

SYMULACJE KOMPUTEROWE W PROJEKTOWANIU URZĄDZEŃ MIESZAJĄCYCH STOSOWANYCH W PRZEMYSŁE SPOŻYWCZYM

Streszczenie

W artykule przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z urządzeniami wykorzystywanymi w procesie mieszania, głównie cieczy i ciał sypkich, w przemyśle spożywczym. Dokonano podziału urządzeń ze względu na typ medium poddawanego mieszaniu. Przedstawiono także przykłady komputerowych symulacji procesu mieszania cieczy i materiałów sypkich.
Słowa kluczowe: mieszanie, mieszalnik, mieszadło, ciecz pseudoplastyczna, DEM, FEM, CFD

Wprowadzenie

Proces technologiczny mieszania jest szeroko stosowany w różnych gałęziach przemysłu. Bez względu na aplikację, polega na wytworzeniu jednorodnej mieszaniny z dwóch lub więcej składników, zarówno pod względem stężenia, fazy, jak i temperatury. Dodatkowo występujące w czasie trwania tego procesu efekty, takie jak ciągły przepływ masy, czy też zachodzące w czasie mieszania reakcje chemiczne i inne, mają ważny i istotny wpływ na uzyskiwany końcowy efekt prowadzonego procesu. W wyniku prowadzenia procesu mieszania zintensyfikowane zostają przemiany fizykochemiczne, procesy przenoszenia ciepła i masy, procesy reakcji chemicznych lub biochemicznych.

W zakładach przemysłu spożywczego mieszanie odbywa się za pomocą urządzeń mechanicznych, procesów strumieniowych i procesów pneumatycznych. Główne cele operacji to [3, 5, 7]:

- ujednoczenie składu produktów, w szczególności gdy stosuje się kilka składników,
- zabezpieczenie przed rozdzielaniem się komponentów,
- zabezpieczenie przed przegrzaniem oraz przypaleniem się produktów,
- zintensyfikowanie procesów wymiany ciepła,
- wywołanie pewnych zjawisk fizycznych (np. zmaślenia się śmietany, wytworzenie emulsji, zapoczątkowanie krystalizacji).

Najczęściej stosowaną metodą mieszania w przemyśle spożywczym jest mieszanie w sposób wymuszony za pomocą urządzeń mechanicznych (mieszadeł) w specjalnych aparatach,

zwanych mieszalnikami, mieszarkami itp.

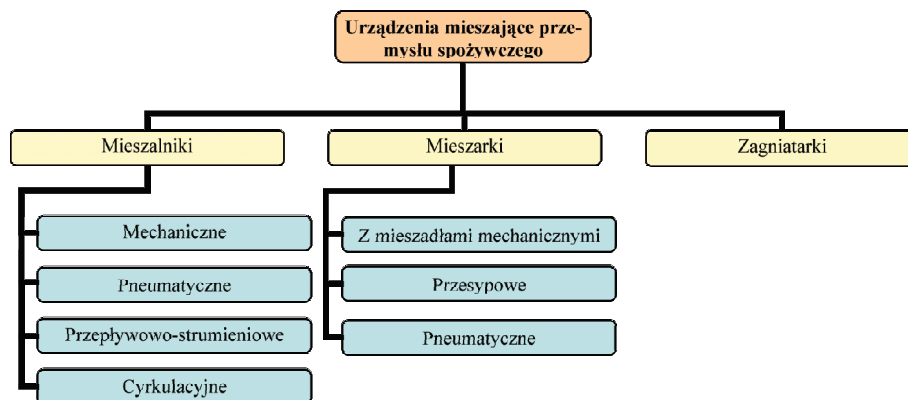
Celem pracy jest przedstawienie zagadnień związanych z urządzeniami wykorzystywanymi w procesie mieszania cieczy i materiałów sypkich.

Urządzenia mieszające wykorzystywane w przemyśle spożywczym

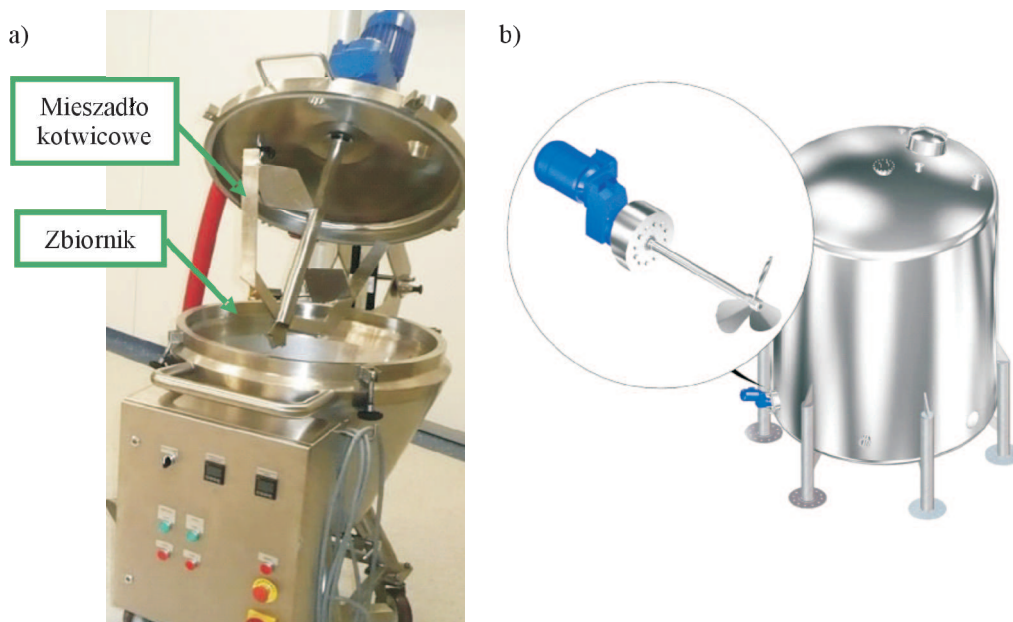
Proces mieszania wykonywany jest w specjalnych aparatach, dedykowanych do konkretnych potrzeb wynikających ze stanu skupienia materiału poddawanego operacji mieszania. Z tego względu, w przemyśle spożywczym aparaty te dzieli się na rys. 1 [3]:

- mieszalniki - służące do mieszania cieczy,
- mieszarki - służące do mieszania materiałów sypkich z ewentualnymi dodatkami stałymi bądź ciekłymi,
- zagniatarki, wygniatarki, ugniatarki do mieszania ciał plastycznych z ewentualnym oddzieleniem fazy ciekłej (np. wygniatanie masła).

Mieszanie mechaniczne w mieszalnikach odbywa się za pomocą mieszadła. Jego konstrukcja obok konstrukcji zbiornika, odgrywa najważniejszą rolę w pracy mieszalnika. W zależności od konstrukcji, mieszadła mechaniczne stosowane w przemyśle spożywczym można podzielić m. in. na: łapowe, śmigłowe, turbinowe, kotwicowe, ramowe oraz ślimakowe. Każde z nich odznacza się odmienną geometrią oraz zastosowaniem. Do mieszania cieczy o dużych lepkościach stosuje się np. mieszadła kotwicowe czy ramowe, natomiast do tworzenia zawiesin wykorzystuje się mieszadła śmigłowe. Na rys. 2 przedstawiono przykłady mieszalników z wymienionymi mieszadłami.



Rys. 1. Podział urządzeń mieszających wykorzystywanych w przemyśle spożywczym [3]
Fig. 1. Classification of mixing machines used in the food industry [3]



Rys. 2. Mieszalnik; a) z mieszadłem kotwicznym, b) z mieszadłem śmigłowym [9, 10]
 Fig. 2. Mixer; a) with an anchor-type stirrer, b) with a propeller stirrer [9, 10]

Mieszarki natomiast, wykorzystywane są w przemyśle spożywczym, jako urządzenia do mieszania ciał stałych sypkich. Ze względu na odmienny charakter mieszania ciał sypkich w porównaniu do cieczy, inne są też rozwiązania konstrukcyjne tych urządzeń. Materiały sypkie (np. ziarno), odmiennie od cieczy nie mają możliwości samoczynnego mieszania się. Do ich wzajemnego przemieszczania się niezbędne jest pokonanie sił tarcia występujących na styku ziaren. Dodatkowo, jeśli składniki różnią się znacznie współczynnikiem kształtu, gęstością i wielkością, trudno jest uzyskać stan równomiernego wymieszania.

Zgniataarki wykorzystywane są w wielu procesach technologicznych takich jak: produkcja past, ciast, mieszanie ciast z rozdrobnionymi ciałami stałymi (cukier) lub cieczami (np. roztwory mleka lub wody) itp. Głównym celem tych procesów jest nie tylko wytworzenie jednorodnej mieszaniny, ale również osiągnięcie odpowiednich właściwości technologicznych poprzez jej zagniatanie, napowietrzenie i nadanie określonych cech mechanicznych. Należy dodać, że termin zagniataarki jest ogólną nazwą urządzeń spożywczych służących do mieszania ciał plastycznych. Bardzo często stosowane są nazwy specyficzne dla danej branży jak np. mięsiarki do ciast, czy ubijarki cukiernicze. Zagniataarki cechują się masywnymi mieszadłami o dużej wytrzymałości mechanicznej, wykonującymi wolny ruch obrotowy lub ruch złożony.

Nowoczesne metody symulacji komputerowych procesu mieszania

Badania procesów i zjawisk fizycznych występujących w przemyśle coraz częściej wspomagane są lub wykonywane wyłącznie za pomocą symulacji komputerowych. Dotyczy to również przemysłu spożywczego. Ciągłe doskonalone programy komputerowe, pod względem jakości obliczeń oraz ich efektywności, pozwalają na podejmowanie złożonych prac i projektów.

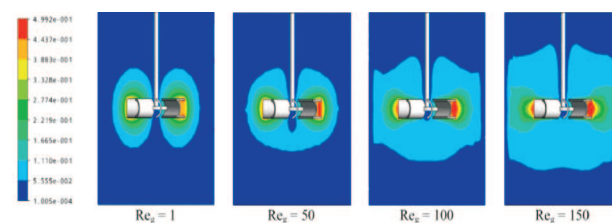
Do symulacji przepływu cieczy stosowane jest oprogramowanie Komputerowej Mechaniki Płynów (ang. *Computational Fluid Dynamics* - CFD) będące jedną z metod komputerowych wykorzystywaną do obliczeń numerycznych. Umożliwia ona rozwiązywanie przepływów z uwzględnieniem lepkości i ściśliwości płynu, przepływów wielofazowych,

reakcji chemicznych, przepływu płynów newtonowskich i nienewtonowskich. Programy te bazują na równaniach różniczkowych ciągłości przepływu, zachowania pędu oraz zachowania energii [8]. Ich rozwiązanie uzyskuje się np. za pomocą Metody Elementów Skończonych (ang. *Finite Element Method* - FEM).

CFD w przemyśle spożywczym wykorzystywana jest do symulacji procesów wentylacji, suszenia, sterylizacji, mrożenia a także mieszania. Obszar zastosowań jest nieustannie poszerzany ze względu na ciągłe udoskonalanie programów symulacyjnych [5].

Analiza procesu mieszania przy użyciu symulacji komputerowych może być pomocna przy określaniu charakteru procesu, doboru typu i geometrii mieszadła, położenie oraz jego usytuowanie itp.

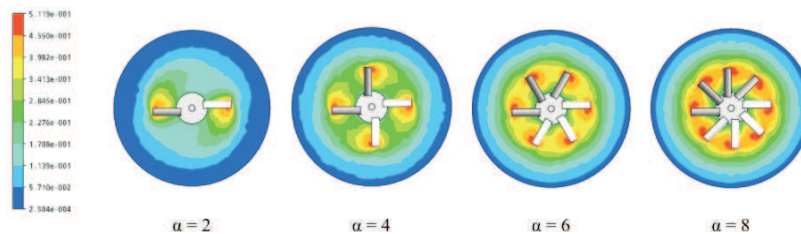
Przykładem może być badanie mieszania cieczy pseudoplastycznej (np. bita śmietana, ketchup, melasa) zaprezentowane w pracy [1]. Podczas badania autorzy analizowali m.in. wpływ prędkości obrotowej mieszadła turbinowego oraz liczby łopatek mieszadła. Na rys. 3 przedstawiono rozkład pola prędkości uzyskanego podczas mieszania w zależności od liczby Reynoldsa, natomiast na rys. 4 zaprezentowano wpływ liczby łopatek na proces mieszania.



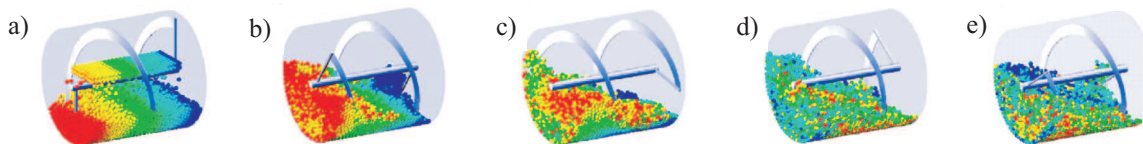
Rys. 3. Pola rozkładu prędkości dla różnych liczb Reynoldsa [1]

Fig. 3. The velocity field distribution for different Reynolds numbers [1]

Badanie pozwoliło wykazać silny wpływ m.in. liczby Reynoldsa na charakter przepływu cieczy w mieszalniku [1]. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej oraz liczby łopatek mieszadła widoczne jest zwiększenie obszarów o intensywniejszym przepływie cieczy (rys. 4).



Rys. 4. Pole rozkładu prędkości dla różnej liczby łopatek [1]
 Fig. 4. The velocity field distribution for different number of blades [1]



Rys. 5. Wizualizacja symulacji mieszania sferycznych granул w mieszarce z mieszadłem wstęgowym przy użyciu DEM; a) czas $t=0$ s; b-e) pozycja granул po czasie 1, 2, 5 i 6 sekundach [2]
 Fig. 5. DEM simulation of the spherical granules in a helical blender; a) step at $t = 0$ s; b-e) position of the granules after 1, 2, 5 and 6 s. [2]

Do symulacji ruchu materiałów sypkich wykorzystywana jest m. in. Metoda Elementów Dyskretnych (ang. *Discrete Element Method* - DEM) będąca zbiorem metod numerycznych obliczających właściwości fizyczne obiektów w ruchu swobodnym. Metodę tą wykorzystuje się w przemyśle spożywczym do modelowania zachowania się ziaren w ruchu (np. w silosach), mieszaniu produktów zbożowych itp. Dzięki dynamicznemu rozwojowi komputerów metoda ta jest coraz częściej stosowana w analizach zachowania materiałów ziarnistych i sypkich. Cykl kalkulacyjny składa się z dwóch niezależnych algorytmów obliczających dwa typy równań [4]:

- równań ruchu - dotyczą każdej cząstki i pozwalają obliczyć przemieszczenia elementów w wyniku działania sił zewnętrznych,
- równań konstytutywnych - obliczają siły wynikające ze wzajemnego oddziaływania na siebie elementów będących w kontakcie.

Dla zwiększenia efektywności obliczeń założone są pewne uproszczenia, na podstawie których elementy traktowane są jako sfery lub grupy sfer. Cząstki mogą być traktowane, jako sztywne bądź też odkształcalne. Ze względu na kontakt poszczególnych cząstek konieczne jest dobranie odpowiedniego modelu odzwierciedlającego charakter badanego materiału. Przykładem może być nieliniowy model Hertza-Mindlina z tłumieniem wiskotycznym [11].

Na rys. 5 przedstawiono symulację procesu mieszania 6440 sferycznych granул o średnicy 10 milimetrów zaprezentowaną w pracy [2]. Mieszanie odbywało się w mieszarce z mieszadłem wstęgowym. Mieszadło obracało się ze stałą prędkością $38 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ [2].

Na rys. 5a) przedstawiono pozycję początkową granул przed uruchomieniem mieszadła. Kolor granул określa wstępną pozycję granул wzdłuż osi mieszadła. Z przeprowadzonej symulacji widoczne jest, że mieszadło wstęgowe generuje dobrą osiową i promieniową dyspersję badanych cząstek.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono podstawowe informacje dotyczące procesu mieszania w przemyśle spożywczym. Dokonano klasyfikacji urządzeń mieszających ze względu na ośrodek mieszany. Przeprowadzona klasyfikacja pozwoliła odróżnić urządzenia mieszające stosowane do cieczy i materiałów sypkich. Zaprezentowane przykłady pozwalają stwierdzić, że projektowanie tego typu urządzeń może być skutecznie wspomagane przez techniki komputerowe. Zaawansowanie oraz możliwości dostępnych programów obliczeniowych są nieocenionym narzędziem coraz szerzej stosowanym w przemyśle spożywczym.

Bibliografia

- [1] Ameer H., Bouzit M.: Mixing in shear thinning fluids. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2012, vol. 29(2).
- [2] Bertrand F., Leclaire L.-A., Levecque G.: DEM-based models for the mixing of granular materials. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60.
- [3] Czerniecka-Skubina E., Nowak D. (red.): *Podstawy Technologii Żywności*. Wydawnictwo Format-AB, Warszawa 2010.
- [4] Czuba W., Gospodarczyk P., Kulinowski P.: Zastosowanie Metody Elementów Dyskretnych (DEM) do symulacji odstawy urobku przez ścianowy przenośnik zgrzebłowy. *Symulacja w Badaniach i Rozwoju*, 2010, vol. 1, No. 3.
- [5] Hixon A. W., Baum S. J., *Ind. Eng. Chem.* 34, 194 (1942).
- [6] Norton T., Da-Wen-Sun: Computational fluid dynamics (CFD) an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *Trends in Food Science & Technology* 17 (2006).
- [7] Wojdalski J. (red.): *Użytkowanie maszyn i aparatury w przetwórstwie rolno-spożywczym. Wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2010.
- [8] Walczak J.: *Inżynierska mechanika płynów*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
- [9] <http://www.koma-brzeg.pl>. Dostęp: 10.07.2014.
- [10] <http://kates.com.pl>. Dostęp: 10.07.2014.
- [11] <http://www.industrio.pl>. Dostęp: 10.07.2014.

COMPUTER SIMULATIONS IN MIXING MACHINES DESIGNED FOR USE IN THE FOOD INDUSTRY

Summary

The article presents fundamental issues concerning mixing machines, especially for liquids and solids that are used in the food industry. The division of the machines is made according to the type of processed medium. Some examples of computer analysis of mixing of fluid and solids are presented as well.

Key words: mixing, mixing vessel, agitator, pseudoplastic fluid, shear thinning fluid, DEM, FEM, CFD