

MAREK TAŃCZYK, MANFRED JASCHIK, KRZYSZTOF WARMUZIŃSKI, ARTUR
WOJDYŁA, DANIEL PIECH, ALEKSANDRA JANUSZ-CYGAN, ELŻBIETA SOLTYS

ZATĘŻANIE NISKOSTĘŻONYCH ZANIECZYSZCZEŃ GAZOWYCH W STRUMIENIU POWIETRZA W DOŚWIADCZALNEJ INSTALACJI DO ADSORPCJI ZMIENNOCIŚNIENIOWEJ

Instytut Inżynierii Chemicznej PAN, ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Celem pracy było określenie granicznych wartości zateżenia niskostężonych zanieczyszczeń gazowych w procesie adsorpcji zmiennociśnieniowej (PSA) na potrzeby badań doświadczalnych nad zateżaniem metanu w powietrzu wentylacyjnym. Jako zanieczyszczenie, w miejsce CH_4 , dobrano ditlenek węgla, który adsorbuje się lepiej i bardziej selektywnie w stosunku do składników powietrza niż metan na zastosowanym adsorbencie. Przeprowadzono zatem badania dla mieszanin zawierających 0,24-0,69% obj. CO_2 w powietrzu. Stwierdzono, że w proponowanym procesie można uzyskać gaz wzbogacony o stężeniu nawet siedmiokrotnie wyższym niż stężenie CO_2 w gazie zasilającym. Ponadto stwierdzono, że w żadnym z przypadków eksperymentalnych stężenie zanieczyszczenia w gazie wzbogaconym nie przekroczyło 5% obj., czyli dolnej granicy wybuchowości metanu.

In the case of experimental investigations concerning methane enrichment in the air it is necessary to avoid a rise of CH_4 concentration above 5 vol.% i.e. its lower explosive limit. In order to determine experimentally safe ranges of pressure swing adsorption (PSA) parameters and the maximum level of the enrichment CO_2 was considered as a low-concentrated impurity in the air instead of methane because of higher adsorption capacity and selectivity towards nitrogen and oxygen in available adsorbents. Experimental results are therefore presented of the enrichment of CO_2 (0.24-0.69 vol.%) mixed with the air. It was found that the concentration of carbon dioxide in a CO_2 -enriched stream is up to seven times higher than that in the raw gas. It was also concluded that in all experimental cases CO_2 concentration in the CO_2 -enriched stream did not exceed 5 vol.%.

1. WPROWADZENIE

Jedną z bardziej istotnych kwestii o znaczeniu ekologicznym i gospodarczym, będącą przedmiotem zainteresowania wielu ośrodków badawczych, jest sprawa zagospodarowania metanu emitowanego z powietrzem wentylacyjnym, opuszczającym szyby kopalń węgla kamiennego. Zasadnicza trudność jest w tym przypadku związana z tym, że metan występuje w bardzo małych stężeniach w potężnej masie balastu. W kopalniach krajowych z pojedynczego szybu odprowadza się od 270 000 do 1 400 000 Nm^3h^{-1} mieszaniny powietrzno-metanowej o średnim stężeniu metanu wynoszącym około 0,3% obj. [1]. W Instytucie opracowano technologię utleniania metanu z powietrza wentylacyjnego w niekatalitycznym, termicznym reaktorze rewersyjnym [2]. Wykazano, że reaktor taki może pracować autotermicznie już przy stężeniach metanu wynoszących 0,2% obj., jednak utylizacja wydzielanego ciepła jest możliwa przy stężeniach metanu wyższych od 0,4% obj. [3]. Wykorzystanie w tym przypadku energii zawartej w metanie emitowanym z powietrzem wentylacyjnym wiąże się zatem z koniecznością podwyższenia stężenia CH_4 w gazie zasilającym reaktor rewersyjny do poziomu wyższego niż 0,4% obj. Naturalnym sposobem zwiększenia stężenia CH_4 w powietrzu wentylacyjnym wydawać się może mieszanie go z wysokostężonym strumieniem gazu z odmetanowania złoża węgla. Metan z odmetanowania jest już jednak w polskich kopalniach wykorzystywany w różny sposób [4]. Alternatywą jest mieszanie powietrza wentylacyjnego z gazem ziemnym bądź zateżanie metanu metodami separacyjnymi. W tym drugim przypadku interesującą opcją wydaje się proces zateżania zanieczyszczeń powietrza metodą adsorpcji zmiennociśnieniowej (PSA) opracowany w Instytucie na potrzeby wydzielania CO_2 ze strumieni spalin [5].

W procesie takim możliwe było zwiększenie stężenia CO_2 z poziomu 12-13% obj. do co najmniej 70% obj. (czyli prawie sześciokrotnie). Nie było natomiast wiadome, jaki byłby stopień wzbogacenia przy znacznie niższym stężeniu zanieczyszczenia (<1%), jak to ma miejsce w przypadku metanu zawartego w powietrzu wentylacyjnym. Brak tej informacji uniemożliwił przeprowadzenie stosownych eksperymentów dla mieszaniny metanu z powietrzem w sposób bezpieczny, a tym samym bezpośrednią weryfikację przydatności tego procesu PSA do zateżania CH_4 w powietrzu wentylacyjnym. Przy poziomie wzbogacenia uzyskiwanym dla wyższych stężeń zanieczyszczenia istniało duże prawdopodobieństwo, że stężenie metanu (chwilowe, lokalne bądź średnie) we wzbogacanej mieszance może przekraczać dolną granicę wybuchowości, wynoszącą 5% obj. Z tego względu w warunkach laboratoryjnych badania procesów separacji mieszanin zawierających metan prowadzi się często przy wykorzystaniu gazów syntetycznych pozbawionych tlenu. W rozważanym przypadku gazem nośnym jest powietrze ze sprężarki, jednak ze względu na duże ($\sim 10 \text{ Nm}^3\text{h}^{-1}$) wydajności instalacji nie było praktycznie możliwe zastąpienie go odpowiednio wysokim strumieniem azotu. W tej sytuacji, w badaniach wstępnych, wskazanym wydało się zastąpienie samego metanu gazem

niewybuchowym i niepalnym podobnie lub lepiej adsorbującym się na stosowanym adsorbencie.

Celem zaprezentowanych w tej pracy badań było zatem z jednej strony określenie przydatności opracowanego w Instytucie procesu PSA do zateżnienia niskostężonych zanieczyszczeń gazowych w powietrzu, a z drugiej ustalenie warunków bezpiecznego ich prowadzenia, gdyby zanieczyszczeniem był gaz wybuchowy, taki jak metan. W badaniach metan, ze względów bezpieczeństwa, został zastąpiony ditlenkiem węgla. W niniejszej pracy przedstawiono w związku z tym wyniki eksperymentów dotyczących zateżnienia mieszanin CO₂ (do około 1% obj.) z powietrzem. Biorąc pod uwagę fakt, że pojemność adsorpcyjna dla ditlenku węgla oraz selektywność CO₂ względem tlenu i azotu na planowanych do stosowania adsorbentach jest większa niż w przypadku metanu, określono w ten sposób graniczne wartości stężeń składnika zateżnionego dla różnych parametrów procesowych. Dzięki temu możliwe będzie w dalszej kolejności prowadzenie badań procesu separacji mieszanin CH₄/powietrze w taki sposób, by zawartość CH₄ w gazie zateżnionym nie przekroczyła dolnej granicy wybuchowości. Zgromadzono także dane doświadczalne, które posłużą do opracowania i wstępnej weryfikacji opisu matematycznego procesu zateżnienia metanu w powietrzu wentylacyjnym emitowanym z szybów kopalń węglowych.

2. METODYKA BADAŃ

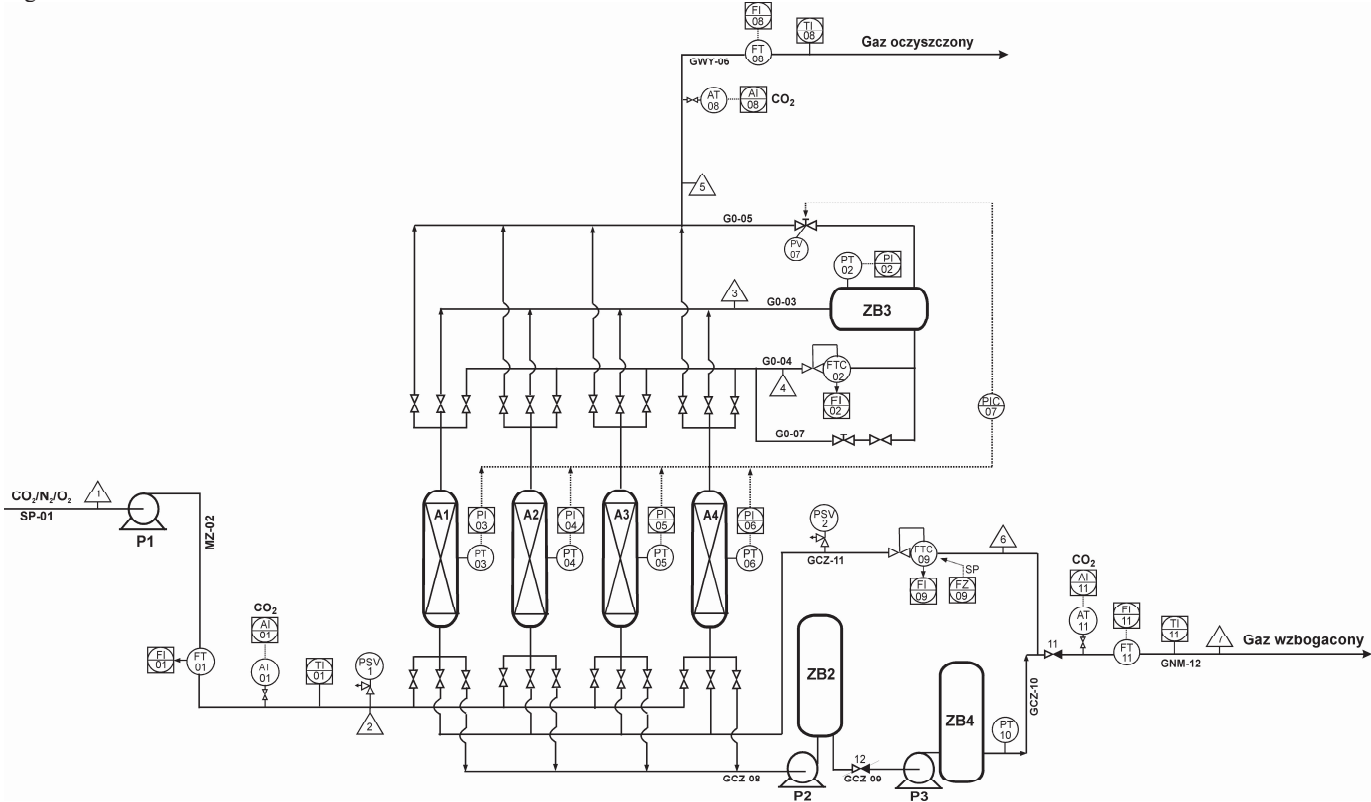
Badania wydzielania CO₂ z mieszaniny CO₂/O₂/N₂ wykonano w czterokolumnowej instalacji PSA, stanowiącej pierwszy węzeł separacyjny w adsorpcyjno-membranowej instalacji hybrydowej, której schemat połączeń pozwala na niezależne prowadzenie badań w każdym węźle separacyjnym. Adsorpcyjny węzeł separacji przedstawiono szczegółowo na rysunku 1. Jego kolumny mają średnicę 0,2 m i wysokość złoża adsorbentu 1,5 m. Adsorbentem jest zeolitowe sito molekularne 13X Grace MS 544HP.

Instalacja PSA była zasilana mieszaniną suchego powietrza i ditlenku węgla (0,24-0,69% obj.) o natężeniu przepływu 8,6 Nm³h⁻¹ i ciśnieniu ~1,14-1,19 bar. Przepływ gazu na wlocie do PSA był regulowany przy pomocy układu regulacyjnego FT-01. Temperatura mieszaniny zasilającej była mierzona w sposób ciągły w punkcie TI-01. Ciśnienie gazu w instalacji PSA było regulowane za pomocą zaworu pneumatycznego PV-07 umieszczonego na wylocie ze zbiornika ZB3. Regulator PV-07 jest skojarzony z pomiarem ciśnienia w punktach PT-03 – PT-06 w adsorberach A1-A4. Węzeł PSA opuszczały dwa strumienie gazu: gaz oczyszczony kierowany do zbiornika ZB3, a następnie do otoczenia oraz gaz wzbogacony w CO₂ kierowany za pośrednictwem pompy próżniowej P2 do zbiornika ZB2. Gaz wzbogacony (2-4% obj. CO₂) ze zbiornika ZB2 był sprężany w sprężarce P3 do ciśnienia 2,5-4 bar i kierowany do zbiornika ZB4. Część gazu wzbogaconego ze zbiornika ZB4 była zawracana po rozprężeniu do instalacji PSA, a resztę odprowadzano jako produkt procesu.

Każdy z 4 adsorberów instalacji PSA pracował na zmianę w krokach zasilania (adsorpcji), współprądowego rozprężania, współprądowego płukania złoża adsorbentu strumieniem gazu wzbogaconego w CO₂, rozprężania przeciwwprądowego, przeciwwprądowej regeneracji adsorbentu strumieniem gazu oczyszczonego i sprężania gazu w kolumnie. Kroki te omówiono bardziej szczegółowo poniżej.

- **Zasilanie** (adsorpcja), prowadzone było przy ciśnieniu 1,14-1,19 bar. Podczas tego kroku ditlenek węgla adsorbował się na wypełnieniu ZSM 13X. Gaz oczyszczony był odbierany wtedy przez górny króciec aparatu, skąd odprowadzono go do zbiornika ZB3. Nadwyżka gazu oczyszczonego była kierowana do otoczenia przez zawór regulacyjny PV-07.
- **Współprądowe rozprężanie**. Po zakończeniu kroku zasilania redukowano ciśnienie w adsorberze do ciśnienia atmosferycznego przez otwarcie zaworu wydmuchowego, łączącego adsorber bezpośrednio z kolektorem wydmuchowym.
- **Współprądowe płukanie złoża adsorbentu strumieniem gazu wzbogaconego w CO₂ ze zbiornika ZB4**. Strumień gazu wzbogaconego ze zbiornika ZB4, regulowany za pomocą układu regulacyjnego FTC-09, był doprowadzany od dołu kolumny pod ciśnieniem atmosferycznym, a wypierany z kolumny gaz oczyszczony, odbierany przez górny króciec, był odprowadzany do kolektora wydmuchu z pominięciem zbiornika ZB3.
- **Rozprężanie przeciwwprądowe**. Ciśnienie w kolumnie obniżane było do poziomu 0,1-0,2 bar. Ditlenek węgla, zaadsorbowany na złożu oraz wypełniający swobodną przestrzeń kolumny i makroporowatą przestrzeń wypełnienia, był usuwany z aparatu za pomocą pompy próżniowej P2 i gromadzony w zbiorniku ZB2 pod ciśnieniem atmosferycznym.
- **Przeciwwprądowa regeneracja adsorbentu strumieniem gazu oczyszczonego**. Po obniżeniu ciśnienia w adsorberze do poziomu 0,1-0,2 bar rozpoczynał się kolejny krok regeneracji adsorbentu, polegający na przemywaniu złoża strumieniem gazu oczyszczonego. Gaz oczyszczony, pobierany ze zbiornika ZB3, przepływał przez wypełnienie adsorbentu pod ciśnieniem 0,1-0,2 bar, usuwając ze złoża pozostałą ilość zaadsorbowanego CO₂, który był odprowadzany do zbiornika ZB2 przez pompę próżniową P2. Strumień gazu do regeneracji był regulowany przez układ pomiarowo-regulacyjny FTC-02.
- **Sprężanie gazu w kolumnie**. Dopływ gazu ze zbiornika ZB3 do kolumny adsorpcyjnej przy zamkniętym odprowadzeniu na ssanie pompy próżniowej powodował kontrolowany wzrost ciśnienia w kolumnie aż do jego wyrównania z ciśnieniem gazu oczyszczonego w zbiorniku ZB3. Krok sprężania kończył pełny cykl i kolumna była gotowa do ponownej pracy w kroku zasilania.

Rys. 1. Schemat instalacji PSA
Fig.1. PSA installation



Tab.1. Parametry ruchowe oraz wyniki badań doświadczalnych procesu wydzielania ditlenku węgla z niskostężonej mieszaniny z powietrzem
 Tab.1. Process parameters and experimental results concerning CO₂ removal from low-concentrated CO₂ mixture with the air

L.p.	parametry ruchowe										wyniki doświadczalne	
	długość kroku s	V _Z ^{włot} Nm ³ ·h ⁻¹	[CO ₂] _Z ^{włot} % obj.	T _{gZ} ^{włot} K	p _Z bar	V _{PŁ} ^{włot} Nm ³ ·h ⁻¹	p _{PŁ} bar	V _{Reg} ^{włot} Nm ³ ·h ⁻¹	p _{R↓} bar	p _{Reg} bar	[CO ₂] _Z ^{wyłot} % obj.	[CO ₂] _{R↓+Reg} ^{wyłot} % obj.
1	105	8,598	0,27	301,06	1,146	3,434	1,046	1,032	0,149	0,170	0	1,95
2	105	8,598	0,24	301,06	1,146	3,434	1,046	1,032	0,149	0,170	0	1,76
3	105	8,593	0,53	298,77	1,144	3,425	1,052	1,032	0,155	0,172	0	3,24
4	105	8,592	0,69	296,00	1,144	3,444	1,053	1,032	0,156	0,172	0	4,11
5	135	8,595	0,49	297,19	1,184	1,100	1,051	1,032	0,154	0,171	0	1,70
6	135	8,593	0,51	300,54	1,188	1,415	1,047	1,032	0,150	0,175	0	2,02
7	135	8,593	0,50	296,25	1,180	1,856	1,055	1,032	0,158	0,175	0	2,11
8	105	8,593	0,50	296,50	1,154	1,859	1,046	1,032	0,157	0,174	0	1,72
9	115	8,596	0,50	297,85	1,177	1,862	1,052	1,032	0,163	0,180	0	1,83

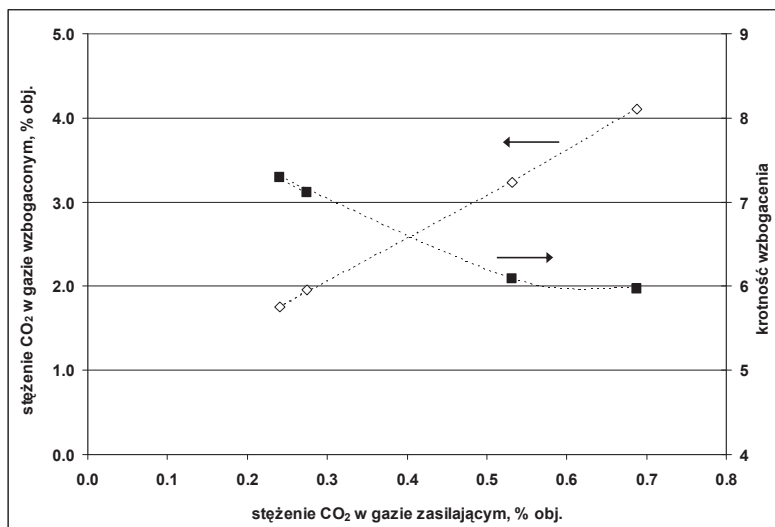
3. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

W badaniach zmieniano stężenie CO₂ w gazie zasilającym, natężenie przepływu gazu wzbogaconego w kroku płukania oraz długość kroku cyklu PSA. Wyniki badań w cyklicznym stanie ustalonym przedstawiono zbiorczo w tabeli 1 oraz na rysunkach 2-4. Cykliczny stan ustalony był osiągany po około 100 cyklach PSA. We wszystkich przypadkach przedstawionych w tabeli 1 sprawność odzysku ditlenku węgla wynosiła 100%.

Na rysunku 2 przedstawiono stężenie ditlenku węgla w gazie wzbogaconym w funkcji stężenia CO₂ w gazie zasilającym, przy natężeniu przepływu gazu w kroku płukania wynoszącym około 3,4 Nm³·h⁻¹ (przypadki 1-4 w tabeli 1). Jak widać na tym rysunku wzrost stężenia CO₂ na wlocie do instalacji PSA prowadzi do praktycznie prostoliniowego wzrostu stężenia CO₂ w gazie wzbogaconym. Trend taki jest związany z liniowym charakterem izotermy adsorpcji ditlenku węgla na ZSM 13X w bardzo niskim obszarze ciśnień cząstkowych. Krotność wzbogacenia (stosunek stężeń CO₂ w gazie wzbogaconym i zasilającym) spada natomiast od 7,3 do 6 przy wzroście stężenia CO₂ w gazie zasilającym z 0,24 do 0,69% obj.

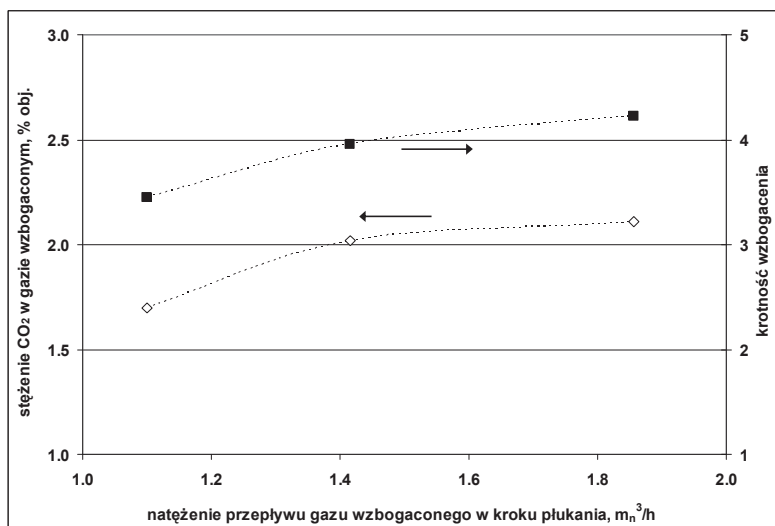
Na rysunku 3 przedstawiono stężenie CO₂ w gazie wzbogaconym w funkcji wlotowego natężenia przepływu gazu w kroku płukania, przy stężeniu CO₂ w gazie zasilającym wynoszącym 0,5% obj. (przypadki 5-7 w tabeli 1). Wzrost natężenia przepływu na wlocie w kroku płukania ma prowadzić w zamierzeniu do wysycenia większych partii złoża gazem wzbogaconym, a w konsekwencji do wzrostu stężenia CO₂ w tym gazie. Taki też wniosek wynika z zależności przedstawionej na rysunku 3. Odbiciem tego trendu jest oczywiście wzrostrotności wzbogacenia, która jest jednak w tym przypadku (krok cyklu 135 s i wlotowe natężenie przepływu gazu w kroku płukania 1,1-1,9 Nm³·h⁻¹) niższa niż w sytuacji przedstawionej na rysunku 2 (krok cyklu 105 s i wlotowe natężenie przepływu gazu w kroku płukania 3,4 Nm³·h⁻¹). Należy też zauważyć, że w sytuacji opisanej na rysunku 3 stosunkowo duża zmiana natężenia przepływu gazu wzbogaconego w kroku płukania (o około 72% w przypadku dwóch skrajnych punktów) prowadzi do stosunkowo niewielkiego wzrostu krotności wzbogacenia (o 22%).

Na rysunku 4 przedstawiono zależność stężenia CO₂ w gazie wzbogaconym w funkcji długości kroku cyklu PSA, przy stężeniu CO₂ w gazie zasilającym wynoszącym 0,5% obj. i natężeniu przepływu gazu w kroku płukania wynoszącym około 1,9 Nm³·h⁻¹ (przypadki 7-9 w tabeli 1). Jak widać na tym rysunku, wydłużenie czasu trwania kroku w instalacji PSA o prawie 30%, przy ustalonych natężeniach przepływu gazu zasilającego, regenerującego i płuczącego prowadzi do wzrostu stężenia CO₂ w gazie wzbogaconym od 1,7 do 2,11% obj. Obserwowany trend jest zgodny z oczekiwaniami, gdyż wydłużenie czasu trwania cyklu skutkuje wysyceniem przez ditlenek węgla większych partii złoża i w konsekwencji wzrostem stężenia CO₂ w gazie wzbogaconym.



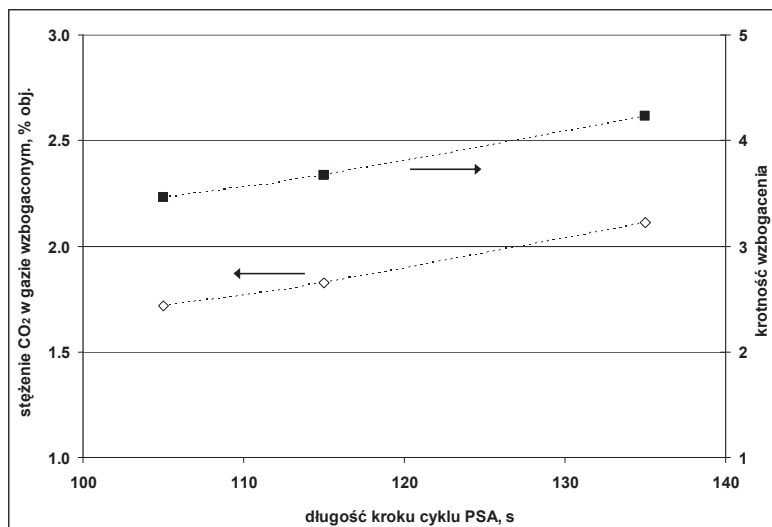
Rys. 2. Stężenie CO₂ w gazie wzbogaconym w funkcji stężenia CO₂ w gazie zasilającym (przypadki 1-4 w tabeli 1)

Fig. 2. Carbon dioxide concentration and enrichment in CO₂-enriched stream vs. CO₂ content in raw gas (Table 1, Runs 1-4)



Rys. 3. Stężenie CO₂ w gazie wzbogaconym w funkcji natężenia przepływu gazu wzbogaconego na wlocie w kroku płukania gazem wzbogaconym (przypadki 5-7 w tabeli 1)

Fig. 3. Carbon dioxide concentration and enrichment in CO₂-enriched stream vs. inlet flow rate of enriched gas during purge (Table 1, Runs 5-7)



Rys. 4. Stężenie CO₂ w gazie wzbogaconym w funkcji długości kroku cyklu PSA (przypadki 7-9 w tabeli 1)

Fig. 4. Carbon dioxide concentration and enrichment in CO₂-enriched stream vs. duration of PSA cycle step (Table 1, Runs 7-9)

4. WNIOSKI

W wyniku badań procesu wydzielania CO₂ z niskostężonych mieszanin z powietrzem stwierdzono, że w proponowanym procesie PSA można uzyskać gaz wzbogacony o stężeniu nawet siedmiokrotnie wyższym niż stężenie CO₂ w gazie zasilającym. Jednocześnie stwierdzono, że w żadnym z przypadków eksperymentalnych stężenie ditlenku węgla w gazie wzbogaconym nie przekroczyło 5% obj. Uzyskane wartości można traktować jako graniczne poziomy wzbogacenia dla dalszych badań nad wydzielaniem metanu z niskostężonych mieszanin z powietrzem, gdyż pojemność adsorpcyjna CO₂ oraz jego selektywność względem tlenu i azotu na planowanych do stosowania adsorbentach są większe niż w przypadku CH₄. Można także stwierdzić, że w przypadku eksperymentów z metanem, prowadzonych w podobnym zakresie parametrów jak w niniejszej pracy, nie powinno dojść do przekroczenia dolnej granicy wybuchowości.

W wyniku przeprowadzonych badań zgromadzono także dane doświadczalne, które będą pomocne przy opracowaniu i weryfikacji opisu matematycznego procesu zateżnienia metanu w powietrzu wentylacyjnym emitowanym z szybów kopalń węglowych.

OZNACZENIA - SYMBOLS

- p – ciśnienie, bar
pressure
- T – temperatura, K
temperature
- V – natężenie przepływu gazu, $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
gas flow rate

INDEKSY DOLNE I GÓRNE – SUBSCRIPTS AND SUPERSRIPTS

- g – faza gazowa
gaseous phase
- PL – krok płukania strumieniem gazu wzbogaconego w CO_2
purge with the CO_2 -enriched stream
- $R\downarrow$ – krok rozprężania przeciwrządowego
countercurrent depressurization
- Reg – krok regeneracji próżniowej
vacuum regeneration
- Z – krok zasilania (adsorpcji)
feed (adsorption)
- $wlot$ – dotyczy parametrów gazu doprowadzanego do kolumny
inlet gas parameters
- $wy\text{lot}$ – dotyczy parametrów gazu wyprowadzanego z kolumny
outlet gas parameters

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE - REFERENCES

- [1] Nawrat S., Gatnar K., 2008. Ocena stanu i możliwości utylizacji metanu z powietrza wentylacyjnego podziemnych kopalń węgla kamiennego. *Polityka Energetyczna*, 11 (Zeszyt 2), 69-84.
- [2] Gosiewski K., Pawlaczyk A., Jaschik M., 2011. Spalanie metanu z powietrza wentylacyjnego kopalń w termicznym reaktorze reweryjnym. *Przemysł Chemiczny*, 10, 1917-1923.
- [3] Pawlaczyk A., 2012. Opis procesu homogenicznego spalania niskostężonych mieszanin powietrze-metan w wypełnieniu monolitycznym i ocena jego przydatności do modelowania reaktorów reweryjnych. Praca doktorska. Gliwice, 131-133.
- [4] Gatnar K., 2006. Metan pokładów węgla jako paliwo alternatywne – przykłady rozwiązań w Jastrzębskiej Spółce Węglowej S.A., *Polityka Energetyczna*, 9 (Zeszyt specjalny), 423-437.
- [5] Warmuzinski K., Tanczyk M., Jaschik M., 2015. Experimental study on the capture of CO_2 from flue gas using adsorption combined with membrane separation, *Int. J. Greenhouse Gas Control*, 37, 182–190. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.03.009.

MAREK TAŃCZYK, MANFRED JASCHIK, KRZYSZTOF WARMUZIŃSKI, ARTUR WOJDYLA, DANIEL PIECH,
ALEKSANDRA JANUSZ-CYGAN, ELZBIETA SOLTYS

THE ENRICHMENT OF LOW-CONCENTRATED IMPURITIES IN AIR USING AN EXPERIMENTAL PRESSURE SWING ADSORPTION INSTALLATION

The removal and utilization of ventilation air methane (VAM) is a big ecological and economical issue. A process of VAM oxidation in the thermal reverse flow reactor was developed in the Institute which requires however methane concentration in the feed air above 0.4 vol.% if the produced heat is to be utilized. One of the possible ways of increasing methane concentration in the ventilation air could be pressure swing adsorption process (PSA). In the case of experimental investigations concerning methane enrichment in the air it is necessary to avoid a rise of CH₄ concentration above 5 vol.% i.e. its lower explosive limit. In order to determine experimentally safe ranges of PSA parameters and the maximum level of the enrichment CO₂ was considered as a low-concentrated impurity in the air instead of methane because of higher adsorption capacity and selectivity towards nitrogen and oxygen in available adsorbents.

The experimental investigations concerning CO₂ removal from CO₂/O₂/N₂ mixture were performed in a laboratory pressure swing adsorption installation (Fig.1) which is the part of a hybrid installation described in detail in [5]. Experimental runs are presented in Table 1 and in Figs 2-4. It can be seen in Fig.2 that carbon dioxide concentration in CO₂-enriched stream increases linearly with CO₂ concentration in the feed gas from 1.95 to 4.11 vol.% and the enrichment level lies between 6 and 7.3. Both CO₂ concentration in the CO₂-enriched stream and the enrichment level increase with an increase of the inlet flow rate of the enriched gas during purge (Fig.3) and with an increase of the single step length of the PSA cycle (Fig.4).

It was found that the concentration of carbon dioxide in a CO₂-enriched stream is up to seven times higher than that in the raw gas. It was also concluded that in all experimental cases CO₂ concentration in the CO₂-enriched stream did not exceed 5 vol.%, i.e. lower explosive limit of methane. The experimental data presented in this study will form the basis for the formulation and verification of a mathematical model of the pressure swing adsorption process concerning the enrichment of low-concentrated impurities (especially methane) in the air.