

Jerzy Jamroz

Katedra Biologicznych Podstaw Technologii Żywności i Pasz AR w Lublinie,

Jerzy Rogalski

Zakład Biochemii UMCS

Determinanty wartości żywieniowej ekstrudatów

381

Wstęp

Proces obróbki surowców metodą ekstruzji uważany jest za powszechnie stosowaną przemysłową technologię wytwarzania wielu produktów żywnościowych oraz pasz. Ekstruzja umożliwia modyfikację składników żywności oraz wpływa na ich teksturyzację [2, 10, 24].

Proces ekstruzji realizowany jest w ekstruderze. Urządzenie to można zdefiniować jako ciągle pracujący reaktor chemiczny, przetwarzający biopolimery i mieszanki żywnościowe w wysokich temperaturach (nawet do 250°C), relatywnie krótkim czasem retencji (ok. 1–2minut), przy wysokich ciśnieniach (do 25 MPa) i dużych siłach ścinania oraz w większości przypadków przy względnie niskich zawartościach wody (poniżej 30%). Nowoczesne konstrukcje ekstruderów 2-ślimakowych (do przetwarzania mięsa, emulsyfikacji i żelowania produktów mleczarskich, produkcji pasz) umożliwiają przeprowadzenie procesu przy dużych wilgotnościach wsadu (40–80% zawartości wody)[33, 38, 52].

Ekstruzja nie jest operacją jednostkową. Jej specyfiką (w porównaniu do innych metod obróbki termicznej lub opartych na HTST) jest szeroki zakres zastosowań zależny od ilości mechanicznych i termicznych cykli obróbki, które zachodzą wzdłuż ślimaka i cylindra, dużych sił ścinania oraz ciśnienia wywieranego na mieszankę żywnościową (zależnego od szybkości obrotów ślimaka). Geometria ekstrudera, warunki procesu i skład mieszanki żywnościowej współdziałają w wytworzeniu zmian fizykochemicznych oraz wartości odżywczej produktu. Wzajemne oddziaływanie tak wielu czynników powoduje, że trudno jest odnieść zmiany chemiczne lub zmiany wartości odżywczej do jakiegokolwiek pojedynczego czynnika [8, 21, 30].

Nowe ekstrudery (o znacznej długości cylindra) są wyposażone w otwory z możliwością zadawania płynów i ciał stałych. W kolejnych strefach segmentów ślimaka są umieszczone czujniki temperatury, ciśnienia i tarcia. Znany czas retencji mieszanki w poszczególnych strefach ekstrudera, przy znajomości wartości parametrów technologicznych, pozwala śledzić kolejne przemiany składników pokarmowych.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono korzystny i destrukcyjny wpływ procesów ekstruzji na zmiany właściwości podstawowych składników pokarmowych. Zachowanie wartości odżywczej jest niewątpliwie bardzo ważnym problemem w produkcji żywności komplementarnej lub specjalnej (produkty dla niemowląt, zamienniki mięsa, żywność dietetyczna) (tab. 1).

Stosowane skróty

RT — czas retencji mieszanki żywnościowej w ekstruderze, RPM — obroty ślimaka na min, TVP — teksturowane białko roślinne, HTST — wysoka temperatura, krótki czas, NPU — współczynnik wykorzystania białko netto, PER — wskaźnik wydajności wzrostowej białka, NSI — wskaźnik rozpuszczalności substancji azotowych, FDNB-lizyna — związanie wolnej ϵ -aminowej grupy aminokwasu z 1-fluoro,2,4-dwunitrobenzenem (FDNB), dotyczy pomiaru przyswajalnej lizyny metodą opracowaną przez Carpentera.

Białko

Substancje białkowe, spośród innych znanych biopolimerów, są najbardziej wrażliwe na działanie ciepła, sił ścinania oraz mogą reagować z innymi składnikami lub dodatkami do żywności. Fizykochemiczne modyfikacje związane są z denaturacją białek, które wówczas mogą wykazywać zróżnicowaną strawność. Powierzchnia białek, w warunkach działania czynników termicznych i występujących sił ścinających, ulega znacznemu rozwinięciu, a jednocześnie mogą powstawać nowe agregaty cząsteczek. Powstałe molekuly wykazują zmniejszenie rozpuszczalności lub ulegają inaktywacji w przypadku wyjściowych protein biologicznie czynnych [10]. W procesie ekstruzji mieszanek białek mleka z gryką obserwowano zjawiska agregacji białek, jak również dezagregacji w przypadku preparatów gryki [17]. Stosunek ilościowy białka do skrobi, w mieszankach surowców roślinnych z udziałem białek mleka, może mieć zasadniczy wpływ na przebieg procesów termoplastycznej restrukturyzacji [18, 40, 48].

Ekstrudowane nasiona roślin strączkowych lub oleistych wykazują zwiększoną strawność i przyswajalność egzogennych aminokwasów siarkowych [23].

Główne frakcje globulin ulegają w procesie termicznym rozwinięciu, a jednocześnie obserwuje się inaktywację inhibitorów trypsyny lub innych termolabilnych czynników przeciwżywnieniowych (lektyny) [10, 27]. Po ekstruzji mieszanek sojowo-zbożowych (przy udziale całych nasion lub odłuszczonej mąki sojowej) zawartość inhibitorów trypsyny zmniejszyła się od 75% do 95%, natomiast wartość wskaźnika NSI zmniejszyła się do 10% (w stosunku do 53% — dla soi surowej)[23, 37].

Tabela 1. Wykorzystanie technologii ekstruzji (z teksturacją lub bez)

Znaczenie	Niewielka rola w żywieniu	Brak destrukcji składników odżywczych, podwyższona strawność skrobi	Niszczenie czynników żywieniowych i toksycznych	Przygotowanie antypodwyższonej wartości żywieniowej lub specjalnej
Przemysłowe	bułka tarta skrobie gotowane bezwodna dekrystalizacja cukrów do produkcji słodczy (twarde cukierki) wyroby czekoladowe obróbka słoju i skrobi dla browarnictwa stabilizacja otrąb ryżowych cukierkowe galaretki żelatynowe karmel, guma do życia	zbożowe i ziemniaczane przystawki z koekstrudowane przystawki z wewnętrznym nadzieniem płatki chleb chrupki (substyt chleba), chleb opiekany herbatniki, krakersy, ciasteczka płatki śniadaniowe produkty mączne, mąka do wyrobu torfili, błyskawiczny pudling ryżowy błyskawiczne zupy na bazie płatków zbożowych lub składniki napojów przekształcenia kazeiny w kazeinian	nasiona oleiste gotowane mąki sojowe (włącznie z mąką sojową o pełnej zawartości tłuszczu dla wzbogacenia chleba, makaronu itd.)	karma dla zwierząt (bydło, zwierzątka domowe, pokarm dla ryb) żywność dla niemowląt lub kasze do szybkiego przygotowania (mieszanki zbożowo-strączkowe) teksturyzacja białka roślinnego (zamienniki mięsa) żywność dietetyczna (bezglutenowa, wzbogacona w otręby itd.)
Badawcze	enzymatyczne upłynnianie skrobi do syropów skrobiowych enzymatyczne upłynnianie skrobi do fermentacji etanolowej kapsułkowanie lub tworzenie związków zapachowych	szybko gotujące się wyroby makaronowe przedekstrakcyjna obróbka nasion oleistych przygotowanie specjalnych ciast (bez procesu retrogradacji podczas przechowywania w stanie schłodzonym lub zamrożonym)	zniszczenie aflatoksyn lub gossypolu w ziarnach orzeszka ziemnego lub nasionach bawełny sterylizacja pokarmu z krwi	żelatynizacja białek roślinnych (znaczna wilgotność restrukturyzacja mielonego mięsa) przygotowanie nowych sterylizowanych serów (wysoka zawartość wody, tłuszczu) przygotowanie sterylnego pożywienia dla małych dzieci (wysoka wilgotność)

W ekstrudatach otrzymywanych z mieszanek zbóż z komosą ryżową oraz bobiku z kukurydzą, odnotowano również zmniejszenie wartości wskaźnika NSI [14, 26].

Pomimo tak znacznego zmniejszenia rozpuszczalności substancji azotowych w testach żywieniowych na szczurach oraz w ocenie wzrostu zwierząt hodowlanych lub eksperymentach równowagi azotowej u dzieci w wieku od 5 do 30 miesięcy wykazano wzrost wartości odżywczej białka ekstrudowanego. Ocena wskaźnika PER kształtowała się na poziomie 2,15 (w stosunku do 1,0 dla soi surowej), kiedy ekstruzję prowadzono przy temperaturze 140°C i zawartości wody w mieszance od 8% do 20% [31].

Podwyższenie wartości żywieniowej ekstrudatów otrzymano przy użyciu wyjściowych mieszanek złożonych z surowców zbożowych, nasion oleistych i strączkowych. Odpowiednio dobrany skład chemiczny wsadu wpływał na wzajemne uzupełnienie aminokwasów egzogennych w mieszankach, ponieważ ich zawartość w nasionach zbóż jest stosunkowo niska [23]. Również komplementarny skład aminokwasowy mieszanek uzyskano w kompozycjach białek roślinnych z białkami mleka [46].

Ekstrudowane mąki zbożowe można wzbogacać dodatkiem wolnej lizyny lub metioniny łącznie z witaminami lub mikroelementami. Zabiegi takie prowadzą do uzyskiwania wysokiego wskaźnika PER, zbliżonego do wartości białka kazeiny [23].

Białka roślinne w warunkach procesów ekstruzji mogą ulegać teksturyzacji. Reakcje rozwinięcia łańcuchów białkowych i agregacji wywołują powstanie nierozpuszczalnych, rozciągliwych oraz włóknistych struktur. Wysoka ich wodochłonność, a zarazem elastyczność i miękkość umożliwia substytucję surowców mięsnych. W teksturacji surowców białkowych wykorzystano koncentraty (od 40% do 65% białka) z odtłuszczonej mąki sojowej lub innych nasion oleistych, względnie strączkowych. Mieszanki — często wzbogacone dodatkiem glutenu, białek mleka, proszków mięsnych, wyciągów z alg — teksturowano najczęściej w 2-ślimakowych ekstruderach o specyficznej geometrii, w ściśle kontrolowanych parametrach procesu [24].

Mechanizmy teksturacji nie są dokładnie wyjaśnione. Mała rozpuszczalność białek jest spowodowana powstawaniem nowych hydrofobowych wiązań wodorowych i dwusiarczkowych. Nie obserwuje się lub powstają w nieznaczających ilościach tzw. aminokwasy nienaturalne, np. lizynoalanina. Zanotowano niewielkie ubytki cysteiny (cystyny) — ok. 15% — oraz nieznaczne zmniejszenie lizyny dostępnej (FDNB-lizyny) [10].

Wartość odżywcza teksturatów białkowych była oceniana w grupie młodzieży, dorosłych oraz w obserwacjach żywieniowych szczurów. W grupie dorosłych średnia strawność oraz równowaga azotowa (g N na osobnika na dzień) wynosiły odpowiednio 66,30% i 1,16 dla TVP z odtłuszczonej mąki sojowej, natomiast dla koncentratu białka sojowego 63,40% i 1,31).

Wskaźnik PER u szczurów żywionych ekstrudatami wyprodukowanymi z handlowych mąk wynosił od 1,8 do 2,4 (w stosunku do kontroli kazeinowej — 2,5) [1, 15, 29].

Wydaje się, że niższe wartości wskaźnika PER były spowodowane złą jakością mąki sojowej, nie wynikały z drastycznych warunków procesu. Zatem, tekstury białkowe o niższych wartościach wskaźnika PER nie powinny być używane w nadmiernych ilościach do substytuowania wyrobów mięsnych (np. do hamburgerów w ilości 30–40%), ponieważ znacznie obniżyłyby wartość żywieniową takich produktów.

Zmiany fizykochemiczne

Obniżenie wartości odżywczej ekstrudatów jest spowodowane reakcjami kondensacji Maillarda, które prowadzą do zmniejszenia dostępności pokarmowej lizyny. Straty wartości odżywczej odnotowano w mieszankach zbożowo-strączkowych, z których były produkowane herbatniki, chrupki chleb, galanteria śniadaniowa w warunkach temperatury ekstruzji powyżej 180°C, przy dużych siłach tnących (RPM > 100) i niskiej wilgotności (poniżej 15%), szczególnie w obecności cukrów redukujących (powyżej 3% glukozy, maltozy, laktozy). Zmniejszenie całkowitej zawartości oraz FDNB-lizyny, jej biodostępności (mierzonej wskaźnikiem NPU w warunkach niedoboru lizyny u szczurów) wynosiły odpowiednio 37%, 37% i 50%. Dieta zawierająca mieszaninę skrobi, białka (22%) i sacharozy (20%) była ekstrudowana w drastycznych warunkach (przy temperaturze 210°C, zawartości wody 13%, RPM = 80, RT = 1 minutę). Obniżenie strawności białek było proporcjonalne do różnicy zawartości między lizyną dostępną a jej całkowitą zawartością [8].

Straty lizyny wynikają z przereagowania jej ε-grup aminowych i aldehydowych cukrów redukujących w reakcjach kondensacji. W omawianej próbce z mieszanką herbatnikową, 10% ilości wyjściowej cząsteczek sacharozy uległo reakcjom hydrolyzy i powstałe heksozy stosunkowo szybko wywołały reakcję Maillarda [40]. Obecnie wiadomo, że w mieszankach o niskim wskaźniku glukozy (DE < 1) [19], tj. w próbkach zawierających jedynie skrobię a nie sacharozę, nie obserwuje się zmniejszenia wartości odżywczej po procesie w umiarkowanych warunkach (temp. 125–165°C, zawartości wody 12–18%, RPM 80–150). W próbce mąki pszennej (mieszanka herbatnikowa), ekstrudowanej w drastycznych warunkach, odnotowano znaczne zmniejszenie zawartości lizyny i biologicznej wartości białka [7, 43, 45].

W produkcji kazeinianu sodu metodą ekstruzji w temperaturze powyżej 100°C obserwowano tworzenie się lizynoalaniny [51]. Straty lizyny są następstwem stosowania związków alkalicznych w produkcji kazeinianów. Z badań Roszkowskiego wynika, że ekstruzja preparatów roślinnych z udziałem białek mleka powodowała zmniejszenie dostępnej lizyny, metioniny i tryptofanu [46].

Przemiany fizykochemiczne kazeiny w procesie ekstruzji zależały głównie od sposobu preparowania białek mleka. Warunki hydrotermiczne procesu ekstruzji nie obniżały wartości biologicznej preparatu parakazeinianu wapniowego, niskowapniowego i kazeiny kwasowej, natomiast odnotowano wyraźny spadek wartości biologicznej kazeinianów sodu i wapnia, otrzymanych z kazeiny kwasowej neutralizowanej alkalinami [49].

Interesujące zależności odnotowano badając wpływ obrotów ślimaka oraz tempa dozowania próbki na zmiany jej wartości odżywczej. Wzrost szybkości obrotów ślimaka (RPM) wpłynął na zmniejszenie zawartości lizyny i wartości biologicznej, natomiast zwiększenie tempa dozowania mieszanki prowadziło do korzystnych rezultatów żywieniowych [7].

Zwiększone dozowanie próbki skraca jej czas retencji oraz zmniejsza wymianę ciepła z mieszanką żywnościową. Zatem, dlaczego tak znaczne straty wartości odżywczej są notowane przy małej zawartości wody w ekstrudowanych mieszankach? Obniżenie wartości biologicznej produktu może być związane z miejscowym przegrzaniem próbki pod wpływem działania dużych sił ścinania. Efekty mechaniczne, przy zmniejszonej barierze dyfuzji wskutek małej wilgotności, mogą przyczynić się do rozrywania wiązań glikozydowych w skrobi lub oligosacharydach. Nagromadzenie substancji redukujących może prowadzić do zwiększenia szybkości reakcji kondensacji [30].

Problemy związane z obniżeniem wartości odżywczej białek mogłyby być dokładniej wyjaśnione w badaniach modelowych przy użyciu reometrów, umożliwiających uzyskanie dużych sił ścinania przy niskiej wilgotności mieszanki żywnościowej. Badania kinetyki reakcji, uwzględniające energię aktywacji oraz skład chemiczny mieszanki (stężenie różnych polisacharydów, białek, wartość pH), powinny być prowadzone w różnych warunkach czasowo-temperaturowych.

W procesach obróbki termicznej, takich jak: pieczenie chleba, suszenie walcowe lub suszenie mąk błyskawicznych, straty lizyny wynoszą od 10% do 15%. Retencja lizyny w ekstrudatach na poziomie 90–85% jest możliwa w zoptymalizowanych warunkach procesu. Wyeliminowanie ze środowiska mieszanki (oraz zapobieganie tworzeniu się) cukrów redukujących, utrzymanie procesu w temperaturze poniżej 180°C, przy zawartości wody powyżej 15% — prowadzi do ograniczenia strat lizyny [7, 22].

Skrobia

W warunkach działania wysokiej temperatury i wilgotności w ziarniakach zbóż, nasionach roślin strączkowych lub bulwach ziemniaczanych następują zmiany fizykochemiczne w granulkach skrobi lub jej biopolimerach. Wraz ze zmianami właściwości reologicznych i teksturalnych materiału biologicznego następuje zwiększenie strawności i dostępności skrobi jako źródła energii. Wpływ warunków ekstruzji na zmiany biopolimerów skrobi jest interesujący w odniesieniu do innych procesów technologicznych takich jak: parowanie, autoklawowanie, pieczenie, suszenie walcowe itp.

Zmiany frakcji skrobiowej

Warunki hydrotermiczne procesu ekstruzji i skład chemiczny mieszanki żywnościowej powodują pęcznienie i rozrywanie granulek skrobi oraz zmiany krystaliczności. W ośrodku upłynniającym skrobię notuje się zwiększoną rozpuszczalność w zimnej wodzie, zmniejszoną lepkość oraz częściowe lub całkowite uwolnienie amylozy i amylopektyny.

Procesy żelatynizacji skrobi przebiegają z różnym nasileniem w zależności od zadanych parametrów technologicznych i ich wzajemnego współdziałania. Całkowite kleikowanie skrobi następuje przy temperaturze wyższej od 110°C i przy wilgotnościach próbek wyjściowych od 20% do 30%. Przy niższych poziomach wilgotności (od 10% do 20%) można również obserwować całkowite zżelowanie skrobi w warunkach odpowiednio współdziałających parametrów sił tarcia i temperatury ekstrudowanej próbki [30].

Warunki hydrotermiczne procesów ekstruzji mogą powodować hydrolizę biopolimeru skrobi. O tym kierunku przemian frakcji skrobiowej informują zmiany lepkości oraz pomiary masy cząsteczkowej amylozy i amylopektyny. Analiza wartości tych parametrów wskazuje, że amyloza i amylopektyna skrobi pszennej są hydrolizowane do maltodekstryn. W procesie ekstruzji skrobi ziemniaczanej (wolnej od frakcji lipidowej) obserwowano tworzenie liniowych maltodekstryn o masie cząsteczkowej 2000. W przypadku suszenia walcowego, gdzie nie działają siły ścinania, nie notuje się zmniejszenia masy cząsteczkowej biopolimerów skrobi [12, 13, 34].

Mąki zbożowe lub z nasion strączkowych, zawierające endoamylazy, mogą wzmagać hydrolizę składników skrobi. Endogenne amylazy, zawarte w skrobi nie oczyszczonej, są aktywne w początkowych fazach ekstruzji. Stopień hydrolizy, mierzony równoważnikiem glukozy, jest najczęściej mniejszy od 3% [19]. Może nieco wzrosnąć w środowisku o obniżonej wartości pH mieszanki żywnościowej oraz przy zawartości endogennych lub dodanych bi- lub oligosacharydów [39].

W warunkach procesu ekstruzji skrobie zbożowe mogą tworzyć kompleksy pomiędzy amylozą a kwasami tłuszczowymi, mono- lub biglicerydami. Polarne lipidy wpływają na zmianę temperatury kleikowania skrobi oraz modyfikują właściwości reologiczne środowiska [11, 25, 35]. Zanotowano również interakcje skrobi z białkami. Obecność tłuszczowców w białkowo-skrobiowych mieszaninach może utrudniać dostęp wody. W próbkach odtłuszczonych reakcje białkowo-skrobiowe przebiegają szybciej, tworząc bardziej zbite konsystencje [16, 23].

Strawność skrobi "in vitro"

Badania enzymatycznej hydrolizy *in vitro* wykazały większą wrażliwość skrobi ekstrudowanej na działanie amylaz. Wykazano, że procesy autoklawowania i ekstruzji w podobnym stopniu uwrażliwiają biopolimery skrobiowe na działanie α -amylazy.

Natomiast skrobie natywne lub gotowane przez 20 minut pozostają bardziej odporne na amylolizę.

W procesach ekstruzji tworzenie formy amorficznej skrobi obejmuje zniszczenie struktur komórkowych w materiale heterogennym mąk, zmniejszenie rozmiarów biopolimerów oraz zwiększenie ich powierzchni właściwej.

Większa aktywność amylolytyczna może korespondować z inaktywacją endogenego inhibitora α -amylazy w ekstrudowanych surowcach skrobiowych.

Badane zawiesiny ekstrudowanych produktów mącznych były łatwo fermentowane do kwasów organicznych przez mikroflorę jamy ustnej. Odnotowane obniżenie wartości pH w okolicach osadu zębnego może wskazywać na próchnicotwórczą rolę ekstrudowanych przetworów. Nie zanotowano wzrostu stężenia jonów wodorowych w podobnych doświadczeniach z udziałem mąk gotowanych lub suszonych walcowo [6].

Strawność skrobi "in vivo"

W badaniach równowagi azotowej na szczurach wykazano całkowitą strawność skrobi natywnej oraz jej ekstrudatów mącznych. Nie uzyskano odpowiedzi różnicującej procesy trawienia *in vivo* i wchłaniania od produktów fermentacji bakteryjnej w jelicie. Celem wyjaśnienia tego problemu mąki pszenne hydrolizowano *in vitro* α -amylazą i uzyskane produkty testowano w procesach *in vivo*. Stężenie glukozy w plazmie oraz insuliny oceniano w 2 godziny po dożołądkowym podaniu hydrolizatu młodym szczurom. Zróżnicowanie poziomów glukozy w plazmie było zależne od warunków obróbki hydrotermicznej próbki. Najwyższy poziom glukozy notowano w próbce skrobi i produktach mącznych ekstrudowanych w drastycznych warunkach procesu (temp. 170°C, zawartość wody 15% oraz RPM 200). W następnej kolejności zaszeregowano warunki ekstruzji przyjęte w produkcji chleba chrupkiego, które są równoważne gotowaniu i pieczeniu chleba, oraz łagodne suszenie walcowe. Nasilenie degradacji cząsteczek skrobi ma bezpośrednie konsekwencje żywieniowe. Długie łańcuchy cukrowców podlegają zwolnionej absorpcji, co umożliwia diabetykom lub osobom otyłym zmniejszenie zapotrzebowania na insulinę. Oporność produktu na procesy przemian w warunkach *in vivo*, a więc na tempo absorpcji skrobi i fizjologiczne działanie hydrolizatu, może być sterowana doбором odpowiednich warunków ekstruzji [6].

W warunkach autoklawowania oraz chłodzenia żeli otrzymano skrobię oporną (resistant starch). Tak modyfikowana skrobia jest oporna na działanie termostabilnej α -amylazy, co oznacza, że przyjmuje funkcje włókna pokarmowego [45].

Włókno pokarmowe

Zboża są najważniejszym źródłem włókna pokarmowego. Ekstrudowane mieszanki zbożowe mogą zawierać ok. 13% błonnika lub mogą być dodatkowo wzbogacane otrębami. Mąki zbożowe zawierają ok. 4% błonnika. Udział błonnika w mieszankach zależy zwykle od produktu finalnego (chrupki chleb, galanteria śniadaniowa itp.).

Procesy ekstruzji powodują wzrost rozpuszczalności włókna pokarmowego oraz zwiększenie podatności fermentacyjnej. Obserwowane zmiany w biodegradacji bakteryjnej w przewodzie pokarmowym lub właściwościach fizjologicznych są następstwem modyfikacji rozmiarów cząsteczki, rozpuszczalności i struktury chemicznej składników włókna [3, 47, 48].

Ekstruzja mąki pszennej (przy temp. od 161°C do 171°C, zawartości wody 15%, RPM 100–200 oraz dozowaniu 200 g na min) powoduje zwiększenie rozpuszczalności błonnika w zakresie od 50% do 75% w stosunku do 40% rozpuszczalności w mące surowej. Względna rozpuszczalność błonnika była mniejsza, gdy analizowano ekstrudaty wyprodukowane z pełnego ziarna.

Badania na szczurach wykazały, że włókno pokarmowe mąki pszennej było wrażliwe na działanie bakterii, ponieważ w wydalinach notowano średnio 22% cukrowców (arabinozy, ksylozy i glukozy). Po procesie ekstruzji przeprowadzonej w łagodnych warunkach zawartość (w odchodach) wspomnianych cukrowców zmniejszyła się o dalsze 12%. Większa rozpuszczalność próbek ekstrudowanych była prawdopodobnie skorelowana ze zwiększoną podatnością fermentacyjną.

Interesujące wyniki badań równowagi u szczurów otrzymano po podaniu mąki z pełnego ziarna pszennego. Analiza odchodów wykazała zawartość ok. 42% włókna pokarmowego zarówno w próbkach po ekstruzji, jak również w kontroli. Można przypuszczać, że niektóre struktury chemiczne są odporne na działanie bakterii pomimo działania sił ścinających w czasie ekstruzji [9].

Badania nad fizjologicznym działaniem włókna pokarmowego — obejmujące m.in. zwiększoną tolerancję na glukozę, obniżony poziom lipidów w plazmie, efekty chelatujące — zasługują na szczegółowe wyjaśnienie w kontekście optymalizacji różnych procesów obróbki hydrotermicznej.

Witaminy

Odpowiedni poziom witamin jest bardzo ważna przy produkcji żywności komplementarnej lub dietetycznej. Zawartość witamin powinna być tak skalkulowana, aby można było uwzględnić ich ubytek podczas obróbki termicznej żywności.

Ekstrudowane produkty mączne analizowano na zawartość witamin z grupy B w odniesieniu do warunków procesu oraz czasu składowania. Analizowano próbki

chleba chrupkiego, który przed procesem wzbogacono 2-procentową mieszaniną termolabilnych witamin: B₁, B₆, B₁₂. Zmniejszenie zawartości witamin mierzono ilością dostarczonej energii na kg mieszanki żywnościowej. Ustalono liniową zależność pomiędzy wkładem energii a procentowym ubytkiem zdegradowanych witamin. Zatem, wartości parametrów procesu technologicznego mogą być charakteryzowane zarówno ilością dostarczonej energii, jak również ilością zainaktywowanych witamin. Dodatkowe poekstruzyjne suszenie chleba chrupkiego powodowało jeszcze ok. 10-procentowy spadek zawartości badanych witamin [36].

Badania wpływu procesów ekstruzji na retencję witaminy A są bardzo utrudnione z powodu występowania jej prekursorów (barwników karotenoidowych) w formie różnych molekuł, ich wzajemnych przemian oraz procesów degradacji. Barwniki karotenoidowe są niestabilne w środowisku kwaśnej żywności oraz pod działaniem światła, ciepła i tlenu.

Karotenoidy, wprowadzone w ilości 50–80 mg na kg skrobi zbożowej, wykazywały znaczną oporność na drastyczne czynniki procesów ekstruzji. W czasie składowania produktów, w zależności od natury chemicznej barwników, ulegały procesom utlenienia. Karotenoidy typu β -trans zostały częściowo przekształcone w formy 15-cis i 9-cis. Wyższa porowatość produktu wzmagala procesy utlenienia, podobnie jak wystawienie ekstrudatu na działanie światła. Przechowywanie próbek w warunkach składowania próżniowego, gazu obojętnego, względnie z dodatkiem antyutleniaczy, wpłynęłoby na ograniczenie procesów izomeryzacji, jak również przeciwdziałało zmniejszeniu zawartości karotenoidów [4].

Znaczne straty witaminy C obserwuje się po obróbce termicznej produktu. Straty witaminy po procesie ekstruzji wynoszą 20–40%. Ubytki witamin bardzo zależą od rodzaju mieszanki żywnościowej oraz warunków procesu technologicznego. Mąka pszenna traci 8,2% witaminy C po procesie ekstruzji, następnie — po 12 miesiącach przechowywania — notowano dalszy spadek jej zawartości o 45,8%.

Podobna próbka poddana suszeniu walcowemu traci 9,2% witaminy C, po rocznym przechowywaniu odnotowano 37-procentowy ubytek. W ekstruderacie z mieszaną rybną po 1 miesiącu przechowywania zauważono obniżenie zawartości witaminy C o 87% [4, 21].

Problem wpływu procesów ekstruzji na zmniejszenie zawartości witamin nie jest dostatecznie wyjaśniony. Procesy izomeryzacji, interakcje z innymi składnikami mieszanki żywnościowej mogą przyczyniać się do obniżenia poziomu witamin lub wpływać na ich biologiczne wykorzystanie. Zalecana obróbka żywności w warunkach HTST nie wydaje się korespondować z tradycyjnymi procesami o znacznie dłuższym czasie obróbki termicznej, jeżeli za kryterium oceny przyjmie poziom ubytku witamin. Straty witamin w analizowanych produktach są znacznie większe, niż by wynikało to z czasu retencji mieszanki w ekstruderze. Dlatego wydaje się konieczne użycie systemów modelowych do zbadania wpływów temperatury, tarcia, wilgotności, szybkości obrotów ślimaka, różnego składu mieszanki itp. na inaktywację witamin.

Składniki mineralne

Składniki mineralne stanowią bardzo mały udział w mieszankach żywnościowych, odgrywają jednak bardzo ważną rolę w procesach katalizy enzymatycznej. Z drugiej strony — katalizują procesy utleniania tłuszczów, wpływając na skrócenie czasu przechowywanej żywności.

W ziarnach zbóż, nasionach roślin strączkowych składniki mineralne występują w formie nierozpuszczalnych kompleksów w włóknie pokarmowym, fitynianach, białczanach. Strawność lub przyswajalność żelaza, miedzi cynku, magnezu itp. jest zazwyczaj bardzo niska [3, 5, 9].

Wydaje się, że można wpływać na zmiany rozpuszczalności lub przyswajalności endogennych lub dodanych składników mineralnych przez dobór odpowiednich parametrów ekstruzji. W czasie ekstruzji mieszanki składającej się ze skrobi, glutenu i otrąb pszennych, ekstrudowanej w temperaturze 150°C, uzyskano redukcję fitynianów od 13% do 35%. Również znaczny ubytek fitynianów odnotowano w ekstrudowanych mieszankach ryżowo-strączkowych. Jednak redukcja fitynianów do poziomu poniżej 40% może nie mieć znacznego wpływu na kompleksowanie metali [3, 47].

Wapń i żelazo to typowe składniki, które podnoszą wartość żywieniową, chociaż niektórzy badacze bardzo krytycznie odnoszą się do galanterii śniadaniowej, w której do mieszanek zbożowych dodano żelazo. Konwencjonalne gotowanie może redukować zdolność składników błonnika do wiązania jonów metali, natomiast rola procesów ekstruzji nie jest wyjaśniona. Niektórzy uczeni przychylają się do stwierdzenia, że destrukcja fitazy w czasie ekstruzji może przyczyniać się do powstawania niestrawnych fitynianów [47].

Podsumowanie

W tabeli 1 podano ważniejsze zastosowania procesów ekstruzji, opracowane na podstawie danych zebranych głównie przez Cheftel [10]. Technologia ekstruzji wzbogaciła rynek produktów żywnościowych oraz pasz. Szerokie możliwości wykorzystania procesu ekstruzji notuje się w wielu gałęziach przemysłu spożywczego. Żywność dla wegetarian w znacznym zakresie wzbogaciły teksturowane produkty białka roślinnego [24]. Częściowa hydroliza białek roślinnych lub mielonych ryb może być wstępnym etapem technologicznym w produkcji sosów. W przemyśle mleczarskim proces ekstruzji zastosowano w celu zastąpienia klasycznych technologii, takich jak: produkcja serów parzonych, topionych, kazeinianów i past serowych. Nowe wykorzystanie technologii ekstruzji jest ukierunkowane na otrzymywanie produktów wysokobiałkowych o wysokiej trwałości i wartości odżywczej, jak przetwory śniadaniowe typu "Snacks", produkowane z suszonego sera, kazeiny podpuszczkowej i kazeiny

kwasowej [24, 52]. Ekstruzja kolagenu i keratyny przyczynia się do podniesienia wartości żywieniowej tych białek [33].

Ekstrudaty mączne wykazują interesujące właściwości funkcjonalne i reologiczne. Ekstruzja skrobi z dodatkiem kwasów tłuszczowych lub glicerydów prowadzi do modyfikacji właściwości funkcjonalnych produktów. Odnotowano mniejszą maziść przystawek i herbatników. Zmniejszona lepkość i podwyższona rozpuszczalność produktów umożliwia przygotowanie żywności dla niemowląt w formie kaszek o zwiększonej koncentracji składników odżywczych i kaloryczności. Czystość mikrobiologiczna produktu odpowiada kryteriom żywności sterylizowanej [30].

Interesujące rezultaty badań otrzymano w próbach detoksykacji pasz. W mące z nasion orzeszka ziemnego w obecności 2-procentowej zasady amonowej obserwowano zmniejszenie zawartości aflatoksyn. Po przerobieniu ziemniaków na płatki ziemniaczane notowano obniżenie zawartości glikoalkaloidów lub po ekstruzji nasion bawełny — gossypolu [20, 32].

Stopień inaktywacji enzymów oraz niszczenie witamin zależą głównie od przyjętych parametrów procesu technologicznego.

W ostatnim okresie notuje się znaczne zainteresowanie produkcją syropów skrobiowych. Ekstruzja skrobi lub mąk z dodatkiem termolabilnej α - i β -amylazy umożliwia daleko posuniętą hydrolizę biopolimerów skrobiowych [41].

Literatura

- [1] Alid G., Yanez E., Aquilera J., Monckeberg F., Chichester C.O. 1981. Nutritive value of an extrusion-texturized peanut protein. *J. Food. Sci.* **46**: 948–953.
- [2] Ambroziak Z., Grekowicz W. 1988. Ekstruzja — technologia przyszłości *Prz. Piek.* **4**: 10–13.
- [3] Andersson Y., Hedlund B., Jonsson L., Svensson S. 1981. Extrusion-cooking of a high-fiber cereal product with crispbread character. *Cereal Chem.* **58**: 370–374.
- [4] Berset C., Debontridder J., Marty C. 1984. Stabilite de quelques pigments carotenoides en cuisson-extrusion, in *Thermal Processing and Quality of Foods*, Zeuthen P., Cheftel J.C., Eriksson C., Jul M., Leninger H., Linko P., Varela G. and Vos G., Eds., Elsevier Applied Science Publishers, London, 162–167.
- [5] Bjorck I., Asp N.G. 1983. The effects of extrusion-cooking on nutritional value. A literature review. *J. Food Engineering.* **2**: 281–308.
- [6] Bjorck I., Asp N.G., Birkhed D., Lundqvist J. 1984a. Effects of processing on starch availability "in vitro" and "in vivo". Extrusion-cooking of wheat flours and starch. *J. Cereal Sci.* **2**: 91–103.
- [7] Bjorck I., Asp N.G., Dahlqvist A. 1984b. Protein nutritional value of extrusion-cooked wheat flours. *Food Chem.* **15**: 203–214.
- [8] Bjorck I., Noguchi A., Asp N.G., Cheftel J.C., Dahlqvist A. 1983. Protein nutritional value of a biscuit processed by extrusion-cooking: Effects on available lysine. *J. Agric. Food Chem.* **31**: 488–492.
- [9] Bjorck I., Nyman M., Asp N.G. 1984c. Extrusion-cooking and dietary fiber: Effects on dietary fiber content and on degradation in the rat intestinal tract. *Cereal Chem.* **61**: 174–179.
- [10] Cheftel J.C. 1986. Nutritional effects of extrusion-cooking. *Food Chem.* **20**: 263–283.

- [11] Colonna P., Mercier C. 1983. Macromolecular modifications of manioc starch components by extrusion-cooking with and without lipids. *Carbohydrate Polym.* **3**: 87–108.
- [12] Colonna P., Doublier J.L., Melcion J.P., de Monredon F., Mercier C. 1984. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. I. Physical and macromolecular modifications. *Cereal Chem.* **61**: 538–543.
- [13] Davidson V.J., Paton D., Diosady L.L., Rubin L.J. 1984. A model for mechanical degradation of wheat starch in a single-screw extruder. *J. Food Sci.* **49**: 1154–1157.
- [14] Dahlin K., Lorenz K. 1993. Nitrogen solubility of extruded cereal fractions. *Lebensm. Wiss. Technol.* **26**: 49–53.
- [15] Elias L.G., Braham J.E., Navarrete D.A., Bressani R. 1984. Calidad proteínica de productos comerciales de proteína texturizada de soya de mezclas con carne. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición.* **34**: 355–364.
- [16] Faubion J.M., Hosney R.C. 1982. High-temperature short-time extrusion cooling of wheat starch flour. II. Effect of protein and lipid on extrudate properties. *Cereal Chem.* **59**: 529–533.
- [17] Fornal Ł., Śmietana Z., Soral-Śmietana M., Fornal J., Szpendowski J. 1985. Products extruded from buckwheat flour and its mixtures with milk proteins. II. Chemical characteristics and physico-chemical properties of proteins and starch products extruded from buckwheat flour and its mixture with milk proteins. *Acta Aliment. Pol.* **11**: 397–411.
- [18] Fornal Ł., Śmietana Z., Solar-Śmietana M., Szpendowski J. 1986. Änderungen der chemischen Zusammensetzung und der physiko-chemischen Veränderungen von Stärke bei der Extrusion von Getreidemehlen und deren Mischungen mit Milchprotein. *Get. Mehl und Brot.* **5**: 154–159.
- [19] Greenwood C.T., Munro D.N. 1979. Chapter 2 Carbohydrates. Glucose Oligomers: "Glucose Syrups", W: Effects of Heating on Foodstuffs, (R.J.Priestley ed.), Appl. Science Publ., London: 45–46.
- [20] Grehaigne B., Chouvel H., Pina M., Graille J., Cheftel J.C. 1983. Extrusion-cooking of aflatoxin containing peanut meal with and without addition of ammonium hydroxide. *Lebensm. Wiss. Technol.* **16**: 317–322.
- [21] de la Guerivière J.F., Mercier C., Baudet L. 1985. Incidences de la cuisson-extrusion sur certains paramètres nutritionnels de produits alimentaires notamment céréaliers. *Cahiers Nutr. Diet.* **20**: 201–210.
- [22] Harmuth-Hoene A.E., Seiler K. 1984. Einfluss verschiedener Extrusionsbedingungen auf die Proteinqualität bei Weizenvollkornextrudaten. *Getreide Mehl und Brot.* **8**: 245–249.
- [23] Harper J.M., Jansen G.R. 1985. Production of nutritious precooked foods in developing countries by low-cost extrusion technology. *Food Reviews International.* **1**: 27–97.
- [24] Harper J.M. 1986. Extrusion texturization of foods. *Food Technol.* **40**: 70–76.
- [25] Holm J., Björck I., Ostrowska S., Eliasson A.C., Asp N.G., Larsson K., Lundqvist I. 1983. Digestibility of amylose lipid complexes "in vitro" and "in vivo". *Die Stärke.* **35**: 294–297.
- [26] Jamroz J. 1992. Wpływ zróżnicowanego składu mieszanek bobiku z kukurydzą na jakość otrzymanych ekstrudatów. *Postępy Tech. Przetw. Spoż.* **2**: 9–11.
- [27] Jamroz J., Masłowski A. 1992. Wpływ obróbki termicznej nasion bobiku i grochu na zawartość hemaglutynin oraz dyspersję azotu w wodzie. Materiały Sesji Naukowej "Uwarunkowania Jakości Surowców i Produktów Spożywczych", 18–19 września 1992, Rzeszów: 189–194.
- [28] Jeunink J., Cheftel J.C. 1979. Chemical and physicochemical changes in field bean and soybean proteins texturized by extrusion. *J. Food Sci.* **44**: 1322–1328.
- [29] Kinsella J.E. 1978. Texturized proteins: Fabrication, flavoring and nutrition. *C. R.C. Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **10**: 147–207.
- [30] Linko P., Colonna P., Mercier C. 1981. High temperature, short time extrusion-cooking. *Adv. in Cereal Sci. and Technol.* **4**: 145–235.
- [31] MacLean W.C., Lopez de Romana G., Gastanaduy A., Graham G.G. 1983. The effect of decortication and extrusion on the digestibility of sorghum by preschool children. *J. Nutr.* **113**: 2171–2177.

- [32] Maga J.A. 1980. Glycoalkaloid stability during the extrusion of potato flakes. *J. Food Sci.* **4**: 291–293.
- [33] Megard D., Kitabatake N., Cheftel J.C. 1985. Continuous restructuring of mechanically deboned chicken meat by HTST extrusion-cooking. *J. Food Sci.* **50**: 1364–1369.
- [34] Mercier C. 1977. Effect of extrusion-cooking on potato starch using a twin-screw French extruder. *Die Starke* **28**: 48–52.
- [35] Mercier C., Charbonniere R., Grebaut J., de la Gueriviere J.F. 1980. Formation of amylose-lipid complexes by twin-screw extrusion cooking of manioc starch. *Cereal Chem.* **57**: 4–9.
- [36] Millauer C., Wiedmann W.M., Killeit U. 1984a. Influence of different extrusion parameters on vitamin stability. W: Thermal processing and quality of food (Zeuthen P. et al. Eds.), Elsevier Appl. Sci. Publis., London: 208–216.
- [37] Molina M.R., Braham J.E., Bressani R. 1983. Some characteristics of whole corn: whole soybean (70:30) and rice: whole soybean (70:30) mixtures processed by simple extrusion-cooking. *J. Food Sci.* **48**: 434–437.
- [38] Mościcki L., Bigelmajer D. 1992. Przegląd rozwiązań konstrukcyjnych ekstruderów paszowych. *Post. Tech. Przetw. Spoż.* **2**: 31–33.
- [39] Nierle W., El-Baya A.E., Seiler K., Fretzdorff B., Wolff J. 1980. Veränderungen der Getreideinhalstoffe während der Extrusion mit einem Doppelschneckenextruder. *Getreide, Mehl, Brot.* **34**: 73–78.
- [40] Noguchi A., Mosso K., Aymand C., Jeunink J., Cheftel J.C. 1982a. Maillard reactions during extrusion cooking of protein enriched biscuits. *Lebensm. Wiss. Technol.* **15**: 105–110.
- [41] Ofoli Robert Y., Komolprasert Vanee, Zaha Badal C., Berglund Kris A. 1990. Production of maltose by reactive extrusion of carbohydrates. *Lebensm. Wiss. und Technol.* **23**: 262–266.
- [42] Peri C., Barbieri R., Casiraghi E.M. 1983. Physical, chemical and nutritional quality of extruded corn germ flour and milk protein blends. *J. Food Technol.* **18**: 43–52.
- [43] Pham C.B., Del Rosario R.R. 1984. Studies on the development of texturized vegetable products by the extrusion process. II. Effects of extrusion variables on the available lysine, total and reducing sugars. *J. Food Technol.* **19**: 549–559.
- [44] Racicot W.F., Satterlee L.D., Hanna M.A. 1981. Interaction of lactose and sucrose with corn-meal proteins during extrusion. *J. Food Sci.* **46**: 1500–1506.
- [45] Ranhotra G.S., Gelroth J.A., Astroth K., Eisenbraun G.J. 1991. Effect of resistant starch on intestinal responses in rats. *Cereal Chem.* **68**: 130–132.
- [46] Roszkowski W. 1990. Optymalizacja wartości odżywczej i ocena przydatności żywieniowej nowych preparatów białkowych przeznaczonych do stosowania w żywieniu człowieka. Wyd. SGGW-AR w Warszawie.
- [47] Sandberg A.S., Andersson H., Kivisto B., Sandstrom B. 1986. Extrusion-cooking of a high-fibre cereal product. *Br. J. Nutr.* **55**: 245–254.
- [48] Siljestrom M., Westerlund E., Bjorck I., Holm J., Asp N.G., Theander O. 1986. The effects various thermal processes on dietary fibre and starch content of whole grain wheat and white flour. *J. Cereal Sci.* **4**: 315.
- [49] Szpendowski J. 1991. Modyfikacje kazeiny metodą ekstruzji. Wyd. ART w Olsztynie, Techn. Żywn.
- [50] Śmietana Z., Fornal Ł., Szpendowski J., Soral-Śmietana. 1988. Utilization of milk proteins and cereal starches to obtain co-extrudates. *Nahrung* **32**: 545–551.
- [51] Tossavainen O., Hakulin S., Kervinen R., Myllymack O., Linko P. 1986. Neutralisation of acid casein in a twinscrew cooking extruder. *Lebensm. Wiss. Technol.* **19**: 443–447.
- [52] Zuber F.D., Megard I.C., Cheftel J.C. 1987. Continuous emulsification and gelation of dairy ingredients by HTST extrusion cooking: production of processed cheeses. *Int. J. Food Sci. and Techn.* **22**: 607–626.