

USUWANIE I ODZYSKIWANIE LOTNYCH ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH Z GAZÓW ODLOTOWYCH W INSTALACJI ADSORPCYJNEJ TSA Z ZAMKNIĘTYM OBIEGIEM GAZU PODCZAS REGENERACJI

Bogdan AMBROŹEK

Politechnika Szczecińska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony
Środowiska, Al. Piastów 42, 71-065 Szczecin

e-mail: ambog@ps.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki analizy teoretycznej oraz badań doświadczalnych nad odzyskiwaniem lotnych związków organicznych z powietrza w cyklicznym układzie adsorpcyjnym TSA, w którym regeneracja prowadzona jest w obiegu zamkniętym. Cykl adsorpcyjny składał się z trzech etapów: adsorpcji związku organicznego ze strumienia chłodnego powietrza, desorpcji zaadsorbowanego związku przy użyciu ogrzanego strumienia azotu oraz chłodzenia złoża adsorbentu za pomocą strumienia chłodnego azotu. Badania wykonano dla dwóch związków organicznych: toluenu i izopropanolu. Jako adsorbent stosowano węgiel aktywny Sorbonorit 4.

1. Wstęp

Lotne związki organiczne (LZO) należą do najczęściej spotykanych zanieczyszczeń powietrza [1]. Jedną z najbardziej efektywnych i ekonomicznych metod ich usuwania jest adsorpcja, połączona z odzyskiwaniem związku organicznego lub jego spalaniem [2]. Najczęściej adsorpcja realizowana jest metodą zmiennno-temperaturową (TSA). Typowy układ TSA zawiera dwie kolumny adsorpcyjne z nieruchomym złożem adsorbentu. Jako adsorbent używany jest najczęściej węgiel aktywny [1]. Regeneracja adsorbentu wykonywana jest w większości przypadków przy użyciu pary wodnej [3]. Zastosowanie pary wodnej do desorpcji wiąże się często z kilkoma niedogodnościami. Produkty desorpcji, w przypadku związków organicznych rozpuszczalnych w wodzie, muszą być rozdzielane, np. metodą destylacji. Poważnym problemem są również ścieki powstające podczas desorpcji. Z tego powodu w ostatnich latach obserwuje się duże zainteresowanie innymi metodami regeneracji, takimi jak metody elektrotermiczne oraz regeneracja za pomocą ogrzanego gazu inerteznego [4].

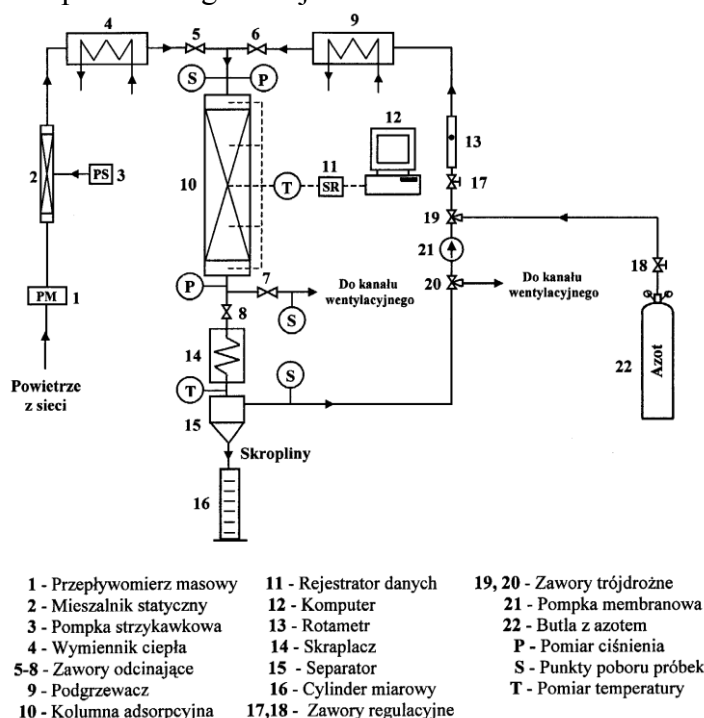
Celem niniejszej pracy było wykonanie badań doświadczalnych oraz analizy teoretycznej odzyskiwania lotnych związków organicznych w cyklicznym układzie TSA z nieruchomym złożem adsorbentu, w którym regenerację złoża wykonuje się za pomocą gazu inerteznego. Pełny cykl pracy kolumny adsorpcyjnej składał się z trzech etapów: adsorpcji związku organicznego ze strumienia powietrza, desorpcji związku organicznego za pomocą ogrzanego strumienia azotu oraz chłodzenia złoża przy użyciu strumienia chłodnego azotu. Desorpcja i chłodzenie realizowane były przy zamkniętym obiegu azotu. Związki organiczne odzyskiwane były w postaci skroplin w wyniku ochłodzenia gazu po desorpcji. Porównano przebieg desorpcji przy zamkniętym i otwartym przepływie gazu. Pomimo dość znacznej liczby prac opublikowanych w dostępnej literaturze na temat cyklicznych procesów TSA, brak jest prac na temat układów z zamkniętym obiegiem gazu podczas regeneracji.

2. Model matematyczny

Analizę teoretyczną badanego cyklicznego układu TSA przeprowadzono stosując model matematyczny uwzględniający wymianę ciepła przez ściankę kolumny adsorpcyjnej oraz opory transportu ciepła i masy. Model stanowi układ równań różniczkowych cząstkowych bilansu energii oraz bilansu masy dla złoża i ziarna adsorbentu. Do opisu kinetyki adsorpcji zastosowano model liniowej siły napędowej (LDF). Rozwiązania modelu uzyskiwano metodą linii. Szczegółowy opis modelu zamieszczono w pracy [4].

3. Aparatura doświadczalna

Badania doświadczalne wykonano za pomocą laboratoryjnej instalacji TSA przedstawionej na rys. 1. Umożliwia on wykonanie badań zarówno przy zamkniętym jak i przy otwartym przepływie gazu w procesie regeneracji.



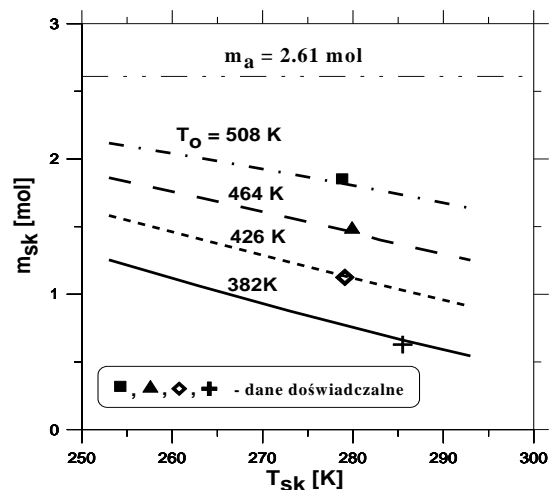
Rys. 1. Schemat aparatury doświadczalnej

Podstawowym elementem instalacji była stalowa kolumna adsorpcyjna (10) o średnicy wewnętrznej 0,048 m i wysokości 1,0 m. Wysokość złoża węgla aktywnego w kolumnie wynosiła 0,8 m. Kolumna była zaizolowana warstwą wełny mineralnej o grubości 0,04 m. W złożu umieszczono termopary typu J, które były podłączone do rejestratora danych (11). Pełny cykl adsorpcyjny składał się z trzech etapów: adsorpcji, desorpcji i chłodzenia. Jako gaz nośny w czasie adsorpcji stosowano powietrze. Gęstość strumienia powietrza wynosiła $13,1 \text{ mol}/(\text{m}^2\text{s})$. Związek organiczny dozowany był do strumienia powietrza za pomocą pompki strzykawkowej (3). Poprzez odpowiedni dobór prędkości powietrza i prędkości dozowania związku organicznego uzyskiwano wymaganą wartość jego stężenia w powietrzu doprowadzonym do kolumny adsorpcyjnej. Zanieczyszczone powietrze doprowadzone było do kolumny adsorpcyjnej od góry. Oczyszczone powietrze odprowadzone było do kanału wentylacyjnego. W czasie adsorpcji mierzono stężenie adsorbowanego składnika w fazie gazowej na wlocie i na wylocie z kolumny. Pomiary stężenia wykonywane były metodą chromatograficzną. Adsorpcję prowadzono do chwili całkowitego nasycenia złoża. Po zakończeniu ad-

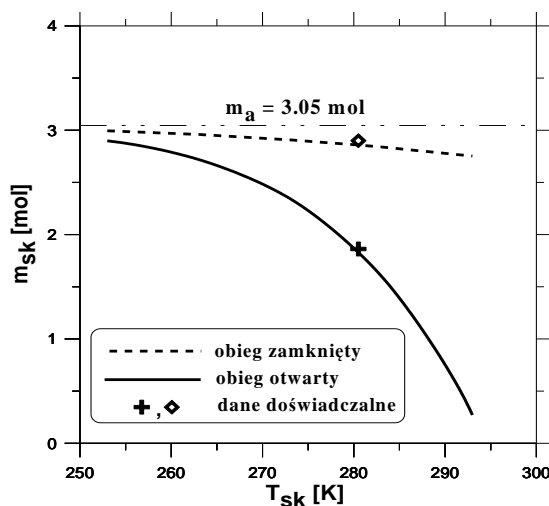
sorpcji adsorbent w kolumnie adsorpcyjnej poddawano regeneracji. Pierwszym etapem regeneracji była desorpcja, którą prowadzono za pomocą strumienia ogrzanego azotu w obiegu zamkniętym lub otwartym. Podczas desorpcji kierunek przepływu azotu w kolumnie adsorpcyjnej był identyczny z kierunkiem przepływu powietrza w czasie adsorpcji. W początkowym etapie desorpcji kolumnę adsorpcyjną przemywano strumieniem chłodnego azotu. Następnie zamykano obieg gazu poprzez odpowiednie ustawienie zaworów trójdrożnych (19, 20). Przepływ gazu wymuszono za pomocą pompki membranowej (21). Prędkość przepływu azotu mierzono za pomocą rotametu (13) i regulowano za pomocą zaworu (17). W czasie desorpcji azot przepływał przez podgrzewacz (9), kolumnę adsorpcyjną (10), skraplacz (14). Gaz opuszczający skraplacz kierowany był ponownie do podgrzewacza i kolumny adsorpcyjnej. Zdesorbowany związek organiczny oddzielono od gazu po desorpcji na drodze wykrapiania. Do chłodzenia gazu stosowano mieszaninę wody destylowanej i lodu. W czasie desorpcji mierzono objętość skroplin, stężenie związku organicznego na wylocie ze skraplacza oraz rejestrowano temperaturę złoża na różnych wysokościach oraz temperaturę gazu na wlocie i wylocie ze złoża. Podczas desorpcji w obiegu otwartym azot przepływał przez zawór trójdrożny (19), zawór regulacyjny (17), rotamet (13), podgrzewacz (9), kolumnę adsorpcyjną (10) i skraplacz (14) i następnie kierowany był do kanału wentylacyjnego. Po zakończeniu desorpcji przeprowadzano chłodzenie za pomocą strumienia azotu w obiegu zamkniętym lub otwartym. W momencie rozpoczęcia chłodzenia wyłączano grzałki w podgrzewaczu. Chłodzenie prowadzono do chwili, gdy temperatura gazu na wylocie ze złoża obniżyła się do wartości 300K. Gęstość strumienia azotu w etapie desorpcji i chłodzenia wynosiła $9,9 \text{ mol}/(\text{m}^2\text{s})$.

4. Omówienie wyników badań

W pracy zamieszczono przykładowe wyniki badań dla dwóch związków organicznych: toluenu i izopropanolu. Jako adsorbent wybrano węgiel aktywny Sorbonorit 4. Na rys. 2 przedstawiono zależność masy odzyskanego w postaci skroplin toluenu m_{sk} od temperatury gazu przemywającego na wlocie do złoża T_o i na wylocie ze skraplacza T_{sk} w etapie desorpcji. Zamieszczone wyniki uzyskano zakładając, że desorpcja prowadzona jest w obiegu zamkniętym. Stężenie toluenu w oczyszczanym powietrzu wynosiło $y = 0,344 \cdot 10^{-2} \text{ mol/mol}$. Wyniki obliczeń porównano z danymi uzyskanymi na drodze doświadczalnej. Na rys. 3 porównano wyniki obliczeń i doświadczeń uzyskane dla różnych sposobów prowadzenia etapów desorpcji: dla desorpcji w obiegu zamkniętym i dla desorpcji w obiegu otwartym. Rysunek przedstawia zależność masy odzyskanego w postaci skroplin izopropanolu od temperatury gazu na wylocie ze skraplacza, dla temperatury gazu przemywającego na wlocie do złoża wynoszącej 499 K. Stężenie izopropanolu w oczyszczanym powietrzu wynosiło $y = 0,257 \cdot 10^{-2} \text{ mol/mol}$. Większą masę skroplin otrzymano prowadząc etap desorpcji przy zamkniętym obiegu gazu. W układzie TSA z zamkniętym obiegiem gazu masa odzyskanego w etapie desorpcji związku organicznego w znacznie mniejszym stopniu zależna jest od temperatury gazu na wylocie ze skraplacza niż w układzie z otwartym przepływem gazu. W układzie z zamkniętym obiegiem gazu możliwe jest odzyskiwanie związku organicznego z dużą wydajnością, nawet po ochłodzeniu gazu po desorpcji do temperatury jedynie nieco niższej od temperatury otoczenia. Odzyskiwanie lotnych związków organicznych przy otwartym przepływie gazu podczas regeneracji wymaga ochłodzenia gazu po desorpcji do niskich temperatur, znacznie niższych od temperatury 273 K. Wyniki obliczeń i badań doświadczalnych wskazują na to, że zastosowany model matematyczny pozwala na przewidywanie ilości odzyskanego w postaci skroplin związku organicznego.



Rys. 2. Wyniki symulacji i badań doświadczalnych nad odzyskiwaniem toluenu przy zamkniętym przepływie gazu w czasie regeneracji (m_a - masa adsorbentu zaadsorbowanego w złożu, mol)



Rys. 3. Porównanie wyników symulacji i badań doświadczalnych nad odzyskiwaniem izopropanolu przy zamkniętym i otwartym przepływie gazu w czasie regeneracji

5. Podsumowanie

Wyniki obliczeń i badań doświadczalnych wskazują na możliwość odzyskiwania badanych związków organicznych w układzie TSA z nieruchomym złożem węgla aktywnego. Etap desorpcji korzystnie jest prowadzić przy zamkniętym obiegu gazu. Przy takim sposobie prowadzenia procesu możliwe jest odzyskiwanie związku organicznego z powietrza z dużą wydajnością, nawet przy temperaturach skraplacza zbliżonych do temperatury otoczenia.

Literatura

1. Khan F.I., Ghoshal A.Kr.: Removal of volatile organic compounds from polluted air. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2000, vol.13, 527-545.
2. Bathen D., Breitbach M.: Adsorptionstechnik. Springer, Berlin 2001.
3. Smallwood I.: Solvent Recovery Handbook. Blackwell Science, Oxford 2002.
4. Ambroźek B.: Theoretical and experimental studies of toluene recovery from waste air in a cyclic TSA system with a fixed bed of polymeric adsorbent. Chem.Proc.Eng., 2007, vol. 28, 879-890.