Rozprawa doktorska pt.: „Analiza teoretyczno-doświadczalna procesu regeneracji węgli aktywnych metodą ogrzewania rezystancyjnego w cyklicznych układach adsorpcyjnych”

mgr inż. Krzysztof Kowalski

Streszczenie

Ze względu na rosnącą świadomość społeczeństwa w zakresie szkodliwości lotnych związków organicznych, wprowadzane są coraz bardziej rygorystyczne normy jakości powietrza, co zwiększa zapotrzebowanie na urządzenia do ograniczania ich emisji. Najczęściej stosowaną techniką oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń gazowych jest adsorpcja. Proces adsorpcji prowadzi się zwykle w kolumnach z nieruchomym złożem adsorbentu, które pracują w cyklicznych systemach adsorpcyjno-desorpcyjnych TSA (termiczna adsorpcja zmienno-temperaturowa). Niniejsza praca koncentruje się na analizie etapu regeneracji złoża metodą ogrzewania elektrotermicznego i składa się z trzech głównych części: przeglądu piśmiennictwa, doświadczalnej oraz obliczeniowej.

W części literaturowej przedstawiono podział metod regeneracji termicznej ze względu na sposób dostarczania ciepła do złoża adsorbentu. Ogrzewanie metodami klasycznymi – przy użyciu pary wodnej lub gorącego inertu – jest procesem czaso- i energochłonnym. Innym sposobem przywrócenia pierwotnej pojemności adsorpcyjnej złoża są metody elektrotermiczne. Warunkiem zastosowania metody jest zdolność adsorbentu do przewodzenia prądu elektrycznego. Wymagania te spełniają węgle aktywne. W pracy opisano proces elektrotermicznej adsorpcji zmiennotemperaturowej ETSA ze szczególnym uwzględnieniem metody bezpośredniego ogrzewania rezystancyjnego. W wariancie tym, ciepło niezbędne do zregenerowania adsorbentu nasyconego adsorbatem jest generowane podczas bezpośredniego przepływu prądu elektrycznego przez złoże. W dalszej części pracy przedstawiono obszary zastosowania procesu ETSA, które można podzielić ze względu na rodzaj stosowanego adsorbatu, adsorbentu lub konfigurację i skalę instalacji doświadczalnej. W opublikowanych pracach naukowych większość stanowią badania dotyczące usuwania LZO (66 %) i CO_2 (27%) z powietrza na tkaninowych (52 %), monolitycznych (23 %) i granulowanych węglach aktywnych (18 %). Z drugiej strony, analiza struktury światowego zużycia węgli aktywnych wskazuje, że zastosowanie znajdują głównie

granulowane węgle aktywne (49 %), dla których jak dotąd opublikowano niewiele badań dotyczących elektrotermicznej metody regeneracji.

Celem pracy była ocena możliwości i warunków wykorzystania metody rezystancyjnej bezpośredniej do regeneracji granulowanych węgli aktywnych nasycanych parami lotnych związków organicznych (LZO).

Część doświadczalna pracy przedstawia opis aparatury i metodyki badawczej oraz wyniki badań wstępnych prowadzonych na czystych adsorbentach węglowych i badań zasadniczych, gdzie adsorbent był nasycony parami LZO. W etapie badań wstępnych prowadzono pomiary kinetyki ogrzewania złoża metodą rezystancyjną bezpośrednia, w ramach których mierzono napięcie i natężenie prądu elektrycznego oraz temperatury na czterech wysokościach złoża. Badania prowadzono w kolumnie o średnicy 42 mm i wysokości złoża 16 cm. Jako adsorbent stosowano następujące granulowane węgle aktywne: BPL 4×6 (BPL), AP3-60 (AP3), RB3, Supersorbon K40 (SK40) w trakcie rezystancyjnego ogrzewania złoża. Analiza uzyskanych danych pozwoliła na wybór dwóch węgli SK40 i BPL, które najlepiej spełniają postawione kryteria selekcji adsorbentu. Węgiel SK40 charakteryzował się najniższą rezystancją i najszybszym czasem nagrzewania do temperatury zadanej. Węgiel BPL cechował się właściwościami elektrotermicznymi porównywalnymi do węgla AP3, jednak jego średnia temperatura podczas regeneracji była najwyższa spośród badanych adsorbentów. Następnie, na podstawie doświadczalnych równowag adsorpcji, dokonano oceny zdolności adsorpcyjnych wybranych adsorbentów do adsorpcji par izopropanolu (IPA) oraz 2-butanolu (2BUT). Izotermy adsorpcji wyznaczono za pomocą analizatora IGA-002 dla temperatur 20, 40, 60, 75, 100, 120 °C w zakresie prężności od 0 do 4000 Pa dla IPA oraz od 0 do 1700 Pa dla 2BUT. Otrzymane izotermy adsorpcji opisano za pomocą wielotemperaturowych modeli adsorpcji Sipsa, Totha, Dubinina-Raduszkiewicza (D-R) oraz niehomogenicznego modelu Dubinina-Astachowa (DA1+DA2). Dla układów SK40-IPA, SK40-2BUT, BPL-IPA najlepsze dopasowania uzyskano dla modelu DA1+DA2. Średnie błędy względne dopasowania wartości obliczonych do wartości doświadczalnych wynosiły odpowiednio 2,23; 2,07 i 3,82 %. Dla układu BPL-2BUT najlepsze dopasowanie dał model Sipsa, dla którego błąd względny wynosił 4,02 %.

Badania zasadnicze, obejmujące trzy serie pomiarowe, prowadzono w instalacji adsorpcyjnej ETSA. W serii A pomiary wykonywano w układzie SK40-IPA, w serii B w układzie SK40-2BUT, a w serii C w układzie BPL-2BUT. Badania prowadzono w sposób cykliczny, a każdy cykl składał się z etapu adsorpcji, regeneracji elektrotermicznej i chłodzenia złoża. Proces adsorpcji prowadzono w temperaturze otoczenia przy stałej wielkości strumienia powietrza zawierającego pary LZO o ustalonym stężeniu. Regenerację złoża prowadzono metodą rezystancyjną bezpośrednią przy stałym napięciu prądu elektrycznego, ustalonej temperaturze regulacyjnej i stałym strumieniu gazu wymywającego – azotu. W etapie chłodzenia stosowano azot o tym samym strumieniu jak podczas desorpcji. Badania prowadzono dla różnych wartości parametrów operacyjnych – napięcia i wielkości strumienia azotu. Wzrost napięcia spowodował polepszenie kinetyki ogrzewania złoża do zadanej temperatury, nie miał jednak wpływu jego temperaturę średnią. Wpływ zmiany wielkości strumienia azotu miał wpływ na temperaturę w pobliżu górnej elektrody. Dokonano analizy wpływu: rodzaju adsorbatu, jego stężenia w fazie stałej i struktury nasycenia złoża na efektywność regeneracji oraz efektywność energetyczną. Stwierdzono, że dla złoża w pełni nasyconego parami izopropanolu, początkowa wartość rezystancji jest wyższa niż rezystancja złoża zregenerowanego. Trend ten jest odwrotny w przypadku 2-butanolu. Wykazano również, że prowadzenie procesu adsorpcji do stanu pełnego nasycenia ma pozytywny wpływ na energochłonność procesu i zapobiega powstawaniu miejscowych przegrzań.

W dalszej części badań oceniono wpływ stosowania izolacji cieplnej kolumny w etapie regeneracji oraz wpływ sposobu prowadzenia procesu regeneracji, w której strumień azotu przepływa w kierunku zgodnym (współprąd) lub przeciwnym (przeciwprąd) do strumienia gazu w etapie adsorpcji. Badania doświadczalne pokazały, że korzystniejszym z punktu widzenia prowadzenia procesu regeneracji jest stosowanie strumienia azotu w tym samym kierunku przepływu jak powietrze w etapie adsorpcji. Zastosowanie izolacji skutkuje ograniczeniem strat ciepła do otoczenia.

W oparciu o wyniki badań kolumnowych dla układów SK40-IPA, KS40-2BUT i BPL-2BUT wyznaczono zależność oporności złoża od temperatury i stężenia adsorbatu w fazie stałej, która posłużyła do wykonania obliczeń modelowych wydajności wewnętrznego objętościowego źródła ciepła. Uzyskane wyniki obliczeń dały zadowalającą zgodność z

wartościami doświadczalnymi energii elektrycznej zużywanej w etapie desorpcji. Sporządzono również bilans ciepła i oszacowano strukturę zużycia energii elektrycznej.

W oparciu o uzyskane wyniki potwierdzono, że metoda rezystancyjna bezpośrednia może być wykorzystywana do desorpcji par lotnych związków organicznych ze złoża węgla aktywnego przy zachowaniu odpowiednich warunków procesowych.

Krzysztof Kowalski

30.06.2023