

Adam MICHAJŁOWSKI, Tomasz KILJAŃSKI

e-mail: admich@wipos.p.lodz.pl

Katedra Inżynierii Chemicznej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, Łódź

## Mieszanie dyspersji pęcherzy gazowych w płynie plastycznolepkim

### Wstęp

Proces mieszania jest jednym z podstawowych procesów często stosowanych w wielu technologiach w różnych gałęziach przemysłu takich jak przemysł chemiczny, spożywczy, farmaceutyczny, czy biotechnologiczny. Mieszanie prowadzi się zarówno w układach jedno- jak i wielofazowych. Proces ten przyspiesza przebieg reakcji chemicznych, niszczy struktury zwarte oraz intensyfikuje wymianę ciepła i masy. Wymiana masy jest szczególnie intensyfikowana w procesach napowietrzania reaktorów, gdzie wirujące mieszadła powodują rozbijanie pęcherzy gazowych a przez to zwiększenie powierzchni kontaktu obu faz.

Szczególnym przypadkiem jest mieszanie rozproszonych pęcherzy gazowych w substancji plastycznolepkiej. Substancje takie pod wpływem naprężeń mniejszych od pewnej wartości granicznej, tzw. granicy płynięcia, nie ulegają przepływowi, czyli zachowują się jak ciało stałe, ulegające odkształceniu sprężystemu. Dopiero pod działaniem wyższych naprężeń substancja ulega upłynnieniu [1]. W płynach plastycznolepkich unieruchomione pęcherze mogą mieć kształty zupełnie nieregularne, gdyż siły napięcia powierzchniowego nie są w stanie pokonać granicy płynięcia otaczającego płynu i nadać mu kulistego kształtu. Dopiero pod wpływem ruchu wymuszonego odpowiednio dużą siłą wyporu przybierają one kształt regularnej bryły obrotowej [2]. O ile mieszanie mediów o takich własnościach prowadzące do powstania mniejszych pęcherzy początkowo może być pożądane – ze względu na zwiększenie powierzchni kontaktu obu faz – to dalej może stać się to problematyczne, gdyż małe rozmiary pęcherzy stanowią jeszcze większą przeszkodę w ich późniejszym usuwaniu (w takim przypadku potrzebne są jeszcze większe siły wyporu, aby pokonać granice płynięcia otaczającej substancji). Jak można się spodziewać, mieszanemu mechaniczemu dyspersji pęcherzy gazowych w substancji plastycznolepkiej, ze względu na specyficzne własności takich układów, a w tym sprężystolepkość fazy ciągłej, może towarzyszyć szereg ciekawych zjawisk.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań wizualizacyjnych procesu mieszania mechanicznego takiego układu.

### Część eksperymentalna

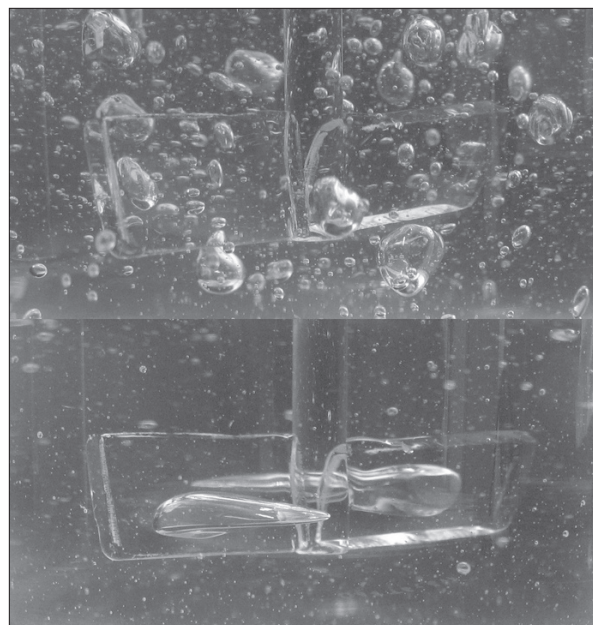
W badaniach jako medium doświadczalne stanowiące fazę ciągłą zastosowano posiadający plastycznolepkie własności wodny roztwór zobojętnionego *Carbopolu* o stężeniu 0,25% i granicy płynięcia  $\tau_y = 76$  Pa. Fazę rozproszoną stanowiły pęcherze powietrza. Mieszanie prowadzono w szklanym naczyniu cylindrycznym o średnicy 0,08 m z użyciem mieszadła o średnicy 50 mm z dwiema prostokątnymi łopatkami o kącie nachylenia 70 stopni. Zakres prędkości obrotowej mieszadła wynosił od 0 do 1250 obr/min. Rejestrację obrazów wykonano z użyciem techniki fotografii cyfrowej z czasem ekspozycji do 1/50000 sekundy, co było konieczne do uzyskania nierozmytego obrazu w wysokich zakresach prędkości mieszadła.

### Analiza zarejestrowanych obrazów

Przeprowadzone badania wykazały, że nie zawsze intensywne mieszanie płynów plastycznolepkich z rozproszoną w nich fazą gazową musi prowadzić do rozbicia jej na drobniejsze fragmenty. Jak zaobserwowano, zależnie od warunków mieszania takich płynów – geometrii mieszadła i jego prędkości obrotowej – może następować albo rozproszenie małych pęcherzyków, albo przeciwnie – koalescencja tych pę-

cherzy i tworzenie się większych jednostek podążających za łopatkami mieszadła.

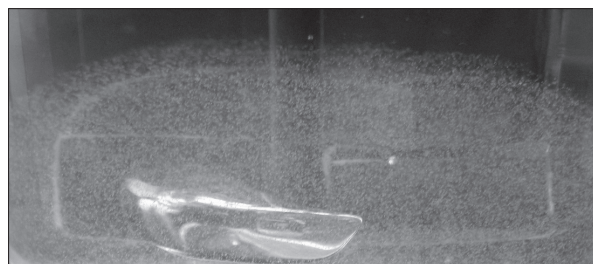
Na rys. 1 przedstawiono pęcherze znajdujące się w otoczeniu mieszadła przed procesem mieszania i efekt uzyskany po kilkuminutowym mieszanym takiej zawiesiny. Widać, że większa część pęcherzy połączyła się tworząc za każdą łopatką po jednym większym pęcherzu. Jak wspomniano, podążały one później za łopatkami.



Rys. 1. Unieruchomione pęcherzyki otaczające mieszadło przed mieszaniem i pęcherze utworzone po ok. 2 minutach mieszania z prędkością 700 obr/min.

Zaobserwowano, że w pewnym zakresie prędkości mieszadła (ok. 500–800 obr/min) wokół mieszadła z tak uformowanymi, odpowiednio dużymi pęcherzami tworzy się gęsta chmura drobnymi pęcherzyków, które zderzając się z łopatkami mogłyby na skutek rozbicia być źródłem mniejszych jednostek.

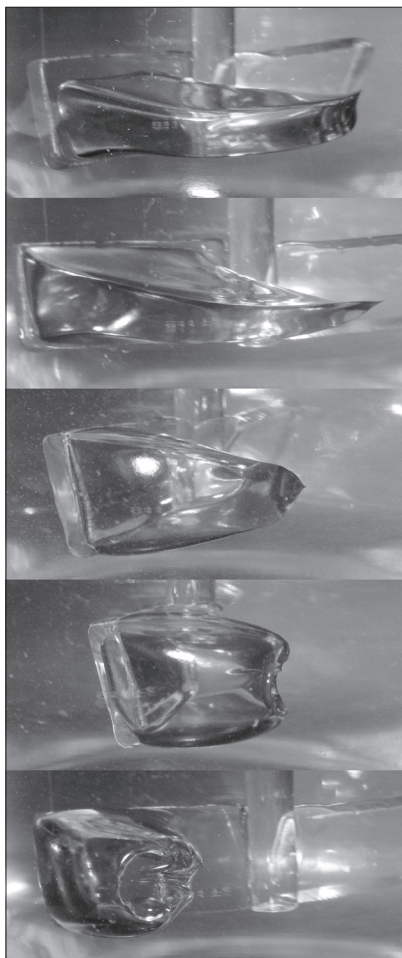
Na rys. 2 widać w strefie bliskiej okolicy mieszadła zmętnienie spowodowane obecnością licznych, drobnych (ok. 0,2–0,3 mm) pęcherzyków powstałych po ok. 3 minutach mieszania oraz znajdującą się ponad tym obszarem strefę wolną od nich. Należy przypuszczać, że granica tych stref jest granicą upłynnienia fazy ciągłej, poza którą powstające pęcherzyki nie mogą się przedostać.



Rys. 2. Chmura drobnych pęcherzyków otaczająca mieszadło

Dalsze zwiększanie prędkości mieszadła ponad wspomniany zakres powodowało dosyć szybkie pochłonięcie tej dyspersji przez duży pęcherz.

Na załączonej serii zdjęć (Rys. 3) przedstawiono przykładowe, zarejestrowane w czasie zmiennej prędkości mieszadła, obrazy kształtów pęcherza uformowanego za łopatką mieszadła, poruszającego się w substancji plastycznolepkiej. Kształty te pęcherz przyjmował kolejno dla mieszadła po jego zatrzymaniu i w ruchu 300, 450, 600, 1250 obr/min.



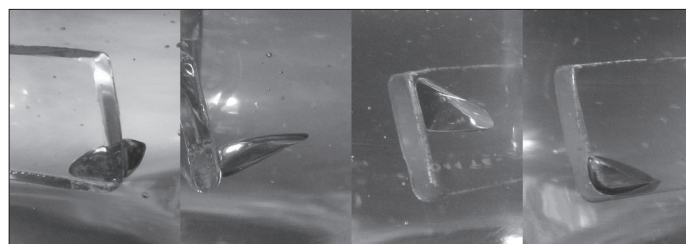
Rys. 3. Kształt pęcherza w roztworze *Carbopolu* w zależności od prędkości mieszadła

Pęcherze poruszające się za mieszadłem mają skłonność do przywierania do jego powierzchni – tym większą im większa jest prędkość obrotowa. Przy mniejszych prędkościach mieszadła pęcherz początkowo ma tendencję do wydłużania się i wysmuklania, a na jego końcu tworzy się spiczasty ogonek.

Stwierdzony bardzo wydłużony kształt pęcherza podczas przepływu wywołany jest najprawdopodobniej własnościami plastycznolepki, gdyż w płynach bez granicy płynięcia tak znaczne wydłużenie nie następuje. Kształt pęcherzy z wyraźnie zaostrzonym tyłem, jest zbliżony do kształtu pęcherza powstającego ze strumienia gazu wpływającego do substancji plastycznolepkiej przez otwór w dnie naczynia, zanim pęcherz oderwał się od otworu [3], jak również do kształtu pęcherza poruszającego się w takim medium w polu sił odśrodkowych [4].

Podczas ruchu w takiej substancji pęcherz nie porusza się w nieograniczonej cieczy, jak w przypadku cieczy bez granicy płynięcia, lecz w strefie upłynnionej, powstającej na skutek ruchu obrotowego mieszadła.

W miarę wzrastania prędkości mieszadła następuje skrócenie pęcherza, a dalej wyraźne zaokrąglenie jego powierzchni w trzech kierunkach – zewnętrznym oraz górnym i dolnym w stosunku do krawędzi łopatki. Jednocześnie z zaokrągleniem się pęcherza najpierw następuje wcinanie się płynu do środka od strony osi mieszadła, a dalej od jego tylnej części. Jego końcówka czasami jest przy tym lekko postrzępiona. Jeżeli za łopatką podąża pęcherz mniejszy od jej rozmiarów to przy niższych prędkościach mieszadła może on płynąć za jej środkową częścią, a nawet być wciągany w kierunku osi mieszadła. W miarę wzrastania prędkości obrotowej przesuwa się jednak w kierunku od osi mieszadła do zewnętrznych brzegów łopatki, gdzie często przyjmuje kształt zdeformowanego ostrosłupa o podstawie trójkątnej (Rys. 4). Jeżeli pęcherz jest odpowiednio duży, to zawsze przylega do górnego rogu łopatki. Zjawisko oddalania się od osi, a dalej skracania i zaokrąglenia się pęcherza związane jest najprawdopodobniej z rozkładem ciśnień wokół mieszadła. Gaz jest niejako zasysany do obszarów o najmniejszym ciśnieniu, a więc tam gdzie płyn opływa łopatkę mieszadła z największą prędkością.



Rys. 4. Kształty pęcherzy na krawędzi mieszadła (600–950 obr/min)

Zaobserwowano również, że jeżeli pęcherz jest odpowiednio duży i znajduje się odpowiednio daleko od łopatek, a strefa upłynniona sięga do powierzchni mieszaniny, to możliwe jest wydostanie się takiego pęcherza na zewnątrz, ponieważ siły wyporu są większe od sił wywołanych przez prądy powstałe na skutek obrotów mieszadła, które mogłyby go zawracać w głąb układu.

Zjawisko powstawania drobnych pęcherzyków spowodowane jest głównie odrywaniem się małych fragmentów tylnej, zaostrej części pęcherza. Prawdopodobnie powstawaniu małych pęcherzyków towarzyszy jednoczesna ich koalescencja z dużym pęcherzem i oba zjawiska ze sobą konkurują. Ustala się stan równowagi zależny od szybkości powstawania drobnych pęcherzyków. Przy szybkim ruchu mieszadła, gdy tył pęcherza jest zaokrąglony, drobne pęcherzyki nie powstają lub powstają w małej ilości i zjawisko koalescencji efektywnie prowadzi do całkowitego usunięcia ich z upłynnionej przestrzeni.

Lepsze poznanie warunków występowania opisanych zjawisk łączenia mniejszych pęcherzy w jeden większy za łopatkami mieszadła może pozwolić na ich praktyczne zastosowanie w procesach napowietrzania i odgazowywania płynów plastycznolepki, ponieważ dostatecznie duże pęcherze oddzielają się same od ośrodka rozpraszającego pod wpływem sił wyporu.

#### LITERATURA

- [1] M. Dziubiński, T. Kiljański, J. Sęk: Podstawy reologii i reometrii płynów Łódź 2009.
- [2] T. Kiljański, A. Michajłowski: Inż. Ap. Chem., **47**, nr 6, 36 (2008).
- [3] K. Terasaka, H. Tsuge: Chem. Eng. Sci. **56**, 3237 (2001).
- [4] T. Kiljański, A. Michajłowski: Inż. Ap. Chem., **48**, nr 6, 107 (2009).