

Operacje (procesy) jednostkowe w przetwórstwie spożywczym

Streszczenie

W artykule przedstawiono historię powstania i rozwoju dyscypliny inżynieria procesowa, jako nauki o operacjach jednostkowych. Są one stosowane w technologiach przemysłu chemicznego, przetwórstwa kopalni, czy technologiach inżynierii środowiska. W szczególności uwzględniono wykorzystanie tej koncepcji w technologiach przetwórstwa spożywczego. Szerzej omówiono dwie operacje mechaniczne: rozdrabnianie i granulację.

Słowa kluczowe: procesy jednostkowe, rozdrabnianie, granulacja

Unit operations (processes) in food production

Summary

The brief history of process engineering as a science discipline on unit operations was presented in the paper. Unit operations are usually applied in technology of chemical industry, mineral processing or technology of environmental engineering. In particular, this concept was applied in a food processing industry technology. Furthermore, two unit operations: disintegration and granulation were reviewed in more details.

Key words: unit operation, disintegration, granulation

Wprowadzenie

Historycznie pojęcie operacji (procesów) jednostkowych pojawiło się, jako pierwszy paradygmat w nowopowstałej, na początku XX wieku, dyscyplinie naukowej: inżynieria chemiczna. Pojęcie to sformułował w roku 1915 Artur D. Little z Massachusetts Institute of Technology (Strumiłło, 2007). Stwierdził on, że wszystkie znane wówczas technologie chemiczne, mimo wykorzystywania różnych surowców oraz odmiennych końcowych produktów, mogą być rozpatrywane jako występujące w odpowiedniej kolejności podstawowe operacje (procesy) jednostkowe. Nowa koncepcja, przyjęta tak w pracach badawczo-rozwojowych jak i w nauczaniu, polegała na założeniu, że te podstawowe operacje jednostkowe, tj. przykładowo: destylacja, filtracja, suszenie itp., przebiegają wg tych samych zasad dla różnych technologii przemysłu chemicznego. Z punktu widzenia postępu technicznego spodziewano się znaczących rezultatów w wyniku zwiększenia efektywności tych operacji jednostkowych poprzez lepsze poznanie występujących w nich zjawisk, a w konsekwencji odpowiednich modernizacji procesowo-aparaturowych. W obszarze nauczania specjalista wykształcony w takim zakresie mógł być zatrudniony w różnych zakładach przemysłu chemicznego, wcześniej nastawionych na absolwentów studiujących konkretne technologie.

Zwykle procesy jednostkowe zestawia się w czterech grupach:

1. Procesy dynamiczne (mechaniczne), do których zalicza się:
 - operacje z materiałami ziarnistymi, tj.: rozdrabnianie, klasyfikacja ziarnowa, aglomeracja, czy mieszanie materiałów ziarnistych,
 - operacje z udziałem układów dwu i trójfazowych, w których wykorzystywane są zjawiska fizyczne, a których celem, jest uzyskanie jednorodności takich układów

(mieszane) lub ich separację (np. odpylanie gazów, rozdzielanie zawiesin).

2. Procesy cieplne, których celem jest kontrolowane ogrzewanie, czy też chłodzenie substancji, które może prowadzić do jej zamrożenia. Procesem cieplnym jest również zateżnienie roztworów w wyniku odparowania części rozpuszczalnika, co może spowodować krystalizację.
3. Procesy dyfuzyjne, takie jak: destylacja, rektyfikacja, ekstrakcja, ługowanie czy suszenie.
4. Procesy reaktorowe w czasie których w odpowiednich, celowo wytworzonych warunkach, mamy do czynienia z reakcjami chemicznymi bądź biochemicznymi.

Procesy jednostkowe w technologiach spożywczych

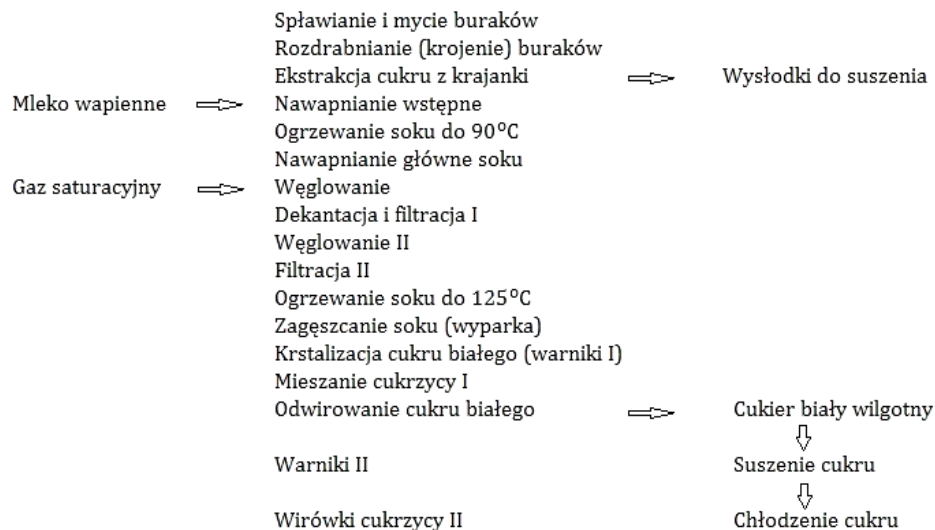
Koncepcja analizy technologii przetwórczych z punktu widzenia procesów jednostkowych w połączeniu z zagadnieniami aparaturowymi, w latach 60-tych ubiegłego wieku została przejęta przez inne dyscypliny naukowe i branże przemysłowe. Okazała się ona również przydatna (w sensie naukowo-badawczym oraz dydaktycznym) w technologiach przetwórstwa rolno-spożywczego (Pijanowski i in., 2009; Lewicki, 2005). Specyfika surowców i produktów w tym przypadku narzuca wiele dodatkowych wymagań odnośnie parametrów procesów i materiałów aparatów, ale mechanizmy zjawisk są wielu przypadkach takie same. Dotyczy to w szczególności zjawisk fizycznych i chemicznych, do których mogą dochodzić odmiennie zjawiska biochemiczne.

Rozszerzenie obszaru badań poza chemię było powodem nieformalnego powstania nowej dyscypliny naukowej: inżynieria procesowa. Zwiększono w ten sposób obszar wykorzystania tej koncepcji badawczej i dydaktycznej nie tylko na przetwórstwo rolno-spożywcze, ale też na przetwórstwo kopalni, czy systemy inżynierii środowiska.

Wzorcową technologią w branży rolno-spożywczej, w której wyraźnie można wyodrębnić poszczególne operacje jednostkowe jest technologia cukrownicza. Uproszczony schemat technologiczny produkcji cukru z buraków cukrowych pokazano na rysunku 1. Wyróżniamy w nim, jak widać ze schematu, wiele typowych operacji jednostkowych, w większości z grupy operacji dynamicznych (rozdrabnianie, rozdzielanie zawiesin) i cieplnych (ogrzewanie, chłodzenie, krystalizacja). Bardzo istotnym procesem jest też suszenie otrzymanego produktu. Względy ekonomiczne są powodem, iż w ocenie procesu produkcyjnego cukru ważnym elementem jest gospodarka cieplna. Analiza i moder-

nizacja procesowo-aparaturowa całego cyklu produkcyjnego z tego punktu widzenia jest ciągle aktualna i dokonywana. Szczególnie kosztochłonne a więc atrakcyjne dla badaczy i konstruktorów aparatury jest suszenie i chłodzenie cukru. Wprowadzane są tutaj nowe rozwiązania procesowo-aparaturowe. Okazało się, że korzystnie jest prowadzić suszenie w warstwie wibro-fluidalnej (Heim i Tomalczyk, 2000; Heim i Tomalczyk, 2011).

Powstały w tej koncepcji problem strat produktu w wyniku unoszenia pyłu cukrowego z powietrzem wymaga odpowiedniego rozwiązania aparaturowego (Heim i Tomalczyk, 2010).



Rys. 1. Uproszczony schemat technologiczny produkcji cukru z buraków cukrowych
Fig. 1. Simplified flowchart for the production of the sugar from sugar beets

W innych technologiach przetwórstwa rolno-spożywczego występują praktycznie procesy jednostkowe ze wszystkich czterech wyżej wymienionych grup. I tak przykładowo z operacji dynamicznych (mechanicznych) często mamy do czynienia z rozdrabnianiem (mielenie ziaren zbóż, rozdrabnianie – kutrowanie mięsa, rozdrabnianie owoców i warzyw), aglomeracją (granulacja mleka, kawy czy wieloskładnikowych produktów spożywczych), mieszaniem układów jedno i wielofazowych oraz rozdzielaniem zawiesin (sedymentacja, filtracja, wirowanie). Obszerność zagadnień związanych z tematyką artykułu jest powodem, że w dalszej jego części szczegółowiej zostaną omówione problemy związane tylko z dwoma operacjami: rozdrabnianiem i aglomeracją. Uzupełnieniem jest krótkie omówienie dwóch nietypowych operacji często występujących w technologiach przetwórstwa spożywczego: ekstruzji oraz płatkowania.

Rozdrabnianie

Pod określeniem rozdrabnianie rozumie się celowy podział cząstki na części poprzez zniszczenie wiązań między elementami struktury materiału. Wymaga to użycia odpowiednich sił niszczących. Pod określeniem odpowiednich sił rozumie się nie tylko wielkość, ale również ich rodzaj (przykładowo: ściskające, tnące, udarowe...). Pierwsze sposoby rozdrabniania zostały wymyślone i zastosowane przez człowieka już na początku jego cywilizacyjnego roz-

woju i miały na celu pozyskanie w odpowiedniej formie żywności (rozbijanie skorup owoców, mielenie ziaren), czy też materiałów budowlanych (kruszenie skał, cięcie drewna). Naukowe podstawy procesu zaczęły być tworzone w XIX wieku, kiedy to powstały pierwsze tzw. hipotezy Rittingera i Kicka, później rozszerzane przez Rebintera, Bonda czy Bracha. Łączą one nakłady energetyczne na rozdrabnianie (pracę rozdrabniania) z własnościami wytrzymałościowymi materiału i w pewnym ograniczonym zakresie, ze stopniem rozdrobnienia. Teorie te opracowano w zasadzie dla materiałów kruchych (sprężysto-kruchych i plastyczno-kruchych) o strukturze krystalicznej i nie spełniają one swojej roli w przypadku materiałów włóknistych czy plastycznych z jakimi często mamy do czynienia w przetwórstwie rolno-spożywczym (przykładowo: mięso, owoce i warzywa). W literaturze krajowej stosowany jest podział na materiały kruche, lepko-sprężyste i lepko-plastyczno-sprężyste (Dowgiało, 2006). Cechą charakterystyczną większość surowców spożywczych jest występowanie powłoki zewnętrznej (różniacej się istotnie własnościami wytrzymałościowymi od materiału wewnętrznego) oraz ich tekstura. Przykładowo w przypadku miększu jabłka, który posiada cechy lepko-sprężyste, pod wpływem obciążeń mogą w nim występować odkształcenia sprężyste, plastyczne i lepkie. Analizowano to m.in. w opracowaniach: (Jakubczyk i Lewicki, 2003) oraz (Nadulski, 2005).

Trzeba ponadto dodać, iż rozdrabnianiu mogą podlegać również cząstki płynne lub półpłynne o budowie jednorodnej (kropki) lub niejednorodnej (komórki mikroorganizmów). Z rozdrabnianiem może też być powiązany proces dyspergowania ciał stałych w cieczy lub dwóch cieczy nierozpuszczalnych wzajemnie w sobie (tworzenie emulsji). Aby wytworzyć trwałą zawiesinę dyspergowanie ciał stałych w cieczy wymaga zwykle obecności dodatkowych substancji błonotwórczych i środków powierzchniowo czynnych.. Dyspergowanie jest fizykochemicznym procesem tworzenia nowej powierzchni rozdziału faz i towarzyszy mu obniżenie swobodnej energii powierzchniowej cząstek ciała stałego na skutek adsorpcji na ich powierzchni molekuł substancji wiążącej. Składa się on z trzech podstawowych stadiów, z zasady nakładających się na siebie:

- zwilżanie spoiwem agregatów i pierwotnych cząstek ciała stałego i wypieranie z ich powierzchni zaadsorbowanych gazów (napięcie powierzchniowe na granicy rozdziału faz obniża się),
- peptyzacja agregatów i cząstek w wyniku adsorpcyjnego blokowania składnikami spoiwa dużej części koagulacyjnych aktywnych ośrodków,
- stabilizacja rozproszonych cząstek ciała stałego zawieszonych w spoiwie w wyniku powstawania szczelnych usieciowanych powłok, tworzących się drogą adsorpcji na powierzchni ziaren z molekuł substancji błonotwórczych i środków powierzchniowo czynnych. Powłoki te zapobiegają łączeniu się ziaren, a tym samym zapewniają stabilność układu.

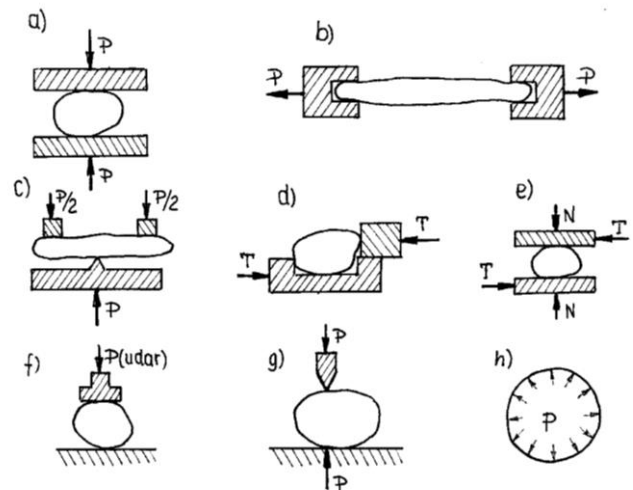
W przypadku tworzenia emulsji dwóch cieczy wymagane jest dostatecznie duże rozbięcie kroplel fazy rozproszonej w fazie ciągłej.

Celem rozdrabniania w technologiach przetwórstwa rolnospożywczego może być:

- Zwiększenie powierzchni cząstek materiału dla umożliwienia (przyspieszenia) przebiegu procesów dyfuzyjnych (przykładowo suszenia owoców i warzyw, ekstrakcji oleju czy cukru...), bądź procesów biochemicznych (fermentacja brzołki, zacieru...);
- Uzyskanie określonej wielkości cząstek produktu (kasze, mąka, krajanka warzywna...);
- Umożliwienie rozdzielenia składników cząstek o budowie niejednorodnej (niszczenie spójności okrywy ziaren czy ściany komórkowej mikroorganizmów);
- Nadanie produktowi odpowiednich cech organoleptycznych.

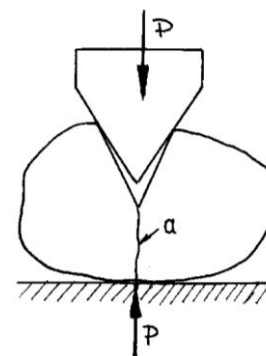
W szeroko rozumianym procesie rozdrabniania wyróżnić można 8 mechanizmów dezintegracji cząstki (rys. 2). Zgniatanie (ściskanie) charakteryzuje wolny w czasie przyrost siły powodującej powstanie w cząstce rozdrabnianej naprężeń niszczących. Natomiast w przypadku uderzenia mamy do czynienia z gwałtownym działaniem siły od ruchomego elementu maszyny (rozdrabniacze bijakowe, młotkowe, pretowe...), lub też w wyniku zderzenia wzajemnego ziaren poruszających się z dużymi prędkościami względnie albo zderzenia ziarna z nieruchomym elementem maszyny (młyny strumieniowe). Ze ścieraniem mamy do czynienia, gdy ziarno jest dociskane pewną, stosunkowo niewielką siłą normalną (nieniszczącą) do powierzchni elementu roboczego maszyny lub do innego ziarna i jedno-

częściej występuje ruch względny tych elementów w kierunku stycznym do stykających się powierzchni. Siła normalna docisku powinna być dostatecznie duża, aby wywołać siłę tarcia zdolną oderwać z powierzchni ziarna niewielkie (w stosunku do wymiarów ziarna) drobiny. Przy ścinaniu podział cząstki na części występuje wzdłuż powierzchni równoległej do linii działania dwóch sił równych, przeciwnie skierowanych, przesuniętych względem siebie o niewielką odległość. Powodują one na tej powierzchni podziału niszczące naprężenia styczne, a rozdzielone części przemieszczają się względem siebie. W przypadku rozłupywania bądź przecinania jeden z elementów maszyny (lub dwa) posiada ostrze.



Rys. 2. Mechanizmy rozdrabniania: a – ściskanie (zgniatanie), b – rozciąganie, c – zginanie, d – ścinanie, e – ścieranie, f – uderzenie, g – przecinanie lub rozłupywanie, h – ciśnieniowe

Fig. 2. The grinding mechanism: a – compression (squeezing), b – stretching, c – bending, d – shearing, e – abrasion, f – hitting, g – cutting or splitting, h – ressurized



Rys. 3. Mechanizm rozłupywania

Fig. 3. The mechanism of splitting

Jeżeli materiał ziarna jest kruchy, a kąt rozwarcia ostrza jest dostatecznie duży następuje wbijanie się klinowe ostrza w cząstkę, co wywołuje powstanie na powierzchni „a” (rys. 3) niszczących naprężeń rozrywających i podział cząstki wzdłuż tej płaszczyzny na dwie części. W przypadku materiału plastycznego, czy włóknistego oraz zastosowania ostrza o małym kącie rozwarcia, naprężenia niszczące mają bardzo złożony charakter i występują jedynie w warstwie położonej w sąsiedztwie przemieszczającego się ostrza. Innymi cechami odróżniającymi przecinanie od klasycznego ścinania jest brak

przemieszczania się względem siebie dzielonych elementów cząstki, oraz to iż przy ścinaniu niszczące naprężenia styczne muszą wystąpić na całej powierzchni podziału cząstki.

W obu wersjach: rozłupywania i przecinania, obok sił koniecznych do wywołania odpowiednich naprężeń niszczących w cząstce dzielonej, występuje dodatkowe siły oporu ruchu ostrza związane z tarcieniem na obu jego powierzchniach (Dowgiałło, 2002). Uwzględniony na rysunku 2 mechanizm „h” dotyczy jedynie rozdrabniania cząstek ciekłych i związany jest ze zjawiskiem gwałtownego wzrostu różnicy ciśnień wewnątrz i na zewnątrz cząstki (np. kawitacji).

Decydujący wpływ konkretnego mechanizmu lub mechanizmów na dezintegrację cząstki ma struktura materiału oraz konstrukcja elementów roboczych urządzenia rozdrabniającego. Chociaż dla danego surowca możliwe jest efektywne prowadzenie rozdrabniania nawet kilkoma metodami, z wykorzystaniem kilku mechanizmów, a więc z użyciem różnych urządzeń, to zawsze konieczne jest przy projektowaniu uwzględnienie specyficznych cech materiału i wymaganego efektu procesu (Dutkiewicz i Słowiński, 2015; Dutkiewicz i Dowgiałło, 2014). Wymaganym efektem rozdrabniania jest zwykle otrzymanie jednorodnego produktu o określonej wielkości ziaren. Ale w przypadku materiału biologicznego często dochodzą inne wymagania, przykładowo aby w czasie procesu temperatura materiału przetwarzanego nie przekroczyła ściśle określonej wartości. Natomiast w przypadku dezintegracji mikroorganizmów, gdy wymagane jest rozerwanie ściany komórkowej, nie może dochodzić do mechanicznego zniszczenia struktury i funkcji składników wewnętrznych komórek (organelli, biopolimerów, fizjologicznie aktywnych substancji i innych).

W Polsce problemami rozdrabniania zajmują lub zajmowały się zespoły badawcze z kilku ośrodków naukowych. Świadcza o tym takie opracowania jak przykładowo: (Grochowicz i Zawisłak, 2000; Zawisłak, 2006; Andrejko i Grochowicz, 2008; Laskowski i in., 2001; Niedziółka i in., 2009; Kusińska i Starek, 2014; Dziki i Przypek-Ochab, 2009; Dziki i in., 2010; Cacek-Pietrzak i in., 2009; Korpysz i in., 2007; Szymanek i Dreszer, 2011; Opielak, 1997; Opielak i Komsta, 2000; Flizikowski, 2005; Flizikowski i Kamyk, 2008; Mięszkański, 2002; Molendowski, 2005; Wiercioch i in., 2008; Obidziński i Hejft, 2000; Jakubczyk i Yeh An, 2009; Lisowski i in., 2012; Warechowska, 2014; Frączek i in., 2009; Marks, 2010; Komsta, 2000; Heim i in., 1999; Heim i Solecki, 2000; Heim i in., 2003; Heim i in., 2005; Heim i Solecki, 2011; Solecki, 2012).

Granulacja

Proces granulacji w najbardziej ogólnym pojęciu jest rozumiany jako wytwarzanie cząstek stałych o odpowiednim kształcie, wymiarach i właściwościach fizyko-chemicznych. W definicji tej mieści się wiele, często odmiennych sposobów otrzymywania takich produktów. Chociaż z założenia otrzymane granulki mają być w stanie stałym, to można je uzyskiwać ze stopu, zawiesiny lub z proszku (pyłu). W przypadku stopu lub zawiesiny proces jest realizowany najczęściej w złożu fluidalnym i może być powiązany z wymianą ciepła, krystalizacją czy też odparowaniem. W warstwie fluidalnej następuje ponadto zderzanie drobnych cząstek w rezultacie czego może dochodzić do ich łączenia (aglomeracji). Granulacja z zawiesiny może być prowadzona też w aparatach

z mieszadłami mechanicznymi (zaopatrzonymi zwykle w płaszcz grzejny), w których w wyniku odparowania cieczy układ przybiera formę najpierw pasty, a potem ciała stałego, w sposób ciągły rozdrabnianego, na zwykle nieregularne aglomeraty.

Najczęściej jednak granulację prowadzi się używając, jako surowca drobnych cząstek stałych (proszku, pyłu) a produktem są większe wymiarowo granulki, będące aglomeratami tych ziaren pierwotnych. Taka granulacja aglomeracyjna może być realizowana bezciśnieniowo lub też ciśnieniowo. W pierwszym przypadku proces prowadzić można w złożu fluidalnym lub w przesypującej się warstwie materiału granulowanego (aparaty bębnowe, talerzowe, wibracyjne). W granulacji ciśnieniowej (pastylkowanie, brykietowanie prasowanie), wytworzenie wysokiego ciśnienia w zamkniętych porcjach materiału ziarnistego powoduje wzajemne zbliżenie się ziaren pierwotnych i często ich deformację plastyczną a w konsekwencji powstanie odpowiednio wytrzymałych mechanicznie aglomeratów. W granulacji bezciśnieniowej, jak też często w granulacji ciśnieniowej, gdy surowcem są proszki (pyły), stosuje się dodatkowo ciecz wiążącą, ułatwiającą proces aglomeracji, a która na dalszym etapie technologicznym jest odparowywana.

Porównując granulację ciśnieniową i bezciśnieniową trzeba stwierdzić, że urządzenia do granulacji ciśnieniowej są znacznie bardziej rozbudowane konstrukcyjnie, ich cena jest wysoka, a nakłady energetyczne dużo wyższe w porównaniu z aparatami do granulacji bezciśnieniowej. Natomiast produkty granulacji ciśnieniowej charakteryzują się identycznością kształtu i wielkości oraz znacznie wyższą wytrzymałością mechaniczną.

Forma zgranulowanego materiału w porównaniu z formą proszkową (pylistą) posiada istotne zalety, tj.:

1. Wyeliminowanie w dużym stopniu pylenia w czasie manipulacji tymi materiałami.
2. Uniknięcie kłopotliwego zbrylania się materiału.
3. Korzystniejsze zachowanie się materiałów zgranulowanych w czasie transportu w przenośnikach i przy dozowaniu.
4. Zapobieganie segregacji w materiałach wieloskładnikowych (przykładowo nawozy lub mieszanki paszowe).

Ponadto odpowiednio uformowane granulki dają możliwość uzyskania odmiennych właściwości dotyczących szybkości ich rozpuszczania. Klasyczne metody granulacji bezciśnieniowej są też stosowane do wytwarzania granulki wieloskładnikowych w takiej postaci, że poszczególne składniki są nakładane w formie warstw powierzchniowych co determinuje kolejne ich uwalnianie w wyniku rozpuszczania. Na podobnej zasadzie opiera się otoczkowanie nasion. Polega to na bezciśnieniowym formowaniu się granulki z nasion i dodatkowego pylistego materiału z użyciem wodnego roztworu kleju. W granulatorze (bębnowym, talerzowym) utworzone w pierwszym etapie granulki są następnie w wyniku zderzeń zagęszczane oraz następuje wzrost ich własności wytrzymałościowych (Domaradzki i in. 2006; Domaradzki i in., 2012; Domaradzki i in., 2014).

Granulacja jest stosowana w celu uzyskania wygodnej, akceptowanej przez użytkowników końcowej formy produktu, ale też często są granulowane surowce lub półpro-

dukty, aby ułatwić bądź nawet umożliwić ich stosowanie w odpowiednich technologiach. Granulacje produktów stosuje się w wielu technologiach wytwórczych. Ze względu na wielkość produkcji dominuje przemysł chemiczny (nawozy sztuczne) i farmaceutyczny, ale często wykorzystywana jest ta operacja jednostkowa w przetwórstwie żywności, tak dla ludzi jak i dla zwierząt, czy też szeroko pojętej produkcji paliw stałych z wykorzystaniem odpadowych surowców roślinnych. Granulację stosuje się również w wielu technologiach związanych z inżynierią środowiska.

W kontekście powyższych stwierdzeń nie dziwi to, że granulacja, tak z punktu widzenia procesowego jak i aparaturowego, znajduje się w centrum zainteresowania wielu naukowych grup badawczych. Prowadzone w różnych ośrodkach naukowych badania dotyczą w szczególności takich zagadnień jak:

- analiza sił spójności między ziarnami tak suchymi jak i przy powstających mostkach cieczowych,
- wzajemne zachowanie się kropeł cieczy i cząstek granulowanych przy ich kontakcie,
- przemieszczanie się materiału granulowanego w aparatach różnych typów (fluidyzacyjne, przesypowe, ciśnieniowe), w tym kinematyka i dynamika złoża,
- zagęszczanie się materiału w brykacie (pastylce, wyprase) w czasie jego tworzenia w aparacie ciśnieniowym
- kinetyka procesu aglomeracji bezciśnieniowej, rozumiana, jako zmiana w czasie średniego wymiaru aglomeratu i wpływ na tą kinetykę parametrów procesowo- aparaturowych,
- wpływ warunków prowadzenia granulacji na właściwości produktu, tj. wytrzymałość granulek, a w przypadku granulacji bezciśnieniowej ich kształt, wielkość i jednorodność.

W przeszłości dominowały w badaniach metody eksperymentalne. Ostatnio coraz częściej prowadzi się symulacje numeryczne, w szczególności dynamiki cząstek, czy przemieszczania się wilgoci w granulach oraz w złożu.

W Polsce badania granulacji bezciśnieniowej prowadzone są, bądź były w kilku ośrodkach naukowych (Feliks, 2009; Feliks, 2013; Heim, Gluba 1996; Heim i in. 1998; Baran i Kobiałka, 1997; Warechowski, 2000; Peron i in., 2008; Zawiaślak i Sobczak, 2007; Hejft i Leszczuk, 2011; Bakoniuk i in., 2013; Borowik i in., 2015; Poćwiardowski i in., 2015; Gluba, 2012). Natomiast szerokie badania granulacji ciśnieniowej są prowadzone głównie w Politechnice Białostockiej, w Uniwersytecie Rolniczym w Lublinie oraz w AGH w Krakowie (Hejft i Czaban, 1997; Hejft i Demaniuk, 2000; Hejft, 2011; Obidziński, 2011; Hejft 2014; Obidziński i in., 2015; Kulig i Laskowski, 2006; Niedziółka i Zuchniarz, 2009; Kulig i in., 2011; Drzymała i Hryniewicz, 1997; Bembenek i Hryniewicz, 2010).

Ekstruzja i płatkowanie

Procesy ekstruzji i płatkowania można w pewnym sensie uznać jako specyficzne sposoby granulacji, czyli otrzymywania cząstek o określonych wymaganych cechach.

Ekstruzja polega na wytłaczaniu materiału poddawanego jednocześnie obróbce mechanicznej (mieszanie, rozcieranie, ściskanie) i cieplnej (nagrzewanie). W tym czasie, który w ekstremalnych warunkach trwa od kilkadziesiąt sekund

do kilku minut, w materiale biologicznym zachodzą istotne zmiany fizykochemiczne. Wzrost temperatury przetwarzanych surowców (wstępnie w stanie układów ziarnistych) jest wynikiem wzrostu ciśnienia, tarcia wewnętrznego, jak również przepięcia ogrzewania. Komora robocza ekstrudera, ze ślimakiem (lub dwoma ślimakami), jako organem roboczym, posiada w tym celu płaszcz grzejny. Wytłaczany przez otwory tzw. matrycy materiał ekspanduje wskutek gwałtownego obniżenia ciśnienia oraz odparowania wody. Produktem są ekstrudaty o różnych kształtach i strukturze w zależności od warunków procesowo-aparaturowych (Mościcki i in. 2007; Grochowicz, 1996; Żeleziński, 2010; Żeleziński i Ekielski, 2012; Gambuś i in., 2012; Tomaszewska-Ciosok i in., 2012). Ekstruzję prowadzi się w zasadzie w trzech zakresach temperatur: 50-60°C (tzw. ekstruzja na zimno), w niskich temperaturach (60-120°C), lub też w wysokich temperaturach (150-200°C).

Płatkowanie jest operacją jednostkową w czasie której następuje zniszczenie struktury wewnętrznej cząstki, w wyniku wytworzenia w niej naprężeń przekraczających wytrzymałość mechaniczną materiału. Jest to podstawowa cecha rozdrabniania. Celem płatkowania nie jest jednak podział cząstki na drobniejsze elementy, natomiast zmiana kształtu cząstki i jej struktury wewnętrznej. Płatkowaniu poddaje się ziarna zbóż, tak dla celów żywieniowych człowieka, jak i pasz dla zwierząt (Łysiak i in., 1995; Niemiec i Romański, 2001; Panasiewicz i in., 2009; Zawiaślak, 2006; Blichniarz-Kania i in., 2015).

Bibliografia

- Andrejko, D., Grochowicz, J. (2008). Wpływ wilgotności nasion łubinu na energię rozdrabniania. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 6, 53-55.
- Bakoniuk, J.R., Miastkowski, K., Leszczuk, T. (2013). Wpływ lepkości na charakterystykę granulometryczną błonnika spożywczego granulowanego bezciśnieniowo. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 13-18.
- Baran, J., Kobiałka, R. (1997). Grudkowania materiałów drobnoziarnistych w rynnowym grudkowniku wibracyjnym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 22, 21-30.
- Bembenek, M., Hryniewicz, M. (2010). *Badania i opracowanie metody doboru układu zagęszczania prasy walcowej*. Wyd. AGH Kraków, ISBN 8374643455.
- Blichniarz-Kania, A., Andrejko, D., Ślaska-Grzywna, B., Starek, A., Szejgiec, P., Krzaczek, P. (2015). Wpływ wilgotności ziarna jęczmienia na proces płatkowania. *Inżynieria Rolnicza*, 153, 5-14.
- Borowik, M., Schab, S., Biskupski, A., Rusek, P., Bogusz, P., Kowalski Z. (2015). Badania granulacji wapna nawozowego węglanowego metodą talerzową. *Materiały X ogólnopolskiego - Sympozjum GRANULACJA 2015*.
- Cacek-Pietrzak, G., Ceglińska, A., Gondek, E., Jakubczyk, E. (2009). Wpływ struktury ziarna pszenicy na proces rozdrabniania. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, 53-56.
- Domaradzki, M., Korpala, W., Weiner, W. (2006). Porównanie właściwości nasion otoczonych uzyskiwanych przy pomocy 10% roztworu dekstryny i 2,5% roztworu alkoholu poliwinylowego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 29, 13-21.

- Domaradzki, M., Kaniewska, J., Weiner, W. (2012). The application of agglomerative granulation for seeds. *Chemik*, 66(5), 473-478.
- Domaradzki, M., Szymura, J., Lamkiewicz, J., Sadowski, Cz. (2014). Warzywa ekologiczne – przygotowanie nasion do siewu. Inokulacja nasion zarodnikami grzybów. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 4(4), 11-14.
- Dowgiało, A. (2002). *Siły cięcia w obróbce ryb*. Wyd. Morski Instytut Rybacki, Gdynia.
- Dowgiało, A. (2006). Modelowanie operacji cięcia materiałów rolno-spożywczych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 47-50.
- Drzymała, Z., Hryniewicz, M. (1997). Wyniki badań nad zastosowaniem brykietowania w procesie przygotowania do utylizacji drobnoziarnistych odpadów przemysłowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 21, 25-32.
- Dutkiewicz, D., Dowgiało, A. (2014). Systemowa struktura związku właściwości surowców ze sposobami działania maszyn i aparatów przetwórstwa spożywczego w procesie ich tworzenia. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 4(4), 5-10.
- Dutkiewicz, D., Słowiński, B. (2015). Maszyny i aparatura przetwórstwa spożywczego w ujęciu systemowym. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, 138-144.
- Dziki, D., Przypek-Ochab, D. (2009). Ocena energochłonności rozdrabniania ziarna pszenicy zróżnicowanego pod względem twardości. *Inżynieria Rolnicza*, 5, 61-67.
- Dziki, D., Laskowski, J., Biernacka, B. (2010). Energochłonność udarowego rozdrabniania ziarna zbóż. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, 64-67.
- Feliks, J. (2009). Badania symulacyjne ruchu grudek w rynnowym grudkowniku wibracyjnym dla różnych średnic rynny. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 4, 38-39.
- Feliks, J. (2013). Nowy model rynnowego grudkownika wibracyjnego. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 3, 171-173.
- Flizikowski, J. (2005). *Konstrukcja rozdrabniaczy żywności*. Wyd. ATR Bydgoszcz. ISBN 8389334429.
- Flizikowski, J., Kamyk, W. (2008). Teoria rozdrabniania ziaren w ruchu. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 6, 84-86.
- Fraćzek, J., Mudryk, K., Wróbel, M. (2009). Zapotrzebowanie mocy jednostkowej do rozdrabniania pedów wierzby na rąbarce toporowej. *Inżynieria Rolnicza*, 6, 69-77.
- Gambuś, H., Matusz-Mirlak, A., Duliński, R., Ziobro, R., Gola-chowski, A. (2012). The influence of extrusion proces on myo-inositol phosphate content and profile in snacks containing rye bran. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 1, 41-44.
- Gluba, T. (2012). *Granulacja bębnowa surowców drobnoziarnistych o różnych składach ziarnowych*. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, 423.
- Grochowicz, J. (1996). *Technologia produkcji mieszanek paszowych*. PWRiL Warszawa. ISBN 83-09-01656-5.
- Grochowicz, J., Zawislak, K. (2000). Badania porównawcze energochłonności rozdrabniania nasion w wlewniku walcowym i rozdrabniaczu bijakowym. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 5-6.
- Heim, A., Gluba, T. (1996). Granulacja dodatków paszowych w układzie ciągłym. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych PAN*, 430, 79-84.
- Heim, A., Kocharński, A., Kocharński, B. (1998). Aglomeracyjna granulacja środków spożywczych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Budowa i Eksploatacja Maszyn*, 120(5), 155-164.
- Heim, A., Solecki, M., Obraniak, A. (1999). Ocena procesu mielenia organicznych frakcji odpadów komunalnych w młynie bębnowym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 26, 221-228.
- Heim, A., Solecki, M. (2000). Dezintegracja bakterii mlekowych w młynie perełkowym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Mechanika*, 254(60), 77-84.
- Heim, A., Solecki, M. (2011). Kinetyka dezintegracji komórek drożdży w młynie perełkowym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 9-10.
- Heim, A., Tomalczyk, M. (2000). Konstrukcja pionowej suszarki cukru z mieszadłami w warstwie fluidalnej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Mechanika*, 254(60), 85-89.
- Heim, A., Kamionowska, U., Kochanek, M., Solecki, M. (2003). Wpływ stężenia zawiesiny mikroorganizmów na uwalnianie białka podczas dezintegracji. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 3, 52-53.
- Heim, A., Kamionowska, U., Solecki, M. (2005) Uwalnianie białka z komórek drożdży *Saccharomyces cerevisiae*. *Inżynieria Rolnicza*, 9, 133-142.
- Heim, A., Tomalczyk, M., Bartczak, Z. (2010). *Construction and investigation of a wet air deduster*. *Environmental Engineering III*, Taylor and Francis Group, London, 25-29. ISBN 978-0-415-54882-3.
- Heim, A., Tomalczyk, M. (2011). Konstrukcja przeponowej chłodziarki cukru. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 11-12.
- Hejft, R., Czaban, J. (1997). Ciśnieniowa aglomeracja materiałów pochodzenia roślinnego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 21, 117-124.
- Hejft, R., Demaniuk, L. (2000). Wytwarzanie brykietów opałowych z odpadowych surowców pochodzenia roślinnego. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, Inżynieria Chemiczna i Procesowa*, 27, 123-130.
- Hejft, R. (2011). Granulowanie i brykietowanie słomy. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 13-14.
- Hejft, R., Leszczuk, T. (2011). Dobór parametrów procesu bezciśnieniowej aglomeracji. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 15-16.
- Hejft, R. (2014). Granulowanie i brykietowanie materiałów pochodzenia roślinnego. *Inżynieria Przetwórstwa Spożywczego*, 4(4), 15-18.
- Jakubczyk, E., Lewicki, P.P. (2003). Własności mechaniczne tkanki jabłka w odniesieniu do jej tekstury. *Acta Agrophysica*, 2, 549-557.
- Jakubczyk, E., Yeh An, I. (2009). Wpływ parametrów rozdrabniania na wielkość cząstek celulozy. *Inżynieria Rolnicza*, 2, 49-55.
- Komsta, H. (2000). Analiza procesów homogenizacji ciśnieniowej emulsji i zawiesin w przemyśle spożywczym. *Rozprawy Naukowe*, 234, Wyd. Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Korpysz, K., Roszkowski, H., Wojdalski, J. (2007). Energetyczne aspekty procesu gniczenia ziarna jęczmienia. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 39-42.
- Kulig, R., Laskowski, J. (2006). Wpływ wybranych właściwości surowców na cechy wytrzymałościowe granulatu. *Inżynieria Rolnicza*, 13, 251-260.

- Kulig, R., Skonecki, S., Laskowski, J. (2011). Wpływ składu surowcowego mieszanek DKA-S i DKA-G na efektywność procesu granulowania. *Inżynieria Rolnicza*, 1, 123-128.
- Kusińska E., Starek A. (2014). Ocena zmienności maksymalnej siły tnącej w zależności od budowy miąższu korzenia buraka ćwikłowego. *Inżynieria Rolnicza*, 1, 91-100.
- Laskowski, J., Łojewska, H., Łysiak, G. (2001). Zastosowanie równania Walkera do oceny energochłonności rozdrabniania ziarna zbóż w rozdrabniaczu bijakowym. *Inżynieria Rolnicza*, 2, 179-185.
- Lewicki, P.P. (2005). *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*. WNT Warszawa. ISBN 83-204-3227-8.
- Lisowski, A., Klonowski, J., Chlebowski, J., Sypuła, M., Kostyra, K., Nowakowski, T., Strużyk, A., Kamiński, J., Powałka, M. (2012). Jednostkowa moc efektywna potrzebna do rozdrabniania roślin energetycznych przeznaczonych na biogaz. *Inżynieria Rolnicza*, 2, 179-188.
- Łysiak, G., Laskowski, J., Melcion, J.P. (1995). Test jednoosiowego ściskania jako próba określenia przydatności odmian kukurydzy do procesu produkcji płatków. *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych*, 424, 285-290.
- Marks, W. (2010). Wpływ wilgotności na zużycie energii bezpośredniej w procesie rozdrabniania żyta i pszenżyta. *Inżynieria Rolnicza*, 7, 125-130.
- Mieszkalski, L. (2002). Metoda wyznaczania strefy rozdrabniania rozdrabniacza z rowkowanymi walcami. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 10-12.
- Molendowski, F. (2005). Energochłonność procesu rozdrabniania surowców roślinnych na przykładzie rdzeni kolb kukurydzy. *Zeszyty naukowe*, 512, Wyd. Akademii Rolniczej we Wrocławiu.
- Mościcki, L., Mitrus, M., Wójtowicz, A. (2007). *Technika ekstruzji w przemyśle rolno-spożywczym*. PWRiL Warszawa. ISBN 9788309010272.
- Nadulski, R. (2005). *Metodyczne aspekty badań mechanicznych właściwości tekstury jabłek*. Rozprawy naukowe 297, Wyd. Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Niedziółka, I., Szymanek, M., Zuchniarz, A. (2009). Zapotrzebowanie mocy podczas rozdrabniania biomasy roślinnej do produkcji brykietów. *Inżynieria Rolnicza*, 1, 213-217.
- Niedziółka, I., Zuchniarz, A. (2009). Wpływ parametrów zagęszczania biomasy roślinnej na właściwości mechaniczne brykietów. *Inżynieria Rolnicza*, 8, 155-160.
- Niemiec, A., Romański, L. (2001). Energochłonność gniecenia wybranych odmian pszenicy przy różnym poziomie wilgotności ziarna. *Inżynieria Rolnicza*, 12, 223-228.
- Obidziński, S., Hejft, R. (2000). Wpływ wilgotności ziarna na energochłonność procesu rozdrabniania. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, 60, 195-202.
- Obidziński, S. (2011). Badania procesu zagęszczania odpadów tytoniowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 29-30.
- Obidziński, S., Kobyliński, M., Dec, D., Piekut, J. (2015). *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 126-130.
- Opielak, M. (1997). *Wybrane zagadnienia rozdrabniania materiałów w przemyśle rolno-spożywczym*. Rozprawy Naukowe Wyd. Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Opielak, M., Komsta, H. (2000). Kierunki badań procesu rozdrabniania sypkich materiałów rolno-spożywczych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej*, 60, 209-216.
- Panasiewicz, M., Zawiślak, K., Sobczak, P. (2009). Wpływ nawilżania parą wodną ziarniaków jęczmienia na energochłonność procesu ich płatkowania. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 1, 54-55.
- Peroń, S., Surma, M., Paśłowska, M. (2008). Granulacja tale rzowa otrębów pszennych z wykorzystaniem gęstwy drożdżowej jako cieczy wiążącej. *Inżynieria Rolnicza*, 5, 175-180.
- Pijanowski, E., Dłużewski, M., Dłużewska, A., Jarczyk, A. (2009). *Ogólna Technologia Żywności*. WNT Warszawa. ISBN 978-83-204-3610-5.
- Poćwiardowski, W., Kaniewska, J., Domaradzka, O. (2015). Granulacja aglomeracyjna wieloskładnikowa. Granulki wielonasienne i wielozarodnikowe. *Materiały X Ogólnopolskiego Symposium GRANULACJA 2015*.
- Solecki, M. (2012). Mechaniczna dezintegracja komórek mikroorganizmów. *Rozprawy Naukowe*, 421, Wyd. Politechniki Łódzkiej.
- Strumiłło, Cz. (red.) (2007). *Inżynieria Chemiczna i Procesowa w Polsce*. Wyd. Polska Akademia Nauk Oddział w Łodzi. ISBN 978-83-86492-41-1.
- Szymanek, M., Dreszer, K.A. (2011). Energochłonność rozdrabniania rdzeni kolb kukurydzy cukrowej. *Inżynieria Rolnicza*, 9, 263-268.
- Tomaszewska-Ciosk, E., Golachowski, A., Drożdż W., Borucki, T., Boruckowska, H., Zdybel, E. (2012). Selected properties of single and double extruded potato starch. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 3, 171-177.
- Warechowska, M. (2014). Wybrane właściwości fizyczne ziarna zbóż a energochłonność rozdrabniania. *Inżynieria Rolnicza*, 1, 239-249.
- Warechowski, J. (2000). *Wpływ warunków procesu aglomeracji na fizyczne i użytkowe właściwości wybranych proszków spożywczych*. Praca doktorska. Wydział Nauk o Żywności Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego.
- Wiercioch, M., Niemiec, A., Romański, M. (2008). Wpływ wielkości ziarniaków pszenicy na energochłonność ich rozdrabniania. *Inżynieria Rolnicza*, 5, 367-372.
- Zawiślak, K. (2006). Przetwarzanie ziarna kukurydzy na cele paszowe. *Rozprawy Naukowe*, 304, Wyd. Akademii Rolniczej w Lublinie.
- Zawiślak, K., Sobczak, P. (2007). Zmiany wybranych właściwości fizycznych granulatu uzyskanego z dodatkiem różnych substancji wiążących. *Inżynieria Rolnicza*, 5, 437-444.
- Żeleziński, T. (2010). Badania procesu ekstruzji mieszanek z udziałem gryki i kukurydzy. *Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych*, 546, 375-381.
- Żeleziński, T., Ekielski, A. (2012). Badania sensoryczne ekstrudatów kukurydziano-gryczanych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1, 50-54.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Heim

Katedra Aparatury Procesowej, Politechnika Łódzka

e-mail: andrzej.heim@p.lodz.pl