ISBN: 979 - 96137 - 1 - X

2002

PROSIDING

SEMINAR NASIONAL "KEJUANGAN" TEKNIK KIMIA 2002

Pengembangan Teknologi Pengelolaan Sumber Daya Alam Indonesia

29 - 30 Januari 2002

JURUSAN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UPN "VETERAN" YOGYAKARTA

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"

C-16. Kesetimbangan Adsorbsi Surfaktan ABS pada *Artificial Reservoir Core* Jenis Batuan Pasir
I Gusti S Budiaman, Bardi Murachman, Estiko Ari Wibowo, Jurusan Teknik Kimia , FT, UGM, Yogyakarta

C-17. Modifikasi Tungku Bak Terbuka Sebagai Upaya Meningkatkan Suhu Bakar dan Efisiensi Panas
Tjukup Marnoto, Gogot Haryono, Jurusan Teknik Kimia FTI, UPN "Veteran" Yogyakarta

C-18. Pesawat Pengering Serba Guna dengan Pompa Kalor
Tjukup Marnoto, Christyadi, Suprapto, Jurusan Teknik Kimia FTI , UPN "Veteran" Yogyakarta, Program Studi Teknik Elektro, UNY, Yogyakarta**

C-19 Desorption Phenomena in Solid-Liquid System Using Solar Energy
Ramli Sitanggang, Supranto, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri , UPN "Veteran" Yogyakarta

C-20 Phenomena Distilasi Campuran Biner Menggunakan Energi Solar
Ramli Sitanggang, Wasir Nuri, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri , UPN "Veteran" Yogyakarta

C-21 Phenomena Pembersihan Udara di Bawah Suhu Kamar dalam Fixed Bed
Ramli Sitanggang, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri , UPN "Veteran" Yogyakarta

C-22. Pengaruh Tinggi Bed, Ukuran Mesh dan Draining Time Terhadap Solution Holdup pada Ekstraksi Minyak kedelai
Muharto, Sulung Cayadi, Magdalena Kristiawan, Jur. Teknik Kimia , ITS, Surabaya

C-23. Kajian Terhadap Dua Kelompok Metode Perhitungan Kinerja Bejana Penguapan Quadruple Efek Standar Di Industri Gula
Bambang Eddy Santoso, Sunantyo, Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia, Pasuruan

C-24. Perhitungan dalam Bejana Penguapan Quadruple Efek : Penyadapan Penuh, Kebutuhan Uap Pemanas, Luas Permukaan Pemanas dan Ekonomi Uap
Bambang Eddy Santoso dan Sunantyo, Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia, Pasuruan

D. TEKNOLOGI PENGELOLAAN DAN PRODUK BERWAWASAN LINGKUNGAN

D-01. Penanggulangan Gulma Air Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes* (Mart.)Solms) Untuk Produksi Biogas
Sriharti, UPT Balai Pengembangan Teknologi Tepat Guna, Subang

D-02. Pengolahan Limbah Minyak Goreng Bekas Menjadi Gliserol dan Minyak Diesel Melalui Proses Trans-Esterifikasi
Moh. Djaeni, Fifi Krishartanti, Ratna Linawati dan Imamul Hakim, Jurusan Teknik kimia, Fakultas Teknik, UNDIP, Semarang

D-03. *Recovery* Pati Terlarut dari Limbah Cair Industri Tapioka dengan Reverse Osmosis
H. Susanto, Budiyono dan I N. Widiasa, Jurusan Teknik Kimia UNDIP, Semarang

D-04. Pengujian Penyulingan Nilam dengan Kapasitas Ketel Bahan 200 kg
Halomoan P. Siregar, Takiyah Salim, UPT-Balai Pengembangan Teknologi Tepat Guna-LIPI, Subang

Prosiding Seminar Nasional "Kejuangan" Teknik Kimia
Pengembangan Teknologi Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia
Yogyakarta, 29-30 Januari 2002
ISBN 979-96137-1-X

PENOMENA PEMBERSIHAN UDARA DIBAWAH SUHU KAMAR DALAM FIXED BED

Ramli Sitanggang
Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Industri UPN "Veteran" Yogyakarta
Jl. Lingkar Utara (SWK) 104 Condongcatur Yogyakarta

Abstrak

Kegiatan industri dan kendaraan bermesin akan semakin berkembang sehingga udara semakin tidak bersih. Polusi udara tersebut perlu diturunkan kàrena akan terkontaminasi jika digunakan untuk udara pengering bahan-bahan makanan dan juga mengakibatkan penyakit ringan sampai berat jika digunakan untuk udara konsumsi. Salah satu metode alternatif untuk menurunkan kadar polutan udara adalah alat produksi udara bersih yang dapat digunakan sebagai alat bantu pengeringan dan alat perereduksi polutan udara ditempat-tempat tertentu untuk udara konsumsi

Dalam kajian ini phenomena pembersihan udara dikaji dibawah suhu kamar untuk memperkaya aplikasinya dengan peubah kadar polutan, tinggi kolom dan waktu tinggal. Dari pembahasan, penomena pembersihan udara menunjukkan model matematik seperti persamaan (11) dan (15)

Pendahuluan

Pada kegiatan industri, polusi udara akan meningkat diantaranya partikulat, debu, logam , bahan organik, *gaseous metal* dan bakteri. Polusi ini sulit dibendung dan diatasi sehingga status kadar metal pada tempat tertentu di wilayah Yogyakarta, Surabaya dan Jakarta menghawatirkan (Media massa KR,2001, Jawa Pos, 5 juni 2001, Jawa Pos, 6 Juni 2001, TVRI 6 Januari 2002). Oleh karena udara konsumsi primer manusia sedangkan pada sistim membran tubuh tidak ada koefisien trobosan logam berat maka dengan sendirinya udara yang terhirup manusia pada kadar logam dibawah ambang batas akan terakumulasi dalam tubuh. Akumulasi tersebut akan mengganggu pembentukan sel darah merah dan menghalangi proses metabolisme yang berpotensi menimbulkan berbagai macam penyakit dari jenis ringan sampai kangker dan juga merusak jaringan otak (Shryock,1982). Mengingat keadaan di atas sangat berbahaya bagi kelangsungan hidup manusia dari satu generasi ke kenerasi berikutnya perlu upaya-upaya membersihkan logam pada udara yang akan dikonsumsi. Salah satu upaya alternatif yang mungkin digunakan adalah menyaring polutan dari udara pada tempat-tempat yang strategis dengan menggunakan alat pembersih udara. Selain alternatif di atas upaya yang sedang dilakukan kalangan praktisi untuk mengurangi partikulat, debu, metal, zat organik dan *gaseous metal* dari gas buang adalah motode mekanik, *electrical precipitator* untuk partikulat besar (Pabrik Semen) dan absorbsi (Nursamsi,2001) sedangkan upaya untuk membersihkan *gaseous metal* dari lingkungan seperti ruangan kegiatan proses Sel merkuri kausti-chlorida, transportasi bermesin (Nevers,1995), peleburan timah, industri *metal plating, plating chemical, surface finishing* (Higgins,1995), industri besi, perkayuan, pengemasan, pengelasan, kegiatan laboratorium, limbah cair maupun padat dan emisi kenderaan bermesin lalu lintas masih belum banyak dilakukan sehingga dalam kajian ini didiskusikan suatu penomena pembersihan udara dari polutan yang akan berguna untuk perancangan alat produksi udara bersih.

Tujuan dari kajian ini mempelajari penomena adsorbsi metal dari *gaseous metal* dibawah suhu kamar dengan peubah kadar metal, tinggi kolom dan waktu adsorbsi. Kegunaan kajian ini pada teknologi adalah pengembangan adsorbsi *gaseous metal* dan pengendalian polutan logam dari udara, untuk lembaga pendidikan hasil kajian ini dapat digunakan untuk phenomena meneliti alat produksi udara bersih sedangkan untuk masyarakat industri dapat digunakan untuk alternatif alat bantu pengeringan bahan-bahan makanan dan bahan yang tidak tahan suhu tinggi serta untuk masyarakat luas alat ini, dipergunakan untuk membersihkan akumulasi metal seperti timbal, raksa dan kadmium pada udara yang akan dikomsumsi dengan menempatkannya pada tempat yang dipandang strategis diantaranya pada gas buang industri setelah melalui absorbsi, ruangan-ruangan kegiatan industri, laboratorium penelitian, gedung pertemuan, hotel-hotel penginapan, perkantoran, ruangan kampus-kampus, rumah sakit, rumah-rumah, mobil angkutan dan pribadi.

Pembersihan Udara

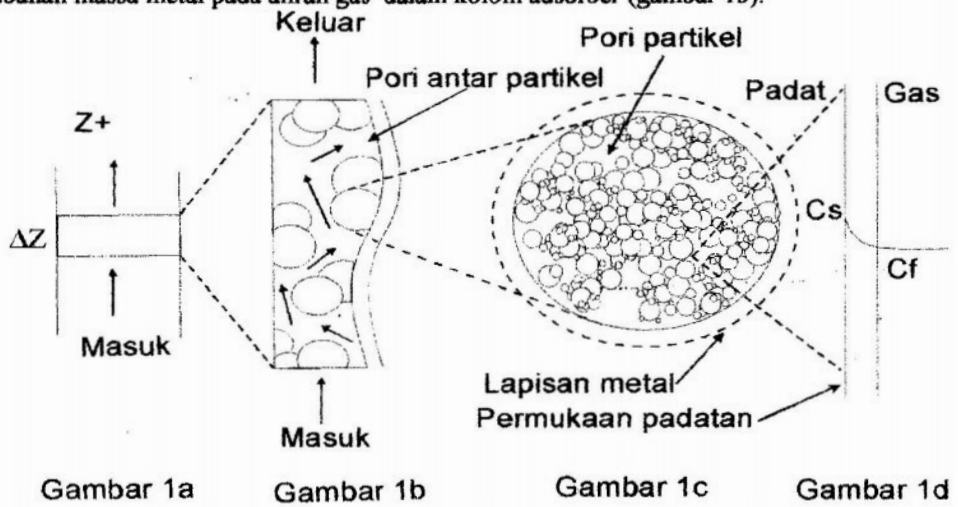
Pembersihan sumber polutan udara sudah banyak dilaporkan dengan metode mekanik, *electrical precipitator* untuk partikulat besar, absorbsi gas (Nursamsi,2001), adsorbsi carbon dioksida, hidrokarbon, sulfur dioksida menggunakan karbon aktif (Smith,1978) kemudian dikembangkan dengan memakai adsorben kopper oksida, oksida besi, oksida zin dan dilanjutkan dengan *moleculer sieve* oksida titan (Ruthven,1997).

Dalam kajian ini perhatian difokuskan pada pembersihan udara bebas dari *gaseous metal* yang masih jarang dijumpai. Menurut Nevers, *gaseous metal* terjadi karena difusi molekuler. Selama penyebarannya, diameter partikulat metal besar akan mengembun bersama gas yang mudah mengembun sedangkan diameter partikulat kecil hingga mendekati diameter molekul akan membentuk *gaseous metal.* Gaseus metal sangat mudah teradsorbsi pada bahan makanan dan terakumulasi pada tubuh manusia (Nevers,1995). Dengan pandangan di atas pembersihan udara dari gaseous metal sangat penting sehingga pada makalah ini didiskusikan penomena pempbersihan udara bebas dengan metode adsorbsi.

Adsorbsi sistim adsorben-gaseous metal tentunya tergantung kepada, jenis, sumber dan pereparasi adsorben, interaksi antara sifat fisik seperti struktur, ukuran pori, geometri partikel dan sifat kimia adsorben (Kingery,1975) juga jenis adsorbat dalam *gaseous metal* dan kondisi operasinya. Menurut Forzatti (1986), pengaruh suhu adsorbsi pada sistim adsorben-*non metal,* adalah naik jika suhu adsorbsi turun sampai suhu kamar (Cheremisinoff, 1986). Dalam kajian ini, pembersihan udara disarankan dibawah suhu kamar agar penurunan konsentrasi gaseous metal dalam gas signifikan dan dilakukan dalam kolom fixed bed.

Pembahasan

Pemindahan *gaseous metal* dijabarkan dari neraca perpindahan massa metal pada volume elemen tumpukan adsorben. Volume elemen ditunjukkan pada gambar 1a yang bagian-bagiannya adalah gambar 1b, 1c dan 1d. Perpindahan massa dalam volume elemen dibagi dua kerangka pemikiran teoritis yaitu perpindahan massa metal pada bagian dalam adsorben, permukaan adsorben (gambar 1c) dan perubahan massa metal pada aliran gas dalam kolom adsorber (gambar 1b).



Gambar 1. Volume elemen perpindahan massa

Dalam gambar 1a, *gaseous metal* mengalir melalui rongga tumpukan adsorben (gambar 1b) yang memiliki porositas ε_p. Selama *gaseous metal* berkontak dengan adsorben (gambar 1b), metal mengisi pori adsorben (gambar 1c) secara terus menerus selanjutnya, metal menutup permukaan partikel adsorben (gambar 1c,1d)

Menurut Forzatti (1986), kecepatan adsorbsi metal dipengaruhi oleh tumbukan, energi adsorbsi dan suhu yang dinyatakan oleh Langmuir (Cheremisinoff,1986) kemudian Froment *et al.* (1990), meninjau kecepatan adsorbsi dari geometri struktur adsorben dan dikembangkan meninjau pengaruh struktur dan ukuran pori dengan tenaga heterogenitas (Do,1998). Dalam adsorbsi terjadi keseimbangan termodinamika antara kadar metal dengan permukaan partikel (Ruthven,1997) (lihat gambar 1c, 1d). Selain hal tersebut metal memiliki mobilitas dari satu pori ke pori yang lain dalam partikel pada suatu suhu dan Wielen *et al.* (1998), sedangkan pengaruh struktur, ukuran pori dan heterogenitas terhadap difusi dikoreksi oleh porositas (Middlement,1997)

Dalam tinjauan ini, geometri struktur adsorben dipadang seperti bola, struktur, ukuran pori dan heterogenitas dinyatakan dalam porositas (gambar 1c) sedangkan *gaseous metal* dipandang dalam bentuk partikel yang sangat kecil sampai molekul. Oleh karena itu, pemindahan massa metal dari gas ke dalam adsorben dapat dibuat sebagai pengaruh difusi internal dan kecepatan adsorbsi.

Jika dalam pemodelan, dirancang peubah perpindahan massa metal pada adsorben yaitu C_f merupakan berat metal per volume pori adsorben, C_s merupakan berat metal bergabung dengan adsorben per berat adsorben, ρ_s densitas adsorben (berat adsorben per volume adsorben) dan C merupakan berat metal per volume campuran metal-adsorben maka hubungan ketiga peubah di atas dapat dibuat seperti persamaan (1)

$$C = \varepsilon_p C_f + (1 - \varepsilon_p)\rho_s C_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(1)$$

hubungan keseimbangan C_s dengan C_f pada permukaan (gambar 1d) adalah persamaan (2)

$$C_s = K_p C_f \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2)$$

Jika k_o faktor kecepatan adsorbsi dan k_a merupakan konstante kecepatan adsorbsi maka berdasarkan persamaan Langmuir dapat disusun kecepatan adsorbsi berikut:

$$Ng = k_o e^{-E/RT}(C_f - C_s) = k_a(C_f - C_s) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(3)$$

Dari neraca perpindahan massa metal pada volume elemen gambar 1c untuk suhu istermal, diperoleh model matematik distribusi massa metal dalam adsorben sebagai berikut.

$$\frac{D_{ieff}}{K_r}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\frac{\partial C}{\partial r}) + k_a(\frac{K_p - 1}{K_r})C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \ldots\ldots\ldots(4)$$

Dengan D_{ieff} adalah difusivitas efektif gaseous metal dalam partikel adsorben yang nilainya dikoreksi oleh porositas (ε_p) sedangkan faktor K_r adalah tahanan dalam partikel adsorben untuk *gaseous metal* yang memasuki pori adsorben yang diyatakan dengan porositas dan nilai konstante keseimbangan metal dalam pori (K_p).

Dalam adsorben dipandang pemindahan massa metal sejauh jari-jari (r) dengan cara melintasi jalan berliku-liku melalui pori partikel adsorben. Difusi metal akan melawan tahanan dalam partikel adsorben sebasar K_r sehingga nilai difusivitas yang sesungguhnya adalah D_{iact}. Jika difusi ini dimasukkan dalam persamaan (4) maka model matematik distribusi massa metal dalam adsorben berubah menjadi persamaan (5).

$$D_{iact}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\frac{\partial C}{\partial r}) + k_a(\frac{K_p - 1}{K_r})C = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \ldots\ldots\ldots(5)$$

batas kondisi untuk mengendalikan persamaan (5), direncanakan pada r = 0 $\frac{\partial C}{\partial r} = 0$ (konsentrasi pada pusat partikel) , $r = R_p$ $C = C_{fz}(z)$ konsentrasi metal pada permukaan partikel dan t = 0 C = 0 konsentrasi pada r = r.

Dalam persamaan (5), distribusi massa metal dalam adsorben bergantung pada difusivitas *actual*, koefisien perpindahan massa kinetika adsorbsi, faktor adsorbsi, ukuran partikel adsorben dan waktu adsorbsi. Menurut Do (1997), jika r besar maka waktu adsorbsi berbanding lurus dengan r pangkat dua dan sebaliknya jika r kecil waktu siklus adsorbsi hanya tergantung kinetika adsorbsi.

Dalam perpindahan massa pada siklus waktu tertentu, persamaan (5) tidak dapat digunakan karena metal sudah memenuhi pori partikel. Akan tetapi perpindahan massa metal tetap berlangsung untuk menutupi permukaan partikel sesuai dengan koordinat bola. Untuk menyusun persamaan dianggap pemindahan massa metal hanya dipengaruhi oleh difusivitas *eksternal* (D_{ep}) sehingga model matematik distribusi massa metal pada permukaan adsorben seperti ditunjukkan persamaan (6):

$$D_{ep}\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\frac{\partial C}{\partial r}) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad \text{..... .....(6)}$$

batas kondisi untuk mengendalikan persamaan (6), direncanakan pada $t = 0$ $C = 0$ $r > R_p$, $r = R_p$ $C = C_{fz}(z)$ $t > 0$ dan r menuju tak hingga $C = 0$ $t > 0$.

Untuk mengetahui perubahan massa metal pada aliran gas, ditinjau neraca massa pada volume elemen gambar 2a. Jika dalam pemodelan, dirancang peubah perpindahan massa metal pada kolom yaitu C_{fz} merupakan berat metal per volume gas dan C merupakan berat metal per volume campuran metal-adsorben. Perubahan massa metal dalam aliran dipengaruhi oleh difusi olakan, konveksi gas dan beda konsentrasi metal pada permukaan partikel adsorben maka dari neraca massa diperoleh model matematik distribusi massa metal dalam aliran gas sepanjang kolom adsorber sebagai berikut:

$$D_{eff}\frac{\partial^2 C_{fz}}{\partial z^2} - U\frac{\partial C_{fz}}{\partial z} + \frac{3}{R_p}(1-\varepsilon_b)D_p\frac{\partial C}{\partial r}/_{r=R_p} = \varepsilon_b\frac{\partial C_{fz}}{\partial t} \quad \text{..... (7)}$$

dipandang pengaruh difusi olakan, sangat kecil sehingga persamaan (7) berubah menjadi persamaan (8)

$$-U\frac{\partial C_{fz}}{\partial z} + \frac{3}{R_p}(1-\varepsilon_b)D_p\frac{\partial C}{\partial r}/_{r=R_p} = \varepsilon_b\frac{\partial C_{fz}}{\partial t} \quad \text{..... (8)}$$

batas kondisi untuk mengendalikan persamaan (8) pada $t = 0$ $C_{fz} = 0$, $z = 0$ $C_{fz} = C_{fzo}$ dan $z = L$ $C_{fz} = C_{fzL}$

Dalam persamaan (8), massa metal akan berkurang dari aliran gas yang berjalan melalui tumpukan adsorben. Siklus waktu perubahan massa dikendalikan oleh tinggi tumpukan adsorben dan kadar metal dalam aliran gas yang akan diadsorbsi.

Seperti yang sudah dijelaskan di atas, selama *gaseous metal* berkontak dengan adsorben, metal mengisi pori adsorben secara terus menerus sampai pori jenuh selanjutnya, metal menutup permukaan partikel adsorben. Pada suhu rendah, waktu siklus metal untuk memenuhi pori partikel adsorben dianggap sangat pendek sedangkan untuk menutupi permukaan partikel cukup lama. Dengan demikian, perpindahan massa metal dianggap hanya dikendalikan oleh difusivitas *eksternal* atau model matematik distribusi massa metal pada adsorben dinyatakan dengan persamaan (6).

Untuk mempermudah analisis, persamaan dinyatakan dalam persamaan tak berdimensi. Misalkan peubah pemindahan metal pada permukaan adsorben direncanakan dalam bentuk analisis tak berdimensi berikut:

$$y = \frac{r}{R_p} \qquad \theta \doteq \frac{t}{\tau} = \frac{t}{V_z/\vartheta} \qquad x = \frac{C_o - C}{C_o} \quad \text{..... (9)}$$

Jika karakteristik pemindahan metal dari gas ke permukaan partikel adsorben di bentuk seperti persamaan (10) maka model distribusi metal pada permukaan adsorben berubah menjadi persamaan (11).

$$\alpha_2 = \frac{D_p\tau}{R_p^2} \quad \text{..... (10)}$$

$$\alpha_2\frac{1}{y}\frac{\partial}{\partial y}(y^2\frac{\partial x}{y}) = \frac{\partial x}{\partial \theta} \quad \text{.....(11)}$$

bilangan α_2 menunjukkan karakteristik waktu difusi terhadap karakteristik waktu adsorbsi metal .

batas kondisi untuk mengendalikan persamaan (11), dibuat sebagai berikut:

IC:	$\theta = 0$	$x = 1$	$y > 1$
BC:	$y = 1$	$x = x$ (z)	$\theta > 0$
	y menuju tak hingga	$x = 1$	$\theta > 0$

Pada persamaan (13), jika waktu siklus udara semakin lama maka kecepatan difusi semakin lambat atau adsorben semakin jenuh. Karakteriristik adsorbsi dinyatakan dengan α_2.

Peubah perubahan massa metal pada aliran gas dibuat dalam analisis dimensi berikut:

$$y_{fz} = \frac{z}{R_p} \qquad \theta = \frac{t}{\tau} = \frac{t}{V/\vartheta} \qquad x_{fz} = \frac{C_{fzo} - C_{fz}}{C_{fzo}} \quad \text{.... (12)}$$

jika karakteristik perubahan massa metal pada aliran udara dalam bentuk bilangan tak berdimensi berikut:

$$\alpha_3 = \frac{3}{R_p^2}(1-\varepsilon_b)\frac{D_{eff}}{K_r}\frac{R_p}{U}\frac{C_o}{C_{fzo}} \quad \text{..... (13)}$$

$$\beta_2 = \frac{R_p}{U\tau} \quad \text{..... (14)}$$

maka model distribusi massa timbal pada aliran gas dalam kolom sebagai berikut:

$$\frac{\partial x_{fz}}{\partial y_{fz}} - \alpha_3 \frac{\partial x}{\partial y}\Big/_{y=1} = -\beta_2 \frac{\partial x_{fz}}{\partial \theta} \quad \text{.....(15)}$$

bilangan α_3 menunjukkan perbandingan karakteristik waktu difusi internal terhadap karakteristik waktu konveksi aliran udara sedangkan β_2 menunjukkan perbandingan karakteristik waktu konveksi pada adsorbsi terhadap waktu tinggal dalam kolom. Kondisi batas untuk mengendalikan persamaan (15) sebagai berikut:

IC : $\theta = 0$ $\quad x_{fz} = 0$

BC: $y_{fz} = 0$ $\quad x_{fz} = 0$

$y_{fz} = 1$ $\quad x_{fz} = \dfrac{C_{fzo} - C_{fzL}}{C_{fzo}}$

Pada persamaan (15), massa metal akan berkurang pada arah axial dan karakteristik pengurangan tersebut dinyatakan dengan bilangan α_3 dan β_2 sedangkan distribusi metal dinyatakan dengan persamaan *differensia parsial* orde satu.

Kesimpulan

Dari kerangka berfikir teoritis di atas dapat disimpulkan bahwa penomena membersihan udara dari polutan gaseous metal dapat digambarkan oleh persamaan (11) dan (15)

Notasi

C	Berat timbal per volume adsorben	(mg/ml)
C_s	Berat timbal per massa adsorben	(mg/g)
C_f	Berat timbal per volume udara	(mg/ml)
D_{eff}	Difusivitas efektif timbal dalam adsorben	(cm^2/det)
D_{act}	Difusivitas sesungguhnya dalam adsorben	(cm^2 /det)
E_a	Energi adsorbsi	(kcal/g)
k_o	Faktor adsorbsi	(cm^3/g det)
k_a	Konstante kecepatan adsorbsi	(cm^3/g det)
K_r	Tahanan dalam adsorben terhadap difusi	
K_p	Konstante keseimbangan padat-udara	(cm^3/g)
r	Jari-jari partikel adsorben	(cm)
R	Konstante gas	(kcal/g °K)
T	Temperatur	(°K)
U	Kecepatan udara	(cm/det)
V	Volume kolom terisi	(cm^3)
z	Tinggi kolom adsorben	
θ	Perbandingan waktu terhadap waktu tinggal udara	
ρ_s	Densiti adsorben	(g/cm^3)

ε_b Porositas tumpukan partikel zeolit

ε_p Porositas adsorben

Rujukan

1. Bird, R., B., Stewart, W.,E., and Lightfoot, E.,N.,1962,"Transport Phenomena ", Willey, New York
2. Cheremisinoff, P.,1986,"Handbook of Head and Mass Transfer", p.299-330, Houston, London, Paris
3. Do, D., D., and Wang, K.,1998," Dual Diffusion and Finite Mass Exchange Mode for Adsorbtion kinetik in Activated Carbon", AlChEj.,44,68
4. Froment F., G., and Bischoff B.,K.,1990," Chemical Reaactor Analysis and Design",John Wiley & Sons, New York Shryock,H.,1982,"Modern Medical Guide", Indonesia Publishing House,Bandung, Indonesia
5. Higgins T., E., 1995" Pollution Prevention Handbook", Lewis Plublishers, London, Tokyo
6. Higgins,T.,E.,1995,"Pollution Prevention Handbook",Lewis Publishers, Tokyo
7. Jawa Pos, 2001,"Pencemaran Udara", Surabaya
8. Kingery W.,D., 1975," Introduction to Ceramics", 2 nd ed.. John Wiley & Sons, New York Middleman, S., 1997,"An Introduction to Mass and Heat Transfer", Willey, New York
9. Kedaulatan Rakyat, 2001," Pencemaran Udara Malioboro", Yogyakarta
10. Middleman, S., 1997,"An Introduction to Mass and Heat Transfer", Willey, New York
11. Nevers N,.1995 "Air Pollution Controll Engineering", McGraw-Hil, New York.
12. Ruthven M.,D.,1997,"Encyclopedia of Seperation Technology", Vol.1,John Wiley & Sons, New York
13. Sarengat,N, Karsiati N.,, and Yuniari,"Pengendalian Pencemaran Udara Pada Industri Peleburan Timah Hitam", BBKKP,Prosiding Seminar Nasional JTK-FTI UPN"Y" , Yogyakarta
14. Smith M., C., 1996, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", McGraw-Hill International Editions
15. Treybal E., R., 1981," Mass-Transfer Operations", McGraw-Hill International Editions
16. Smith J.,M.,1987,"Chemical Engineering Kinetic", International Student Edition, Singapore
17. Warsito E.,1995,"Koefisien Perpindahan Massa Adsorbsi para xylen pada Kolom Isian dengan Bentonit", Tesis , Program Pasca Sarjana Ugm, Yogyakarta