

EKSTRUZJA – WYBRANE ASPEKTY TECHNICZNE I TECHNOLOGICZNE

Agnieszka Wójtowicz  

UP w Lublinie, Wydział Inżynierii Produkcji

Streszczenie. W pracy przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące techniki ekstruzji oraz możliwości aplikacyjnych w zależności od zastosowanych rozwiązań technicznych urządzeń. Omówiono podział i budowę ekstruderów jedno-, dwu- i wieloślیمakowych, porównano wybrane charakterystyki techniczne urządzeń, przedstawiono zalety procesu, przemiany przetwarzanych komponentów w zależności od parametrów procesu oraz zastosowanie ekstruzji w różnych branżach – począwszy od przetwórstwa rolno-spożywczego po biopolimery oraz obróbkę materiałów lignocelulozowych.

Słowa kluczowe: ekstruzja, ekstruder, konfiguracja ślimaka, ekstruder planetarny

WSTĘP

Ekstruzja (ang. *extrusion-cooking*) jest procesem znanym od ponad 70 lat. Pierwsze doniesienia dotyczące zastosowania ekstruderów do celów spożywczych pochodzą z 1946 roku z USA [Harper 1981]. W Europie ekstruzja pojawiła się na początku lat 60. XX wieku. Proces wykorzystywany był już ponad 100 lat temu do przetwarzania tworzyw sztucznych, które charakteryzują się stabilną temperaturą płynięcia i dużą jednorodnością w odniesieniu do poszczególnych rodzajów polimerów [Mercier i in. 1989, Martin 2016]. Modyfikacje konstrukcji cylindra oraz ślimaka ekstrudera pozwoliły na przetwarzanie również surowców roślinnych różnego pochodzenia botanicznego, charakteryzujących się dużą zmiennością pod względem kompozycji składników chemicznych oraz cech fizycznych [Frame 1994, Altan i in. 2008, González i in. 2008]. Udoskonalanie urządzeń oraz technologii przetwarzania ciągle poszerza możliwości wykorzystania ekstruzji w przetwórstwie rolno-spożywczym, chemicznym, farmaceutycznym, papierni-

Agnieszka Wójtowicz  <https://orcid.org/0000-0001-5981-6109>

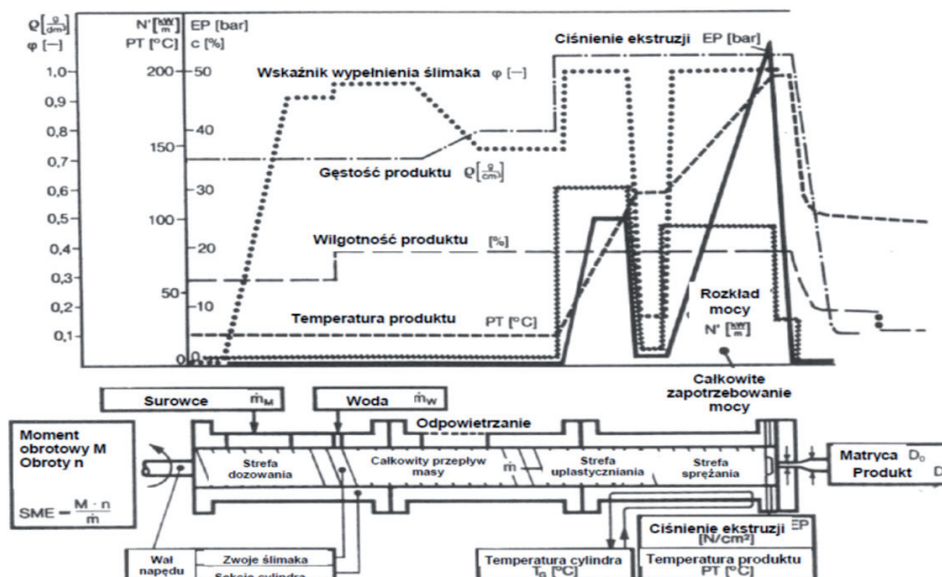
 agnieszka.wojtowicz@up.lublin.pl

© Copyright by Wydawnictwo SGGW

czym, w utylizacji odpadów i w innych branżach [Moscicki 2011, Martin 2016]. Główną zasadą prowadzenia procesu ekstruzji jest obróbka HTST (ang. *high temperature, short time*), obejmująca uplastycznienie przetwarzanych surowców pod wysokim ciśnieniem, przy wysokiej temperaturze i pod działaniem sił ścinających oraz w efekcie wytłoczenie materiału przez dyszę formującą. Oddziaływania termomechaniczne wywołują w przetwarzanych materiałach wiele przemian fizykochemicznych oraz wpływają na cechy jakościowe uzyskanych ekstrudatów [Mercier i in. 1998, Moscicki 2011, Mitrus i in. 2017]. Uniwersalność ekstruderów HTST daje możliwość stosowania ich jako ciągłych reaktorów chemicznych. Surowce zawierające biopolimery, czyli praktycznie wszystkie surowce pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, mogą być przetwarzane do różnorodnych zastosowań lub poddane obróbce wstępnej przed dalszą obróbką technologiczną. Wiele układów sterowania pozwala na regulację warunków pracy urządzeń (rys. 1), co pozwala na obróbkę różnego rodzaju surowców w celu uzyskania ekstrudatów o określonych cechach.

W zależności od temperatury masy podczas przetwarzania proces ekstruzji można podzielić na:

- ekstruzję wysokotemperaturową w temperaturze 120–200°C – ekstruzja typu HTST, która wykorzystywana jest w produkcji ekspandowanych wyrobów spożywczych i paszowych oraz teksturowanych białek roślinnych,
- ekstruzję w temperaturze 65–120°C – ekstruzja niskotemperaturowa stosowana przy produkcji zbożowych pelletów przekąskowych i wyrobów podgotowanych;



Rys. 1. Charakterystyka możliwości regulacji parametrów procesu ekstruzji w różnych sekcjach ekstrudera [na podstawie Wiedmann i Strobel 1987]

Fig. 1. Characteristics of adjustable parameters of the extrusion-cooking process in several sections of the extruder [based on Wiedmann and Strobel 1987]

- ekstruzję w temperaturze 50–65°C – tzw. ekstruzja „na zimno”, tą technologią uzyskiwane mogą być makarony i pellety ziemniaczane [Riaz 2000, Bastos-Cardoso i in. 2007, Mościcki i in. 2007, van der Sman i Broeze 2013, González i in. 2014].

EKSTRUDERY – PODZIAŁ I BUDOWA

Urządzenia wykorzystywane do realizacji procesu to ekstrudery. Podział ekstruderów możliwy jest zarówno ze względu na aspekty procesowe, jak i konstrukcyjne. Charakterystyki techniczne urządzeń, przepływy materiału i energii oraz modelowanie procesu ekstruzji w urządzeniach jedno- i dwuślimakowych zostały opracowane już w latach 80. przez Harpera [1981] i są nadal aktualne. Ze względu na sposób generowania energii dostarczanej do przetwarzanego materiału można wyróżnić ekstrudery autogenne, w których źródłem ciepła jest tarcie cząsteczek surowca wywołane obracającym się ślimakiem (np. typu *collet*), ekstrudery izotermiczne, w których elementy układu plastyfikującego są ogrzewane/chłodzone, oraz ekstrudery politropowe, w których wykorzystuje się zarówno ogrzewanie niektórych elementów cylindra, jak i ciepło generowane w wyniku tarcia. Ze względu na ilość generowanej energii mechanicznej można wyróżnić ekstrudery niskonaprzężeniowe wytwarzające niewielkie naprężenia ścinające oraz ekstrudery wysokonaprzężeniowe generujące duże ilości energii mechanicznej i naprężeń ścinających. Jednak najczęściej występujący podział obejmuje różnice w budowie zespołu plastyfikującego, dzieląc ekstrudery na jedno-, dwu- oraz wieloślimakowe [Harper 1981, Limper i in. 2002, Martin 2016].

Ekstruder zbudowany jest z kilku kluczowych podzespołów, z których każdy pełni inną rolę w procesie. Korpus ekstrudera stanowi lity lub modułowy cylinder połączony z koszem zasypowym na surowiec zasilanym podajnikiem ślimakowym, z którego materiał trafia do sekcji zasilającej ekstrudera. W cylindrze obraca się odpowiednio uzwojony pojedynczy ślimak lub zestaw ślimaków wykonanych z materiałów odpornych na zużycie ścierne, które zasilane są poprzez przekładnię pasową połączoną z silnikiem elektrycznym o dużej mocy (od kilkunastu do ponad 200 kW przy wydajności przerobowej 5–10 t·h⁻¹). Dzięki ich specjalnej konstrukcji następuje mieszanie, ściskanie, zagęszczanie, ścinanie i przesuwanie surowca w komorze ekstrudera, a ogrzewanie cylindra i ślimaka umożliwia upłynnienie, uplastycznienie oraz częściowe ugotowanie gęstwy [Riaz 2000]. Materiał w ekstruderze podczas procesu przebywa stosunkowo krótko (od kilkunastu sekund do kilku minut). Czas przebywania RTD (ang. *residence time distribution*) wpływa na intensywność przemian oraz stopień ujednorodnienia przetwarzanego materiału i jest wynikiem rozkładu prędkości przepływu strumienia materiału wewnątrz urządzenia oraz długości ślimaka, wielkości przestrzeni międzyzwojowej ślimacznicy, stopnia jej wypełnienia a także stopnia sprężania ślimaka [Mercier i in. 1989].

Ekstrudery jednoślimakowe mogą przetwarzać suche i sypkie materiały, głównie surowce zbożowe. Są to urządzenia o stosunkowo prostej budowie, w którym zadaniem obracającego się w cylindrze ślimaka jest transport, zagęszczanie, uplastycznianie i sprężenie masy oraz przetłoczenie jej pod znacznym ciśnieniem przez niewielkie otwory matrycy zainstalowanej na końcu cylindra. Warunkiem przesuwania się materiału jest przepływ wleczony, który powoduje, że materiał nie przykleja się do ścianek cylindra [Frame

1994, Mościcki i in. 2007]. Ślimak może być wykonany jako jednolity, odpowiednio frezowany element bądź zbudowany z wymiennych modułów. Najczęściej wykorzystywane jest uzwojenie transportujące i sprężające, których wzajemne ułożenie na rdzeniu wpływa na intensywność sprężania oraz ogrzewania i ugotowania materiału. Ślimaki mogą mieć różną geometrię rdzenia – od jednakowej średnicy na całej długości ślimaka do zwiększającej się średnicy rdzenia przy końcowej strefie uplastyczniania i sprężania, co sprzyja generowaniu wyższego ciśnienia w ostatnich sekcjach ekstrudera. W tabeli 1 zestawiono charakterystykę ekstruderów jednoślímakowych przeznaczonych do różnych zastosowań. Różne typy ekstruderów jednoślímakowych, w zależności od stosunku długości do średnicy ślimaka (L/D) układu plastyfikującego oraz zakresu temperatury obróbki i wilgotności przetwarzanego materiału, mogą być wykorzystywane zarówno w produkcji wyrobów bezpośrednio ekspandowanych (chrupki czy galanteria śniadaniowa), jak i do wytwarzania teksturatów białkowych czy modyfikowanych skrobi [Harper 1981, Mercier i in. 1989].

W ekstruderach dwuślímakowych para ślimaków obraca się w cylindrze współbieżnie lub przeciwbieżnie do siebie, przemieszczając materiał w kierunku matrycy formującej. Ślimaki mogą mieć konstrukcję prostą lub stożkową, zaś zwoje ślimacznicy zachodzą na siebie lub nie zazębiają się [Harper 1981]. W tych urządzeniach zachodzi bardziej intensywna obróbka przetwarzanego materiału, w związku z czym mogą być wykorzystywane do przetwarzania bardziej niejednorodnych materiałów i wytwarzania produktów wielokomponentowych (tab. 2). W ekstruderach współbieżnych ślimaki obracają się w jednym kierunku i z dużą prędkością obrotową, co sprzyja dobrej efektywności przemieszczania i wymieszania materiału, uplastycznieniem i równomiernym wytłaczaniem [Mercier i in. 1989, Kalyon i Malik 2007, Martin 2016]. Wzajemnie obracające się i zachodzące na siebie zwoje ślimaków są równoległe i efektywnie przepychają do przodu materiał, który praktycznie nie zalega w przestrzeni między ślimakami a powierzchnią cylindra. Z tego właśnie powodu ten rodzaj ekstruderów dwuślímakowych często określany jest jako maszyny samooczyszczające się. Ekstrudery o ślimakach przeciwbieżnych, ze ślimakami obracającymi się do lub od siebie, używane są do generowania bardzo dużych sił ścinających. Może to jednak powodować nadmierne zużycie i wycieranie ślimaków, co sprawia, że są one mniej popularne. Typ współbieżny ekstrudera dwuślímakowego o ściśle współpracujących ślimakach znalazł najszerze zastosowanie, głównie w przetwórstwie materiałów wielokomponentowych [Frame 1994, Ryu i Ng 2001, Mościcki i in. 2007].

W celu wydłużenia czasu oddziaływania wysokiej temperatury na materiał, zmniejszenia zużycia energii mechanicznej i zwiększenia wydajności oraz lepszego związania składników i skleikowania skrobi, często łączy się ekstrudery z kondycjonerami. W urządzeniach tych istnieje możliwość wstępnego wymieszania materiału, jego równomiernego dowilżenia wodą bądź parą wodną, czy dodania komponentów tłuszczowych. Najczęściej kondycjonery stosuje się przy wytwarzaniu wieloskładnikowych karm dla zwierząt towarzyszących i ryb oraz materiałów kompozytowych [Mościcki 2011, Oniszczyk i in. 2016].

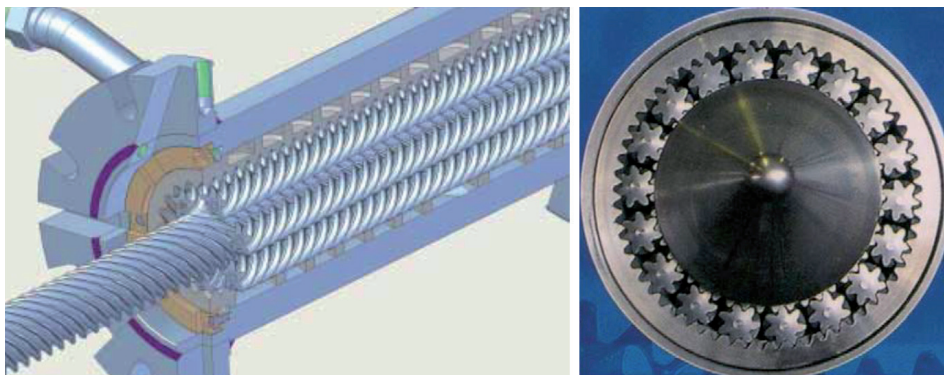
Stosunkowo nowym rozwiązaniem konstrukcyjnym są ekstrudery wieloślímakowe planetarne, skonstruowane w Niemczech około 45 lat temu, pracujące w układzie od 4 do 24 ślimaków o niewielkiej średnicy („planetek”) rozmieszczonych wokół centralnego ślimaka (rys. 2). Podczas procesu przetwarzany materiał jest wciągany pomiędzy uzwo-

Tabela 1. Wybrane charakterystyki ekstruderów jednoślیمakowych [na podstawie Harper 1981, Mercier i in. 1989]

Table 1. Selected characteristics of single screw extruders [based on Harper 1981, Mercier et al. 1989]

Wyszczególnienie Specification	Prasy makaronowe Pasta press	Wysoko- ciśnieniowe ekstrudery High-pressure extruders	Nisko- naprężeniowe ekstrudery Low-shear extruders	Wysoko- naprężeniowe ekstrudery High-shear extruders	Ekstrudery typu <i>collet</i> Collet-type extruders
Wilgotność materiału Feed moisture [%]	32	25	28	15–25	11
Maksymalna temperatura produktu Maximum product temperature [°C]	52	80	150	180	200
Sekcje ogrzewania/ /chłodzenia Heating/cooling sections	chłodzenie cooling	chłodzenie cooling	chłodzenie/ /ogrzewanie cooling/heating	chłodzenie/ /ogrzewanie cooling/heating	chłodzenie/ /ogrzewanie cooling/heating
Prędkość ścinania Shear rate in screw [s ⁻¹]	5	10	20–100	120–180	140
Typowe L/D Typical L/D	9–11	12–15	15–30	15–25	3–5
Typy produktów Product types	makaron, ravioli, ciasta pasta, ravioli, pastry	pellety ziemniaczane potato pellets	pellety zbożowe, mąka podgotowana, płatki zbożowe, wilgotne karmy dla zwierząt cereal pellets, precooked flour, cereal flakes, moist animal feed	wyroby podgotowane, galanteria śniadaniowa, teksturaty białkowe, modyfikaty skrobiowe, suche karmy dla zwierząt precooked products, breakfast cereals, protein texturates, modified starch, dry petfood	bezpośrednio ekspandowane przekąski, chrupki directly expanded snacks, crisps

jenie trzpienia głównego oraz uzwojone ślimaki zewnętrzne, rozwałcowywany na cienką warstwę pomiędzy planetkami oraz pomiędzy ślimakami a cylindrem i jednocześnie transportowany do przodu maszyny. Takie wielokrotnie powtarzające się rozwałcowywanie materiału umożliwia bardzo dokładne kontrolowanie temperatury materiału w całej jego objętości [Rudolf i in. 2014]. Ogrzewane/chłodzone są zarówno ślimak centralny, jak i ścianki cylindra. Przez wprowadzenie regulacji temperatury za pomocą ciśnieniowych systemów hydraulicznych oraz polepszoną konstrukcją kanałów chłodzących



Rys. 2. Schemat i widok ekstrudera planetarnego [ENTEX® n.d.]
 Fig. 2. Schematic and view of planetary extruder [ENTEX® n.d.]

można uzyskać bardzo dokładne sterowanie temperatury procesu przetwórczego (z dokładnością nawet do $0,5^{\circ}\text{C}$) w zależności od przetwarzanego materiału. Urządzenia te charakteryzują się wyjątkowo dużą efektywnością mieszania ze względu na dużą powierzchnię roboczą ślimaków, a dzięki ich modułowej budowie mają możliwość zmiany konfiguracji ślimaków. Konfiguracja urządzeń uzależniona jest od liczby modułów (od kilku do kilkunastu) oraz od liczby i geometrii ślimaków „planetek”.

Różne konfiguracje ślimaków w urządzeniach planetarnych pozwalają uzyskać dużą wydajność, dobrą efektywność przemieszczania i mieszania materiału, uplastycznienie i równomierne wytłaczanie. Możliwe jest dozowanie dodatków płynnych i stosowanie systemu odpowietrzania w poszczególnych sekcjach cylindra, co umożliwi przetwarzanie materiałów o dużych różnicach lepkości i konsystencji [Birr 2017]. Dla ekstruderów planetarnych zostały opracowane charakterystyki przepływu materiału, rozkładu temperatury, ciśnienia, czasu przebywania w ekstruderze oraz zagadnienia energetyczne [Rudloff i in. 2011]. W procesie można zastosować również chłodzenie cylindra oraz obniżenie temperatury do nawet -15°C , co wykorzystuje się przy produkcji lodów. Ekstrudery planetarne znajdują zastosowanie głównie w przetwórstwie tworzyw sztucznych oraz w procesach mieszania, homogenizowania i technologii reakcyjnej w przetwórstwie tworzyw sztucznych i kompozytów, w branży chemicznej, lakierniczej, farmaceutycznej [Limper i in. 2002, Markarian 2008], aniewiele jest doniesień o możliwościach ich zastosowania w przetwórstwie spożywczym, np. do wytwarzania analogów mięsa [Palanisamy i in. 2018]. Trwają prace nad możliwością zastosowania ekstruderów planetarnych do wytwarzania czekolady, nadzień i mas cukierniczych, przecierów i dań dla dzieci, płatków zbożowych (dane firmy ENTEx®), lecz dotychczas opublikowana literatura z tego zakresu jest uboga.

Porównanie wybranych charakterystyk ekstruderów różnego typu zestawiono w tabeli 2. Dobierając rodzaj ekstrudera do potrzeb przetwórczych, warto określić najważniejsze zadania, które mają być realizowane w trakcie procesu. Jeśli najważniejsze jest intensywne mieszanie i homogenizacja materiału, lepiej sprawdzą się ekstrudery dwu- i wieloślimakowe. Jeśli ważniejsze jest uplastycznienie materiału, to bardziej efektywne będą ekstrudery jednoślimakowe z długim układem plastyfikującym.

ELEMENTY ROBOCZE EKSTRUDERA

W ostatnich latach oprócz ślimaków toczonych w postaci jednoelementowego modułu pojawiły się możliwości dowolnego kreowania funkcjonalności ślimaka dzięki pojedynczym modułom roboczym o różnej konfiguracji (m.in. transportowe, mieszające, zawierające, zagęszczające, ugniatające, sprężające, odpowietrzające, dyski dystansowe) oraz o różnej gęstości uzwojenia (jednozwojne, dwuzwojne, trójzwojne, uzębione tzw. TME (ang. *toothed mixing elements*), które według specyfikacji umieszcza się na ryflowanym wrzecionie/wale pełniącym funkcję rdzenia. Możliwość zaprojektowania konfiguracji ślimaka za pomocą kombinacji wielu elementów sprawia, że proces jest bardzo elastyczny, można w ten sposób regulować intensywność mieszania, sił ścinających, wzrost ciśnienia oraz czas przebywania materiału w przestrzeni roboczej. Użycie modułów ugniatających, które mogą być ustawione naprzemiennie pod różnymi kątami (zwykle 30°, 45°, 60° i 90°), w kierunku zgodnym lub przeciwnym do kierunku przemieszczania obrabianego surowca, może powodować duże naprężenia ścinające poprzez wymuszanie przeciskania materiału przez małe prześwity pomiędzy dyskami oraz między dyskami i powierzchnią cylindra [Kalyon i Malik 2007]. Możliwe jest również skonfigurowanie regionów uszczelnionych, w których ciśnienie może być znacznie wyższe niż w innych strefach roboczych ekstrudera [Mercier i in. 1989, Riaz 2000, Rudolff i in. 2014]. Najbardziej

Tabela 2. Wybrane charakterystyki układów uplastyczniających ekstruderów

Table 2. Selected characteristics of extruders plasticizing units

Charakterystyka technologiczna Technological characteristics	Rodzaj ekstrudera – Extruder type			
	jednoślimakowe single screw	dwuślimakowe przeciwbieżne twin screw counter-rotating	dwuślimakowe współbieżne twin screw co- -rotating	wieloślimakowe multiple screws, planetary
Pobieranie materiału z zasobnika Feeding efficiency	dostateczne sufficient	bardzo dobre very good	bardzo dobre very good	bardzo dobre very good
Upłastycznianie Plastification	dobrze good	dobrze good	bardzo dobre very good	bardzo dobre very good
Mieszanie rozprowadzające Distributive mixing	dobrze good	dostateczne sufficient	bardzo dobre very good	bardzo dobre very good
Mieszanie rozdrabniające Disintegrating mixing	dobrze good	bardzo dobre very good	bardzo dobre very good	bardzo dobre very good
Wytwarzanie ciśnienia Pressure formation	dobrze good	bardzo dobre very good	dostateczne sufficient	słabe weak
Samooczyszczanie się ślimaków Self-wiping of screws	słabe weak	dobrze good	bardzo dobre very good	bardzo dobre very good
Rozkład czasu przebywania w ekstruderze Residence time distribution	szeroki wide	bardzo wąski very narrow	wąski narrow	wąski narrow

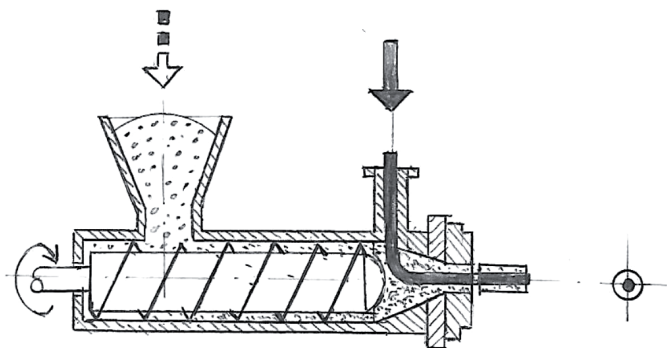
popularne są elementy transportujące i sprężające, których ułożenie na rdzeniu wpływa na intensywność sprężania oraz ogrzewania i ugotowania materiału. Ślimaki ekstrudera mogą być zróżnicowane, jeśli chodzi o geometrię rdzenia – od jednakowej średnicy do zwiększającej się średnicy przy końcowej części ślimaka w strefie uplastyczniania i sprężania [Mercier i in. 1989, Mościcki i in. 2007]. Modułowa konstrukcja ślimaka umożliwia tworzenie dedykowanych konfiguracji do konkretnych zastosowań. Podobne rozwiązania konstrukcji ślimaków można stosować zarówno w ekstruderach jedno- i wieloślimakowych.

Ślimaki modułowe zazwyczaj składają się z kilku sekcji. W strefie transportowej znajdują się moduły głębokie i szeroko uzwojone, co umożliwia pobieranie surowców i ich transport wzdłuż cylindra. W kolejnej strefie następuje zmniejszenie głębokości i rozstawu zwojów ślimacznicy umożliwiające wymieszanie materiału i zapoczątkowanie oddziaływania sił ścinających. Po przetransportowaniu materiału do strefy uplastyczniającej zwiększa się znacznie intensywność ścinania oraz ciśnienie, wywołując zmiany strukturalne w przetwarzanym materiale, który przechodzi w stan lepko-sprężysty. Zwiększenie intensywności sił ścinających można regulować przez umieszczenie na rdzeniu modułów uzębionych bądź zwracających [Mercier i in. 1989]. W następnej strefie gęstwa jest przeciskana przez niewielkie prześwity pomiędzy gęsto uzwojonym ślimakiem a cylindrem ekstrudera, powodując intensywne ścinanie materiału, zwiększenie temperatury przetwarzanej masy aż do jej ugotowania oraz generując powstawanie wysokiego ciśnienia bezpośrednio przed matrycą formującą. Wykorzystanie modułowych ślimaków, zarówno w urządzeniach jedno-, jak i wieloślimakowych, umożliwia kontrolę warunków procesu przez różnicowanie ilości sekcji, konfiguracji elementów w każdej z sekcji oraz regulacji intensywności ścinania przez umieszczanie dysków dystansowych lub rozluźnianie struktury materiału przez odpowietrzanie [Riaz 2000].

KOEKSTRUZJA

Koekstruzja, czyli współwytłaczanie, stosowane jest w celu uzyskania produktu łączącego dwie lub więcej warstw: jeden rodzaj materiału jest wytłaczany i stale napełniany lub powlekany innym, aby uzyskać wielowarstwowy produkt (rys. 3). Współwytłaczanie obejmuje zastosowanie ekstrudera do tworzenia zewnętrznej powłoki, zaś układu pomocniczego do wstrzykiwania nadzienia lub zastosowanie kilku ekstruderów dozujących przetworzone materiały do wspólnej wielokanałowej głowicy formującej. Wyroby koekstrudowane z kilkoma różnokolorowymi nadzieniami wymagają podawania ich odrębnymi kanałami a różnorodność zastosowanych komponentów nadaje produktom charakterystyczny smak, wygląd i teksturę.

Można również wykorzystać układ dwóch lub większej ilości ekstruderów do oddzielnego przygotowania składników o odpowiedniej konsystencji, które następnie łączy się w wielokanałowej głowicy formującej do uzyskania ostatecznego kształtu produktów nadziewanych o różnorodnej teksturze lub wielokolorowych ekstrudatów. Przykładem stosowania koekstruzji w przetwórstwie spożywczym i paszowym mogą być kolorowe płatki śniadaniowe, wielobarwne przekąski i karma dla zwierząt domowych, nadziewane kremem lub dżemem rurki lub ciastka, czy przekąski, w których chrupiąca zewnętrzna



Rys. 3. Schemat głowicy do koekstruzji [rys. S. Juško, za zgodą]

Fig. 3. Schematic of co-extrusion die [by S. Juško, with permission]

powłoka zbożowa może być wytłaczana wraz ze słodkim lub pikantnym nadzieniem. Rozwiązania konstrukcyjne obejmują wbudowaną wielokanałową matrycę formującą z trzpieniem kanałowym doprowadzającym masę do głowicy z dyszą formującą lub wolnostojący moduł zatrzaskowy do koekstruzji, który może być wbudowany w nowe linie produkcyjne lub dodany do istniejącej infrastruktury jako rozwiązanie modernizacyjne w celu zróżnicowania asortymentów i poszerzenia możliwości produkcyjnych [Moscicki 2011].

SUROWCE I PRZEMIANY SKŁADNIKÓW W PROCESIE EKSTRUZJI

W wyniku zintegrowanego oddziaływania wysokiej temperatury przy określonej ilości wody dostępnej w surowcach, sił ścinających, wysokiego ciśnienia przy sprężaniu materiału i gwałtownego rozprężenia po opuszczeniu matrycy, w przetwarzanych surowcach zachodzi szereg przemian. Główne procesy podczas wytwarzania żywności czy pasz obejmują skleikowanie skrobi, zwiększenie lepkości przetwarzanej gęstwy, denaturację białek, hydrolizę tłuszczów, formowanie kompleksów tłuszczowo-białkowych i tłuszczowo-skrobiowych, inaktywację niepożądanych enzymów, unieczynnienie związków antyżywniowych, a przy temperaturze przekraczającej 100°C sterylizację mikrobiologiczną materiału [Mercier i in. 1989, Frame 1994, Mościcki i in. 2007]. W odniesieniu do fizycznych cech przetworzonych w trakcie ekstruzji materiałów następuje wzrost rozpuszczalności w wodzie, wzrost wodochłonności, ujednorodnienie materiału oraz jego odwodnienie. Przez dobór odpowiednich warunków procesu można kreować cechy fizyczne ekstrudatów, m.in. ekspandowanie ekstrudatów, ich gęstość, porowatość itp.

Surowce używane w procesie ekstruzji muszą spełniać kilka podstawowych funkcji, m.in. odgrywają rolę strukturotwórczą, regulują przebieg przemian fizycznych w trakcie ekstruzji, wpływają na zmiany lepkości gęstwy oraz jej uplastycznienie, ułatwiają rozproszenie składników w cieście, przyspieszają upłynnienie i kleikowanie skrobi, poprawiają walory smakowe, czy służą do zabarwienia wyrobu [Mościcki i in. 2007, Moscicki 2011]. Surowce strukturotwórcze to przede wszystkim surowce o dużej zawartości skrobi, tj. kukurydza, ryż, owies, gryka, pszenica, susz ziemniaczany, płatki i skrobie [Thymi i in. 2005,

Bastos-Cardoso i in. 2007, Wójtowicz i in. 2013, Kręcisz i Wójtowicz 2017, Matysiak i in. 2018]. Funkcję wypełniaczy pełnią najczęściej frakcje włókniste oraz białkowe roślin oleistych i ziarniaków zbóż dodawane do podstawowych składników. Poprawiają one elastyczność ciasta po hydratacji w czasie fazy uplastyczniania masy w ekstruderze. Jako wypełniacze wykorzystuje się też komponenty bogate w błonnik pokarmowy [Wójtowicz i in. 2014]. Do plastyfikatorów należą woda, oleje, tłuszcze oraz emulgatory. Ograniczona ilość wody stymuluje tarcie i powoduje intensywną obróbkę przetwarzanego materiału [Altan i in. 2008]. Woda działa również jako rozpuszczalnik polimerów skrobiowych, co powoduje dyspersję ziarenek skrobi. Oleje i tłuszcze z jednej strony ułatwiają transport i proces zagęszczania masy, z drugiej wpływają na jakość i wartość odżywczą ekstrudatów. Emulgatory ułatwiają cięcie i tworzenie jednolitej powierzchni zewnętrznej produktów oraz chronią je przed sklejeniem [van der Sman i Broeze 2013]. Substancje spulchniające jak soda czy węglan wapnia oraz komponenty smakowe (głównie sól i cukier) sprzyjają tworzeniu porowatej struktury ekstrudatów cenionej przez konsumentów przekąsek zbożowych i snacków [Matysiak i in. 2018]. Do uzyskania pożądanego koloru ekstrudatów wykorzystywać można barwniki naturalne, organiczne, roślinne oraz syntetyczne.

Szerokie możliwości regulowania parametrów procesu pozwalają na zastosowanie ekstruderów do celów spożywczych, paszowych, ale także w innych branżach przemysłu. Obecnie ekstrudery stosuje się do produkcji:

- galanterii śniadaniowej, błyskawicznych płatków zbożowych,
- grzanek, chleba chrupkiego,
- chrupek, przekąsek ekspandowanych, pelletów przekąskowych ziemniaczanych i zbożowych, tortilli,
- kaszek i kleików błyskawicznych, odżywek dla niemowląt,
- kruszonek, panierek i posypek zbożowych,
- podgotowanych substytutów kasz, ryżu, kuskusu,
- makaronów błyskawicznych i bezglutenowych,
- skrobi modyfikowanych i mąk podgotowanych, zagęstników do zup, sosów i napojów, deserów instant w proszku,
- teksturatów sojowych, koncentratów białkowych,
- gum do żucia, żelek i lukrecji, czekolad i mas czekoladowych, słodczy, również mrożonych,
- suchych karm dla psów i kotów, karm dla ryb, ptaków ozdobnych, karm specjalistycznych (bezglutenowe, wysokoenergetyczne, dietetyczne), przekąsek dla psów,
- materiałów biodegradowalnych, skrobi termoplastycznej, biokompozytów,
- substratów lignocelulozowych i bioodpadów do biogazowni.

Wprowadzanie dodatków wzbogacających w postaci proszków owocowych, warzywnych czy z roślin strączkowych bezpośrednio do wyrobów ekstrudowanych w celu poprawy właściwości żywieniowych, ale także nadania ekstrudatom specyficznych cech użytkowych jest możliwe w szerokim zakresie produktów (przekąski, chrupki, kaszki i kleiki błyskawiczne, chleb chrupki, makarony, pellety czy karmy dla zwierząt) [Potter i in. 2013, Gondek i in. 2014, Oniszczuk i in. 2015, Wójtowicz i in. 2015, Kasprzak i in. 2018, Kręcisz i Wójtowicz 2018]. Dowiedziono, że ekstruzja, dzięki krótkotrwałemu oddziaływaniu wysokiej temperatury, nie wpływa istotnie na zmniejszenie zawartości składników bioaktywnych, głównie polifenoli wykazujących aktywność antyoksydacyj-

ną w produktach z dodatkiem owoców, warzyw czy ziół, zaś zastosowanie ekstruderów umożliwi wytwarzanie produktów o zwiększonej wartości odżywczej [Bouasla i in. 2016, Wójtowicz i in. 2017, Wójtowicz i in. 2018].

Dużą wagę należy zwrócić na możliwość stosowania ekstruzji w przetwórstwie biopolimerów i biokompozytów, które stanowią bazę do wytwarzania materiałów biodegradowalnych i kompostowalnych do celów opakowaniowych, medycznych, farmaceutycznych czy rolniczych. Specjalne miejsce od wielu lat zajmuje zastosowanie ekstruzji do wytwarzania skrobi termoplastycznej [Moscicki i Janssen 2009, Moscicki i in. 2012, Combrzyński i in. 2018]. W literaturze naukowej znaleźć można również przykłady zastosowania techniki ekstruzji do przygotowywania substratów lignocelulozowych i bioodpadów do stosowania w biogazowniach. Słoma, siano, odpady zielone czy odpady z przemysłu drzewnego poddane obróbce ciśnieniowo-termicznej stają się użytecznym komponentem do produkcji biogazu. Obróbka takich surowców ma na celu degradację struktury lignin i przekształcenie węglowodanów złożonych do cukrów prostszych, które stają się bardziej dostępne dla bakterii fermentacji metanowej i skraca się znacznie czas fermentacji substratów lignocelulozowych [Zheng i Rehmann 2014, Pilarski i in. 2016, Kuster Moro i in. 2017].

PODSUMOWANIE

Przedstawione wybrane zagadnienia z zakresu ekstruzji nie wyczerpują tematu. Mogą zaś być przydatne przy wyborze odpowiednich rozwiązań technicznych, konstrukcyjnych czy technologicznych do wytwarzania różnych typów wyrobów ekstrudowanych. Do zalet techniki ekstruzji zaliczyć można: pracę w długich cyklach produkcyjnych i dużą wydajność procesu, sprawność energetyczną, możliwość przetwarzania relatywnie suchych, ale także włóknistych i lepkich materiałów oraz kontroli intensywności zachodzących przemian. Zróżnicowanie warunków prowadzenia procesu pozwala na kształtowanie strukturalnych i smakowych właściwości żywności i pasz oraz na zastosowanie niekonwencjonalnych surowców i dodatków. Nowości w zakresie konstrukcji urządzeń obejmują modułowe ślimaki o zróżnicowanej konfiguracji oraz ekstrudery planetarne, które można stosować nie tylko w przetwórstwie tworzyw sztucznych i branży chemicznej, ale także w produkcji żywności. Szeroki wachlarz możliwości nie został jeszcze wyczerpany i wiele nowych zastosowań zapewne będzie pojawiać się w literaturze tematu.

LITERATURA

- Altan A., McCarthy K.L., Maskan M., 2008. Extrusion cooking of barley flour and process parameter optimization by using response surface methodology. *J. Sci. Food Agric.* 88, 1648–1659.
- Bastos-Cardoso I., Zazueta-Morales J.J., Martinez-Bustos E., Kil-Chang Y., 2007. Development and characterization of extruded pellets of whole potato (*Solanum tuberosum* L.) flour expanded by microwave heating. *Cereal Chem.* 84 (2), 137–144.

- Birr T., 2017. PVC-Direktextrusion mit dem Planetwalzen-Extruder. PVC ohne Vormischen extrudieren. Pobrano z: <https://www.kgk-rubberpoint.de/21142/pvc-ohne-vormischen-extrudieren/> [dostęp: 14.08.2018].
- Bouasla A., Wójtowicz A., Zidoune M.N., Olech M., Nowak R., Mitrus M., Oniszczyk A., 2016. Gluten-free precooked rice-yellow pea pasta: effect of extrusion-cooking conditions on phenolic acids composition, selected properties and microstructure. *J. Food Sci.* 81 (5), 1070–1079.
- Combrzyński M., Mościcki L., Kwaśniewska A., Oniszczyk T., Wójtowicz A., Kręcisz M., Sołowiej B., Gładyszewska B., Muszyński S., 2018. Effect of PVA and PDE on selected structural characteristics of extrusion-cooked starch foams. *Polimeros – Ciencia e Tecnologia* 28(1), 76–83.
- ENTEX®, n.d. Planetary Roller Extruder. Pobrano z: https://www.environmental-expert.com/files/34483/download/656204/2-pwe_engl..pdf.
- Frame N.D., 1994. *The Technology of Extrusion Cooking*. Springer Science + Business Media, Dordrecht.
- Gondek E., Jakubczyk E., Stasiak M., Królikowski K., 2014. Wpływ dodatków wzbogacających wartość odżywczą na teksturę bezglutenowego pieczywa chrupkiego. *ZPPNR* 578, 49–60.
- González R.J., Drago S.R., Torres R.L., De Greef D.M., 2014. Extrusion cooking of cereal-based products. W: R.P.F. Guiné, P.M.R. Correia (red.), *Engineering Aspects of Cereal and Cereal-based Products*. CRC Press Taylor and Francis Group, Boca Raton FL, 269–292.
- Harper J.M., 1981. *Extrusion of Foods*. CRC Press, Boca Raton FL.
- Kalyon D.M., Malik M., 2007. An integrated approach for numerical analysis of coupled flow and heat transfer in co-rotating twin screw extruders. *Int. Polym. Proc.* 22 (3), 293–302.
- Kasprzak K., Oniszczyk T., Wójtowicz A., Waksmundzka-Hajnos M., Olech M., Nowak R., Polak R., Oniszczyk A., 2018. Phenolic acid content and antioxidant properties of extruded corn snacks enriched with kale. *J. Anal. Methods Chem.* #7830546. doi 10.1155/2018/7830546
- Kręcisz M., Wójtowicz A., 2017. Evaluation of selected properties of gluten-free instant gruels processed under various extrusion-cooking conditions. *Acta Sci. Pol. Technol. Aliment.* 16 (2), 135–147.
- Kręcisz M., Wójtowicz A., 2018. Effect of processing conditions and concentration of water and milk suspensions on the dynamic viscosity of corn-cranberry gluten-free instant gruels. *Acta Agrophys.* 25 (2), 227–238.
- Kuster Moro M., Teixeira R., Silva A., Duarte Fujimoto M., Melo P., Secchi A., Pinto da Silva Bon E., 2017. Continuous pretreatment of sugarcane biomass using a twin-screw extruder. *Ind. Crop. Prod.* 97, 509–517.
- Limper A., Seibel S., Fattmann G., 2002. Compounding unit planetary roller extruder. *Macromol. Mater. Eng.* 287 (11), 815–823.
- Markarian J., 2008. Outdoor living space drives growth in wood-plastic composites. *Plastics Additives & Compounding* 10 (4), 20–25.
- Martin C., 2016. Twin screw extruders as continuous mixers for thermal processing: a technical and historical perspective. *AAPS Pharm. Sci. Tech.* 17 (1), 3–19. doi 10.1208/s12249-016-0485-3
- Matysiak A., Wójtowicz A., Oniszczyk T., 2018. Process efficiency and energy consumption during the extrusion of potato and multigrain formulations. *Agricult. Engineering* 22 (2), 49–57.
- Mercier C., Linko P., Harper J.M., 1989. *Extrusion Cooking*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul MN.

- Mitrus M., Wójtowicz A., Oniszczyk T., Gondek E., Mościcki L., 2017. Effect of processing conditions on microstructure and pasting properties of extrusion-cooked starches. *Int. J. Food Eng.* 13 (6), 1–12.
- Moscicki L. (red.), 2011. *Extrusion-Cooking Techniques. Applications, Theory and Sustainability.* Wiley-VCH, Weinheim.
- Moscicki L., Janssen L.P.B.M. (red.), 2009. *Thermoplastic Starch.* Wiley-VCH, Weinheim.
- Moscicki L., Mitrus M., Wójtowicz A., Oniszczyk T., Rejak A., Janssen L., 2012. Application of extrusion-cooking for processing of thermoplastic starch (TPS). *Food Res. Int.* 47, 291–299.
- Mościcki L., Mitrus M., Wójtowicz A., 2007. *Technika ekstruzji w przemyśle rolno-spożywczym.* PWRiL, Warszawa.
- Oniszczyk A., Wójtowicz A., Oniszczyk T., Olech M., Nowak R., Wojtunik K., Klimek M., Krawczyk W., Hajnos M., 2015. Extruded corn gruels containing linden flowers: quantitation of phenolic compounds and selected quality characteristics. *Open Chem.* 13 (1), 1209–1217.
- Oniszczyk T., Oniszczyk A., Gondek E., Guz L., Puk K., Kocira A., Kusz A., Kasprzak K., Wójtowicz A., 2016. Active polyphenolic compounds, nutrient contents and antioxidant capacity of extruded fish feed containing purple coneflower (*Echinacea purpurea* (L.) Moench). *Saudi J. Biol. Sci.* doi 10.1016/j.sjbs.2016.11.013
- Palanisamy M., Töpfl S., Aganovic K., Berger R.G., 2018. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues. *LWT-Food Sci. Technol.* 87, 546–552.
- Pilarski K., Pilarska A.A., Witaszek K., Dworecki Z., Żelaziński T., Ekielski A., Makowska A., Michniewicz J., 2016. The impact of extrusion on the biogas and biomethane yield of plant substrates. *J. Ecol. Eng.* 17 (4), 264–272.
- Potter R., Stojceska V., Plunkett A., 2013. The use of fruit powders in extruded snacks suitable for Children's diets. *LWT-Food Sci. Technol.* 51, 537–544.
- Riaz M.N., 2000. Introduction to extruders and their principles. W: M.N. Riaz (red.), *Extruders in Food Applications.* CRC Press, Boca Raton FL, 1–23.
- Rudloff J., Bastian M., Heidemeyer P., Kretschmer K., 2011. Compounding: modeling planetary roller extruders. *Kunststoffe International* 6, 28–32.
- Rudloff J., Lang M., Kretschmer K., Heidemeyer P., Bastian M., Koch M., 2014. Analysis of the process behavior for planetary roller extruders. W: 8th Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, 1–11. URN:urn:nbn:de:gbv:ilm1-2014iwk-045:7.
- Ryu G.H., Ng P.K., 2001. Effect of selected process parameters on expansion and mechanical properties of wheat flour and whole cornmeal extrudates. *Starch/Stärke* 53, 147–154.
- van der Sman R.G.M., Broeze J., 2013. Structuring of indirectly expanded snacks based on potato ingredients: A review. *J. Food Eng.* 114 (4), 413–425.
- Thymi S., Krokida M.K., Pappa A., Maroulis Z.B., 2005. Structural properties of extruded corn starch. *J. Food Eng.* 68 (4), 519–526.
- Wiedmann W., Strobel E., 1987. Processing and economic advantages of extrusion cooking in comparison with conventional processes in the food industry. W: C. O'Connor (red.), *Extrusion Technology for the Food Industry.* Elsevier Applied Science, London, 132–170.
- Wójtowicz A., Kolasa A., Mościcki L., 2013. The influence of buckwheat addition on physical properties, texture and sensory characteristic of extruded corn snacks. *Polish J. Food Nutr. Sci.* 63 (4), 239–244.
- Wójtowicz A., Kozak M., Lewandowska Z., 2014. Wybrane właściwości prażynek ziemniaczanych z dodatkiem otrąb zbożowych. *ZPPNR* 577, 115–124.
- Wójtowicz A., Mitrus M., Oniszczyk T., Mościcki L., Kręcisz M., Oniszczyk A., 2015. Selected physical properties, texture and sensory characteristics of extruded breakfast cereals based on wholegrain wheat flour. *Agric. Agric. Sci. Procedia* 7, 301–308.

- Wójtowicz A., Oniszczyk A., Oniszczyk T., Kocira S., Wojtunik K., Mitrus M., Kocira A., Widelski J., Skalicka-Woźniak K., 2017. Application of Moldavian dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) leaves addition as a functional component of nutritionally valuable corn snacks. *J. Food Sci. Technol.* 54 (10), 3218–3229.
- Wójtowicz A., Zalewska-Korona M., Jabłońska-Ryś E., Skalicka-Woźniak K., Oniszczyk A., 2018. Chemical characteristics and physical properties of functional snacks enriched with powdered tomato. *Polish J. Food Nutr. Sci.* 68 (3), 251–261.
- Zheng J., Rehmann L., 2014. Extrusion pretreatment of lignocellulosic biomass: A review. *Int. J. Mol. Sci.* 15 (10), 18967–18984.

THE EXTRUSION-COOKING – SELECTED TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS

Summary. The present work has presented selected aspects of extrusion-cooking techniques and possibilities of applications depend on technical solutions applied. Various types of extruders are used depend on the number of screws: single screw, co-rotating and counter-rotating twin screw extruders and multiple screws planetary extruders. Numerous working conditions, as low or high shearing forces, low or high pressure, and short or wide residence time distribution, may affect on application possibilities of extruders. Many variables can be regulated during processing as the screw speed, feed rate, temperature, pressure, compression intensity or residence time to obtain wide range of products with desired features. Novelty is the possibility to apply the planetary extruders in food sector as well as in the processing of polymers and chemicals. Extruders are composed of few main parts: the feeding system, the screw or screws, the barrel, the die and the cutting mechanism. Extruders can vary with respect to screw, barrel and die configuration. The extruder barrel is divided into feeding, kneading and high-pressure zones. Inside the barrel there is working screw or screws with various configuration. Several new advantages have been designed due to application of modular screws instead of monolith ones. Screw elements can vary in number and shapes, each segment is designed for a specific purpose. Possibilities of creating the screw functionality have emerged due to a combination of many working elements, including conveying, mixing, backflow, kneading, shearing, compressing, venting, or spacing disks, which are placed according to the specification on a grooved spindle/shaft acting as a core. The possibility of designing the screw configuration makes the process very flexible, thus it could be adjusting the mixing intensity, shear forces, pressure building or material residence time in the working space. Also, the new types of extrudates can be designed due to the application of coextrusion, i.e. dual- or multicolored breakfast cereals, snacks or pet food. Pre-conditioning with water or steam can be used before the extrusion process to uniform particles hydration, reduction of retention time within the extruder, increasing throughput, and reducing the costs of energy involved in the process. Wide range of raw materials and additives can provide the possibility to create physicochemical properties of extrudates. Some new applications of extrusion have been mentioned, as biopolymers, thermoplastic starch or pretreatment of lignocellulose biomass or wastes for biogas plants. Due to many advantages of the extrusion-cooking its future application is certainly not yet finally defined.

Key words: extrusion-cooking, extruder, screw configuration, planetary extruder