

**Beata BAKA\*, Karol SZTEKLER, Roman KLAJNY**

Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii  
Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych  
ul. J.H. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa  
\*e-mail: bakab@fluid.is.pcz.pl

## **Analiza symulacyjna pracy jednostki adsorpcyjnej PTSA do wychwytywania dwutlenku węgla ze spalin kotłowych**

W prezentowanej pracy została przedstawiona technologia separacji dwutlenku węgla ze spalin kotłowych wykorzystująca proces adsorpcji bazujący na zdolności sorbentu do selektywnego pochłaniania składników mieszanin gazowych. Technologia ta, zwana post-combustion, jest połączeniem metody adsorpcji zmiennociśnieniowej i zmiennotemperaturowej (metoda PTSA) i stanowi elastyczną technikę, mogącą znaleźć zastosowanie w istniejących już blokach energetycznych. Jednostka PTSA do wychwytu CO<sub>2</sub> została opracowana jako model matematyczny przy wykorzystaniu oprogramowania IPSE-pro firmy SimTech, który to model umożliwił przeprowadzenie symulacji numerycznych. Celem wykonanych obliczeń symulacyjnych było określenie warunków pracy układu PTSA, w szczególności określono wpływ temperatury i ciśnienia spalin na proces adsorpcji, wpływ ciśnienia desorpcji na zapotrzebowanie na sorbent, a także wpływ parametrów czynnika grzejącego na proces desorpcji oraz ustalono optymalne parametry pracy układu separacji.

**Słowa kluczowe:** adsorpcja, jednostka PTSA, separacja CO<sub>2</sub>, modelowanie procesowe

### **Wprowadzenie**

W ramach europejskiej polityki zapobiegania zmianom klimatycznym ważnym aspektem stał się rozwój czystych technologii spalania paliw węglowych w energetyce. Świadczą o tym działania podjęte w sferze naukowo-badawczej oraz powstające obiekty demonstracyjne i pilotażowe, które zmierzają do zminimalizowania czy usuwania substancji toksycznych ze spalin powstających podczas procesu spalania węgla kamiennego i brunatnego. Wyróżnia się cztery kluczowe komponenty strategii redukcji emisji gazów cieplarnianych: wzrost sprawności wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, zwiększenie efektywności energetycznej, stosowanie paliw o niższej zawartości węgla pierwiastkowego, zwłaszcza odnawialnych źródeł energii, oraz wprowadzenie technologii CCS (Carbon Capture and Storage).

Założeniem technologii CCS jest sekwestracja dwutlenku węgla ze strumienia spalin kotłowych. Cały system składa się nie tylko z wychwycenia CO<sub>2</sub>, ale także jego transportu do miejsc zdeponowania oraz składowania pod ziemią. Obecnie rozważane są trzy główne warianty technologiczne usuwania CO<sub>2</sub>, a mianowicie pre-combustion capture, tj. wychwytywanie CO<sub>2</sub> przed procesem spalania, post-

-combustion capture, tj. wychwytywanie CO<sub>2</sub> po procesie spalania, oraz spalanie w atmosferze modyfikowanej tlenem tzw. oxy-combustion. Każda z technologii redukcji emisji CO<sub>2</sub> charakteryzuje się specyficznymi własnościami, szczególnie w zakresie urządzeń i aparatury niezbędnej do realizacji technicznej procesu. Najbardziej elastyczną technologią mogącą znaleźć zastosowanie nie tylko w nowo budowanych obiektach, ale przede wszystkim w jednostkach już pracujących, jest technologia post-combustion. Wynika to z faktu, że elementem łączącym tego typu układy z obiegami bloków energetycznych jest właściwie jedynie ciąg spalinowy bloku. W konsekwencji, ingerencja w infrastrukturę bloku jest niewielka [5].

W pracy zaprezentowano model matematyczny jednostki separacji dwutlenku węgla z wykorzystaniem łączonej adsorpcji zmiennociśnieniowej oraz zmiennotemperaturowej. Badania symulacyjne prowadzono przy wykorzystaniu modelu numerycznego opracowanego w środowisku programistycznym IPSE-pro firmy SimTech. Celem pracy jest ustalenie optymalnych parametrów termodynamicznych zarówno spalin kotłowych wprowadzanych do jednostki separacji, pary grzejnej wykorzystanej do regeneracji sorbentu, jak i ciśnienia desorpcji, które zapewnią najniższe zużycie sorbentu, oraz koniecznej energii do jego regeneracji.

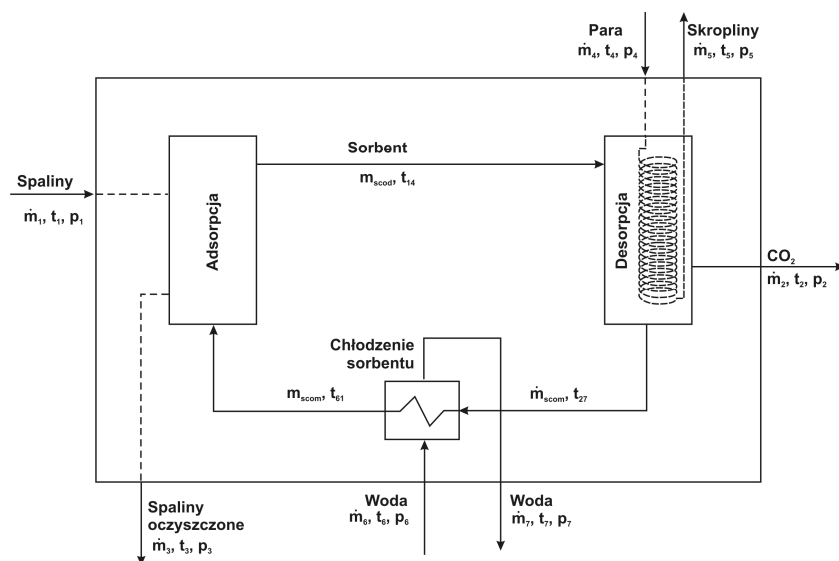
## 1. Podstawy procesu adsorpcji

Proces adsorpcji polega na wiązaniu cząsteczek gazu w objętości mikroporów ciała stałego na skutek przyciągających sił międzycząsteczkowych. Metody adsorpcyjne bazują na zdolności sorbentu do pochłaniania wybranych składników gazowych, a proces przebiega cyklicznie. Sam mechanizm procesów jest złożony i zależy od właściwości chemicznych i fizycznych gazu oraz ciała stałego zwanego adsorbentem [8, 9].

Procesy adsorpcyjne możemy podzielić w zależności od rodzaju sił biorących udział w procesie na adsorpcję fizyczną i chemiczną. O adsorpcji fizycznej mówimy wtedy, gdy cząsteczki gazu wiązane są słabymi siłami oddziaływań międzycząsteczkowych (siły van der Waalsa). Adsorpcja fizyczna charakteryzuje się niskim ciepłem procesu adsorpcji. Proces desorpcji, tj. uwolnienie pochłoniętego gazu, odbywa się poprzez zmianę ciśnienia lub temperatury, po czym następuje tworzenie się warstwy adsorpcyjnej o grubości odpowiadającej kilku średnicom cząsteczek adsorbentu. Natomiast adsorpcja chemiczna, nazywana inaczej chemisorpcją, polega na przejściu elektronów pomiędzy adsorbentem a adsorbentem (substancją adsorbującą się) w wyniku dużej siły wiązania pomiędzy nimi [3, 9]. Podczas adsorpcji chemicznej do zainicjowania procesu należy doprowadzić energię aktywacji. Pomiedzy gazem zanieczyszczającym a adsorbentem występują bardzo trwałe połączenia, dlatego rozerwanie połączenia wymaga dużych nakładów energetycznych, z tego też względu większość komercyjnych instalacji opiera się na zastosowaniu fizycznej adsorpcji [3, 10].

Wszystkie procesy adsorpcyjne mają charakter egzotermiczny, a więc w celu wyizolowania cząstek zaadsorbowanych należy doprowadzić ciepło. Aby proces

przebiegał efektywnie, należy zastosować adsorbenty o dużej powierzchni właściwej, dlatego sorbentami, które wydają się najefektywniejsze do prowadzenia wychwytu  $\text{CO}_2$ , są węgiel aktywny, zeolity naturalne i syntetyczne, żel glinowy i krzemionkowy [1, 4]. Przy wyborze sorbentu należy również kierować się następującymi zasadami: sorbent musi posiadać dużą pojemność sorpcyjną oraz musi wykazać się dużą selektywnością w stosunku do wyseparowanego gazu, wymagane jest również, aby proces adsorpcji był procesem odwracalnym. Na szczególną uwagę zasługują zeolity, stanowiące grupę glinokrzemianów i zawierające w swej strukturze tlenki metali alkalicznych i metali ziem alkalicznych [11]. Zeolity dzięki dużej powierzchni właściwej ( $500\div 1000 \text{ m}^2/\text{g}$ ) i dużej ilości porów są odpowiednimi sorbentami do przeprowadzenia adsorpcji  $\text{CO}_2$  [4].



Rys. 1. Schemat modelu jednostki adsorpcyjnej [6]

Fig. 1. The scheme of adsorption unit model

Schemat jednostki wykorzystującej procesy adsorpcyjne przedstawiony został na rysunku 1. Gaz spalinowy zostaje doprowadzony do kolumny adsorpcyjnej, w której następuje pochłanianie dwutlenku węgla przez adsorbent. Adsorbent bogaty w  $\text{CO}_2$  doprowadzany jest do układu desorpcji, gdzie zachodzi jego regeneracja i uwolnienie  $\text{CO}_2$ . Układ separacji może składać się z kilku równoległych działających kolumn adsorpcyjno-desorpcyjnych, które w kolejnych cyklach oczyszczania działają naprzemiennie. Wśród procesów adsorpcyjnych wyróżnia się adsorpcję: zmiennociśnieniową PSA - Pressure Swing Adsorption, zmiennotemperaturową TSA - Temperature Swing Adsorption, zmiennociśnieniową z zastosowaniem próżni przy procesie desorpcji VPSA - Vacuum Pressure Swing Adsorption, łączoną adsorpcję zmiennociśnieniową oraz zmiennotemperaturową - PTSA (Pressure Temperature Swing Adsorption), i adsorpcję z zastosowaniem niskonapięcio-

wego prądu elektrycznego przepuszczanego przez złoże podczas realizacji etapu desorpcji - ESA lub ETSA (Electrical Thermal Swing Adsorption).

## 2. Model układu separacji CO<sub>2</sub> ze spalin kotłowych

Metoda PTSA (Pressure Temperature Swing Adsorption) stanowi połączenie dwóch metod: PSA (Pressure Swing Adsorption) i TSA (Temperature Swing Adsorption). Proces adsorpcji prowadzony jest przy wysokim ciśnieniu i niskiej temperaturze, natomiast desorpcja przy niskim ciśnieniu i wysokiej temperaturze.

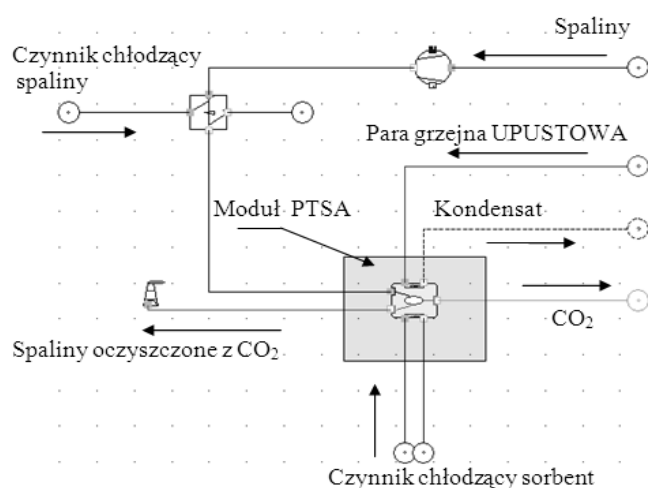
W modelowaniu matematycznym układu do separacji CO<sub>2</sub> metodą PTSA przyjęto następujące założenia:

1. Spaliny przed wprowadzeniem do jednostki separacji są pozbawione tlenków siarki i tlenków azotu, odpylone i suche.
2. Ciepło powstałe w procesie adsorpcji CO<sub>2</sub> przejmują sorbent i pozbawione CO<sub>2</sub> spaliny.
3. W procesie desorpcji (regeneracji sorbentu) ciepło oddane przez czynnik grzejący zużywane jest na:
  - podgrzanie sorbentu,
  - podgrzanie zdesorbowanego CO<sub>2</sub>,
  - pokrycie zapotrzebowania na energię w procesie desorpcji.
4. Po regeneracji sorbentu uzyskujemy czysty dwutlenek węgla.
5. Do analiz wybrano sorbenty, których charakterystyki są znane, a w szczególności [2]:
  - entalpia właściwa sorbentu ( $h_{\text{sorbentu}} = f(t)$  kJ/kg),
  - chłonność adsorpcji CO<sub>2</sub> ( $a = f(p, t)$  kg<sub>CO<sub>2</sub></sub>/kg<sub>sorbentu</sub>),
  - ciepło adsorpcji i desorpcji ( $Q_a$  oraz  $Q_d$  kJ/kg<sub>CO<sub>2</sub></sub>).
6. Jednostka separacji CO<sub>2</sub> pracuje w stanie ustalonym.

Wychwyt CO<sub>2</sub> ze spalin metodą PTSA składa się z procesu adsorpcji oraz procesu desorpcji (regeneracji sorbentu). Spaliny kotłowe wprowadzone są do kolumny adsorpcyjnej, gdzie przy wysokim ciśnieniu i niskiej temperaturze w wyniku kontaktu z sorbentem następuje pochłanianie CO<sub>2</sub>. Oczyszczone z dwutlenku węgla gazy spalinowe wyprowadzane są poza układ. Następnie sorbent z pochłoniętym CO<sub>2</sub> ulega regeneracji (desorpcji) przy wyższej temperaturze i niższym ciśnieniu niż przy adsorpcji. Regeneracja sorbentu pozwala na przywrócenie pierwotnych właściwości sorpcyjnych sorbentowi, przez co może on być wykorzystywany w następnych cyklach adsorpcyjno-desorpcyjnych. Czyste CO<sub>2</sub> wyprowadzane jest w postaci strumienia gazu. Ciepło do procesu regeneracji pochodzi z pary pobieranej z upustów turbiny. Sorbent przed ponownym wykorzystaniem zostaje schłodzony ze względu na zbyt wysoką temperaturę, która mogłaby doprowadzić proces adsorpcji do zatrzymania. Czynnikiem chłodzącym sorbent jest woda czerpana z obiegu ciepłego.

Schemat jednostki PTSA zamodelowanej w środowisku IPSE-pro przedstawiono na rysunku 2. Standardowa biblioteka IPSE-pro nie zawiera modelu układu do

separacji CO<sub>2</sub> z gazów spalinowych, bazującego na procesach adsorpcyjnych, dlatego opracowano matematyczny model procesu i określono niezbędne równania bilansowe wynikające z zachodzących zjawisk. Moduł został opisany równaniami: bilansu masy, bilansu energii adsorpcji, bilansu energii desorpcji, bilansu energii podczas chłodzenia sorbentu [7]. Przyjęto, że całość procesu separacji będzie opisana w postaci jednego modułu, który będzie dostępny w postaci pojedynczego obiektu z poziomu biblioteki programu IPSE-pro.



Rys. 2. Schemat układu separacji CO<sub>2</sub> zaimplementowany w środowisku IPSE-pro

Fig. 2. The scheme of the CO<sub>2</sub> separation unit implemented in the IPSE-pro software

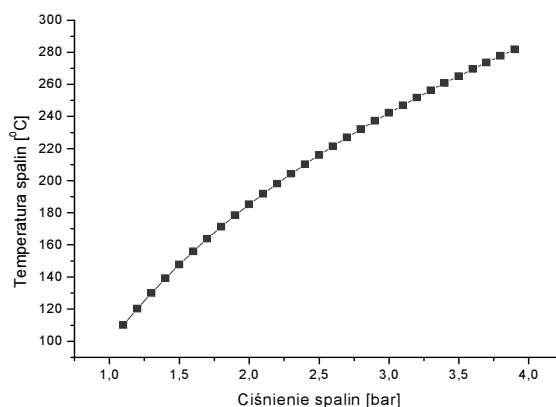
Analiza pracy jednostki PTSA do separacji dwutlenku węgla obejmowała wybór najefektywniejszego sorbentu, ustalenie wpływu parametrów spalin na proces adsorpcji CO<sub>2</sub>, określenie wpływu parametrów pary grzeicznej na przebieg regeneracji sorbentu.

### 3. Analiza warunków pracy układu PTSA

Ilość wykorzystanego sorbentu do przeprowadzenia separacji CO<sub>2</sub> jest zróżnicowana, co spowodowane jest różną pojemnością sorpcyjną analizowanych sorbentów. Na podstawie wyników określających zapotrzebowanie na sorbent w zależności od stopnia separacji CO<sub>2</sub> do dalszych badań wybrano zeolit syntetyczny 5A [5]. Proces adsorpcji CO<sub>2</sub> w układzie PTSA przeprowadzono przy wartościach parametrów spalin uzyskanych z obliczeń symulacyjnych obiegu bloku energetycznego o mocy 833 MW, którego dane zaczerpnięto z projektu wykonanego dla BOT Elektrownia Bełchatów S.A. [7]. Spaliny przed wprowadzeniem ich do komina charakteryzują się wartością ciśnienia  $p = 1,1$  bar, temperatury  $t = 110^{\circ}\text{C}$  oraz strumieniem spalin  $\dot{m} = 1016$  kg/s. W procesie desorpcji wykorzystano parę upustową o ciśnieniu  $p = 56$  bar i temperaturze  $t = 305^{\circ}\text{C}$ .

### 3.1. Wpływ temperatury i ciśnienia spalin na proces adsorpcji

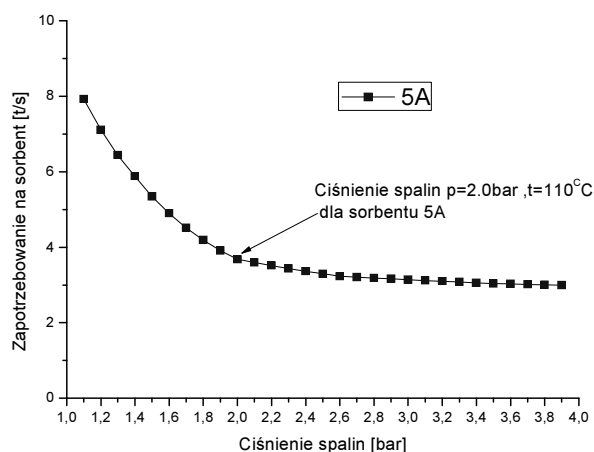
Zgodnie z charakterystyką sorbentu, zwiększanie ciśnienia procesu adsorpcji przyczynia się do zmniejszenia zapotrzebowania na dany sorbent [2]. Jednakże wraz z podnoszeniem ciśnienia spalin następuje wzrost ich temperatury (rys. 3), co jest zjawiskiem niekorzystnym dla procesu adsorpcji, dlatego przyjęto, iż symulacja pracy jednostki prowadzona będzie w temperaturze 110°C, która jest równa temperaturze spalin wprowadzonych do komina.



Rys. 3. Wpływ wzrostu ciśnienia na temperaturę spalin

Fig. 3. The influence of pressure increase on the flue gas temperature

W wyniku zwiększania ciśnienia spalin przed wprowadzeniem ich do układu separacji następuje jednoczesny wzrost ciśnienia cząstkowego dwutlenku węgla w tych spalinach. Ma to znaczący wpływ na spadek zapotrzebowania na sorbent w procesie separacji, gdyż zgodnie z charakterystyką zeolitu [2] wraz ze wzrostem ciśnienia cząstkowego dwutlenku węgla rośnie jego zdolność sorpcyjna.



Rys. 4. Wpływ ciśnienia spalin na zapotrzebowanie na sorbent 5A

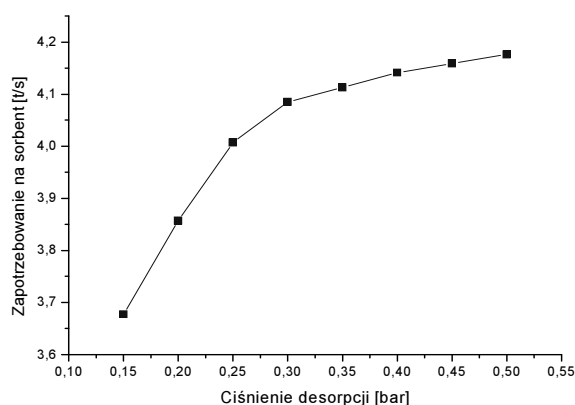
Fig. 4. The influence of the flue gas pressure on the demand for the 5A sorbent

Wzrost ciśnienia z poziomu 1,1 do 4 bar (rys. 4) powoduje ok. 62% spadek zapotrzebowania na sorbent 5A. Jednakże tak wysokie sprężanie spalin nie jest energetycznie uzasadnione, ponieważ koszt sprężania jest bardzo wysoki w stosunku do uzyskanego zmniejszenia zapotrzebowania na sorbent.

Spadek zapotrzebowania na sorbent w zakresie ciśnień od 1,1 do 2 bar wynosi około 53%. Powyżej tego ciśnienia obserwowalne zmiany nie są znaczące, dlatego jako ciśnienie graniczne przyjęto wartość  $p = 2$  bar. Reasumując, prowadzenie procesu adsorpcji jest najefektywniejsze przy ciśnieniu  $p = 2$  bar oraz temperaturze  $t = 110^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2. Wpływ ciśnienia desorpcji na zapotrzebowanie na sorbent

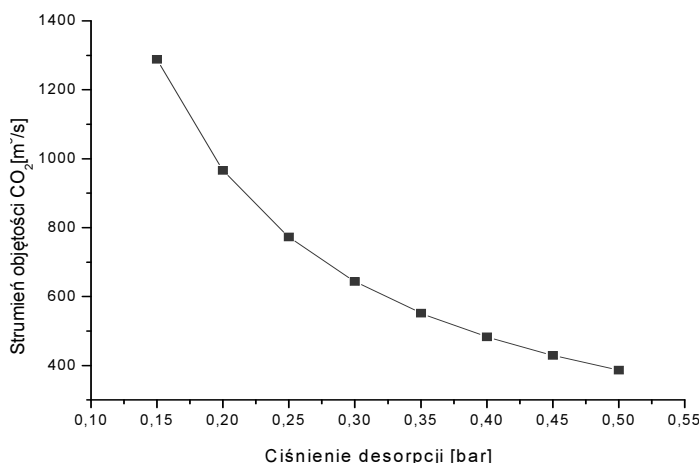
W układzie PTSA proces desorpcji prowadzony jest przy ciśnieniu niższym i temperaturze wyższej niż w trakcie procesu adsorpcji. Ilość uwolnionego dwutlenku węgla odpowiada różnicy zdolności adsorpcyjnej sorbentu przy ciśnieniu i temperaturze adsorpcji i desorpcji. Proces desorpcji analizowano w zakresie ciśnień od 0,15 do 0,5 bar. Na rysunku 5 przedstawiono wpływ ciśnienia desorpcji na zapotrzebowanie na sorbent 5A dla całkowitego strumienia spalin  $\dot{m} = 1016$  kg/s przy 100% stopniu separacji  $\text{CO}_2$ .



Rys. 5. Wpływ ciśnienia desorpcji na zapotrzebowanie na sorbent 5A

Fig. 5. The influence of the desorption pressure on the demand for the 5A sorbent

Wraz z obniżeniem ciśnienia desorpcji następuje spadek zapotrzebowania na sorbent. Prowadzenie procesu regeneracji przy ciśnieniu 0,15 bar powoduje ok. 12% redukcję zapotrzebowania na sorbent w porównaniu do ciśnienia 0,5 bar. Stąd też, mając na uwadze uzyskanie jak najmniejszego zapotrzebowania na zeolit 5A, celowe jest prowadzenie procesu desorpcji przy ciśnieniu 0,15 bar. Prowadzenie procesu desorpcji przy obniżonym ciśnieniu wymusza zastosowanie dodatkowych urządzeń niezbędnych do utrzymania wymaganego ciśnienia. Wpływ ciśnienia desorpcji na strumień objętości uwolnionego dwutlenku węgla z sorbentu dla nominalnego (całkowitego) strumienia spalin przy całkowitym wychwycie  $\text{CO}_2$  przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Wpływ ciśnienia desorpcji na strumień CO<sub>2</sub> uwolnionego z sorbentu

Fig. 6. The influence of the desorption pressure on the flow rate of CO<sub>2</sub> released from the sorbent

Przedstawione powyżej dane wskazują jednoznacznie, że wraz ze zmniejszaniem ciśnienia desorpcji następuje wzrost strumienia objętości CO<sub>2</sub> uwolnionego z sorbentu. Dla ciśnienia 0,15 bar obserwowany jest 70% wzrost strumienia objętości w porównaniu do ciśnienia 0,5 bar. Można stwierdzić, że im wyższy strumień objętości CO<sub>2</sub>, tym większa szybkość uwalniania dwutlenku węgla z sorbentu, co skutkuje krótszym czasem procesu desorpcji.

### 3.3. Wpływ parametrów czynnika grzejjego na proces desorpcji

Zgodnie z przyjętymi założeniami (pkt 2) ciepło oddane przez czynnik grzejjny zużywane jest na podgrzanie sorbentu i zdesorbowanego CO<sub>2</sub> oraz na pokrycie zapotrzebowania na ciepło desorpcji. Założono również, że z nominalnego (całkowitego) strumienia spalin wyseparowany zostaje cały dwutlenek węgla. Do przeprowadzenia regeneracji sorbentu wykorzystano parę grzejjną, której ciśnienie mogło się zmieniać w zakresie od  $p = 3$  do  $p = 59$  bar przy zmianie temperatury od 135 do 550°C. Granice zakresów temperatury i ciśnienia odpowiadają minimalnym i maksymalnym parametrom pary pochodzącej z upustów turbiny w referencyjnym obiegu cieplnym. Dla rozważanego procesu desorpcji przyjęto, że proces ten przebiega w temperaturze kondensacji pary grzejjnej wynikającej z ciśnienia tej pary.

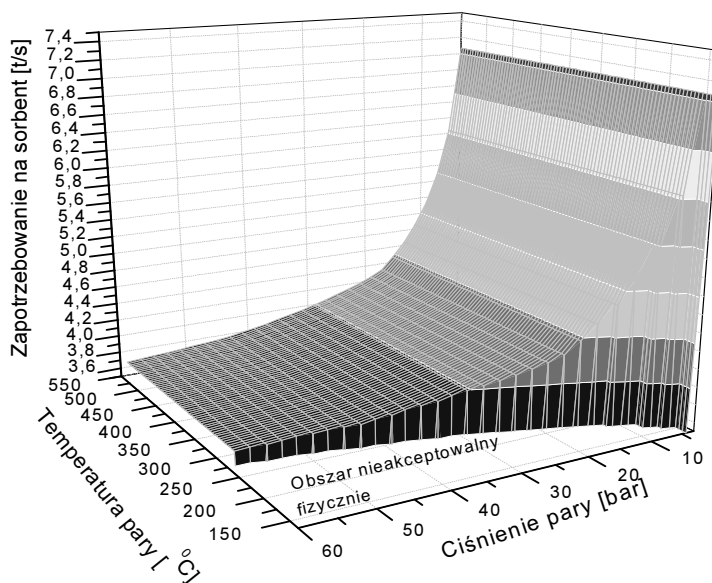
### 3.4. Wpływ parametrów pary grzejjnej na proces desorpcji

Wpływ parametrów pary na zapotrzebowanie na sorbent 5A przedstawiono na rysunku 7. Uzyskane dane wskazują, że istnieją wartości graniczne ciśnienia i temperatury pary, poniżej których nie pokrywa ona zapotrzebowania na ciepło w procesie desorpcji. Przy ciśnieniu pary  $p = 59$  bar i w zakresie temperatury od 275 do



550°C temperatura kondensacji, a tym samym temperatura desorpcji wynosi 274°C. Zapotrzebowanie na sorbent jest wówczas najniższe, wynika to z własności sorbentu, ponieważ przy wyższych temperaturach desorpcji więcej dwutlenku węgla jest uwalniane z zeolitu 5A. W rezultacie spada zapotrzebowanie na sorbent, gdyż zeolit jest wykorzystywany efektywnie.

Przy zastosowaniu pary o ciśnieniu 3 bar i temperaturze z zakresu 135÷550°C (przy tych parametrach temperatura desorpcji wynosi 133°C) następuje ok. 48% wzrost zapotrzebowania na sorbent w porównaniu do pary o ciśnieniu  $p = 59$  bar.

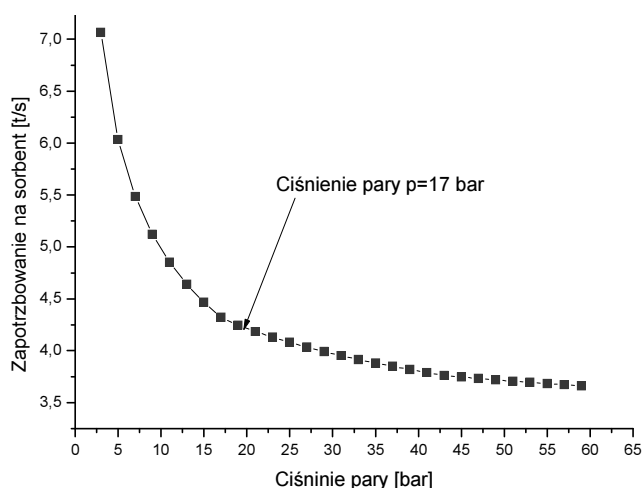


Rys. 7. Wpływ parametrów pary na zapotrzebowanie na sorbent 5A

Fig. 7. The influence of the steam parameters on the demand for the 5A sorbent

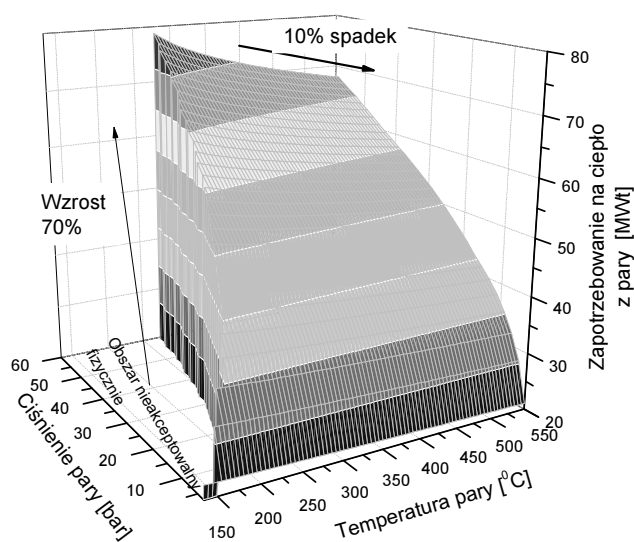
Przyjęto zatem, iż najbardziej korzystnym ciśnieniem pary w procesie desorpcji jest ciśnienie  $p = 17$  bar, bowiem powyżej tej wartości ciśnienia redukcja zapotrzebowania na sorbent pomiędzy ciśnieniem niższym a wyższym pary jest mniejsza od założonej granicznej wartości na poziomie 3%. Zatem przy  $p = 17$  bar w zakresie temperatury 205÷550°C proces desorpcji przebiega najefektywniej, powodując jednocześnie zmniejszenie zapotrzebowania na sorbent 5A, niezbędny do wychwytu CO<sub>2</sub>. Przy tych parametrach pary grzejnej proces desorpcji przebiega w temperaturze 204°C.

Z danych przedstawionych na rysunku 8 wynika również, że spadek zapotrzebowania na sorbent przy ciśnieniu pary grzejnej  $p = 17$  bar wynosi ok. 39% w porównaniu do ciśnienia wynoszącego 3 bar. Zastosowanie pary o wyższych parametrach powoduje zmniejszenie ilości sorbentu niezbędnego do wychwytu CO<sub>2</sub> oraz skutkuje jednocześnie wzrostem zapotrzebowania na ciepło konieczne do przeprowadzenia procesu regeneracji, co zobrazowano na rysunku 9.



Rys. 8. Zapotrzebowanie na sorbent 5A w funkcji ciśnienia pary grzewczej

Fig. 8. The demand for the 5A sorbent as a function of the heating steam pressure



Rys. 9. Wpływ parametrów pary na zapotrzebowanie na ciepło dla zeolitu 5A

Fig. 9. The influence of the steam parameters on the heat demand for the 5A sorbent

Wraz ze wzrostem temperatury od 135 do 550°C w zakresie ciśnień od 3 do 59 bar zaobserwowano zmniejszenie zapotrzebowania na ciepło. Średni spadek zapotrzebowania na ciepło w tym obszarze wynosi około 10%, co odpowiada kosztowi energetycznemu na poziomie ok. 6 MWt. Z przedstawionych danych wynika, że przy zmianie ciśnienia pary grzewczej z 3 do 59 bar następuje wzrost zapotrzebowania na ciepło w procesie desorpcji o 70% (odpowiada to wzrostowi mocy ter-

micznej około 64 MWt). Dla przyjętego ciśnienia pary 17 bar zaobserwowano ok. 53% wzrost zapotrzebowania na ciepło w procesie desorpcji. Przy wysokim ciśnieniu pary równym  $p = 59$  bar zapotrzebowanie na ciepło w procesie desorpcji wynosi ok. 72 MWt, natomiast dla przyjętego wcześniej ciśnienia  $p = 17$  bar zapotrzebowanie to wynosi ok. 44 MWt.

## Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników określono technicznie uzasadnione parametry pracy jednostki adsorpcji PTSA dla separacji dwutlenku węgla ze spalin kotłowych przy zastosowaniu zeolitu 5A jako sorbentu. Badania symulacyjne wykonane w środowisku IPSE-pro wykazały, że proces adsorpcji jest najbardziej efektywny, gdy:

- 1) parametry spalin wprowadzanych do jednostki PTSA wynoszą odpowiednio:  $p = 2$  bar i  $t = 110^{\circ}\text{C}$ ,
- 2) parametry pary grzejnej wynoszą:  $p = 17$  bar i  $t = 205\div 550^{\circ}\text{C}$ ,
- 3) proces desorpcji zachodzi przy ciśnieniu  $p = 0,15$  bar.

Podwyższanie temperatury spalin wpływa na spadek chłonności sorpcyjnej sorbentu, co przyczynia się do zwiększenia zapotrzebowania na sorbent. W związku z tym proces adsorpcji przeprowadza się przy możliwie najniższej temperaturze spalin. Podniesienie ciśnienia spalin opuszczających kocioł energetyczny do 2 bar skutkuje ok. 53% redukcją zapotrzebowania na sorbent 5A. Przyjęto także, że proces desorpcji (regeneracji sorbentu) prowadzony będzie przy ciśnieniu 0,15 bar, ponieważ przy tym ciśnieniu uzyskuje się najniższe zapotrzebowanie na sorbent. W przypadku zeolitu 5A ustalono, że dla prowadzenia desorpcji najodpowiedniejsza jest para grzejna o ciśnieniu 17 bar w zakresie temperatur  $205\div 550^{\circ}\text{C}$ , ponieważ w tych warunkach zapotrzebowanie na moc cieplną niezbędną do uwolnienia dwutlenku węgla z sorbentu wynosi 44 MWt.

## Literatura

- [1] Kotowicz J., Janusz K., Sposoby redukcji emisji  $\text{CO}_2$  z procesów energetycznych, Rynek Energii 2007, nr 1.
- [2] Majchrzak-Kucęba I., Badania usuwania i zagospodarowania dwutlenku węgla ze spalin kotłowych przy użyciu zeolitów, Praca doktorska, 2001.
- [3] Ościk J., Adsorpcja opis i teoria procesu, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Lublin 1969.
- [4] Paderewski M., Adsorpcja i adsorbery, Wyd. I - Politechnika Szczecińska, Szczecin 1980.
- [5] Sztekler K., Panowski M., Klajny R., Analiza rozwiązań konfiguracyjnych integracji technologii wychwytu  $\text{CO}_2$  z konwencjonalną siłownią cieplną, Pr. Nauk. Polit. Warsz. Konf. 2009, 26, 317-324.
- [6] Sztekler K., Panowski M., Klajny R., Modelling of  $\text{CO}_2$  adsorption from exhaust gases, The 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Xian 2009, 889-897.
- [7] Sztekler K., Modelowanie procesu ograniczania emisji dwutlenku węgla ze spalin w układzie bloku energetycznego, Praca doktorska, 2011.

- [8] Warych J., *Procesy oczyszczania gazów. Problemy projektowo - obliczeniowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [9] Warych W., *Oczyszczanie gazów. Procesy i aparatura*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.
- [10] [www.chem.ug.edu.pl/~bojirka/GAZ\\_ODL.pdf](http://www.chem.ug.edu.pl/~bojirka/GAZ_ODL.pdf);
- [11] Xu X., Chunshan Song Ch., Miller G.B., Scaroni W.A., Adsorption separation of carbon dioxide from flue gas of natural gas-fired boiler by a novel nanoporous molecular basket adsorbent, *Fuel Processing Technology* 2005, 86, 14-15, 1457-1472.

### **Simulation Analysis of Work of PTSA Adsorption Unit for Carbon Dioxide Separation from Flue Gas**

This paper presents one of the post-combustion methods of capturing carbon dioxide. The basics of adsorption process are shown, and the adsorption model PTSA is presented. The PTSA model is a combination of two different methods of separation: Pressure Swing Adsorption (PSA) and Temperature Swing Adsorption (TSA). The standard library from IPSE-pro software does not include a model for the separation unit, therefore is why a mathematical model was developed and imported to the IPSE-pro. Carried out simulations are designed to analyze the work conditions of the PTSA. This study focuses on three effects: the temperature and gas pressure effect on the process of adsorption, desorption pressure effect on the demand for sorbent and the parameters of a heating medium effect on the desorption process. Justified values of parameters of the separation units are defined. Experimental work is conducted by using synthetic 5A zeolite. The adsorption process in the PTSA system is operated with temperature and pressure corresponding to the temperature and pressure of the flue gas, which is introduced to capture units. In the first stage of the simulation, tests are conducted. The tests are to determine the parameters of flue gas, which allows reducing requirements on the sorbent and reducing the energy required to regenerate the sorbent. After the adsorption process, sorbent along with adsorbed CO<sub>2</sub> is subjected to the regeneration process, in which carbon dioxide is released from the surface and pores of the sorbent. Regeneration of the sorbent allows restoring the original sorption properties of the sorbent and thus it can be used in subsequent cycles. The temperature, in which the desorption process takes place has a significant meaning and the heat source can be derived from a steam turbine. The next stage of this study is to examine the effect of pressure and temperature of the heating steam on the demand for the sorbent and desorption heat. Extraction steam is used to carry out the regeneration of sorbent.

**Keywords:** adsorption, PTSA unit, CO<sub>2</sub> separation, process modelling