

DOROTA DOWNAROWICZ

Wydział Technologii i Inżynierii Chemicznej, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

# Ocena stopnia wykorzystania złoża węgla aktywnego w cyklicznym procesie ETSA

## Wprowadzenie

Instalacja adsorpcyjna procesu ETSA (*Electrothermal Temperature Swing Adsorption*) zbudowana jest z co najmniej dwóch adsorberów pracujących na przemian w trybie adsorpcji i regeneracji elektrotermicznej. W każdej z kolumn z nieruchomym złożem adsorbentu proces adsorpcji powinien być przerywany w momencie przebicia złoża, a więc gdy stężenie adsorptywu w oczyszczonym gazie osiągnie graniczną dopuszczalną wartość, wynikającą ze stopnia toksyczności związku chemicznego. Na ogół przyjmuje się, że jest to wartość 5% stężenia wlotowego adsorptywu. W kolumnie pozostaje więc warstwa niewykorzystanego adsorbentu, której wysokość zależy od wielkości strumienia oczyszczanego gazu, rodzaju i stężenia zawartych w nim związków chemicznych oraz od typu adsorbentu i wymiarów gabarytowych jego złoża. W etapie desorpcji do usuwania zaadsorbowanych składników zużywane jest ciepło *Joule'a*, wytworzone podczas bezpośredniego przepływu prądu elektrycznego przez złoża, które jest wewnętrznym źródłem ciepła [1].

W myśl prawa *Joule'a-Lenza* ilość wydzielonego ciepła  $Q$  w czasie procesu  $\tau_{des}$  jest proporcjonalna do rezystancji  $R$  ogrzewanego adsorbentu i kwadratu natężenia prądu elektrycznego  $I$

$$Q = \int_0^{\tau_{des}} P dt = \int_0^{\tau_{des}} I^2 R dt \quad (1)$$

Wartość rezystancji złoża  $R$  określa II prawo *Ohma*:

$$R = \rho \frac{H_c}{S} \quad (2)$$

gdzie:

- $\rho$  – oporność właściwa [ $\Omega m$ ],
- $S$  – pole poprzecznego przekroju [ $m^2$ ],
- $H_c$  – wysokość [ $m$ ].

Z powyższych równań wynika, że prowadząc proces przy stałym napięciu zasilającym ( $U < 40V$ ) o ilości generowanego ciepła *Joule'a* decydują właściwości odporowe adsorbentu oraz wymiary gabarytowe złoża. Z tych też powodów w instalacjach przemysłowych wysokość warstwy ziarnistego węgla aktywnego nie przekracza 60 cm. Proces ETSA zaliczany jest przez to do tzw. metod krótkiego złoża. Tak niska wysokość warstwy węgla aktywnego sprawia, że czas użytkowania adsorbentu w etapie adsorpcji może być nadzbyt krótki, aby zapewnić ciągłość procesu oczyszczania w instalacji ETSA.

## Metodyka i zakres wykonywanych badań

Badania obejmowały łącznie 20 cykli adsorpcyjnych procesu ETSA dla układu 2-propanol – węgiel aktywny *Sorbono-*

*rit* 4. Szczegółowy opis instalacji doświadczalnej przedstawiono w pracy [3]. Wysokość złoża adsorbentu wynosiła 0,27 m.

Podczas etapu adsorpcji prowadzono pomiary dynamiki adsorpcji w zakresie stężeń wlotowych adsorptywu  $C_o = 5-15 g/m^3$ . Każdorazowo etap adsorpcji przerywano, gdy stężenie adsorptywu w gazie wylotowym osiągnęło żadaną wartość stężenia względnego  $C/C_o$ . Desorpcję elektrotermiczną prowadzono w następujących zakresach parametrów regulacyjnych: temperatura 120–170°C, napięcie 30 V, strumień azotu 0,12–0,18 m<sup>3</sup>/h. Zastosowano współprądowy kierunek przepływu gazu w stosunku do adsorpcji. Etap desorpcji przerywano po czasie 5400 s.

## Omówienie wyników

W oparciu o pomiary dynamiki adsorpcji wyznaczono podstawowe parametry krzywych wyjścia stężenia na wysokości złoża  $H_c = 0,27 m$ . Dla każdej z krzywych określono czas przebicia złoża dla  $C/C_o = 5\%$ , czas stechiometryczny dla  $C/C_o = 50\%$  oraz szerokość strefy wymiany masy *MTZ* (*Mass Transfer Zone*) i wartości wskaźnika *TPR* (*Through Put Ratio*) zdefiniowanego jako [4]

$$TPR = \frac{t_{5\%}}{t_{50\%}} \quad (3)$$

oraz wskaźnika *LUB* (*Lenght of Unused Bed*) określającego wysokość warstwy niewykorzystanego adsorbentu w adsorbencie w momencie przebicia złoża [5]

$$LUB = \left(1 - \frac{t_{5\%}}{t_{50\%}}\right) H_c \quad (4)$$

W tablicy 1 zestawiono wyniki obliczeń uzyskane, dla tych cykli, w których etap adsorpcji prowadzono do wartości stężeń  $C/C_o$  przekraczających 50%. Wartości wskaźników *MTZ* oraz *TPR* wskazują na nieostrą strefy wymiany masy, która jest efektem nienajlepszej adsorpcji cząsteczek polarnego związku na niepolarnym węglu aktywnym. Przerwanie etapu adsorpcji w momencie przebicia złoża, jest przyczyną pozostawienia w nim nawet 9-centymetrowej warstwy czystego adsorbentu, o czym świadczą wartości wskaźnika *LUB*.

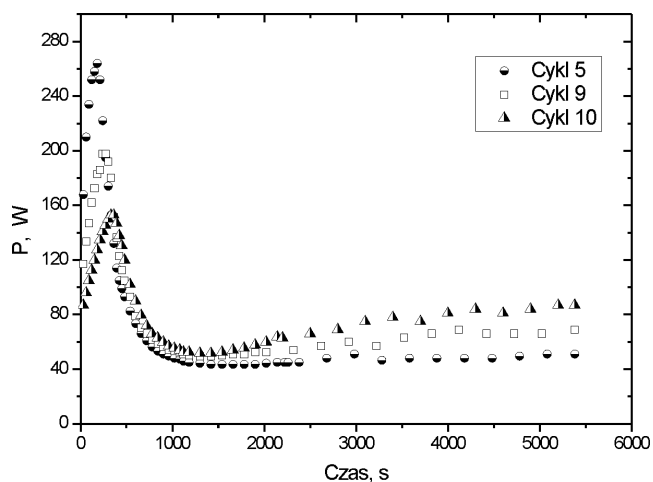
W etapie desorpcji elektrotermicznej złoża adsorbentu traktuje się jako układ połączonych szeregowo elementarnych warstw adsorbentu, które może cechować różna zawartość początkowa adsorbentu a przez to różna oporność właściwa. Ponieważ całkowita rezystancja złoża jest sumą oporności wszystkich jego warstw, stąd też niejednorodna struktura nasycenia adsorbentu ma znaczący wpływ na efektywność generacji ciepła *Joule'a*. Miara ilości wytworzonego ciepła jest pole pod krzywą zależności mocy grzejnej  $P$  od czasu (Rys. 2). Na

Tablica 1  
Parametry adsorpcji w procesie ETSA dla wybranych cykli pomiarowych

Nr cyklu	Prędkość pozorna [m/s]	$C_o$ [g/m <sup>3</sup> ]	TPR [-]	MTZ [m]	LUB [m]	Czas przebiecia [min]	
						$t_{5\%}$	$t_{50\%}$
3	0,24	13,6	0,678	0,148	0,087	110,6	163,1
5	0,24	14,0	0,685		0,086	109,5	160,0
6	0,24	13,5	0,686		0,085	129,1	188,2
7	0,23	10,0	0,714	0,138	0,077	177,6	248,8
19	0,25	9,2	0,691	0,149	0,083	159,2	230,3
20	0,25	5,9	0,698	0,121	0,082	247,4	354,3

rysunku przedstawiono wyniki dla trzech wybranych cykli, w których stosowano jednakowe parametry regulacyjne desorpcji. W etapie adsorpcji stosowano to samo stężenie adsorptywu, ale w różnym momencie przerwano ten proces, tj., gdy stężenie względne  $C/C_o$  wyniosło 85% (cykl 5), 25% (cykl 9) i 8% (cykl 10).

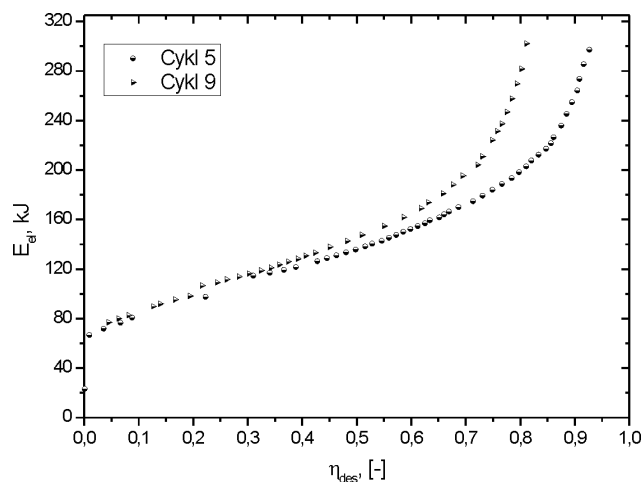
Układ krzywych na rys. 1 wskazuje, że w początkowej fazie desorpcji ilość wytworzonej w złożu energii cieplnej zależy od struktury nasycenia węgla adsorbentem. Przykładowo dla cyklu 10 maksymalna wartość mocy grzejnej wynosiła 150 W i była o niemal 60% mniejsza niż w cyklu 5, w którym moc maksymalna wynosiła 260 W.



Rys. 1. Zależność mocy grzejnej od czasu desorpcji dla różnych stopni nasycenia złoża

Na rys. 2 przedstawiono zależność ilości pobranej energii elektrycznej  $E_{el}$  od stopnia desorpcji  $\eta_{des}$  zdefiniowanego jako iloraz masy desorbentu do masy zaadsorbowanej substancji w jednym cyklu procesu ETSA. Jak wynika z analizy danych przed rozpoczęciem właściwej desorpcji 2-propanolu należy doprowadzić około 70 kJ energii aby ogrzać wstępnie złoże.

Sprawność końcowa desorpcji, w przypadku cyklu 5 prowadzonego do pełnego nasycenia złoża jest o ponad 10% większa niż dla cyklu 9, w którym adsorpcję zakończono, w momencie,



Rys. 2. Zależność ilości pobranej energii elektrycznej od stopnia desorpcji

gdy stężenie  $C/C_o$  było równe 25%. Oznacza to, że im bardziej jednorodna jest struktura nasycenia złoża adsorbentem po etapie adsorpcji tym mniejszą ilość energii potrzeba do desorpcji tej samej ilości 2-propanolu.

### Podsumowanie

O efektywności etapu desorpcji decydują nie tylko zastosowane parametry procesowe, ale także struktura nasycenia złoża po etapie adsorpcji. Jak wynika z pomiarów dynamiki adsorpcji wysokość warstwy niewykorzystanego adsorbentu w momencie przebiecia złoża wynosi około 7 cm, co stanowi ponad 30% jego całkowitej wysokości. Tak duża warstwa nieczynnego adsorbentnie węgla aktywnego wpływa znacząco na wydajność wewnętrznego źródła ciepła w etapie desorpcji. Jeżeli w złożu występuje strefa LUB to sprawność desorpcji i jego efektywność energetyczna ulega pogorszeniu. Mniej jednorodny jest też rozkład temperatury w złożu w obszarze elektrody dolnej, w którym zlokalizowana jest ta strefa. Jest to efekt wyższej oporności właściwej tej warstwy w stosunku do pozostałego adsorbentu nasyczonego 2-propanolem, przez co inaczej generuje się ciepło *Joule'a*. Temperatura tej warstwy jest nawet o 50°C większa w stosunku do pozostałych.

### LITERATURA:

1. D. Downarowicz, E. Gabryś: Przem. Chem., **87**, 768 (2008).
2. J. Nastaj, D. Downarowicz: Int. Commun. in Heat and Mass Transfer, **32**, 779 (2005).
3. D. Downarowicz, J. Nastaj: Inż. Ap. Chem., **42**, nr 4s, 280, (2003).
4. P. Sullivan, M. Rood, G. Grevillot, J. Wander: Environ. Sci. Technol. **38**, 4865 (2004).
5. A. Kohl, R. Nielsen: Gas Purification, Houston, Texas, Gulf Publishing Company 1997.

**Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy własny nr N N208 2151 33.**