

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

Badania pilotowe procesu aminowego usuwania CO₂ w Elektrowni Jaworzno II

Streszczenie: Badania procesu usuwania CO₂ ze spalin klasycznych bloków węglowych stanowiły jeden z głównych elementów Strategicznego Programu Badawczego realizowanego w latach 2010–2015. W strukturze krajowej energetyki, opartej w głównej mierze na węglu, badania te mają znaczenie strategiczne w aspekcie konieczności obniżenia emisji gazów cieplarnianych, w tym CO₂, z procesów generacji energii elektrycznej, zgodnie z wymaganiami polityki klimatyczno-energetycznej UE. W artykule przedstawiono wyniki prac realizowanych w Elektrowni Jaworzno, gdzie w 2014 roku przeprowadzono testy na instalacji pilotowej aminowego usuwania CO₂, w których skupiono się na określeniu wpływu konfiguracji procesowych na sprawność i energochłonność procesu usuwania CO₂. Zgodnie z danymi literaturowymi zaawansowane modyfikacje procesowe technologii mycia aminowego, obok doboru specjalnych roztworów absorpcyjnych pozwolą na dalsze obniżenie energochłonności instalacji usuwania CO₂ ze spalin, które współpracując z blokiem energetycznym będą miały bezpośredni wpływ na obniżenie sprawności takiego bloku. Otrzymane wyniki badań dla przedstawionego w pracy wariantu przepływu z rozdzielonymi strumieniami roztworu i międzystopniowym chłodzeniem, w stosunku do klasycznego układu przepływowego, wykazały wzrost sprawności usuwania CO₂ średnio o około 8% oraz redukcję zapotrzebowania cieplnego średnio o około 7%. Wyniki te są zgodne z danymi literaturowymi, które do tej pory opierały się głównie na obliczeniach modelowych i symulacyjnych pracy bloków w systemie CCS.

Słowa kluczowe: CCS, aminowe usuwanie CO₂, modyfikacje procesowe

Amine – based pilot plant tests – the Jaworzno power plant campaigns

Abstract: Research of the Carbon Capture process from flue gases was one of the main elements of the Strategic Research Program carried out in 2010-2015. According to the Climate and Energy Policy of the European Union, this research is very important for the national energy sector which is mostly based on coal combustion processes. The article presents the results of the work – amine based pilot plant tests carried out at Jaworzno Power plant in 2014. These test were focused on determining the impact of process configuration on performance and energy consumption of the Carbon Capture Process (CCP). The advanced modifications of the CCP, together with the

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

special solvent selection allow for further energy consumption reduction of the CO₂ removal from flue gases. The CCP energy consumption impacts on the power block efficiency reduction. The obtained results for the split streams flow and interstage cooling showed an increase of CO₂ removal efficiency of about 3 to 8 percentage points, and a reduction of heat demand of approximately 5 percentage points compared to the classic flow system. These results are in line with the model calculations and simulation work presented in the world's literature.

Keywords: CCS, amine based CO₂ removal process, process modifications

Wprowadzenie

W ostatnich dwóch dziesięcioleciach wydać wyraźny wzrost działalności badawczej i innowacyjnej w obszarze metod usuwania CO₂ z gazów spalinowych, którego główną siłą napędową stała się polityka klimatyczna UE i rozwiniętych światowych gospodarek. Celem propagowanej polityki energetyczno-klimatycznej jest obniżenie negatywnego oddziaływania przemysłowej działalności człowieka na środowisko. W UE wyrazem tych dążeń są m.in. coraz ostrzejsze zobowiązania krajów członkowskich Unii do obniżenia emisji CO₂ (Wojtkowska-Łodej 2015).

Wyzwania stojące przed polską energetyką to poprawa efektywności energetycznej, dywersyfikacja struktury wytwarzania energii oraz ograniczenie oddziaływania na środowisko przy równoczesnej konieczności poprawy konkurencyjności krajowego sektora energetycznego na otwierającym się rynku wewnętrznym UE (Zamasz 2015). Polski sektor energetyczny jest trzecim pod względem wielkości produkcji energii elektrycznej z paliw stałych w Europie, za niemieckim i brytyjskim (Wojtkowska-Łodej 2015). Struktura produkcji energii elektrycznej w Polsce i w UE jest bardzo różna, i tak w Polsce energia elektryczna w 85% generowana jest na bazie spalania węgla kamiennego i brunatnego, podczas gdy dla całej UE udział ten wynosi 25,9% (Wojtkowska-Łodej 2015).

Biorąc pod uwagę strategiczne znaczenie węgla w obecnej strukturze krajowego systemu energetycznego (Śląsk 2.0... 2015), zagadnienia obniżenia emisji z procesów generacji energii elektrycznej stanowiły jeden z głównych nurtów badawczych Strategicznego Programu Badawczego „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”, realizowanego przez konsorcja naukowo-przemysłowe w latach 2010–2015. W zadaniu badawczym 1 – poświęconemu klasycznym blokom węglowym, badania skoncentrowano m.in. na rozwoju technologii absorpcyjnego wychwytu CO₂ ze spalin węglowych kotłów energetycznych.

Przedstawione w artykule prace miały na celu sprawdzenie wpływu konfiguracji przepływowych procesu aminowego usuwania CO₂ na sprawność usuwania CO₂ ze spalin i zapotrzebowanie energetyczne procesu desorpcji, optymalizację procesu, określenie wpływu podstawowych parametrów pracy na sprawność procesu prowadzonego w warunkach przemysłowych.

1. Opis instalacji

Instalacja pilotowa jako narzędzie badawcze została zaprojektowana w układzie wielo-wariantowym przepływu strumieni absorbentu, obejmując możliwość pracy zgodnie z konwencjonalnym schematem procesu (klasycznym), jak również w innych zaawansowanych

układach (Spietz i in. 2014), które według doniesień literaturowych (Le Moullec i Kanniche 2011) i badań modelowych (Szczypiński i in. 2013) mają korzystny wpływ na proces.

Opis instalacji pilotowej do usuwania CO₂ ze spalin wraz ze schematem ogólnym został przedstawiony w kilku krajowych i zagranicznych publikacjach (Więclaw-Solny i in. 2012; Stec i in. 2015a, b).



Rys. 1. Widok instalacji pilotowej w Elektrowni Jaworzno

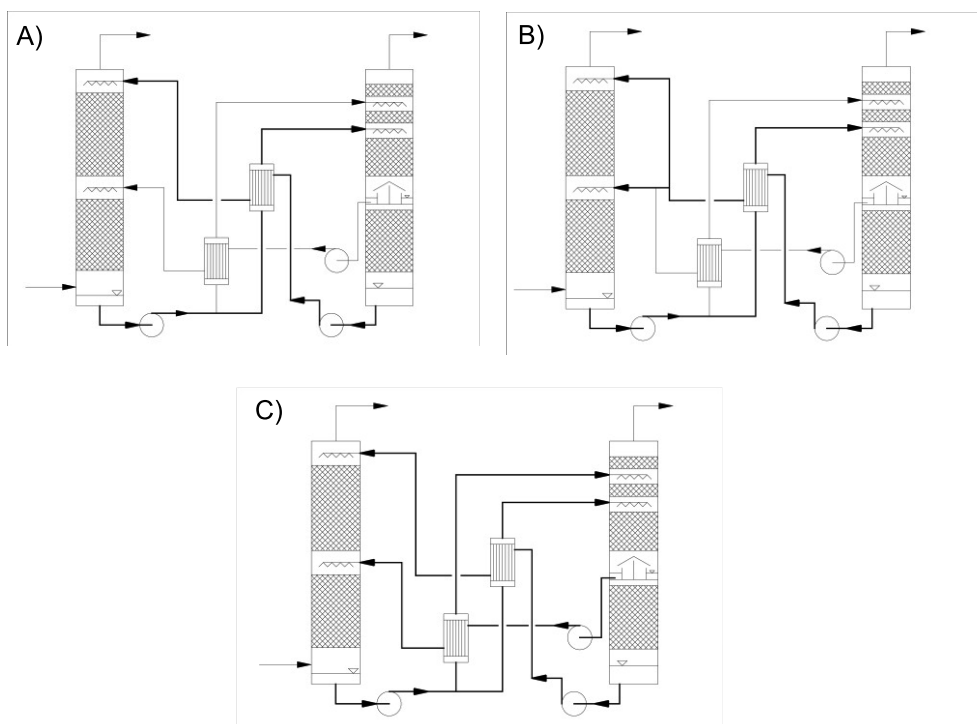
Fig. 1. Pilot plant view at Jaworzno Power Plant

2. Wybrane konfiguracje procesowe instalacji pilotowej

Instalacja pilotowa poprzez zaprojektowaną mnogość połączeń i zaworów pomiędzy poszczególnymi nitkami pozwala na sprawdzenie różnych wariantów przepływu strumieni roztworu w module absorpcji CO₂.

Najprostszym wariantem procesowym jest wariant klasycznego przepływu strumieni cieczy (rys. 2 A). W wariacie klasycznym, roztwór zregenerowany, jak i nasycony, przepływają tylko jedną nitką, a kontakt pomiędzy strumieniami, związany z wymianą ciepła, zachodzi tylko na jednym wymienniku ciepła. Układ klasyczny, stosowany w większości instalacji aminowych, pozwala porównać działanie przedstawionej instalacji z innymi instalacjami pilotowymi. Wyniki wstępnych testów dla wariantu klasycznego z zastosowaniem roztworu 30% monoetanolaminy wykazały zbieżność z wynikami pochodzącymi z instalacji pilotowych CSIRO PCC (Artano i in. 2012) i CASTOR (Mangalapally i in. 2012).

Bardziej zaawansowane warianty przepływowe (rys. 2B, C) polegają na rozdzieleniu strumienia cieczy zregenerowanej i/lub nasyconej, jak również wprowadzeniu roztworu na różne wysokości kolumn. Przedstawione rozwiązania pozwalają na uzyskanie wyższych sprawności usuwania CO₂, a także obniżyć zużycie energii. Z drugiej jednak strony koszt



Rys. 2. Uproszczone schematy badanych wariantów procesowych instalacji pilotowej:
 A) klasyczny, B) z międzystopniowym chłodzeniem kolumny absorpcyjnej, C) z rozdzielonym strumieniem roztworu absorpcyjnego

Fig. 2. A simplified schemes of pilot plant streams configurations:
 A) standard flow. B) multi absorber feed, C) split flows process

inwestycyjny instalacji o zmodyfikowanych układach przepływu roztworu jest wyższy niż w przypadku układu klasycznego (Polasek i in. 1983).

Rysunek 2B przedstawia konfigurację przepływu roztworu z międzystopniowym chłodzeniem kolumny absorpcyjnej. Roztwór zregenerowany w tym przypadku jest podzielony na dwa strumienie i wprowadzany jest na różne wysokości kolumny absorpcyjnej. Wprowadzając zimną ciecz zregenerowaną do części środkowej kolumny absorpcyjnej, można obniżyć temperaturę absorpcji, co termodynamicznie poprawia absorpcję CO_2 . Rozwiązanie to powoduje podobny efekt, co zastosowanie standardowego układu z międzystopniowym chłodzeniem kolumny absorpcyjnej, gdzie roztwór częściowo nasycony z górnego złoza kolumny jest zbierany, chłodzony i ponownie wprowadzany poniżej półki zbierającej (Tobiesen i in. 2007). Wprowadzanie zimnego roztworu zregenerowanego w porównaniu z częściowo nasyconym powoduje zwiększenie termodynamicznej siły napędowej procesu absorpcji, co poprawia absorpcję CO_2 , jak również w mniejszym stopniu umożliwia uzyskanie wyższego, równowagowego stopnia karbonizacji roztworu (Polasek i in. 1983). Analiza teoretyczna klasycznego układu z układem posiadającym międzystopniowe chłodzenie wskazała na redukcję zapotrzebowania cieplnego na regenerację brutto o około 3,5% (Le Moulec i Kanniche 2011). Literaturaowy poziom redukcji zapotrzebowania cieplnego procesu desorpcji jest zgodny z wynikami

zaprezentowanymi w niniejszej pracy. Niższe zapotrzebowanie na ciepło desorpcji natomiast, w porównaniu z wynikami literaturowymi, uzyskano dzięki rozdzieleniu aminy zregenerowanej, a nie jak w przypadku standardowego układu z chłodzeniem międzystopniowym aminy częściowo nasyconej (Le Moullec i Kanniche 2011).

Rysunek 2C przedstawia najbardziej zaawansowany procesowo układ absorpcji CO₂ z rozdzieleniem strumienia. W konfiguracji tej występuje dodatkowy strumień roztworu częściowo zregenerowanego. Roztwór częściowo zregenerowany zbierany jest z części środkowej kolumny desorpcyjnej i pompowany jest przez wymiennik krzyżowy i chłodziącą końcową, aż do części środkowej kolumny absorpcyjnej (Polasek i in. 1983). Zmniejszenie strumienia aminy poprzez odprowadzanie części roztworu częściowo zregenerowanego powoduje obniżenie stopnia karbonizacji roztworu zregenerowanego w dolnej części kolumny desorpcyjnej. Roztwór częściowo zregenerowany pompowany jest do części środkowej kolumny absorpcyjnej, gdzie ditlenek węgla jest wstępnie absorbowany. Roztwór głęboko zregenerowany, o bardzo niskim stopniu karbonizacji wpływa natomiast na szczyt kolumny absorpcyjnej, gdzie usuwa pozostały ditlenek węgla z gazu. Użycie roztworu głęboko zregenerowanego na szczycie kolumny absorpcyjnej, gdzie ciśnienie cząstkowe CO₂ jest niskie, a roztworu częściowo zregenerowanego w środkowej części, gdzie ciśnienie cząstkowe CO₂ jest wyższe, wyrównuje termodynamiczną siłę napędową procesu na całej długości kolumny. Wyrównanie siły napędowej obniża koncentrację ditlenku węgla w gazie wylotowym z kolumny absorpcyjnej. Konfiguracja procesowa z rozdzielonymi strumieniami odznacza się jednak zwiększoną ilością cyrkulującego roztworu pomiędzy kolumnami. Przeprowadzona analiza literaturowa wykazała, że układ przepływu z rozdzielonymi strumieniami roztworu powoduje redukcję zapotrzebowania cieplnego na desorpcję CO₂ od 5% (Polasek i in. 1983) do nawet 30% (Aroonwilas i Veawab 2007).

3. Testy badawcze

Media

Podczas prac badawczych z zastosowaniem instalacji pilotowej wykorzystano spaliny pochodzące z kotła fluidalnego usytuowanego w TAURON Wytwarzanie S.A. Oddział Elektrownia Jaworzno III – Elektrownia II w Jaworznie.

Stosowanym roztworem do absorpcji CO₂ w czasie prowadzenia testów w Elektrowni Jaworzno, był 30% (wag.) roztwór wodny etanoloaminy – MEA z dodatkiem środka antypieniowego, którym był Silpian W3.

Metodologia prowadzenia badań

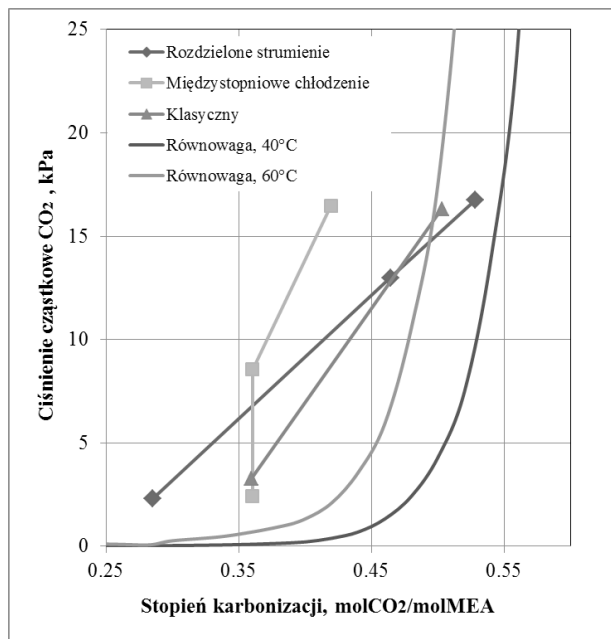
Badania pilotowe zostały podzielone na tzw. kampanie badawcze, które trwały przez około 100 godzin ciągłej, nieprzerwanej pracy instalacji pilotowej. Kampanie badawcze podzielone zostały na krótsze okresy, w których badano wpływ różnych parametrów na proces aminowej absorpcji CO₂.

Po przeprowadzeniu czynności rozruchowych, następował etap stabilizacji parametrów zgodnie z wyznaczonymi nastawami, opisanymi w karcie kampanii badawczej. Wszystkie parametry były na bieżąco monitorowane i automatycznie zapisywane dzięki oprogramowaniu typu SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Podgląd na parametry i wybór ich stanu ustalonego był możliwy dzięki tworzonemu w czasie rzeczywistym wykresom. Stan ustalony wybierano średnio z około 60 minutowego okresu niezmienności kluczowych parametrów procesu. Z zebranych danych wyliczano wartości średnie i na ich podstawie dokonywano szczegółowych obliczeń. Jako wartości porównawcze wykorzystano wartości sprawności usuwania CO₂ oraz zużycia energii na regeneracji roztwór (liczone bezpośrednio z ilości energii elektrycznej dostarczanej do grzałki wyparki kolumny desorpcyjnej).

4. Wyniki badań

Linia operacyjna procesu absorpcji CO₂

Rysunek 3. zawiera wyznaczone linie operacyjne dla różnych wariantów procesowych oraz linie równowag absorpcyjnych dla danej temperatury. Linie równowag absorpcyjnych CO₂ w 30-procentowym roztworze MEA zaczerpnięto z pozycji literaturowej (Jou i in.



Rys. 3. Porównanie linii operacyjnych kolumny absorpcyjnej dla różnych konfiguracji procesowych instalacji pilotowej w obecności linii równowag absorpcyjnych

Fig. 3. Comparison of absorption column operating lines for different process configurations with equilibrium lines at 40 and °C

1995). Jako że temperatura w kolumnie absorpcyjnej podczas testów wahała się w granicach 40–60°C wybrano linie równowag absorpcji w temperaturach 40 i 60°C.

Przedstawione dane eksperymentalne (rys. 3) w postaci ciśnień cząstkowych CO₂ nad roztworem, w kolumnie absorpcyjnej dotyczą roztworów: zregenerowanego (wlotowego), częściowo zregenerowanego (wlotowego do środkowej sekcji kolumny) i nasyconego (wylotowego), wyjątkiem jest układu klasyczny, gdzie występują jedynie dwa strumienie cieczy.

Linie, którymi połączono punkty, narysowano jedynie w celu poprawy wizualnej rysunku.

Odległość pomiędzy linią operacyjną, a równowagową jest miarą siły napędowej procesu absorpcji CO₂ w roztworze MEA. W klasycznym układzie przepływu strumieni siła napędowa jest stosunkowo niska, co spowodowane jest wysokim wylotowym ciśnieniem cząstkowym CO₂. W układzie z rozdzielonymi strumieniami odległość pomiędzy linią operacyjną a równowagową jest wyższa, szczególnie w niskim zakresie ciśnień CO₂ (dla górnej części kolumny absorpcyjnej), gdzie wpływa głęboko zregenerowany roztwór absorpcyjny, co jest jedną z idei rozdzielania strumieni w układzie (Polasek i in. 1983). Stosunkowo wysoka siła napędowa w części górnej kolumny absorpcyjnej poprawia sprawność usuwania CO₂.

Najniższą siłę napędową w dolnej części kolumny zaobserwowano dla układu procesowego z międzystopniowym chłodzeniem, gdzie roztwór zregenerowany wpływa na szczyt, jak i do środkowej sekcji kolumny absorpcyjnej. Roztwór zregenerowany wpływając do środkowej sekcji kolumny zmienia linię operacyjną dla wysokich ciśnień cząstkowych CO₂.

Dla wybranych testów, zarówno dla wariantów z rozdzielonym strumieniem, jak i międzystopniowym chłodzeniem wyniki sprawności usuwania CO₂ ze spalin były zbliżone: 89% i 88% sprawności i były średnio o 5% wyższe niż dla klasycznego układu procesowego (tab. 1).

Profile temperatur i stężeń CO₂ kolumny absorpcyjnej

Rysunek 4. przedstawia wykresy temperatur i stężeń CO₂ w funkcji wysokości kolumny absorpcyjnej. Dla analizowanych konfiguracji procesowych interesujący wzrost temperatury, związany z egzotermicznym ciepłem absorpcji, można zaobserwować na różnych wysokościach kolumny absorpcyjnej. W układzie klasycznym najwyższa temperatura przypada na górną część kolumny absorpcyjnej i spada niemalże liniowo ze spadkiem wysokości. Kształt ten jest zgodny z profilem temperatur kolumn absorpcyjnych większości instalacji pilotowych, pracujących w tym układzie przepływowym (Stec i in. 2015b). Związany z wysoką temperaturą moduł napędowy jest najwyższy zaraz poniżej miejsca zasilania kolumny i maleje liniowo wraz ze spadkiem wysokości kolumny.

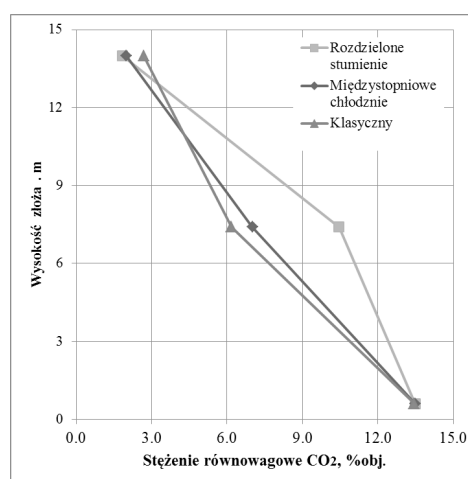
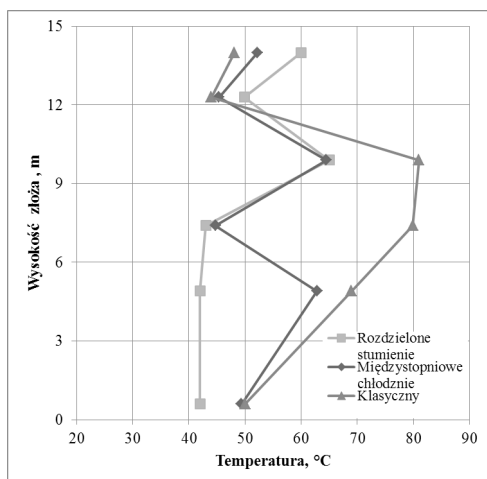
W układzie przepływowym z międzystopniowym chłodzeniem kolumny absorpcyjnej najwyższe temperatury można zaobserwować dla dwóch różnych wysokości – na szczycie kolumny i na środku kolumny, poniżej miejsca zasilania roztworem zregenerowanym. Zimny strumień roztworu zregenerowanego wpływając do środkowej sekcji kolumny początkowo powoduje obniżenie temperatury „spływającego” z górnej części roztworu w równowadze z gazem. Ze spadkiem wysokości kolumny, roztwór wpływający do środkowej części również oddaje ciepło, przez co kolumna ponownie się nagrzewa.

Dla układu procesowego z rozdzielonym strumieniem, gdzie kolumna absorpcyjna również jest zasilana dwoma strumieniami, najwyższą temperaturę zauważamy tylko na jednej

TABELA 1. Wybrane wyniki badań różnych konfiguracji procesowych przepływu strumieni

TABLE 1. Process conditions, CO₂ recovery, reboiler heat duty and CO₂ loading for selected tests

Wariant procesowy	Sprawność usuwania CO ₂ [%]	Zapotrzebowanie cieplne regeneracji brutto [MJ/kg CO ₂]	Stopień karbonizacji roztworu [mol CO ₂ / mol MEA]			L/G [kg/kg]
			nasycony	zregenerowany	częściowo zregenerowany	
Rozdzielone strumienie	86	3,82	0,51	0,30	0,48	5,7
Międzystopniowe chłodzenie	80	4,15	0,50	0,38	0,38	5,4
Klasyczny	77	4,23	0,47	0,36	-	5,4
Klasyczny	75	4,36	0,46	0,34	-	5,0
Klasyczny	83	3,97	0,49	0,33	-	3,9
Rozdzielone strumienie	87	3,77	0,48	0,29	0,51	5,8
Rozdzielone strumienie	85	3,91	0,48	0,29	0,54	4,8
Rozdzielone strumienie	89	3,78	0,53	0,28	0,46	4,9
Międzystopniowe chłodzenie	88	3,79	0,42	0,36	0,36	4,7
Klasyczny	84	3,98	0,50	0,36	-	4,7



Rys. 4. Profile temperatur i stężeń w funkcji wysokości kolumny absorpcyjnej dla poszczególnych wariantów procesowych.

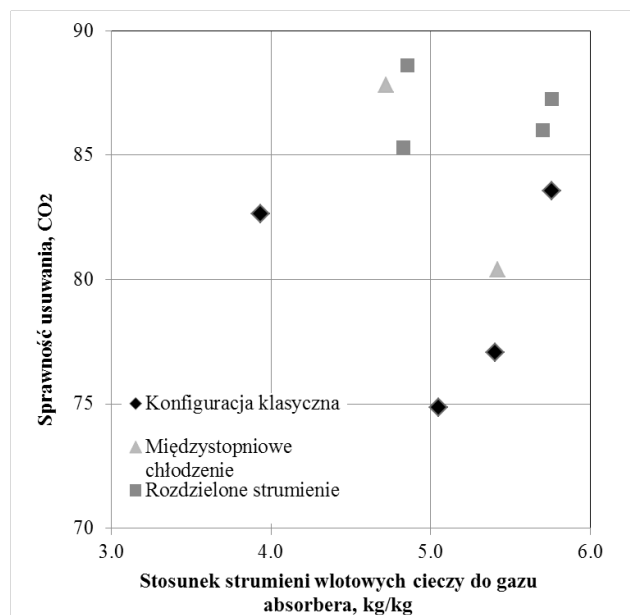
Fig. 4. Absorption column temperature and CO₂ concentration profiles for different process configurations

wysokości kolumny. Dzieje się tak, ponieważ wartość ciepła uwalnianego z procesu absorpcji w dolnej sekcji jest niższa od ciepła oddawanego w górnej sekcji kolumny. Różnice tych wartości oczywiście wynikają z poziomu karbonizacji roztworu zregenerowanego.

Strumień roztworu częściowo zregenerowanego ze względu na stosunkowo wysoki stopień karbonizacji, w porównaniu do roztworu głęboko zregenerowanego, pozwala na absorpcję mniejszej ilości ditlenku węgla, co w konsekwencji powoduje wydzielenie mniejszej ilości ciepła w dolnej sekcji kolumny absorpcyjnej.

Efekt ten można również zaobserwować na profilu stężeń CO_2 kolumny absorpcyjnej (rys. 4 prawy). Spadek koncentracji CO_2 w fazie gazowej w dolnej sekcji kolumny absorpcyjnej, dla rozdzielonego układu strumieni jest mniejszy, niż dla układu klasycznego, czy z międzystopniowym chłodzeniem. Pomimo tego, dla rozdzielonych strumieni, ze względu na bardzo niski stopień karbonizacji roztworu głęboko zregenerowanego, zasilającego górną sekcję kolumny absorpcyjnej, może zostać zaabsorbowana większa objętość ditlenku węgla, co w ostatecznym rozliczeniu daje niższe stężenie ditlenku węgla w gazie oczyszczonym. Podobne wnioski zaprezentowano w (Leites i in. 2003).

Z porównania wartości zapotrzebowania cieplnego procesu desorpcji wynika jasno, że w wariacie procesowym z rozdzielonymi strumieniami roztworu należy dostarczyć mniej ciepła do procesu desorpcji, by uzyskać podobną sprawność usuwania CO_2 . Podobne wnioski można zredagować bazując na wykresie (rys. 5), który przedstawia wpływ stosunku strumieni wlotowych cieczy i gazu (L/G) na sprawność usuwania CO_2 dla różnych konfiguracji procesowych. Dla badań prowadzonych przy tym samym strumieniu cieplnym, dostarczonym do wyparki kolumny desorpcyjnej i stosunku cieczy do gazu, najniższą sprawność uzyskano dla klasycznego układu przepływu strumieni. Porównanie takie było możliwe, ze względu na fakt, iż ok. 80% całości zapotrzebowania energetycznego instalacji usuwania CO_2 potrzebne jest do desorpcji CO_2 z roztworu (Kohl 1997).



Rys. 5. Wpływ stosunku strumieni wlotowych cieczy i gazu na sprawność usuwania CO_2 dla różnych konfiguracji przepływowych instalacji pilotowej

Fig. 5. Correlation between liquid to gas ratio and CO_2 recovery for different process configurations

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania modyfikacji konfiguracji przepływowych procesu aminowego usuwania CO₂ potwierdziły możliwość poprawy zarówno sprawności, jak i zmniejszenia zapotrzebowania energetycznego procesu desorpcji (regeneracji absorbentu). Otrzymane wyniki badań dla przedstawionego w pracy wariantu przepływu z rozdzielonymi strumieniami roztworu i międzystopniowym chłodzeniem, w stosunku do klasycznego układu przepływowego, wykazały wzrost sprawności usuwania CO₂ średnio o około 8% oraz redukcję zapotrzebowania cieplnego średnio o około 7%. Potwierdzenie wpływu modyfikacji na proces absorpcji CO₂ przedstawiono na wykresach obejmujących linię operacyjną procesu, profil temperatury i stężenia CO₂ w kolumnie absorpcyjnej. Dotychczasowe doniesienia światowej literatury w tym zakresie opierały się przede wszystkim na badaniach modelowych i symulacyjnych i wymagały weryfikacji w warunkach rzeczywistych. Uzyskane dane potwierdziły w warunkach rzeczywistego procesu możliwość obniżenia energochłonności i poprawy sprawności procesu aminowego usuwania CO₂ poprzez modyfikację procesową przepływu strumieni absorbentu.

Praca naukowa współfinansowana przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach umowy SP/E/1/67484/10 – Strategiczny Program Badawczy – Zaawansowane technologie pozyskiwania energii: Opracowanie technologii dla wysokosprawnych „zero-emisyjnych” bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO₂ ze spalin.

Literatura

- Aroonwilas, A. i Veawab, A. 2007. Integration of CO₂ capture unit using single- and blended-amines into supercritical coal-fired power plants: Implications for emission and energy management. *Int. J. Greenh. Gas Control*, Vol. 1, No. 2, s. 143–150.
- Artanto i in. 2012 – Artanto, Y., Jansen, J., Pearson, P., Do, T., Cottrell, A., Meuleman, E. i Feron P. 2012. Performance of MEA and amine-blends in the CSIRO PCC pilot plant at Loy Yang Power in Australia. *Fuel* Vol. 101, s. 264–275.
- Jou i in. 1995 – Jou, F.-Y., Mather, A.E. i Otto, F.D. 1995. The solubility of CO₂ in a 30 mass percent monoethanolamine solution. *Can. J. Chem. Eng.* Vol. 73, No. 1, s. 140–147.
- Kohl, A.L. 1997. Gas Purification, Fifth Edition. 5 edition. *Gulf Professional Publishing*, Houston, Tex.
- Leites i in. 2003 – Leites, I.L., Sama, D.A. i Lior N. 2003. The theory and practice of energy saving in the chemical industry: some methods for reducing thermodynamic irreversibility in chemical technology processes. *Energy* Vol. 28, No. 1, s. 55–97.
- Le Moulec, Y. i Kanniche, M. 2011. Screening of flowsheet modifications for an efficient monoethanolamine (MEA) based post-combustion CO₂ capture. *Int. J. Greenh. Gas Control* Vol. 5, No.4, s. 727–740.
- Mangalapally i in. 2012 – Mangalapally, H.P., Notz, R., Asprion, N., Sieder, G., Garcia, H. i Hasse, H. 2012. Pilot plant study of four new solvents for post combustion carbon dioxide capture by reactive absorption and comparison to MEA. *Int. J. Greenh. Gas Control* Vol. 8, s. 205–216.
- Polasek i in. 1983 – Polasek, J.C., Bullin, J.A. i Donnelly, S.T. 1983. How to Reduce Costs in Amine Sweetening Units. *Chem. Eng. Prog.*, Vol. 79, s. 63–67.
- Spietz i in. 2014 – Spietz, T., Więclaw-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.
- Stec i in. 2015a – Stec, M., Tatarczuk, A., Więclaw-Solny, L., Krótki, A., Spietz, T., Wilk, A. i Śpiewak, D. 2015a. Demonstration of a post-combustion carbon capture pilot plant using amine-based solvents at the Łaziska Power Plant in Poland. *Clean Technol. Environ. Policy*, s. 1–10.

- Stec i in. 2015b – Stec, M., Tatarczuk, A., Więclaw-Solny, L., Krótki, A., Ściążko, M. i Tokarski, S. 2015b. Pilot plant results for advanced CO₂ capture process using amine scrubbing at the Jaworzno II Power Plant in Poland. *Fuel* Vol. 151, s. 50–56.
- 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.
- Śląsk 2.0 Program wsparcia przemysłu Województwa Śląskiego i Małopolski Zachodniej, Kancelaria Rady Ministrów, 2015.
- Tobiesen i in. 2007 – Tobiesen, F.A., Svendsen, H.F. i Juliussen, O. 2007. Experimental validation of a rigorous absorber model for CO₂ postcombustion capture. *AIChE J.* Vol. 53, No. 4, s. 846–865.
- Więclaw-Solny i in. 2012 – Więclaw-Solny, L., Tatarczuk, A., Krótki, A., Wilk, A. i Śpiewak, D. 2012. Dotrzymać kroku polityce energetyczno-klimatycznej UE – postęp badań procesów usuwania CO₂ z gazów spalinywych. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 15, z. 4, s. 111.
- Wojtkowska-Lodej, G. 2015. Polityka klimatyczno-energetyczna Unii Europejskiej – wyzwania dla przyszłości polskiej gospodarki. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 18, z. 1, s. 15–26.
- Zamasz K. 2015. Uwarunkowania ekonomiczno-regulacyjne konsolidacji krajowego sektora elektroenergetycznego. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 18, z. 2, s. 19–28.

