



Pemodelan Perpindahan Massa Adsorpsi Zat Warna pada Adsorben Berbasis *Jatropha Curcas L.* dengan *Homogeneous* dan *Heterogeneous Surface Diffusion Model*

Aditya Putranto*, Yansen Hartanto, Kornelius Karlvin dan Arenst Andreas

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Katolik Parahyangan, Jalan Ciumbleuit 94, Bandung

*E-mail: adityaptr@yahoo.com

Abstract

The major objective of this experiment is to assess applicability of surface diffusion model to model the adsorption of methylene blue into *Jatropha Curcas L.* based adsorbents. Homogeneous Surface Diffusion Model (single pore consideration) and Heterogeneous Surface Diffusion Model (multi pore consideration) will be used in this modelling experiments. The modelling data were estimated and validated based on the published experimental results. Subsequently, simulation will be conducted by establishing three dimensional profile of solid phase concentration vs. radius and adsorption time. This simulation was held to discover and observe the adsorbent performance. The other objectives in this modelling experiment are to verify the model's accuracy against the mass transfer phenomena of the following adsorption process. Based on the modelling experiment, Homogeneous Surface Diffusion Model doesn't fit to show mass transfer characteristic for adsorption based on *Jatropha Curcas L.* press-cake residue. However, Heterogeneous Surface Diffusion Model is perfectly appropriate to show the mass transfer characteristic. Hence, the validation and simulation will be done only to the appropriate model. Based on mathematics model, effective diffusivity coefficient (D_s) and the rate diffusivity coefficient (k_1) are either affected by initial solution's concentration of methylene blue or the type of adsorbent.

Keywords : modelling, diffusion, homogeneous, heterogeneous, adsorption

Pendahuluan

Jatropha Curcas L. atau tanaman jarak pagar merupakan tanaman penghasil minyak dan sudah digunakan untuk produksi biodiesel di beberapa negara Asia seperti Indonesia. Minyak atau biodiesel ini dihasilkan dari proses pemerasan (*seed-pressing*) dari tanaman tersebut. Namun, residu padatan yang dihasilkan menjadi limbah setelah proses pemerasan ini hanya tersisa menjadi limbah yang tidak memiliki daya guna. Pada tahun 2009, Indonesia telah memproduksi sebanyak 2.105.400 ton biji *Jatropha Curcas L.* dan 70% dari jumlah itu menjadi limbah residu hasil pemerasan (Ismadji dkk., 2011). Akumulasi dari limbah ini dalam jangka waktu lama akan mengakibatkan masalah lingkungan karena bau yang tidak sedap. Kandungan karbon yang tinggi pada residu hasil pemerasan menjadikan dorongan untuk memproduksi karbon aktif berbasis residu *Jatropha Curcas L.* ini. Ditambah lagi, pemanfaatan limbah yang dihasilkan dapat menghasilkan karbon aktif yang berbahan baku murah dan meminimalisasi masalah lingkungan yang ada.

Untuk mengetahui unjuk kerja adsorpsi pada adsorben berbasis residu *Jatropha Curcas L.* diperlukan adanya suatu model. Suatu model penentuan kinetika dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu model mekanistik dan empiris (Roux dkk., 1991). Model empiris sangat berguna apabila pemahaman sistem terbatas karena model ini hanya menyatakan persamaan berdasarkan input dan output tanpa mengetahui struktur fisik daripada model tersebut (Lith, 2002). Sedangkan, model mekanistik sebagai model yang lebih akurat memerlukan adanya konsep *physicochemical* secara mendetail untuk mendeskripsikan suatu proses secara luas (Roux dkk., 1991).

Dalam penelitian ini, akan diteliti pemodelan dan simulasi mengenai pengaruh adsorpsi batch zat warna pada karbon aktif menggunakan *Homogeneous* dan *Heterogeneous Surface Diffusion Model*. Pemodelan yang bersifat mekanistik ini digunakan untuk memprediksi kinerja yang terjadi pada adsorben berbasis residu *Jatropha Curcas L.* Hasil pemodelan ini akan divalidasi terhadap data yang diperoleh dari hasil eksperimen. Setelah parameter-parameter yang ada telah divalidasi, simulasi dilakukan untuk mengetahui kinerja daripada adsorben yang dihasilkan.



Metodologi

Perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi dinyatakan dalam model matematis berdasarkan penurunan neraca massa. Pemodelan matematis dengan *Heterogeneous Surface Diffusion Model* dan *Homogeneous Surface Diffusion Model* menggunakan asumsi – asumsi berikut :

1. Perpindahan massa terjadi secara radial.
2. Perpindahan massa internal hanya dikendalikan oleh difusi permukaan.
3. Perpindahan massa eksternal terjadi secara konvektif.
4. Partikel adsorben berbentuk bola.
5. Terjadi kesetimbangan konsentrasi adsorbat pada *interface*.

Model juga dibuat dengan cara mengasumsikan kontrol volum berupa kulit bola untuk menjelaskan fluks perpindahan massa yang terjadi. Sedangkan, kesetimbangan dijelaskan dan mengikuti persamaan isothermal Langmuir.

$$q_{s,t} = \frac{Q_o K_L C_{s,t}}{1 + K_L C_{s,t}} \quad (1)$$

Homogeneous Surface Diffusion Model (Homogeneous SDM)

Pada lapisan luar adsorben, perpindahan massa eksternal berbanding lurus dengan selisih konsentrasi pada solut dan pada permukaan luar adsorben (secara konvektif).

$$\frac{dC}{dt} = -k_f \frac{A}{V} (C_t - C_{s,t}) \quad (1)$$

Pada Homogeneous SDM, perpindahan massa dari solute dikontrol oleh fluks perpindahan massa yang terjadi. Untuk partikel berbentuk bola, adsorpsi tipe ini dapat dijelaskan menurut Hukum I Fick (McKay G., 2004)

$$J_s = -\rho_p D \frac{dq}{dr} \quad (2)$$

Persamaan utama pada Homogeneous SDM akan dinyatakan dalam variasi q terhadap jari-jari dan waktu sesuai dengan persamaan (4) yang merupakan persamaan difusivitas.

$$\frac{\partial q}{\partial t} = D_s \left(\frac{\partial^2 q}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial q}{\partial r} \right) \quad (4)$$

Untuk menyelesaikan persamaan. (2) dan (4) dibutuhkan kondisi awal dan kondisi batas berikut:

- $C_t(t = 0) = C_0$
- $q(r, 0) = 0$
- $(C_t - C_{s,t}) = D_s \rho_p \frac{\partial q}{\partial r} \Big|_{r=R}$

Heterogeneous Surface Diffusion Model (Heterogeneous SDM)

Heterogeneous SDM mengasumsikan bahwa partikel dari adsorben akan terdiri lebih dari satu distribusi pori. Dalam kasus ini, makropori akan merepresentasikan fraksi pori yang lebih besar dan mikropori akan merepresentasikan fraksi pori yang lebih kecil. Mekanisme dari Heterogeneous SDM mengikuti persamaan berikut: (Al-Duri B., 2000)

1. Perpindahan massa eksternal dikontrol dengan koefisien perpindahan massa eksternal k_f sesuai persamaan (1)
2. Difusi intrapartikel pada makropori dijelaskan secara difusi solut dan dikontrol dengan koefisien difusivitas D_s

$$f_1 \frac{\partial q_1}{\partial t} = f_1 \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial q_1}{\partial r} r^2 \right) - R_1 \quad (3)$$

3. Difusi pada mikropori dijelaskan secara interaksi pada dinding pori dan molekul-molekul solut. Selanjutnya, laju difusi dari mikropori ini dikontrol oleh koefisien laju mikropori k_1

$$f_2 \frac{\partial q_2}{\partial t} = k_1 (q_1 - q_2) = R_1 \quad (6)$$

4. Persamaan (5) dan (6) akan berhubungan dengan parameter f_1 yang akan merepresentasikan fraksi pada makropori dan f_2 akan merepresentasikan fraksi adsorptivitas pada mikropori sesuai dengan persamaan (7)

$$f_2 = (1 - f_1) \quad (7)$$

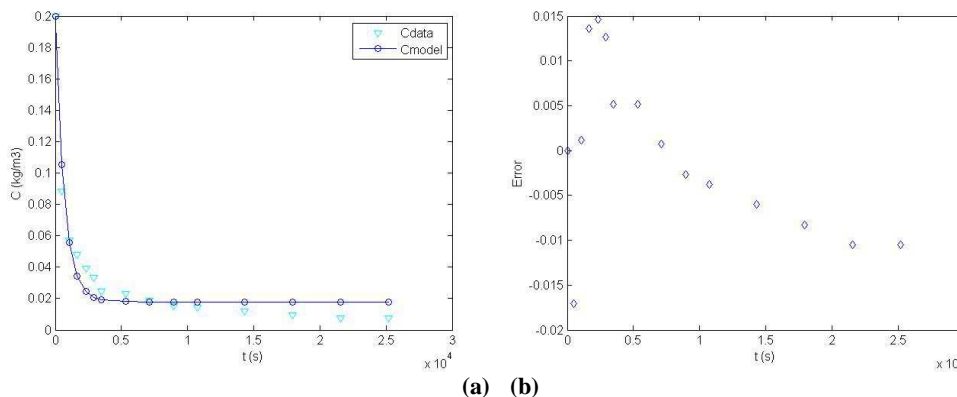
Pada Heterogeneous SDM, kesetimbangan solut akan terjadi pada permukaan padatan adsorben yang dijelaskan menurut isothermal Langmuir pada persamaan (1). Dengan demikian, dibutuhkan kondisi awal dan kondisi batas berikut ini untuk menyelesaikan persamaan

- $q_1(r, 0) = 0$
- $q_2(r, 0) = 0$
- $C_t(t = 0) = C_0$
- $\frac{\partial q_1}{\partial r}(0, t) = 0$
- $k_f (C_t - C_{s,t}) = f_1 D_s \rho_p \frac{\partial q_1}{\partial r} \Big|_{r=R}$

Hasil dan Pembahasan

Homogeneous Surface Diffusion Model (Homogeneous SDM)

Estimasi parameter-parameter Heterogeneous Surface Diffusion Model dilakukan terhadap parameter D_s . Sedangkan nilai k_f , Q_0 , K_L dapat dianggap konstan. Estimasi parameter ini disyaratkan untuk memenuhi error kurang dari 10^{-3} .



Gambar 1. Kurva Estimasi dengan *Homogeneous SDM* untuk JAC-1 pH 7
 (a) Kurva C vs t , (b) Kurva Error

Berdasarkan **Gambar 1(a)**., dapat dilihat adanya dua buah contoh kurva hasil estimasi parameter pada pH 7 untuk JAC-1. Gambar tersebut menunjukkan adanya penyimpangan antara kurva data eksperimen terhadap kurva hasil pemodelan. Hal ini ditunjukkan oleh plot titik-titik C -data tidak sesuai dengan plot titik-titik C -model. Artinya, kinetika yang ditunjukkan oleh model tidak sesuai dengan data eksperimen yang ada. Selanjutnya, koefisien determinasi (R^2) yang dihasilkan sebesar $9.64E-01$ untuk konsentrasi awal $0,2 \text{ kg/m}^3$ dan $9.81E-01$ untuk konsentrasi awal $0,8 \text{ kg/m}^3$. Koefisien determinasi ini masih dibawah < 0.99 yang juga menggambarkan ketidaksesuaian antara model dan data. Ditambah lagi, ketidakcocokan ditunjukkan oleh konsentrasi kesetimbangan yang tidak sama antara C -data dan C -model. **Gambar 1(a)**. menunjukkan konsentrasi kesetimbangan model yang lebih cepat dibandingkan konsentrasi kesetimbangan data. Selain itu, konsentrasi kesetimbangan model (*long tail*) juga masih jauh berada di atas konsentrasi kesetimbangan data.

Pada *Homogeneous SDM*, penyimpangan yang terjadi juga mengindikasikan terbentuknya suatu pola yang sistematis. Error ini didefinisikan sebagai plot-plot yang merupakan pengurangan antara C -data dengan C -model. Berdasarkan **Gambar 1.b**. terlihat bahwa pada waktu awal adsorpsi error mula-mula tinggi (positif) kemudian berangsur-angsur turun terus menerus sampai akhirnya negatif.

Homogeneous SDM menggambarkan bahwa kinetika adsorpsi yang paling lambat terjadi di perpindahan massa eksternal dengan mengganggu seluruh ukuran pori homogen. Berdasarkan estimasi parameter yang telah dilakukan, kinetika adsorpsi pada adsorben JAC-1 dan JAC-3 mungkin tidak dapat dimodelkan oleh *Homogeneous SDM* dengan baik. Secara kuantitatif, koefisien determinasi yang dihasilkan juga dapat dikategorikan rendah. Ditambah lagi, pengamatan visual (grafis) antara model dengan data dan terbentuknya error yang sistematis (mempunyai pola). Oleh karena itu, dapat diduga bahwa asumsi atas ukuran pori homogen yang menjadi ciri dari kinetika *Homogeneous SDM* tidak dapat diimplementasikan pada kedua jenis adsorben.

Heterogeneous Surface Diffusion Model (Heterogeneous SDM)

Estimasi parameter *Heterogeneous SDM* juga dilakukan untuk kedua macam adsorben JAC-1 dan JAC-3 berdasarkan percobaan (Ismadji, *et al.*, 2011). *Heterogeneous SDM* memiliki parameter tebakan yang lebih banyak dibandingkan dengan *Homogeneous SDM*. Estimasi parameter *Heterogeneous SDM* dilakukan pada dua buah parameter yaitu D_s dan k_1 . Nilai k_f , f_1 , Q_0 , K_L dapat dilihat pada **Tabel 1**. dan berubah untuk jenis adsorben yang berbeda. Sedangkan, parameter D_s dan k_1 akan berubah sesuai seiring perubahan konsentrasi. Parameter-parameter ini akan dibahas lebih lanjut dalam validasi parameter. Selanjutnya, estimasi juga dilakukan dengan metode yang sama dengan *Homogeneous SDM* sehingga diperoleh error minimum. Data hasil estimasi parameter *Heterogeneous SDM* dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 1. Konstanta *Heterogeneous SDM*

	f_1	k_f (m/s)	Q_0 (kg/kg)	K_L (m ³ /kg)
JAC-1	3,16E-01	6,64E-05	1,19E-02	2,18E+01
JAC-3	1,88E-01	6,10E-06	1,07E-02	2,63E+01

Tabel 2. Estimasi Parameter *Heterogeneous SDM*

JAC-1					JAC-3				
	D_s (m ² /s)	k_1 (s ⁻¹)	SSE	R ²		D_s (m ² /s)	k_1 (s ⁻¹)	SSE	R ²
pH 3					pH 3				
0,2	3,49E-14	3,59E-11	1,77E-04	9,95E-01	0,2	1,88E-14	3,99E-08	2,76E-04	9,93E-01
0,8	3,62E-13	3,72E-11	9,17E-04	9,80E-01	0,8	5,55E-13	7,69E-07	6,41E-04	9,97E-01
pH 7					pH 7				
0,2	2,18E-14	8,74E-09	2,12E-04	9,94E-01	0,2	2,08E-15	7,62E-10	1,83E-05	9,99E+00
0,8	6,76E-13	4,22E-06	2,60E-04	9,98E-01	0,8	1,42E-13	3,60E-07	8,44E-06	9,99E+00
pH 11					pH 11				
0,2	1,09E-14	8,46E-08	1,14E-04	9,69E-01	0,2	1,27E-14	6,30E-09	8,80E-05	9,98E-01
0,8	6,60E-13	6,77E-06	2,72E-04	9,98E-01	0,8	4,18E-14	5,65E-07	1,45E-05	9,99E+00

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada estimasi parameter, *Homogeneous SDM* terbukti kurang cocok untuk memodelkan sistem adsorpsi pada penelitian ini. Selanjutnya, validasi parameter hanya akan dilakukan untuk model *Heterogeneous SDM*. Validasi ini dilakukan untuk adsorben JAC-1 maupun JAC-3 pada pH 7 dan pH 11 serta konsentrasi 0,5 kg/m³ saja. Konstanta yang digunakan sesuai pada **Tabel 2**. Penentuan parameter-parameter validasi berbeda dengan penentuan parameter-parameter estimasi. Estimasi parameter menggunakan syarat error minimum yang bisa dicapai sehingga diperoleh parameter-parameternya. Namun, validasi parameter menggunakan data-data parameter hasil estimasi untuk membandingkan apakah error bisa dapat diterima. Selain itu, pengamatan juga dilakukan secara grafis antara kurvyang merupakan perbandingan antara C-data hasil eksperimen dengan C-model hasil validasi.

Parameter D_s merupakan koefisien difusivitas efektif permukaan yang menggambarkan laju difusi partikel adsorbat pada permukaan di dalam adsorben. D_s dapat dinyatakan berdasarkan konsentrasi adsorbat berdasarkan korelasi berikut (Danny, dkk., 2002).

$$D_s = D_{s\infty} (q'/q_0)^n \quad (8)$$

Menurut (Danny, dkk., 2002) besaran q' merupakan konsentrasi padatan rata-rata yang tidak berubah untuk tiap set data eksperimen pada jenis adsorben dan kondisi yang sama dan q_0 (konsentrasi jenuh pada fasa padatan) dapat dianggap berbanding lurus dengan C_0 . Berdasarkan korelasi yang dinyatakan oleh persamaan (4.3), dapat dilakukan modifikasi linearisasi logaritmik menjadi persamaan (9)

$$\log D_s = \log D_{s\infty} + n \log C_0 \quad (9)$$

Berdasarkan linearisasi tersebut, koefisien difusivitas permukaan (D_s) akan meningkat pada penambahan konsentrasi awal larutan dengan catatan harga n positif. Oleh karena itu, validasi D_s yang menjadi parameter validasi nilainya dapat diperoleh dengan menggunakan interpolasi logaritmik. Interpolasi logaritmik bisa dilakukan untuk set eksperimen ini karena data estimasi yang hanya terdiri dari dua data percobaan yang masing-masing konsentrasinya 0,2 kg/m³, dan 0,8 kg/m³.

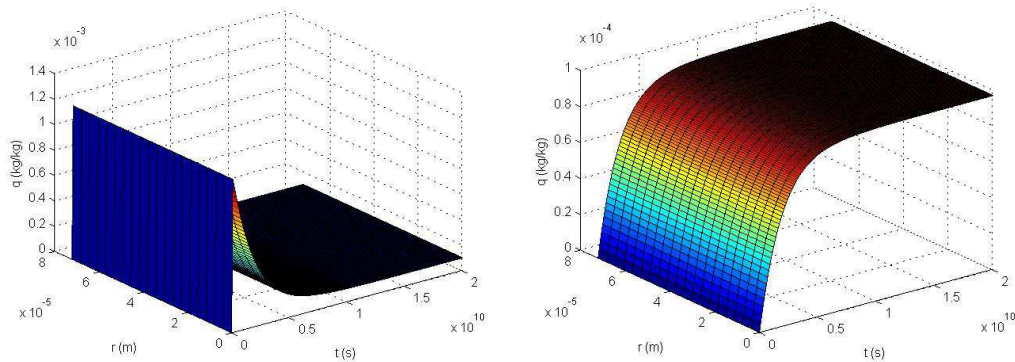
Data estimasi parameter pada **Tabel 2**. menunjukkan kecenderungan yang tepat bahwa nilai D_s akan meningkat pada konsentrasi 0,8 kg/m³ dibandingkan konsentrasi 0,2 kg/m³. Hal ini secara langsung menunjukkan bahwa parameter D_s merupakan fungsi dari konsentrasi awal larutan. Selain itu, nilai D_s akan berubah juga pada kondisi pH dan jenis adsorben yang berbeda.

Parameter k_1 merupakan konstanta perpindahan masa di dalam adsorben. Parameter ini mempunyai karakteristik yang sama dengan parameter D_s dimana harganya akan berubah tergantung konsentrasi larutan di fasa cair. Asumsi ini didasarkan pada bentuk persamaan perpindahan massa dengan *driving force* berupa konsentrasi padatan di makropori dan mikropori sesuai persamaan (6).

Karena karakteristik tersebut, parameter k_1 juga dapat didekati dengan interpolasi logaritmik seperti parameter D_s . Berdasarkan hasil estimasi parameter, harga k_1 meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi larutan. Ini menunjukkan bahwa semakin bertambahnya konsentrasi larutan, konsentrasi padatan di makropori akan semakin besar dan akan mempercepat kesetimbangan antara makropori dan mikropori.

Selain itu harga k_1 juga akan berubah pada pH adsorpsi dan jenis adsorben yang berbeda. Jenis adsorben yang berbeda menggambarkan ada perbedaan fraksi yang ditempati oleh makropori dan mikropori. Sedangkan, nilai k_1 pada persamaan (6) nilainya juga bergantung atau merupakan fungsi dari fraksi makropori (f_1).

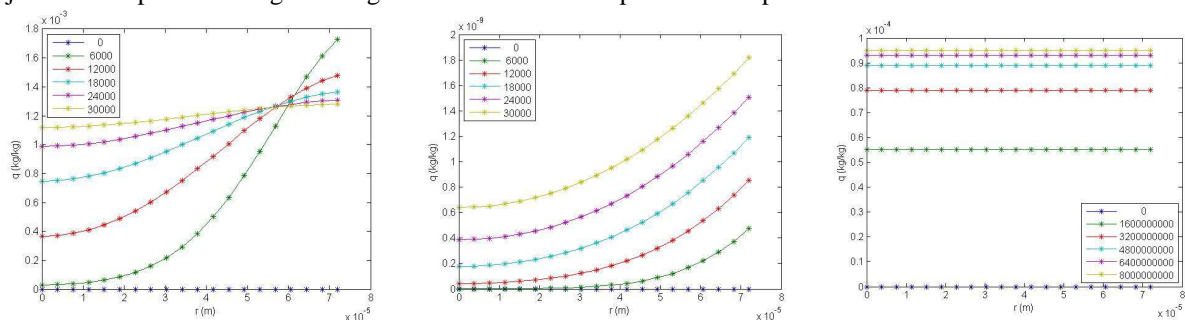
Berdasarkan **Gambar 2(a)**, pada fraksi makropori dapat terlihat bahwa konsentrasi di dalam adsorben mengalami peningkatan singkat terhadap penambahan waktu operasi. Namun, dalam selang waktu tertentu, konsentrasi padatan akan berangsur-angsur turun sebelum akhirnya mencapai konstan. Peningkatan konsentrasi solut di fasa padat (q) karena mula-mula terjadi perpindahan massa zat warna dari permukaan karbon aktif ke fraksi makropori karbon aktif secara difusi molekular sehingga konsentrasi zat warna pada makropori mengalami peningkatan drastis. Perpindahan massa zat warna di dalam partikel adsorben terjadi karena terdapat perbedaan konsentrasi pada permukaan karbon aktif dan makropori.



Gambar 2. Profil Tiga Dimensi untuk JAC-1 pada pH 3

(a) Makropori, (b) Mikropori

Berdasarkan Gambar 2(b), pada fraksi mikropori konsentrasi adsorbat di fasa padat dapat terlihat mula-mula rendah kemudian mengalami peningkatan konsentrasi terus-menerus seperti halnya pada Gambar 2(a). Namun, peningkatan konsentrasi ini tidak diikuti dengan penurunan seperti pada fraksi makropori melainkan langsung konstan di selang waktu yang sama. Hal ini disebabkan oleh terjadinya laju perpindahan massa adsorbat secara kontinu dari makropori ke dalam mikropori adsorben. Laju perpindahan massa zat warna ini dipengaruhi oleh koefisien laju adsorpsi (k_1). Nilai fraksi solut di mikropori akan mencapai konstan pada $t \cong 5$ milyar detik untuk $C_0 = 0,2 \text{ kg/m}^3$ dan $t \cong 0,5$ juta detik untuk $C_0 = 0,8 \text{ kg/m}^3$. Kesetimbangan untuk konsentrasi awal yang tinggi juga akan terjadi lebih cepat dibandingkan dengan konsentrasi rendah pada kondisi pH sama.



Gambar 3. Profil gradien q (kg/kg) vs r (m) untuk JAC-1 pH-3 dengan $C_0 = 0,2 \text{ kg/m}^3$ pada tiap t (s)

(a) Profil Makropori, (b) Profil Awal Mikropori, (c) Profil Akhir Mikropori

Berdasarkan Gambar 3(a), pada waktu nol ($t = 0$) konsentrasi padat seluruhnya dianggap nol akibat adanya kondisi batas (*boundary*) yang menjadi syarat untuk menyelesaikan persamaan diferensial model. Sedangkan, konsentrasi solut di fasa padat pada fraksi makropori untuk rentang waktu awal cenderung meningkat seiring bertambahnya jari-jari adsorben. Semakin lama waktu adsorpsi, gradien yang terbentuk antara q dan r juga semakin kecil dan akhirnya mendekati nol (konsentrasi solut di fasa padat untuk tiap jari-jari sama). Ini disebabkan sudah tidak ada lagi padatan adsorbat yang berpindah dari jari-jari yang lebih luar menuju ke jari-jari yang lebih dalam. Pada kondisi pH dan waktu yang sama, gradien pada $C_0 = 0,2 \text{ kg/m}^3$ lebih besar dibandingkan gradien pada $C_0 = 0,8 \text{ kg/m}^3$. Hal ini menggambarkan bahwa harga konsentrasi awal berbanding terbalik dengan besarnya gradien yang terbentuk.

Seiring bertambahnya jari-jari adsorben (fungsi posisi) terlihat pada selang waktu awal (Gambar 3(b)) terjadi kenaikan konsentrasi adsorbat di sepanjang jari-jari. Artinya jari-jari yang lebih luar memiliki konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan jari-jari yang lebih dalam. Seiring dengan bertambahnya waktu, gradien konsentrasi di sepanjang jari-jari adsorben akan semakin besar pada selang waktu awal. Hal ini disebabkan oleh berpindahnya konsentrasi adsorbat pada makropori menuju mikropori. Dengan kata lain, konsentrasi adsorbat di makropori akan berkurang seiring bertambahnya konsentrasi adsorbat pada mikropori. Setelah waktu adsorpsi yang lama (Gambar 3(c)), gradien konsentrasi sepanjang jari-jari adsorben ini tidak terbentuk lagi.



Kesimpulan

1. *Homogeneous Surface Diffusion Model* kurang sesuai untuk menunjukkan karakteristik perpindahan massa pada adsorpsi berdasarkan *Jatropha Curcas L.*
2. *Heterogeneous Surface Diffusion Model* sesuai untuk menunjukkan karakteristik perpindahan massa pada adsorpsi menggunakan residu *Jatropha Curcas L.*
3. Koefisien difusi permukaan efektif (D_s) dan koefisien laju difusivitas (k_1) merupakan fungsi dari konsentrasi awal larutan zat warna dan jenis adsorben.

Notasi

$q_{s,t}$	= konsentrasi padatan pada permukaan terluar adsorben [kg/kg]	D_p	= diameter adsorben [m]
$C_{s,t}$	= konsentrasi larutan pada permukaan terluar adsorben [kg/m ³]	N	= kecepatan pengadukan [rps]
C_0	= konsentrasi awal larutan [kg/kg]	ρ	= densitas pelarut [kg/m ³]
Q_0	= kapasitas maksimum adsorben [kg/kg]	ρ_p	= densitas padatan [kg/m ³]
K_L	= konstanta Isoterm Langmuir	D_s	= difusivitas permukaan efektif [m ² /s]
k_f	= koefisien perpindahan massa eksternal [m/s]	f_1	= fraksi dari adsorbtifitas total pada makropori
C-model	= konsentrasi solut pada larutan zat warna yang diperoleh dari model [kg/m ³]	$1 - f_1$	= fraksi dari adsorbtifitas total pada mikropori
C-data	= konsentrasi solut pada larutan zat warna yang diperoleh dari eksperimen [kg/m ³]	k_1	= koefisien laju difusivitas dari makropori ke mikropori [s ⁻¹]
V	= volume larutan adsorpsi [m ³]	t	= waktu [s]
W	= massa adsorben [kg]	r	= posisi radial di dalam partikel [m]
T	= suhu operasi [°C]	q_t	= konsentrasi yang teradsorpsi [kg/kg]
R	= jari-jari adsorben [m]	A	= luas permukaan adsorben [m ²]
		q_1	= konsentrasi solut pada makropori [kg/kg]
		q_2	= konsentrasi solute pada mikropori [kg/kg]

Daftar Pustaka

- Bird, B.R. and Stewart W.E., Lightfoot, E.N., 2002, *Transport Phenomena*, 2nd edition, John Wiley and Sons, USA.
- Al-Duri, B. and Xiao-Yan Y., 2000, Application of Branched Pore Diffusion Model in the Adsorption of Reactive Dyes on Activated Carbon, *Chem. Eng. J.*, 83, pp. 15-23.
- Calo, J.M., E.J. Henley, 1984, *Stagewise and Mass Transfer Operations Volume 5 Chromatography, Percolation, Adsorption, and Gas Adsorption, AIChE Instruction Module*, New York, USA.
- Danny C. K. Ko, dkk., 2002, Applications of Multipore Model of the Mechanism Identification during the Adsorption of Dye on Activated Carbon and Bagasse Pith, *Langmuir Vol. 19 No. 3*, pp. 722-730.
- Chapra, S.C., 2012, *Applied Numerical Methods with MATLAB*, 3rd edition, Mc Graw Hill, USA.
- Crittenden, Barry, 1998, *Adsorption Technology and Design*, Elsevier Science and Technology Books, USA.
- Ismadji, dkk., 2011, Potential utilization of *Jatropha Curcas L.* press-cake residue as new precursor for activated carbon preparation: Application in methylene blue removal from aqueous solution, *Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers*.
- Ho, Y., & McKay, G., 2002, Application of Kinetic Models to the Sorption of Copper(II) on to Peat, *Adsorption Science & Technology Vol. 20 No. 8*, pp. 797-815.
- Lith, P. v, 2002, *Hybrid Fuzzy-First Principles Modeling*, Enschede, Twente University Press, Holland.
- Matthews, J.H., 1987, *Numerical Methods for Computer Science, Engineering, and Mathematics*, Prentice-Hall Inc., New York.
- Matthews, J.H & Fink, K.K., 1987, *Numerical Methods Using Matlab 4th Edition*, Prentice-Hall Inc., New York
- McKay, G., Vinci K.C., 2004, Comparison of Solutions for the Homogeneous Surface Diffusion Model Applied to Adsorption Systems, *Chem. Eng. J.*, 98, pp. 255-264.
- Miller, R.E., 2000, *Optimization Foundations and Applications*. John Wiley and Sonds Inc., New York
- Rakoczy, R., Stanislaw Maisuk., 2011, Forced Convection Mass-Transfer Enhancement in Mixing Systems, Institute of Chemical Engineering and En West Pomeranian University of Technology, Poland.
- Ruthven, D.M., 1984, *Principle of Adsorption and Adsorption Processes*, John Wiley and Sons, USA.
- Sadikul, M.N.O, C.N Obiozor, 1998, "A Simple Introduction to the Method of Lines", Department of Electrical and Computer Engineering, Temple University, Philadelphia dan Department of Electrical Engineering, University of North Florida, Jacksonville, USA.
- Seader, J.D., Ernest J.H., 2006, *Separation Process Principles*, John Wiley and Sons, USA.
- Worch, Eckhard, 2012, *Adsorption Technology in Water Treatment*, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin/Boston





Lembar Tanya Jawab

Moderator : Didi Dwi Anggoro (Universitas Diponegoro Semarang)

Notulen : Susanti Rina Nugraheni (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : Hendriyana (Universitas Jenderal Ahmad Yani Bandung)
Pertanyaan : Apa bedanya homogeneous dan heterogeneous SDM ?
Jawaban : Hetero : lebih dari 1 ukuran pori
Homo : ukuran pori sama

