

**Dr hab.  
inż. Magdalena  
Jasińska**

pracuje w Zakładzie  
Inżynierii i Dynamiki  
Reaktorów  
Chemicznych  
na Wydziale Inżynierii  
Chemicznej  
i Procesowej PW;  
ubiegłoroczna  
laureatka nagrody  
naukowej Wydziału IV  
Nauk Technicznych  
PAN za rozprawę  
habilitacyjną. W latach  
2012–2014 wraz ze  
współpracownikami  
uzyskała patent  
światowy, dwa patenty  
europejskie oraz  
złożyła dwa zgłoszenia  
patentowe.

Magdalena.Jasinska  
@pw.edu.pl

A woman with dark hair, wearing a white lab coat over a dark top, is smiling and looking towards the camera. She is holding a cylindrical stainless steel mechanical component with both hands. The component has a flange at one end and a smaller diameter section in the middle. The background is a blurred laboratory setting.

# TANIE W KROPLI MIESZANIE

## Uzyskanie czystego produktu z surowców w przemysłowych procesach ich przetwarzania jest trudne. Jak badać mieszalniki i zapewnić efektywne wykorzystanie energii?

**dr hab. inż. Magdalena Jasińska**

Politechnika Warszawska

**W** przemyśle chemicznym oraz pokrewnych – spożywym, farmaceutycznym, kosmetycznym czy tworzyw sztucznych – zasadniczym celem jest przetworzenie surowców w półprodukty i produkty końcowe o określonych, ściśle zdefiniowanych właściwościach. Dyscypliną naukową, która umożliwia ścisłą interpretację procesów przetwórczych, jest inżynieria chemiczna.

Ciekawym zagadnieniem jest wykorzystanie do wytwarzania form użytkowych produktów mieszalników typu rotor-stator. Mieszalniki tego typu charakteryzują się generowaniem wysokich naprężeń lokalnie, w wybranych obszarach urządzenia. Pozostałe obszary można wtedy traktować jako obszary pasywne z punktu widzenia działania naprężeń i zużycia energii mechanicznej. Pomaga to uzyskać wysoką wydajność i efektywność energetyczną procesów homogenizacji, dyspersji, emulsyfikacji, mielenia, przemian chemicznych, dezintegracji komórek mikroorganizmów oraz koagulacji. Prowadzenie tych procesów jest energetycznie kosztowne, cenne stają się zatem umiejętności przewidywania mocy mieszania oraz możliwość jej jak najbardziej efektywnego wykorzystania.

Teoretyczny opis takiego procesu nie jest jednak sprawą prostą. Warto tu przytoczyć opinię Atiemo-Obenga i Calabrese przedstawioną w popularnym „Handbook of Industrial Mixing”, Wiley, 2004: „Do chwili obecnej nie ma podstawowego matematycznego opisu urządzeń typu rotor-stator”. Po roku 2004 ukazało się wiele artykułów naukowych, w których opisano szczegóły pracy mieszalnika typu rotor-stator i mechanizmy zachodzących w nim procesów, a wśród nich prace mojego i prof. Jerzego Bałdygi autorstwa.

### Produkt główny na celowniku

Rozważmy proces przetwarzania surowca w produkt prowadzony w mieszalnikach typu rotor-stator. Jest to proces złożony, wieloetapowy, który obejmuje zarówno etapy

o charakterze mechanicznym (tzw. operacje jednostkowe), jak i chemicznym. Zasadniczym problemem, który towarzyszy przebiegowi reakcji chemicznych, jest możliwość wytworzenia produktów reakcji ubocznych. Oprócz produktu głównego powstają bowiem produkty niepożądane, w ilościach zależnych od warunków prowadzenia procesu. Tymczasem celem prowadzenia procesu jest przecież uzyskanie czystego produktu.

Pierwszym sposobem na osiągnięcie tego celu jest wydzielenie produktu głównego z mieszaniny zawierającej również produkty uboczne. Jest to jednak metoda energetycznie bardzo kosztowna. Drugi sposób polega na prowadzeniu procesu tak, aby minimalizować wytwarzanie produktów ubocznych. W przypadku przemian chemicznych prowadzonych w układach

masy. Współzawodnictwo przebiegu reakcji głównej prowadzącej do pożądanego produktu, z przebiegiem reakcji ubocznych, sprowadza się wtedy do rywalizacji między mieszaniem a ubocznymi reakcjami chemicznymi. Przy bardzo wolnym mieszanii faworyzowana będzie reakcja uboczna. Z kolei szybkie kontaktowanie odpowiednio wprowadzanych reagentów sprawi, że uprzywilejowane stają się reakcje szybkie.

## Spojrzenie matematyczne

W praktyce przemysłowej zauważono, że zastosowanie klasycznych aparatów, takich jak reaktor zbiornikowy z mieszadłem mechanicznym czy reaktor rurowy, nie zapewnia na ogół dostatecznie szybkiego mieszania. Rozpoczęło się zatem poszukiwanie rozwiązań alternatywnych. Jednym z takich rozwiązań jest zastosowanie mikroreaktorów. Innym – wykorzystanie mieszalników typu rotor-stator. Urządzenia te ze względu na swoją specyficzną konstrukcję zapewniają intensywne mieszanie i wymianę masy, a co za tym idzie – umożliwiają maksymalizację wytwarzania produktów głównych przy kontrolowanym zużyciu energii. Efektywność energetyczna procesu wiąże się ściśle z kosztami jego prowadzenia. Często aparaty, które umożliwiają szybkie kontaktowanie reagentów, nie zapewniają efektywnego wykorzystania energii, co poważnie zwiększa koszty prowadzenia procesów. W omawianej pracy wykazano, że zarówno mieszalniki typu rotor-stator, jak i mikroreaktory, choć te drugie w znacznie mniejszym stopniu, umożliwiają dobór warunków pozwalających na optymalne wykorzystanie energii.

Korzystne warunki dla prowadzenia złożonych reakcji chemicznych w mieszalnikach typu rotor-stator oraz preferowane konstrukcje mieszalników znaleziono zarówno w trakcie badań doświadczalnych, jak i bezpośrednio w zastosowaniach przemysłowych.

Celem naszych prac, prowadzonych w dużej części we współpracy z firmą Unilever oraz Uniwersytetem w Manchester, było wszechstronne zbadanie i scharakteryzowanie mieszalników typu rotor-stator, również z wykorzystaniem metod naukowych. Miało to zapewnić umiejętność przewidywania przebiegu procesu w zależności od zastosowanych warunków, a zatem umożliwić kontrolowanie procesu i projektowanie produktu. Prace doświadczalne służyły weryfikacji wyników modelowania, podczas gdy modele matematyczne stały się zasadniczym narzędziem badawczym. Modele, przy użyciu odpowiedniego aparatu matematycznego, zapewniły systematyczny opis zjawisk i procesów towarzyszących pracy mieszalników. W naszym wypadku były to przede wszystkim różniczkowe, cząstkowe równania zachowania pędu (tzw. równania Naviera-Stokesa), równania bilansu składników oraz równania bilansu populacji; te ostatnie umożliwiły śledzenie ewolucji rozkładów rozmia-

Pierwotną motywacją do prowadzenia badań były potrzeby przemysłu. Jednakże zaowocowały one również wynikami mającymi dużą wartość naukową.

homogenicznych decydującą rolę odgrywa wtedy mikromieszanie, czyli mieszanie na skalę molekularną. Jeśli z kolei mamy do czynienia z reakcjami przebiegającymi w układach dwufazowych ciecz-ciecz, to o selektywności przebiegu procesu może decydować szybkość transportu masy między fazą rozproszoną (krople) a fazą ciągłą. Umiejętne sterowanie sposobem i szybkością przebiegu tych procesów, a więc kinetyką reakcji chemicznych oraz sekwencją kontaktowania reagentów i szybkościami mieszania oraz transportu masy, umożliwia taki przebieg reakcji chemicznych, który prowadzi do uzyskania czystego produktu. Opracowanie metodologii i selektywnego prowadzenia procesów kontrolowanych przez mieszanie było jednym z zasadniczych celów prac prowadzonych w naszym zespole.

Reakcje chemiczne określamy jako bardzo wolne, wolne, szybkie lub natychmiastowe, jeśli ich charakterystyczne stałe czasowe są odpowiednio: znacznie większe, nieco większe, zbliżone lub znacznie mniejsze od stałych czasowych mieszania i wymiany masy. W przypadku gdy mamy do czynienia z układem reakcji złożonych, produkt główny powstaje zazwyczaj w reakcji szybkiej lub bardzo szybkiej, produkt uboczny z kolei tworzony jest w reakcji wolnej lub bardzo wolnej. Jeśli zatem mieszanie kontroluje przebieg reakcji bardzo szybkich lub szybkich, to o szybkości wytwarzania produktu zasadniczego decyduje nie kinetyka chemiczna, ale szybkość mieszania lub transportu

## MIESZALNIKI ROTOR-STATOR

rów cząstek produktu i innych jego właściwości. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, gdy w procesie występuje faza rozproszona, jak krople, kryształy czy mikroorganizmy. Wymienione równania bilansowe są podstawą modelowania, wymagają jednak użycia dodatkowych, specyficznych modeli opisujących kinetykę chemiczną, szybkość koalescencji i rozpadu kropeł, a także szybkość wzrostu i agregacji kryształów oraz wiele innych szybkości przemian fazy rozproszonej.

Jak wspomnieliśmy wcześniej, pierwotną motywacją do prowadzenia badań były potrzeby przemysłu, szczególnie w kontekście wytwarzania czystego produktu. Jednakże nasze badania zaowocowały również wynikami mającymi dużą wartość naukową. Wyniki te dotyczą głównie badań struktury przepływu turbulentnego pod działaniem wysokich naprężeń oraz identyfikacji mechanizmów mieszania i wymiany masy w takich specyficznych warunkach. Zbadaliśmy również wpływ struktury przepływu, mieszania oraz wymiany masy na przebieg złożonych reakcji chemicznych.

## „Nie” dla bezużyteczności

Reakcje chemiczne wykorzystywane są przede wszystkim do wytwarzania cennych produktów w wielu procesach o znaczeniu przemysłowym. Jednak re-

akcje chemiczne, w szczególności reakcje złożone, stosowane są również w badaniach naukowych jako indykatory specyficznych cech mieszania i wymiany masy. Taką funkcję spełniły także w naszej pracy. Jak wspomnieliśmy wcześniej, końcowy skład produktów w dużym stopniu zależy od sposobu kontaktowania reagentów. W oparciu o skład produktów można definiować indeksy stanu wymieszania oraz identyfikować stałe czasowe procesów mieszania i wymiany masy. W związku z powyższym w naszej pracy zaproponowaliśmy nową, oryginalną metodę wykorzystania reakcji testowych w celu identyfikacji efektywności energetycznej procesu. Pozwala ona określić, jaka część energii mechanicznej doprowadzanej do układu i w nim dyssypowanej wykorzystywana jest wprost do wytworzenia produktu, a jaka wydatkowana jest bezużytecznie, a nawet ze szkodą dla produktu. W rezultacie zaproponowana przez nas metoda umożliwia porównanie pod względem kosztów energetycznych wytwarzania produktu działania tak odmiennych aparatów jak mikroreaktory i mieszalniki rotor-stator, a także porównanie tak różnych procesów jak mikromieszanie i dyspersja kropeł w powiązaniu z wymianą masy.

MAGDALENA JASIŃSKA  
 ZDJĘCIE JAKUB OSTAŁOWSKI

Chcesz wiedzieć więcej?

Bałdyga J., Kowalski A., Cooke M., Jasińska M. (2007). Investigation of micromixing in a rotor-stator mixer. [w:] *Chemical and Process Engineering*, 28, 867–877.

Jasińska M., Bałdyga J., Cooke M., Kowalski A. (2013). Application of test reactions to study micromixing in the rotor-stator mixer (test reactions for rotor-stator mixer). *Applied Thermal Engineering*, 57 (1–2), 172–179.

Jasińska M., Bałdyga J. (2014). Effects of Rotor-Stator Mixer Performance on Drop Dispersion, Micromixing, Mass Transfer and Chemical Reactions. LAP Lamber Academic Publishing, Saarbrücken, Germany.

REKLAMA



# Śledź nas

na

# Facebooku

Naukaonline.pl