



Politechnika Wroclawska

## **Analiza próbek środowiskowych i przemysłowych** (CHC015011L)

*Detekcja i usuwanie CO<sub>2</sub> metodą  
zmiennociśnieniowej adsorpcji (PSA)*

Opracowane przez:

dr inż. Adam Moyseowicz  
dr inż. Katarzyna Labus

Wrocław 2015



## I. WPROWADZENIE

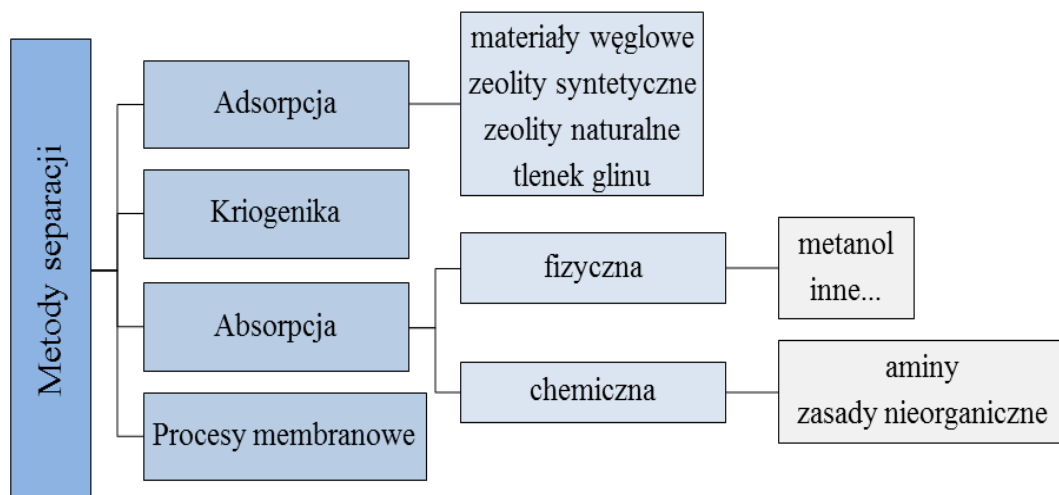
Usuwanie ditlenku węgla ze strumieni mieszanin gazowych jest konieczną operacją w wielu ważnych, wielkotonażowych procesach technologicznych i prawdopodobnie, perspektywnie w energetyce. Wymienić tu należy tak odległe obszary działalności przemysłowej jak choćby produkcja wodoru na drodze parowego reformingu metanu i zgazowania innych węglowodorów, usuwanie CO<sub>2</sub> z gazu ziemnego i gazu syntezowego stosowanych do celów energetycznych czy wreszcie spalin z instalacji energetycznych klasycznych i przyszłościowych. Obecnie 80 % światowego zużycia energii opiera się na paliwach kopalnych, a na podstawie aktualnych trendów polityczno-gospodarczych wskazuje się kontynuację uzależnienia od paliw kopalnych. Ważnym aspektem ze względów ochrony środowiska i zmniejszeniu efektu cieplarnianego stają się systemy sekwestracji i magazynowania ditlenku węgla CCS (ang. Carbon Capture and Storage). Są to zintegrowane systemy wydzielenia, wychwycenia i geologicznego magazynowania ditlenku węgla ze spalin generowanych przez przemysł energetyczny czy chemiczny. Zgodnie z zaleceniami Parlamentu Europejskiego do roku 2020 państwa członkowskie UE powinny zmagazynować ok. 160 milionów ton CO<sub>2</sub> [1]. W realizacji założeń unijnych dotyczących wychwycenia i magazynowania ditlenku węgla mogą znacząco pomóc techniki separacji gazów, z których obecnie najbardziej obiecujące pod względem ekonomicznym są metody wykorzystujące procesy adsorpcji.

## II. METODY ROZDZIAŁU MIESZANIN GAZOWYCH

Nie istnieje jedna uniwersalna, optymalna metoda rozdziału mieszanin gazowych. Zastosowana technologia musi uwzględniać takie czynniki jak:

- ✓ skład mieszaniny gazowej,
- ✓ cel oraz skalę procesu,
- ✓ parametry fizykochemiczne (ciśnienie, temperatura),
- ✓ kryteria środowiskowe.

Przyjmując za kryterium zjawisko fizyczne lub chemiczne stanowiące podstawę danej metody, możemy technologie separacji ditlenku węgla z mieszanin gazowych podzielić zgodnie z poniższym schematem (Rys.1)



Rys.1. Metody separacji ditlenku węgla z mieszanin gazowych.

### Metody kriogeniczne

Sposób konwencjonalny, stosowany powszechnie, ale w specyficznych uwarunkowaniach. Skraplanie i rektyfikacja są procesami energochłonnymi. Metody te znajdują zastosowanie do rozdziału gazów zawierających duże stężenie ditlenku węgla, najlepiej ponad 90% i bez obecności pary wodnej. Technika ta nie zapewnia precyzji rozdziału. Z drugiej strony operacja skraplania jest nieodzownym, końcowym etapem każdej metody, jeżeli tylko oddzielony CO<sub>2</sub> jest przesyłany na dalsze odległości lub zamierza się go składować.

### Procesy membranowe

Rozwijane od kilkudziesięciu lat nie znalazły jednak powszechnego zastosowania. Siłą napędową procesu dyfuzji cząsteczek gazu przez membranę jest różnica ciśnień parcyjnych po obydwu jej stronach [2]. Membrany mogą być ceramiczne lub polimerowe jak i stanowić złożone zaawansowane technologicznie układy. Mimo postępów technologicznych membrany są drogie. Procesy oddzielania składników gazu przebiegają z małą szybkością, co stanowi istotną przeszkodę w przypadku dużych, przemysłowych strumieni gazów. Procesy membranowe nie są odpowiednie do separacji gazów występujących w niskich stężeniach. Ponadto łatwiej jest wyodrębnić z mieszaniny gaz o dużej czystości niż uzyskać wysoki stopień odzysku.



## Procesy absorpcyjne

Absorpcyjne usuwanie ditlenku węgla w aminach (MEA, DEA, TEA) to najpowszechniej stosowane rozwiązanie. Ta metoda jest rozwiązaniem z wyboru w instalacjach produkcji wodoru z gazu ziemnego po procesach reformingu parowego i konwersji CO do CO<sub>2</sub>. Energochłonność metody, uważana za nadmierną wynika z konieczności stosowania przegrzanej pary wodnej do regeneracji amin. Inne niekorzystne aspekty technologii to straty amin w wyniku degradacji termicznej i lotności oraz korozja instalacji. Na absorpcji CO<sub>2</sub> w cieczach bazują takie procesy jak Selexol i Rectisol.

## Procesy adsorpcyjne

Metody rozdzału jak i też oczyszczanie gazów oparte na zjawisku adsorpcji fizycznej od kilkunastu lat uważane są za najbardziej obiecujący kierunek rozwoju [3]. Na zjawisku selektywnej adsorpcji gazów na stałych adsorbentach oparty jest proces adsorpcji zmiennociśnieniowej (Pressure Swing Adsorption - PSA).

### III. ADSORPCJA ZMIENNOCIŚNIENIOWA (PSA)

Proces adsorpcji zmiennociśnieniowej stanowi przykład jednej z metod adsorpcyjnych. Proces ten opiera się na zjawisku selektywnej adsorpcji gazów na stałych sorbentach. Siłą napędową procesu jest różnica ciśnień w następujących po sobie cyklach pracy adsorpcji (przebiegających przy podwyższonym ciśnieniu) oraz desorpcji (przebiegający przy obniżonym ciśnieniu).

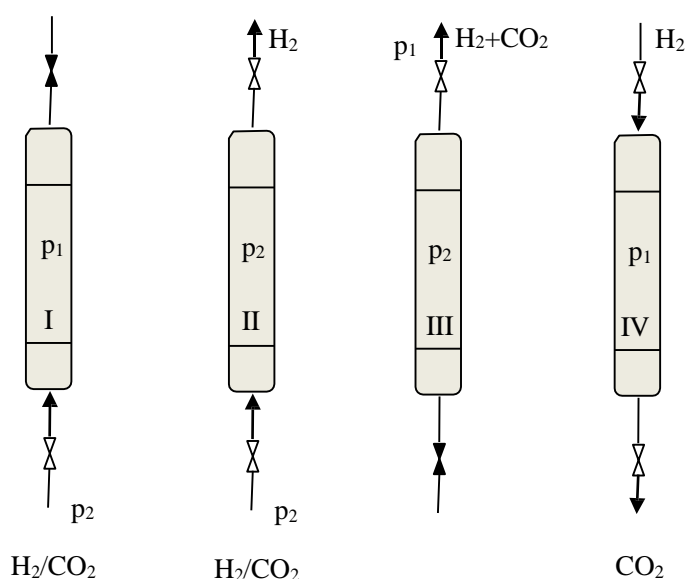
Proces adsorpcji zmiennociśnieniowej polega na takim dobraniu warunków procesowych i rodzaju adsorbentu, aby selektywnie na złożu adsorbował się jeden ze składników mieszaniny gazowej. Następnie, po wysyceniu się złoża adsorbentu, obniża się ciśnienie desorbując zaadsorbowany składnik. Może być to oczywiście równie dobrze pożądaný produkt jak i odpad. Technologie oparte na procesie adsorpcji zmiennociśnieniowej są dziś powszechnie stosowanym rozwiązaniem w instalacjach produkujących wodór z gazu ziemnego, do procesu oddzielania ditlenku węgla od wodoru (odpad wypuszczany do atmosfery). Podobnie systemy PSA są coraz częściej stosowane do produkcji tlenu i azotu z powietrza, wypierając metody kriogeniczne.

Instalacje adsorpcji zmiennociśnieniowej cechują się niskimi kosztami inwestycyjnymi, kosztami konserwacji urządzeń oraz niską awaryjnością. Szybko mogą być uruchamiane i wyłączane z ruchu. Są elastyczne w sensie obciążenia. Wolno ulegają dekapitalizacji. Instalacje pracują w zasadzie w temperaturze otoczenia, nie wymagają nakładów na izolację cieplną. Adsorpcja zmiennociśnieniowa jest odpowiednią techniką do separacji składników

gazowych występujących w niskich stężeniach. Zjawisko fizycznej adsorpcji gazów na stałych adsorbentach wiąże się z niskim efektem energetycznym, co ma największe znaczenie na etapie desorpcji adsorbentu. W większości układów proces jest zbliżony do izotermicznego.

Zasadę działania prostej klasycznej instalacji PSA można opisać w oparciu o ideowy uproszczony, schemat blokowy (Rys. 2), na przykładzie separacji  $\text{CO}_2$  ze strumienia wodoru. Proces przebiega w następujący sposób:

- I. Do kolumny adsorpcyjnej, w której znajduje się złożo adsorbentu wysyczone wodorem, pod ciśnieniem  $p_1$  od dołu wpływa surowiec ( $\text{H}_2 + \text{CO}_2$ ) pod ciśnieniem  $p_2$ , większym od  $p_1$ , do osiągnięcia ciśnienia  $p_2$  w kolumnie.
- II. Górą kolumny jest odbierany czysty wodór do momentu aż czoło fali adsorbującego się  $\text{CO}_2$  zbliży się do punktu przebiccia. Zamyka się zawór dolotowy.
- III. Współprądowo rozpręża się kolumnę do ciśnienia  $p_1$ , górą odbierany jest wodór z domieszką  $\text{CO}_2$ , strumień gazu zawracany jest do procesu.
- IV. Przeciwnieprądowo desorbuje się  $\text{CO}_2$ , miejsce którego wypełnia wodór.



Rys. 2. Schemat metody PSA.

Cechą wspólną wszystkich adsorberów do rozdzielania mieszanin gazowych metodą PSA jest cykliczna zmiana ciśnienia oraz kierunków przepływu gazu w kolumnie. Pojedynczy aparat pracuje okresowo - przeprowadza się w nim na przemian adsorpcję i desorpcję, dlatego dla uzyskania ciągłości procesu stosuje się dwie lub więcej kolumn o przesuniętym w fazie cyklu pracy.



Bardziej zaawansowane rozwiązania są zazwyczaj cztero-, sześciokolumnowe i zawierają układy kilku współpracujących kolumn na różnych etapach cyklu. Dodatkowe operacje to przede wszystkim „płukanie” kolumn pomiędzy określonymi etapami cyklu, w celu oddzielenia poszczególnych strumieni gazów by uzyskać produkt o maksymalnym stężeniu, z wysokim odzyskiem i przy dużej wydajności instalacji.

Dobór odpowiedniego adsorbenta i optymalizacja systemu pracy instalacji może zdecydowanie zminimalizować koszty procesowe, nawet o 40%.

#### IV. MODYFIKACJE KLASYCZNEGO PROCESU PSA

Modyfikacje klasycznego procesu adsorpcji zmiennociśnieniowej, dotyczące głównie sposobu desorpcji adsorbentu, wykreowały podział zasadniczego procesu na kilka charakterystycznych odmian:

**TSA** (Thermal Swing Adsorption). Desorpcja jest wspomagana podniesieniem temperatury złoża adsorbenta, realizowanym bezprzeponowo, ogrzewanym w wymienniku strumieniem gazu. Zapewnia to szybką i głęboką desorpcję, ale konieczne się staje dodanie operacji chłodzenia po procesie desorpcji, co wydłuża cykl pracy i w efekcie wydajność instalacji.

**VPSA** lub **VSA** (Vacuum Pressure Swing Adsorption). Desorpcja zaadsorbowanego gazu zachodzi pod wpływem obniżonego ciśnienia, zwykle do 0,01-0,05 bara. Dzięki temu proces adsorpcji może przebiegać pod ciśnieniem atmosferycznym. Unika się konieczności sprężania gazu. Z kolei niskie ciśnienie skutecznie desorbuje gaz zwiększając pojemność roboczą złoża i dalej w konsekwencji wydajność dobową instalacji.

**ESA** (Electric Swing Adsorption). Dotyczy procesów adsorpcji na przewodzących materiałach węglowych, nanorurkach i nanowłóknach [4]. Przyłożenie napięcia do złoża adsorbentu powoduje błyskawiczną desorpcję zaadsorbowanego gazu. Efektywność regeneracji sięga 85%, 20% więcej niż z zastosowaniem technik próżniowych. Metoda nowa, w stadium intensywnych badań. Barię w jej praktycznym zastosowaniu jest cena nanomateriałów węglowych.

Układy „**Rapid Cycles**” [3]. Stosowane są tu szerokie, niskie kolumny i niezwykle krótkie czasy poszczególnych etapów cyklu: napełnianie 0,3 – 1,0 s; przerwa 0,5 – 3,0 s., opróżnianie około 2 s. Taki reżim pracy nie daje wysokiego odzysku, ale za to około pięciokrotny wzrost wydajności.



## V. CHARAKTERYSTYKA CZĘŚCIEJ STOSOWANYCH ADSORBENTÓW

*Adsorbentami nazywamy ciała stałe, mające zdolność do adsorpcji na swojej powierzchni lub w porach innej substancji. Ze względu na mechanizm wyróżniamy dwa rodzaje adsorpcji:*

**Adsorpcję fizyczną** wywołują oddziaływania międzycząsteczkowe (siły van der Waalsa, wiązania wodorowe). Charakteryzuje się ona niewielkim ciepłem adsorpcji, odwracalnością procesu, adsorpcja może zachodzić wielowarstwowo (kilka warstw adsorbentu na powierzchni adsorbentu);

**Adsorpcję chemiczną** (chemisorpcję), której procesem napędowym jest reakcja chemiczna pomiędzy adsorbentem a adsorbentem. Charakteryzującą się dużym ciepłem adsorpcji (zbliżonym do ciepła reakcji chemicznej) i trudną, energochłonną desorpcją. Adsorbent na powierzchni adsorbentu tworzy jedną (mono-) warstwę [5].

Do najczęściej stosowanych w praktyce adsorbentów należą:

- ✓ Węgla aktywne,
- ✓ Sita molekularne (zeolity),
- ✓ Żele krzemionkowe,
- ✓ Aktywowane tlenki glinu.

Charakterystyka wybranych sorbentów:

**Węgla aktywne** otrzymuje się wyniku karbonizacji materiału węglowego oraz następnie jego aktywacji (parą wodną,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{KOH}$ ,  $\text{FeCl}_3$ ). Adsorbenty węglowe różnią się między sobą strukturą porowatą, na której wpływ mają takie czynniki jak: rodzaj surowca wyjściowego, warunki procesu karbonizacji oraz przede wszystkim metoda aktywacji. W strukturze adsorbentów węglowych istnieją pory o rozmiarach makro-, mezo- i mikroporów. Ich głównym zastosowaniem jest oczyszczanie wody oraz usuwanie z powietrza par związków organicznych. Nowym typem adsorbentów węglowych są **sita węglowe** odznaczające się wąskim przedziałem wielkości porów.

**Sita molekularne** stanowią krystaliczne glinokrzemiany metali dwuwartościowych oraz alkalicznych. Zeolity zbudowane są z połączonych jonami tlenu tetraedrów  $\text{SiO}_4$  i  $\text{AlO}_4$ . Główną zaletą tych materiałów jest wąski zakres wymiarów porów 0,3- 1,1 nm.



**Żele krzemionkowe** (silikażel) są to bezpostaciowe ciała stałe o wzorze ogólnym  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Żele otrzymuje się zwykle przez koagulację mieszaniny kwasu siarkowego i krzemianu sodu. Wyróżnia się żele wąskoporowate (15 nm) lub szerokoporowate (60 nm), a decyduje o tym technologia ich produkcji. Materiały te stosuje się do suszenia gazów i cieczy organicznych.

**Aktywowane tlenki glinu** zawierają zwykle niewielkie ilości innych tlenków (np. Na, Si, Fe, Ti). Adsorbent ten znalazł zastosowanie do usuwania lotnych związków fluoru.

Adsorbenty do oczyszczania gazów do celów przemysłowych obok odpowiedniego ukształtowania struktury porowatej powinny spełniać szereg cech pozwalających na zastosowanie ich jako wypełnienia kolumny adsorpcyjnej [6]. Wymagania stawiane tym materiałom przedstawiono poniżej.

➤ **Struktura porowata**

- ✓ duża powierzchnia właściwa ( $S_{\text{BET}}$  1000- 2500  $\text{m}^2/\text{g}$ )
- ✓ wysoki udział mikroporów

➤ **Uwarunkowania procesowe**

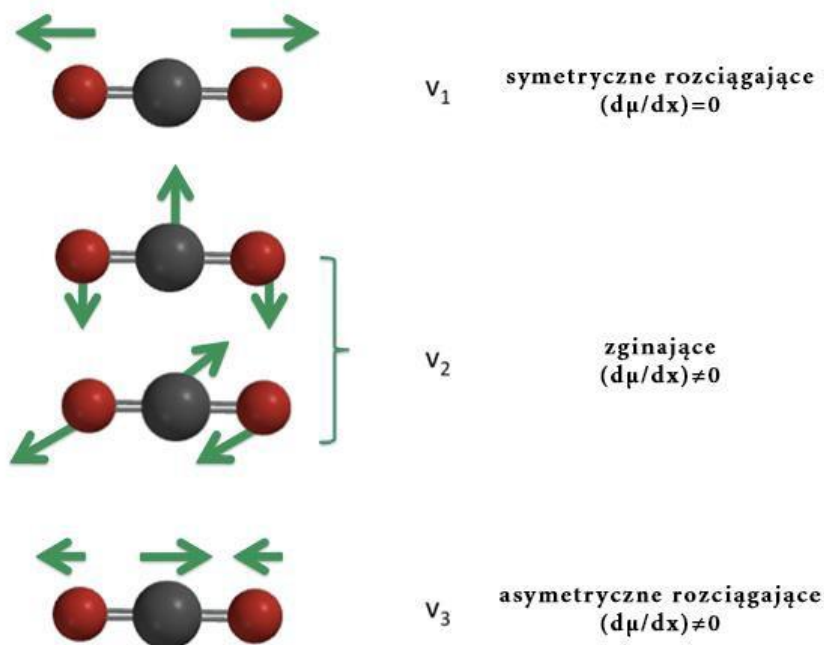
- ✓ wytrzymały mechanicznie
- ✓ dobra selektywność
- ✓ mały opór dla strumienia gazów
- ✓ duża pojemność adsorpcyjna w jednostce objętości
- ✓ całkowita desorpcja zaadsorbowanych gazów w podwyższonej temperaturze i obniżonym ciśnieniu
- ✓ wysokie powinowactwo adsorpcyjne do gazów w obecności pary wodnej

## VI. METODY DETEKCJI GAZÓW CIEPLARNIANYCH ( $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ )

Za gazy cieplarniane uważa się gazy absorbujące promieniowanie podczerwone w atmosferze, powodujące zatrzymanie ciepła odbijającego się od powierzchni ziemi. Najważniejsze gazy cieplarniane (charakteryzujące się parametrem GWP – ang. Global Warming Potential) to przede wszystkim para wodna, a także ditlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ) oraz podtlenek azotu ( $\text{N}_2\text{O}$ ) [7].

Ditlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) jest liniową cząsteczką długości wiązań C=O 116,3 pm. W temperaturze pokojowej jest bezbarwnym, bezwonnym gazem resublimującym w temperaturze poniżej  $-78\text{ }^\circ\text{C}$  (suchy lód). Liniowa cząsteczka  $\text{CO}_2$  charakteryzuje się 3 rodzajami drgań oscylacyjnych, które zostały zilustrowane poniżej:

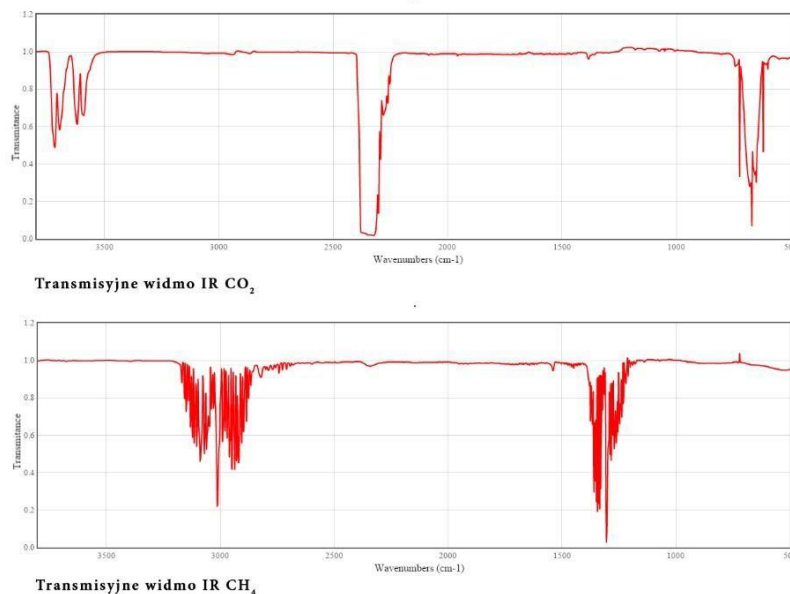




Rys. 3. Rodzaje drgań oscylacyjnych cząsteczki ditlenku węgla.

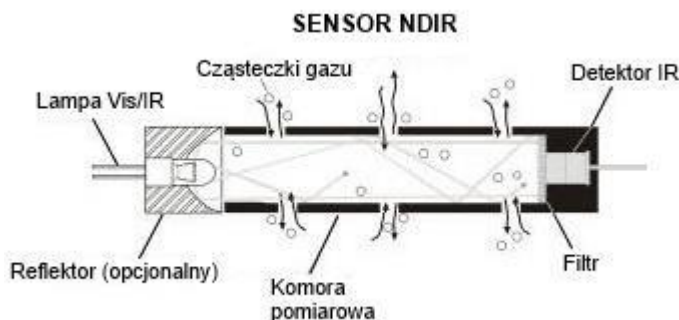
Symetryczne drgania rozciągające nie wywołują przemieszczenia się środków ciężkości ładunków oraz zmiany momentu dipolowego, który w stanie stacjonarnym wynosi zero, czego wynikiem jest brak pasma absorpcyjnego w widmie podczerwieni zgodnie z regułami wyboru znanymi ze spektroskopii IR. Natomiast drgania rozciągające asymetryczne i zginające generują zmienny moment dipolowy cząsteczki CO<sub>2</sub>, które generują sygnały przy długości fali odpowiednio 2300 cm<sup>-1</sup> i 670 cm<sup>-1</sup>.

Metan (CH<sub>4</sub>) jest najprostszym węglowodorem nasyconym, w warunkach normalnych jest to bezwonny, bezbarwny gaz. Metan emitowany do atmosfery jest głównie w wyniku anaerobowego rozkładu materii organicznej, hodowli trzody czy z nieszczelności podczas wydobywania gazu ziemnego, ropy naftowej i węgla. Posiada symetryczną, niepolarną budowę, w której atom węgla otoczony jest przez 4 atomy wodoru w idealnej strukturze tetraedycznej (kąty między wiązaniami równocennymi wynoszą 109°28'). Widmo IR metanu charakteryzuje się dwoma silnymi pasmami absorpcji przy długości fali 3020 cm<sup>-1</sup> i 1300 cm<sup>-1</sup> odpowiadającymi drganiom rozciągającym oraz zginającym wiązań C-H.



Rys. 4. Widma transmisyjne IR ditlenku węgla oraz metanu [8]

Najprostszymi, a zarazem najskuteczniejszymi detektorami gazów takich jak CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> są analizatory niedispersyjne na podczerwień (NDIR – ang. Non-Dispersive Infrared). Kluczowymi komponentami analizatorów NDIR jest źródło podczerwieni (lampa), komora pomiarowa, filtr długości fali i detektor podczerwieni. Analizowany gaz jest pompowany do komory pomiarowej, a stężenie gazu mierzone jest elektrooptycznie przez jego absorpcję określonej długości fali w podczerwieni.



Rys. 4. Budowa analizatora NDIR [9].

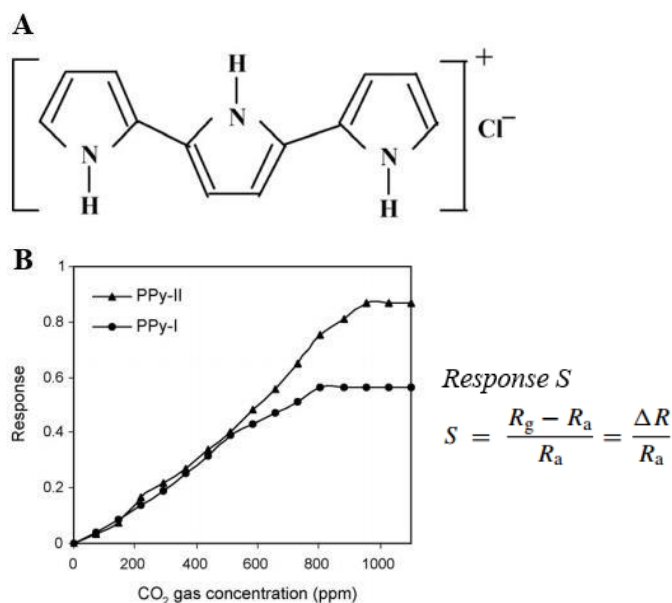
Promieniowanie podczerwone kierowane jest do czujnika NDIR przez komorę pomiarową w stronę detektora. Przed detektorem umieszczony jest filtr optyczny, eliminujący całe promieniowanie, z wyjątkiem długości fal, które mogą być zaabsorbowane przez określone cząsteczki gazów. Pozostałe cząsteczki nie absorbują promieniowania przy określonych długościach fal, dzięki czemu nie wpływają one na wynik uzyskiwany przez detektor. Sygnał IR pochodzący ze źródła promieniowania jest zwykle zmieniony w taki sposób, aby

temperaturowy wpływ otoczenia był oddzielony od żądanego sygnału badanego. Intensywność promieniowania podczerwonego, które pada na detektor NDIR jest odwrotnie proporcjonalny do stężenia badanego gazu w komorze pomiarowej. Wraz ze wzrostem stężenia próbki, intensywność promieniowania IR padająca na detektor będzie maleć. Powyższą zależność pomiędzy opisuje prawo Lamberta-Beera:

$$I = I_0 e^{-\epsilon c l}$$

gdzie  $I$  jest natężeniem światła po przejściu przez próbkę,  $I_0$  jest natężeniem światła padającego na próbkę,  $l$  jest drogą pokonaną przez światło w próbce,  $\epsilon$  nazywamy molowym współczynnikiem absorpcji, a  $c$  jest stężeniem molowym molekuł absorbujących w próbce.

Nowoczesnym rozwiązaniem detekcji ditlenku węgla stają się sensory elektrochemiczne, zarówno na bazie tlenków metali jak i polimerów. Przykładem może być czujnik zbudowany z polipirolu (PPy) domieszkowanego jonami chlorkowymi. Zasada działania sensora opiera się na pomiarze zmian rezystancji elektrycznej (dokładniej spadku przewodnictwa) płytek polimerowych w wyniku oddziaływań elektronu z łańcucha polimerowego a wolnymi parami elektronów z cząsteczki CO<sub>2</sub>. Proces adsorpcji CO<sub>2</sub> na powierzchni PPy jest odwracalny. Ze względu na wysokie przewodnictwo polipirolu sensor elektrochemiczny może pracować w różnych warunkach stężeń CO<sub>2</sub> czy w różnych temperaturach, zachowując jednocześnie wysoką czułość detekcji (Waghuley i współpracownicy opracowali sensor o czułości 139.3·10<sup>6</sup> Ω/ppm CO<sub>2</sub> [10]).



Rys. 5. Struktura przewodzącego PPy (A) i wykres zależności odpowiedzi sensora w funkcji stężenia ditlenku węgla w temperaturze pokojowej (B) [10].



## VII. WYKONANIE ĆWICZENIA

### *Cel ćwiczenia*

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania instalacji do rozdziału mieszanin gazowych, na przykładzie rozdziału mieszaniny dwuskładnikowej (np. 20% CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>) do ditlenku węgla i wodoru. Do zadań należy uruchomienie instalacji i wykonanie pomiaru w określonych przez prowadzącego warunkach oraz sporządzenie sprawozdania z przeprowadzonych badań.

### *Przebieg doświadczenia*

Przed przystąpieniem do badań, należy napełnić kolumnę adsorpcyjną (poj. ok 100 cm<sup>3</sup>) badanym sorbentem, a następnie do aparatury podłączyć pompę próżniową w celu oczyszczenia układu z resztek powietrza. Do tak przygotowanej aparatury należy wprowadzić od dołu kolumny wodór do ciśnienia atmosferycznego. Po operacjach przygotowawczych można przystąpić do właściwego procesu separacji CO<sub>2</sub> z mieszaniny gazowej.

Proces ten składa się z 6 operacji technologicznych:

I – **Napełnianie** kolumny adsorpcyjnej surowcem z szybkością 1000 ml/min do założonego ciśnienia adsorpcji (3, 5, 10 bar).

II – **Adsorpcja I**. Do kolumny od dołu dopływa surowiec, górą odbierany jest **Produkt 1**, wolny od CO<sub>2</sub>, z szybkością 1000 ml/min.

III – **Adsorpcja II**. Po przekroczeniu zakładanego stężenia CO<sub>2</sub> (2%, przebicie kolumny), w układzie jak w adsorpcji I dołem kolumny dalej podawany jest surowiec a górą odbierany **Produkt 2** do osiągnięcia stężenia CO<sub>2</sub> na poziomie surowca (20%).

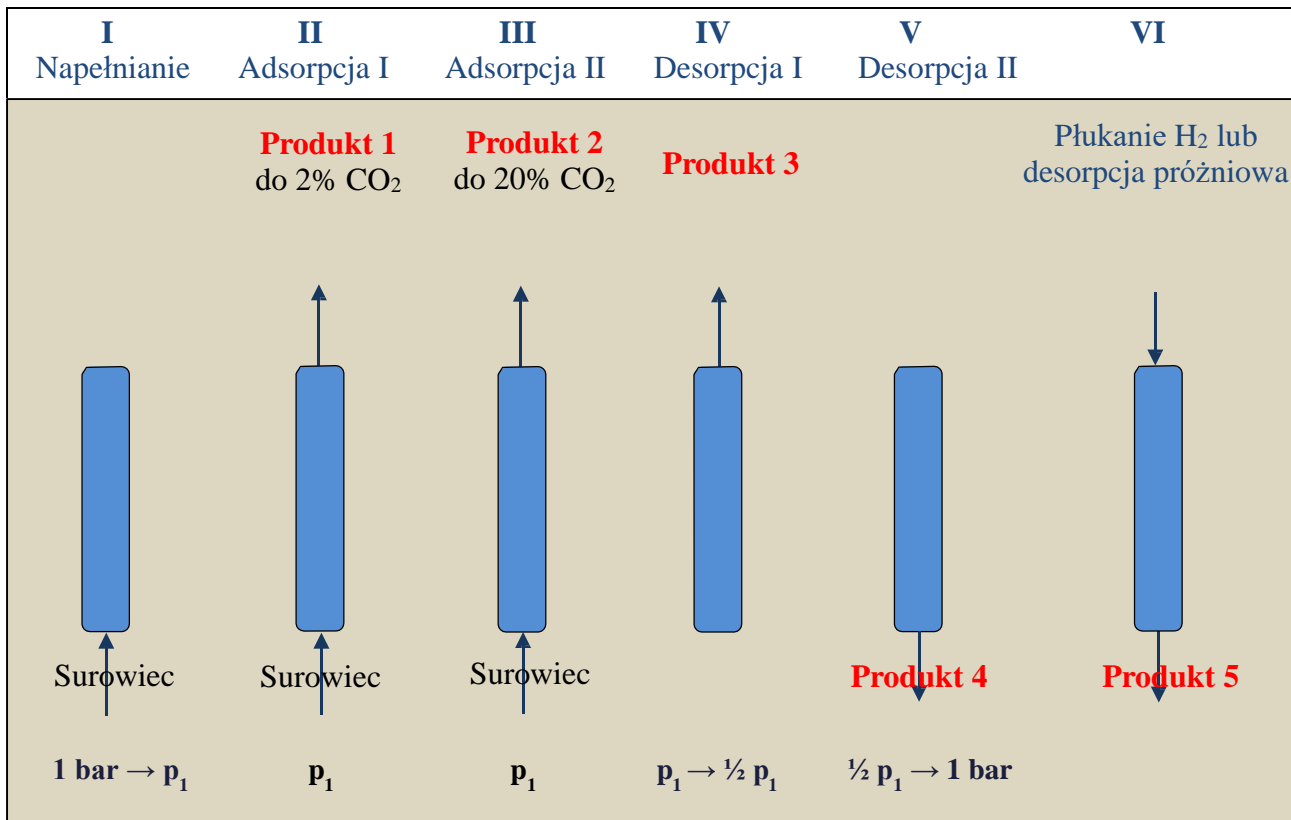
IV – **Desorpcja I**. Zamykany jest dopływ surowca do kolumny. Współprądowo odbierany jest górą kolumny **Produkt 3** z szybkością 1000 ml/min, do osiągnięcia ciśnienia w złożu adsorbenta równego ½ ciśnienia adsorpcji. Zakłada się, że **Produkt 2** i **Produkt 3** będą zawracane do strumienia surowca.

V – **Desorpcja II**. Odcinany jest wypływ strumienia gazów z górnej części kolumny. Otwierany jest zawór w dolnej części kolumny. Przeciwprądowo dołem kolumny wypływa **Produkt IV**, z szybkością 1000 ml/min, o stężeniu CO<sub>2</sub> zwykle > 50%. Ciśnienie w kolumnie spada do ciśnienia otoczenia. Produkt 4 może być zawracany do strumienia surowca lub poddawany zatężaniu. Zasadniczo operacje desorpcji I i II mają za zadanie usunięcie z przestrzeni międzyziarnowej adsorbenta nie zaadsorbowanych gazów o niskim stężeniu CO<sub>2</sub>.



VI– **Płukanie wodorem** lub **desorpcja próżniowa** lub **termiczna**. Operacje te mają na celu uzyskanie Produktu 5, który z założenia powinien być stężonym strumieniem CO<sub>2</sub> (co najmniej 90% docelowo).

Przebieg procesu separacji ditlenku węgla przedstawiono schematycznie na rys. 5.

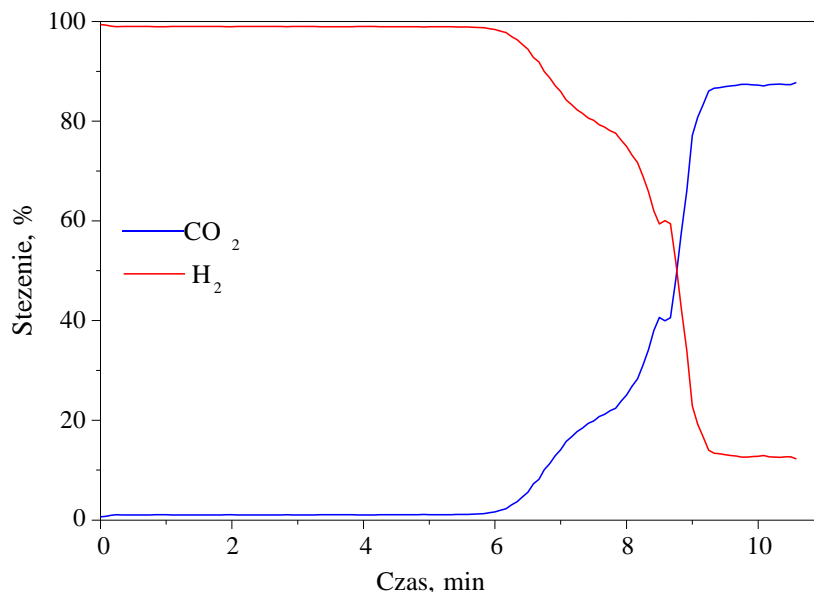


Rys. 5. Schemat procesu technologicznego separacji ditlenku węgla.

### VIII. SPRAWOZDANIE

#### *Opracowanie wyników*

Wyniki z aparatury otrzymujemy w formie wykresów zmiany stężeń składników gazu w poszczególnych etapach trwania procesu (rys. 4). Niebieskie linie obrazują zmiany stężenia ditlenku węgla, zaś czerwone zmiany stężenia wodoru w trakcie trwania procesu. Warto tutaj zwrócić uwagę na etap Adsorpcji 1 w którym otrzymujemy duże ilości praktycznie stuprocentowego wodoru oraz na etap desorpcji 3 pod obniżonym ciśnieniem w którym odzyskujemy ok. 90% CO<sub>2</sub>. Takie przedstawienie umożliwia przeprowadzenie bilansu materiałowego dla każdego składnika mieszaniny gazowej w danym etapie cyklu. Pola powierzchni pod krzywymi są proporcjonalne do ilości danego składnika.



Rys. 6. Przykładowy wykres zmiany stężeń składników gazu (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) w poszczególnych etapach trwania procesu.

W sprawozdaniu należy umieścić wykres obrazujący zmianę stężenia poszczególnych składników mieszaniny gazowej w czasie oraz obliczenia wydajności odzysku, jak i czystość otrzymanych produktów. Otrzymane wyniki należy podsumować odpowiednimi wnioskami.

## VIII. LITERATURA

- [1] Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council on the geological storage of carbon dioxide. [Dostęp elektroniczny: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0031&from=EN>]
- [2] J. Albo, P. Luis, A. Irabien, Carbon dioxide capture from flue gases using a cross-flow membrane contactor and the ionic liquid 1-ethyl-3-methylimidazolium ethylsulfate, *Industrial Engineering Chemistry Research* 49, 11045-11051, 2010.
- [3] A.L. Kohl, R.B. Nielsen, Gas dehydration and purification by adsorption w: *Gas Purification*, Chapter 12, 1022-1052, Elsevier, 1997.
- [4] Seung-Hyun Moon, Jae-Woon Shim, A novel process for CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> gas separation on activated carbon fibres – electric swing adsorption, *Journal of Colloid and Interface Science* 298, 523-528, 2006.
- [5] M.L. Paderewski, *Procesy adsorpcyjne w inżynierii chemicznej*, WNT, Warszawa 1999.
- [6] H. Marsh, F. Rodriguez-Reinoso, *Activated Carbons* 415- 417, Elsevier 2006.
- [7] Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects
- [8] NIST Standard Reference Database 69: *NIST Chemistry WebBook* [dostęp elektroniczny <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Type=IR-SPEC&Index=1>]
- [9] Informacja techniczna International Light Technologies. [Dostęp elektroniczny: <http://www.intl-lighttech.com/applications/light-sources/ndir-gas-sensor-lamps>]
- [10] S.A. Waghuley, S.M. Yenorkar, S.S. Yawale, S.P. Yawale, Application of chemically synthesized conducting polymer-polypyrrole as a carbon dioxide gas sensor. *Sensors and Actuators B* 128, 366-373, 2008