

Sterowanie przebiegiem procesu separacji membranowej z wykorzystaniem zjawiska termoakustycznego


Krzysztof Grzywnowicz, Grzegorz Wiciak

1. Wstęp

Separacja składników mieszanin gazowych może mieć kluczowe znaczenie dla utrzymania właściwych wskaźników ekologicznych i ekonomicznych danego procesu technologicznego w obszarze inżynierii chemicznej, np. w przemyśle rafineryjnym, a także w energetyce, m.in. podczas produkcji użytkowych form energii w układach zeroemisyjnych [1, 2]. Ponadto, separacja składników mieszanin gazowych jest procesem niezbędnym do realizacji licznych procesów technologicznych, w szczególności w instalacjach chemicznych. Stąd parametry procesu separacji są istotne ze punktu widzenia całego układu, w którym znajduje on zastosowanie. Jedną z powszechnie stosowanych metod separacji gazów jest separacja membranowa [1, 3, 4, 5]. Siłą napędową procesu separacji przez membranę jest różnica potencjałów chemicznych: stężeń, ciśnień lub potencjału elektrycznego po obu stronach membrany [1, 2, 6]. Istotną zaletą stosowania membran do separacji gazów, w porównaniu z innymi metodami separacji składników z mieszanin gazowych, jest brak zmiany fazy gazowej na ciekłą, co zmniejsza zapotrzebowanie energii do prowadzenia procesu separacji.

Stosowanie membran w przemyśle upowszechniono dopiero po opracowaniu technologii wytwarzania modułów membranowych, które pod względem konstrukcyjnym pozwalają na uzyskanie dużej powierzchni rozdziału w niewielkiej objętości [3–6]. Separator membranowy tworzony jest przez zbiór modułów połączonych równolegle lub szeregowo bądź kombinacją tych połączeń. Wybór rodzaju modułu membranowego do budowy separatora zależy w głównej mierze od kosztów i parametrów zastosowania [1], dlatego istotne jest precyzyjne określenie parametrów pracy modułów tworzących separator, a także optymalnego sposobu ich łączenia. Konstrukcje takie cechują się najczęściej niewielkimi rozmiarami, co jest ważne przy wdrażaniu systemów separacji do istniejących instalacji przemysłowych, np. układów wychwytu CO₂ do funkcjonujących układów energetycznych, bazujących na procesie spalania węgla. Separatory membranowe cechują się prostotą działania i brakiem ruchomych części mechanicznych, co powoduje zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych [3, 5]. Główną ich wadą jest jednakże konieczność dokładnego oczyszczania surowego gazu z pyłów, związków siarki, smół i innych zanieczyszczeń, ponieważ wprowadzenie nieoczyszczonego gazu powoduje uszkodzenie membran lub znaczące pogorszenie właściwości separacji [3, 5, 7, 8], co istotnie zwiększa energochłonność tego procesu. Potencjalne ograniczenie ich zastosowania stanowi

Streszczenie: Jedną z powszechnie stosowanych technologii separacji gazów, zwłaszcza w obszarze inżynierii procesowej i energetyki, jest separacja membranowa. W artykule podsumowano obecnie oferowane sposoby kontroli parametrów procesowych membranowej separacji gazów oraz przedstawiono metodę, wykorzystującą zjawisko termoakustyczne. Ponadto zaprezentowano przykład modułu membranowego, zawierającego membranę polimerową kapilarną, wykorzystującego omawianą metodę.

 **Abstract:** One of commonly applied separation technologies, especially in the field of process engineering and power and heat industry, is membrane separation. In the paper, currently available methods of control of the process parameters are briefly discussed and the innovative method of control, involving utilization of a thermoacoustic phenomenon, is presented. Furthermore, the example of membrane module, including capillary polymer membrane and using the mentioned method, is described.

także utrudnione sterowanie parametrami procesowych w przypadku silnie zmiennych właściwości strumienia gazu podlegającego separacji, które może być szczególnie istotne w kontekście ich stosowania w instalacjach oczyszczania gazów odpadowych w koksowniach, spalarniach odpadów czy zakładach metalurgicznych i odlewniczych.

2. Kontrola procesu separacji – przegląd obecnych rozwiązań

Ze względu na rosnący popyt na membrany do separacji gazów, spowodowany upowszechnieniem ich wykorzystania w oczyszczaniu gazów odpadowych i procesowych [1, 2], kontrola parametrów procesu separacji w modułach membranowych stanowi ważny obszar badawczy. W wyniku prowadzonych prac obliczeniowych i eksperymentalnych opracowano zróżnicowane metody modyfikacji parametrów separacji membranowej. Literatura przedmiotu [8] opisuje metodę efektywnej kontroli parametrów procesu, zwłaszcza selektywności membrany względem danego składnika mieszaniny, poprzez

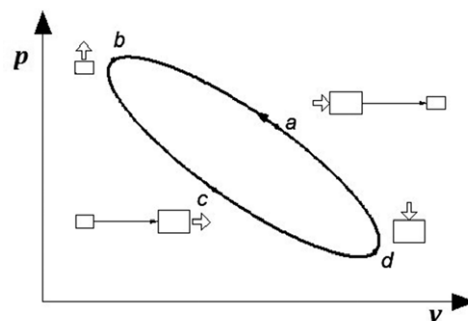
zlokalizowanie w obszarze membrany ujemnych lub dodatnich ładunków elektrycznych. Jak dowodzą badania, membrany polimerowe wykazują silną zależność właściwości od zgromadzonego na ich powierzchni ładunku, jak również od jego znaku. Jednakże, w celu wymuszenia znaczącej zmiany parametrów operacyjnych membrany, konieczne jest zastosowanie ładunków o wysokiej gęstości – całkowita energia pola elektrycznego, zgromadzonego w obszarze membrany, może wynosić do $3 \cdot 10^5$ kcal/mol [8]. Tak wysoki ładunek elektryczny w obszarze modułu membranowego może uniemożliwić zastosowanie tej metody sterowania procesem w przypadku separacji mieszanin gazowych łatwopalnych i wybuchowych, co stanowi istotne ograniczenie, szczególnie w obszarze przemysłu chemicznego i petrochemicznego.

Inną metodą kontroli procesu, opisaną w literaturze [9], jest wymuszenie odkształcenia membrany poprzez oddziaływanie siłą mechaniczną w celu lokalnej deformacji jej struktury i tym samym modyfikacji parametrów separacji, szczególnie w zakresie przepuszczalności i selektywności membrany. Jednakże metoda ta może znaleźć zastosowanie jedynie w przypadku membran ultracienkich, np. jednowarstwowych, wykonanych z polimerów całkowicie lub częściowo organicznych. Przyczyną tego faktu jest wysoka wytrzymałość mechaniczna tego typu membran – odkształcenie, wywoływane wskutek działania siły, może wynosić do 12% szerokości membrany [9]. Ponadto nawet w przypadku wykorzystania tej metody sterowania w modułach membranowych opartych o membrany organiczne pojawia się problem dokładnego pomiaru naprężeń – kluczowego w celu ochrony struktury membrany przez zniszczeniem.

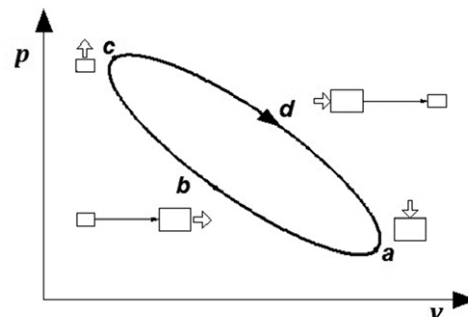
Przedmiotem zainteresowania środowisk naukowych jest także możliwość kontroli pracy membran poprzez regulację ich temperatury. Literatura [10] dostarcza opisu membrany wykonanej z organicznego kopolimeru, której właściwości w istotny sposób zależą od temperatury. Zależność ta ma charakter skokowy – po przekroczeniu zadanego progu temperaturowego następuje przemiana fazowa jednego ze składników kopolimeru, co skutkuje radykalną zmianą właściwości membrany, a tym samym parametrów procesu separacji. Jedną z istotnych wad opisywanej metody jest możliwość sterowania procesem jedynie na zasadzie zero-jedynkowej; ponadto regulowana w ten sposób kopolimerowa membrana charakteryzuje się relatywnie złożoną technologią wytwarzania [10], co może skutkować wysokim kosztem jej zakupu, a tym samym ograniczyć zastosowanie w licznych gałęziach przemysłu ciężkiego. Jednakże, jak wykazano w wyniku prac eksperymentalnych [11], istotna zmiana warunków pracy – ciśnienia i temperatury – wskutek równomiernego ogrzewania/chłodzenia całego modułu membranowego pozwala na znaczącą modyfikację parametrów operacyjnych także komercyjnie dostępnych membran poliimidowych i polisulfonowych [11]. W warunkach instalacji przemysłowych umieszczenie całego modułu membranowego w urządzeniu, realizującym jego równomierne podgrzewanie lub chłodzenie, może być trudne do realizacji. Jednakże trudność ta może zostać ominięta poprzez lokalną modyfikację koncentracji składników separowanej mieszaniny gazów lub intensywną zmianę temperatury membrany wskutek zjawiska termoakustycznego.

3. Kontrola procesu separacji z wykorzystaniem zjawiska termoakustycznego

Zjawisko termoakustyczne, polegające na samoistnym wytworzeniu fali akustycznej w elemencie jednostronnie ogrzewanym, dmuchacze szkła zaczęli wykorzystywać ponad dwieście lat temu [12]. Pierwsze naukowe badania fenomenu spontanicznej indukcji fali dźwiękowej na skutek doprowadzenia ciepła do układu poczynili Rijke oraz Rayleigh. Jednakże rezultaty doświadczenia nie pozwoliły na pełne wyjaśnienie przyczyn tego zjawiska [12]. Dalsze badania, prowadzone przez badaczy z Los Alamos National Laboratory w drugiej połowie ubiegłego wieku, doprowadziły do wytłumaczenia tego zjawiska na gruncie podstawowych praw przepływu ciepła i termodynamiki [13]. Rezultaty tych badań wykazały również, że obieg termodynamiczny realizowany w trakcie występowania zjawiska jest odwracalny, to znaczy, że nie tylko dostarczone do układu ciepło indukuje falę akustyczną, ale również propagująca fala akustyczna „pompuje” ciepło. W pierwszym z wymienionych przypadków proces realizowany jest w prawobieżnym obiegu silnika (rys. 1), w drugim natomiast – w lewobieżnym obiegu urządzenia chłodniczego (rys. 2) [13].



Rys. 1. Schemat obiegu termodynamicznego chłodziarki termoakustycznej (na podst. [14]): a – przemieszczenie gazu roboczego i jego sprężenie; b – oddanie ciepła przez gaz; c – przemieszczenie gazu roboczego i jego rozprężenie; d – pobranie ciepła przez gaz



Rys. 2. Schemat obiegu termodynamicznego silnika termoakustycznego (na podst. [14]): a – pobranie ciepła przez gaz; b – przemieszczenie gazu (ruchy konwekcyjne) i jego rozprężenie; c – oddanie ciepła przez gaz; d – przemieszczenie gazu i jego sprężenie

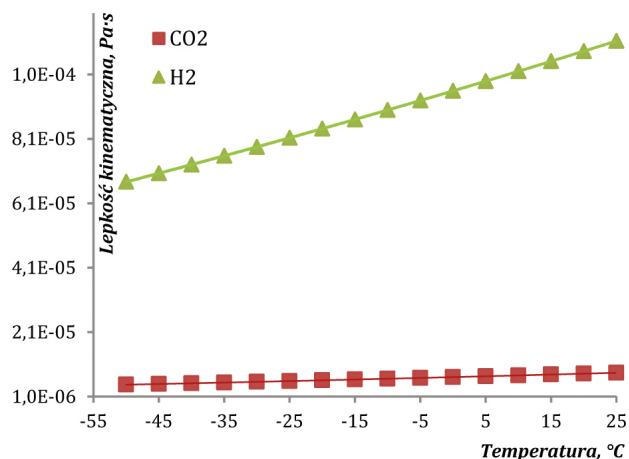
Znanych jest szereg urządzeń termoakustycznych – zarówno chłodziarek, jak i silników – wykorzystujących te obiegi. Przykład stanowi urządzenie do skraplania gazu ziemnego, wykorzystujące zjawisko chłodzenia termoakustycznego, opracowane w Los Alamos National Laboratory [13]. Pierwsza w pełni sprawna instalacja termoakustycznego skraplania gazu została zaprezentowana w 1997 roku [13], a osiągnięta w niej temperatura minimalna wynosiła 133 K [13]. Jedną z cech charakterystycznych termoakustycznych urządzeń chłodniczych, umożliwiającą badania wspomnianego urządzenia do wytwarzania LNG, jest możliwość uzyskania – w relatywnie krótkim czasie – niskich temperatur w obszarze ochładzanym.

Właściwości gazów rzeczywistych silnie zależą od temperatury, co z jednej strony stanowi oczywistość, a z drugiej jest podstawą funkcjonowania licznych układów i rozwiązań technologicznych [1–3]. Niejednokrotnie w obszarze inżynierii chemicznej czy procesowej wykorzystuje się mieszaniny gazowe, których składniki wykazują istotnie różne zależności swoich właściwości fizycznych od temperatury. Przykładem takiej mieszaniny jest mieszanina składająca się z wodoru i dwutlenku węgla, które charakteryzują się widocznie różnymi postaciami zależności lepkości kinematycznej od temperatury (rys. 3). Podobne różnice można zaobserwować dla mieszanin: dwutlenku i tlenku węgla (rys. 4) oraz azotu, tlenu i dwutlenku węgla (rys. 5). Jeżeli przedmiot separacji stanowi mieszanina wykazująca wspomnianą własność, jej gwałtowne podgrzanie lub ochłodzenie może spowodować zasadniczą zmianę warunków pracy układu separacji. Obserwacja ta stanowi podstawę technologii separacji, wykorzystującej selektywną zmianę właściwości jednego z gazów, stanowiącego składnik mieszaniny, wskutek absorpcji promieniowania w określonym paśmie [15]. Jednakże, jak nadmieniono, zastosowanie krótkotrwałej intensywnej zmiany temperatury separowanej mieszaniny gazów może być wykorzystane do sterowania przebiegiem procesu separacji prowadzonej z wykorzystaniem popularnych membran polimerowych nie tylko wskutek zmian właściwości separowanych gazów, ale i materiału membrany w obszarach chłodzenia lub ogrzewania.

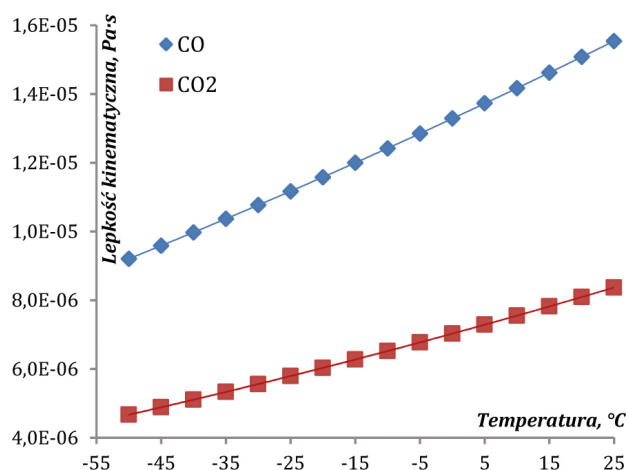
Membrany polimerowe kapilarne charakteryzują się zróżnicowanymi technologiami wytwarzania i wykorzystywane są powszechnie w komercyjnie dostępnych modułach do separacji gazów [1, 4]. Ich podstawowymi zaletami jest relatywnie niewielki koszt produkcji oraz satysfakcjonujące parametry procesowe dla zróżnicowanych warunków pracy [16]. Jednakże, analizując ich potencjał zastosowania w modułach sterowanych, ich kluczową zaletą jest materiał wykonania – dla zdecydowanej większości procesów separacji, w których membrany te mogą znaleźć zastosowanie, tworzywa polimerowe charakteryzują się wyższą pojemnością cieplną właściwą od separowanych gazów [4]. Właściwość ta umożliwia bezpośrednie zastosowanie membran polimerowych w układach separacji membranowej ze sterowaniem, wykorzystującym zjawisko termoakustyczne [14, 17].

4. Koncepcja urządzenia

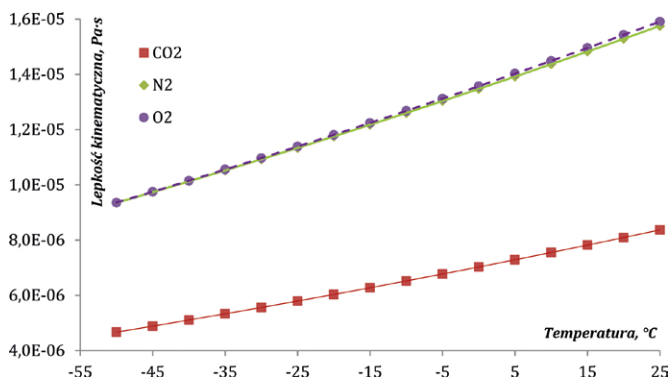
Separator membranowy, wykorzystujący termoakustyczne sterowanie procesu, przedstawiony został schematycznie na



Rys. 3. Zależność lepkości kinematycznej od temperatury dla dwutlenku węgla i wodoru (dla ciśnienia 1 bar)



Rys. 4. Zależność lepkości kinematycznej od temperatury dla dwutlenku węgla i tlenku węgla (dla ciśnienia 1 bar)



Rys. 5. Zależność lepkości kinematycznej od temperatury dla dwutlenku węgla, azotu i tlenu (dla ciśnienia 1 bar)

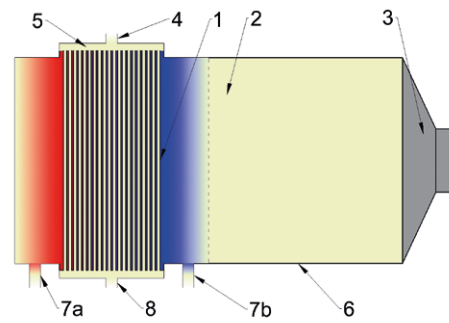
rys. 6. Najistotniejsze cechy konstrukcyjne urządzenia, umożliwiające wymuszenie zjawiska termoakustycznego, to prostopadłe zamknięcie zestawu kapilar (1) tworzących membranę w kanale akustycznym, ograniczonym przez obudowę modułu, zabudowanie kanału akustycznego (2) źródłem fali akustycznej, np. głośnikiem (3), oraz sekcja budowa urządzenia, umożliwiająca montaż kilku zestawów kapilar w obrębie pojedynczego kanału akustycznego. Zestaw kapilar tworzący membranę zasilany jest mieszaniną gazów, podlegającą separacji, doprowadzaną przez otwór wlotowy (4) na wspólny kolektor (5), zintegrowany z obudową modułu (6). W wyniku różnicy ciśnień między gazem doprowadzonym a permeatem wypełniającym przestrzeń kanału akustycznego (2) następuje selektywny transport składników mieszaniny przez materiał kapilar. Intensywność tego procesu może być regulowana przez wytworzenie fali stojącej w obszarze kanału akustycznego (2) na skutek emisji przez głośnik (3) fali akustycznej o częstotliwości równej częstotliwości rezonansowej kanału akustycznego (2). Jeżeli sekcje zestawu kapilar (1) umieszczone zostaną w około jednej czwartej długości kanału akustycznego (2), po obu stronach zestawu pojawi się gradient temperatury, wpływający na intensywność selektywnego przenikania składników separowanej mieszaniny w pobliżu wylotu permeatu (7ab). W zależności od warunków procesu oraz założonych efektów separacji permeat może zostać pobrany przez wylot umieszczony w strefie ogrzewanej (7a) lub zlokalizowany w strefie ochładzanej (7b) kapilar. Mieszanina gazów zawierająca składniki, które nie przeniknęły przez powierzchnię membrany, transportowana jest przez wylot retentatu (8), jak to ma miejsce w typowych układach membranowych.

Układ zaprezentowany na rys. 6 może pozwolić także na stabilizację procesu: w przypadku istotnie zmiennego składu mieszaniny gazowej, dostarczanej na wlot separatora, zmiana stosunku strumieni permeatu, pobieranych ze strefy ogrzewanej i chłodzonej, może prowadzić ostatecznie do uzyskania relatywnie niezmiennych parametrów permeatu. Jednakże w przypadku instalacji procesowych, charakteryzujących się bardzo wysoką zmiennością parametrów operacyjnych i składu transportowanych mieszanin, nawet stabilizacja produktu separacji przez regulację udziałów strumieni permeatu może okazać się niewystarczająca. W takiej sytuacji jedną z potencjalnie kluczowych zalet omawianego urządzenia jest jego modułowość. Jak wykazują badania, których wyniki przedstawiono na rys. 7 i rys. 8, intensywność procesu ochładzania i ogrzewania wskutek zjawiska termoakustycznego zależy od rodzaju gazu, w którym propaguje fala dźwiękowa, współczynnika blokady (w przybliżeniu stanowiącego stosunek połowy pola powierzchni kapilar do pola przekroju kanału akustycznego, zależność (1)) oraz względnej szerokości i położenia membrany kapilarnej.

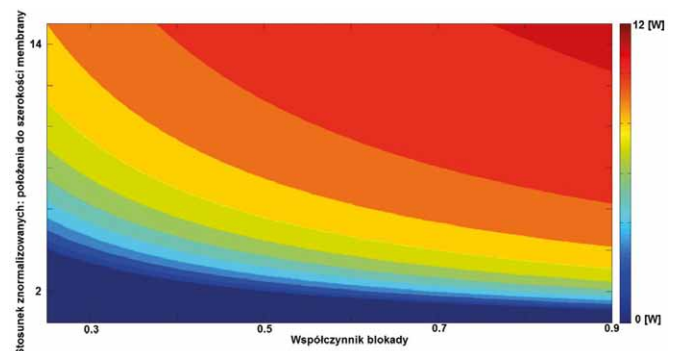
$$B \approx \frac{\frac{1}{2}A_m}{A_k} \quad (1)$$

gdzie: B – współczynnik blokady; A_m – pole powierzchni kapilar membrany; A_k – pole przekroju kanału akustycznego.

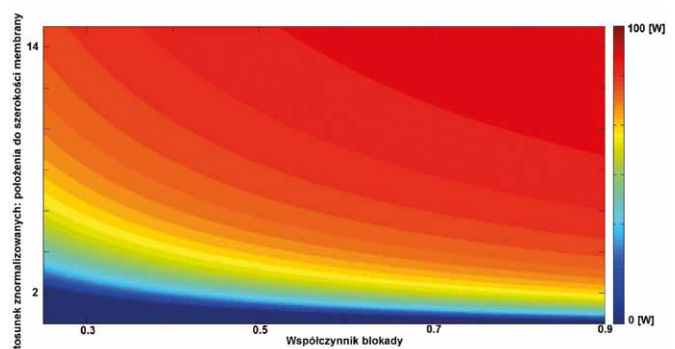
Analogicznie: nadmieniona długość ciała, wzdłuż którego pojawia się gradient temperatury, odpowiadająca szerokości



Rys. 6. Schemat modułu membranowego z termoakustycznym sterowaniem procesu separacji: 1 – zestaw kapilar polimerowych; 2 – kanał akustyczny; 3 – głośnik (źródło fali dźwiękowej); 4 – wlot mieszaniny gazów; 5 – wspólny kolektor wlotowy; 7a – wylot permeatu w strefie nagrzewanej; 7b – wylot permeatu w strefie ochładzanej; 8 – wylot retentatu



Rys. 7. Zależność osiągniętej mocy chłodniczej od wartości współczynnika blokady oraz stosunku znormalizowanych położenia i szerokości membrany dla azotu jako permeatu



Rys. 8. Zależność osiągniętej mocy chłodniczej od wartości współczynnika blokady oraz stosunku znormalizowanych położenia i szerokości membrany dla wodoru jako permeatu

membrany, jest stała i zależy od ilości wykorzystanych kapilar. Jednakże poprzez sekcyjną budowę modułu membranowego możliwa jest modyfikacja położenia membrany względem źródła fali dźwiękowej. Przybliżenie zestawu kapilar tworzących membranę do głośnika lub jego odsunięcie w kierunku

zamkniętego krańca kanału akustycznego skutkuje znaczącą zmianą osiągniętej mocy chłodniczej oraz grzewczej, a tym samym – ograniczeniem lub intensyfikacją efektu podgrzewania lub chłodzenia kapilar. Należy podkreślić, że dla różnych gazów wypełniających kanał akustyczny – a w przypadku skonstruowanego modułu membranowego stanowiących produkt procesu separacji gazów – osiągnięcie zamierzonego efektu może wymagać jedynie drobnej korekty położenia membrany lub konieczności znacznego jej przesunięcia w kanale akustycznym.

Podsumowanie


Rozwój technologii membranowej umożliwia uzyskiwanie coraz to wyższych parametrów procesu separacji gazów, znajdującego szerokie zastosowanie w przemyśle [1, 16]. Jednakże ważnym zagadnieniem pozostaje kontrola procesu, szczególnie istotna przy zmiennych warunkach pracy układów separacji. Jak przedstawiono, istnieje szereg metod kontroli procesu, wykorzystujących różnorodne podstawy fizyczne i właściwości membran. Jednak praktycznie każda z metod obciążona jest ograniczeniami, uniemożliwiającymi jej zastosowanie we wszystkich obszarach zastosowań membran. Ograniczenia te wynikają między innymi z niebezpieczeństwa uszkodzenia membrany (na przykład poprzez jej nadmierne odkształcenie w wyniku niedokładności pomiaru jej naprężenia lub zapłonu separowanej mieszaniny w wyniku rozładowania zgromadzonego w obszarze membrany ładunku elektrycznego) czy trudności ich implementacji w instalacjach przemysłowych (na przykład w postaci kontroli temperatury całych zestawów modułów membranowych przy wykorzystaniu zewnętrznych źródeł ciepła lub chłodu).

Proponowane alternatywne rozwiązanie, tj. sterowanie parametrami procesowymi poprzez regulację temperatury przy wykorzystaniu zjawiska termoakustycznego, pozwoliłoby uniknąć niebezpieczeństwa wybuchu separowanej mieszaniny w przypadku, gdy co najmniej jeden jej składnik jest wybuchowy lub łatwopalny, zapewniając jednocześnie ułatwioną implementację w układach przemysłowych. Jednakże konieczne są dalsze badania nad tą technologią, uwzględniające m.in. identyfikację wpływu zmian składu gazu, związanego z występowaniem procesu separacji, na stabilność zjawiska termoakustycznego oraz opracowanie konstrukcji efektywnych separatorów membranowych wykorzystujących prezentowaną metodę sterowania.

Literatura

- [1] KOTOWICZ J., JANUSZ-SZYMAŃSKA K., WICIAK G.: *Technologie membranowe wychwyty dwutlenku węgla ze spalin dla nadkrytycznego bloku węglowego*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia – Politechnika Śląska, Gliwice 2015.
- [2] BODZEK M., BOHDZIEWICZ J., KONIECZNY K.: *Techniki membranowe w ochronie środowiska*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
- [3] KALDIS S.P., SKODRAS G., SAKELLAROPOULOS G.P.: *Energy and capital cost analysis of CO₂ capture in coal IGCC processes via gas separation membranes*. „Fuel Processing Technology” 85/2004.

- [4] CZYPEREK M., ZAPP P., BOUWMEESTER H.J.M., MODIGELL M., EBERT K., VOIGT I., MEULENBERG W.A., SINGHEISER L., STOVER D.: *Gas separation membranes for zero-emission fossil power plants: MEM-BRAIN*. „Journal of Membrane Science” 359 /2010.
- [5] STRUBE R., MANFRIDA G.: *CO₂ capture in coal-fired power plants – impact on plant performance*. „International Journal of Greenhouse Gas Control” 5/2011.
- [6] WIJMANS J.G., BAKER R.W.: *The solution-diffusion model: a review*. „Journal of Membrane Science” 107/1995.
- [7] LIM H., HONG S.-I.: *Effects of polyether diamine on gas permeation properties of organic-inorganic hybrid membranes*. „Journal of Sol-Gel Science and Technology” 43/2007.
- [8] CHANG X., ZHU L., XUE Q., LI X., GUO T., LI X., MA M.: *Charge controlled switchable CO₂/N₂ separation for g-C10N9 membrane: Insights from molecular dynamics simulations*. „Journal of CO₂ Utilization” 26/2018.
- [9] DENG S., HU H., ZHUANG G., ZHONG X., WANG J.: *A strain-controlled C₂N monolayer membrane for gas separation in PEMFC application*. „Applied Surface Science” 441/2018.
- [10] CHOOI J.-Y., YUN T., KWAK S.-Y.: *Two-step thermoresponsive membrane with tunable separation properties and improved efficiency*. „Journal of Membrane Science” 554/2018.
- [11] SONG C., FAN Z., LI R., LIU Q., SUN Y., KITAMURA Y.: *Intensification of CO₂ separation performance via cryogenic and membrane hybrid process – Comparison of polyimide and polysulfone hollow fiber membrane*. „Chemical Engineering & Processing: Process Intensification” 133/2018.
- [12] REMIORZ L., DYKAS S., RULIK S.: *Numerical Modelling of Thermoacoustic Phenomenon as Contribution to Thermoacoustic Engine Model*. „Task Quarterly” 3/2010.
- [13] SWIFT G., WOLLAN J.: *Thermoacoustics for Liquefaction of Natural Gas*. „GasTIPS Fall” 4(8)/2002.
- [14] GRZYWNOWICZ K., REMIORZ L.: *Model numeryczny elementarnego termoakustycznego urządzenia chłodniczego*, „Rynek Energii” 131/2017.
- [15] REMIORZ L.: *Badania numeryczne i eksperymentalne akustycznej separacji CO₂*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [16] WICIAK G.: *The application of membrane separator arranged in series-parallel mode to removal of carbon dioxide from flue gases generated in heat and power industry*. „Desalination and Water Treatment” 64/2017.
- [17] Zgłoszenie patentowe z dn. 13.11.2018 r.: Sposób i urządzenie do lokalnej modyfikacji parametrów pracy separatora membranowego z wykorzystaniem zjawiska termoakustycznego, Kancelaria Ogólna UPRP.

 Krzysztof Grzywnowicz – e-mail: krzysztof.grzywnowicz@polsl.pl, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska; Grzegorz Wiciak – e-mail: grzegorz.wiciak@polsl.pl, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska, autor korespondujący