



Andrzej WILK*, Lucyna WIĘCŁAW-SOLNY**, Adam TATARCZUK*, Tomasz SPIETZ*,
Dariusz ŚPIEWAK*, Aleksander KRÓTKI*

Obniżanie energochłonności instalacji separacji CO₂ ze spalin

STRESZCZENIE. Istotnym zagadnieniem związanym z ograniczaniem emisji ditlenku węgla ze spalin powstających w procesie produkcji energii elektrycznej jest zmniejszenie energochłonności wężła wychwytu CO₂, a więc jego negatywnego wpływu na ogólną sprawność bloku węglowego. Można tego dokonać albo poprzez zastosowanie odpowiednich konfiguracji procesowych i integrację z systemami elektrowni, albo poprzez zastosowanie odpowiedniego sorbentu lub też dobór parametrów procesowych pracy instalacji. W artykule przedstawiono wyniki badań prowadzonych nad doбором optymalnych parametrów procesowych instalacji separacji ditlenku węgla. W ramach badań określono wpływ temperatury i ciśnienia w węźle absorpcji oraz ciśnienia w węźle regeneracji, a także wpływ stężenia ditlenku węgla na wlocie na efektywność oczyszczania spalin. Porównano również różne konfiguracje procesowe – układ klasyczny z układem rozdzielonych strumieni. Badania przeprowadzono na aktywowanym roztworze aminy z zawadą steryczną wykorzystując w kolumnie absorpcyjnej wypełnienie strukturalne. Przedstawione wyniki pokazały, iż przy zastosowaniu odpowiednich parametrów pracy można w istotnym stopniu zredukować zużycie energii instalacji wychwytu ditlenku węgla.

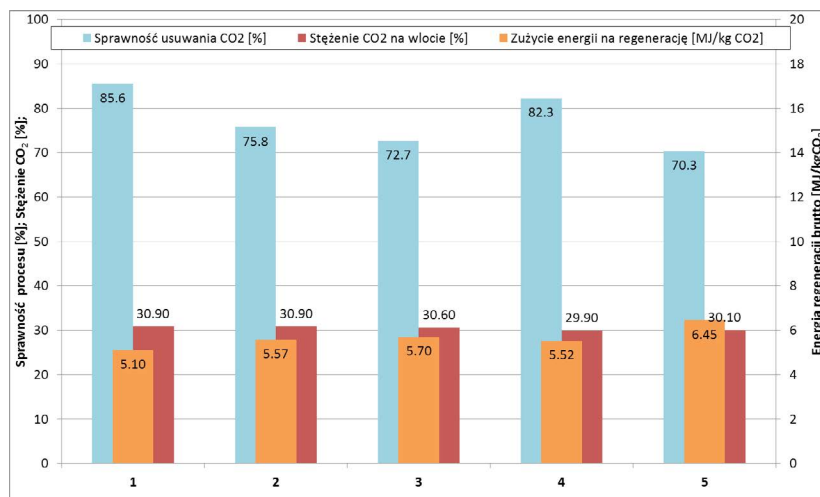
SŁOWA KLUCZOWE: CCS, AMP, ditlenek węgla

* Mgr inż., ** Dr inż. – Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla w Zabrze; e-mail: awilk@ichpw.pl

Wprowadzenie

Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, a w szczególności ditlenku węgla, stanowi ogromne wyzwanie dla sektora energetycznego, który jest jednym z największych źródeł emisji tego gazu. Obniżenie emisji CO₂ z procesów wytwarzania energii elektrycznej wiąże się ze znaczącym zmniejszeniem sprawności bloków energetycznych, związanym z wysoką energochłonnością najbardziej rozwiniętych i najszerzej stosowanych metod separacji ditlenku węgla, czyli metod absorpcji chemicznej (Więclaw-Solny i in. 2011). Spośród tych metod obecnie najczęściej stosowane do oczyszczania gazów, czy procesowych czy rafineryjnych, są procesy absorpcji w roztworach amin. Procesy te prowadzone są w prostym układzie absorpcji-desorpcji. W kolumnie absorpcyjnej roztwór aminowy jest kontaktowany w przeciwnym kierunku ze strumieniem gazu zawierającego CO₂, ditlenek węgla ulega absorpcji w roztworze, a oczyszczony gaz odprowadzany jest z góry kolumny. Nasycony roztwór aminowy jest kierowany z kolumny absorpcyjnej poprzez system wymienników ciepła do kolumny desorpcyjnej. W kolumnie tej roztwór jest ogrzewany, w wyniku czego uwalnia się czysty CO₂ a zregenerowany sorbent jest kierowany z powrotem do kolumny absorpcyjnej przez system wymienników ciepła. Energochłonność procesu jest związana więc głównie z węzłem regeneracji. Obniżyć ją można zasadniczo na dwa sposoby – albo poprzez zastosowanie odpowiednich konfiguracji procesowych (Szczypiński i in. 2013; Spietz i in. 2014) i integrację z systemami elektrowni, dzięki czemu możliwie jest obniżenie zużycia energii do 10%, albo poprzez dobór najefektywniejszego sorbentu cechującego się wysoką pojemnością absorpcyjną, dużą szybkością absorpcji i niskim ciepłem absorpcji ditlenku węgla (Wilk i in. 2013, 2014a). Dzięki zastosowaniu odpowiedniego sorbentu można ograniczyć energochłonność nawet do 30% (Wang i in. 2011).

Przeprowadzone zostały badania mające na celu ocenę możliwości obniżenia energochłonności procesu wychwytu ditlenku węgla oraz wpływu poszczególnych parametrów procesowych i stosowanych sorbentów na efektywność wychwytu CO₂. Badania składały się z dwóch etapów. Pierwszy obejmował wyznaczenie podstawowych parametrów sorbentów aminowych, tj. ciepło absorpcji (Wilk i in. 2014a), pojemność absorpcyjną i szybkość absorpcji (Wilk i in. 2014b, 2015) oraz weryfikację sorbentów na rzeczywistej instalacji separacji ditlenku węgla (Wilk i in. 2015). Drugi etap obejmował badania procesowe na instalacji wychwytu ditlenku węgla w skali laboratoryjnej (6 m³/h) w celu określenia wpływu ciśnienia absorpcji, ciśnienia desorpcji, temperatury absorpcji oraz stężenia wlotowego ditlenku węgla, a także badania różnych konfiguracji procesowych na instalacji o większej skali (100 m³/h). Wszystkie badania procesowe przeprowadzono przy wykorzystaniu sorbentu opartego o aminę z zawadą steryczną – 2-amino-2-metylo-1-propanol. Roztwór ten został wytypowany na bazie wcześniejszych badań, gdzie wykazywał obiecujące wyniki zarówno pod kątem pojemności absorpcyjnej, jak i szybkości absorpcji. Porównanie wybranych sorbentów przedstawia rysunek 1.



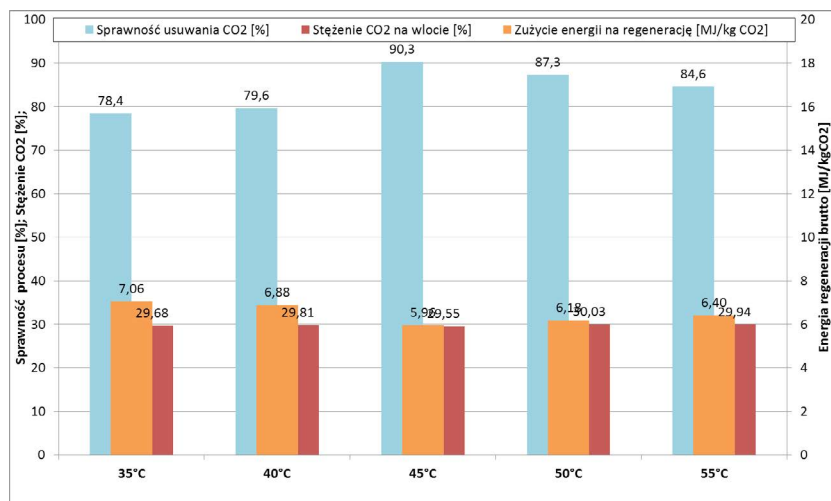
Rys. 1. Porównanie wyników uzyskiwanych dla różnego typu sorbentów: 1 – roztwór aktywowanego 2-amino-2-metylopropanolu (AMP), 2 – roztwór wieloskładnikowy (aminy + ciecze organiczne), 3 – roztwór N-metylodietanolaminy (MDEA) aktywowanej piperazyną (PZ), 4 – roztwór aminoetyloetanolaminy (AEEA), 5 – roztwór AEEA + PZ (Sprawozdanie... 2015)

Fig. 1. Comparison of results for different sorbents: 1 – activated AMP solution, 2 – multicomponent solution, 3 – activated MDEA solution, 4 – AEEA solution, 5 – AEEA/PZ solution

1. Wpływ parametrów procesowych na energochłonność procesu separacji ditlenku węgla

Parametry pracy instalacji separacji ditlenku węgla odgrywają równie istotną rolę, co odpowiedni sorbent. Dla każdego z parametrów (np. ciśnienie absorpcji i desorpcji czy temperatura absorpcji) można dobrać taką wartość przy której będziemy uzyskiwali możliwie najwyższą sprawność i najniższe zużycie energii.

Jednym z głównych czynników wpływających na proces absorpcji jest temperatura. Wraz ze spadkiem temperatury absorpcji wzrasta pojemność absorpcyjna, ale jednocześnie maleje szybkość absorpcji oraz dyfuzyjność. Ze względu na to istotne staje się więc określenie optymalnej temperatury prowadzenia procesu absorpcji, przy której będzie możliwość uzyskania stosunkowo wysokiej szybkości absorpcji przy zachowaniu względnie dużej siły napędowej procesu (wysokiej równowagowej pojemności absorpcyjnej). Rysunek 2. przedstawia porównanie uzyskanych wyników badań wpływu temperatury na proces absorpcji. Jak pokazują uzyskane dane, w zakresie temperatur 35–55°C wraz ze zwiększaniem temperatury początkowo następuje wzrost sprawności, a tym samym i również spadek zużycia energii na kg wychwyconego ditlenku węgla. Natomiast dla temperatury bliskiej 45°C układ uzyskuje maksymalną sprawność, po czym przy dalszym zwiększaniu temperatury roztworu wchodzącego do kolumny absorpcyjnej następuje obniżenie uzyskiwanej sprawności. Gorsze wyniki uzyskiwano w przypadku tempera-



Rys. 2. Wpływ temperatury absorpcji na sprawność i energochłonność procesu absorpcji CO₂ (Sprawozdanie... 2015)

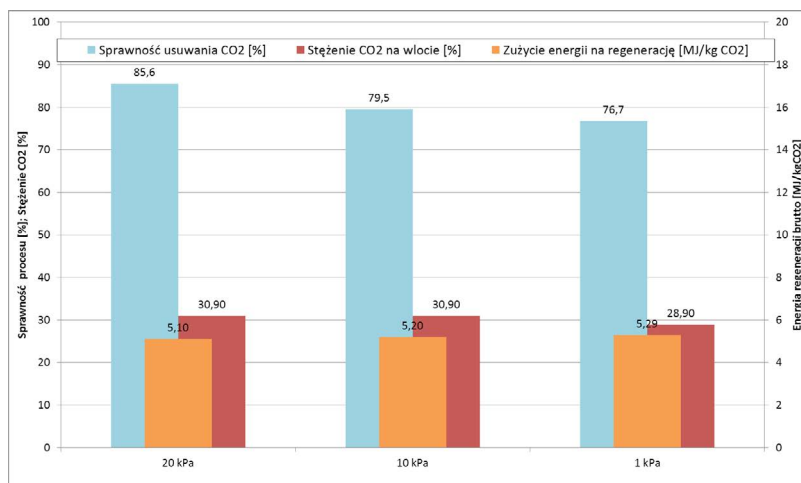
Fig. 2. Influence of temperature on carbon dioxide removal efficiency

tur niższych od temperatury optymalnej (45°C) niż w przypadku temperatur wyższych, co wskazuje, iż większą rolę dla absorpcji ditlenku węgla odgrywają parametry kinetyczne niż równowagowe. Wzrost temperatury o 10°C od temperatury optymalnej powodował spadek sprawności o około 5 pkt. procentowych natomiast obniżenie temperatury o taką samą wartość powodowało spadek sprawności o ponad 10 pkt. procentowych.

Aminy pierwszo- i drugorzędowe mogą ulegać nasyceniu ditlenkiem węgla do 0,5 mola na mol aminy, ze względu na tworzenie stabilnych karbaminianów. Jednak pewna ilość karbaminianu może ulegać hydrolizie w przypadku wszystkich amin, zwłaszcza przy wysokim ciśnieniu CO₂. Wzrost ciśnienia w absorberze wpływa na zwiększenie ciśnienia cząstkowego CO₂, co przekłada się na możliwą do uzyskania w danych warunkach pojemność absorpcyjną roztworu (większa siła napędowa) (Tan i in. 2012; Bailey i Feron 2005), jak i na zmniejszenie oporu wnikania masy w fazie gazowej (Absorption...). Dane uzyskiwane dla roztworu MEA (Godini i Mowla 2008) jak i aktywowanej piperazyną MDEA (Zhang i in. 2003) potwierdzają korzystny wpływ zwiększonego ciśnienia na sprawność wychwytu ditlenku węgla. Przy wysokim ciśnieniu cząstkowym CO₂, zwiększeniu ulega napięcie międzyfazowe, co skutkuje zwiększeniem stężenia w obszarze międzyfazowym. Te warunki powodują większą niestabilność na granicy gaz–ciecz i prowadzą do powstawania tzw. efektu Marangoni. Efekt ten znacznie zwiększa szybkość wymiany masy, ale może być łatwo zniwelowany poprzez obecność nawet śladowych ilości surfaktantów w roztworze aminowym (Buzek i in. 1997).

Uzyskane dane dotyczące wpływu ciśnienia absorpcji na proces wychwytu CO₂ przedstawia rysunek 3. Zgodnie z przewidywaniami wzrost ciśnienia w kolumnie absorpcyjnej spowodował poprawę sprawności wychwytu ditlenku węgla i spadek zużycia energii. Podniesienie ciśnienia w absorberze do 120 kPa abs. zwiększyło sprawność wychwytu ditlenku węgla o około 9% i o kilka procent obniżyło ogólne zużycie energii na regenerację.

Ciśnienie w kolumnie desorpcyjnej również odgrywa ważną rolę w procesie wychwytu ditlenku węgla. Zwiększone ciśnienie desorpcji umożliwia stosowanie desorberów o mniejszych gabarytach, jak i również powoduje wzrost temperatury w kolumnie, co ułatwia desorpcję di-

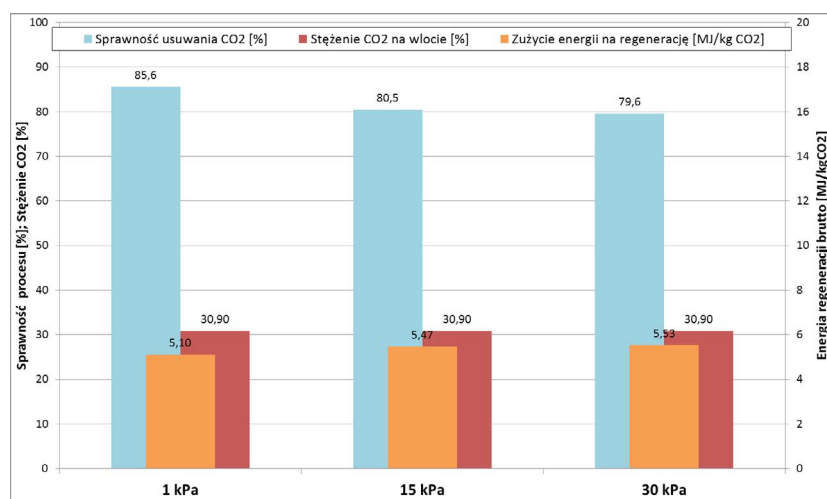


Rys. 3. Wpływ ciśnienia absorpcji na sprawność i energochłonność procesu wychwytu CO₂ (Sprawozdanie... 2015)

Fig. 3. Influence of absorption pressure on carbon dioxide removal efficiency

tlenku węgla. Jednakże większość alkanoloamin ulega degradacji termicznej w temperaturach powyżej 135°C, co w istotny sposób wpływa na straty sorbentu w procesie – jak pokazują dane literaturowe (Warudkar i in. 2013a, b), wzrost ciśnienia powoduje wyraźne zwiększenie strat sorbentu.

Rysunek 4. przedstawia porównanie wyników uzyskanych dla różnych wartości ciśnienia desorpcji. Uzyskane wyniki pokazały, iż zwiększanie ciśnienia w kolumnie desorpcyjnej, w przypadku aktywowanego roztworu 2-amino-2-metylo-1-propanolu, powoduje spadek uzyskiwanych sprawności wychwytu ditlenku węgla oraz nieznaczny wzrost zużycia energii.

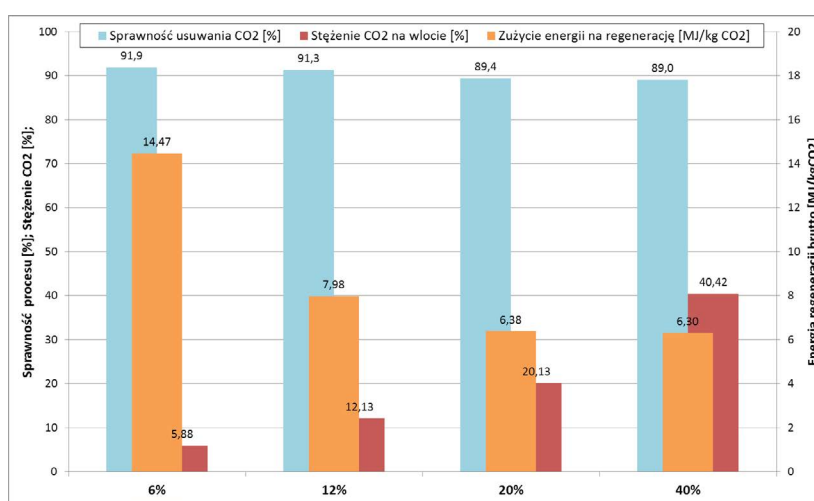


Rys. 4. Wpływ ciśnienia desorpcji na sprawność i energochłonność procesu wychwytu CO₂ (Sprawozdanie... 2015)

Fig. 4. Influence of stripper pressure on efficiency of carbon dioxide removal

Równie istotnym czynnikiem, co pozostałe parametry procesowe, jest stężenie ditlenku węgla w gazach wlotowych. Efekt zwiększenia stężenia wlotowego CO₂ jest porównywalny do wzrostu ciśnienia w kolumnie absorpcyjnej. Ilość ditlenku węgla w gazie dodatkowo przekłada się na nasycenie roztworu aminowego. Im wyższe nasycenie roztworu CO₂, tym większa jest ilość ditlenku węgla związanego w formie wodorowęglanu, poza tym związanym w formie karbaminianu. Obniża to średnie ciepło absorpcji ditlenku węgla, a więc również ułatwia jego desorpcję z roztworu.

Wyniki badań nad określeniem wpływu stężenia wlotowego ditlenku węgla przedstawione na rysunku 5. pokazują, iż dla zbliżonych sprawności wychwytu ditlenku węgla (około 90%) wartości zużycia energii wykazują znaczące zróżnicowanie. Im wyższa jest zawartość ditlenku węgla w gazie, tym uzyskiwane wskaźniki zużycia energii są niższe.



Rys. 5. Wpływ stężenia wlotowego CO₂ na sprawność i energochłonność procesu wychwytu CO₂ (Sprawozdanie... 2015)

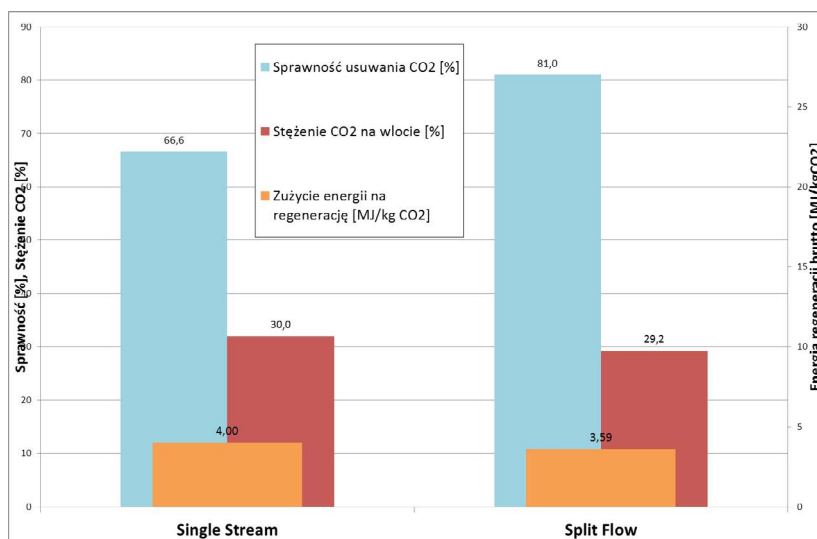
Fig. 5. Influence of inlet CO₂ concentration on efficiency of carbon dioxide removal

2. Wpływ konfiguracji procesowych na energochłonność procesu separacji ditlenku węgla

W celu poprawy sprawności, jak i efektywności energetycznej procesu wychwytu CO₂, wprowadza się różnego typu modyfikacje procesowe. Stosuje się np. dodatkowe desorbery, które mają na celu poprawę stopnia regeneracji roztworu, poza głównymi strumieniami aminy t.j. zregenerowanym i nasyconym, z kolumn wyodrębniany jest dodatkowo jeden bądź dwa strumienie (tzw. częściowo-zregenerowane). Wykorzystywane jest również ciepło kondensacji par powstałych w regeneratorze – poprzez wyprowadzenie pary z aparatu i jej rozprężenie, a następnie sprężanie i ponowne skierowanie do kolumny (Spietz i in. 2014).

W ramach prowadzonych badań przetestowano wpływ konfiguracji z rozdzielonymi strumieniami (strumień głęboko zregenerowany i średnio zregenerowany wychodzący z desorbera) w porównaniu do układu klasycznego z pojedynczymi strumieniami. Układ rozdzielonych strumieni został zaproponowany przez Shoelda w 1934 r. (Cousins i in. 2011a, b). Układ ten miał na celu rozwiązanie problemu ze wzrostem temperatury w kolumnie absorpcyjnej wynikającym z egzotermicznej reakcji absorpcji ditlenku węgla (Cousins i in. 2011b). Jest to szczególnie istotne w przypadku procesów wychwyty ditlenku węgla z gazów o jego zwiększonej koncentracji, gdzie temperatura w kolumnie absorpcyjnej może osiągnąć nawet 80°C.

Zmiana konfiguracji procesowej z układu klasycznego jednostrumieniowego (tzw. *single stream*) na układ z rozdzielonymi strumieniami (tzw. *split flow*) powoduje istotną zmianę w uzyskiwanych na wyjściu parametrach, co pokazuje rysunek 6. Zastosowanie układu *split flow* spowodowało wzrost sprawności o około 15 pkt. procentowych oraz spadek zużycia energii o około 10%.



Rys. 6. Porównanie klasycznej konfiguracji procesowej z układem rozdzielonych strumieni (Sprawozdanie... 2015)

Fig. 6. Comparison of different process configurations

Poza przedstawionymi wynikami badań nad wpływem parametrów, takich jak: ciśnienie, temperatura czy stężenie ditlenku węgla w gazie istotną rolę odgrywa również wypełnienie zastosowane w kolumnie absorpcyjnej. Wyniki badań prowadzonych nad doбором wypełnienia przedstawione zostały w poprzedniej pracy (Wilk i in 2014b). Najlepsze wyniki uzyskiwano w przypadku zastosowania wypełnień strukturalnych (700 CY), które zapewniały wysoki stopień wychwyty ditlenku węgla przy stosunkowo niskim oporze przepływu gazu przez złożo.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki pokazały, jak istotną rolę odgrywa dobór parametrów procesowych oraz konfiguracji procesowych w ograniczaniu energochłonności i poprawie sprawności instalacji separacji ditlenku węgla z gazów. Zmiana parametrów poprawia bądź pogarsza efektywność procesu wychwytu CO₂ w równie dużym stopniu, co zmiana stosowanego sorbentu. Największy wpływ na uzyskiwane wartości zużycia energii miała temperatura doprowadzanego do wężła absorpcji sorbentu oraz stężenie ditlenku węgla na wlocie. Równie ważną kwestią okazała się także przyjęta konfiguracja procesowa – zmiana konfiguracji zmniejszyła zużycie energii o 10% i zwiększyła sprawność usuwanego CO o około 15 pkt. procentowych. Zmiana wartości ciśnienia zarówno w desorberze jak i w absorberze powoduje nieco mniejsze zmiany w efektywności procesu absorpcji CO₂, ale może mieć duże znaczenie podczas długotrwałej eksploatacji instalacji – źle dobrane ciśnienie może się przyczynić do znacznych strat sorbentu.

Praca naukowa współfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, jako Projekt Strategiczny PS/E/2/66420/10 „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii spalania tlenowego dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO₂ oraz w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysoko sprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.

Literatura

- Absorption of Carbon dioxide in Packed Column - ijsrp-p2885.pdf. [Online] Dostępne w: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0414/ijsrp-p2885.pdf> [Dostęp: 28.06.2015].
- BAILEY, D.W. i FERON, P.H.M. 2005. Post-Combustion Decarbonisation Processes. *Oil Gas Sci. Technol.* Vol. 60, No. 3, s. 461–474.
- BUZEK i in. 1997 – BUZEK, J., PODKAŃSKI, J. i WARMUZIŃSKI, K. 1997. The enhancement of the rate of absorption of CO₂ in amine solutions due to the Marangoni effect. *Energy Convers. Manag.* Vol. 38, Supplement, s. S69–S74.
- COUSINS i in. 2011a – COUSINS, A., WARDHAUGH, L.T. i FERON, P.H.M. 2011a. Preliminary analysis of process flow sheet modifications for energy efficient CO₂ capture from flue gases using chemical absorption. *Chem. Eng. Res. Des.* Vol. 89, No. 8, s. 1237–1251.
- COUSINS i in. 2011b – COUSINS, A., WARDHAUGH, L.T. i FERON, P.H.M. 2011b. A survey of process flow sheet modifications for energy efficient CO₂ capture from flue gases using chemical absorption. *Int. J. Greenh. Gas Control* Vol. 5, No. 4, s. 605–619.
- GODINI, H.R. i MOWLA, D. 2008. Selectivity study of H₂S and CO₂ absorption from gaseous mixtures by MEA in packed beds. *Chem. Eng. Res. Des.* Vol. 86, No. 4, s. 401–409.
- SPIETZ i in. 2014 – SPIETZ, T., WIĘCŁAW-SOLNY, L., TATARCZUK, A., KRÓTKI, A. i STEC, M. 2014. Technological modifications in pilot research on CO₂ capture process. *Chemik* Vol. 68, No. 10, s. 884–892.
- Sprawozdanie... 2015 – Sprawozdanie z wykonania pracy pt.: Etap 43: Badania laboratoryjne optymalnych warunków pracy instalacji separacji CO₂. Zabrze 2015.

- SZCZYPIŃSKI i in. 2013 – SZCZYPIŃSKI, T., TATARCZUK, A. i GRUDNIK, K. 2013. Optimization of amine-based CO₂ capture from flue gas by flowsheet modification. *Przem. Chem.* Vol. 92, No. 1, s. 106–110.
- WANG i in. 2011 – WANG, M., LAWAL, A., STEPHENSON, P., SIDDEERS, J. i RAMSHAW, C. 2011. Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chem. Eng. Res. Des.* Vol. 89, No. 9, s. 1609–1624.
- WARUDKAR i in. 2013a – WARUDKAR, S.S., COX, K.R., WONG, M.S. i HIRASAKI, G.J. 2013a. Influence of stripper operating parameters on the performance of amine absorption systems for post-combustion carbon capture: Part I. High pressure strippers. *Int. J. Greenh. Gas Control* Vol. 16, s. 342–350.
- WARUDKAR i in. 2013b – WARUDKAR, S.S., COX, K.R., WONG, M.S. i HIRASAKI, G.J. 2013b. Influence of stripper operating parameters on the performance of amine absorption systems for post-combustion carbon capture: Part II. Vacuum strippers. *Int. J. Greenh. Gas Control* Vol. 16, s. 351–360.
- WIĘCŁAW-SOLNY i in. 2011 – WIĘCŁAW-SOLNY, L., ŚCIAŻKO, M., TATARCZUK, A., KRÓTKI, A. i WILK, A. 2011. Will CCS be cheaper? – New CO₂ sorbents wanted. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 14, z. 2, s. 441–453.
- WILK i in. 2013 – WILK, A., WIĘCŁAW-SOLNY, L., TATARCZUK, A., ŚPIEWAK, D. i KRÓTKI, A. 2013. Effect of composition of absorption solution on carbon dioxide removal efficiency. *Przem. Chem.* Vol. 92, No. 1, s. 120–125.
- WILK i in. 2014a – WILK, A., WIĘCŁAW-SOLNY, L., KIERZKOWSKA-PAWLAK, H., STEC, M., ŚPIEWAK, D. i SPIETZ, T. 2014a. Effect of the solvent composition on the heat of absorption in the CO₂ capture from flue gases. *Przem. Chem.* Vol. 93, No. 12, s. 2237–2240.
- WILK i in. 2014b – WILK, A., WIĘCŁAW-SOLNY, L., ŚPIEWAK, D. i SPIETZ, T., 2014b. Badania laboratoryjne nad doбором optymalnych warunków pracy instalacji separacji CO₂ – postęp prac. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 17, z. 4, s. 339–349.
- WILK i in. 2015 – WILK, A., WIĘCŁAW-SOLNY, L., ŚPIEWAK, D., SPIETZ, T. i KIERZKOWSKA-PAWLAK, H. 2015. A Selection of Amine Sorbents for CO₂ Capture from Flue Gases. *Chem. Process Eng.* Vol. 36, No. 1, s. 49–57.
- TAN i in. 2012 – TAN, L.S., SHARIFF, A.M., LAU, K.K. i BUSTAM, M.A. 2012. Factors affecting CO₂ absorption efficiency in packed column: A review. *J. Ind. Eng. Chem.* Vol. 18, No. 6, s. 1874–1883.
- ZHANG i in. 2003 – ZHANG, X., WANG, J., ZHANG, C., YANG, Y. i XU, J. 2003. Absorption Rate into a MDEA Aqueous Solution Blended with Piperazine under a High CO₂ Partial Pressure. *Ind. Eng. Chem. Res.* Vol. 42, No. 1, s. 118–122.

Andrzej WILK, Lucyna WIĘCŁAW-SOLNY, Adam TATARCZUK, Tomasz SPIETZ,
Dariusz ŚPIEWAK, Aleksander KRÓTKI

Energy consumption reduction of carbon dioxide removal plants

Abstract

An important issue related to the reduction of carbon dioxide emission from flue gases generated in electricity production processes is the reduction of energy consumption of CO₂ capture plants, and its negative impact on the overall efficiency of coal-fired units. This can be done by using the appropriate process configuration and integration with power station systems, or by using a suitable sorbent and selection of optimal operating parameters of the installation. The article presents the results of research conducted over the selection of the optimum process parameters of carbon dioxide separation plants. During the research the effects of absorption temperature and pressure and desorption pressure on carbon dioxide removal efficiency and the influence of the carbon dioxide concentration at the inlet gas on purification efficiency were determined. Also compared were the various process configurations a single stream with a split flow. The research was conducted on a solution of activated sterically hindered amine using structural packing in the absorption column. The results showed that appropriate operating parameters can significantly reduce energy consumption of carbon dioxide capture plants.

KEYWORDS: CCS, AMP, carbon dioxide