

PENJERAPAN *p*-KHLOROFENOL DALAM AIR LIMBAH DENGAN ZEOLIT (*Adsorption of p-Chlorophenol from Wastewater using Zeolite*)

Sarto, Siti Syamsiah, dan Andreas Didit Herdito
Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada,
Sekip Utara, Yogyakarta 55281
E-mail : sarto@chemeng.ugm.ac.id

Diterima: 22 Maret 2007

Disetujui: 4 Mei 2007

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kemampuan zeolit untuk menyerap *p*-klorofenol dari limbah cair secara batch, pada suhu 30 °C dan tekanan 1 atmosfer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses penyerapan mengikuti persamaan Freundlich dan bersifat reversibel sebagian. Nisbah kinerja desorpsi dan penyerapan adalah antara 31,85 % dan 49,36 %. Kemampuan zeolit untuk menyerap *p*-klorofenol meningkat dengan semakin rendahnya pH. Pada nilai pH 3,92, berat zeolit 30 g, dan konsentrasi awal *p*-klorofenol 97,302 mg/L. Adapun jumlah *p*-klorofenol yang terjerap adalah sebesar 8,319 mg/L.

Kata kunci : penyerapan, *p*-klorofenol, zeolit

Abstract

The aim of this research is to study the characteristics of zeolit to adsorb p-chlorophenol from wastewater in a batch reactor at 30 °C and atmospheric conditions. The experimental results show that the adsorption process is partially reversible and fits with Freundlich Equation. The ratio of desorption and adsorption performance is between 31.85 % and 49.36 %. The performance of zeolit to adsorb p-chlorophenol increases with decreasing pH. At pH about 3.92, using 30 g zeolit and 97.302 mg p-chlorophenol/L. The concentration of adsorbed p-chlorophenol is about 8.319 mg/L.

Keywords : adsorption, p-chlorophenol, zeolite

PENDAHULUAN

Salah satu masalah yang dihadapi pada kegiatan industri migas dan panas bumi ialah mengenai pengolahan limbah yang dihasilkan. Salah satu komponen limbah cair kegiatan tersebut adalah senyawa fenol dan turunannya. Keberadaan senyawa-senyawa tersebut di lingkungan menimbulkan masalah yang serius karena sifat toksik yang dimilikinya dan sulit terdegradasi.

Berbagai macam usaha telah dilakukan untuk mengurangi konsentrasi senyawa-senyawa tersebut antara lain dengan cara ekstraksi, oksidasi kimia, penyerapan, reaksi enzimatik, dan proses biologi (Metcalf dkk., 2003). Penyerapan kadar senyawa-senyawa tersebut dengan karbon aktif telah dibahas secara rinci oleh Metcalf dkk. (2003).

Di Indonesia, zeolit ditemukan pada tahun 1985 oleh PPTM Bandung dalam jumlah besar diantaranya tersebar di beberapa daerah pulau

Sumatra dan Jawa. Akan tetapi pemanfaatannya masih belum banyak diketahui secara luas, dan masih dipasarkan masih dalam bentuk alami (Las, 1991). Katalisis adalah satu dari bidang pemanfaatan zeolit yang paling penting. Akan tetapi, zeolit juga digunakan sebagai penukar ion, pengolahan limbah radiokatif, sebagai adsorben, dan pemisahan beberapa senyawa (Weitkamp, 2000). Penelitian ini dimaksudkan untuk mempelajari karakteristik penjerapan p-klorofenol dengan menggunakan zeolit.

Penjerapan adalah proses akumulasi suatu zat pada bidang batas (interface) di antara dua fase. Penjerapan pada padatan telah banyak diterapkan dalam berbagai permasalahan lingkungan. Ini disebabkan karena kemampuannya dalam menghilangkan polutan dari suatu cairan ataupun gas. Tingginya tingkat kemurnian yang dapat diperoleh membuat proses ini sering digunakan pada bagian akhir suatu proses pengolahan di industri (Noll dkk., 1992).

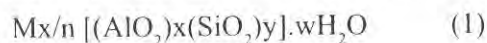
Penjerapan terbagi menjadi dua macam, yaitu physical adsorption (penjerapan fisika) dan chemisorption (penjerapan kimia). Physical adsorption atau Van Der Waals adsorption, yaitu penjerapan yang terjadi karena adanya gaya tarik-menarik intermolekuler antara molekul padatan dengan material yang terpenjerapan (Noll dkk., 1992). Adapun chemisorption atau penjerapan teraktifkan, yaitu penjerapan yang terjadi karena adanya interaksi proses kimia antara padatan dengan material terjerap. Penjerapan kimia bersifat irreversible dengan panas reaksi cukup besar, dan mempunyai order sebagaimana pada panas reaksi (Treyball, 1981). Karena sulitnya membedakan antara penjerapan fisika dan penjerapan kimia, maka istilah sorpsi sering digunakan sebagai pengganti keduanya. Proses penjerapan terjadi dalam beberapa langkah, langkah paling lambat adalah diidentifikasi sebagai langkah pembatas lajunya. Secara umum, laju penjerapan fisika ditentukan oleh langkah pindah difusinya, sedangkan laju penjerapan kimia sangat dipengaruhi oleh langkah penjerapan (Metcalf dkk., 2003).

Proses penjerapan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis adsorbat, kara-

teristik adsorben, waktu, suhu, dan pH. Telah dilaporkan bahwa jumlah fenol yang terjerap pada zeolit semakin banyak dengan semakin besarnya berat zeolit yang digunakan (Yuliana, 1998). Dalam kegiatan industri migas dan panas bumi, keberadaan senyawa fenol dan turunannya memberikan kontribusi yang besar pada komposisi air buangan yang dihasilkan oleh berbagai proses produksi antara lain catalytic cracking, hydrocracking, crude distillation, crude oil and product storage, dan lain-lain (Martopo, 1985).

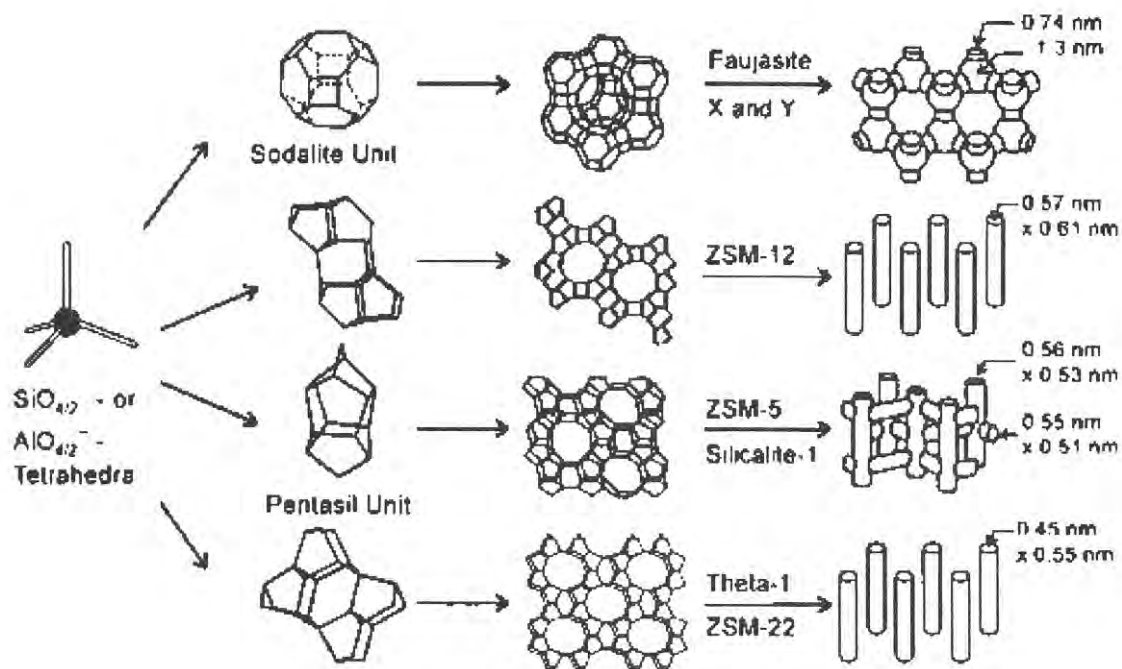
Baku mutu air limbah untuk parameter fenol dan turunannya pada kegiatan minyak dan gas bumi berkisar antara 0,5 mg/L hingga 2 mg/L (Meneg, KLH, 1996). Senyawa fenol terkhlorinasi pada umumnya bersifat racun, dan bersifat lebih stabil di alam dibandingkan dengan fenol. Semakin banyak jumlah khlor yang terdapat dalam senyawa ini, kecepatan dekomposisinya semakin berkurang dan sifat toksiknya semakin bertambah (Kirk dan Othmer, 1990a).

Zeolit merupakan mineral yang terdiri dari kristal alumino silikat terhidrasi yang mengandung kation alkali atau alkali tanah dalam kerangka tiga dimensi. Ion-ion logam tersebut dapat diganti oleh kation lain tanpa merusak struktur zeolit dan dapat menyerap air secara reversibel (Weitkamp, 2000). Struktur kerangka zeolit dibangun oleh rangkaian tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 yang merupakan unit bangun primer zeolit. Kerangka tetrahedra ini saling berkaitan pada atom oksigennya membentuk satuan bangun sekunder. Rumus struktur zeolit berdasarkan unit sel kristal atau unit struktur terkecil, dapat dinyatakan sebagai berikut.



Dengan n, w, dan x berturut-turut adalah valensi kation M, jumlah molekul air per unit sel, dan jumlah tetrahedra per unit sel. Adapun y/x biasanya bernilai 1-5 (Weitkamp, 2000).

Zeolit tidak dapat diidentifikasi hanya berdasarkan analisis komposisi kimianya saja, melainkan harus dianalisis strukturnya juga. Gambar 1 menunjukkan struktur 4 macam



Gambar 1. Struktur 4 macam zeolit (contoh) dengan sistem dan dimensi mikroporinya

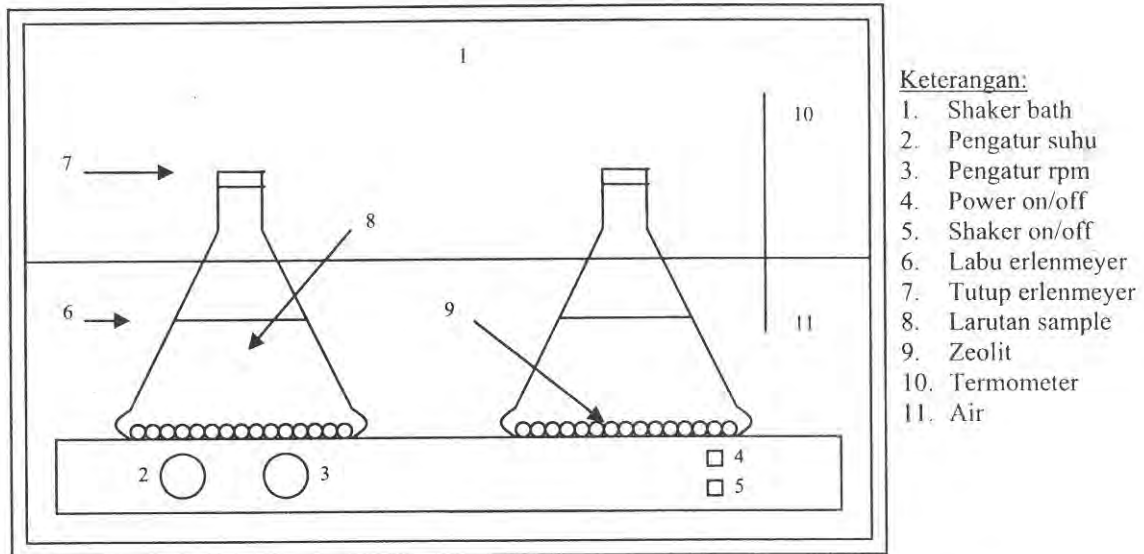
zeolit dengan sistem dan dimensi mikroporinya (Weitkamp, 2000). Pada kerangka zeolit juga terdapat saluran dan mikropori yang saling berhubungan dan terisi oleh kation dan molekul air (Kirk dan Othmer, 1990b).

Permukaan zeolit mengandung gugus asam yang dapat memberikan sifat keasaman zeolit, yaitu asam Bronsted (proton) dan asam Lewis (kation) dengan oksigen pada kerangka aluminosilikat (Bonnevot dan Kaliaguine, 1995).

Zeolit mampu menyerap atau menolak molekul secara selektif berdasarkan atas perbedaan ukuran, bentuk, dan polaritas molekul. Karakteristik kemampuan penjerapan oleh zeolit dapat dimodifikasi sedemikian rupa antara lain dengan cara pertukaran kation, dekationisasi, penjerapan awal molekul yang sangat polar, *pore-closure effect*, dealuminasi, dan peningkatan rasio Si-Al (Weitkamp, 2000). Dealuminasi pada zeolit dengan cara penambahan asam dapat meningkatkan rasio $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ dan menyebabkan zeolit menjadi hydro-

phobic sehingga mampu untuk memisahkan senyawa organik yang hidropob dari air (Kirk dan Othmer, 1990).

Zeolit telah digunakan secara luas dalam bidang industri, lingkungan, dan pertanian (Las, 1991; Las, 1994; dan Las, 1995). Kegunaan zeolit di dalam industri antara lain untuk pengemban katalis, drying gas dan cairan, pemurnian gas, deaktivasi limbah radioaktif, filtrasi air minum, pemurnian limbah, ekstraksi logam pada limbah industri, dan lain-lain (Tsitsishvili dkk., 1992). Karena begitu luasnya penggunaan zeolit, banyak usaha dilakukan untuk meningkatkan kapasitas zeolit baik melalui proses pemurnian maupun dengan memproduksi suatu struktur ideal dalam bentuk membran zeolit (Chiang dan Chao, 2001). Disamping itu, usaha mensintesis zeolitpun sudah mulai banyak dilakukan, misalnya sintesa zeolit dari abu terbang (Queral dkk., 2002). Untuk lebih meningkatkan penggunaan zeolit sebagai adsorben, karakterisasi zeolit sebagai adsorben *p*-klorofenol perlu dipelajari.



Gambar 2. Rangkaian alat penjerapan *p*-klorofenol pada zeolit

METODE PENELITIAN

Bahan Penelitian

Bahan utama penelitian adalah *p*-klorofenol dan zeolit. *P*-klorofenol berupa padatan kristal berwarna putih dengan kemurnian 99,9 % dan berat molekul 128,56 g/gmol. Zeolit yang dipakai merupakan zeolit alam lokal yang sudah diaktifkan dan diperoleh dari Industri Zeolit di Yogyakarta, dengan kandungan mineral zeolit adalah modernit 50 % dan klinoptilolit 30 %. Bahan lain yang digunakan adalah air suling, natrium fosfat monobasis, natrium fosfat dibasis, asam borat, dan boraks.

Alat Penelitian

Alat penelitian terdiri dari shaker bath, labu erlemeyer, dan termometer yang dirangkai sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.

Prosedur

Mula-mula dibuat larutan induk *p*-klorofenol dengan konsentrasi 1000 mg/L. Larutan kerja masing-masing sebanyak 200 mL dengan konsentrasi awal *p*-klorofenol yang bervariasi dibuat dengan cara mengencerkan larutan induk tersebut. Pengaturan pH dilakukan

dengan cara menggunakan air suling yang telah dibufferkan sebagai pelarut. Larutan buffer dibuat dengan menambahkan zat tertentu ke dalam air suling sebelum digunakan sebagai pelarut.

Zeolit yang digunakan sebagai adsorben diayak untuk memperoleh kisaran diameter yang diinginkan, yaitu 5-7 mesh. Kemudian zeolit dicuci dengan air suling dan dikeringkan pada suhu 110 °C selama 6 jam. Zeolit dengan berat tertentu ditambahkan ke dalam larutan kerja yang telah disiapkan. Labu erlenmeyer kemudian dimasukkan ke dalam shaker bath Grand SS40-2 yang beroperasi pada suhu 30 °C dan kecepatan 50 goyangan/menit. Pengambilan contoh dilakukan setelah tercapai keadaan setimbang (24 jam) untuk kemudian dianalisis kadar *p*-klorofenolnya dengan menggunakan spektrofotometer UV dengan panjang gelombang 500 nm.

Pada penjerapan yang dilanjutkan dengan desorpsi, zeolit yang telah dikontakkan dengan larutan *p*-klorofenol selama 24 jam dipisahkan dari fase larutannya. Kemudian dikontakkan kembali dengan air suling selama 24 jam. Pengambilan contoh dilakukan pada akhir proses desorpsi untuk dianalisis kadar

p-klorofenolnya dengan menggunakan spektrofotometer UV.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

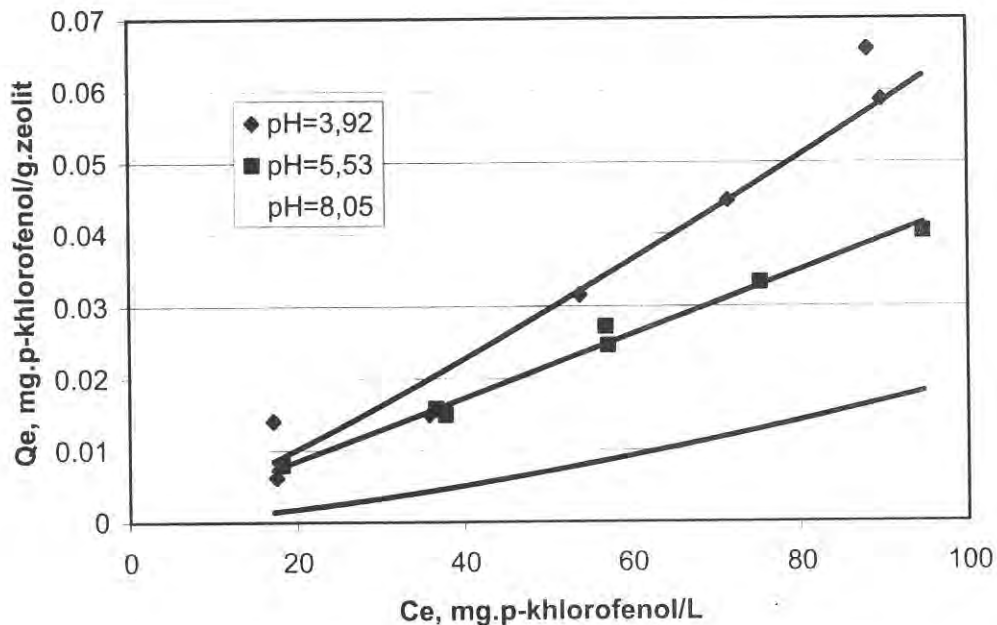
Penelitian dilakukan dengan memvariasi pH dan berat zeolit. Di samping itu, proses desorpsi juga dipelajari. Hasil penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3 - Gambar 5.

Pengaruh pH Larutan

Pengaruh pH larutan terhadap penjerapan *p*-klorofenol pada zeolit ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 1. Dari data tersebut nampak bahwa dengan pH larutan semakin besar, maka *p*-klorofenol yang terjerap pada permukaan zeolit semakin kecil. Hal ini disebabkan dengan adanya pH semakin besar yang berarti konsentrasi ion H⁺ semakin berkurang. Berkurangnya konsentrasi H⁺ dalam larutan menyebabkan ion H⁺ yang merupakan asam Brønsted zeolit melepaskan diri dari ikatannya dengan oksigen penyusun struktur tetrahedral aluminosilikat. Zeolit yang mengalami depro-

tonisasi menjadi bermuatan negatif, sehingga memberikan gaya tolak menolak terhadap ion klorofenolat yang terbentuk dari disosiasi *p*-klorofenol di dalam air. Semakin kecil konsentrasi H⁺ larutan, zeolit akan semakin bermuatan negatif dan ion klorofenolat yang terbentuk akan semakin banyak. Gaya tolak menolak yang semakin besar antara zeolit yang bermuatan negatif dan ion klorofenolat menyebabkan *p*-klorofenol yang terjerap cenderung berkurang.

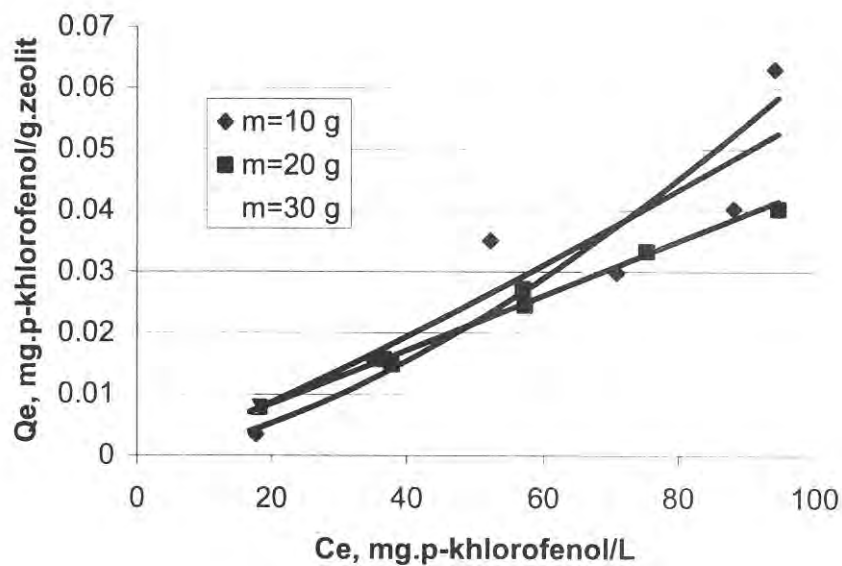
Berdasarkan data sebagaimana dilukiskan pada Gambar 3, nilai-nilai konstanta empirik *b* dan *q* pada ketiga persamaan penjerapan isothermal setimbang dapat ditentukan, yang nilainya ditunjukkan pada Tabel 1. Dari Tabel 1 terlihat bahwa persamaan Freundlich mampu mewakili dengan baik data-data percobaan yang ada sehingga memberikan kesalahan relatif yang terkecil. Hal ini menunjukkan bahwa penjerapan yang dominan adalah penjerapan secara fisis sesuai dengan asumsi pengembangan Persamaan Freundlich, yaitu tidak adanya asosiasi dan disosiasi molekul-molekul adsorbat setelah terjerap pada permukaan padatan.



Gambar 3. Pengaruh pH larutan terhadap penjerapan *p*-klorofenol pada zeolit menggunakan persamaan Freundlich

Tabel 1. Persamaan isotherm penjerapan *p*-klorofenol pada pengaruh pH Larutan

Persamaan	pH	Tetapan persamaan isotherm		Ralat Qe, %
		q	b	
Freundlich	3,92	$3,049 \cdot 10^{-4}$	0,8562	19,69
	5,35	$3,985 \cdot 10^{-4}$	0,9795	3,68
	8,05	$1,525 \cdot 10^{-5}$	0,6320	17,19
Langmuir	3,92	-0,1923	$-2,42 \cdot 10^{-3}$	23,43
	5,35	-2,7794	$-1,53 \cdot 10^{-4}$	3,52
	8,05	-0,0121	-0,0067	21,29
BET	3,92	-0,1055	-109,8104	20,36
	5,35	-1,2292	-9,3028	3,68
	8,05	-0,0108	-194,9331	23,07

**Gambar 4. Pengaruh berat zeolit terhadap penjerapan *p*-klorofenol pada zeolit menggunakan Persamaan Freundlich****Pengaruh Berat Zeolit**

Pengaruh berat zeolit yang digunakan terhadap penjerapan *p*-klorofenol pada zeolit ditunjukkan pada Gambar 4 dan Tabel 2.

Secara umum *p*-klorofenol yang terjerap semakin banyak dengan bertambahnya berat zeolit yang digunakan. Hal ini disebabkan luas permukaan zeolit, terutama luas permukaan mikropori, yang semakin besar sehingga memungkinkan berlangsungnya proses penjerapan dalam jumlah yang lebih banyak. Gambar 4 juga menunjukkan bahwa kenaikan jumlah *p*-

klorofenol yang terjerap proporsional terhadap kenaikan berat zeolit. Proporsionalitas hubungan tersebut dimungkinkan karena jumlah luas permukaan tiap satuan berat zeolit tidak tepat homogen untuk masing-masing zeolit. Walaupun zeolit telah diayak sehingga memiliki diameter yang seragam, namun luas permukaan yang efektif berperan dalam proses penjerapan tidak hanya terbatas pada permukaan saja. Mikropori yang terdapat pada bagian dalam zeolit juga memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap penjerapan.

Tabel 2. Tetapan persamaan isotherm penjerapan *p*-klorofenol pada pengaruh berat zeolit (pH = 3,92)

Persamaan	Berat zeolit, g	Tetapan persamaan isotherm		Ralat Qe, %
		q	b	
Freundlich	10	$5,221 \cdot 10^{-5}$	0,6482	14,70
	20	$3,049 \cdot 10^{-4}$	0,8562	19,69
	30	$2,664 \cdot 10^{-4}$	0,8643	22,60
Langmuir	10	-0,0168	$-1,03 \cdot 10^{-2}$	58,71
	20	-0,1923	$-2,42 \cdot 10^{-3}$	23,43
	30	2,4940	$1,82 \cdot 10^{-4}$	26,44
BET	10	-0,0332	-190,47	32,20
	20	-0,1055	-109,81	20,36
	30	-0,0986	-101,26	23,69

Tabel 3. Penjerapan-desorbsi *p*-klorofenol pada zeolit

No. Percb.	Awal	Akhir penjerapan	Akhir desorbsi	Jumlah pcp terjerap, mg/g zeolit	Jumlah pcp terdesorbsi, mg/g zeolit	Persen pcp terdesorbsi %
	Konst, mg/L	Konst, mg/L	Konst, mg/L			
71	181,79	159,461	7,112	0,22329	0,07112	31,85
72	231,701	208,935	8,058	0,22766	0,08075	35,47
73	278,109	253,592	10,264	0,24517	0,10264	41,86
74	322,329	297,811	12,103	0,24518	0,12103	49,36
75	370,489	341,593	13,942	0,28896	0,13942	48,25

Catatan : pcp= *p*-klorofenol

(Suhu 30°C, waktu 24 jam, diameter zeolit 5-7 mesh, pH = 3,92, rasio 20 g zeolit/200 mL larutan; kecepatan shaker bath 50 goyangan/menit)

Bentuk persamaan isotherm penjerapan yang sesuai tercantum pada Tabel 2. Persamaan Freundlich ternyata juga dapat mewakili dengan baik data-data percobaan yang ada sehingga memberikan kesalahan relatif yang terkecil.

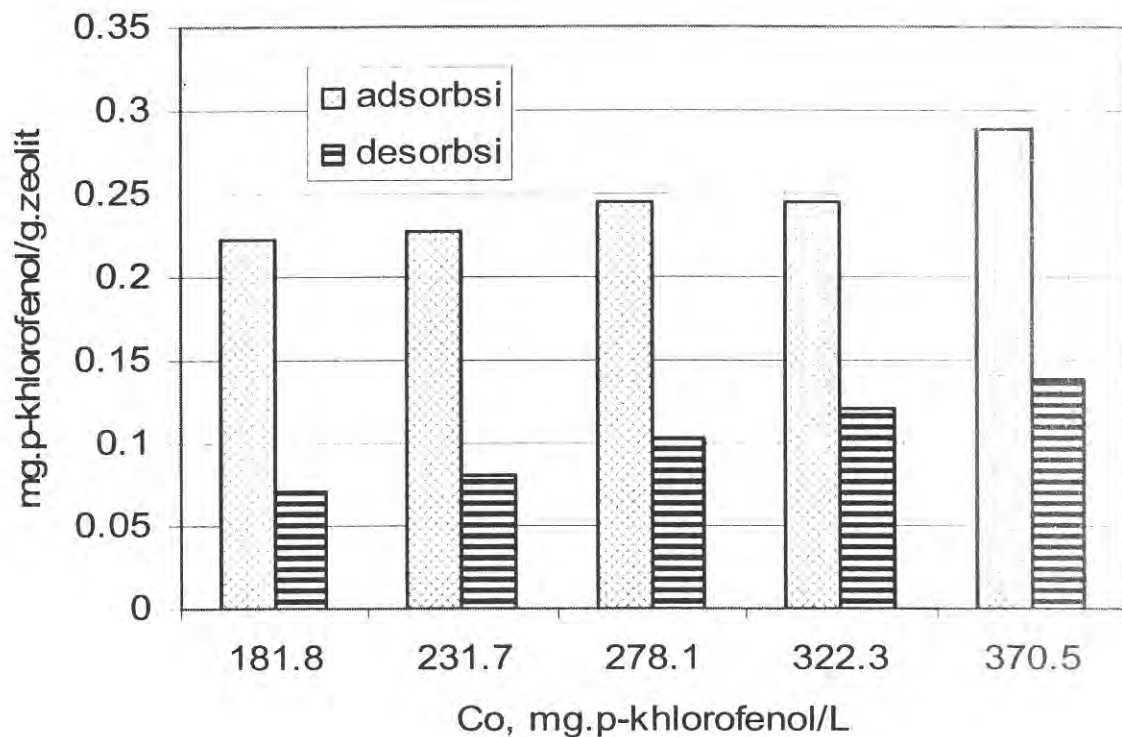
Jika dibandingkan dengan hasil penelitian penjerapan fenol zeolit yang dilakukan oleh Yuliana pada kondisi percobaan yang sama, ternyata jumlah *p*-klorofenol yang teradsorpsi pada zeolit lebih sedikit (Yuliana, 1998). Hal ini disebabkan ukuran senyawa *p*-klorofenol yang lebih besar daripada fenol, sehingga pori-pori

zeolit mampu menampung fenol dalam jumlah yang lebih banyak.

Penjerapan-Desorbsi

Sebelum proses desorbsi dilakukan, zeolit dikontakkan pada larutan *p*-klorofenol dengan konsentrasi lebih besar daripada 150 mg/L. Hal ini dimaksudkan agar jumlah *p*-klorofenol yang terdesorbsi memungkinkan untuk dianalisis dengan baik.

Data-data penjerapan-desorbsi *p*-klorofenol dari zeolit tercantum pada Tabel 3 dan Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan antara jumlah *p*-klorofenol terjerap dan terdesorbsi tiap satuan berat zeolit pada berbagai konsentrasi awal *p*-klorofenol dalam larutan (C_o).

Dari Gambar 5 terlihat kenaikan jumlah zeolit terjerap pada akhir proses kecil sekali dibandingkan dengan kenaikan konsentrasi setimbang *p*-klorofenol. Hal ini menunjukkan kondisi zeolit yang hampir mendekati keadaan jenuhnya yaitu penambahan konsentrasi larutan tidak lagi mempengaruhi banyaknya *p*-klorofenol yang terjerap pada permukaan zeolit. Adanya *p*-klorofenol yang dapat didesorbsi menunjukkan bahwa proses penjerapan yang berlangsung sebelumnya bersifat reversibel sebagian. Jumlah *p*-klorofenol yang terdesorbsi selama 24 jam berkisar 31,85 % hingga 49,39 % dari jumlah *p*-klorofenol yang terjerap.

KESIMPULAN

Proses penjerapan *p*-klorofenol dari dalam larutan dapat dilakukan dengan menggunakan zeolit sebagai adsorben, dan cenderung

mengikuti persamaan Freundlich. Semakin asam larutan berakibat pada semakin banyak *p*-klorofenol yang terjerap ke dalam zeolit. Untuk diameter zeolit 5-7 mesh, berat 20 g dalam 200 mL, pada suhu 30 °C selama 24 jam diperoleh nilai q untuk pH 3,92; 5,35; dan 8,05 berturut-turut sebesar $3,0493 \cdot 10^{-4}$; $3,9853 \cdot 10^{-4}$; dan $1,5246 \cdot 10^{-5}$; sedangkan nilai b untuk ketiga pH tersebut berturut-turut sebesar 0,08562; 0,9795; dan 0,6320. Kenaikan berat zeolit yang digunakan menghasilkan peningkatan *p*-klorofenol yang terjerap ke dalam zeolit. Pada pH 3,92, nilai q untuk berat zeolit sebanyak 10 g, 20 g, dan 30 g dalam 200 mL berturut-turut diperoleh sebesar $5,2214 \cdot 10^{-5}$; $3,0493 \cdot 10^{-4}$; dan $2,6645 \cdot 10^{-4}$, sedangkan nilai b untuk ketiga berat tersebut berturut-turut sebesar 0,6482; 0,08562; dan 0,8643. Penjerapan *p*-klorofenol dalam limbah cair dengan zeolit bersifat reversibel sebagian.

DAFTAR PUSTAKA

- Bonneviot, L., and Kaliaguine, S., 1995. *Lewis Basic and Lewis Acidic Sites in Zeolites*. Elsevier Science B. V., New Yor, p.311,.
- Chiang, A.S.T and Chao, K-j, 2001. Membrane and Films of Zeolite and Zeolite-like Materials, *J. Phys & Chem Solids*, 62, 1899-1910.
- Khan, A. R., Al-Bahri, T. A., and Al-Haddad, A., 1997. Adsorption of Phenol Based Organic Pollutants on Activated Carbon from Multi-Component Dilute Aqueous Solutions. *Wat.Res.*, 31, 2102-2112.
- Kirk, R. E. dan Othmer, D. F., 1990a. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 2nd ed., vol.5, John Willey & Sons, New York, pp.864-871.
- Kirk, R. E. dan Othmer, D. F., 1990b. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 2nd ed., vol.15, John Willey & Sons, New York, pp.639-650.
- Las. T, 1991. *Zeolit Untuk Industri*. Proceed Seminar/ Kolokium Lembaga Ilmu Dasar ITI, Institut Teknologi Indonesia , Serpong.
- Las. T, 1994. *Use of Inorganic Sorbents for Liquid Waste Treatment and Backfill for Underground Repositories*. Technical Report, IAEA-RC No 7215/R1/RB, Shellafield, UK.
- Las. T, 1995. *Zeolite for Radioactive Waste Treatment*. Technical Report, IAEA-RC No 7215/R2/RB, Beijing, China.
- Martopo, S., 1995. *Penentuan Baku Mutu Lingkungan di Indonesian*. Makalah Lokakarya 2 Hari: Kajian Ilmiah tentang Komponen dan Baku Mutu Lingkungan dalam Kegiatan Migas dan Panas Bumi, PPLH, Yogyakarta, p.13.
- Mckay, G., Bino, M. J., and Altanemi, A. R., 1985. The Adsorption of Various Pollutants from Aqueous Solutions onto Activated Carbon. *Wat.Res.*, 4, pp. 491-495.
- Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup, 1996. *Kep 42/MenLH/10/1996 tentang Pengendalian Pencemaran Air*. Sekretariat Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup, Jakarta.
- Metcalf, Eddy, Tchobanoglous, G., Burton, F.L., and Stensel, H.O., 2003. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4th ed., McGraw-Hill, Boston, pp.1138-1145.
- Noll, K. E., Gournaris, V., and Hou, W.S., 1992. *Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control*. Lewis Publisher Inc., Michigan, pp.1-8.
- Queral, X., Moreno, N., Umana, J.C., Alastuly, A., Hernandez, E., Lopez_Soler, A., dan Plana, F., 2002. Syntesis of Zeolites from Coal Fly Ash: An Overview, *International Journal of Coal Geology*, 50, pp.413-423.
- Sutarti, M. dan Rachmawati, M., 1994. *Zeolit Tinjauan Literatur*. Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah, Jakarta, pp.20-41.
- Treybal, R.E., 1981. *Mass Transfer Operations*. 3rd ed., McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, pp.565-567, 641.
- Tsitsishvili, G.V., Andronikashvili, T.G., Kirov, G.N., and Filizova, L.D., 1992. *Natural Zeolites*. Elish Horwood Ltd., England, pp.101-117.
- Vollhart, K.P.C., 1987. *Organic Chemistry*, W.H. Freeman and Company, New York, pp.270-278.
- Weitkamp, J., 2000. Zeolit and Catalysis, *Solid State Ionics*, 131, pp. 175-188.
- Yuliana, 1998. *Isotherm Adsorpsi Fenol pada Zeolit secara Batch*. Laporan Penelitian Laboratorium Proses Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, p.18.