE ON THE CONTENT OF RESISTANT STARCH IN SELECTED LEGUME SEEDS	30
6.3.	[P3] EFFECT OF COOKING AND COOLING CHICKPEA PASTA ON RESISTANT STARCH CONTENT, GLYCEMIC RESPONSE AND GLYCEMIC INDEX IN HEALTHY ADULTS	32
7.	MATERIAŁY NIEPUBLIKOWANE	35
7.1.	ZADANIE BADAWCZE NR 3.....	35
7.2.	ZADANIE BADAWCZE NR 6.....	36
8.	WNIOSKI DOTYCZĄCE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	42
9.	SPIS LITERATURY ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	43

Wykaz stosowanych skrótów

AMG (Amyloglukozydaza) – enzym hydrolizujący skrobię do glukozy (ang. Amyloglucosidase).

BCAA (Aminokwasy rozgałęzione) – leucyna, izoleucyna i walina, istotne w syntezie białek (ang. Branched-Chain Amino Acids).

BMI (Wskaźnik masy ciała) – wskaźnik używany do oceny masy ciała względem wzrostu (ang. Body Mass Index).

FODMAP (Fermentujące oligosacharydy, disacharydy, monosacharydy i poliole) – grupa trudno przyswajalnych węglowodanów, które mogą powodować objawy jelitowe (ang. Fermentable Oligosaccharides, Disaccharides, Monosaccharides, and Polyols).

GIP (Glukozozależny peptyd insulinotropowy) – hormon inkretynowy stymulujący wydzielanie insuliny (ang. Glucose-Dependent Insulinotropic Peptide).

GLP-1 (Glukagonopodobny peptyd-1) – hormon inkretynowy, który stymuluje wydzielanie insuliny i hamuje glukagon (ang. Glucagon-Like Peptide-1).

HbA1c (Hemoglobina glikowana) – wskaźnik długoterminowego poziomu glukozy we krwi (ang. Glycated Hemoglobin).

HDL - Lipoproteiny o wysokiej gęstości, (ang. High-Density Lipoprotein).

HMT (Obróbka ciepno-wilgotnościowa) – metoda przetwarzania skrobi wpływająca na jej właściwości fizyczne (ang. Heat-Moisture Treatment).

HOMA-IR (Model oceny insulinooporności) – wskaźnik stosowany do oceny wrażliwości na insulinę (ang. Homeostasis Model Assessment of Insulin Resistance).

HPP (Wysokociśnieniowe przetwarzanie) – metoda nietermicznej obróbki żywności przy użyciu wysokiego ciśnienia (ang. High-Pressure Processing).

IAUC (Przyrostowy obszar pod krzywą) – miara odpowiedzi organizmu na spożycie glukozy lub innej substancji (ang. Incremental Area Under the Curve).

IBS (Zespół jelita drażliwego) – przewlekła choroba przewodu pokarmowego charakteryzująca się bólem brzucha i zmianami rytmu wypróżnień (ang. Irritable Bowel Syndrome).

IG (Indeks glikemiczny) – wskaźnik określający wpływ spożycia pokarmów na poziom glukozy we krwi (ang. Glycemic Index).

In vitro – badania przeprowadzane poza organizmem, np. w probówkach (ang. In vitro).

In vivo – badania przeprowadzane na żywych organizmach (ang. In vivo).

LDL - Lipoproteiny o niskiej gęstości (ang. Low-Density Lipoprotein).

MPa (Megapaskal) – jednostka ciśnienia używana do opisywania wartości ciśnienia w przetwarzaniu wysokociśnieniowym (ang. Megapascal).

NAFLD (Niealkoholowa stłuszczeniowa choroba wątroby) – schorzenie polegające na nadmiernym odkładaniu się tłuszczu w wątrobie (ang. Non-Alcoholic Fatty Liver Disease).

PAPI (Wywiad tradycyjny) – metoda zbierania danych z użyciem papieru i ołówka (ang. Paper and Pencil Interview).

RDS (Szybko strawna skrobia) – forma skrobi szybko rozkładana w jelicie cienkim (ang. Rapidly Digestible Starch).

RS (Skrobia oporna) – rodzaj skrobi, która nie ulega trawieniu w jelicie cienkim i fermentuje w jelicie grubym (ang. Resistant Starch).

SCFA (Krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe) – produkty fermentacji błonnika przez mikrobiotę jelitową, takie jak kwas masłowy, octowy i propionowy (ang. Short-Chain Fatty Acids).

SDS (Wolno strawna skrobia) – rodzaj skrobi rozkładanej stopniowo w jelicie cienkim (ang. Slowly Digestible Starch).

SIBO (Zespół przerostu bakteryjnego jelita cienkiego) – nadmierny rozrost bakterii w jelicie cienkim, powodujący objawy jelitowe (ang. Small Intestinal Bacterial Overgrowth).

T2DM (Cukrzyca typu 2) – przewlekła choroba metaboliczna charakteryzująca się insulinoopornością i podwyższonym poziomem glukozy we krwi (ang. Type 2 Diabetes Mellitus).

1. Wykaz opublikowanych artykułów naukowych

1. Adrianna Bojarczuk, Sylwia Skąpska, Amin Mousavi Khaneghah, Krystian Marszałek; 2022, Health benefits of resistant starch: a review of the literature, *Journal of Functional Foods*, 93(3):105094; DOI: 10.1016/j.jff.2022.105094; **IF₂₀₂₃=3.8; 100 pkt. MEiN**

Mój udział w przedstawionej publikacji obejmował opracowanie konceptualizacji badania oraz metodologii, w czym wspierali mnie promotor, Profesor Krystian Marszałek, oraz Doktor Sylwia Skąpska. Wspólnie ustaliliśmy cel badania i odpowiednie metody, co pozwoliło na precyzyjne zdefiniowanie ram projektu. Następnie przystąpiłam do napisania tekstu głównego, w którym szczegółowo przedstawiłam wyniki oraz ich interpretację. Ostateczną wersję pracy nadzorował także dr Amin Khaneghah, zapewniając dodatkową superwizję, która pomogła w udoskonaleniu całości publikacji.

2. Adrianna Bojarczuk, Joanna Le-Thanh-Blicharz, Dorota Michałowska, Danuta Kotyrba, Krystian Marszałek; Application of High Hydrostatic Pressures and Refrigerated Storage on the Content of Resistant Starch in Selected Legume Seeds, *Applied Sciences*. 2024; 14(16):7049. <https://doi.org/10.3390/app14167049> **IF₂₀₂₃=2.5; 40 pkt. MEiN**

Mój udział w przedstawionej publikacji obejmował opracowanie koncepcji prac badawczych, w czym wsparł mnie Profesor Krystian Marszałek. Następnie zaplanowałam metodologię badań, korzystając z pomocy doktor Joanny Le-Thanh-Blicharz oraz mgr Doroty Michałowskiej, co pozwoliło na dokładne określenie podejścia badawczego. Po zebraniu danych przeprowadziłam analizy, a także zrealizowałam analizę statystyczną przy wsparciu mgr Danuty Kotyrby, co zapewniło wiarygodność wyników. Przygotowałam oryginalną wersję manuskryptu, starając się w klarowny sposób przedstawić wyniki i ich interpretację. Dodatkowo, odpowiadałam za kontakt z recenzentami, udzielając odpowiedzi na ich uwagi i pytania, co przyczyniło się do udoskonalenia publikacji.

3. Adrianna Bojarczuk, Paulina Kęszycka, Krystian Marszałek, Danuta Gajewska; Effect of cooking and cooling chickpea pasta on resistant starch content, glyemic response and glyemic index in healthy adults; *Metabolites*, 14(11), 585.
<https://doi.org/10.3390/metabo14110585>; IF₂₀₂₃=3.4; 100 pkt. MEiN

Mój udział w przedstawionej publikacji obejmował opracowanie koncepcji prac badawczych, w czym wspierali mnie Doktor Danuta Gajewska, Doktor Paulina Kęszycka oraz Profesor Krystian Marszałek. Metodologię badań opracowałam pod nadzorem Doktor Gajewskiej oraz Doktor Kęszyckiej, a na podstawie obszernej metodologii przeprowadziłam pełen zakres badań z udziałem ludzi, na co otrzymałam wcześniej odpowiednią zgodę Komisji Bioetycznej. Po przeprowadzeniu części badawczej opracowałam wyniki i przeprowadziłam analizę statystyczną pod nadzorem Doktor Gajewskiej i Doktor Kęszyckiej. Samodzielnie przygotowałam draft artykułu do publikacji, a nad całością procesu superwizję sprawowali wszyscy pozostali współautorzy.

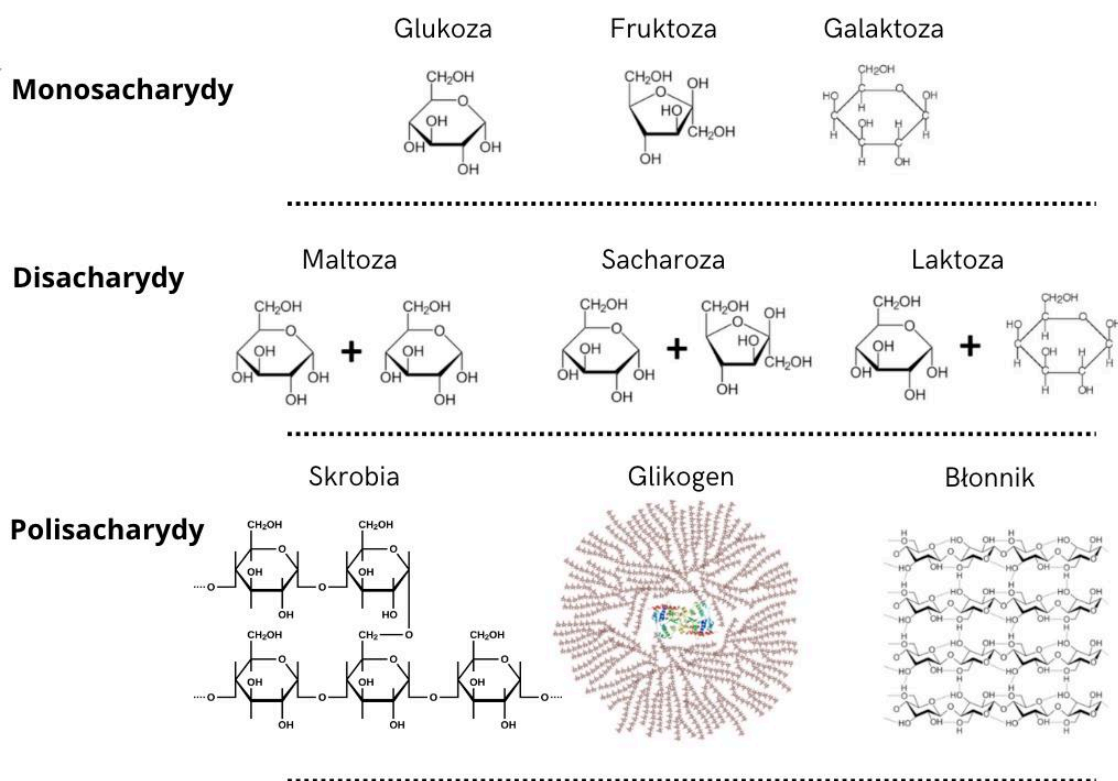
Łączne dane bibliometryczne: IF₂₀₂₃=9,7; 240 pkt. MEiN

2. Wprowadzenie

2.1. Węglowodany w żywieniu człowieka - skrobia

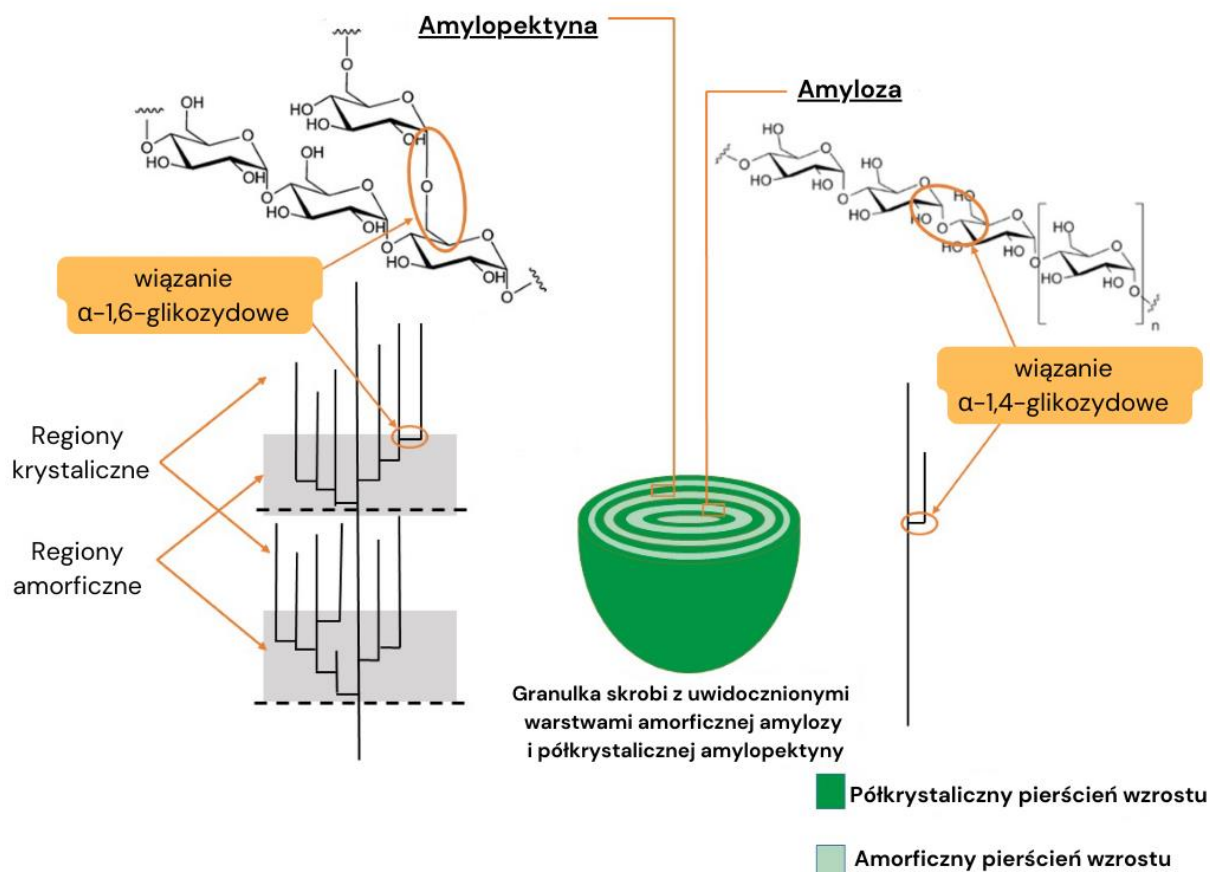
Węglowodany, obok białek i tłuszczów, stanowią jeden z trzech podstawowych makroskładników diety człowieka. Ich struktura chemiczna składa się z atomów węgla, wodoru oraz tlenu, co determinuje ich właściwości biologiczne. Węglowodany pełnią kluczową funkcję w organizmie, przede wszystkim jako główne źródło energii metabolicznej. Biorą udział w metabolizmie glukozy i insuliny, wpływając na wrażliwość tkanek na ten hormon. Ponadto, węglowodany odgrywają istotną rolę w procesach związanych z metabolizmem lipidów, w tym cholesterolu i triglicerydów, a także uczestniczą w fermentacji mikrobiologicznej zachodzącej w jelicie grubym z udziałem mikroflory jelitowej. W wyniku trawienia, węglowodany w przewodzie pokarmowym są rozkładane do monosacharydów, głównie glukozy, która stanowi bezpośrednie źródło energii dla komórek. Nadmiar glukozy, niewykorzystany w procesach metabolicznych, jest magazynowany w postaci glikogenu w wątrobie oraz mięśniach szkieletowych, stanowiąc

rezerwę wykorzystywaną w sytuacjach zwiększonego zapotrzebowania energetycznego [1–3]. Podział węglowodanów przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1 Źródła węglowodanów. Opracowanie własne za pomocą programu Canva, na podstawie [4]

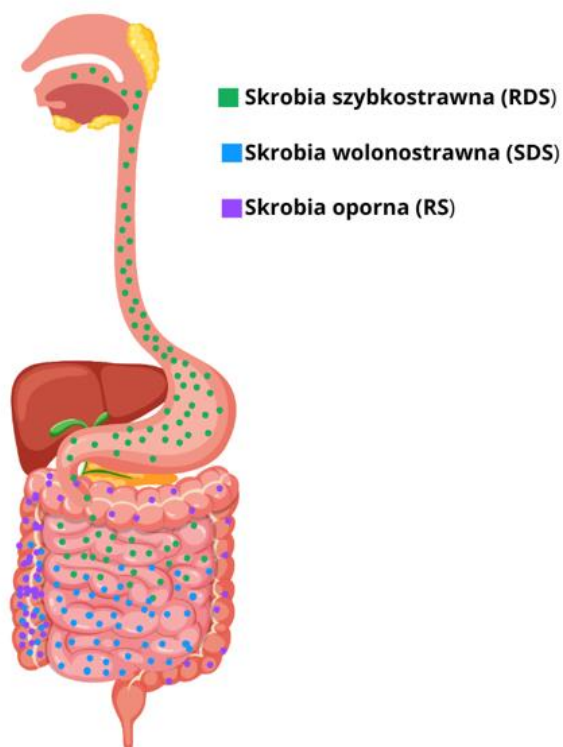
Skrobia stanowi kluczowy składnik diety człowieka, będąc jednym z głównych źródeł węglowodanów złożonych, a tym samym podstawowym substratem energetycznym. Jako główny polisacharyd magazynowany w roślinach, jest obecna w różnych organach roślinnych, takich jak: nasiona, korzenie, bulwy, niedojrzałe owoce czy łodygi. Skrobia składa się z dwóch głównych polimerów glukozy: amylopektyny i amylozy (Rysunek 2). Amylopektyna to wysoce rozgałęziony polisacharyd, w którym jednostki α -D-glukozowe są połączone wiązaniami α -1-4 glikozydowymi w głównych łańcuchach oraz α -1-6 glikozydowymi w miejscach rozgałęzień. Z kolei amyloza jest nierozgałęzionym polimerem, w którym jednostki glukozy połączone są głównie wiązaniami α -1-4 glikozydowymi. Obie formy mają istotny wpływ na właściwości technologiczne skrobi, strawność oraz funkcje metaboliczne w organizmie człowieka [5].



Rysunek 2 Schematyczne przedstawienie granulek skrobi wraz z ich strukturą i typami. Źródło: opracowanie własne za pomocą programu Canva, na podstawie [6].

Badania *in vitro* wykazały, że część skrobi nie ulega hydrolizie przez enzymy trawienne i nie jest wchłaniana w przewodzie pokarmowym. W celu opisania zróżnicowanej strawności skrobi, Englyst i wsp. zaproponowali klasyfikację opartą na wynikach badań nad hydrolizą skrobi w różnych produktach spożywczych, porównując je z danymi uzyskanymi metodami *in vivo*. Klasyfikacja ta umożliwiła ocenę produktów skrobiowych na podstawie szybkości uwalniania glukozy oraz stopnia wchłaniania w przewodzie pokarmowym [7]. Skrobia została w ten sposób podzielona na trzy główne kategorie w zależności od szybkości jej trawienia (Rysunek 3). Szybkostrawna skrobia (ang. Rapidly Digestible Starch, RDS) odnosi się do frakcji skrobi, która jest hydrolizowana i wchłaniana do krwiobiegu w ciągu pierwszych 20 minut trawienia *in vitro*. Wolnostrawna skrobia (ang. Slowly Digestible Starch, SDS) to frakcja, która podlega pełnej hydrolizie w przedziale czasowym od 20 do 120 minut [8]. Trzecia kategoria, skrobia oporna (ang. Resistant Starch,

RS), obejmuje skrobię, która nie ulega trawieniu w ciągu 120 minut w jelicie cienkim [9,10].



Rysunek 3 Trawienie skrobi w przewodzie pokarmowym w zależności od typu. Źródło: opracowanie własne za pomocą programu Canva, na podstawie [11,12]

2.1.1. Skrobia oporna

2.1.1.1. Definicja i klasyfikacja

Skrobia oporna jest frakcją skrobi, która nie ulega trawieniu enzymatycznemu w jelicie cienkim człowieka i przechodzi do jelita grubego, gdzie podlega fermentacji przez mikrobiotę jelitową. Wyróżnia się pięć głównych typów skrobi odpornej:

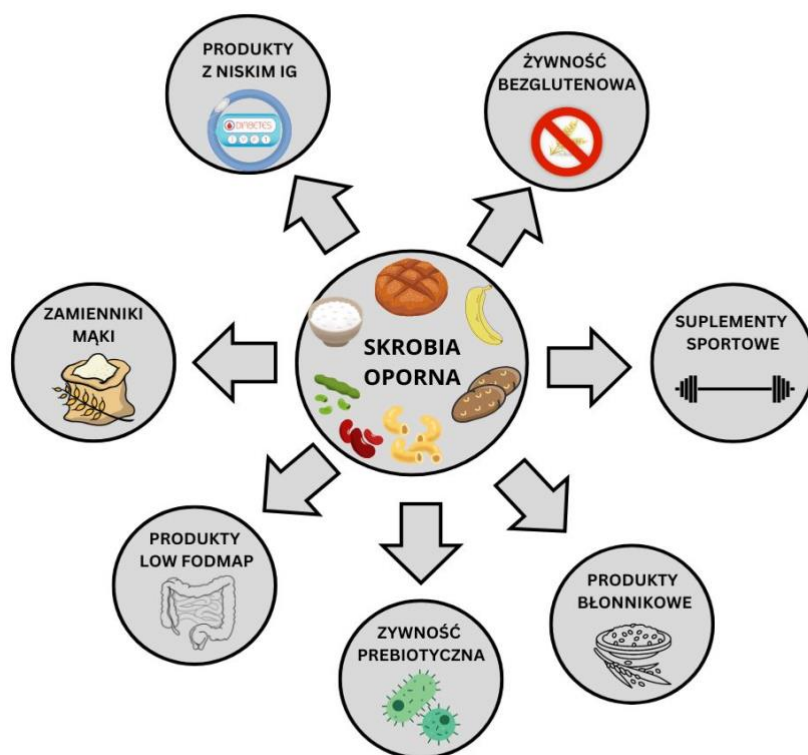
1. RS1 (skrobia fizycznie niedostępna) – skrobia zatrzymana w strukturach roślinnych, takich jak ściany komórkowe, co utrudnia dostęp enzymom trawiennym. Występuje w produktach z pełnego ziarna, nasionach i nieprzetworzonych zbożach.

2. RS2 (skrobia o strukturze krystalicznej) – skrobia surowa, o zwartej, krystalicznej strukturze utrudniającej jej trawienie. Jest obecna w surowych ziemniakach, zielonych bananach i niektórych rodzajach skrobi roślinnych. RS2 była szeroko badana w badaniach klinicznych, w szczególności poprzez zastosowanie HI-MAIZE® 260 (Ingredion United Kingdom, Ltd) jako dodatku do testowanych produktów [13–15].
3. RS3 (skrobia zretrogradowana) – skrobia powstała w wyniku procesów technologicznych np. podgrzewania i chłodzenia, co prowadzi do reorganizacji struktur molekularnych i tworzenia wiązań, które są odporne na trawienie. Występuje w schłodzonych produktach gotowanych, takich jak ziemniaki, nasiona roślin strączkowych, ryż, kasze czy makarony.
4. RS4 (skrobia modyfikowana chemicznie) – skrobia, która została zmodyfikowana chemicznie w celu nadania jej oporności na trawienie. Modyfikacje te są stosowane głównie w przemyśle spożywczym, aby poprawić właściwości funkcjonalne skrobi w produktach żywnościowych.
5. RS5 – początkowo piąta kategoria została utworzona w celu opisania przypadków, w których RS tworzy kompleksy z lipidami, nadając im właściwości oporności na trawienie. Jednakże, najnowsze badania wskazują na możliwość tworzenia się kompleksów skrobiowych z innymi cząsteczkami, takimi jak aminokwasy, peptydy, polisacharydy czy polifenole, które wykazują podobne właściwości strukturalne i funkcjonalne do kompleksów skrobiowo-lipidowych [16,17]. Do tej grupy zaliczane są także oporna maltodekstryna, która jest wytwarzana przez rozgałęzienie struktury skrobi [18].

2.1.1.2. Właściwości fizykochemiczne i zastosowanie technologiczne

Właściwości fizykochemiczne RS są determinowane przez wiele czynników, w tym fizyczną formę skrobi oraz strukturę ziaren i nasion. Istotne znaczenie mają również typ granulek skrobi oraz ich rozmiar, a także interakcje między skrobią a innymi składnikami odżywczymi, takimi jak lipidy, cukry, białka, gumy czy bioaktywne składniki roślinne [19,20]. Na zawartość RS mają również wpływ metody przetwarzania żywności, w tym np. gotowanie, mielenie, obróbka wysokociśnieniowa, fermentacja, autoklawowanie oraz ekstruzja. Aspekty takie jak warunki i czas przechowywania produktów także wpływają na jej zawartość [21–24]. Skrobia ta posiada uniwersalne właściwości fizykochemiczne, takie jak neutralny smak, biały kolor i niską zdolność wiązania wody, co sprawia, że może być

funkcjonalnym dodatkiem do różnorodnych produktach spożywczych i może być wykorzystywana w szerokiej gamie produktów, bez wpływu na ich smak, teksturę czy procesy technologiczne [25,26]. Zmodyfikowane formy RS są aktualnie dostępne komercyjnie i znajdują szerokie zastosowanie w żywieniu człowieka, co przedstawiono na Rysunku 4. Obejmują zarówno żywność dla sportowców, np. produkty na bazie skrobi woskowej, jak i suplementy diety przeznaczone dla osób z zaburzeniami metabolizmu węglowodanów, które mogą stanowić alternatywę dla rafinowanych mąk. Dodatkowo, na rynku amerykańskim dostępne są produkty o wysokiej zawartości błonnika, charakteryzujące się niską zawartością węglowodanów z grupy FODMAP, co czyni je odpowiednimi dla osób cierpiących na zespół rozrostu bakteryjnego jelita cienkiego (ang. Small Intestinal Bacterial Overgrowth, SIBO) czy zespół jelita drażliwego (ang. Irritable Bowel Syndrome, IBS). Ponadto, RS może stanowić istotny składnik w żywności bezglutenowej, co ma kluczowe znaczenie dla osób z celiakią i nietolerancją glutenu, przyczyniając się do zwiększenia zawartości błonnika w ich diecie [27].



Rysunek 4 Możliwości zastosowania produktów na bazie skrobi odpornej w technologii żywności

Źródło: opracowanie własne za pomocą programu Canva.

2.1.1.3. Przetwarzanie i przechowywanie produktów skrobiowych - retrogradacja

Przetwarzanie produktów skrobiowych, prowadzi do strukturalnych zmian w cząsteczkach skrobi. Proces gotowania wywołuje znaczące zmiany w strukturze i właściwościach skrobi, które odgrywają kluczową rolę w determinowaniu strawności żywności skrobiowej oraz odpowiedzi glikemicznej. W trakcie gotowania granule skrobi chłoną wodę i ulegają kleikowaniu, co polega na zniszczeniu struktury krystalicznej skrobi w wyniku pęcznienia i uwalniania amylozy oraz amylopektyny do otaczającej wody. Zaburzenie krystalicznej struktury skrobi zwiększa jej strawność poprzez ułatwienie dostępu enzymów trawiennych do cząsteczek skrobi [28,29].

Jednym z kluczowych czynników wpływających na stopień kleikowania skrobi jest temperatura oraz czas gotowania. Wraz ze wzrostem temperatury proces kleikowania przyspiesza, co prowadzi do intensywniejszego rozpadu granulek skrobi. Może to zwiększyć odpowiedź glikemiczną oraz indeks glikemiczny produktów, ponieważ trawienie łatwostrawnej skrobi prowadzi do szybkiego uwalniania glukozy do krwi po spożyciu. Stopień kleikowania jest również zależny od zawartości wody oraz specyficznego typu skrobi obecnego w matrycy pokarmowej, proporcji amylozy do amylopektyny i innych czynników takich jak warunki przetwarzania czy przechowywania [30]. Alternatywą dla tradycyjnego termicznego kleikowania jest metoda wysokociśnieniowego przetwarzania (HPP), która prowadzi do kleikowania skrobi bez zastosowania wysokiej temperatury. HPP umożliwia przekształcenie struktury skrobi poprzez zastosowanie wysokiego ciśnienia, co pozwala na zachowanie wartości odżywczej i żywieniowej produktu oraz minimalizuje zmiany w innych właściwościach żywności wynikających z zastosowania wysokiej temperatury. Pomimo braku wysokiej temperatury, proces HPP skutecznie prowadzi do destabilizacji granulek skrobi, co sprzyja tworzeniu się skrobi odpornej po procesie chłodzenia [6,31].

2.1.1.4. Korzyści zdrowotne wynikające ze spożywania skrobi odpornej

Wpływ na gospodarkę węglowodanową

Skrobia oporna może wpływać na zmniejszenie odpowiedzi glikemicznej poprzez spowolnienie wchłaniania składników odżywczych. Zjawisko to stało się przedmiotem intensywnych badań w ostatnich latach. Najnowsze badania wykazały, że spożycie RS znacząco obniżało poposiłkowe stężenia glukozy, zarówno w przypadku jednorazowego, jak i długotrwałego spożycia. Regularne spożywanie RS zmniejszało również poziom glukozy na czczo, szczególnie w przypadku RS1 i RS2. Długotrwałe efekty były widoczne głównie u osób z cukrzycą typu 2, natomiast inne markery metaboliczne, takie jak stężenie GLP-1 (ang. Glucagon-Like Peptide-1) i GIP (ang. Glucose-Dependent Insulinotropic Peptide) oraz wrażliwość na insulinę, pozostawały bez zmian [32]. W innym badaniu, analiza wyników wykazała znaczącą poprawę poziomu glukozy na czczo u 503 uczestników, zarówno zdrowych, jak i chorych, którzy otrzymywali RS w porównaniu do grupy kontrolnej bez suplementacji. Analiza podgrup pokazała, że efekt był silniejszy, gdy dawka RS wynosiła ponad 28 g/dzień lub gdy interwencja trwała dłużej niż 8 tygodni. Nie zaobserwowano jednak istotnego wpływu na parametry związane z insuliną, z wyjątkiem wskaźnika insulinooporności HOMA-IR [33]. W metaanalizie przeprowadzonej przez Gao i wsp. uwzględniono 14 badań obejmujących łącznie 515 uczestników, z czego większość chorowała na otyłość lub cukrzycę typu 2 (ang. Type 2 Diabetes Mellitus, T2DM). Badania obejmowały wszystkie formy RS, a grupa kontrolna spożywała łatwostrawne węglowodany. Nie stwierdzono znaczącego wpływu suplementacji RS na poziom glukozy na czczo. Jednak u pacjentów z T2DM i otyłością odnotowano znaczną redukcję tego parametru. W grupie suplementowanej RS zaobserwowano także istotne obniżenie poziomu insuliny na czczo w porównaniu z grupą kontrolną. Wskaźnik HOMA-IR był istotnie niższy u pacjentów z T2DM ze współwystępującą otyłością [34]. Co ciekawe, odmienne wyniki uzyskano w innej metaanalizie, obejmującej 20 badań z udziałem 670 uczestników, gdzie badano wpływ RS pochodzącej z kukurydzy o wysokiej zawartości amylozy (typ 2) w dawkach ≥ 8 g dziennie. Uczestnikami były zarówno osoby zdrowe, jak i osoby z nadwagą, otyłością, zespołem metabolicznym lub cukrzycą typu 2. Wyniki nie wykazały istotnego wpływu RS w porównaniu z placebo na poziom glukozy na czczo. Analizy podgrup, przeprowadzone w zależności od stanu zdrowia uczestników, również nie wykazały znaczących różnic. Dodatkowo, wskaźniki takie jak hemoglobina glikowana (HbA1c) oraz HOMA-IR nie uległy zmianie pod wpływem suplementacji RS

w porównaniu do placebo [35]. Z kolei Wang i współpracownicy przeanalizowali wyniki 13 randomizowanych badań kontrolowanych, w których wzięło udział 428 uczestników z nadwagą lub otyłością. Stwierdzono, że suplementacja RS w dawkach od 10 do 45 g dziennie znacząco obniżyła poziom glukozy na czczo, insuliny oraz hemoglobiny glikowanej, zarówno u osób z cukrzycą, jak i bez niej, w porównaniu z grupą kontrolną. Nie zaobserwowano jednak istotnych zmian w przypadku wskaźnika HOMA-IR [36].

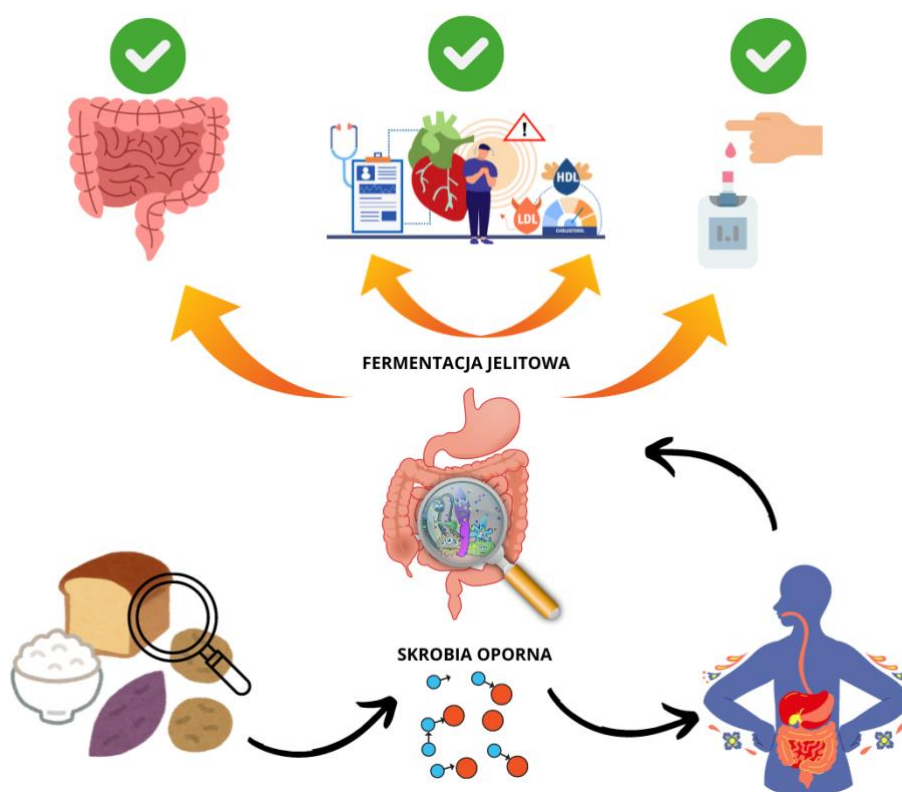
Wpływ na metabolizm lipidów

W metaanalizie, obejmującej 14 randomizowanych badań kontrolowanych z udziałem 820 uczestników, analizowano wpływ RS, głównie typu 2, na stężenie lipoprotein we krwi. Dzienna dawka RS wahała się od 10 do 66 g. Wyniki wykazały istotne obniżenie poziomu cholesterolu całkowitego oraz cholesterolu LDL (ang. Low-Density Lipoprotein) w porównaniu do grupy kontrolnej. Z kolei poziomy triglicerydów i cholesterolu HDL (ang. High-Density Lipoprotein) pozostały niezmiennione. Autorzy zauważyli, że dłuższy okres suplementacji RS, trwający ponad 4 tygodnie, miał bardziej znaczący wpływ na redukcję cholesterolu całkowitego i LDL. Wyższe dawki RS, przekraczające 20 g dziennie, miały również wpływ na obniżenie poziomu triglicerydów [37]. Inna metaanaliza wykazała, że RS znacząco obniżyła poziom cholesterolu całkowitego oraz cholesterolu LDL w surowicy w porównaniu z grupą kontrolną. Natomiast poziom cholesterolu HDL i triglicerydów nie uległy istotnym zmianom [38]. Podobne wnioski w kontekście obniżenia frakcji LDL wyciągnięto z metaanalizy przeprowadzonej przez Wang i wsp. [36]. Z kolei w metaanalizie przeprowadzonej przez Snelson i wsp. nie zaobserwowano wpływu RS na poziom lipoprotein we krwi [35].

Wpływ na mikrobiotę i funkcje jelit

Wiele badań wskazuje, że fermentacja mikrobiologiczna RS w okrężnicy prowadzi do powstawania SCFA, takich jak kwas mlekowy, octowy, propionowy i masłowy, które stanowią główne produkty końcowe tego szlaku fermentacyjnego. Kwas masłowy odgrywa kluczową rolę w utrzymaniu prawidłowej funkcji nabłonka okrężnicy, m.in. poprzez dostarczanie energii kolonocytom. Badania wskazują również na jego korzystny wpływ w redukcji ryzyka wystąpienia zmian nowotworowych w kolonocytach. Z kolei kwas propionowy i octowy przyczyniają się do obniżenia pH w jelicie grubym, co ogranicza

rozwój patogennych mikroorganizmów, a jednocześnie sprzyja proliferacji korzystnych bakterii zasiedlających jelito grube [39–41]. W badaniach dotyczących wpływu RS na mikrobiotę jelitową, dokonano analizy 7 badań z udziałem 248 uczestników. Wykazano związek pomiędzy spożyciem RS, a zwiększoną liczebnością bakterii *Ruminococcus*, *Agathobacter*, *Faecalibacterium* i *Bifidobacterium*. Co istotne, różne typy RS wywoływały odmienne reakcje mikrobiomu, co sugeruje zróżnicowany wpływ poszczególnych rodzajów RS na skład i funkcję mikrobioty jelitowej [42]. Metaanaliza przeprowadzona przez Shen i wsp., obejmująca 9 randomizowanych badań kontrolowanych, oceniała efekty podawania RS w dawkach od 22 do 45 g/dzień (średnio 33 g/dzień) u zdrowych uczestników. W grupach kontrolnych diety były ubogie w RS. Wyniki wykazały znaczną poprawę w zakresie zwiększenia masy stolca, zwiększenia stężenia kwasu masłowego oraz obniżenia pH stolca u osób, które suplementowały RS w porównaniu do grup kontrolnych [43]. Z kolei podawanie zdrowym uczestnikom opornej maltodekstryny (RS typu 5) w dawkach od 3,8 do 13,5 g dziennie wykazało, że w porównaniu z grupą kontrolną, nastąpił istotne zwiększenie objętości stolca oraz częstotliwości defekacji, co potwierdzono w metaanalizie 29 randomizowanych badań kontrolowanych [44]. W ostatnich latach wykazuje się także związek składu i funkcji mikrobioty jelitowej z występowaniem chorób wątroby, czego przykładem jest niealkoholowa choroba tłuszczeniowa wątroby (ang. non-alcoholic fatty liver disease, NAFLD). W jednym z badań suplementacja RS przez 4 miesiące spowodowała istotne zmniejszenie zawartości triglicerydów w wątrobie, w porównaniu do grupy kontrolnej. Zmniejszony był także poziom rozgałęzionych aminokwasów (ang. Branched-Chain Amino Acids, BCAA) oraz niektórych gatunków drobnoustrojów jelitowych, w tym *Bacteroides stercoris*, które korelowało z zawartością triglicerydów wewnątrzwątrobowych i enzymami wątrobowymi. Analizy wykazały powiązania między mikrobiotą jelitową, dostępnością BCAA i stężeniem wątroby, co sugeruje, że RS może być skuteczną strategią w leczeniu NAFLD poprzez modulację mikrobioty jelitowej [45]. Główne efekty zdrowotne podsumowano na Rysunku 5.



Rysunek 5 Główne efekty zdrowotne wynikające ze spożycia skrobi odpornej.

Źródło: opracowanie własne za pomocą programu Canva.

2.1.1.5. Spożycie w różnych krajach

W krajach rozwiniętych, gdzie dominuje typ diety zachodniej o niskiej zawartości błonnika, spożycie RS jest niższe niż w krajach rozwijających się. W regionach, gdzie spożycie skrobi jest wysokie, takich jak niektóre kraje afrykańskie, codzienne spożycie RS wynosi około 30-40 g/dzień [46]. Badania przeprowadzone w Indiach i Chinach wykazały spożycie RS na poziomie 10-18 g/dzień [47,48], podczas gdy w Wielkiej Brytanii wartość ta wynosiła zaledwie 2,76 g/dzień [49]. Średnie spożycie RS określono także w Serbii i wynosiło ono około 6 g/dzień [50]. Wciąż jednak nie sformułowano oficjalnych wytycznych dotyczących spożycia RS dla populacji, które może przynieść oczekiwane efekty zdrowotne. Autorzy definiują korzystną ilość spożywanej RS na zdrowie w odmienny sposób, jak np. 6 g na posiłek [51] lub 20 g dziennie [52]. Z kolei codzienne spożycie RS w granicach 15-20 g uznawane jest za niezbędne do poprawy zdrowia, np. poprzez zwiększenie objętości stolca [53,54]. Niektóre badania sugerują także, że spożycie

6-12 g RS w pojedynczym posiłku może korzystnie wpływać na poposiłkowe stężenia glukozy i insuliny [55,56].

2.1.1.6. Metody przetwarzania i przechowywania produktów skrobiowych

Utrzymanie krystalicznej struktury skrobi odgrywa kluczową rolę w redukcji jej strawności, co przekłada się na korzystne efekty odżywcze, takie jak np. niski indeks glikemiczny. Na poziom RS wpływają różnorodne czynniki, zarówno na wczesnym etapie, jak np. wybór odmiany rośliny, jak i na późniejszych etapach związanych z fizyczną obróbką żywności, czy metodami przechowywania [57]. Także proces modyfikacji proporcji amylozy do amylopektyny w uprawach może skutkować zwiększeniem poziomu RS w produktach spożywczych. Wyższa zawartość amylozy sprzyja bowiem procesowi retrogradacji po gotowaniu, co pozwala na zwiększenie zawartości RS, a jest to związane z liniową strukturą amylozy, która ułatwia jej odtworzenie w porównaniu do rozgałęzionej amylopektyny [58,59]. Badania wykazały, że zastosowanie odmian pszenicy o wyższej zawartości amylozy znacząco podnosi końcowy poziom RS w pieczywie w porównaniu do tradycyjnych odmian [60,61]. Produkcja ryżu [62] czy pszenicy [63] o zwiększonej zawartości amylozy korzystnie wpływała na poposiłkowy poziom glukozy we krwi co może być bezpośrednio związane z wyższą zawartością RS.

Mielenie

Proces mielenia produktów skrobiowych zaburza strukturę krystaliczną skrobi, zwiększając tym samym jej dostępność dla enzymów i prowadząc do znacznej utraty RS. W porównaniu z pełnymi ziarnami zbóż, mąki zbożowe, zwłaszcza mąka pszenna, charakteryzują się niższą zawartością RS, co jest także związane z brakiem zawartości zewnętrznych części ziaren w przetworzonym produkcie [64–66]. Korzystnym działaniem, które pomoże ograniczyć straty RS jest grube mielenie i wybór mniej rozdrobnionych po frakcjonowaniu produktów. Warto dodać, iż produkty pełnoziarniste zawierają większą ilość RS, szczególnie RS typu 1, ponieważ skrobia oporna jest zamknięta w strukturze ziarna [65].

Gotowanie

Gotowanie wywiera istotny wpływ na strukturę i zawartość skrobi w żywności. Po osiągnięciu temperatury żelatynizacji lub wyższej, przy dostępie odpowiedniej ilości wody, dochodzi do naruszenia krystalicznej struktury granulek skrobi, co zwiększa podatność skrobi na trawienie. Jednak w trakcie chłodzenia, polimery skrobi, zwłaszcza amyloza, zaczynają ponownie łączyć się w uporządkowane struktury, które stają się odporne na działanie enzymów trawiennych. Ten proces jest znany jako retrogradacja [64].

Podgrzewanie mikrofalowe

Główną formą RS w żywności przetworzonej jest RS typu 3 i jednocześnie w największym stopniu przyczynia się do spożycia RS [60]. Podgrzewanie produktów skrobiowych za pomocą mikrofal przyspiesza proces retrogradacji skrobi [67]. Badania wykazały, że podgrzewanie ryżu w kuchence mikrofalowej, niezależnie od zawartości wody, zwiększało zawartość RS w produkcie, jednocześnie zmniejszając udział strawnych frakcji skrobi [68,69]. Efekt ten ma również odniesienie do innych produktów spożywczych, jak np. ziemniaki [70]. Z kolei proces gotowania makaronu pszennego w kuchence mikrofalowej okazał się bardziej skuteczny w zachowaniu RS i obniżeniu indeksu glikemicznego, niż gotowanie tradycyjne lub gotowanie na parze [71]. Isra i wsp. w metaanalizie 31 artykułów badających wpływ obróbki mikrofalowej na zawartość skrobi w żywności o wysokiej zawartości węglowodanów, podkreślili, że ta metoda obróbki termicznej znacząco zwiększyła poziom RS, niezależnie od matrycy żywności [72].

Pieczenie

Co ciekawe także proces pieczenia może mieć wpływ na zawartość RS w produktach skrobiowych. Wykazano, że długotrwałe (20h) pieczenie chleba w niskiej temperaturze (np. 120°C) wpłynęło istotnie na zwiększenie zawartości RS w porównaniu do standardowego pieczenia (45 min w 200°C) [73]. Zbadano wpływ pieczenia chleba pszennego przez 4 godziny w temperaturze 120°C oraz przez 3 godziny w temperaturze 150°C i wykazano wzrost zawartości odpowiednio o 24% i 15% w porównaniu do chleba pieczonego przez 30 minut w temperaturze 200°C [74].

Obróbka cieplno-wilgotnościowa oraz wyżarzanie

Na poziom RS ma wpływ także kontrola wilgotności, temperatury oraz czasu ogrzewania żywności. Obróbka cieplno-wilgotnościowa (ang. Heat Moisture Treatment, HMT) oraz wyżarzanie to dwa powszechnie stosowane procesy hydrotermiczne, mające na celu modyfikację właściwości skrobi. Wyżarzanie to proces polegający na podgrzewaniu skrobi w obecności wody, poniżej temperatury żelatynizacji (w zależności od produktu ok 50-80°C [75], co prowadzi do bardziej uporządkowanej struktury molekularnej. Z kolei HMT polega na ogrzewaniu granulek skrobi w wysokiej temperaturze (84-140°C) przy niskiej wilgotności (10-35%) przez określony czas, aby zapobiec ich żelatynizacji. Badacze wykazali, że stopniowy wzrost temperatury podczas HMT zmniejsza strawność skrobi ze słodkich ziemniaków poprzez zmniejszenie RDS i zwiększenie frakcji RS [76]. Podobne wyniki zaobserwowano w przypadku skrobi ryżowej [77,78], a w przypadku jęczmienia poddanego HMT zaobserwowano poprawę odpowiedzi glikemicznej i wzrost liczby bakterii wytwarzających SCFA [79].

Autoklawowanie

Badania wskazują, że proces autoklawowania (tj. przetwarzania w wysokiej temperaturze w podwyższonym ciśnieniu) indukuje powstawanie RS typu 3, a efekt ten jest szczególnie widoczny w połączeniu z chłodzeniem próbki po procesie [80]. Metaanaliza 10 badań przeprowadzona przez Faridah i in. wykazała, że proces autoklawowania połączonego z chłodzeniem jak również rodzaj żywności, udział wody w procesie, a także czas i temperatura obróbki wpływały na ostateczną zawartość RS w produkcie [81].

Przetwarzanie wysokociśnieniowe (HPP)

Przetwarzanie żywności za pomocą wysokich ciśnień hydrostatycznych (ang. High Pressure Processing, HPP) to technologia, która polega na użyciu ekstremalnie wysokiego ciśnienia (zwykle w zakresie od 100 do 600 MPa) w celu inaktywacji patogennych mikroorganizmów i enzymów odpowiedzialnych za psucie się żywności. HPP jest metodą nietermiczną, co oznacza, że przetwarzanie odbywa się bez użycia wysokich temperatur, dzięki czemu możliwe jest zachowanie naturalnych właściwości organoleptycznych i odżywczych produktów, takie jak smak, kolor, tekstura oraz zawartość składników odżywczych. Technologia ta jest uważana za przyjazną dla środowiska i może być

stosowana do modyfikacji struktury skrobi, poprawiając jej właściwości funkcjonalne, bez znacznych zmian w wiązaniach chemicznych [82]. W badaniu Ahmed i Al-Attar [83] zbadano wpływ HPP przy 400, 500 i 600 MPa przez 10 minut na skrobię mąki kasztanowej i nie zaobserwowano istotnych różnic w skrobi całkowitej, uszkodzonej i odpornej. Inni autorzy poddali obróbce skrobię z komosy ryżowej podczas 15 minutowego ciśnieniowania przy ciśnieniu w zakresie 450 - 600 MPa i stwierdzili, że całkowita zawartość skrobi zmniejszyła się nieznacznie z 64 do 60% wraz ze wzrostem ciśnienia odpowiednio dla 450 i 600 MPa, ale różnice te były istotne statystycznie, w porównaniu do kontroli (73,25%), podczas gdy zawartość uszkodzonej skrobi wzrosła znacząco z 15,27% przy 450 MPa do 17,39% przy 600 MPa. Wyniki te wskazują, że uszkodzenia skrobi były istotne tylko przy średnim i wysokim ciśnieniu, tj. przy wartościach przy których obserwowano niszczenie obszaru krystalicznego [84]. Podobne wyniki uzyskali badacze, którzy poddali skrobię gryczaną 20-minutowemu działaniu ciśnienia w zakresie od 120 do 600 MPa i odnotowali znaczny spadek całkowitej zawartości skrobi przy 600 MPa [85,86]. W badaniu przeprowadzonym przez Ahmed i wsp. [87] wykazano zwiększoną zawartość RS w soczewicy między 400 a 600 MPa, odpowiednio z 4,47 do 6,80%, co mogło być spowodowane według autorów wzrostem temperatury wynikającym z efektu adiabatycznego obserwowanego podczas wzrostu ciśnienia. Wpływ temperatury i ciśnienia mógł spowodować rekrytalizację skrobi, co zwiększyło zawartość RS. Z drugiej strony, w badaniu przeprowadzonym przez Deng i wsp. [88] zbadano wpływ HPP na skrobię ryżową i wykazano, że wyższe ciśnienie (600 MPa) skutkowało niższą zawartością RS w porównaniu do niższego ciśnienia (200 MPa). Inni badacze oceniali wpływ czasu obróbki HPP na zawartość RS i skrobi strawnej w nasionach algarrobo (rodzina bobowatych) oraz jabłkach poddanych działaniu ciśnienia 500 MPa w czasie od 2 do 10 minut. W przypadku nasion algarrobo czas obróbki nie miał istotnego wpływu na zawartość RS, jednak w przypadku jabłek zabiegi trwające 4, 8 i 10 minut spowodowały wzrost zawartości RS odpowiednio o 27%, 76% i 84% w porównaniu do próbek niepoddanych obróbce. Ponadto, znaczące zmiany odnotowano przy obróbce przez 4, 8 i 10 minut w przypadku skrobi strawnej, gdzie w nasionach algarrobo zawartość jej wzrosła z 10,6% (w próbkach niepoddanych obróbce) do 19,8%, 17,5% i 31,5%, a w przypadku jabłek z 75,5% do odpowiednio 83,8%, 96,7% i 100,4% [89,90].

Fermentacja

Fermentacja jest metodą przetwarzania żywności polegającą na działaniu mikroorganizmów, takich jak bakterie i drożdże, na substraty węglowodanowe, w tym produkty skrobiowe. Proces ten może wpływać na zawartość skrobi, zwłaszcza RS, co z kolei wpływa na właściwości zdrowotne i funkcjonalne produktów spożywczych. W kilku badaniach przeanalizowano, jak warunki fermentacji wpływają na zawartość RS w żywności. Przykładem jest badanie, w którym wykazano, że chleb na zakwasie, niezależnie od rodzaju użytej mąki charakteryzował się wyższą zawartością RS w porównaniu z chlebem drożdżowym. Ponadto, przy tej samej temperaturze fermentacji, fermentacja typu 2, w której zastosowano szczepy bakterii (*Lactobacillus brevis* ELB99, *Lactiplantibacillus plantarum* ELB75) oraz drożdże (*Saccharomyces cerevisiae* TGM55), prowadziła do wyższej zawartości RS, niż fermentacja spontaniczna (typu 1). Co ciekawe w przypadku białego chleba pszennego obniżenie temperatury fermentacji z 30°C do 25°C dodatkowo zwiększało zawartość RS, niezależnie od rodzaju fermentacji, natomiast w chlebie pełnoziarnistym efekt ten zaobserwowano jedynie w przypadku fermentacji typu 1 [91]. W badaniach nad produkcją słodu jęczmiennego wykazano, że wzrost zawartości RS był ściśle powiązany z odmianą jęczmienia, a zwłaszcza z poziomem amylozy, a także wykazano, że moczenie jęczmienia w roztworze 0,4% kwasu mlekowego prowadziło do zwiększenia zawartości RS, niezależnie od temperatury procesu [92]. W innym badaniu nie odnotowano znaczącego wpływu dodatku zakwasu na poziom RS w chlebie przygotowanym z pszennej mąki [74]. Natomiast w badaniach dotyczących chleba z młki abisyńskiej (teff), wykazano, że wzrost zawartości RS był bezpośrednio związany z większą ilością dodanego zakwasu [93].

Chłodzenie

Warunki przechowywania, w szczególności przechowywanie chłodnicze po wcześniejszym przetworzeniu, odgrywają kluczową rolę dla zawartości RS w żywności. Chłodzenie po wcześniejszej obróbce (np. gotowaniu) jest kluczowym etapem, podczas którego skrobia ulega retrogradacji, częściowo przywracając jej krystaliczność [59,65]. W jednym z przytoczonych w poprzednim podrozdziale badań zaobserwowano stopniowy wzrost zawartości RS w chlebie z młki abisyńskiej na zakwasie w ciągu 5-dniowego okresu przechowywania, co było związane z procesem retrogradacji, przy jednoczesnym obniżeniu zawartości skrobi strawnej [93]. Podobny wpływ przechowywania na wzrost

poziomu RS, niezależnie od temperatury, zaobserwowano również w pieczywie pszennym [74]. Wykazano także, że szybkość procesu rekrytalizacji skrobi podczas przechowywania różni się w zależności od rodzaju zboża. W chlebie pszennym proces ten był szybszy w porównaniu do chleba żytniego [94]. W jednym z eksperymentów, pieczywo przechowywano przez tydzień w różnych warunkach: w temperaturze pokojowej (20°C), w lodówce (3,5°C) oraz w zamrażarce (-17°C). Wyniki wykazały, że zawartość RS była najwyższa w chlebie przechowywanym w lodówce w porównaniu z innymi metodami przechowywania [95]. Podobny efekt zaobserwowano w przypadku białego ryżu, gdzie przechowywanie w temperaturze 4°C przez 24 godziny przed podgrzaniem spowodowało wzrost RS, w przeciwieństwie do ryżu schłodzonego w temperaturze pokojowej przez 10 godzin. W tym samym badaniu porównano także odpowiedź glikemiczną u osób zdrowych i wykazano, że była ona znacznie zmniejszona po spożyciu ryżu schłodzonego, w stosunku do ryżu przechowywanego w temperaturze pokojowej [96]. Podobne doświadczenie, porównujące glikemię po spożyciu ryżu chłodzonego i świeżo ugotowanego, lecz w grupie osób z cukrzycą typu 1 również wykazało korzystny wpływ chłodzenia na glikemię poposiłkową [97]. Inni badacze analizowali, czy rodzaj ryżu ma wpływ na zawartość RS powstałej w procesie chłodzenia. Najwyższy poziom RS zaobserwowano w ryżu długoziarnistym, który został ugotowany w ryżowarce i przechowywany w lodówce przez 3 dni w temperaturze 4°C. Natomiast ryż krótkoziarnisty, ugotowany i schłodzony w tych samych warunkach, wykazał najniższy poziom RS spośród testowanych wariantów [98].

3. Cel i hipotezy badawcze

3.1. Cele badań

- Ocena wpływu metody HPP oraz chłodniczego przechowywania wybranych produktów skrobiowych na zawartość skrobi opornej.
- Ocena wpływu produktu ze zwiększoną zawartością RS na glikemię poposiłkową i indeks glikemiczny u osób zdrowych.
- Ocena spożycia RS wśród badanej grupy dorosłych Polaków.

3.2. Hipotezy badawcze

1. Technika HPP ma wpływ na zawartość skrobi opornej w produktach roślinnych.
2. Przechowywanie produktów skrobiowych w warunkach chłodniczych po wcześniejszym ich przetworzeniu zwiększa zawartość skrobi opornej.
3. Spożywanie produktów ze zwiększoną zawartością skrobi opornej obniża glikemię poposiłkową i indeks glikemiczny.
4. Spożycie skrobi opornej wśród badanej grupy dorosłych Polaków jest niskie i wymagana jest edukacja żywieniowa w tym zakresie.

4. Zakres pracy

Weryfikacja hipotez została przeprowadzona w następujących zadaniach badawczych:

1. Analiza i ocena produktów skrobiowych (kasza bulgur, kasza jagłana, ryż brązowy, groch, fasola, soczewica czerwona, soczewica zielona, ciecierzycy) pod kątem zawartości błonnika całkowitego, frakcji rozpuszczalnej i nierozpuszczalnej.
 - Wytypowanie surowców do badań zostało dokonane na podstawie aktualnie dostępnej literatury międzynarodowej – wybrano produkty z różnych grup żywności skrobiowej, potencjalnie dające możliwość określenia zawartości błonnika i skrobi opornej.
2. Analiza wybranych produktów skrobiowych pod kątem zawartości skrobi całkowitej, strawnej i opornej (fasola, soczewica zielona, ciecierzycy).

- Na podstawie analiz zawartości błonnika pokarmowego (1 zadanie badacze) wybrano do dalszych analiz 3 produkty skrobiowe z największą zawartością błonnika pokarmowego.
3. Zbadanie wpływu przechowywania w warunkach chłodniczych po ugotowaniu na ilość skrobi odpornej w wybranych produktach skrobiowych (fasola, soczewica zielona, ciecierzycy).
- W wybranych poprzednio produktach skrobiowych (Zadanie 2) określono zmiany ilości RS pod wpływem chłodniczego przechowywania (24h, 4°C) oraz chłodniczego przechowywania i ponownego ogrzewania (15 min, 95°C) w stosunku do próbki kontrolnej (świeżo skleikowanej, 95°C, 30 min).
4. Poszerzenie analiz (Zadanie 3) o badanie wpływu HPP oraz HPP w połączeniu z chłodniczym przechowywaniem na zawartość skrobi odpornej w wybranych produktach skrobiowych (fasola, soczewica zielona, ciecierzycy).
- Wybrano metodę nietermicznego przetwarzania żywności, aby uzupełnić tzw. „research gap” w odniesieniu do wpływu tej metody na zawartość skrobi odpornej w nasionach roślin strączkowych, a także połączono metodę HPP z chłodniczym przechowywaniem, aby określić wpływ kombinacji tych metod na zawartość RS.
5. Ocena wpływu gotowania i chłodzenia makaronu z ciecierzycy na odpowiedź glikemiczną i IG u zdrowych osób.
- Po przeprowadzeniu analiz określających wpływ metod przetwarzania i przechowywania chłodniczego nasion roślin strączkowych (fasola, soczewica zielona, ciecierzycy) na zawartość RS (Zadanie 3 i 4) wybrano produkt, w którym efekt chłodzenia był największy – ciecierzycę i do dalszych badań wybrano produkt na jej bazie - makron z mąki z ciecierzycy. Celem tego zadania była ocena wpływu kombinacji metod gotowania i chłodzenia makaronu z ciecierzycy na odpowiedź glikemiczną i IG u zdrowych osób.
6. Ocena spożycia skrobi odpornej wśród grupy dorosłych Polaków. Badanie ankietowe.
- Po dokonaniu przeglądu literatury na temat korzyści zdrowotnych wynikających ze spożywania RS oraz jej spożycia w różnych krajach

wywnioskowano, że w Polsce do tej pory nie przeprowadzono badań w tym obszarze, dlatego celem niniejszego zadania było stworzenie bazy danych produktów skrobiowych spożywanych w Polsce, określenie w nich zawartości RS oraz obliczenie spożycia RS wśród grupy 115 dorosłych Polaków.

5. Materiał i metody badawcze

5.1. Zadania badawcze nr. 1- 4:

- Wybrane do badań produkty skrobiowe pochodziły z firmy Melvit S.A. (Warszawa, Polska), zostały zakupione w sklepie spożywczym w Warszawie.
- Wszystkie wzorce i odczynniki były klasy analitycznej, a inne materiały były dostarczane przez renomowanych dostawców. Nasiona zostały zmielone w analitycznym młynku elektrycznym (Rommelsbacher EKM 100, Rommelsbacher ElektroHausgeräte GmbH, Dinkelsbühl, Niemcy), przesiane przez sito 1 mm (Labindex S.C., Warszawa, Polska), wysuszone, a następnie zapakowane w hermetyczne szklane pojemniki z zamknięciem.
- Metodą grawimetryczną (suszkowo-wagową) określono zawartość suchej masy w temperaturze 105 °C. Zawartość błonnika pokarmowego została zmierzona przy użyciu metody AOAC 991.43. Próbkę poddano sekwencyjnej obróbce następującymi enzymami: alfa-amylazą, proteazą i amyloglukozydazą. Następnie etanol wytrącił rozpuszczalne włókno, oddzielając białko i glukozę od próbek. Pozostałość przefiltrowano, kolejno przemyto etanolem i acetonem, a następnie wysuszono i zważono. Jeden duplikat został przeanalizowany pod kątem niestrawnego białka, a drugi pod kątem popiołu. Błonnik pokarmowy stanowi pozostałość po analizie skorygowaną o zawartość niestrawnego białka i popiołu.
- Zestaw Resistant Starch Assay Kit do pomiaru i analizy skrobi odpornej w materiałach roślinnych i próbkach skrobi został zakupiony od

Megazyme International Ireland (Bray Business Park, Bray, Co. Wicklow, Irlandia). Zastosowano następujące oficjalne metody analizy:

- AOAC 2002.02 – Oznaczanie zawartości skrobi odpornej w skrobi i materiałach roślinnych. Trawienie enzymatyczne. Próbkę poddano inkubacji i wytrząsaniu z α -amylazą trzustkową i amyloglukozydazą (AMG) w łaźni wodnej w temperaturze 37°C przez 16 godzin. Nieodporna skrobia została rozpuszczona i zhydrolizowana do D-glukozy w wyniku połączonego działania obu enzymów. Reakcję zatrzymano przez dodanie równej objętości etanolu lub metylowanego spirytusu przemysłowego (IMS, denaturowany etanol), a RS odzyskano w postaci granulatu podczas wirowania. Kolejne etapy obejmowały dwa płukania przez zawieszenie w wodnym IMS lub etanolu (50% v/v), a następnie odwirowanie. Wolna ciecz została usunięta poprzez dekantację. Ziarnisty RS rozpuszczono następnie w 2 M KOH i energicznie mieszano w łaźni wodnej z lodem za pomocą mieszadła magnetycznego. Roztwór zneutralizowano buforem octanowym, a skrobię zhydrolizowano ilościowo do glukozy przy użyciu AMG. D-glukozę mierzono za pomocą oksydazy glukozowej/peroksydazy (GOPOD), a zawartość RS mierzono w próbce.
- Roztwory skrobi i wody (20% w/w) przygotowano w temperaturze pokojowej i hermetycznie zamknięto w pojemnikach z polietylenu o wysokiej gęstości. Zapakowane próbki umieszczono w cylindrycznej komorze ładunkowej i poddano działaniu wysokiego ciśnienia hydrostatycznego 200, 400 i 600 MPa przez 3, 5, 6 i 9 minut w temperaturze pokojowej (25 °C) w komorze HPP (EXDIN Solutions Ltd., Kraków, Polska), z wodą jako medium przenoszącym ciśnienie. Czas do osiągnięcia określonego ciśnienia był krótszy niż 90 s, a czas dekompresji był krótszy niż 15 s. Po zakończeniu procesu część próbek została bezpośrednio przeanalizowana pod kątem zawartości RS. Natomiast pozostała część była przechowywana w warunkach chłodniczych (4 °C) przez 24 godziny przed poddaniem jej tej samej

analizie. Każda analiza została przeprowadzona w trzech powtórzeniach.

- Wszystkie analizy statystyczne przeprowadzono przy użyciu programu Statistica, wersja 13 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA).

5.2. Zadanie badawcze nr. 5:

- Wszystkie procedury z udziałem ludzi zostały przeprowadzone zgodnie z wytycznymi określonymi w Deklaracji Helsińskiej. Protokół badania został zatwierdzony przez Rektorską Komisję ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka - SGGW (Uchwała nr 5/RKE/2023/U).
- W badaniu wzięło udział 12 zdrowych osób obojga płci w wieku 18-65 lat. Kwalifikacja do badania została przeprowadzona przez pracowników służby zdrowia: wywiad medyczny został przeprowadzony przez lekarza (10 min), a wywiad żywieniowy przez dietetyka (15 min).
- Badanie było randomizowane i prowadzone metodą pojedynczej ślepej próby. Uczestnicy zostali poproszeni o udział w spotkaniu przesiewowym i sześciu spotkaniach w trakcie badania. Pomiędzy każdym dniem testu były dwa dni przerwy. Podczas wizyty przesiewowej wszyscy uczestnicy zostali poinformowani o protokole badania i procedurach oraz wyrazili pisemną świadomą zgodę. Dla każdej osoby zmierzono wysokość ciała (za pomocą wzrostomierza SECA 213), masę ciała i skład ciała (za pomocą analizatora składu ciała TANITA BC-545N). BMI poszczególnych osób obliczono przy użyciu standardowego wzoru $[waga\ (kg)/wysokość\ x\ wzrost\ (m^2)]$.
- Każda osoba spożywała dwie standaryzowane porcje makaronu z ciecierzycy: (i) świeżo ugotowanego i (ii) ugotowanego, schłodzonego przez 24 godziny w temperaturze 4°C i ponownie podgrzanego przed spożyciem oraz roztwór glukozy jako żywność referencyjną. Uczestnicy spożywali makaron z ciecierzycy w losowej kolejności. Pomiaru IG dokonano przy użyciu standardowej metodologii i obliczono zgodnie z normą ISO 2010.

- Przed rozpoczęciem pomiarów wszyscy uczestnicy badania zostali odpowiednio poinstruowani w zakresie korzystania ze sprzętu i wykonywania pomiarów, w tym samodzielnego nakłuwania opuszki palca i zasad higieny związanych z naruszeniem osłon skóry. Wszystkie pomiary były nadzorowane przez pracowników służby zdrowia. Każdorazowo do badania wymagane było 0,3-0,4 μ l krwi włosniczkowej. Oznaczenia glukozy we krwi włosniczkowej wykonywano suchą metodą enzymatyczną przy użyciu pasków testowych i glukometrów Contour® plus (Ascensia Diabetes Care Poland Sp. z o.o.). Krew włosniczkową pobierano po zdezynfekowaniu opuszki palca, przy użyciu jednorazowych lancetów.
- Próbkę makaronu z ciecierzycy analizowano pod kątem zawartości węglowodanów ogółem, białka, tłuszczu, popiołu, błonnika i wody przy użyciu standardowych metod. Zawartość wilgoci oznaczono metodą wagową (suszenie 180 minut w temperaturze 105-107°C). Całkowitą zawartość popiołu oszacowano metodą wagową (po prażeniu) zgodnie z normą EN ISO 2171:2010. Zawartość białka ogółem oznaczono metodą Kjeldahla zgodnie z PN-A-04018:1975/Az3:2000. Zawartość tłuszczu ogółem oznaczono zgodnie z PN-A-79011-4:1998. Całkowitą zawartość błonnika pokarmowego oznaczono zgodnie z 991.43 AOAC, 32-07 AACC. Zawartość węglowodanów ogółem obliczono zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) nr 1169/2011 z dnia 25.10.2011. Węglowodany obliczono na podstawie zawartości: suchej masy, popiołu, białka, tłuszczu i błonnika.
- Ocena sensoryczna ugotowanego makaronu z ciecierzycy została przeprowadzona przy użyciu 7-punktowej skali hedonicznej, gdzie wynik 1 oznaczał, że produkt był zdecydowanie nie lubiany, a wynik 7 oznaczał, że był bardzo lubiany. Wszyscy badani zostali poproszeni o ocenę takich parametrów jak wygląd, smak, zapach, tekstura i ogólna akceptowalność.

5.3. Zadanie badawcze nr. 6:

- Wszystkie procedury z udziałem ludzi zostały przeprowadzone zgodnie z wytycznymi określonymi w Deklaracji Helsińskiej. Protokół badania

został zatwierdzony przez Rektorską Komisję ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka - SGGW (Uchwała nr 6/RKE/2023/U).

- Włączenie do badania nastąpiło na podstawie kwestionariusza osobowego, zawierającego informacje niezbędne do zakwalifikowania na podstawie kryteriów włączenia.
- 115 ochotników w wieku 18-65 lat zostało zrekrutowanych do badania za pomocą kuli śnieżnej wśród studentów Wydziału Żywienia Człowieka Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ich rodzin i znajomych. Do zbierania informacji wykorzystano metodę PAPI (Pen-and-Paper Personal Interview), która została przeprowadzona przez przeszkolonego ankietera. Wszyscy uczestnicy otrzymali formularz oraz jasne pisemne lub ustne instrukcje dotyczące sposobu wypełnienia kwestionariusza osobowego i 3-dniowego bieżącego notowania.
- Przeprowadzono przegląd artykułów opublikowanych między 1985 r. a listopadem 2023 r., które analizowały obecność RS w żywności, korzystając z PubMed, Scopus i Science Direct. Kryteria wykluczenia obejmowały stosowanie RS z preparatów, suplementów, skrobi modyfikowanej lub izolowanej skrobi surowej. Z otrzymanych rekordów, 79 badań zostało włączonych do stworzenia bazy danych. Wybór produktów skrobiowych uwzględnionych w analizie został określony na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego dotyczących spożycia żywności w Polsce oraz różnorodności tych produktów dostępnych w trzech największych supermarketach w Warszawie. Spójne dane zostały skompilowane do bazy danych Excel (Microsoft Office, 2019, Polska).
- Dane z wypełnionych 3-dniowych bieżących notowań uczestników zostały zebrane i przekształcone w bazę danych Excel. Całkowite spożycie RS obliczono mnożąc dzienne spożycie produktów skrobiowych (g/dzień) przez ich zawartość RS (g/100 g produktu).
- Wszystkie analizy statystyczne zostały przeprowadzone za pomocą programu Statistica 13 (TIBCO, USA).

6. Materiały opublikowane

6.1. [P1] Health benefits of resistant starch: a review of the literature

Adrianna Bojarczuk, Sylwia Skąpska, Amin Mousavi Khaneghah, Krystian Marszałek; 2022, Health benefits of resistant starch: a review of the literature, *Journal of Functional Foods*, 93(3):105094; DOI: 10.1016/j.jff.2022.105094; IF₂₀₂₃=3.8; 100 pkt. MEiN

Rosnące zainteresowanie konsumentów produktami żywnościowymi o cechach funkcjonalnych skutkuje ciągłym rozwojem produktów spożywczych oraz badaniem ich cech, a także nowoczesnych technologii przetwarzania żywności, które mogą poprawiać właściwości prozdrowotne. Głównym makroskładnikiem w diecie człowieka są węglowodany, a wśród nich skrobia, która stanowi jednocześnie najważniejszy polisacharyd w żywności pochodzenia roślinnego. Skrobia w żywności może być podzielona w zależności od tempa trawienia na trzy kategorie: wolnostrawna, szybkostrawna skrobia oraz skrobia oporna (ang. Resistant Starch, RS) [7] i to właśnie potencjał zdrowotny tej ostatniej frakcji został omówiony w pracy **P1**. Najważniejsze efekty fizjologiczne żywności zawierającej RS wynikają z jej fermentacji w jelicie grubym z udziałem mikrobioty jelitowej. W wyniku tego procesu powstają krótkołańcuchowe kwasy tłuszczowe (SCFA), głównie octowy, propionowy i masłowy, których korzystne efekty metaboliczne takie jak wpływ na metabolizm glukozy, lipidów i działanie prebiotyczne zostały opisane w pracy **P1**. Skrobia i inne węglowodany przyczyniają się do wzrostu poziomu glukozy we krwi; jednak niektóre rodzaje węglowodanów mogą również umożliwiać powolne uwalnianie glukozy. Różnice w strukturze i pochodzeniu skrobi oraz przetwarzaniu produktów skrobiowych wpływają na jej hydrolizę i późniejsze procesy metaboliczne. Konsekwencją tych różnic jest różnica w odpowiedzi glikemicznej organizmu, związanej ze zdolnością do kontrolowania poziomu glukozy [99,100]. Proces trawienia żywności zawierającej RS jest wolniejszy niż żywności zawierającej tylko szybko strawną skrobię (RDS). W związku z tym spożywanie takich pokarmów prowadzi do powolnego uwalniania glukozy do krwiobiegu, a efekt ten jest opisywany jako indeks glikemiczny (GI), system klasyfikacji, który klasyfikuje różne pokarmy zgodnie ze zmianą odpowiedzi glikemicznej po spożyciu żywności [101]. W związku z tym poszukuje się metod, które umożliwią przetwarzanie produktów skrobiowych w taki sposób, aby zwiększyć zawartość RS. Metody fizycznej modyfikacji skrobi obejmują np. obróbkę cieplno-wilgotnościową (HMT). A także poszukuje się możliwości zwiększania RS

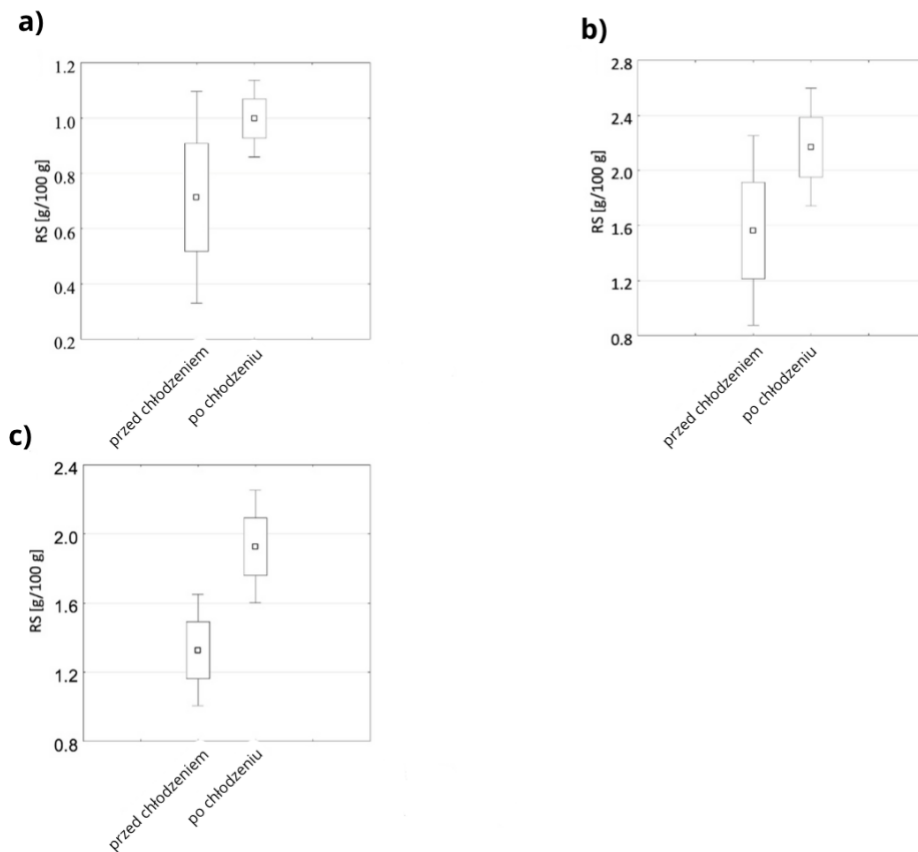
poprzez przechowywanie chłodnicze, gdyż badania wykazały jego korzystny wpływ na zawartość RS, a także na gospodarkę węglowodanową [96,97], co stanowiło podstawę do poszerzenia badań w kierunku oceny tego zjawiska w kontekście zwiększenia zawartości RS (**materiały nieopublikowane – potwierdzenie hipotezy 2**) i jego wpływu na glikemię w badaniu **P3 (potwierdzenie hipotezy 3)**. W ostatnich latach opracowywane są również inne nowoczesne, nietermiczne metody fizyczne z łagodnym przetwarzaniem takie jak np. wysokie ciśnienie hydrostatyczne (HHP) [22–24,102,103]. Przeprowadzona w artykule **P1** analiza metod przetwarzania i przechowywania pozwoliła wyselekcjonowanie metody HPP oraz chłodniczego przechowywania do dalszych badań ich wpływu na zawartość RS, czego dokonano w artykule **P2**. Analiza literatury dotyczącej RS i jej spożycia w przeglądzie **P1** wykazała, że nie istnieją oficjalne zalecenia dotyczące spożycia RS, a ilość, która może wykazywać korzystne efekty zdrowotne jest różnie definiowana przez różnych autorów. Te wnioski stanowiły inspirację do poszukiwania odpowiedzi na te pytania i na tej podstawie opracowano badania ankietowe i przeanalizowano spożycie RS oraz jej źródła w diecie grupy dorosłych Polaków (**materiały nieopublikowane**).

6.2. [P2] Application of High Hydrostatic Pressures and Refrigerated Storage on the Content of Resistant Starch in Selected Legume Seeds

Adrianna Bojarczuk, Joanna Le-Thanh-Blicharz, Dorota Michałowska, Danuta Kotyrba, Krystian Marszałek; Application of High Hydrostatic Pressures and Refrigerated Storage on the Content of Resistant Starch in Selected Legume Seeds, *Applied Sciences*. 2024; 14(16):7049. DOI: 10.3390/app14167049 IF₂₀₂₃=2.5; 40 pkt. MEiN

Na podstawie przeglądu badań w artykule **P1** możliwy był wybór produktów skrobiowych (kasza bulgur, kasza jaglana, ryż brązowy, groch, fasola, soczewica czerwona, soczewica zielona, ciecierzycy) do dalszych badań oraz dokonanie ich analizy i oceny pod kątem zawartości błonnika całkowitego, frakcji rozpuszczalnej i nierozpuszczalnej (**zadanie badawcze nr 1**, artykuł **P2**). Następnie na podstawie tych analiz wybrano do dalszych badań 3 produkty skrobiowe z największą zawartością błonnika pokarmowego i oceniono w nich zawartość skrobi całkowitej, strawnej i odpornej (**zadanie badawcze nr 2**), co przedstawiono w kolejnym opublikowanym artykule (**P2**). Do dalszych badań wybrano nowoczesną, nietermiczną metodę przetwarzania żywności, jaką jest przetwarzanie wysokociśnieniowe (HPP). Metoda ta wpływa na strukturę dużych cząsteczek, takich jak białka i polisacharydy, umożliwiając inaktywację mikroorganizmów i enzymów, pozostawiając mniejsze cząsteczki, takie jak witaminy, polifenole i aromaty bez zmian [104–106]. W związku z tym produkty poddane obróbce HPP charakteryzują się wysoką jakością sensoryczną i związanymi z tym korzyściami zdrowotnymi [106]. Wyniki badań dotyczące wpływu HPP na proces żelatynizacji skrobi i zawartość RS w nasionach roślin strączkowych były niejednoznaczne. Ponadto, informacje na temat intensywności procesu retrogradacji w produktach skrobiowych przetwarzanych za pomocą HPP podczas przechowywania w warunkach chłodniczych nie były wystarczające, zatem aby uzupełnić tę lukę w wiedzy. Badanie (**P2**) miało na celu porównanie wpływu HPP i HPP w połączeniu z przechowywaniem w lodówce na zawartość RS w białej fasoli, zielonej soczewicy i ciecierzycy. Zastosowano różne poziomy ciśnienia i czasy przetwarzania w celu oceny zmian zawartości RS (**zadanie badawcze nr 4**). Przeprowadzone badanie (**P2**) wykazało, że wzrost ciśnienia i czasu ciśnieniowania wpłynął na zmiany zawartości RS w badanych nasionach roślin strączkowych, co **potwierdziło hipotezę 1**. Wyniki nie są jednak jednoznaczne i wskazują, że zmiany zawartości RS zależą od testowanego produktu i zastosowanych parametrów czasu ciśnieniowania i wartości ciśnienia. Co więcej, proces

chłodzenia wcześniej poddanych ciśnieniowaniu próbek spowodował znaczny wzrost zawartości RS, co stanowiło **potwierdzenie hipotezy 2**, a zjawisko to było prawdopodobnie spowodowane procesem retrogradacji skrobi, która uległa żelatynizacji w wyniku działania procesu HPP, co przedstawiono na Rysunku 6.

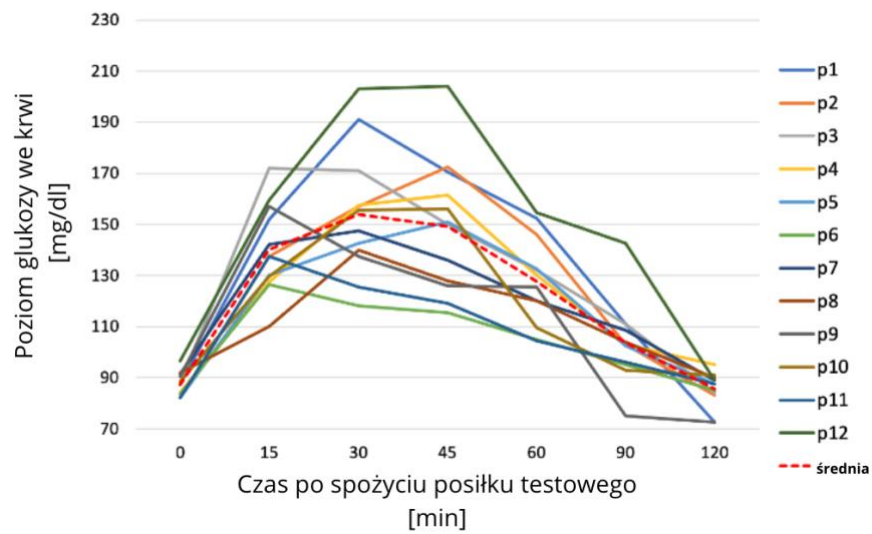


Rysunek 6 Wpływ chłodzenia na zawartość RS ze średnich wszystkich testowanych ciśnień i czasów na próbkach fasoli (a), ciecierzycy (b) i soczewicy (c).

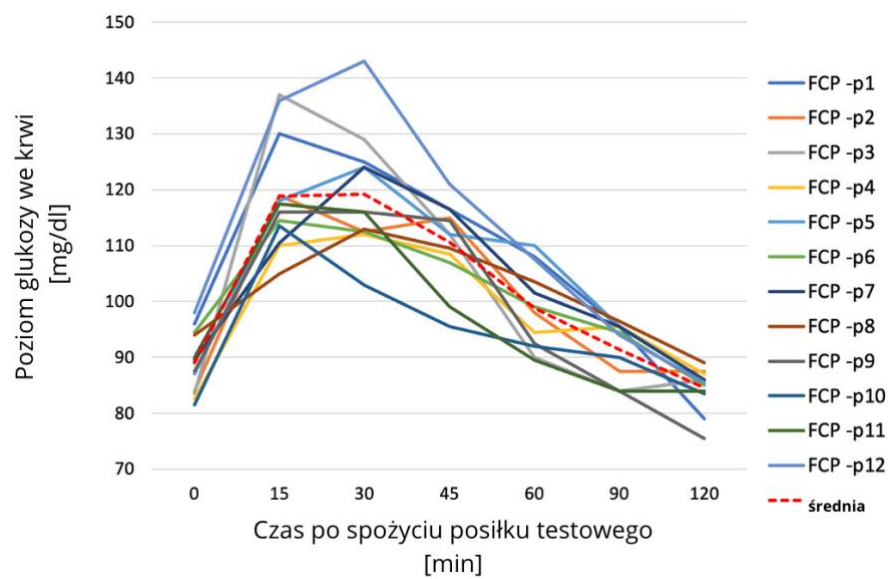
6.3. [P3] Effect of cooking and cooling chickpea pasta on resistant starch content, glycemic response and glycemic index in healthy adults

Adrianna Bojarczuk, Paulina Kęszycka, Krystian Marszałek, Danuta Gajewska; Effect of cooking and cooling chickpea pasta on resistant starch content, glycemic response and glycemic index in healthy adults; *Metabolites*, 14(11), 585. DOI: 10.3390/metabo14110585; IF₂₀₂₃=3.4; 100 pkt. MEiN

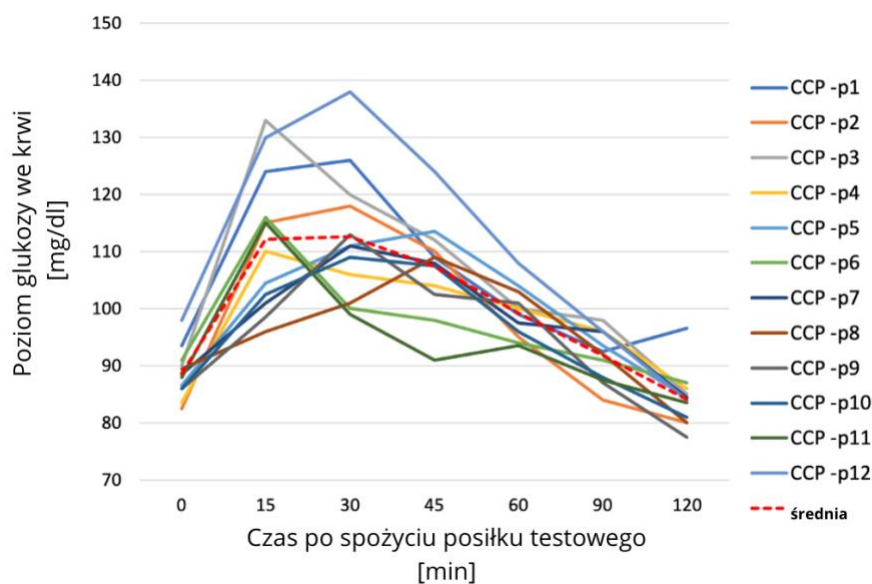
W pracy przeglądowej (**P1**) przedstawiono szereg korzyści zdrowotnych wynikających ze spożywania RS, w tym dotyczących metabolizmu węglowodanów. Biorąc pod uwagę rosnącą liczbę osób chorujących na zaburzenia gospodarki węglowodanowej celowe wydawało się poszerzenie tego tematu i zbadanie wpływu chłodzenia na zawartość RS, indeks glikemiczny oraz glikemię poposiłkową u zdrowych osób (**P3**). Z kolei analizy błonnika i skrobi odpornej w badaniu 2 (**P2**) wykazały, że nasiona roślin strączkowych takie jak fasola biała, ciecierzycza i soczewica zielona są bogatym źródłem obu tych cennych składników, a dodatkowo stanowią źródło związków mineralnych, witamin i steroli roślinnych [107]. Biorąc pod uwagę powyższe fakty oraz analizę wpływu chłodzenia przetworzonych nasion roślin strączkowych, gdzie najwyższą zawartością RS po chłodzeniu charakteryzowała się ciecierzycza, to właśnie makaron na bazie mąki z ciecierzycy wybrano do dalszych badań (**P3**). Celem badania była ocena wpływu kombinacji metod gotowania i chłodzenia makaronu z ciecierzycy na zawartość RS, odpowiedź glikemiczną i IG u zdrowych osób (**zadanie badawcze nr 5, P3**). W badaniu wzięło udział 12 zdrowych osób obojga płci w wieku 18-65 lat. Każda osoba spożywała dwie standaryzowane porcje makaronu z ciecierzycy: (i) świeżo ugotowanego (FCP) oraz (ii) ugotowanego, schłodzonego przez 24 godziny w 4°C i ponownie podgrzanego przed spożyciem (CCP), a także roztwór glukozy jako żywność referencyjną. Procesy chłodzenia i odgrzewania znacząco zwiększyły zawartość RS w gotowanym makaronie z ciecierzycy (z 1,83 g/100 g do 3,65 g/100 g), co miało korzystny wpływ na glikemię poposiłkową (Rysunki 7,8 i 9). Makaron CCP miał istotnie niższą wartość IG niż makaron FCP (33 vs. 39, $p=0,0022$). Zaobserwowano istotną różnicę w przyrostowym polu pod krzywą (IAUC) odpowiedzi glikemicznej między CCP i FCP (1327.9 ± 414.8 mg/dl/min vs. 1556.1 ± 456.9 mg/dl/min, $p=0.0022$).



Rysunek 7 Indywidualne odpowiedzi glikemiczne i wartość średnia po spożyciu roztworu glukozy (posiłek referencyjny).
p1-p12 - numery uczestników



Rysunek 8 Indywidualne odpowiedzi glikemiczne i wartość średnia po spożyciu świeżo ugotowanego makaronu z
ciecierzycy (FCP). p1-p12 - numery uczestników



Rysunek 9 Indywidualne odpowiedzi glikemiczne i wartość średnia po spożyciu schłodzonego makaronu z ciecierzycy (CCP). p1-p12 - numery uczestników

Proces chłodzenia i podgrzewania nie wpłynął na cechy sensoryczne makaronu z ciecierzycy, ogólna ocena sensoryczna makaronu CCP była podobna do oceny makaronu FCP. Wyniki naszego badania potwierdzają hipotezę o zmniejszonej odpowiedzi glikemicznej po prostych zmianach w interwencji technologicznej prowadzącej do obniżenia poposiłkowego stężenia glukozy we krwi i IG, co stanowi **potwierdzenie hipotezy 3** i może być pomocne dla osób, które muszą kontrolować glikemię poposiłkową.

7. Materiały niepublikowane

7.1. Zadanie badawcze nr 3

Cel:

Poszerzenie analiz o **zadanie badawcze nr 3**, w celu potwierdzenia **hipotezy 2**: Celem było zbadanie wpływu chłodniczego przechowywania po ugotowaniu metodą tradycyjną (gotowanie w wodzie) na ilość skrobi odpornej w wybranych produktach skrobiowych (fasola, soczewica zielona, ciecierzycy).



Rysunek 10 Wpływ procesu gotowania i chłodzenia na skrobię

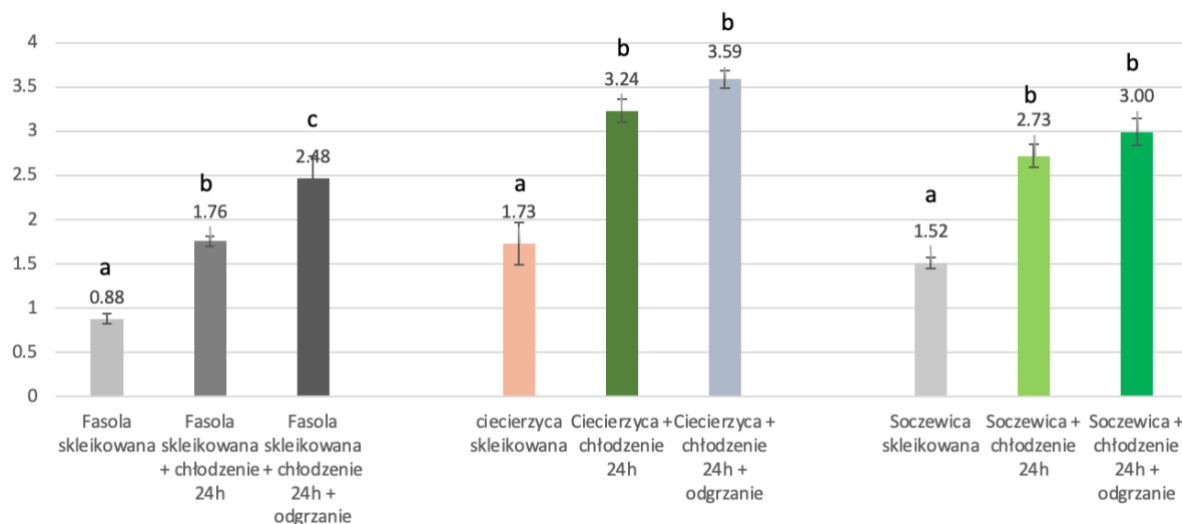
Materiały i metody:

W wybranych poprzednio produktach skrobiowych (**Zadanie badawcze nr 2**) określono zmiany ilości RS pod wpływem chłodniczego przechowywania (24h, 4°C) oraz chłodniczego przechowywania i ponownego ogrzewania (15 min, 95°C) w stosunku do próbki kontrolnej (świeżo skleikowanej, ugotowanej, 95°C, 30 min).

Metoda AOAC 2002.02 – Oznaczanie zawartości skrobi odpornej w skrobi i materiałach roślinnych. Trawienie enzymatyczne.

Analizę statystyczną przeprowadzono przy użyciu programu Statistica, wersja 13 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, CA, USA).

Wyniki i wnioski:



Rysunek 11 Zawartość RS (%s.m.) w próbkach kontrolnych, po schłodzeniu oraz schłodzeniu i ponownym podgrzaniu. Wartości oznaczone różnymi literami różnią się istotnie, ANOVA, test Tukeya, $p < 0,05$, Słupki błędów oznaczają odchylenia standardowe.

Badania RS wykazały, że jej zawartość w próbkach kontrolnych, po schłodzeniu oraz schłodzeniu i podgrzaniu wynosiła odpowiednio 0,88 g/100 g, 1,76 g/100 g i 2,48 g/100 g dla fasoli białej, 1,73 g/100 g, 3,24 g/100 g i 3,59 g/100 g dla ciecierzycy oraz 1,52 g/100 g, 2,73 g/100 g i 3,0 g/100g dla soczewicy zielonej, co przedstawiono na Rysunku 11.

Uzyskane wyniki badań wskazują na to, że zawartość RS po ugotowaniu i schłodzeniu badanych nasion roślin strączkowych wzrasta istotnie ($p < 0.05$). Wyniki te stanowiły podstawę do dalszych analiz innych metod przetwarzania (nietermicznej metody- HPP) w połączeniu z chłodniczym przechowywaniem, co wykonano i opublikowano wyniki w artykule **P2**, realizując tym samym **zadanie badawcze nr 4** i potwierdzając **hipotezę 1**. Ponadto zaobserwowano, że ponowne podgrzanie powoduje dalszy istotny wzrost zawartości RS tylko w fasoli. Zjawisko to może być wykorzystywane w projektowaniu żywności bogatej w RS, co może przyczynić się do obniżenia indeksu glikemicznego produktu, co jest szczególnie istotne dla osób z zaburzeniami gospodarki węglowodanowej. Wskazane jest przeprowadzenie dalszych badań *in vivo* w celu określenia wpływu spożycia RS na gospodarkę węglowodanową u ludzi, co zostało również zweryfikowane w dalszych badaniach (**zadanie badawcze nr 5**) i opublikowane w artykule **P3**, potwierdzającym **hipotezę 3**.

7.2. Zadanie badawcze nr 6

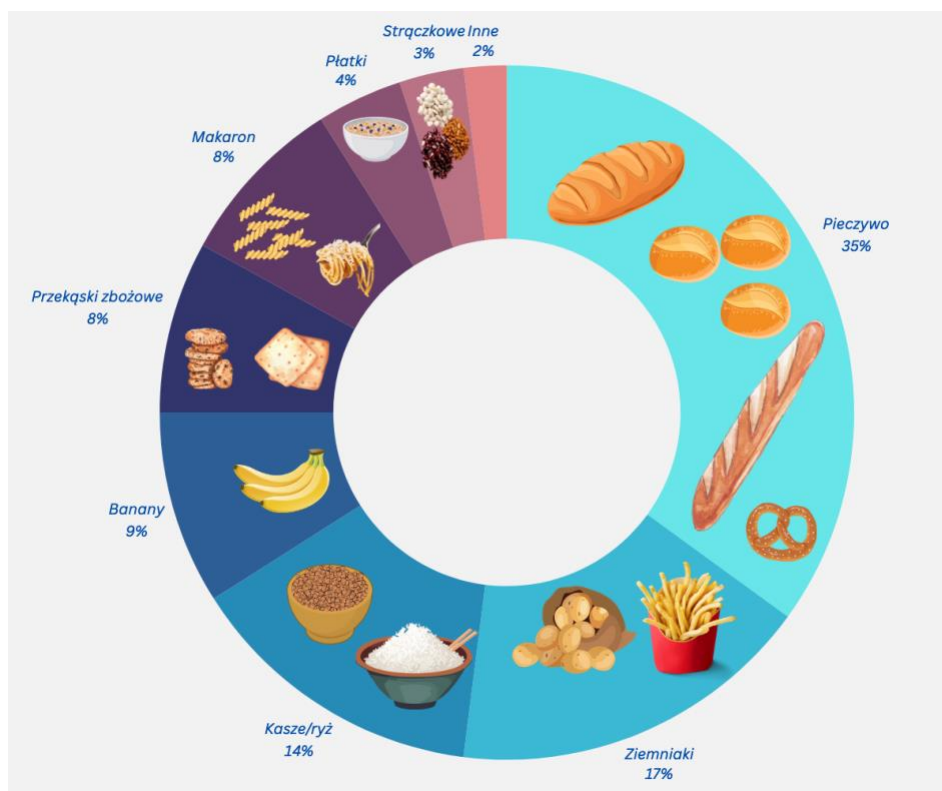
Cel: Ocena spożycia RS w grupie dorosłych Polaków.

Po dokonaniu przeglądu literatury (**P1**) na temat korzyści zdrowotnych wynikających ze spożywania RS oraz jej spożycia w różnych krajach wywnioskowano, że w Polsce do tej pory nie przeprowadzono badań w tym obszarze. Dodatkowo wyniki przeprowadzonych i opublikowanych badań (**P2**) wykazały wpływ chłodniczego przechowywania żywności na zawartość RS, co uwzględniono tworząc bazę danych produktów skrobiowych przygotowanych w różnymi metodami, a fragment tej części tabeli przedstawiono Rysunku 12.

Produkt	RS(g/100g)	Min	Max	Referencje
Ziemniaki				
Ziemniaki pieczone	1	0,8	1,4	[108], [109],[110]
Ziemniaki gotowane	1,3	0,3	4,5	[108], [10], [7], [111], [112], [113],[114], [115], [116], [109], [110], [117],[118],[119],[120]
Ziemniaki gotowane, chłodzone i podgrzane	1,6	0,4	2,2	[110], [118]
Ziemniaki smażone	2,8	1,3	5,5	[114], [109], [110],[120]

Rysunek 12 Fragment tabeli stworzonej na potrzeby obliczenia spożycia RS w grupie dorosłych Polaków - porównanie metod obróbki termicznej

Co więcej, przeprowadzone i opublikowane (**P3**) wyniki badań dotyczące wpływu spożycia chłodzonych nasion roślin strączkowych (makaron z ciecierzycy) na poziom glikemii i indeks glikemiczny stanowiły punkt odniesienia do przeanalizowania źródeł skrobi opornej w diecie grupy dorosłych Polaków, co przedstawiono na Rysunku 13. Dlatego niniejsze badanie miało na celu stworzenie bazy danych określającej ilościowo zawartość RS w powszechnie spożywanych produktach skrobiowych w Polsce oraz wykorzystanie tych danych do obliczenia spożycia RS wśród grupy dorosłych Polaków, co stanowiło zrealizowanie **zadania badawczego nr 6**. Jednocześnie wyniki badania potwierdziły **Hipotezę 4** - Spożycie skrobi opornej wśród badanej grupy dorosłych Polaków nie jest wysokie i wymagana jest edukacja żywieniowa w tym zakresie.



Rysunek 13 Źródła skrobi opornej w diecie badanych osób

Materiały i metody:

Informacje ogólne

Wszystkie procedury z udziałem ludzi zostały przeprowadzone zgodnie z wytycznymi określonymi w Deklaracji Helsińskiej i zatwierdzone przez Rektorską Komisję ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka - SGGW (Uchwała nr 6/RKE/2022).

Uczestnicy i projekt badania

Włączenie do badania nastąpiło na podstawie kwestionariusza osobowego, zawierającego informacje niezbędne do zakwalifikowania na podstawie kryteriów włączenia. 115 ochotników w wieku 18-65 lat zostało zrekrutowanych do badania za pomocą kuli śnieżnej wśród studentów Wydziału Żywienia Człowieka Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, ich rodzin i znajomych. Do zbierania informacji wykorzystano metodę PAPI (Pen-and-Paper Personal Interview), która została przeprowadzona przez przeszkolonego ankietera. Wszyscy uczestnicy otrzymali formularz oraz jasne pisemne lub ustne instrukcje dotyczące sposobu wypełnienia kwestionariusza osobowego i 3-dniowego bieżącego notowania.

Dane socjodemograficzne i antropometryczne

W kwestionariuszu zebrano informacje na temat danych socjodemograficznych i antropometrycznych, takich jak wiek, płeć, poziom wykształcenia i miejsce zamieszkania. Podana waga i wzrost zostały wykorzystane do obliczenia masy ciała. Wskaźnik masy ciała (BMI) obliczono jako masę ciała w kg podzieloną przez wzrost w metrach podniesiony do kwadratu. Zgodnie ze standardem WHO, kryteria BMI zostały wdrożone dla uczestników w następujący sposób: BMI < 18,5 kg/m² - niedowaga; BMI 18,5-24,9 kg/m² - waga prawidłowa; BMI 25-29,9 kg/m² - nadwaga i BMI ≥ 30 kg/m² - otyłość [121].

Skrobia oporna w żywności - baza danych

Przeprowadzono przegląd artykułów opublikowanych między 1985 r. a listopadem 2023 r., które analizowały zawartość RS w żywności, korzystając z PubMed, Scopus i Science Direct. Kryteria wykluczenia publikacji obejmowały stosowanie RS z preparatów, suplementów, skrobi modyfikowanej lub izolowanej skrobi surowej. Z otrzymanych rekordów, 79 badań zostało włączonych do stworzenia bazy danych. Wybór produktów skrobiowych uwzględnionych w analizie został określony na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego [122] dotyczących spożycia żywności w Polsce oraz różnorodności tych produktów dostępnych w trzech największych supermarketach w Warszawie. Wyniki zawartości RS w danych literaturowych zostały uwzględnione na dwa różne sposoby: jako cała żywność z zawartością wilgoci (g RS/100 g całej żywności) lub procent suchej masy (g RS/100 g suchej masy). Obie opcje zostały uwzględnione przy tworzeniu bazy danych, chociaż w celu zachowania spójności wyników, dane przedstawione jako procent RS w suchej masie zostały przekształcone z uwzględnieniem zawartości wilgoci. Spójne dane zostały skompilowane do bazy danych Excel (Microsoft Office, 2019, Polska) i podsumowane według kategorii żywności.

Spożycie skrobi odpornej

Szczegółowe informacje na temat żywności i napojów spożywanych w ciągu 3 dni zostały zebrane od uczestników, stosując metodę 3-dniowego zapisu żywności. Dane zostały przekształcone w bazę danych Excel. Całkowite spożycie RS obliczono mnożąc dzienne spożycie produktów skrobiowych (g/dzień) przez zawartość RS w danym produkcie (g/100 g produktu).

Analizy statystyczne

Określono statystyki opisowe dla zmiennych jakościowych (płeć, poziom wykształcenia, miejsce zamieszkania, kategorie wskaźnika masy ciała (BMI)): procent (%) i liczba przypadków (N). Normalność rozkładu zmiennych ilościowych zweryfikowano za pomocą testu Shapiro-Wilka. Ze względu na niespełnienie założenia normalności następujących zmiennych (wiek, BMI, spożycie skrobi opornej) zastosowano metody nieparametryczne. Do oceny różnic między badanymi grupami w spożyciu skrobi opornej zastosowano test U-Mana Whitneya (dla dwóch grup, tj. mężczyźni/kobiety) lub analizę Kruskalla-Wallisa (dla więcej niż dwóch grup, tj. klasyfikacja ze względu na poziom wykształcenia lub miejsce zamieszkania). Dla tych danych wyznaczono mediany, wartości min-max, a do oceny zależności między zmiennymi (dane socjodemograficzne i spożycie skrobi opornej) zastosowano korelację rang Spearmana. Wszystkie analizy statystyczne przeprowadzono za pomocą programu Statistica 13 (TIBCO, USA).

Wyniki i wnioski:

W badanej grupie mediana spożycia RS wyniosła 6,37 g/dzień (Min= 0,95- Max 25,36). U większości badanych spożycie RS oscylowało w zakresie od 5 do 10 g/dzień (n=66), a 35 badanych spożywało do 5 g/dzień. Tylko jeden uczestnik spożywał więcej niż 25 g/dzień. Wykazano również różnice w spożyciu RS między mężczyznami i kobietami; spożycie wśród kobiet było niższe (Me = 5,72 g/dzień) niż u mężczyzn (Me = 7,13 g/dzień) ($p = 0,003$). W badaniu nie stwierdzono istotnych różnic w spożyciu RS między osobami o różnym poziomie wykształcenia ($p=0,37$). Również miejsce zamieszkania nie było czynnikiem determinującym różne spożycie RS w badanej grupie Polaków ($p=0,73$). Nie wykazano również korelacji pomiędzy spożyciem RS a takimi czynnikami jak wiek ($p=0,11$) czy BMI ($p=0,23$). Dodatkowo przeanalizowano, z jakich źródeł pokarmowych pochodziła spożywana skrobia oporna i wykazano, że aż ponad połowa spożywanej skrobi opornej pochodziła z pieczywa i ziemniaków, odpowiednio 35% i 17%, podczas gdy przedmiot wcześniejszych analiz - nasiona roślin strączkowych stanowiły jedynie 3% wszystkich źródeł skrobi opornej. Wydaje się korzystne, aby dorośli Polacy zwiększyli spożycie RS w codziennej diecie w celu uzyskania korzyści zdrowotnych, takich jak poprawa funkcji przewodu pokarmowego oraz poprawa metabolizmu glukozy i insuliny. Szczególną uwagę należy zwrócić na wysoce odżywczy składnik żywności, jakim są

nasiona roślin strączkowych, które są bogatym źródłem RS, co wykazano w badaniach (**P2 i P3**), a ich spożycie jest na niskim poziomie.

8. Wnioski dotyczące rozprawy doktorskiej

Na podstawie przeprowadzonych i omówionych badań zawartych w cyklu trzech artykułów naukowych oraz dodatkowych wyników, przedstawionych jako materiały nieopublikowane, sformułowano następujące stwierdzenia i wnioski:

- Skrobia oporna stanowi funkcjonalny składnik żywności, o wielu potencjalnych korzyściach zdrowotnych.
- Technika HPP ma wpływ na zawartość skrobi odpornej w produktach roślinnych. Wpływ ten zależy od wielu czynników takich jak np. rodzaj produktu, długość ciśnieniowania i wartość ciśnienia.
- Przechowywanie produktów skrobiowych w warunkach chłodniczych po wcześniejszym ich przetworzeniu zarówno metodą tradycyjną (gotowanie w wodzie), jak i metodą nietermiczną (HPP) zwiększa zawartość skrobi odpornej w badanych nasionach roślin strączkowych.
- Spożywanie produktów ze zwiększoną zawartością skrobi odpornej istotnie obniża glikemię poposiłkową i indeks glikemiczny u osób zdrowych.
- Spożycie skrobi odpornej wśród badanej grupy dorosłych Polaków nie jest wysokie i wymagana jest edukacja żywieniowa w tym zakresie.

9. Spis literatury rozprawy doktorskiej

1. Mills, S.; Stanton, C.; Lane, J.; Smith, G.; Ross, R. Precision Nutrition and the Microbiome, Part I: Current State of the Science. *Nutrients* **2019**, *11*, 923, doi:10.3390/nu11040923.
2. Lunn, J.; Buttriss, J.L. Carbohydrates and Dietary Fibre. *Nutr Bull* **2007**, *32*, 21–64, doi:10.1111/j.1467-3010.2007.00616.x.
3. Flint, H.J.; Scott, K.P.; Duncan, S.H.; Louis, P.; Forano, E. Microbial Degradation of Complex Carbohydrates in the Gut. *Gut Microbes* **2012**, *3*, 289–306.
4. Clemente-Suárez, V.J.; Mielgo-Ayuso, J.; Martín-Rodríguez, A.; Ramos-Campo, D.J.; Redondo-Flórez, L.; Tornero-Aguilera, J.F. The Burden of Carbohydrates in Health and Disease. *Nutrients* **2022**, *14*, 3809, doi:10.3390/nu14183809.
5. Li, Z.; Wei, C. Morphology, Structure, Properties and Applications of Starch Ghost: A Review. *Int J Biol Macromol* **2020**, *163*, 2084–2096, doi:10.1016/j.ijbiomac.2020.09.077.
6. Balakrishna, A.K.; Wazed, M.A.; Farid, M. A Review on the Effect of High Pressure Processing (HPP) on Gelatinization and Infusion of Nutrients. *Molecules* **2020**, *25*, 2369, doi:10.3390/molecules25102369.
7. Englyst, H.N.; Kingman, S.M.; Cummings, J.H. Classification and Measurement of Nutritionally Important Starch Fractions. In Proceedings of the European Journal of Clinical Nutrition; 1992; Vol. 46, pp. 33–50.
8. Englyst, H.N.; Cummings, J.H. Digestion of the Carbohydrates of Banana (*Musa Paradisiaca Sapientum*) in the Human Small Intestine. *American Journal of Clinical Nutrition* **1986**, *44*, 42–50, doi:10.1093/ajcn/44.1.42.
9. Bello-Perez, L.A.; Flores-Silva, P.C.; Agama-Acevedo, E.; Tovar, J. Starch Digestibility: Past, Present, and Future. *J Sci Food Agric* **2020**, *100*, 5009–5016.
10. Englyst, H.N.; Cummings, J.H. Digestion of Polysaccharides of Potato in the Small Intestine of Man. *American Journal of Clinical Nutrition* **1987**, *45*, 423–431, doi:10.1093/ajcn/45.2.423.
11. Sorndech, W.; Tongta, S.; Blennow, A. Slowly Digestible- and Non-Digestible A-Glucans: An Enzymatic Approach to Starch Modification and Nutritional Effects. *Starch - Stärke* **2018**, *70*, doi:10.1002/star.201700145.

12. Miao, M.; Jiang, B.; Cui, S.W.; Zhang, T.; Jin, Z. Slowly Digestible Starch—A Review. *Crit Rev Food Sci Nutr* **2015**, *55*, 1642–1657, doi:10.1080/10408398.2012.704434.
13. Foschia, M.; Beraldo, P.; Peressini, D. Evaluation of the Physicochemical Properties of Gluten-Free Pasta Enriched with Resistant Starch. *J Sci Food Agric* **2017**, *97*, 572–577, doi:10.1002/jsfa.7766.
14. Keenan, M.J.; Janes, M.; Robert, J.; Martin, R.J.; Raggio, A.M.; McCutcheon, K.L.; Pelkman, C.; Tulley, R.; Goita, M.; Durham, H.A.; et al. Resistant Starch from High Amylose Maize (HAM-RS2) Reduces Body Fat and Increases Gut Bacteria in Ovariectomized (OVX) Rats. *Obesity* **2013**, *21*, 981–984, doi:10.1002/oby.20109.
15. Le Leu, R.K.; Hu, Y.; Brown, I.L.; Young, G.P. Effect of High Amylose Maize Starches on Colonic Fermentation and Apoptotic Response to DNA-Damage in the Colon of Rats. *Nutr Metab (Lond)* **2009**, *6*, 11, doi:10.1186/1743-7075-6-11.
16. Wang, Z.; Wang, S.; Xu, Q.; Kong, Q.; Li, F.; Lu, L.; Xu, Y.; Wei, Y. Synthesis and Functions of Resistant Starch. *Advances in Nutrition* **2023**, *14*, 1131–1144, doi:10.1016/j.advnut.2023.06.001.
17. Gutiérrez, T.J.; Tovar, J. Update of the Concept of Type 5 Resistant Starch (RS5): Self-Assembled Starch V-Type Complexes. *Trends Food Sci Technol* **2021**, *109*, 711–724, doi:10.1016/j.tifs.2021.01.078.
18. Astina, J.; Sapwarobol, S. Resistant Maltodextrin and Metabolic Syndrome: A Review. *J Am Coll Nutr* **2019**, *38*, 380–385, doi:10.1080/07315724.2018.1523028.
19. Lochocka, K.; Bajerska, J.; Glapa, A.; Fidler-Witon, E.; Nowak, J.K.; Szczapa, T.; Grebowiec, P.; Lisowska, A.; Walkowiak, J. Green Tea Extract Decreases Starch Digestion and Absorption from a Test Meal in Humans: A Randomized, Placebo-Controlled Crossover Study. *Sci Rep* **2015**, *5*, doi:10.1038/srep12015.
20. Oyeyinka, S.A.; Akintayo, O.A.; Adebo, O.A.; Kayitesi, E.; Njobeh, P.B. A Review on the Physicochemical Properties of Starches Modified by Microwave Alone and in Combination with Other Methods. *Int J Biol Macromol* **2021**, *176*, 87–95, doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.02.066.
21. Fonseca, L.M.; Halal, S.L.M. El; Dias, A.R.G.; Zavareze, E. da R. Physical Modification of Starch by Heat-Moisture Treatment and Annealing and Their Applications: A Review. *Carbohydr Polym* **2021**, *274*, 118665, doi:10.1016/j.carbpol.2021.118665.

22. Rojas-Molina, I.; Mendoza-Avila, M.; Cornejo-Villegas, M. de los Á.; Real-López, A. Del; Rivera-Muñoz, E.; Rodríguez-García, M.; Gutiérrez-Cortez, E. Physicochemical Properties and Resistant Starch Content of Corn Tortilla Flours Refrigerated at Different Storage Times. *Foods* **2020**, *9*, 469, doi:10.3390/foods9040469.
23. BeMiller, J.N. Physical Modification of Starch. In *Starch in Food*; Elsevier, 2018; pp. 223–253.
24. Huang, H.-W.; Hsu, C.-P.; Wang, C.-Y. Healthy Expectations of High Hydrostatic Pressure Treatment in Food Processing Industry. *J Food Drug Anal* **2020**, *28*, 1–13, doi:10.1016/j.jfda.2019.10.002.
25. Jiang, F.; Du, C.; Jiang, W.; Wang, L.; Du, S. The Preparation, Formation, Fermentability, and Applications of Resistant Starch. *Int J Biol Macromol* **2020**, *150*, 1155–1161, doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.10.124.
26. Patterson, M.A.; Maiya, M.; Stewart, M.L. Resistant Starch Content in Foods Commonly Consumed in the United States: A Narrative Review. *J Acad Nutr Diet* **2020**, *120*, 230–244, doi:10.1016/j.jand.2019.10.019.
27. Bojarczuk, A.; Skapska, S.; Mousavi Khaneghah, A.; Marszałek, K. Health Benefits of Resistant Starch: A Review of the Literature. *J Funct Foods* **2022**, *93*, 105094, doi:10.1016/j.jff.2022.105094.
28. Wani, A.A.; Singh, P.; Shah, M.A.; Schweiggert-Weisz, U.; Gul, K.; Wani, I.A. Rice Starch Diversity: Effects on Structural, Morphological, Thermal, and Physicochemical Properties—A Review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* **2012**, *11*, 417–436, doi:10.1111/j.1541-4337.2012.00193.x.
29. YAMAGUCHI, Y.; OKAWA, Y.; NINOMIYA, K.; KUMAGAI, H.; KUMAGAI, H. Evaluation and Suppression of Retrogradation of Gelatinized Rice Starch. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)* **2019**, *65*, S134–S138, doi:10.3177/jnsv.65.S134.
30. Pandolfo, A.; Messina, B.; Russo, G. Evaluation of Glycemic Index of Six Different Samples of Commercial and Experimental Pasta Differing in Wheat Varieties and Production Processes. *Foods* **2021**, *10*, 2221, doi:10.3390/foods10092221.
31. Leite, T.S.; de Jesus, A.L.T.; Schmieles, M.; Tribst, A.A.L.; Cristianini, M. High Pressure Processing (HPP) of Pea Starch: Effect on the Gelatinization Properties. *LWT - Food Science and Technology* **2017**, *76*, 361–369, doi:10.1016/j.lwt.2016.07.036.

32. Pugh, J.E.; Cai, M.; Altieri, N.; Frost, G. A Comparison of the Effects of Resistant Starch Types on Glycemic Response in Individuals with Type 2 Diabetes or Prediabetes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Nutr* **2023**, *10*, doi:10.3389/fnut.2023.1118229.
33. Xiong, K.; Wang, J.; Kang, T.; Xu, F.; Ma, A. Effects of Resistant Starch on Glycaemic Control: A Systematic Review and Meta-Analysis. *British Journal of Nutrition* **2021**, *125*, 1260–1269, doi:10.1017/S0007114520003700.
34. Gao, C.; Rao, M.; Huang, W.; Wan, Q.; Yan, P.; Long, Y.; Guo, M.; Xu, Y.; Xu, Y. Resistant Starch Ameliorated Insulin Resistant in Patients of Type 2 Diabetes with Obesity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Lipids Health Dis* **2019**, *18*, 205, doi:10.1186/s12944-019-1127-z.
35. Snelson, M.; Jong, J.; Manolas, D.; Kok, S.; Louise, A.; Stern, R.; Kellow, N.J. Metabolic Effects of Resistant Starch Type 2: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients* **2019**, *11*, 1833, doi:10.3390/nu11081833.
36. Wang, Y.; Chen, J.; Song, Y.-H.; Zhao, R.; Xia, L.; Chen, Y.; Cui, Y.-P.; Rao, Z.-Y.; Zhou, Y.; Zhuang, W.; et al. Effects of the Resistant Starch on Glucose, Insulin, Insulin Resistance, and Lipid Parameters in Overweight or Obese Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutr Diabetes* **2019**, *9*, 19, doi:10.1038/s41387-019-0086-9.
37. Yuan, H.C.; Meng, Y.; Bai, H.; Shen, D.Q.; Wan, B.C.; Chen, L.Y. Meta-Analysis Indicates That Resistant Starch Lowers Serum Total Cholesterol and Low-Density Cholesterol. *Nutrition Research* **2018**, *54*, 1–11, doi:10.1016/j.nutres.2018.02.008.
38. Halajzadeh, J.; Milajerdi, A.; Reiner, Ž.; Amirani, E.; Kolahdooz, F.; Barekat, M.; Mirzaei, H.; Mirhashemi, S.M.; Asemi, Z. Effects of Resistant Starch on Glycemic Control, Serum Lipoproteins and Systemic Inflammation in Patients with Metabolic Syndrome and Related Disorders: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Clinical Trials. *Crit Rev Food Sci Nutr* **2020**, *60*, 3172–3184, doi:10.1080/10408398.2019.1680950.
39. Chang, R.; Jin, Z.; Lu, H.; Qiu, L.; Sun, C.; Tian, Y. Type III Resistant Starch Prepared from Debranched Starch: Structural Changes under Simulated Saliva, Gastric, and Intestinal Conditions and the Impact on Short-Chain Fatty Acid Production. *J Agric Food Chem* **2021**, *69*, 2595–2602, doi:10.1021/acs.jafc.0c07664.

40. Maier, T. V.; Lucio, M.; Lee, L.H.; Verberkmoes, N.C.; Brislawn, C.J.; Bernhardt, J.; Lamendella, R.; McDermott, J.E.; Bergeron, N.; Heinzmann, S.S.; et al. Impact of Dietary Resistant Starch on the Human Gut Microbiome, Metaproteome, and Metabolome. *mBio* **2017**, *8*, doi:10.1128/mBio.01343-17.
41. Sobh, M.; Montroy, J.; Daham, Z.; Sibbald, S.; Lalu, M.; Stintzi, A.; Mack, D.; Fergusson, D.A. Tolerability and SCFA Production after Resistant Starch Supplementation in Humans: A Systematic Review of Randomized Controlled Studies. *Am J Clin Nutr* **2022**, *115*, 608–618, doi:10.1093/ajcn/nqab402.
42. Chen, R.; Zhang, C.; Xu, F.; Yu, L.; Tian, F.; Chen, W.; Zhai, Q. Meta-Analysis Reveals Gut Microbiome and Functional Pathway Alterations in Response to Resistant Starch. *Food Funct* **2023**, *14*, 5251–5263, doi:10.1039/D3FO00845B.
43. Shen, D.; Bai, H.; Li, Z.; Yu, Y.; Zhang, H.; Chen, L. Positive Effects of Resistant Starch Supplementation on Bowel Function in Healthy Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Int J Food Sci Nutr* **2017**, *68*, 149–157, doi:10.1080/09637486.2016.1226275.
44. Watanabe, N.; Suzuki, M.; Yamaguchi, Y.; Egashira, Y. Effects of Resistant Maltodextrin on Bowel Movements: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Clin Exp Gastroenterol* **2018**, *Volume 11*, 85–96, doi:10.2147/CEG.S153924.
45. Ni, Y.; Qian, L.; Siliceo, S.L.; Long, X.; Nychas, E.; Liu, Y.; Ismaiah, M.J.; Leung, H.; Zhang, L.; Gao, Q.; et al. Resistant Starch Decreases Intrahepatic Triglycerides in Patients with NAFLD via Gut Microbiome Alterations. *Cell Metab* **2023**, *35*, 1530-1547.e8, doi:10.1016/j.cmet.2023.08.002.
46. Baghurst, K.I.; Baghurst, P.A.; Record, S.J. Dietary Fiber, Nonstarch Polysaccharide, and Resistant Starch Intakes in Australia. In *CRC Handbook of Dietary Fiber in Human Nutrition, Third Edition*; 2001.
47. Muir, J.G.; Walker, K.Z.; Kaimakamis, M.A.; Cameron, M.A.; Govers, M.J.A.P.; Lu, Z.X.; Young, G.P.; O’Dea, K. Modulation of Fecal Markers Relevant to Colon Cancer Risk: A High- Starch Chinese Diet Did Not Generate Expected Beneficial Changes Relative to a Western-Type Diet. *American Journal of Clinical Nutrition* **1998**, *68*, 372–379, doi:10.1093/ajcn/68.2.372.
48. Platel, K.; Shurpalekar, K.S. Resistant Starch Content of Indian Foods. *Plant Foods for Human Nutrition* **1994**, *45*, 91–95, doi:10.1007/BF01091233.

49. Tomlin, J.; Read, N.W. The Effect of Resistant Starch on Colon Function in Humans. *British Journal of Nutrition* **1990**, *64*, 589–595, doi:10.1079/BJN19900058.
50. Dodevska, M.S.; Sobajic, S.S.; Djordjevic, P.B.; Dimitrijevic-Sreckovic, V.S.; Spasojevic-Kalimanovska, V. V.; Djordjevic, B.I. Effects of Total Fibre or Resistant Starch-Rich Diets within Lifestyle Intervention in Obese Prediabetic Adults. *Eur J Nutr* **2016**, *55*, 127–137, doi:10.1007/s00394-015-0831-3.
51. Birt, D.F.; Boylston, T.; Hendrich, S.; Jane, J.L.; Hollis, J.; Li, L.; McClelland, J.; Moore, S.; Phillips, G.J.; Rowling, M.; et al. Resistant Starch: Promise for Improving Human Health. *Advances in Nutrition* **2013**, *4*, 587–601.
52. Ashwar, B.A.; Gani, A.; Shah, A.; Wani, I.A.; Masoodi, F.A. Preparation, Health Benefits and Applications of Resistant Starch - A Review. *Starch/Staerke* **2016**, *68*, 287–301.
53. Miketinas, D.C.; Shankar, K.; Maiya, M.; Patterson, M.A. Usual Dietary Intake of Resistant Starch in US Adults from NHANES 2015–2016. *J Nutr* **2020**, *150*, 2738–2747, doi:10.1093/jn/nxaa232.
54. Murphy, M.M.; Douglass, J.S.; Birkett, A. Resistant Starch Intakes in the United States. *J Am Diet Assoc* **2008**, *108*, 67–78, doi:10.1016/j.jada.2007.10.012.
55. Behall, K.M. Consumption of Both Resistant Starch and α -Glucan Improves Postprandial Plasma Glucose and Insulin in Women. *Diabetes Care* **2006**, *29*, 976–981, doi:10.2337/diacare.295976.
56. Fuentes-Zaragoza, E.; Sánchez-Zapata, E.; Sendra, E.; Sayas, E.; Navarro, C.; Fernández-López, J.; Pérez-Alvarez, J.A. Resistant Starch as Prebiotic: A Review. *Starch/Staerke* **2011**, *63*, 406–415.
57. Patterson, M.A.; Maiya, M.; Stewart, M.L. Resistant Starch Content in Foods Commonly Consumed in the United States: A Narrative Review. *J Acad Nutr Diet* **2020**, *120*, 230–244, doi:10.1016/j.jand.2019.10.019.
58. Roman, L.; Martinez, M.M. Structural Basis of Resistant Starch (RS) in Bread: Natural and Commercial Alternatives. *Foods* **2019**, *8*, 267, doi:10.3390/foods8070267.
59. Shen, L.; Li, J.; Li, Y. Resistant Starch Formation in Rice: Genetic Regulation and Beyond. *Plant Commun* **2022**, *3*, 100329, doi:10.1016/j.xplc.2022.100329.
60. Hallström, E.; Sestili, F.; Lafiandra, D.; Björck, I.; Östman, E. A Novel Wheat Variety with Elevated Content of Amylose Increases Resistant Starch Formation

- and May Beneficially Influence Glycaemia in Healthy Subjects. *Food Nutr Res* **2011**, *55*, 7074, doi:10.3402/fnr.v55i0.7074.
61. Maina, N.H.; Rieder, A.; De Bondt, Y.; Mäkelä-Salmi, N.; Sahlstrøm, S.; Mattila, O.; Lamothe, L.M.; Nyström, L.; Courtin, C.M.; Katina, K.; et al. Process-Induced Changes in the Quantity and Characteristics of Grain Dietary Fiber. *Foods* **2021**, *10*, 2566, doi:10.3390/foods10112566.
 62. Zenel, A.; Stewart, M. High Amylose White Rice Reduces Post-Prandial Glycemic Response but Not Appetite in Humans. *Nutrients* **2015**, *7*, 5362–5374, doi:10.3390/nu7075225.
 63. Belobrajdic, D.P.; Regina, A.; Klingner, B.; Zajac, I.; Chapron, S.; Berbezy, P.; Bird, A.R. High-Amylose Wheat Lowers the Postprandial Glycemic Response to Bread in Healthy Adults: A Randomized Controlled Crossover Trial. *J Nutr* **2019**, *149*, 1335–1345, doi:10.1093/jn/nxz067.
 64. Delcour, J.A.; Bruneel, C.; Derde, L.J.; Gomand, S. V.; Pareyt, B.; Putseys, J.A.; Wilderjans, E.; Lamberts, L. Fate of Starch in Food Processing: From Raw Materials to Final Food Products. *Annu Rev Food Sci Technol* **2010**, *1*, 87–111, doi:10.1146/annurev.food.102308.124211.
 65. Alsaffar, A.A. Effect of Food Processing on the Resistant Starch Content of Cereals and Cereal Products – a Review. *Int J Food Sci Technol* **2011**, *46*, 455–462, doi:10.1111/j.1365-2621.2010.02529.x.
 66. Fuentes-Zaragoza, E.; Riquelme-Navarrete, M.J.; Sánchez-Zapata, E.; Pérez-Álvarez, J.A. Resistant Starch as Functional Ingredient: A Review. *Food Research International* **2010**, *43*, 931–942, doi:10.1016/j.foodres.2010.02.004.
 67. Bilbao-Sáinz, C.; Butler, M.; Weaver, T.; Bent, J. Wheat Starch Gelatinization under Microwave Irradiation and Conduction Heating. *Carbohydr Polym* **2007**, *69*, 224–232, doi:10.1016/j.carbpol.2006.09.026.
 68. Cheng, Z.; Li, J.; Qiao, D.; Wang, L.; Zhao, S.; Zhang, B. Microwave Reheating Enriches Resistant Starch in Cold-Chain Cooked Rice: A View of Structural Alterations during Digestion. *Int J Biol Macromol* **2022**, *208*, 80–87, doi:10.1016/j.ijbiomac.2022.03.034.
 69. Liu, T.; Zhang, B.; Wang, L.; Zhao, S.; Qiao, D.; Zhang, L.; Xie, F. Microwave Reheating Increases the Resistant Starch Content in Cooked Rice with High Water Contents. *Int J Biol Macromol* **2021**, *184*, 804–811, doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.06.136.

70. Peng, Z.; Cheng, L.; Meng, K.; Shen, Y.; Wu, D.; Shu, X. Retaining a Large Amount of Resistant Starch in Cooked Potato through Microwave Heating after Freeze-Drying. *Curr Res Food Sci* **2022**, *5*, 1660–1667, doi:10.1016/j.crfs.2022.09.023.
71. Tian, Y.; Li, M.; Tang, A.; Jane, J.-L.; Dhital, S.; Guo, B. RS Content and EGI Value of Cooked Noodles (I): Effect of Cooking Methods. *Foods* **2020**, *9*, 328, doi:10.3390/foods9030328.
72. Isra, M.; Andrianto, D.; Setiarto, R.H.B. Effect of Microwave Heat Treatment for Resistant Starch Levels and Prebiotic Properties of High Carbohydrate Foods: Meta-Analysis Study. *Chiang Mai University Journal of Natural Sciences* **2022**, *21*, doi:10.12982/CMUJNS.2022.032.
73. Åkerberg, A.; Liljeberg, H.; Björck, I. Effects of Amylose/Amylopectin Ratio and Baking Conditions on Resistant Starch Formation and Glycaemic Indices. *J Cereal Sci* **1998**, *28*, 71–80, doi:10.1006/jcers.1997.0173.
74. Amaral, O.; Guerreiro, C.S.; Gomes, A.; Cravo, M. Resistant Starch Production in Wheat Bread: Effect of Ingredients, Baking Conditions and Storage. *European Food Research and Technology* **2016**, *242*, 1747–1753, doi:10.1007/s00217-016-2674-4.
75. Ubwa, S.T.; Abah, J.; Asemave, K.; Shambe, T. Studies on the Gelatinization Temperature of Some Cereal Starches. *Int J Chem* **2012**, *4*, doi:10.5539/ijc.v4n6p22.
76. Sun, Y.; Qin, R.; Zeng, J.; Li, G. Effect of Heat–Moisture Treatment on the Structure and Digestibility of Sweet Potato Starch. *Foods* **2023**, *12*, 3076, doi:10.3390/foods12163076.
77. Lee, C.-S.; Chung, H.-J. Enhancing Resistant Starch Content of High Amylose Rice Starch through Heat–Moisture Treatment for Industrial Application. *Molecules* **2022**, *27*, 6375, doi:10.3390/molecules27196375.
78. Li, Z.; Guo, D.; Li, X.; Tang, Z.; Ling, X.; Zhou, T.; Zhang, B. Heat-Moisture Treatment Further Reduces In Vitro Digestibility and Enhances Resistant Starch Content of a High-Resistant Starch and Low-Glutelin Rice. *Foods* **2021**, *10*, 2562, doi:10.3390/foods10112562.
79. Zheng, B.; Zhong, S.; Tang, Y.; Chen, L. Understanding the Nutritional Functions of Thermally-Processed Whole Grain Highland Barley in Vitro and in Vivo. *Food Chem* **2020**, *310*, 125979, doi:10.1016/j.foodchem.2019.125979.

80. Ma, Z.; Boye, J.I. Research Advances on Structural Characterization of Resistant Starch and Its Structure-Physiological Function Relationship: A Review. *Crit Rev Food Sci Nutr* **2018**, *58*, 1059–1083, doi:10.1080/10408398.2016.1230537.
81. Faridah, D.N.; Silitonga, R.F.; Indrasti, D.; Afandi, F.A.; Jayanegara, A.; Anugerah, M.P. Verification of Autoclaving-Cooling Treatment to Increase the Resistant Starch Contents in Food Starches Based on Meta-Analysis Result. *Front Nutr* **2022**, *9*, doi:10.3389/fnut.2022.904700.
82. Yordanov, D.G.; Angelova, G.V. High Pressure Processing for Foods Preserving. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* **2010**, *24*, 1940–1945, doi:10.2478/V10133-010-0057-8.
83. Ahmed, J.; Al-Attar, H. Structural Properties of High-Pressure-Treated Chestnut Flour Dispersions. *Int J Food Prop* **2017**, *20*, S766–S778, doi:10.1080/10942912.2017.1311343.
84. Ahmed, J.; Thomas, L.; Arfat, Y.A.; Joseph, A. Rheological, Structural and Functional Properties of High-Pressure Treated Quinoa Starch in Dispersions. *Carbohydr Polym* **2018**, *197*, 649–657, doi:10.1016/j.carbpol.2018.05.081.
85. Liu, H.; Guo, X.; Li, Y.; Li, H.; Fan, H.; Wang, M. In Vitro Digestibility and Changes in Physicochemical and Textural Properties of Tartary Buckwheat Starch under High Hydrostatic Pressure. *J Food Eng* **2016**, *189*, 64–71, doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.05.015.
86. Liu, H.; Wang, L.; Cao, R.; Fan, H.; Wang, M. In Vitro Digestibility and Changes in Physicochemical and Structural Properties of Common Buckwheat Starch Affected by High Hydrostatic Pressure. *Carbohydr Polym* **2016**, *144*, 1–8, doi:10.1016/j.carbpol.2016.02.028.
87. Ahmed, J.; Thomas, L.; Taher, A.; Joseph, A. Impact of High Pressure Treatment on Functional, Rheological, Pasting, and Structural Properties of Lentil Starch Dispersions. *Carbohydr Polym* **2016**, *152*, 639–647, doi:10.1016/j.carbpol.2016.07.008.
88. Deng, Y.; Jin, Y.; Luo, Y.; Zhong, Y.; Yue, J.; Song, X.; Zhao, Y. Impact of Continuous or Cycle High Hydrostatic Pressure on the Ultrastructure and Digestibility of Rice Starch Granules. *J Cereal Sci* **2014**, *60*, 302–310, doi:10.1016/j.jcs.2014.06.005.
89. Briones-Labarca, V.; Venegas-Cubillos, G.; Ortiz-Portilla, S.; Chacana-Ojeda, M.; Maureira, H. Effects of High Hydrostatic Pressure (HHP) on Bioaccessibility, as

- Well as Antioxidant Activity, Mineral and Starch Contents in Granny Smith Apple. *Food Chem* **2011**, *128*, 520–529, doi:10.1016/j.foodchem.2011.03.074.
90. Briones-Labarca, V.; Muñoz, C.; Maureira, H. Effect of High Hydrostatic Pressure on Antioxidant Capacity, Mineral and Starch Bioaccessibility of a Non Conventional Food: Prosopis Chilensis Seed. *Food Research International* **2011**, *44*, 875–883, doi:10.1016/j.foodres.2011.01.013.
 91. Demirkesen-Bicak, H.; Arici, M.; Yaman, M.; Karasu, S.; Sagdic, O. Effect of Different Fermentation Condition on Estimated Glycemic Index, In Vitro Starch Digestibility, and Textural and Sensory Properties of Sourdough Bread. *Foods* **2021**, *10*, 514, doi:10.3390/foods10030514.
 92. Teixeira, C.; Nyman, M.; Andersson, R.; Alminger, M. Effects of Variety and Steeping Conditions on Some Barley Components Associated with Colonic Health. *J Sci Food Agric* **2016**, *96*, 4821–4827, doi:10.1002/jsfa.7923.
 93. Shumoy, H.; Van Bockstaele, F.; Devecioglu, D.; Raes, K. Effect of Sourdough Addition and Storage Time on in Vitro Starch Digestibility and Estimated Glycemic Index of Tef Bread. *Food Chem* **2018**, *264*, 34–40, doi:10.1016/j.foodchem.2018.05.019.
 94. Mihhalevski, A.; Heinmaa, I.; Traksmäa, R.; Pehk, T.; Mere, A.; Paalme, T. Structural Changes of Starch during Baking and Staling of Rye Bread. *J Agric Food Chem* **2012**, *60*, 8492–8500, doi:10.1021/jf3021877.
 95. Sullivan, W.R.; Hughes, J.G.; Cockman, R.W.; Small, D.M. The Effects of Temperature on the Crystalline Properties and Resistant Starch during Storage of White Bread. *Food Chem* **2017**, *228*, 57–61, doi:10.1016/j.foodchem.2017.01.140.
 96. Sonia, S.; Witjaksono, F.; Ridwan, R. Effect of Cooling of Cooked White Rice on Resistant Starch Content and Glycemic Response. *Asia Pac J Clin Nutr* **2015**, *24*, 620–625, doi:10.6133/apjcn.2015.24.4.13.
 97. Strozyk, S.; Rogowicz-Frontczak, A.; Pilacinski, S.; LeThanh-Blicharz, J.; Koperska, A.; Zozulinska-Ziolkiewicz, D. Influence of Resistant Starch Resulting from the Cooling of Rice on Postprandial Glycemia in Type 1 Diabetes. *Nutr Diabetes* **2022**, *12*, 21, doi:10.1038/s41387-022-00196-1.
 98. Chiu YT, S.M. Effect of Variety and Cooking Method on Resistant Starch Content of White Rice and Subsequent Postprandial Glucose Response and Appetite in Humans. *Asia Pac J Nutr.* **2013**, *22*, 372–379.

99. Harris, K.F. An Introductory Review of Resistant Starch Type 2 from High-Amylose Cereal Grains and Its Effect on Glucose and Insulin Homeostasis. *Nutr Rev* **2019**, *77*, 748–764, doi:10.1093/nutrit/nuz040.
100. Manning, S.; Batterham, R.L. The Role of Gut Hormone Peptide YY in Energy and Glucose Homeostasis: Twelve Years On. *Annu Rev Physiol* **2014**, *76*, 585–608.
101. Barclay, A.W.; Augustin, L.S.A.; Brighenti, F.; Delport, E.; Henry, C.J.; Sievenpiper, J.L.; Usic, K.; Yuexin, Y.; Zurbau, A.; Wolever, T.M.S.; et al. Dietary Glycaemic Index Labelling: A Global Perspective. *Nutrients* **2021**, *13*, 3244, doi:10.3390/nu13093244.
102. Mathobo, V.M.; Silungwe, H.; Ramashia, S.E.; Anyasi, T.A. Effects of Heat-Moisture Treatment on the Thermal, Functional Properties and Composition of Cereal, Legume and Tuber Starches—a Review. *J Food Sci Technol* **2021**, *58*, 412–426, doi:10.1007/s13197-020-04520-4.
103. Punia, S. Barley Starch Modifications: Physical, Chemical and Enzymatic - A Review. *Int J Biol Macromol* **2020**, *144*, 578–585, doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.12.088.
104. Pottier, L.; Villamonte, G.; de Lamballerie, M. Applications of High Pressure for Healthier Foods. *Curr Opin Food Sci* **2017**, *16*, 21–27, doi:10.1016/j.cofs.2017.06.009.
105. Andrés, V.; Mateo-Vivaracho, L.; Guillamón, E.; Villanueva, M.J.; Tenorio, M.D. High Hydrostatic Pressure Treatment and Storage of Soy-Smoothies: Colour, Bioactive Compounds and Antioxidant Capacity. *LWT - Food Science and Technology* **2016**, *69*, 123–130, doi:10.1016/j.lwt.2016.01.033.
106. Paciulli, M.; Medina-Meza, I.G.; Chiavaro, E.; Barbosa-Cánovas, G.V. Impact of Thermal and High Pressure Processing on Quality Parameters of Beetroot (*Beta Vulgaris* L.). *LWT - Food Science and Technology* **2016**, *68*, 98–104, doi:10.1016/j.lwt.2015.12.029.
107. *Sustainable Healthy Diets*; FAO and WHO, 2019; ISBN 978-92-5-131875-1.
108. Brighenti, F.; Casiraghi, M.C.; Baggio, C. Resistant Starch in the Italian Diet*. *British Journal Of Nutrition* **1998**, *80*, 333–341, doi:10.1079/096582198388283.
109. García-Alonso, A.; Goñi, I. Effect of Processing on Potato Starch: In Vitro Availability and Glycaemic Index. *Nahrung/Food* **2000**, *44*, 19–22, doi:10.1002/(SICI)1521-3803(20000101)44:1<19::AID-FOOD19>3.0.CO;2-E.

110. Kingman, S.M.; Englyst, H.N. The Influence of Food Preparation Methods on the In-Vitro Digestibility of Starch in Potatoes. *Food Chem* **1994**, *49*, 181–186, doi:10.1016/0308-8146(94)90156-2.
111. Åkerberg, A.K.E.; Liljeberg, H.G.M.; Granfeldt, Y.E.; Drews, A.W.; Björck, I.M.E. An In Vitro Method, Based on Chewing, To Predict Resistant Starch Content in Foods Allows Parallel Determination of Potentially Available Starch and Dietary Fiber. *J Nutr* **1998**, *128*, 651–660, doi:10.1093/jn/128.3.651.
112. Rosin, P.M.; Lajolo, F.M.; Menezes, E.W. Measurement and Characterization of Dietary Starches. *Journal of Food Composition and Analysis* **2002**, *15*, 367–377, doi:10.1006/jfca.2002.1084.
113. Saura-Calixto, F.; García-Alonso, A.; Goñi, I.; Bravo, L. In Vitro Determination of the Indigestible Fraction in Foods: An Alternative to Dietary Fiber Analysis. *J Agric Food Chem* **2000**, *48*, 3342–3347, doi:10.1021/jf0000373.
114. Liljeberg Elmståhl, H. Resistant Starch Content in a Selection of Starchy Foods on the Swedish Market. *Eur J Clin Nutr* **2002**, *56*, 500–505, doi:10.1038/sj.ejcn.1601338.
115. Muir, J.G.; O'Dea, K. Measurement of Resistant Starch: Factors Affecting the Amount of Starch Escaping Digestion in Vitro. *American Journal of Clinical Nutrition* **1992**, *56*, 123–127, doi:10.1093/ajcn/56.1.123.
116. Silvester, K.; Englyst, H.; Cummings, J. Ileal Recovery of Starch from Whole Diets Containing Resistant Starch Measured in Vitro and Fermentation of Ileal Effluent. *Am J Clin Nutr* **1995**, *62*, 403–411, doi:10.1093/ajcn/62.2.403.
117. Gormley, R.; Walshe, T. Effects of Boiling, Warm-holding, Mashing and Cooling on the Levels of Enzyme-resistant Potato Starch. *Int J Food Sci Technol* **1999**, *34*, 281–286, doi:10.1046/j.1365-2621.1999.00270.x.
118. Leeman, M.; Östman, E.; Björck, I. Vinegar Dressing and Cold Storage of Potatoes Lowers Postprandial Glycaemic and Insulinaemic Responses in Healthy Subjects. *Eur J Clin Nutr* **2005**, *59*, 1266–1271, doi:10.1038/sj.ejcn.1602238.
119. Leeman, A.M.; Bårström, L.M.; Björck, I.M. In Vitro Availability of Starch in Heat-treated Potatoes as Related to Genotype, Weight and Storage Time. *J Sci Food Agric* **2005**, *85*, 751–756, doi:10.1002/jsfa.2035.
120. Borczak, B.; Sikora, E.; Sikora, M.; Baranska, G.; Kapusta-Duch, J.; Kutyla-Kupidura, E. Wpływ Obróbki Kulinarnej Na Wskaźnik Trawienia Oraz Zawartość

Frakcji Żywniowych Skrobi w Ziemniakach Odmiany Lord. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* **2016**, 585.

121. World Health Organization (WHO). *Obesity: Preventing and Managing the Global Epidemic. In Report of a WHO Consultation; Technical Report Series No 894; ;* Geneva, Switzerland, 2000;
122. <https://Bdl.Stat.Gov.Pl/Bdl/Metadane>. Dostęp online:13.07.2024

- **Załącznik nr 1** – Uchwała Nr 5/RKE/2023/U Rektorskiej Komisji ds. Etyki Badań z Udziałem Człowieka SGGW; „**Ocena wpływu spożycia posiłków testowych z ciecierzycy na glikemię poposiłkową u osób zdrowych – projekt badawczy**”.
- **Załącznik nr 2** - Uchwała Nr 6/RKE/2023/U Rektorskiej Komisji ds. Etyki Badań z Udziałem Człowieka SGGW; „**Ocena spożycia skrobi odpornej wśród dorosłych Polaków. Badanie ankietowe**”.
- **Załącznik nr 3** - Kopia publikacji **P1**: Health benefits of resistant starch: a review of the literature
- **Załącznik nr 3a** - Oświadczenia współautorów publikacji **P1**
- **Załącznik nr 4** – Kopia publikacji **P2**: Application of High Hydrostatic Pressures and Refrigerated Storage on the Content of Resistant Starch in Selected Legume Seeds
- **Załącznik nr 4a** - Oświadczenia współautorów publikacji **P2**
- **Załącznik nr 5** – Kopia publikacji **P3**: Effect of cooking and cooling chickpea pasta on resistant starch content, glycemic response and glycemic index in healthy adults
- **Załącznik nr 5a** - Oświadczenia współautorów publikacji **P3**

**Załącznik nr 1 - Uchwała Nr 5/RKE/2023/U Rektorskiej Komisji ds. Etyki Badań z
Udziałem Człowieka SGGW; „Ocena wpływu spożycia posiłków testowych z
ciecierzycy na glikemię poposiłkową u osób zdrowych – projekt badawczy”.**

Uchwała Nr 5/RKE/2023/U
Rektorskiej Komisji ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka SGGW
z dnia 30 stycznia 2023 roku
w sprawie dokonania oceny projektu badania naukowego pt.
Ocena wpływu spożycia posiłków testowych z ciecierzycy na glikemię poposiłkową
u osób zdrowych - projekt badawczy
prowadzonego z udziałem człowieka pod względem etycznym i wydania opinii o jego
etycznej dopuszczalności

Po rozpoznaniu wniosku dr Danuty Gajewskiej z dnia 20 grudnia 2022 roku wniosek o nr 4/RKE/2022, działając na podstawie § 8 ust. 1 i § 9 ust. 7 pkt. 1 Regulaminu Rektorskich Komisji ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka, Rektorska Komisja ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka SGGW

wydaje opinię pozytywną o etycznej dopuszczalności

projektu badania naukowego pt. *Ocena wpływu spożycia posiłków testowych z ciecierzycy na glikemię poposiłkową u osób zdrowych - projekt badawczy*

Imię i nazwisko kierownika badania naukowego: dr Danuta Gajewska
Imię i nazwisko wykonawców: dr hab. lek. med. Dariusz Włodarek, prof. SGGW; dr Paulina Kęszczycka; mgr Adrianna Bojarczuk
Miejsce prowadzenia badań/ badania: Katedra Dietetyki, Instytut Nauk o Żywieniu Człowieka, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Czas prowadzenia badań/badania: od daty uzyskania zgody Komisji do dn. 31.12.2024

Uzasadnienie:

Rektorska Komisja ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka SGGW wydała opinię pozytywną o etycznej dopuszczalności projektu badania naukowego pt. *Ocena wpływu spożycia posiłków testowych z ciecierzycy na glikemię poposiłkową u osób zdrowych - projekt badawczy prowadzonego z udziałem człowieka* po dokonaniu oceny wyżej wymienionego projektu pod względem etycznym na podstawie złożonego Wniosku o nr 4/RKE/2022 z dnia 20 grudnia 2022 roku oraz wszelkiej dokumentacji i informacji złożonych przez Wnioskodawcę dr Danutę Gajewską. Wniosek spełnia wymagania formalne i nie narusza zasad etyki w zakresie badań z udziałem ludzi.


.....
Prof. dr hab. Jadwiga Hamułka
Przewodnicząca Rektorskiej Komisji
ds. Etyki Badań Naukowych
z Udziałem Człowieka SGGW

**Załącznik nr 2 - Uchwała Nr 6/RKE/2023/U Rektorskiej Komisji ds. Etyki Badań z
Udziałem Człowieka SGGW; „Ocena spożycia skrobi odpornej wśród dorosłych
Polaków. Badanie ankietowe”.**

Uchwała Nr 6/RKE/2023/U
Rektorskiej Komisji ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka SGGW
z dnia 30 stycznia 2023 roku
w sprawie dokonania oceny projektu badania naukowego pt.
Ocena spożycia skrobi odpornej wśród dorosłych Polaków. Badania ankietowe.
przrowadzonego z udziałem człowieka pod względem etycznym i wydania opinii o jego
etycznej dopuszczalności

Po rozpoznaniu wniosku dr Pauliny Kęszyckiej z dnia 20 grudnia 2022 roku wniosek o nr 5/RKE/2022, działając na podstawie § 8 ust. 1 i § 9 ust. 7 pkt. 1 Regulaminu Rektorskich Komisji ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka, Rektorska Komisja ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka SGGW

wyduje opinię pozytywną o etycznej dopuszczalności

projektu badania naukowego pt. *Ocena spożycia skrobi odpornej wśród dorosłych Polaków.*
Badania ankietowe

Imię i nazwisko kierownika badania naukowego: dr Paulina Kęszycka
Imię i nazwisko wykonawców: dr Danuta Gajewska; mgr Adrianna Bojarczuk
Miejsce prowadzenia badań/ badania: Katedra Dietetyki, Instytut Nauk o Żywieniu Człowieka, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
Czas prowadzenia badań/badania: od daty uzyskania zgody Komisji do dn. 31.12.2024

Uzasadnienie:

Rektorska Komisja ds. Etyki Badań Naukowych z Udziałem Człowieka SGGW wydała opinię pozytywną o etycznej dopuszczalności projektu badania naukowego pt. *Ocena spożycia skrobi odpornej wśród dorosłych Polaków. Badania ankietowe* prowadzonego z udziałem człowieka, po dokonaniu oceny wyżej wymienionego projektu pod względem etycznym na podstawie złożonego Wniosku o nr 5/RKE/2022 z dnia 20 grudnia 2022 roku oraz wszelkiej dokumentacji i informacji złożonych przez Wnioskodawcę dr Paulinę Kęszycką. Wniosek spełnia wymagania formalne i nie narusza zasad etyki w zakresie badań z udziałem ludzi.


.....
Prof. dr hab. Jadwiga Hamulka
Przewodnicząca Rektorskiej Komisji
ds. Etyki Badań Naukowych
z Udziałem Człowieka SGGW

Załącznik 3 - Kopia publikacji **P1**: Health benefits of resistant starch: a review of the literature – na kolejnej stronie

Załącznik 3a - Oświadczenia współautorów publikacji **P1** – na kolejnej stronie

Załącznik nr 4 – Kopia publikacji **P2:** Application of High Hydrostatic Pressures and Refrigerated Storage on the Content of Resistant Starch in Selected Legume Seeds –
na kolejnej stronie

Załącznik 4a - Oświadczenia współautorów publikacji P2 – na kolejnej stronie

Załącznik nr 5 – Kopia publikacji **P3** - Effect of cooking and cooling chickpea pasta on resistant starch content, glycemic response and glycemic index in healthy adults - na kolejnej stronie

Załącznik nr 5a - Oświadczenia współautorów publikacji P3