

Perjanjian No: III/LPPM/2013-03/02-P

**PEMODELAN PERPINDAHAN MASSA ADSORPSI ZAT WARNA  
PADA FLORISIL DAN SILICA GEL DENGAN HOMOGENEOUS  
AND HETEROGENEOUS SURFACE DIFFUSION MODEL**

**Disusun Oleh:  
Aditya Putranto, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D.  
Stephanie Angelina, S.T.**



**Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat  
Universitas Katolik Parahyangan  
2014**

## DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Lembar Pengesahan.....	ii
Surat Pernyataan.....	iii
Kata Pengantar.....	iv
Daftar Isi.....	v
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel.....	x
<i>Abstract</i> .....	xi
Intisari.....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tema Sentral Masalah.....	3
1.3 Identifikasi Masalah.....	3
1.4 Premis.....	3
1.5 Hipotesis.....	4
1.6 Tujuan Penelitian.....	4
1.7 Manfaat Penelitian.....	5
1.8 Pembatasan Masalah.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>6</b>
2.1 Karbon Aktif.....	6
2.1.1 Sifat Fisik dan Sifat Kimia Karbon Aktif.....	6
2.1.2 Proses Pembuatan Karbon Aktif.....	9
2.1.3 Aplikasi Penggunaan Karbon Aktif.....	11
2.1.4 Regenerasi Karbon Aktif.....	12

2.2	Teori Adsorpsi .....	14
2.3	Adsorbat .....	17
2.4	Keseimbangan Adsorpsi.....	21
2.5	Kinetika Adsorpsi .....	25
2.6	Perpindahan Massa ( <i>Mass Transfer</i> ) .....	27
	2.6.1 <i>Lumped Model</i> .....	28
	2.6.2 <i>Distributed Model</i> .....	29
	2.6.3 Perpindahan Massa Internal dan Eksternal .....	30
2.7	Persamaan Sherwood .....	35
2.8	Metode Numerik .....	36
<b>BAB III BAHAN DAN METODE .....</b>		<b>40</b>
3.1	Rancangan Penelitian.....	40
3.2	Bahan Penelitian .....	40
3.3	Peralatan .....	41
3.4	Metode Penyelesaian.....	41
	3.4.1 Percobaan Pendahuluan .....	41
	3.4.1.1 Penentuan $pH_{pzc}$ .....	41
	3.4.1.2 Penentuan $\lambda$ maksimum .....	43
	3.4.1.3 Penentuan Kurva Standar .....	43
	3.4.2 Percobaan Utama.....	44
3.5	Pengolahan Data (Algoritma Perhitungan).....	45
3.6	Lokasi dan Rencana kerja.....	47
<b>BAB IV HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>49</b>
4.1	Percobaan Pendahuluan .....	49
	4.1.1 Penentuan $pH_{pzc}$ .....	49
	4.1.2 Penentuan $\lambda$ maksimum.....	50

4.1.3	Penentuan kurva standar.....	53
4.2	Percobaan Utama .....	55
4.2.1	Profil konsentrasi.....	56
4.2.1.1	Profil Cmodel dan Cdata terhadap waktu .....	56
4.2.1.2	Profil konsentrasi solut di fasa padatan pada <i>macropore</i> ( $q_m$ ) terhadap waktu dan posisi.....	58
4.2.1.3	Profil konsentrasi solut di fasa padatan pada <i>micropore</i> ( $q_b$ ) terhadap waktu.....	61
4.2.2	Pengaruh T terhadap parameter $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan f .....	62
4.2.3	Pengaruh $C_0$ terhadap parameter $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan f.....	65
4.2.4	Pengaruh jenis zat warna terhadap $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan f.....	67
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>		<b>70</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>71</b>
<b>LAMPIRAN A</b>	<b>MSDS.....</b>	<b>74</b>
<b>LAMPIRAN B</b>	<b>DATA PERCOBAAN .....</b>	<b>78</b>
<b>LAMPIRAN C</b>	<b>HASIL ANTARA DAN GRAFIK.....</b>	<b>85</b>
<b>LAMPIRAN D</b>	<b>SCRIPT MATLAB.....</b>	<b>119</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Distribusi ukuran pori dari karbon aktif .....	7
Gambar 2.2	Bentuk dari karbon aktif .....	9
Gambar 2.3	Proses adsorpsi dengan karbon aktif .....	15
Gambar 2.4	Struktur molekul <i>methylene blue</i> .....	17
Gambar 2.5	Struktur molekul <i>acid red 114</i> .....	18
Gambar 2.6	Struktur molekul <i>basic red 22</i> .....	18
Gambar 2.7	Struktur molekul <i>acid blue 80</i> .....	18
Gambar 2.8	Struktur molekul <i>basic blue 69</i> .....	19
Gambar 2.9	Struktur molekul <i>methyl orange</i> .....	20
Gambar 2.10	Perubahan warna pada <i>methyl orange</i> .....	20
Gambar 2.11	Grafik klasifikasi isoterm adsorpsi.....	23
Gambar 2.12	Profil konsentrasi ( <i>lumped model</i> ) .....	28
Gambar 2.13	Kurva kesetimbangan .....	29
Gambar 2.14	Profil konsentrasi ( <i>distributed model</i> ).....	30
Gambar 2.15	Profil konsentrasi ( <i>combined model</i> ).....	31
Gambar 3.1	Prosedur penentuan $pH_{pzc}$ .....	42
Gambar 3.2	Prosedur penentuan $\lambda$ maksimum dengan spektrofotometer....	43
Gambar 3.3	Prosedur penentuan kurva kalibrasi spektrofotometer .....	44
Gambar 3.4	Prosedur penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi	45
Gambar 3.5	Algoritma perhitungan secara numerik .....	47
Gambar 4.1	Grafik penentuan $pH_{pzc}$ .....	50
Gambar 4.2	Kurva penentuan $\lambda$ maksimum larutan <i>methylene blue</i> .....	51
Gambar 4.3	Kurva penentuan $\lambda$ maksimum larutan <i>methyl orange</i> .....	53
Gambar 4.4	Kurva standar <i>methylene blue</i> .....	54
Gambar 4.5	Kurva standar <i>methyl orange</i> .....	54
Gambar 4.6	Grafik C vs t <i>methylene blue</i> ( $C_0=10$ ppm dan $T=50^\circ C$ ).....	57

Gambar 4.7	Grafik $C$ vs $t$ <i>methyl orange</i> ( $C_0=10$ ppm dan $T=50^\circ\text{C}$ ).....	57
Gambar 4.8	Grafik $q$ vs $t$ <i>methylene blue</i> ( $C_0=10$ ppm dan $T=50^\circ\text{C}$ ) .....	59
Gambar 4.9	Grafik $q$ vs $t$ <i>methyl orange</i> ( $C_0=10$ ppm dan $T=50^\circ\text{C}$ ) .....	59
Gambar 4.10	Grafik $q_m$ vs $t$ dan $r$ <i>methylene blue</i> ( $C_0=10$ ppm dan $T=50^\circ\text{C}$ )	60
Gambar 4.11	Grafik $q_m$ vs $t$ dan $r$ <i>methyl orange</i> ( $C_0=10$ ppm dan $T=50^\circ\text{C}$ ).	61

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi pori pada karbon aktif .....	7
Tabel 2.2	Komposisi kimia karbon dari kayu keras.....	9
Tabel 2.3	Jenis dan karakteritik adsorben .....	15
Tabel 2.4	Perbedaan adsorpsi fisika dengan adsorpsi kimia .....	16
Tabel 3.1	Rencana kerja penelitian .....	48
Tabel 4.1	pH larutan.....	49
Tabel 4.2	Nilai %T pada berbagai $\lambda$ untuk <i>methylene blue</i> .....	51
Tabel 4.3	Nilai %T pada berbagai $\lambda$ untuk <i>methyl orange</i> .....	52
Tabel 4.4	Nilai $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan $f$ untuk <i>methylene blue</i> .....	62
Tabel 4.5	Nilai $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan $f$ untuk <i>methyl orange</i> .....	63

## ABSTRACT

Adsorption process has been extensively applied in many industries for impurities removal and waste water treatment. Activated carbon is one of the most effective adsorbent which is used in adsorption process. Activated carbon has complex structure, that's why mass transfer characteristics of adsorption process using activated carbon have to be investigated by using model. Mass transfer is influenced by types of adsorbate, initial concentration of dye solution, and temperature.

The objectives of this research are to study mass transfer phenomena occurred in dyes adsorption using activated carbon, to determine values of Heterogenous Surface Diffusion Model parameters, such as external liquid film mass transfer coefficient ( $k_f$ ), surface diffusion coefficient ( $D_s$ ), branched pore rate coefficient ( $k_b$ ), and fraction of total adsorptive capacity in macropores ( $f$ ), and to study the effects of adsorbate types, initial concentration of dye solution, and temperature to the values of  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , and  $f$ .

This research was carried out by using 2 types of adsorbate, 3 variation of initial concentration, and 4 variation of temperature. Adsorption experiment was carried out in shaking waterbath that had been setted in certain operating condition. Concentration of dye solutions in certain time interval was determined by measuring absorbance using UV spectrophotometer. Analysis procedures of experimental data in this research consist of several steps: arranging model based on adsorption phenomena, finishing model that consists of differential equations, validation between experimental data and model, and determining values of Heterogenous Surface Diffusion Model parameters.

The results of this research show that the values of  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$  are influenced by types of adsorbate, initial concentration of dye solution, and temperature; if initial concentration increases, the values of  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$  will increase; if temperature increases, the values of  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$  will increase; the values of  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$  for methylene blue solution are greater than methyl orange; the value of  $f$  is not influenced by types of adsorbate, initial concentration of dye solution, and temperature; and Heterogenous Surface Diffusion Model is suitable to show mass transfer characteristics that occurs in dyes adsorption using activated carbon.



## INTISARI

Proses adsorpsi merupakan proses yang banyak digunakan dalam dunia industri baik untuk pemurnian maupun pengolahan limbah. Karbon aktif merupakan adsorben yang efektif digunakan dalam proses adsorpsi. Karbon aktif mempunyai struktur kompleks sehingga perpindahan massa proses adsorpsi dengan karbon aktif tersebut perlu dikaji karakteristiknya dengan model. Perpindahan massa tersebut dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis adsorbat, konsentrasi awal larutan adsorbat, dan temperatur.

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari fenomena perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif, menentukan parameter-parameter *external liquid film mass transfer coefficient* ( $k_f$ ), *surface diffusion coefficient* ( $D_s$ ), *branched pore rate coefficient* ( $k_b$ ), dan *fraction of total adsorptive capacity in macropores* ( $f$ ) dalam *Heterogenous Surface Diffusion Model*, dan mempelajari pengaruh jenis zat warna, konsentrasi awal larutan zat warna, dan temperatur terhadap parameter-parameter  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$ .

Penelitian ini dilakukan dengan percobaan utama, yaitu penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi. Percobaan adsorpsi dilakukan dengan 2 jenis zat warna, 3 variasi konsentrasi awal larutan zat warna, dan 4 variasi temperatur. Percobaan dilakukan dengan menggunakan *shaking waterbath*. Konsentrasi larutan ( $C$ ) diamati tiap selang waktu tertentu dengan pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer. Prosedur pengolahan dan analisa data percobaan dalam penelitian ini meliputi penyusunan model berdasarkan fenomena yang terjadi, penyelesaian model yang berupa persamaan diferensial, validasi data percobaan dengan data model berdasarkan fenomena yang terjadi dalam adsorpsi, serta penentuan parameter-parameter perpindahan massa pada *Heterogenous Surface Diffusion Model*.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh kesimpulan yaitu parameter-parameter  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$  dipengaruhi oleh jenis adsorbat, konsentrasi awal larutan adsorbat, dan temperatur, nilai  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$  semakin tinggi jika konsentrasi awal larutan adsorbat semakin tinggi, nilai  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$  semakin tinggi jika temperatur semakin tinggi, nilai  $f$  tidak dipengaruhi oleh jenis adsorbat, konsentrasi awal larutan adsorbat, dan temperatur. Selain itu, dapat disimpulkan bahwa *Heterogenous Surface Diffusion Model* cocok untuk menunjukkan karakteristik perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada zaman sekarang ini, dunia industri telah mengalami perkembangan yang sangat pesat. Di Indonesia terdapat berbagai macam jenis industri, seperti industri minyak, industri tekstil, industri besi baja, industri makanan, industri obat-obatan, dan industri lainnya. Dari berbagai macam industri tersebut, industri minyak dan industri tekstil banyak mendapat sorotan karena minyak dan tekstil merupakan kebutuhan pokok yang penting dalam kehidupan manusia.

Dalam industri minyak, diperlukan adanya proses pemurnian minyak. Tujuan utama dari proses pemurnian minyak adalah menghilangkan bau, menghilangkan warna, dan memperpanjang masa simpan minyak sebelum dikonsumsi atau digunakan sebagai bahan mentah dalam industri. Minyak yang digunakan untuk bahan pangan dimurnikan melalui beberapa tahap proses, salah satunya adalah dekolorisasi dengan proses pemucatan (*bleaching*). *Bleaching* merupakan suatu tahap proses pemurnian untuk menghilangkan zat-zat warna yang tidak disukai dalam minyak.<sup>[1]</sup> Pemucatan minyak ini dapat dilakukan dengan metode adsorpsi, yaitu mencampur minyak dengan sejumlah adsorben, seperti tanah serap (*fuller earth*), lempung aktif (*activated clay*), dan karbon aktif (*activated carbon*). Dengan demikian proses adsorpsi memegang peranan penting dalam peningkatan kualitas dan nilai jual minyak sehingga mekanisme adsorpsi untuk menghilangkan zat warna perlu diteliti lebih lanjut.

Dalam industri tekstil, digunakan zat warna dalam proses produksi untuk menghasilkan tekstil dengan kualitas yang baik. Namun, penggunaan zat warna dalam industri tekstil memberikan dampak negatif, yaitu pencemaran air oleh limbah cair dari industri tekstil. Limbah cair dari industri tekstil umumnya masih mengandung zat warna yang berbahaya bagi air, seperti air sungai, air laut, dan lain-lain. Oleh karena itu, perlu dilakukan

pengolahan terlebih dahulu terhadap limbah cair dari industri tekstil, yaitu dengan menghilangkan zat warna yang terkandung dalam limbah cair tersebut. Terdapat berbagai macam metode yang dapat digunakan untuk menghilangkan zat warna, antara lain : flokulasi, koagulasi, presipitasi, adsorpsi, filtrasi dengan membran, teknik elektrokimia, ozonisasi, dan dekolorisasi.<sup>[2]</sup> Adsorpsi merupakan metode yang umum digunakan dalam penghilangan zat warna pada limbah cair industri tekstil.

Adsorpsi merupakan metode pemurnian yang banyak digunakan dalam industri minyak dan industri tekstil karena metode ini dinilai efektif dalam menghilangkan zat warna.<sup>[1][2][3]</sup> Proses penghilangan zat warna ini sangat bergantung kepada jenis adsorben yang digunakan. Penghilangan zat warna dengan berbagai macam jenis adsorben, seperti silika, chitosan, tanah serap (*fuller earth*), dan *peat* telah dilakukan.<sup>[3]</sup> Namun, adsorpsi dengan adsorben berupa karbon aktif tetap menjadi salah satu teknik paling efisien dan efektif dalam penghilangan zat warna.<sup>[2][3]</sup> Dalam penelitian ini dilakukan adsorpsi padat-cair dengan adsorben berupa karbon aktif.

Untuk mendesain dan mengoperasikan proses adsorpsi secara efisien diperlukan pembelajaran mengenai kesetimbangan adsorpsi, kinetika adsorpsi, dan proses perpindahan massa yang terjadi pada adsorpsi.<sup>[2][3][4]</sup> Terdapat berbagai macam model yang digunakan untuk menunjukkan atau memprediksi kinetika adsorpsi berdasarkan fenomena yang terjadi dalam adsorpsi. Suatu model untuk adsorpsi padat-cair memerlukan hubungan antara kesetimbangan padat-cair, neraca massa, dan hubungan-hubungan perpindahan massa secara difusi. Model yang biasa digunakan dalam adsorpsi padat-cair, yaitu film-pore diffusion model dan pore-surface diffusion model. Pada penelitian ini akan digunakan *Heterogenous Surface Diffusion Model*, dimana karbon aktif dianggap memiliki distribusi ukuran pori, ada ukuran pori yang besar (*macropore*) dan ada ukuran pori yang kecil (*micropore*).<sup>[3]</sup> Data percobaan yang diperoleh akan diolah untuk menentukan parameter-parameter yang belum diketahui dalam model yang digunakan.

## 1.2 Tema Sentral Masalah

**Tema sentral masalah pada penelitian ini adalah karbon aktif mempunyai struktur yang kompleks (struktur pori yang berbeda) sehingga perpindahan massa proses adsorpsi dengan karbon aktif tersebut perlu dikaji karakteristiknya dengan model.**

## 1.3 Identifikasi Masalah

Permasalahan yang melatarbelakangi penelitian ini adalah

1. Bagaimana mekanisme perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif?
2. Model apakah yang cocok untuk menunjukkan karakteristik perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif?
3. Berapa harga parameter-parameter *external liquid film mass transfer coefficient* ( $k_f$ ), *surface diffusion coefficient* ( $D_s$ ), *branched pore rate coefficient* ( $k_b$ ), dan *fraction of total adsorptive capacity in macropores* ( $f$ ) dalam *Heterogenous Surface Diffusion Model*?
4. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi awal solut di fasa cair ( $C_0$ ) dan temperatur operasi ( $T$ ) terhadap harga parameter-parameter ( $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$ ) dalam *Heterogenous Surface Diffusion Model*?
5. Bagaimana perbandingan antara difusi yang terjadi pada *macropore* dengan difusi yang berlangsung pada *micropore*?

## 1.4 Premis

Dari studi literatur yang dilakukan diketahui bahwa

1. Variabel-variabel yang mempengaruhi adsorpsi : konsentrasi awal solut di fasa cair ( $C_0$ ), massa dan ukuran adsorben yang digunakan, temperatur operasi ( $T$ ), jenis solut, kecepatan pengadukan (rpm), dan pH larutan<sup>[5]</sup>.
2. Temperatur yang digunakan untuk proses adsorpsi dengan karbon aktif adalah  $20 \pm 2$  °C<sup>[3][4][7]</sup>,  $25 \pm 5$  °C<sup>[6]</sup>,  $25$  °C<sup>[5]</sup>,  $25 \pm 1$  °C<sup>[8]</sup>,  $30$  °C<sup>[2]</sup>,  $40$  °C<sup>[2]</sup>,  $50$  °C<sup>[2]</sup>.
3. Ukuran karbon aktif yang digunakan untuk adsorpsi antara  $500-710\mu\text{m}$ <sup>[3][4][7]</sup>,  $30\mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>,  $15-20\mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>.
4. Konsentrasi awal larutan zat warna yang digunakan dalam proses adsorpsi adalah  $50\text{ mg/L}$ <sup>[3][10]</sup>,  $75\text{ mg/L}$ <sup>[3]</sup>,  $100\text{ mg/L}$ <sup>[3][10]</sup>,  $150\text{ mg/L}$ <sup>[3][10]</sup>,  $200$

mg/L<sup>[3][6][10]</sup>, 250 mg/L<sup>[3][10]</sup>, 300 mg/L<sup>[2][3][10]</sup>, 400 mg/L<sup>[2][6]</sup>, 500 mg/L<sup>[2][6]</sup>, 600 mg/L<sup>[2][6]</sup>, 800 mg/L<sup>[6]</sup>.

5. Massa adsorben yang digunakan dalam proses adsorpsi sebanyak 0.4 g<sup>[3][7]</sup>, 0.8 g<sup>[3][7]</sup>, 1.2 g<sup>[3][7]</sup>, 1.7 g<sup>[3][4][7][10]</sup>, 2.2 g<sup>[3][7]</sup>, 2.125 g<sup>[10]</sup>, 2.55 g<sup>[10]</sup>.
6. Kecepatan pengadukan yang digunakan dalam adsorpsi sebesar 150 rpm<sup>[6]</sup>, 125 rpm<sup>[2]</sup>, 400 rpm<sup>[4][5][7]</sup>.
7. Pengukuran adsorban dari *methylene blue* pada panjang gelombang ( $\lambda$ ) antara 630-651 nm<sup>[6]</sup>, *acid blue* 80 pada  $\lambda_{maks} = 626$  nm<sup>[3][4]</sup>, *acid yellow* 117 pada  $\lambda_{maks} = 438$  nm<sup>[4]</sup>, *acid red* 114 pada  $\lambda_{maks} = 522$  nm<sup>[3]</sup>, *basic red* 22 pada  $\lambda_{maks} = 538$  nm<sup>[3]</sup>, dan *basic blue* 69 pada  $\lambda_{maks} = 585$  nm<sup>[3]</sup>.

## 1.5 Hipotesis

1. *Heterogenous Surface Diffusion Model* cocok untuk menunjukkan karakteristik perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif.
2. *Surface Diffusion Coefficient* (Ds) dipengaruhi oleh konsentrasi solut di fasa cair ( $C_0$ ) dan temperatur operasi (T).
3. *Pore structure* pada karbon aktif mempengaruhi mekanisme perpindahan massa pada proses adsorpsi.
4. Difusi yang terjadi pada *micropore* lebih signifikan dibandingkan dengan difusi yang berlangsung pada *macropore*.

## 1.6 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah

1. Mempelajari fenomena perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif.
2. Menentukan parameter-parameter *external liquid film mass transfer coefficient* (kf), *surface diffusion coefficient* (Ds), *branched pore rate coefficient* (kb), dan *fraction of total adsorptive capacity in macropores* (f) dalam *Heterogenous Surface Diffusion Model*.
3. Mempelajari faktor-faktor yang mempengaruhi *external liquid film mass transfer coefficient* (kf), *surface diffusion coefficient* (Ds), *branched pore*

*rate coefficient* ( $k_b$ ), dan *fraction of total adsorptive capacity in macropores* ( $f$ ).

### 1.7 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini, antara lain

1. Bagi mahasiswa: menambah pengetahuan mengenai karakteristik perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif dengan menggunakan *Heterogenous Surface Diffusion Model* dan menambah pengetahuan mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi *external liquid film mass transfer coefficient* ( $k_f$ ), *surface diffusion coefficient* ( $D_s$ ), *branched pore rate coefficient* ( $k_b$ ), dan *fraction of total adsorptive capacity in macropores* ( $f$ ).
2. Bagi industri : membantu industri tekstil dalam pengolahan limbah cair terutama yang mengandung zat warna agar tidak mencemari dan merusak lingkungan. Selain itu, membantu industri minyak dalam proses pemurnian minyak dengan menghilangkan zat warna yang terkandung dalam minyak tersebut sehingga meningkatkan kualitas dan nilai jual dari minyak tersebut. Dengan proses adsorpsi yang telah didesain dan dipelajari karakteristiknya dengan baik akan memberikan hasil yang efektif dan efisien.
3. Bagi pemerintah : membantu pemerintah untuk menangani permasalahan pengolahan limbah cair yang dihasilkan oleh industri sehingga dapat meminimalkan terjadinya pencemaran air yang disebabkan oleh limbah cair industri. Selain itu, peningkatan kualitas dan nilai jual minyak dapat memicu peningkatan perekonomian Indonesia ke arah yang lebih baik.

### 1.8 Pembatasan Masalah

1. Proses adsorpsi dilangsungkan secara isothermal.
2. Proses adsorpsi dilakukan dengan menggunakan reaktor batch.
3. Adsorben yang digunakan pada proses adsorpsi adalah karbon aktif.
4. Solut yang digunakan pada proses adsorpsi adalah zat warna.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Karbon Aktif**

Karbon aktif merupakan zat padat amorf yang mempunyai luas permukaan internal dan volume pori yang sangat besar.<sup>[11]</sup> Karbon aktif dapat digunakan sebagai adsorben dalam proses adsorpsi. Adsorben adalah zat padat yang digunakan untuk mengadsorp atom-atom atau ion-ion (disebut juga solut) yang terkandung dalam gas atau cairan. Kriteria-kriteria adsorben yang baik, antara lain<sup>[12]</sup>:

- a. memiliki selektivitas tinggi untuk proses pemisahan
- b. memiliki kapasitas tinggi untuk meminimalisasi jumlah adsorben yang diperlukan
- c. memiliki sifat fisik dan sifat kimia yang mendukung proses perpindahan massa secara cepat.
- d. memiliki stabilitas kimia dan termal, serta sifat kelarutan yang rendah terhadap fluida yang kontak dengan adsorben
- e. memiliki ketahanan secara fisik dan mekanik
- f. tidak memiliki kecenderungan untuk mendorong terjadinya reaksi-reaksi kimia yang tidak dikehendaki
- g. memiliki kemampuan untuk diregenerasi
- h. memiliki harga yang relatif murah

##### **2.1.1 Sifat Fisik dan Sifat Kimia Karbon Aktif**

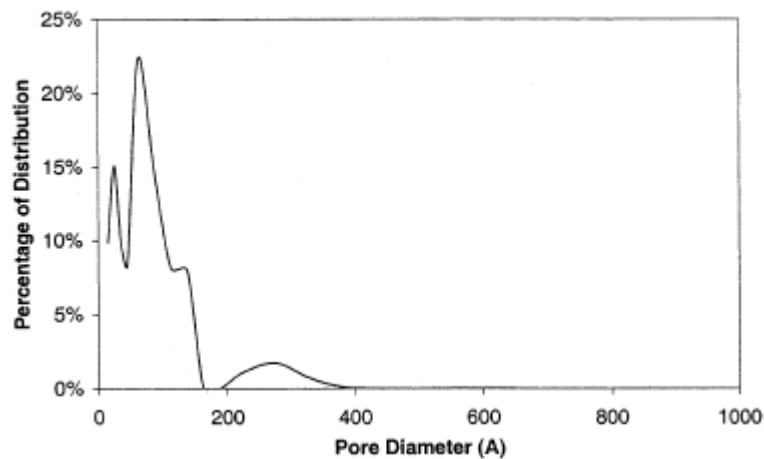
Struktur dari karbon aktif dapat didefinisikan sebagai jaringan berliku-liku dari lapisan karbon, yang dihubungkan secara silang oleh ikatan gugus alifatik. Pola difraksi sinar X dari karbon aktif menunjukkan bahwa karbon aktif memiliki struktur yang tidak teratur (amorf) disebabkan oleh jaringan silang acak yang menghambat teraturnya struktur karbon aktif walaupun dipanaskan hingga 3000<sup>0</sup>C.<sup>[11]</sup> Properti dari karbon aktif tersebut memberikan keunikan, yaitu

struktur pori internal karbon aktif yang dapat dikembangkan dan dapat dilalui oleh zat tertentu (solut). Luas permukaan, dimensi, dan distribusi pori pada karbon aktif bergantung pada kondisi dari proses karbonisasi dan aktivasi. Ukuran pori telah diklasifikasi menjadi 3 oleh International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Klasifikasi ukuran pori pada karbon aktif ditunjukkan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1** Klasifikasi pori pada karbon aktif <sup>[11][13]</sup>

Jenis pori	Ukuran pori
<i>micropore</i>	< 2nm
<i>mesopore</i>	2 – 50nm
<i>macropore</i>	> 50nm

Distribusi ukuran pori pada karbon aktif dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Pada Gambar 2.1 dapat dilihat bahwa sebagian besar pori pada karbon aktif adalah *mesopore* dan *micropore*.



**Gambar 2.1** Distribusi ukuran pori dari karbon aktif <sup>[3]</sup>

Luas permukaan dari karbon aktif umumnya ditentukan dengan menggunakan model adsorpsi fisika *Brunauer-Emmett-Teller* (BET). Prinsip dari model BET ini adalah penyerapan nitrogen pada titik didih normal  $N_2$  ( $-196^{\circ}C$ ) dengan mengukur volume kesetimbangan dari  $N_2$  cair yang terserap oleh sejumlah adsorben pada beberapa tekanan total vakum antara 5 sampai dengan 250 mmHg.



Produk komersial karbon aktif memiliki luas permukaan spesifik antara 500-2000m<sup>2</sup>/g, tetapi seiring perkembangan teknologi telah dikembangkan pula karbon aktif dengan luas permukaan spesifik antara 3500-5000m<sup>2</sup>/g. Secara umum, luas permukaan efektif karbon aktif dengan *micropores* jauh lebih kecil karena pada *micropores* tidak terjadi penyerapan (adsorpsi) nitrogen berdasarkan asumsi yang digunakan pada proses dalam model BET. Kapasitas adsorpsi dan laju adsorpsi bergantung pada luas permukaan internal, distribusi ukuran dan bentuk pori, serta dipengaruhi juga oleh permukaan kimia dari karbon aktif. Pori-pori makro dari karbon memegang peranan penting dalam perpindahan molekul-molekul adsorbat menuju *adsorption sites* dalam partikel.<sup>[11]</sup>

Karbon aktif mempunyai kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap polutan organik yang mengalami peningkatan dari kompleksitas gugus fungsional. Pada permukaan karbon aktif dapat terjadi proses oksidasi yang menghasilkan gugus fungsional yang menyebabkan karbon bersifat amfoter (dapat bersifat asam atau basa). Permukaan karbon aktif mengandung setidaknya lima tipe gugus kimia, seperti gugus karboksilat, gugus laktonik, gugus fenolik, gugus karbonil, dan gugus eter.<sup>[3]</sup> Gugus-gugus fungsional tersebut terbentuk selama proses aktivasi dari karbon melalui interaksi antara radikal bebas pada permukaan karbon dengan atom-atom yang terkandung dalam udara, seperti oksigen dan nitrogen. Terbentuknya gugus fungsional ini mengakibatkan permukaan karbon aktif menjadi reaktif dan mempengaruhi kemampuan adsorpsinya.<sup>[11]</sup> Perbedaan gugus kimia yang terdapat pada karbon aktif ini menyebabkan karbon aktif jauh lebih efektif untuk digunakan sebagai adsorben dibandingkan dengan adsorben lainnya. Karbon aktif memperlihatkan kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap ion H<sup>+</sup> dan OH<sup>-</sup>. Sifat tersebut menyebabkan karbon aktif menunjukkan kereaktifan terhadap banyak adsorbat organik dan anorganik.<sup>[3]</sup>

Secara umum, karbon aktif memiliki afinitas rendah terhadap air (bersifat hidrofobik) dan memiliki luas permukaan spesifik yang besar sehingga berguna bagi proses-proses yang melibatkan molekul-molekul organik yang bersifat non polar dan sedikit polar. Namun, adanya gugus fungsional pada permukaan karbon

menyebabkan karbon aktif dapat berinteraksi dengan air sehingga permukaan karbon lebih hidrofilik.<sup>[11]</sup> Bentuk dari karbon aktif ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Bentuk dari karbon aktif<sup>[14]</sup>

### 2.1.2 Proses Pembuatan Karbon Aktif

Karbon merupakan bahan padat yang berpori-pori dan umumnya diperoleh dari hasil pembakaran kayu atau bahan lain yang mengandung unsur karbon (C).<sup>[1]</sup> Sumber lain dari karbon dapat berasal dari bahan nabati maupun hewani, antara lain serbuk gergaji, ampas tebu, tempurung kelapa, tongkol jagung, tulang, dan lain-lain.<sup>[1][3][12]</sup> Karbon umumnya memiliki daya adsorpsi yang rendah terhadap zat warna. Daya adsorpsi tersebut dapat ditingkatkan dengan cara mengaktifkan karbon dengan menggunakan uap atau bahan kimia. Komposisi kimia karbon dari kayu keras dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Komposisi kimia karbon dari kayu keras<sup>[1]</sup>

Komponen (%)	Dikeringkan oleh udara	Dikeringkan oleh oven
Air	9,9	-
Bahan volatil	8,1	9,0
Abu	2,0	2,2
<i>Fixed carbon</i>	80,0	88,8

Proses pembuatan karbon aktif terdiri dari 2 bagian, yaitu:

1. Proses karbonisasi<sup>[1]</sup>

Proses karbonisasi umumnya dilakukan pada suhu 600-700<sup>0</sup>C. Pada proses karbonisasi akan terjadi penguapan air (H<sub>2</sub>O) yang disusul

dengan pelepasan gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) dan selanjutnya terjadi peristiwa eksotermis yang merupakan tahap permulaan proses karbonisasi. Karbonisasi dianggap sempurna jika asap sudah tidak terbentuk lagi. Kualitas hasil karbonisasi ditentukan oleh banyaknya kandungan karbon, semakin tinggi kandungan karbon maka kualitasnya semakin baik.

## 2. Proses pengaktifan karbon<sup>[1]</sup>

Proses pengaktifan karbon dilakukan dengan tujuan untuk memperbesar luas permukaan karbon dengan cara membuka pori-pori yang tertutup sehingga memperbesar kapasitas adsorpsi terhadap zat warna. Pori-pori dalam karbon umumnya mengandung *tar*, hidrokarbon, dan zat-zat organik lainnya seperti *fixed carbon*, abu, air, persenyawaan yang mengandung nitrogen dan sulfur. Bahan kimia yang dapat digunakan sebagai bahan pengaktif karbon adalah  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , sianida,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , dan uap air pada suhu tinggi. Unsur-unsur mineral dari senyawa-senyawa kimia pengaktif yang ditambahkan akan meresap ke dalam karbon dan membuka permukaan yang mula-mula tertutup oleh komponen kimia sehingga luas permukaan karbon yang aktif bertambah besar. Komponen hidrokarbon yang menutupi pori-pori karbon dapat dihilangkan dengan cara oksidasi menggunakan oksidator lemah, seperti  $\text{CO}_2$  yang disertai dengan uap air. Kualitas dari karbon aktif yang diperoleh tergantung dari luas permukaan partikel, ukuran partikel, volume dan luas penampang kapiler, sifat kimia permukaan karbon, sifat karbon secara alamiah, jenis bahan pengaktif yang digunakan, dan kadar air.

Untuk memenuhi kebutuhan bagi aplikasi-aplikasi spesifik, karbon aktif dibuat dan diklasifikasi dalam bentuk granular, bubuk, dan bentuk tertentu.<sup>[11]</sup> Karbon aktif granular diproduksi secara langsung dengan menggunakan bahan baku granular, misalnya serbuk gergaji. Karbon aktif yang berupa bubuk diperoleh dengan cara menggiling karbon aktif granular. Produk karbon aktif dengan bentuk tertentu biasanya diproduksi dalam bentuk pellet silinder dengan

cara *extrusion* bahan baku dengan *binder* yang sesuai sebelum bahan baku mengalami proses aktivasi.

### 2.1.3 Aplikasi Penggunaan Karbon Aktif <sup>[11]</sup>

Aplikasi penggunaan karbon aktif dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:

#### 1. Aplikasi karbon aktif untuk fasa liquid

Karbon aktif yang digunakan untuk aplikasi fasa cair berbeda dengan karbon aktif untuk fasa gas. Perbedaannya terutama terletak pada distribusi ukuran pori dimana karbon aktif untuk fasa cair memiliki volume pori yang lebih besar pada bagian *macropore* yang menyebabkan cairan dapat berdifusi lebih cepat ke bagian *mesopore* dan *micropore*. Karbon aktif yang digunakan untuk fasa cair dapat berupa bubuk, granular, maupun dalam bentuk tertentu. Aplikasi penggunaan karbon aktif pada fasa cair antara lain sebagai berikut :

##### a. Penjernihan air

Karbon aktif banyak digunakan dalam proses penjernihan air. Air yang berasal dari berbagai sumber seperti sungai, danau, air tanah dari sumur, dan lain-lain umumnya masih mengandung kontaminan-kontaminan seperti bakteri, virus, dan bahan-bahan organik lainnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan penjernihan air minum dengan karbon aktif untuk menghilangkan kontaminan dan bahan organik lain sehingga air minum menjadi aman untuk dikonsumsi.

##### b. Pengolahan limbah cair industri

Limbah cair industri biasanya mengandung padatan-padatan tersuspensi, mikroorganisme berbahaya, kontaminan organik maupun anorganik beracun yang harus dihilangkan sebelum limbah tersebut dibuang ke lingkungan. Pada pengolahan limbah tersier, karbon aktif digunakan untuk menghilangkan zat-zat berbahaya dan bahan organik lainnya yang masih tersisa dalam limbah cair.

c. Dekolorisasi bahan pemanis

Karbon aktif untuk fasa cair dapat diaplikasikan dalam proses pemurnian gula. Proses pemurnian gula (dekolorisasi gula) dapat dilakukan dengan menggunakan adsorpsi dengan karbon aktif. Adsorpsi dengan karbon aktif ini dapat menghilangkan zat warna, rasa, dan bau yang tidak diinginkan dalam gula, serta dapat memperpanjang umur penyimpanan gula.

d. Industri makanan, minuman, dan minyak

Karbon aktif merupakan salah satu bahan yang digunakan dalam proses pemurnian makanan. Minyak nabati dan lemak hewani harus dimurnikan terlebih dahulu sebelum dikonsumsi untuk menghilangkan partikulat, kontaminan organik dan anorganik. Pada produksi minuman beralkohol, salah satu contohnya: karbon aktif digunakan untuk menghilangkan rasa dan bau yang tidak diinginkan pada vodka.

2. Aplikasi karbon aktif untuk fasa gas

Karbon aktif yang digunakan untuk aplikasi fasa gas umumnya berupa granular atau dengan bentuk tertentu. Karbon aktif untuk fasa gas terutama digunakan dalam proses-proses pemisahan. Proses pemisahan tersebut didasarkan pada perbedaan daya adsorpsi karbon aktif terhadap gas dan uap. Contohnya yaitu molekul-molekul organik dengan berat molekul lebih dari 40 dapat dihilangkan dari udara dengan adsorpsi karbon aktif.

#### 2.1.4 Regenerasi Karbon Aktif

Regenerasi merupakan suatu proses penting dalam adsorpsi dimana adsorben yang telah jenuh oleh adsorbat diberi perlakuan dengan metode tertentu sehingga dapat digunakan kembali dalam proses adsorpsi. Metode-metode yang umum digunakan dalam proses regenerasi adsorben yaitu <sup>[15]</sup>:

a. *Temperature Swing Adsorption (TSA)*

Pada metode *TSA*, regenerasi adsorben dilakukan dengan menaikkan temperatur. Pada fluida (fasa cair) yang hanya mengandung sedikit

adsorbat, kenaikan temperatur akan menyebabkan adsorben melepaskan adsorbat sehingga adsorben dapat digunakan kembali.

b. *Pressure Swing Adsorption (PSA)*

Pada metode *PSA*, unggun adsorben diregenerasi dengan menurunkan tekanan dalam unggun. Metode ini memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode *TSA* karena tekanan unggun dapat diturunkan secara cepat sehingga proses regenerasi dapat berlangsung lebih cepat.

c. *Displacement Purge Adsorption (DPA)*

Pada metode *DPA*, adsorben dibuat menjadi jenuh dengan suatu jenis adsorbat yang mudah digantikan oleh jenis adsorbat yang dikehendaki.

Karbon aktif merupakan suatu jenis adsorben yang harganya relatif mahal. Oleh karena itu, perlu dilakukan regenerasi terhadap karbon aktif sehingga karbon aktif dapat digunakan kembali dalam proses adsorpsi. Beberapa metode telah dikembangkan untuk proses regenerasi karbon aktif, antara lain <sup>[16]</sup>:

a. Regenerasi uap

Metode regenerasi uap hanya dilakukan untuk regenerasi karbon aktif yang hanya mengandung sedikit komponen volatil (komponen yang mudah menguap).

b. Regenerasi termal

Regenerasi termal dilakukan dengan proses pirolisis dan pembakaran dari bahan-bahan organik yang teradsorpsi. Untuk menghindari terbakarnya karbon aktif, maka proses pemanasan dilakukan pada suhu  $\pm 800^{\circ}\text{C}$  dalam atmosfer yang dikontrol. Metode ini umum digunakan karena dapat meregenerasi karbon aktif dengan sangat baik. Kerugian dari metode ini yaitu diperlukan investasi besar untuk penyediaan peralatan *multiple-hearth furnace*. Selain itu, metode ini menyebabkan banyak karbon aktif yang hilang selama proses pemanasan.

c. Regenerasi secara kimia

Metode ini dilakukan dengan proses yang didasarkan pada penggunaan suatu pelarut pada temperatur  $\pm 100^{\circ}\text{C}$  dan dengan pH tinggi.

d. Regenerasi secara biologi

Metode regenerasi ini belum diaplikasikan dalam skala industri.

## 2.2 Teori Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses pemisahan secara selektif terhadap suatu komponen atau zat pengotor (*impurity*) yang terkandung dalam fluida dengan cara mengkontakkan fluida tersebut dengan adsorben padatan.<sup>[3][17]</sup> Pada proses adsorpsi terjadi perpindahan massa dari fluida (dapat berupa fasa gas atau cairan) ke fasa padatan. Solut yang terserap pada permukaan padatan disebut dengan adsorbat sedangkan padatan penyerap disebut dengan adsorben. Dalam adsorpsi terjadi proses pengikatan oleh permukaan adsorben padatan terhadap atom-atom, ion-ion, atau molekul-molekul adsorbat dengan gaya intermolekular yang lemah.<sup>[12]</sup>

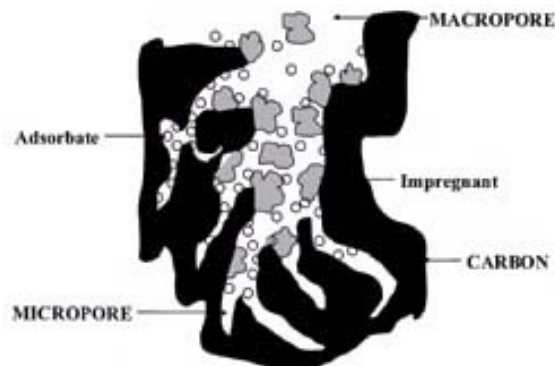
Pada proses adsorpsi padat cair, mula-mula terjadi perpindahan solut secara konveksi dari fasa curah cairan menuju ke adsorben. Kemudian pada bagian *interface* (antar muka antara fasa cairan dengan fasa padatan) terjadi kesetimbangan konsentrasi. Dari *interface* dilanjutkan dengan proses perpindahan solut secara difusi ke dalam partikel-partikel padatan (adsorben) yang berlangsung lambat. Secara umum, tahap pengendali laju dari suatu proses ditentukan oleh tahap yang paling lambat. Dalam adsorpsi, tahap yang paling lambat adalah proses difusi oleh karena itu secara keseluruhan laju adsorpsi dikendalikan oleh laju difusi dari molekul-molekul solut dalam pori-pori kapiler dari partikel adsorben.

Untuk melangsungkan proses adsorpsi, dapat digunakan adsorben, baik yang bersifat polar (silika, alumina, dan tanah diatomae) atau yang bersifat non polar (karbon aktif). Jenis dan karakteristik dari adsorben ditunjukkan pada Tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Jenis dan karakteritik adsorben <sup>[15]</sup>

Tipe	Karakteristik	Kegunaan	Kerugian
Karbon aktif	Hidrofobik	Menghilangkan polutan organik	Relatif sulit untuk diregenerasi
Zeolit	Hidrofilik, polar	Untuk proses pemisahan udara, dehidrasi	Kapasitas total rendah
Silika gel	Kapasitas tinggi, hidrofilik	Untuk pengeringan gas	Kurang efektif dalam menghilangkan senyawa-senyawa tertentu
Alumina aktif	Kapasitas tinggi, hidrofilik	Untuk pengeringan gas	Kurang efektif dalam menghilangkan senyawa-senyawa tertentu

Proses adsorpsi suatu jenis adsorbat dengan menggunakan adsorben berupa karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 2.3.

**Gambar 2.3** Proses adsorpsi dengan karbon aktif <sup>[18]</sup>

Berdasarkan perbedaan jenis gaya yang bekerja antara molekul-molekul fluida dengan molekul-molekul padatan, adsorpsi dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu adsorpsi fisika (Van der Waals *adsorption*) dan adsorpsi kimia (*activated adsorption*).<sup>[12]</sup> Pada adsorpsi fisika tidak terbentuk ikatan kimia. Penyerapan adsorbat oleh adsorben pada adsorpsi fisika terjadi karena adanya formasi dari intermolekular elektrostatis seperti gaya London atau gaya Van der Waals dari interaksi dipol-dipol atau disebabkan konfigurasi fisik dari adsorben seperti



porositas dari karbon aktif.<sup>[13]</sup> Adsorpsi fisika pada gas terjadi ketika gaya tarik intermolekular antara molekul-molekul padatan dengan gas lebih besar daripada gaya intermolekular antar molekul-molekul padatan itu sendiri. Hal tersebut menyebabkan adsorpsi berlangsung secara eksotermik (melepaskan kalor). Kalor yang dilepaskan pada adsorpsi fisika dapat lebih besar atau lebih kecil daripada kalor penguapan. Pada adsorpsi kimia terdapat susunan ikatan-ikatan kimia antara adsorben dengan adsorbat. Adsorpsi kimia juga melepaskan kalor dimana kalor yang dilepaskan jauh lebih besar daripada kalor penguapan. Adsorpsi kimia pada gas umumnya berlangsung pada temperatur lebih besar dari 200<sup>0</sup>C, prosesnya lambat dan bersifat irreversibel. Perbedaan antara adsorpsi fisika dengan adsorpsi kimia ditunjukkan pada Tabel 2.4.

**Tabel 2.4** Perbedaan adsorpsi fisika dengan adsorpsi kimia <sup>[12] [15]</sup>

<b>Karakteristik</b>	<b>Adsorpsi Fisika</b>	<b>Adsorpsi Kimia</b>
Gaya yang bekerja	Gaya tarik secara fisika sehingga adsorpsi fisika sering disebut adsorpsi Van der Waals	Gaya tarik atau ikatan kimia sehingga adsorpsi kimia sering disebut adsorpsi teraktifasi
Tebal lapisan	Banyak lapisan ( <i>multilayer</i> )	Satu lapis ( <i>single layer</i> )
Energi aktifasi	kurang dari 1 kkal/gr-mol	10-60 kkal/gr-mol
Temperatur	Terjadi pada temperatur di bawah titik didih adsorbat	Dapat terjadi pada temperatur tinggi
Kemampuan adsorpsi	Lebih bergantung pada adsorbat daripada adsorben	Bergantung pada adsorben dan adsorbat
Jumlah zat teradsorp	Sebanding dengan kenaikan tekanan	Sebanding dengan banyaknya inti aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan adsorbat
Driving force	Tidak ada transfer elektron, meskipun mungkin terjadi polarisasi pada sorbet	Ada transfer elektron, terbentuk pada ikatan antara sorbat dan permukaan padatan
Kalor adsorpsi	5 – 10 kkal/gr-mol gas	10-100 kkal/gr-mol gas

### 2.3 Adsorbat

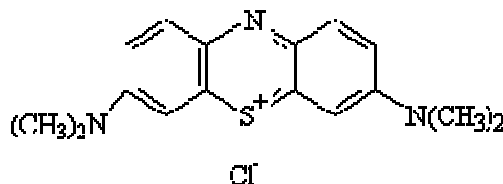
Adsorbat merupakan solut yang terserap pada permukaan padatan dalam proses adsorpsi. Faktor yang mempengaruhi banyaknya jumlah adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben, antara lain : jenis adsorben, jenis adsorbat, ukuran adsorben, konsentrasi adsorbat, dan temperatur.<sup>[19]</sup>

Adsorbat yang digunakan dalam penelitian ini berupa zat warna (*dye*). Adsorbat ada yang memiliki sifat basa dan ada yang memiliki sifat asam. *Basic dye* merupakan jenis zat warna yang bersifat basa dan kationik (bermuatan positif). *Basic dye* tidak larut dalam air, tetapi sifat ketidaklarutannya dalam air dapat diatasi dengan mengubah basa menjadi garam dengan mereaksikan *basic dye* dengan asam.<sup>[20]</sup> *Basic dye* biasa digunakan sebagai zat warna pada bahan wol, bahan katun, bahan sutera, dan serat akrilik. Contoh *basic dye* adalah *safranin*, *basic fuchsin*, *basic red*, *methylene blue*, dan lain-lain. *Acid dye* merupakan jenis zat warna yang memiliki sifat asam dan anionik (bermuatan negatif). *Acid dye* dapat larut dalam air karena *acid dye* memiliki gugus sulfonik atau gugus amino.<sup>[21]</sup> *Acid dye* biasa digunakan sebagai zat warna pada serat protein, bahan sutera, serat sintesis nilon, dan terdapat pula *acid dye* yang digunakan sebagai pewarna makanan. Contoh *acid dye* adalah *acid red*, *acid blue*, dan lain-lain.

Jenis-jenis adsorbat yang umum digunakan dalam proses adsorpsi antara lain:

1. *Methylene Blue/Basic Blue 9*

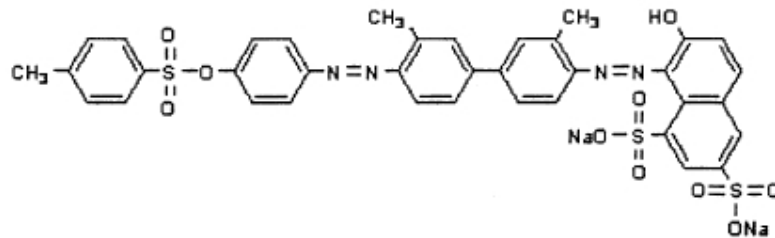
Mr *methylene blue* : 319.85 g/mol



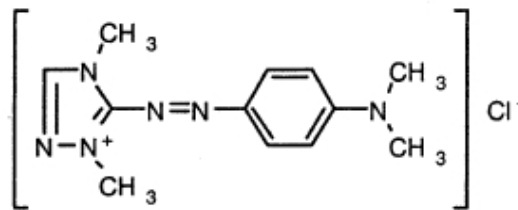
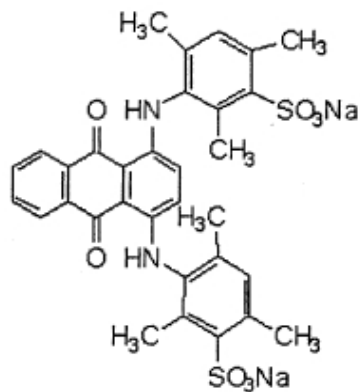
**Gambar 2.4** Struktur molekul *methylene blue*<sup>[22]</sup>

2. *Acid Red 114*

Mr acid red 114 : 830 g/mol

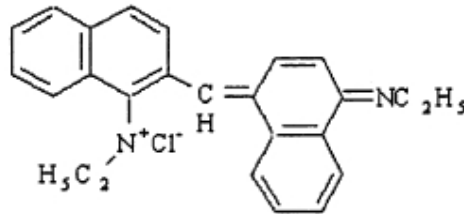
Gambar 2.5 Struktur molekul *acid red 114* <sup>[3]</sup>3. *Basic red 22*

Mr basic red 22 : 309 g/mol

Gambar 2.6 Struktur molekul *basic red 22* <sup>[3]</sup>4. *Acid blue 80*Mr *acid blue 80* : 678 g/molGambar 2.7 Struktur molekul *acid blue 80* <sup>[3]</sup>

5. *Basic blue 69*

Mr *basic blue 69* : 387 g/mol



**Gambar 2.8** Struktur molekul *basic blue 69* <sup>[3]</sup>

Jenis adsorbat yang akan digunakan dalam penelitian ini ada 2 jenis, antara lain:

1. *Methylene Blue/Basic Blue 9*

*Methylene blue* merupakan senyawa kimia aromatik heterosiklik yang memiliki rumus molekul  $C_{16}H_{18}ClN_3S$ . Pada temperatur ruang, *methylene blue* berwujud padatan, tidak berbau, berwarna hijau tua yang akan menghasilkan larutan berwarna biru jika dilarutkan dalam air.

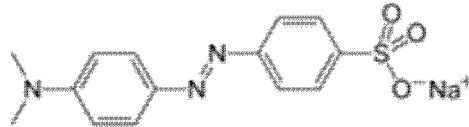
Dalam bidang kimia, *methylene blue* umumnya digunakan sebagai indikator redoks pada kimia analitik. Larutan *methylene blue* akan berwarna biru pada kondisi dimana terjadi proses oksidasi dan akan berubah menjadi tidak berwarna pada kondisi dimana terjadi proses reduksi. <sup>[22]</sup>

Dalam bidang biologi, *methylene blue* digunakan sebagai zat warna pada perwarnaan mikroorganisme, seperti pada perwarnaan dengan metode Gram, Wright, dan Jenner. Selain itu, *methylene blue* dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya RNA atau DNA pada analisa sel dengan menggunakan mikroskop. *Methylene blue* juga dapat digunakan untuk menentukan masih hidup atau tidaknya suatu mikroorganisme dimana *methylene blue* menjadi tidak berwarna bila berada dalam sel hidup. <sup>[22]</sup>

Dalam bidang farmasi, *methylene blue* digunakan untuk menyembuhkan penyakit [methemoglobinemia](#) dimana *methylene blue* dapat mereduksi methemoglobin menjadi hemoglobin.

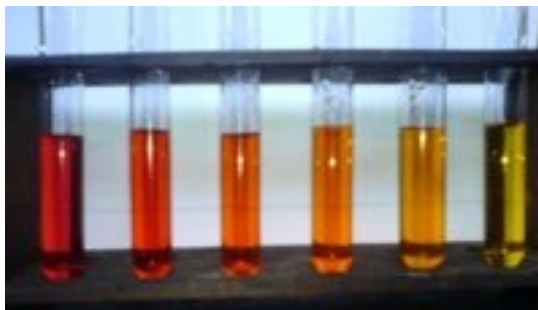
## 2. *Methyl orange*

Mr *methyl orange* : 327.33 g/mol



**Gambar 2.9** Struktur molekul *methyl orange* <sup>[23]</sup>

*Methyl orange* merupakan jenis zat warna yang larut dalam air panas, memiliki titik didih  $> 300^{\circ}\text{C}$ , dan mempunyai struktur molekul  $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$ . *Methyl orange* akan berwarna merah pada  $\text{pH} < 3.1$  dan akan berwarna kuning pada  $\text{pH} > 4.4$ . *Methyl orange* merupakan indikator pH yang jarang digunakan dalam titrasi. Hal ini disebabkan karena perubahan warna *methyl orange* sulit untuk dibedakan. Pada larutan yang semakin berkurang sifat asamnya, *methyl orange* berubah warna dari merah ke jingga dan akhirnya menjadi berwarna kuning. Perubahan warna tersebut secara keseluruhan berlangsung pada kondisi asam. Perubahan warna pada *methyl orange* untuk larutan yang semakin berkurang sifat asamnya ditunjukkan pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10** Perubahan warna pada *methyl orange* <sup>[23]</sup>

## 2.4 Kesetimbangan Adsorpsi

Secara umum, proses adsorpsi dipelajari lebih lanjut melalui berbagai mekanisme yang terjadi antara lain perpindahan massa eksternal solut dari fasa cairan ke adsorben yang dilanjutkan dengan perpindahan massa internal pada adsorben (difusi intrapartikel). Berbagai eksperimen telah dilakukan untuk memperoleh data yang berguna bagi aplikasi khusus dari adsorpsi, namun data yang diperoleh masih kurang memadai. Oleh karena itu, metode prosedur desain empiris berdasarkan kesetimbangan adsorpsi umum digunakan untuk memperkirakan ukuran adsorber dan performansi dari adsorpsi. Kesetimbangan adsorpsi merupakan konsep dinamik yang diperoleh ketika laju adsorpsi solut ke permukaan adsorben sama dengan laju desorpsi solut dari fasa cairan.

Kesetimbangan adsorpsi menunjukkan hubungan antara konsentrasi solut pada fasa padatan ( $q_e$ ) dan konsentrasi solut pada fasa cairan ( $C_e$ ). Kesetimbangan adsorpsi mencakup informasi penting yang diperlukan untuk mengevaluasi afinitas atau kapasitas dari suatu adsorben. Kesetimbangan adsorpsi dapat ditunjukkan oleh persamaan-persamaan isotherm adsorpsi, antara lain:

a. Isotherm Langmuir <sup>[12]</sup>

$$\text{Persamaan isotherm Langmuir : } q = \frac{Kq_m C}{1 + KC} \quad K = \frac{ka}{kd}$$

dengan:

$q$  = konsentrasi solut fasa padat di permukaan partikel saat  $t$

$q_m$  = konsentrasi maksimum solut di permukaan adsorben

$ka$  = laju adsorpsi

$kd$  = laju desorpsi

$C$  = konsentrasi solut fasa cair di pori partikel saat  $t$

Asumsi yang digunakan dalam isotherm Langmuir:

- Permukaan pori dari adsorben seragam (homogen).
- Gaya interaksi antar molekul-molekul solut yang teradsorp diabaikan.
- Keseimbangan dinamis berada di antara molekul adsorbat dan adsorben
- Adsorpsi tidak berlaku di luar cakupan monolayer.

Persamaan isoterm Langmuir dapat dilinearisasi menjadi :

$$\frac{C}{q} = \frac{1}{q_m K} + \frac{C}{q_m}$$

Berdasarkan persamaan hasil linearisasi, dilakukan plot grafik antara C sebagai sumbu x dengan C/q sebagai sumbu y. Hasil plot grafik tersebut berupa garis lurus dengan *slope*  $1/q_m$  dan *intercept*  $1/(q_m K)$ . Dari nilai *slope* dan *intercept* grafik, dapat ditentukan nilai K dan  $q_m$ . Nilai K mengalami perubahan terhadap temperatur.

b. Isoterm Freundlich <sup>[12]</sup>

Persamaan isotherm Freundlich :  $q = kC^n$

dengan :

q = konsentrasi solut dalam padatan pada saat kesetimbangan

C = konsentrasi solut dalam larutan pada saat kesetimbangan(M)

k dan n = konstanta, umumnya n memiliki nilai rentang 1-5

Asumsi yang digunakan dalam isotherm Freundlich:

- Permukaan pori dari adsorben berbeda-beda (heterogen).
- Terdapat distribusi ukuran pori pada adsorben.
- Berlaku untuk adsorpsi multilayer.

Persamaan isotherm Freundlich dapat dilinearisasi menjadi :

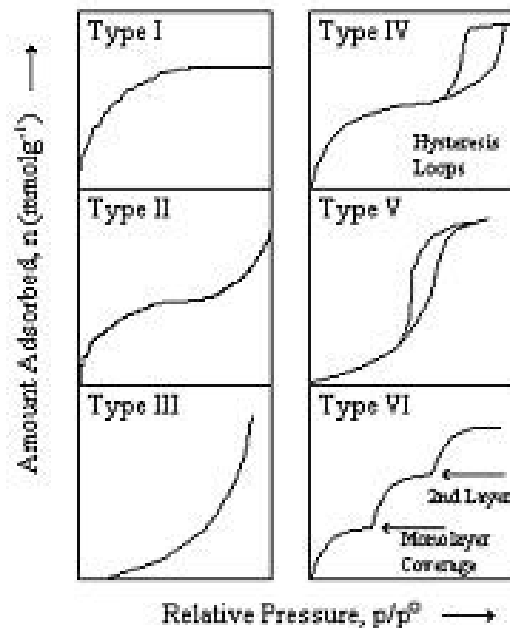
$$\log q = \frac{1}{n} \log C + \log k$$

Berdasarkan persamaan hasil linearisasi, dilakukan plot grafik antara log C sebagai sumbu x dengan log q sebagai sumbu y. Hasil plot grafik tersebut berupa garis lurus dengan *slope*  $1/n$  dan *intercept* log k. Dari nilai *slope* dan *intercept* grafik, dapat ditentukan nilai k dan n. Secara umum, nilai k akan menurun seiring dengan meningkatnya temperatur, sedangkan nilai n meningkat dengan adanya peningkatan temperatur dan nilai n akan mendekati 1 pada temperatur tinggi.

Isoterm adsorpsi umumnya ditunjukkan dengan menggunakan plot grafik tekanan relatif ( $p/p_0$ ) sebagai sumbu x terhadap jumlah adsorbat yang teradsorpsi ( $\text{mmol/g}$ ) sebagai sumbu y. Prosedur percobaan isoterm adsorpsi menggunakan tekanan parsial dimana tekanan aktual ditunjukkan dengan tekanan uap jenuh pada adsorpsi dengan temperatur konstan sehingga proses adsorpsi berlangsung secara isotermal. Isoterm memberikan informasi mengenai adsorben yang digunakan dan interaksi antara adsorben dengan adsorbat dalam suatu sistem, termasuk:

- dasar-dasar proses adsorpsi
- perkiraan luas permukaan, volume pori, dan distribusi ukuran pori dari adsorben
- profil efisiensi penggunaan karbon dalam proses industri

Isoterm adsorpsi diklasifikasikan menjadi 6 tipe oleh Brunauer, Deming, Deming dan Teller (sistem B.D.D.T). Klasifikasi dari isoterm adsorpsi dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Grafik klasifikasi isoterm adsorpsi<sup>[13]</sup>



Seluruh isotherm adsorpsi harus sesuai dengan minimal 1 tipe grafik dari 6 klasifikasi isotherm adsorpsi. Keenam klasifikasi dari isotherm adsorpsi dapat dijelaskan sebagai berikut <sup>[13][25]</sup>:

1. Isoterm tipe I

Isoterm tipe I umumnya berlangsung pada adsorben yang ukuran porinya didominasi oleh *micropore*. Contoh adsorpsi yang termasuk dalam isoterm tipe I adalah adsorpsi nitrogen oleh karbon pada 77 K dan adsorpsi amonia pada arang pada 273 K.

2. Isoterm tipe II

Adsorpsi fisika gas oleh padatan tak berpori termasuk dalam klasifikasi isotherm tipe II. Karbon yang memiliki pori berupa *micropore* dan *mesopore* akan menghasilkan isoterm tipe II.

3. Isoterm tipe III

Plot grafik dari isotherm tipe III menghasilkan bentuk konveks terhadap tekanan relatif. Klasifikasi isotherm ini merupakan karakteristik dari interaksi lemah antara adsorbat dengan adsorben. Isoterm tipe ini umumnya berlangsung pada adsorben tak berpori dan adsorben berpori mikro. Interaksi lemah antara adsorbat dan adsorben menyebabkan sedikit adsorbat yang teradsorp pada kondisi tekanan relatif rendah, tetapi ketika suatu molekul telah teradsorp pada *adsorption site* utama, akan terjadi interaksi yang kuat antara adsorbat dengan adsorben. Interaksi kuat tersebut menjadi *driving force* bagi proses adsorpsi sehingga mempercepat penyerapan adsorbat pada tekanan relatif yang lebih tinggi. Contoh adsorpsi yang mengikuti isotherm ini adalah adsorpsi molekul air pada karbon yang didasarkan pada oksigen.

4. Isoterm tipe IV

Isoterm tipe IV disebut juga *hysteresis loop*. Isoterm tipe ini umumnya terjadi pada adsorben dengan ukuran pori berupa *mesopore*. Tipe isotherm ini memiliki bentuk unik untuk tiap sistem adsorpsi.

#### 5. Isoterm tipe V

Isoterm tipe V memiliki bentuk grafik konveks terhadap tekanan relatif dan merupakan karakteristik dari interaksi lemah antara adsorbat dengan adsorben. Tipe isoterm ini terjadi pada padatan dengan ukuran pori berupa *micropore* atau *mesopore*. Contoh adsorpsi yang mengikuti isoterm ini adalah adsorpsi molekul air pada karbon.

#### 6. Isoterm tipe VI

Isoterm tipe VI sering dikenal sebagai *hypothetical isotherm*. Bentuk grafik dari isoterm ini disebabkan karena formasi lengkap dari lapisan-lapisan monomolekular sebelum terjadi peningkatan menuju ke lapisan *subsequent*. Contoh adsorpsi yang mengikuti isoterm tipe VI adalah adsorpsi krypton oleh karbon hitam pada 90 K.

### 2.5 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi menggambarkan profil konsentrasi solut selama proses adsorpsi sebelum kesetimbangan tercapai. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinetika adsorpsi<sup>[13][26]</sup>:

#### a. luas permukaan adsorben

Semakin besar luas permukaan dari adsorben, maka jumlah adsorbat yang terserap akan semakin banyak dan laju adsorpsi akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin besar luas permukaan adsorben, semakin banyak pusat aktif adsorben yang mampu mengikat adsorbat.

#### b. diameter partikel adsorben

Semakin kecil diameter partikel adsorben, maka laju adsorpsi akan semakin meningkat sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih efektif. Hal ini disebabkan karena semakin kecil diameter partikel adsorben, lintasan yang ditempuh oleh adsorbat dalam berdifusi ke pori-pori adsorben lebih pendek.

#### c. konsentrasi awal adsorbat pada fasa cairan ( $C_0$ )

Semakin besar konsentrasi awal adsorbat pada fasa cairan ( $C_0$ ), maka laju adsorpsi akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin

besar konsentrasi awal larutan, semakin banyak jumlah adsorbat yang teradsorp oleh adsorben.

d. kelarutan adsorbat (*solubility of adsorbate*)

Semakin kecil kelarutan adsorbat, maka laju adsorpsi akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin kecil kelarutan adsorbat, semakin mudah adsorbat untuk berpindah dari fasa cairan menuju ke fasa padatan (adsorben).

e. berat molekul adsorbat

Semakin kecil berat molekul adsorbat, maka laju adsorpsi akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin kecil berat molekul adsorbat, kemampuan adsorbat untuk berpindah dari fasa cairan menuju ke fasa padatan (adsorben) semakin meningkat.

f. temperatur (T)

Semakin besar temperatur (T), maka laju adsorpsi akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin besar temperatur, perpindahan massa secara konveksi pada larutan dan perpindahan massa secara difusi molekular pada adsorben akan berlangsung lebih cepat.

g. kecepatan pengadukan

Semakin besar kecepatan pengadukan, maka laju adsorpsi akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan karena semakin besar kecepatan pengadukan, semakin bertambah kesempatan kontak antara adsorbat dengan adsorben sehingga adsorpsi dapat berlangsung lebih efektif.

h. pH

Pengaruh pH terhadap laju adsorpsi dipengaruhi oleh jenis adsorbat. Laju adsorpsi meningkat pada kondisi pH yang menyebabkan penurunan kelarutan adsorbat dalam cairan.

i. waktu kontak

Untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi dan memaksimalkan efisiensi adsorpsi maka diperlukan waktu kontak yang cukup antara adsorbat dengan adsorben.

Secara umum, terdapat 3 model yang dapat menyatakan kinetika adsorpsi, antara lain <sup>[7]</sup>:

1. Model kinetika pseudo orde 1

$$\frac{dq}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

Hasil integrasi persamaan diferensial pseudo orde 1 :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - k_1 t$$

2. Model kinetika pseudo orde 2

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

Hasil integrasi persamaan diferensial pseudo orde 2 :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

3. Model difusi intrapartikel

$$q = kt^{0.5} + C$$

## 2.6 Perpindahan Massa ( *Mass Transfer* )

Proses adsorpsi merupakan proses pemisahan secara selektif terhadap suatu komponen (solut) yang terkandung dalam fluida dengan cara mengontakkan fluida dengan adsorben padatan sehingga terjadi perpindahan massa dari fluida (dapat berupa fasa gas atau cairan) ke fasa padatan. Mekanisme perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi padat-cair dapat dideskripsikan dengan 3 tahap sebagai berikut :

- Perpindahan massa eksternal

Perpindahan massa eksternal terjadi pada fasa cairan. Pada tahap ini terjadi perpindahan massa solut dari fasa curah cairan menuju ke permukaan adsorben melalui lapisan-lapisan yang menyelimuti partikel adsorben. Perpindahan massa eksternal ini berlangsung secara konveksi dan disebabkan oleh adanya perbedaan konsentrasi solut pada fasa curah cairan dengan konsentrasi solut pada permukaan adsorben.<sup>[6]</sup>

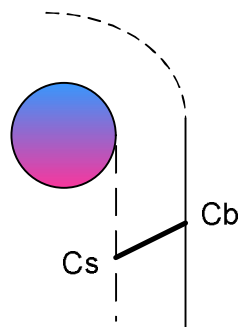
- Kesetimbangan pada antarmuka antara fasa cairan dengan fasa padatan  
Pada antarmuka (*interface*) antara fasa cairan dengan fasa padatan terjadi kesetimbangan antara konsentrasi solut di fasa cairan ( $C_s$ ) dengan konsentrasi solut di fasa padatan ( $q_s$ ).<sup>[4]</sup>
- Perpindahan massa internal  
Perpindahan massa internal terjadi pada fasa padatan. Pada tahap ini terjadi perpindahan massa solut dari permukaan adsorben menuju ke pori-pori adsorben. Perpindahan massa internal ini berlangsung secara difusi molekular dan disebabkan oleh adanya perbedaan konsentrasi solut pada permukaan adsorben dengan konsentrasi solut pada pori-pori adsorben.<sup>[6]</sup>

### 2.6.1 *Lumped Model* <sup>[27]</sup>

Pada *lumped model*, tinjauan yang digunakan bahwa butir adsorben berada di dalam larutan dengan konsentrasi tertentu, konsentrasi solut di dalam larutan akan berkurang seiring dengan waktu akibat perpindahan massa dari fasa cairan menuju ke adsorben. Di luar partikel terdapat tahanan perpindahan massa film eksternal. Model ini berlaku bila kinetika laju adsorpsi ditentukan oleh perpindahan massa eksternal secara konveksi sedangkan perpindahan massa internal secara difusi diabaikan karena jauh lebih cepat daripada perpindahan massa eksternal.

Asumsi:

- Perpindahan massa eksternal (konveksi) menjadi tahap penentu laju.
- Konsentrasi di dalam partikel adsorben seragam (bukan fungsi dari posisi).



**Gambar 2.12** Profil konsentrasi (*lumped model*)

Berdasarkan asumsi tersebut, dapat disusun neraca massa solut di fasa bulk:

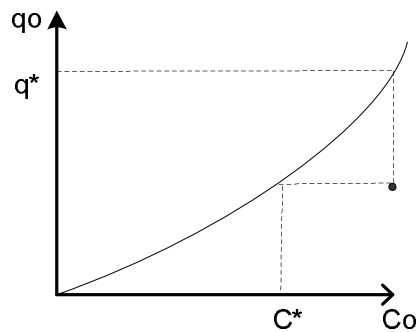
Akumulasi = in – out + transfer massa

$$\frac{d(CV)}{dt} = 0 - 0 - K(C - C^*)V$$

$$V \frac{dC}{dt} = -K(C - C^*)$$

pada saat  $t = 0 \rightarrow C = C_0$

sedangkan  $C^*$  dicari dari hubungan kesetimbangan seperti di bawah ini.



**Gambar 2.13** Kurva kesetimbangan

### 2.6.2 *Distributed Model* <sup>[27]</sup>

Pada distributed model, tinjauan yang digunakan adalah butir adsorben berada di dalam larutan dengan konsentrasi tertentu, konsentrasi solut di dalam larutan akan berkurang seiring dengan waktu akibat perpindahan massa dari fasa cairan menuju ke adsorben. Tahanan film eksternal dianggap jauh lebih kecil daripada tahanan internal di dalam partikel, sehingga perpindahan massa eksternal secara konveksi jauh lebih cepat daripada perpindahan massa internal secara difusi. Akibatnya, laju adsorpsi dikendalikan oleh perpindahan massa internal.

Asumsi:

- Tahap penentu laju adalah perpindahan massa di dalam partikel (difusi).
- Konsentrasi di dalam partikel merupakan fungsi dari posisi.
- Tidak ada tahanan film.
- Pada permukaan, terjadi kesetimbangan antara  $C$  dan  $q$ .

$$q_s \leftrightarrow C_\infty$$

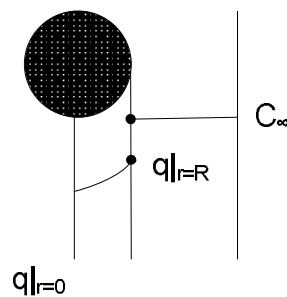
Berdasarkan asumsi di atas, dapat disusun neraca massa sebagai berikut:

$$\frac{dq_i}{dt} = D \frac{d^2 q_i}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dq_i}{dr}$$

$$t = 0 \rightarrow q = 0$$

$$r = 0 \rightarrow \frac{dq}{dr} = 0$$

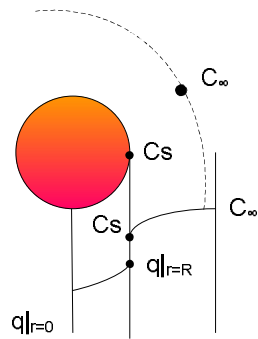
$$r = R \rightarrow q = q_s$$



**Gambar 2.14** Profil konsentrasi (*distributed model*)

### 2.6.3 Perpindahan Massa Internal dan Eksternal <sup>[27]</sup>

Tinjau butir adsorben berada di dalam larutan dengan konsentrasi tertentu, konsentrasi solut di dalam larutan akan berkurang seiring dengan waktu akibat perpindahan massa dari fasa cairan menuju ke adsorben. Terdapat dua tahanan perpindahan massa internal dan eksternal. Kedua macam tahanan memiliki peranan penting sehingga tidak dapat diabaikan. Perpindahan massa eksternal merupakan perpindahan melewati tahanan film dengan driving force perbedaan konsentrasi antara konsentrasi di fasa bulk dengan konsentrasi di permukaan adsorben. Pada permukaan adsorben terjadi kesetimbangan antara konsentrasi solut di fasa adsorben dengan di fasa cairan yang ditunjukkan oleh isotherm. Di samping itu, perpindahan massa internal merupakan difusi permukaan (*surface diffusion*) yang diidentifikasi oleh  $D_s$  (difusivitas permukaan) sepanjang radius adsorben sehingga pada pusat adsorben konsentrasi solut mencapai minimum. Peristiwa ini dapat ditunjukkan oleh gambar di bawah ini.



**Gambar 2.15** Profil konsentrasi (*combined model*)

Neraca massa dapat disusun sebagai berikut.

- Eksternal

$$\frac{dC}{dt} = -K(C - C_s)$$

$$t = 0 \rightarrow C = C_0$$

- Kestimbangan (pada permukaan)

$$q_s \leftrightarrow C_s$$

- Internal

$$\frac{dq}{dt} = D \frac{d^2q}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dq}{dr}$$

$$t = 0 \rightarrow q = 0$$

$$r = 0 \rightarrow \frac{dq}{dr} = 0$$

$$r = R \rightarrow q = q_s$$

Pada penelitian ini digunakan tinjauan perpindahan massa dengan menggunakan *Heterogenous Surface Diffusion Model* karena karbon aktif memiliki distribusi ukuran pori yaitu *macropore* (ukuran pori > 50nm) dan *micropore* (ukuran pori < 2nm). Perbedaan ukuran pori ini menyebabkan adanya perbedaan mekanisme perpindahan massa pada *macropore* dan *micropore*.



Pada *Heterogenous Surface Diffusion Model* terjadi mekanisme perpindahan massa sebagai berikut <sup>[3]</sup>:

1. Perpindahan massa solut dari fasa cair (larutan) menuju ke fasa padatan (permukaan adsorben) secara konveksi.
2. Difusi dan adsorpsi solut pada *macropore*.
3. Difusi dan adsorpsi solut pada *micropore*.

Neraca massa yang digunakan dalam pemodelan adsorpsi fasa cair dengan *multipore model* :

1. Neraca massa fasa cair

Akumulasi massa = massa in – massa out ± transfer massa

$$m_A|_{t+\Delta t} - m_A|_t = 0 - 0 - k A(C_t - C_s, t)\Delta t$$

$$C_t.V|_{t+\Delta t} - C_t.V|_t = -k A(C_t - C_s, t)\Delta t$$

$$\frac{C_t.V|_{t+\Delta t} - C_t.V|_t}{\Delta t} = -k A(C_t - C_s, t)$$

$$\frac{d(C_t.V)}{dt} = -k A(C_t - C_s, t)$$

$$\frac{dC_t}{dt} = -k_f (C_t - C_s, t)$$

Kondisi awal yang digunakan :

$$t = 0 \rightarrow C_t = C_0$$

Keterangan variabel:

V = volume partikel (dm<sup>3</sup>)

k<sub>f</sub> = koefisien perpindahan massa pada fasa cair (dm/s)

A = luas total permukaan partikel (dm<sup>2</sup>)

C<sub>t</sub> = konsentrasi solut di fasa cair pada waktu tertentu (mg/L)

C<sub>s,t</sub> = konsentrasi solut di fasa cair pada permukaan partikel pada waktu tertentu (mg/L)

## 2. Neraca massa *macropore*

Akumulasi massa = massa in – massa out ± transfer massa

$$\begin{aligned}
 m_A|_{t+\Delta t} - m_A|_t &= J_A 4\pi r^2 f \Delta t|_r - J_A 4\pi r^2 f \Delta t|_{r+\Delta r} - R_b \rho_p 4\pi r^2 \Delta r \Delta t \\
 \rho_p q_m \Delta V|_{t+\Delta t} - \rho_p q_m \Delta V|_t &= J_A 4\pi r^2 f \Delta t|_r - J_A 4\pi r^2 f \Delta t|_{r+\Delta r} - R_b \rho_p 4\pi r^2 \Delta r \Delta t \\
 \rho_p q_m 4\pi r^2 \Delta r f|_{t+\Delta t} - \rho_p q_m 4\pi r^2 \Delta r f|_t &= J_A 4\pi r^2 f \Delta t|_r - J_A 4\pi r^2 f \Delta t|_{r+\Delta r} - R_b \rho_p 4\pi r^2 \Delta r \Delta t \\
 \frac{\rho_p q_m r^2 f|_{t+\Delta t} - \rho_p q_m r^2 f|_t}{\Delta t} &= \frac{J_A r^2 f|_r - J_A r^2 f|_{r+\Delta r}}{\Delta r} - R_b \rho_p r^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccc}
 \boxed{\lim} & & \boxed{\lim} \\
 \Delta t \rightarrow 0 & & \Delta r \rightarrow 0 \\
 \downarrow & & \downarrow
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_p r^2 f \frac{\partial q_m}{\partial t} &= -f \frac{\partial (J_A r^2)}{\partial r} - R_b \rho_p r^2 \\
 \rho_p f \frac{\partial q_m}{\partial t} &= -\frac{f}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( -D_s \rho_p \frac{\partial q_m}{\partial r} r^2 \right) - R_b \rho_p \\
 f \frac{\partial q_m}{\partial t} &= \frac{f D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial q_m}{\partial r} \right) - R_b
 \end{aligned}$$

$R_b$  merupakan laju perpindahan adsorbat dari *macropore* ke *micropore*.

Kondisi awal yang digunakan :

- $t = 0 \rightarrow q_m = 0$

Pada saat  $t = 0$ , nilai  $q_m = 0$  karena saat  $t = 0$  belum terdapat solut pada *macropore* padatan (adsorben).

- $r = 0 \rightarrow \frac{dq_m}{dr} = 0$

Pada saat  $r = 0$ , nilai  $\frac{dq_m}{dr} = 0$  karena saat  $r = 0$  konsentrasi solut paling minimum.

- $r = R \rightarrow q_m = q_s$

$$k_f (C_t - C_s, t) = -D_s \rho_p \left( \frac{\partial q_m}{\partial r} \right)_{r=R}$$

Pada saat  $r = R$ , terjadi kesetimbangan adsorpsi. Pada kondisi ini, massa solut yang diterima secara konveksi dari fasa cairan akan diteruskan ke partikel bagian dalam adsorben secara difusi.

Keterangan variabel:

$f$  = fraksi dari kapasitas total adsorpsi pada *macropore*

$q_m$  = konsentrasi solut di fasa padatan pada *macropore* (mg solut/g adsorben)

$D_s$  = koefisien difusi permukaan ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$r$  = jari-jari partikel (cm)

$R_b$  = laju perpindahan massa solut dari *macropore* ke *micropore* (mg solut/g adsorben/s)

### 3. Neraca massa *micropore*

Akumulasi massa = massa in – massa out  $\pm$  transfer massa

$$\rho_p q_b 4\pi r^2 \Delta r (1-f) \Big|_{t+\Delta t} - \rho_p q_b 4\pi r^2 \Delta r (1-f) \Big|_t = k_b (q_m - q_b) \rho_p 4\pi r^2 \Delta r \Delta t$$

$$\frac{q_b (1-f) \Big|_{t+\Delta t} - q_b (1-f) \Big|_t}{\Delta t} = k_b (q_m - q_b)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \downarrow$$

$$(1-f) \frac{\partial q_b}{\partial t} = k_b (q_m - q_b) = R_b$$

Kondisi awal yang digunakan :

1.  $t = 0 \rightarrow q_m = 0$

Pada saat  $t = 0$ , nilai  $q_m = 0$  karena saat  $t = 0$  belum terdapat solut pada *macropore* padatan (adsorben).

2.  $t = 0 \rightarrow q_b = 0$

Pada saat  $t = 0$ , nilai  $q_b = 0$  karena saat  $t = 0$  belum terdapat solut pada *micropore* padatan (adsorben).

Keterangan variabel :

(1-f) = fraksi dari kapasitas total adsorpsi pada *micropore*

$q_b$  = konsentrasi solut di fasa padatan pada *micropore* (mg solut/g adsorben)

$k_b$  = koefisien laju adsorpsi pada *micropore* ( $s^{-1}$ )

$q_m$  = konsentrasi solut di fasa padatan pada waktu tertentu (mg solut/g adsorben)

$R_b$  = laju perpindahan massa solut dari *macropore* ke *micropore* (mg solut/g adsorben/s)

Korelasi yang menghubungkan koefisien difusivitas permukaan ( $D_s$ ) dengan temperatur (T) dan konsentrasi solut di fasa padatan (adsorben) adalah<sup>[10]</sup>:

$$D_s = \frac{D_{s,0} \exp(-E / RT)}{\left(1 - \frac{q_e}{q_{\max}}\right)}$$

dengan :

$D_s$  = koefisien difusi permukaan ( $cm^2/s$ )

$D_{s,0}$  = koefisien difusi permukaan saat  $q=0$  ( $cm^2/s$ )

E = energi aktivasi (kJ)

R = konstanta gas (8.31 kJ/mol.K)

T = temperatur (K)

$q_e$  = konsentrasi adsorbat di fasa padatan saat kesetimbangan pada saat t (mg/g)

$q_{\max}$  = konsentrasi adsorbat maksimum di fasa padatan saat kesetimbangan (mg/g)

## 2.7 Persamaan Sherwood <sup>[28]</sup>

Bilangan Sherwood merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang umum digunakan untuk menunjukkan ukuran perpindahan massa biner yang terjadi pada fluida isothermal dengan satuan molar. Bilangan ini tidak hanya berkaitan dengan koefisien perpindahan massa, tetapi juga merupakan fungsi dari bilangan Reynolds dan bilangan Schmidt.

$$N_{sh} = \frac{k_f D_p}{D_i} = a + b N_{Re}^c N_{Sc}^d$$

dengan:

$N_{Sh}$  = bilangan Sherwood

$N_{Re}$  = bilangan Reynolds =  $\rho N D^2 / \mu$  (N=kecepatan rotasi, D=diameter impeller)

$N_{Sc}$  = bilangan Schmidt =  $\mu / \rho D_i$

$k_f$  = koefisien perpindahan massa

$D_p$  = diameter partikel adsorben

$D_i$  = difusivitas komponen i dalam campuran

a,b,c,d = konstanta

## 2.8 Metode Numerik

Persamaan diferensial biasa maupun persamaan diferensial parsial yang diperoleh dari penurunan neraca massa dalam pemodelan adsorpsi fasa cair dengan *multipore model* akan diselesaikan dengan metode numerik. Metode numerik yang digunakan yaitu metode semi diskretisasi dimana persamaan diferensial parsial (PDP) diubah menjadi beberapa persamaan diferensial biasa (PDB) orde 1. Setelah dilakukan semi diskretisasi terhadap PDP, maka sejumlah PDB orde 1 yang diperoleh dapat diselesaikan secara simultan untuk memperoleh nilai parameter-parameter yang ingin ditentukan.

Algoritma perhitungan metode numerik dengan semi diskretisasi untuk menentukan parameter-parameter dalam Heterogenous Surface Diffusion Model adalah sebagai berikut :

1. Neraca massa fasa cair

$$V \frac{dC_t}{dt} = -k A(C_t - C_s, t) \quad (1)$$

$$C_{s,t} = f(q_s)$$

$$\text{Dari persamaan Langmuir diperoleh : } C_s = \frac{q_s}{K(q_m - q_s)} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2) ke dalam persamaan (1) diperoleh :

$$\frac{dy_1}{dt} = -k_f \left( y_1 - \frac{y_{11}}{K(q_m - y_{11})} \right)$$

dimana:  $y_1 = Ct$

$$k_f = (k.A)/V$$

$$y_{11} = q_s$$

## 2. Neraca massa *macropore*

$$f \frac{\partial q_m}{\partial t} = \frac{fDs}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial q_m}{\partial r} \right) - Rb$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial t} = \frac{Ds}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial q_m}{\partial r} \right) - \frac{k_b}{f} (q_m - q_b)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial t} = Ds \frac{\partial^2 q_m}{\partial r^2} + \frac{2Ds}{r} \frac{\partial q_m}{\partial r} - \frac{k_b}{f} (q_m - q_b) \quad (3)$$

Persamaan (2) diubah menjadi:

i=0	i=1	i=2	i=3	i=4	i=5	i=6	i=7	i=8	i=9	i=10	i=11
$y_a$	$r = 0$									$r = R$	$y_b$

$$y_2 \qquad \qquad \qquad y_{11}$$

$$y_{12} \qquad \qquad \qquad y_{21}$$

$$i = 1 \rightarrow \frac{dy_2}{dt} = Ds \left( \frac{y_3 - 2y_2 + y_a}{\Delta r^2} \right) + \frac{2Ds}{r} \left( \frac{y_3 - y_a}{2\Delta r} \right) - \frac{k_b}{f} (y_2 - y_{12})$$

$$\text{pada } r = 0 \rightarrow \frac{dq_m}{dr} = 0$$

$$\frac{y_3 - y_a}{2\Delta r} = 0$$

$$y_3 = y_a$$

$$\frac{dy_2}{dt} = Ds \left( \frac{2y_3 - 2y_2}{\Delta r^2} \right) - \frac{k_b}{f} (y_2 - y_{12})$$

$$i = 2 \rightarrow \frac{dy_3}{dt} = Ds \left( \frac{y_4 - 2y_3 + y_2}{\Delta r^2} \right) + \frac{2Ds}{r} \left( \frac{y_4 - y_2}{2\Delta r} \right) - \frac{k_b}{f} (y_3 - y_{13})$$

$$i=3 \text{ s/d } i=9 \rightarrow \frac{dy_{i+1}}{dt} = Ds \left( \frac{y_{i+2} - 2y_{i+1} + y_i}{\Delta r^2} \right) + \frac{2Ds}{r} \left( \frac{y_{i+2} - y_i}{2\Delta r} \right) - \frac{k_b}{f} (y_{i+1} - y_{i+11})$$

$$i=10 \rightarrow \frac{dy_{11}}{dt} = Ds \left( \frac{y_b - 2y_{11} + y_{10}}{\Delta r^2} \right) + \frac{2Ds}{r} \left( \frac{y_b - y_{10}}{2\Delta r} \right) - \frac{k_b}{f} (y_{11} - y_{21})$$

pada  $r = R \rightarrow q_m = q_s$

$$k_f (C_t - C_s, t) = -D_s \rho_p \left( \frac{\partial q_m}{\partial r} \right)_{r=R}$$

$$k_f \left( y_1 - \frac{y_{11}}{K(q_m - y_{11})} \right) = -D_s \rho_p \left( \frac{y_b - y_{10}}{2\Delta r} \right)$$

$$y_b = \frac{2k_f \Delta r [K y_1 (q_m - y_{11}) - y_{11}]}{D_s \rho_p K (q_m - y_{11})} + y_{10}$$

dimana:  $y_2$  sampai  $y_{11} = q_m$

$y_{12}$  sampai  $y_{21} = q_b$

### 3. Neraca massa *micropore*

$$(1-f) \frac{\partial q_b}{\partial t} = k_b (q_m - q_b) = Rb \quad (4)$$

Persamaan (4) diubah menjadi:

$$i=1 \rightarrow \frac{dy_{12}}{dt} = \frac{k_b}{(1-f)} (y_2 - y_{12})$$

$$i=2 \rightarrow \frac{dy_{13}}{dt} = \frac{k_b}{(1-f)} (y_3 - y_{13})$$

$$i=3 \text{ s/d } i=9 \rightarrow \frac{dy_{i+11}}{dt} = \frac{k_b}{(1-f)} (y_{i+1} - y_{i+11})$$

$$i=10 \rightarrow \frac{dy_{21}}{dt} = \frac{k_b}{(1-f)} (y_{11} - y_{21})$$

dimana:  $y_2$  sampai  $y_{11} = q_m$

$y_{12}$  sampai  $y_{21} = q_b$

Persamaan-persamaan dari neraca massa tersebut kemudian diselesaikan secara simultan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB.



## **BAB III**

### **BAHAN DAN METODE**

#### **3.1 Rancangan Penelitian**

Pada penelitian adsorpsi zat warna dengan karbon aktif dengan menggunakan *Heterogenous Surface Diffusion Model*, variabel yang akan divariasikan adalah jenis zat warna, konsentrasi awal larutan zat warna, dan temperatur. Jumlah run yang dilakukan dalam penelitian ini sebanyak 24 run percobaan dimana jumlah karbon aktif yang digunakan sebanyak 0,15 g/250ml dan variabel yang divariasikan adalah jenis zat warna yaitu *methylene blue* dan *methyl orange*; konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ) sebanyak 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm; dan temperatur (T) sebesar 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C. Tahap awal yang dilakukan adalah melakukan studi mengenai sifat-sifat *methylene blue*, *methyl orange* dan karbon aktif, peristiwa adsorpsi, dan penurunan neraca massa untuk *Heterogeneous Surface Diffusion Model*. Pengolahan data yang diperoleh dari percobaan akan dilakukan dengan bantuan alat simulator yaitu program MatLab untuk mendapatkan nilai-nilai parameter pada *Heterogeneous Surface Diffusion Model*.

#### **3.2 Bahan Penelitian**

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a. karbon aktif sebagai adsorben sebanyak 0,15 g/250 ml
- b. larutan *methylene blue* sebagai adsorbat dengan konsentrasi 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm
- c. larutan *methyl orange* sebagai adsorbat dengan konsentrasi 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm
- d. aquadest

### 3.3 Peralatan

Alat-alat yang digunakan pada penelitian terdiri atas alat-alat untuk percobaan pendahuluan dan percobaan utama. Alat-alat yang digunakan pada percobaan antara lain :

1. Labu takar 250 ml
2. Gelas kimia 1000 ml
3. Gelas kimia 100 ml
4. Labu erlenmeyer 250 ml
5. Gelas ukur 100 ml
6. Gelas ukur 50 ml
7. Waterbath yang dilengkapi dengan shaker
8. Botol semprot
9. Spektrofotometer
10. Stopwatch
11. Neraca
12. Termometer

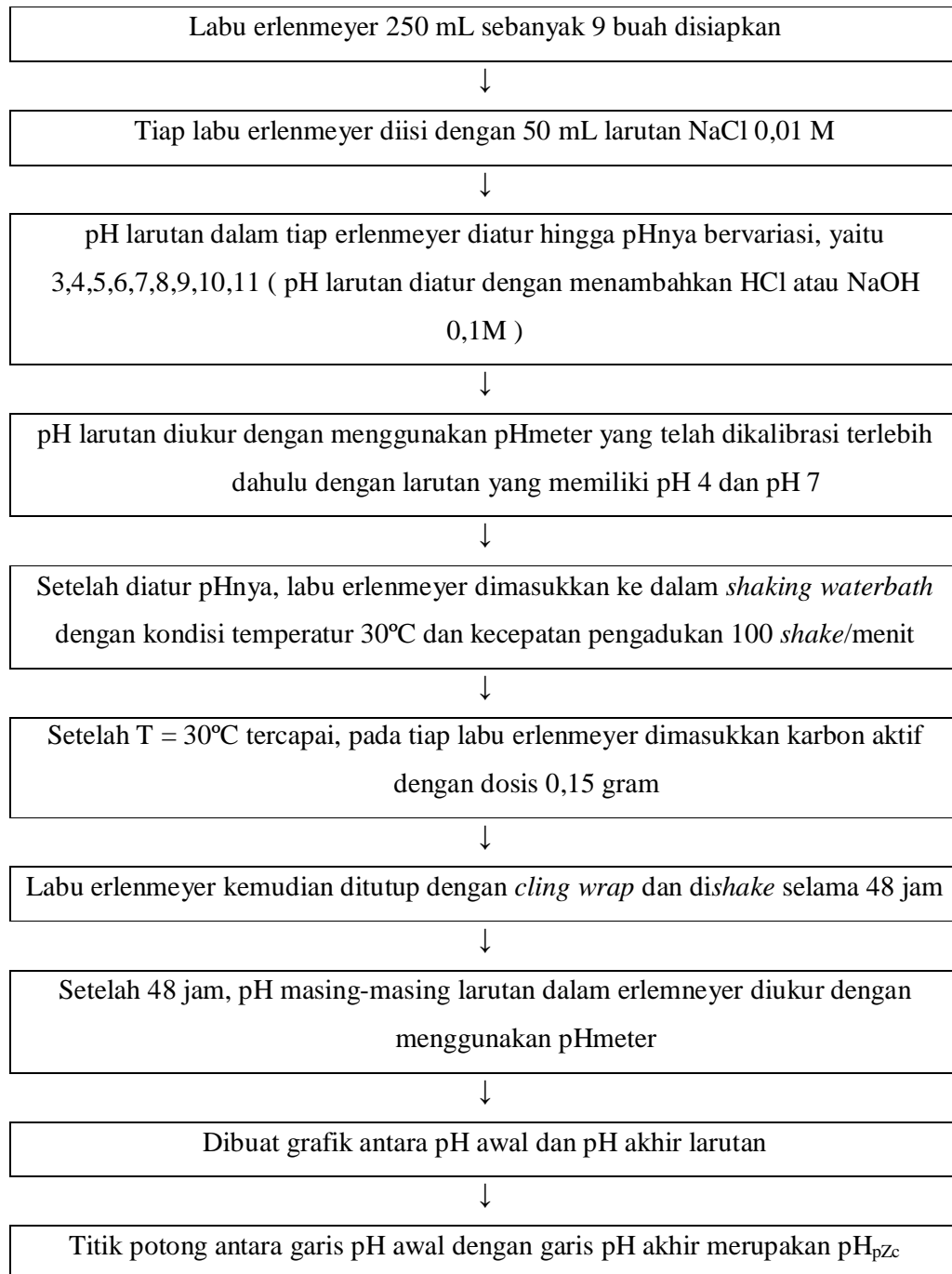
### 3.4 Metode Penyelesaian

Penelitian terbagi menjadi dua tahap, yaitu percobaan pendahuluan dan percobaan utama.

#### 3.4.1 Percobaan Pendahuluan

##### 3.4.1.1 Penentuan $pH_{pZc}$

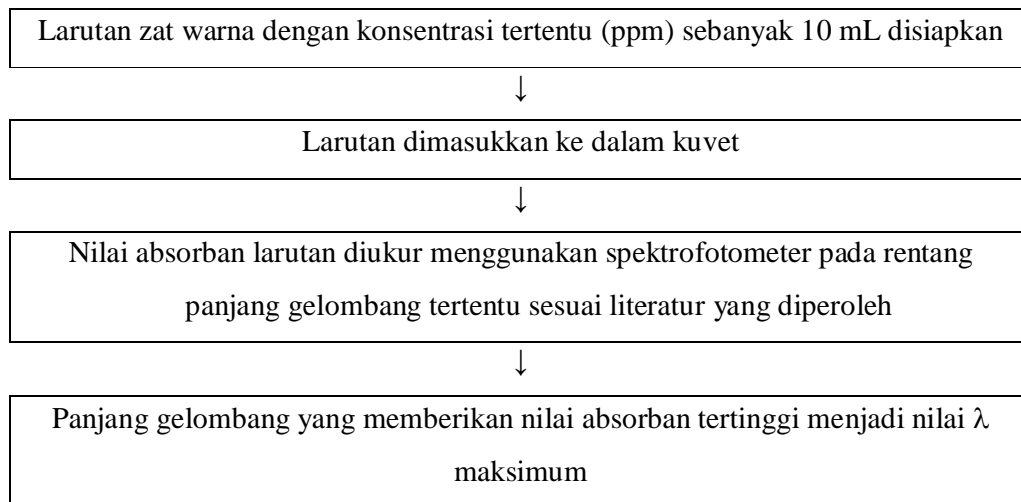
Penentuan  $pH_{pZc}$  bertujuan untuk menentukan nilai pH dimana karbon aktif tidak memiliki muatan positif maupun negatif (*zero charge*). Pada kondisi  $pH_{pZc}$ , pH larutan tidak mempengaruhi kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap zat warna.



**Gambar 3.1** Prosedur penentuan  $pH_{pZc}$

### 3.4.1.2 Penentuan $\lambda$ maksimum

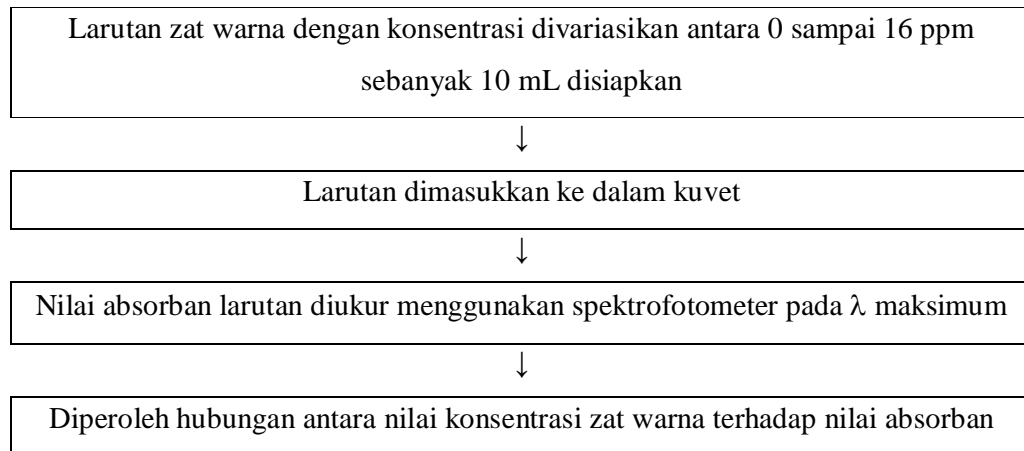
Penentuan  $\lambda$  maksimum bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pada pengukuran %T dengan spektrofotometer karena pada  $\lambda$  maksimum sensitivitas molekul dalam menyerap cahaya paling tinggi sehingga pengukuran nilai %T lebih akurat.  $\lambda$  maksimum merupakan nilai  $\lambda$  yang menghasilkan %T minimum. Percobaan ini dilakukan dengan melakukan pengukuran nilai %T larutan zat warna dengan konsentrasi tertentu untuk masing-masing variasi jenis zat warna pada berbagai  $\lambda$ .



**Gambar 3.2** Prosedur penentuan  $\lambda$  maksimum dengan spektrofotometer

### 3.4.1.3 Penentuan Kurva Standar

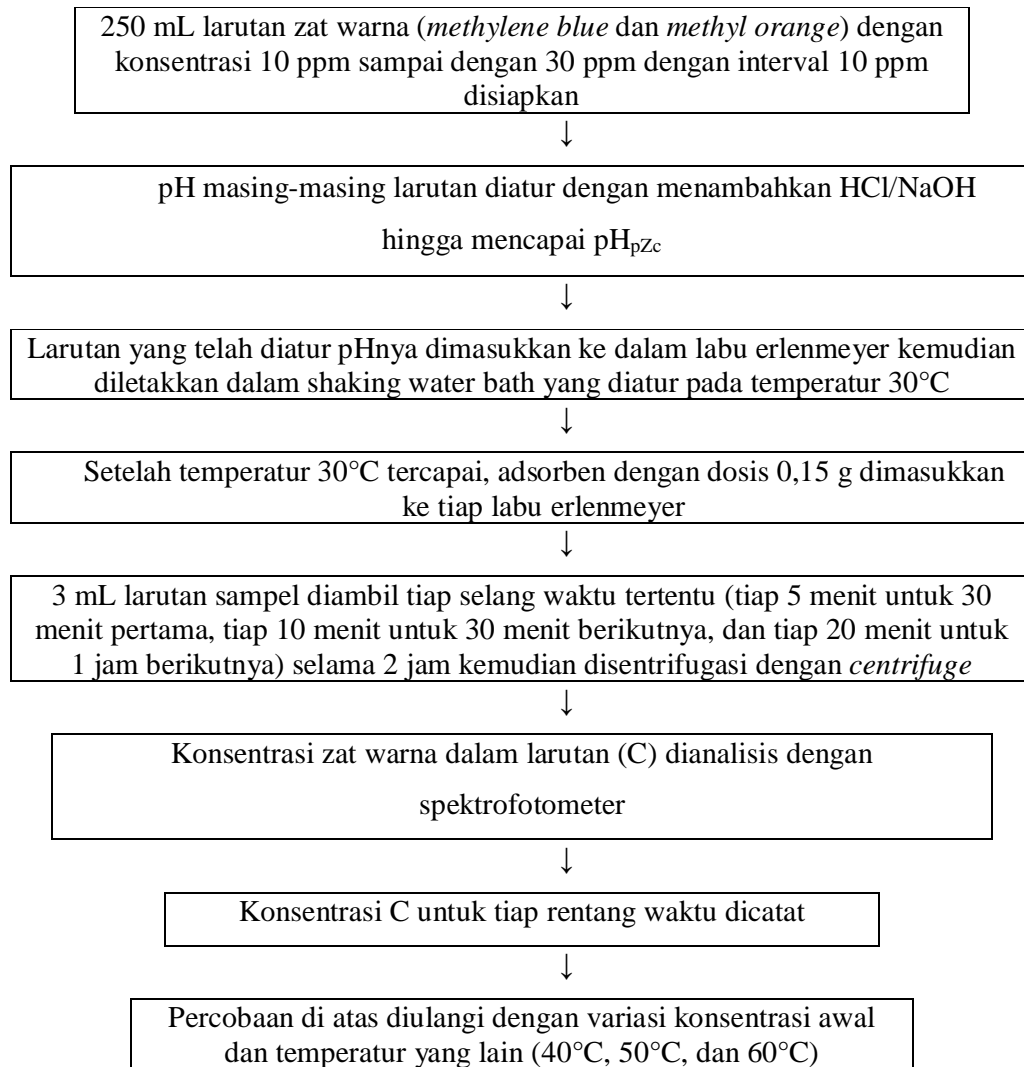
Penentuan kurva standar bertujuan untuk menentukan konsentrasi larutan zat warna dari data absorban yang diperoleh. Percobaan ini dilakukan dengan melakukan variasi konsentrasi terhadap tiap jenis zat warna.



**Gambar 3.3** Prosedur penentuan kurva kalibrasi spektrofotometer

### **3.4.2 Percobaan Utama (Penentuan Kinetika dan Perpindahan Massa Adsorpsi)**

Percobaan penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi dilakukan dengan melakukan variasi terhadap jenis zat warna, konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ), dan temperatur (T). Percobaan ini bertujuan untuk memperoleh parameter konstanta kinetika adsorpsi dan memperoleh parameter dalam *Heterogenous Surface Diffusion Model* ( $D_s$ ,  $k_b$ ,  $k_f$ , dan  $f$ ). Prosedur percobaan utama dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.4** Prosedur penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi

### 3.5 Pengolahan Data (Algoritma Perhitungan)

Korelasi-korelasi untuk pengolahan data diperoleh dari penurunan neraca massa berdasarkan pemodelan adsorpsi fasa cair dengan *Multipore model*. Korelasi-korelasi yang digunakan antara lain :

4. Neraca massa fasa cair

$$\frac{dC_t}{dt} = -k_f (C_t - C_s, t)$$

5. Neraca massa *Macropore*

$$f \frac{\partial q_m}{\partial t} = \frac{f D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial q_m}{\partial r} \right) - Rb$$

$Rb$  merupakan laju perpindahan adsorbat dari *macropore* ke *micropore*.

6. Neraca massa *Micropore*

$$(1-f) \frac{\partial q_b}{\partial t} = k_b (q_m - q_b) = Rb$$

Kondisi awal yang digunakan :

$$q_m(r,0) = 0$$

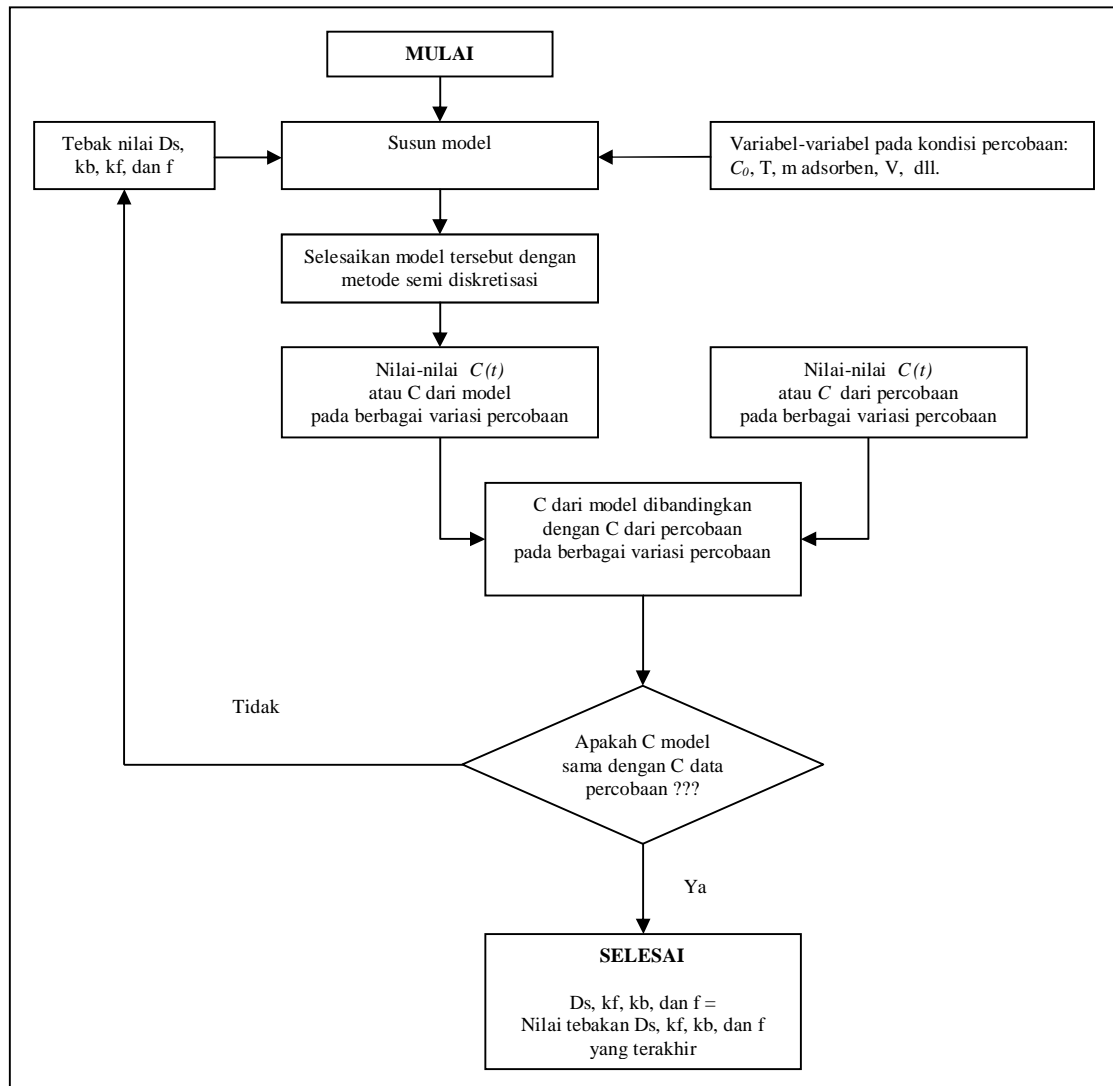
$$q_b(r,0) = 0$$

$$C_t(t=0) = C_0$$

$$q_m(r,t) = q_s(t)$$

$$\frac{\partial q_m}{\partial t}(0,t) = 0$$

Algoritma metode perhitungan nilai  $D_s$ ,  $k_f$ ,  $k_b$ , dan  $f$  secara numerik (metode integrasi) diberikan pada Gambar 3.5. Penyelesaian dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak seperti MATLAB<sup>®</sup>. Contoh fungsi-fungsi MATLAB yang dapat digunakan adalah *fminsearch* dan *ode45*.



**Gambar 3.5** Algoritma perhitungan secara numerik

### 3.6 Lokasi dan Rencana Kerja

Penelitian bertempat di Laboratorium Penelitian Jurusan Teknik Kimia, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung. Rencana kerja yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3.1.



**Tabel 3.1** Rencana kerja penelitian

No	Kegiatan	Agustus				September				Oktober				November				Desember			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Persiapan alat dan bahan			■	■																
2	Percobaan pendahuluan					■	■														
3	Percobaan penentuan kinetika adsorpsi							■	■	■	■										
4	Modelling, pengolahan dan analisa data										■	■	■	■							
5	Pembahasan hasil percobaan														■	■					
6	Penyelesaian akhir laporan																■	■			

## BAB IV

### HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN

#### 3.3 Percobaan Pendahuluan

Percobaan pendahuluan yang dilakukan dalam penelitian ini ada tiga, yaitu penentuan  $pH_{pZc}$ , penentuan  $\lambda$  maksimum untuk masing-masing zat warna yang digunakan, dan penentuan kurva standar untuk masing-masing zat warna.

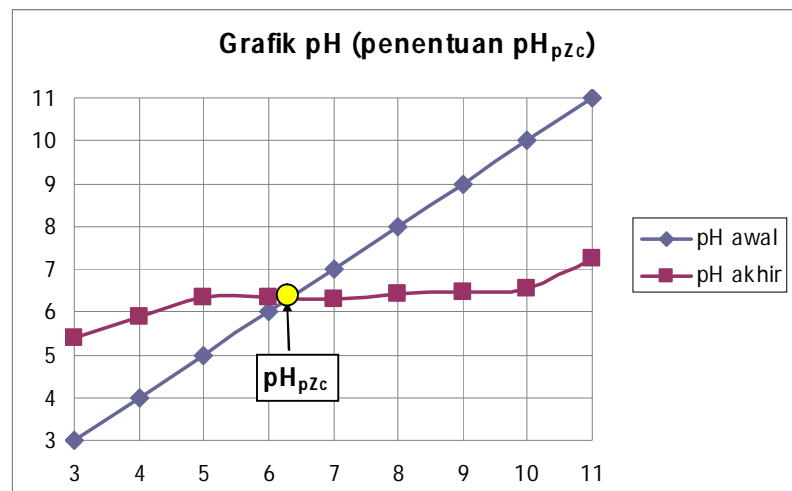
##### 3.3.1 Penentuan $pH_{pZc}$

Penentuan  $pH_{pZc}$  bertujuan untuk menentukan nilai pH dimana karbon aktif tidak memiliki muatan positif maupun negatif (*zero charge*). Pada kondisi  $pH_{pZc}$ , pH larutan tidak mempengaruhi kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap zat warna. pH awal dan pH akhir larutan hasil percobaan ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 pH larutan

pH awal	pH akhir
3	5,38
4	5,88
5	6,35
6	6,32
7	6,3
8	6,41
9	6,45
10	6,55
11	7,25

Penentuan  $pH_{pZc}$  dilakukan dengan mengalurkan grafik antara pH awal dan pH akhir larutan. Hasil penentuan  $pH_{pZc}$  ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik penentuan  $pH_{pzc}$

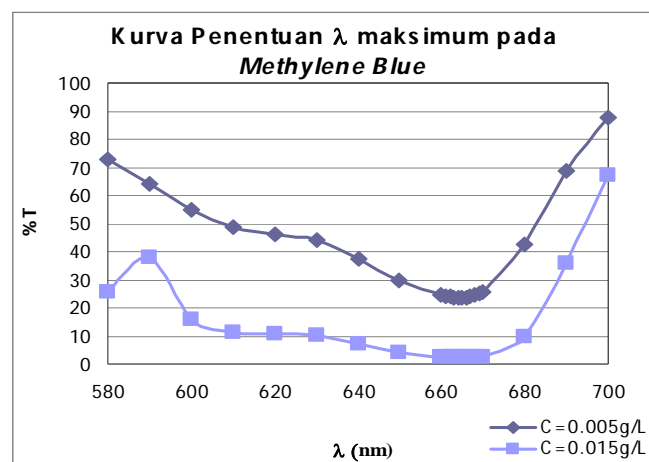
Gambar 4.1 menunjukkan bahwa variasi pH awal akan memberikan hasil pH akhir yang tidak jauh berbeda untuk tiap labu erlenmeyer. Berdasarkan Gambar 4.1 diperoleh bahwa nilai  $pH_{pzc} = 6,31$ . Percobaan utama dilakukan pada kondisi pH larutan =  $pH_{pzc}$ .

### 3.3.2 Penentuan $\lambda$ maksimum

Penentuan  $\lambda$  maksimum bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pada pengukuran %T dengan spektrofotometer karena pada  $\lambda$  maksimum sensitivitas molekul dalam menyerap cahaya paling tinggi sehingga pengukuran nilai %T lebih akurat.  $\lambda$  maksimum merupakan nilai  $\lambda$  yang menghasilkan %T minimum. Percobaan ini dilakukan dengan melakukan pengukuran nilai %T larutan zat warna dengan konsentrasi tertentu untuk masing-masing variasi jenis zat warna pada berbagai  $\lambda$ . Hasil penentuan  $\lambda$  maksimum untuk larutan *methylene blue* ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2.

Tabel 4.2 Nilai %T pada berbagai  $\lambda$  untuk *methylene blue*

$C_0 = 0.005 \text{ g/L}$		$C_0 = 0.015 \text{ g/L}$	
$\lambda$	% T	$\lambda$	% T
580	72.8	580	25.8
590	64.3	590	37.8
600	55	600	15.8
610	48.6	610	11.2
620	46.4	620	10.7
630	44.3	630	10.2
640	37.6	640	7
650	29.9	650	4
660	24.4	660	2.6
661	24.1	661	2.5
662	23.9	662	2.5
663	23.7	663	2.4
664	23.6	664	2.4
665	23.6	665	2.4
666	23.7	666	2.4
667	24	667	2.5
668	24.4	668	2.5
669	24.9	669	2.7
670	25.4	670	2.8
680	42.5	680	10
690	68.8	690	35.8
700	87.5	700	67

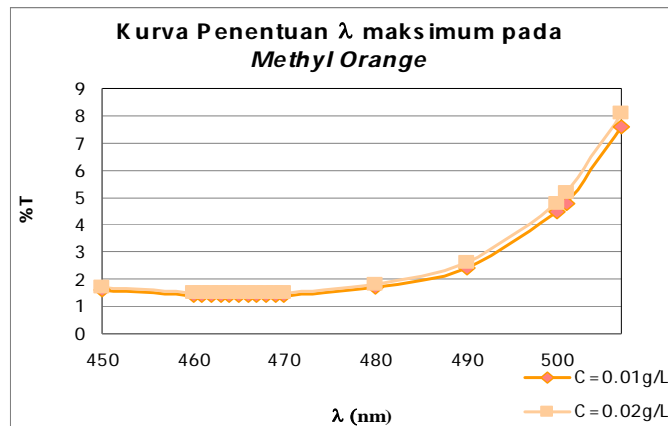
Gambar 4.2 Kurva penentuan  $\lambda$  maksimum larutan *methylene blue*

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Gambar 4.2 diperoleh bahwa nilai %T paling minimum diperoleh pada panjang gelombang antara 663-665nm. Hal ini menunjukkan bahwa nilai  $\lambda$  maksimum untuk larutan *methylene blue* adalah 665nm. Hasil penentuan  $\lambda$  maksimum *methylene blue* menunjukkan bahwa  $\lambda$  maksimum *methylene blue* tetap untuk berbagai konsentrasi awal larutan ( $C_0$ ) berarti  $\lambda$  maksimum untuk satu jenis zat warna tidak dipengaruhi oleh  $C_0$ .

Hasil penentuan  $\lambda$  maksimum untuk larutan *methyl orange* ditunjukkan pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.3.

Tabel 4.3 Nilai %T pada berbagai  $\lambda$  untuk *methyl orange*

$C_0 = 0.01 \text{ g/L}$		$C_0 = 0.02 \text{ g/L}$	
$\lambda$	% T	$\lambda$	% T
450	1.6	450	1.7
460	1.4	460	1.5
461	1.4	461	1.5
462	1.4	462	1.5
463	1.4	463	1.5
464	1.4	464	1.5
465	1.4	465	1.5
466	1.4	466	1.5
467	1.4	467	1.5
468	1.4	468	1.5
469	1.4	469	1.5
470	1.4	470	1.5
480	1.7	480	1.8
490	2.4	490	2.6
500	4.5	500	4.8
501	4.8	501	5.2
507	7.6	507	8.1

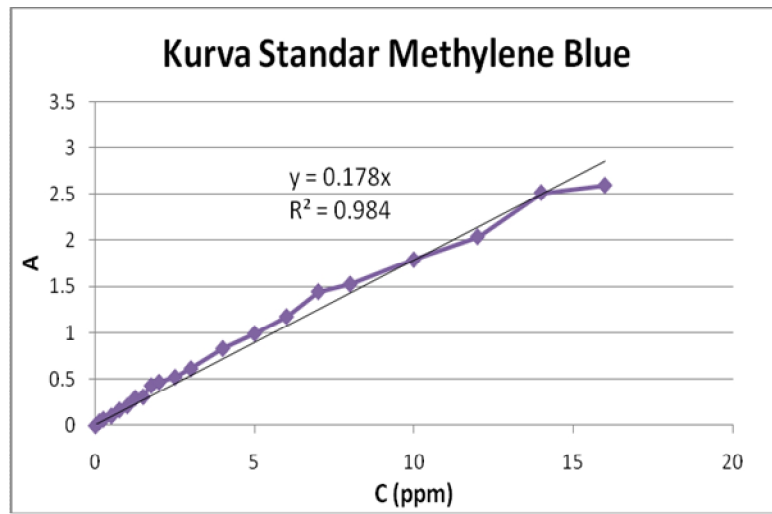


Gambar 4.3 Kurva penentuan  $\lambda$  maksimum larutan *methyl orange*

Berdasarkan Tabel 4.3 dan Gambar 4.3 diperoleh bahwa nilai %T paling minimum diperoleh pada panjang gelombang antara 460-470nm. Hal ini menunjukkan bahwa nilai  $\lambda$  maksimum untuk larutan *methyl orange* adalah 465nm. Hasil penentuan  $\lambda$  maksimum *methyl orange* menunjukkan bahwa  $\lambda$  maksimum *methylene orange* tetap untuk berbagai konsentrasi awal larutan ( $C_0$ ) berarti  $\lambda$  maksimum untuk satu jenis zat warna tidak dipengaruhi oleh  $C_0$ .

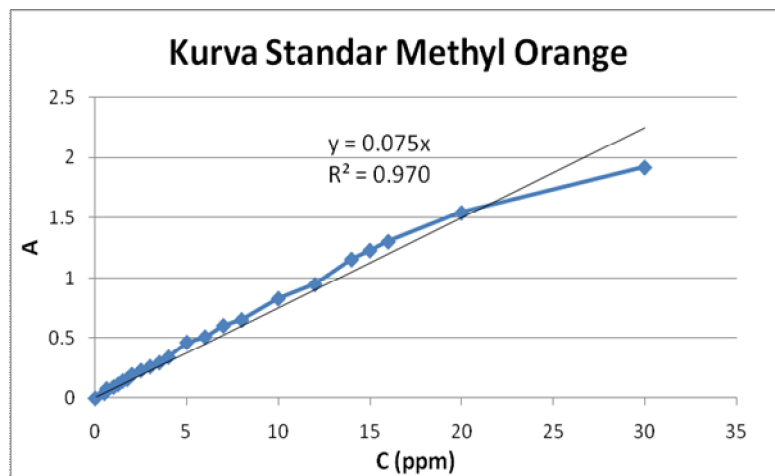
### 3.3.3 Penentuan kurva standar

Kurva standar didapatkan dengan mengalurkan data absorbansi yang diperoleh terhadap konsentrasi larutan. Penentuan kurva standar bertujuan untuk menentukan konsentrasi larutan zat warna dari data absorbansi yang diperoleh. Kurva standar untuk masing-masing zat warna (*methylene blue* dan *methyl orange*) ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Kurva standar *methylene blue*

Berdasarkan Gambar 4.4 diperoleh bahwa persamaan kalibrasi spektrofotometer untuk larutan *methylene blue* :  $A = 0,178 C$ .



Gambar 4.5 Kurva standar *methyl orange*

Berdasarkan Gambar 4.5 diperoleh bahwa persamaan kalibrasi spektrofotometer untuk larutan *methyl orange*:  $A = 0,075 C$ .

Pada percobaan kurva standar untuk kedua jenis zat warna memberikan kecenderungan data yang sama, yaitu semakin tinggi konsentrasi larutan zat warna maka nilai absorbansi juga semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena konsentrasi yang semakin tinggi mengakibatkan semakin banyak sinar UV dari spektrofotometer yang dapat diserap oleh molekul-molekul dalam larutan

sehingga nilai absorbansi semakin tinggi. Persamaan kurva standar yang diperoleh untuk kedua jenis zat warna menunjukkan bahwa konsentrasi larutan zat warna berbanding lurus dengan nilai absorbansi yang diukur dengan spektrofotometer UV.

#### 4.2 Percobaan Utama (Penentuan Kinetika dan Perpindahan Massa Adsorpsi)

Percobaan penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi dilakukan dengan melakukan variasi terhadap jenis zat warna, konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ), dan temperatur ( $T$ ). Jenis zat warna yang digunakan ada dua, yaitu *methylene blue* dan *methyl orange*. Konsentrasi awal larutan untuk masing-masing zat warna ( $C_0$ ) yang digunakan ada tiga, yaitu 10 ppm, 20 ppm, dan 30 ppm. Temperatur ( $T$ ) yang digunakan divariasikan menjadi lima level, yaitu 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C. Percobaan ini bertujuan untuk memperoleh parameter konstanta kinetika adsorpsi dan memperoleh parameter dalam *Heterogenous Surface Diffusion Model* ( $D_s$ ,  $k_b$ ,  $k_f$ , dan  $f$ ).

Percobaan utama yang dilakukan menghasilkan data berupa konsentrasi larutan zat warna tiap selang waktu tertentu. Pengolahan data tersebut dilakukan dengan menggunakan korelasi-korelasi yang diperoleh dari penurunan neraca massa berdasarkan pemodelan adsorpsi fasa cair dengan *Multipore model*. Korelasi-korelasi yang digunakan antara lain :

7. Neraca massa fasa cair

$$\frac{dC_t}{dt} = -k_f (C_t - C_s, t)$$

8. Neraca massa *Macropore*

$$f \frac{\partial q_m}{\partial t} = \frac{f D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial q_m}{\partial r} \right) - R_b$$

$R_b$  merupakan laju perpindahan adsorbat dari *macropore* ke *micropore*.

9. Neraca massa *Micropore*

$$(1 - f) \frac{\partial q_b}{\partial t} = k_b (q_m - q_b) = R_b$$



Kondisi awal yang digunakan :

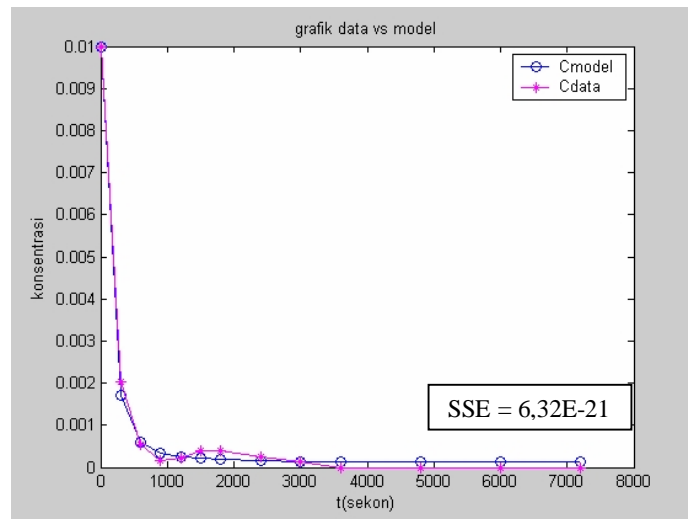
$$\begin{aligned}q_m(r,0) &= 0 \\q_b(r,0) &= 0 \\C_t(t=0) &= C_0 \\q_m(r,t) &= q_s(t) \\\frac{\partial q_m}{\partial t}(0,t) &= 0\end{aligned}$$

Persamaan diferensial biasa maupun persamaan diferensial parsial yang diperoleh dari penurunan neraca massa dalam pemodelan adsorpsi fasa cair dengan *multipore model* akan diselesaikan dengan metode numerik. Metode numerik yang digunakan yaitu metode semi diskretisasi dimana persamaan diferensial parsial (PDP) diubah menjadi beberapa persamaan diferensial biasa (PDB) orde 1. Setelah dilakukan semi diskretisasi terhadap PDP, maka sejumlah PDB orde 1 yang diperoleh dapat diselesaikan secara simultan untuk memperoleh nilai parameter-parameter yang ingin ditentukan. Penyelesaian dapat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak seperti MATLAB<sup>®</sup>. Contoh fungsi-fungsi MATLAB yang dapat digunakan adalah *fminsearch* dan *ode23s*.

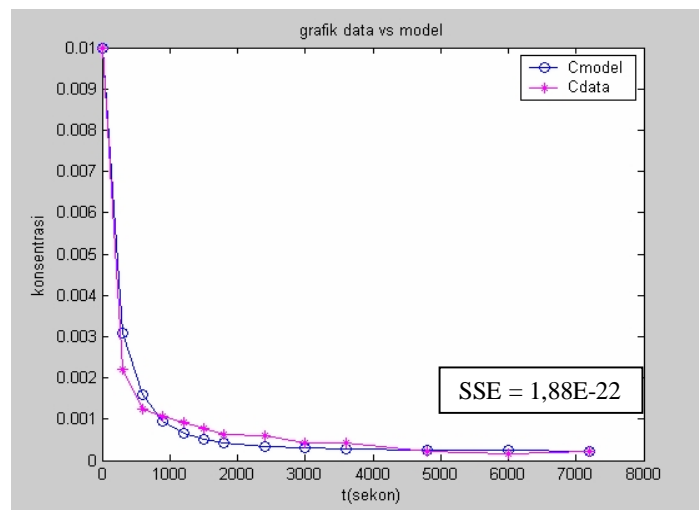
## 4.2.1 Profil konsentrasi

### 4.2.1.1 Profil Cmodel dan Cdata terhadap waktu

Nilai parameter pada *Heterogenous Surface Diffusion Model* yang telah diperoleh dapat digunakan untuk mendapatkan harga Cmodel tiap selang waktu tertentu. Data Cmodel dan Cdata terhadap waktu dialurkan sehingga diperoleh profil konsentrasi zat warna di fasa cair (C), baik pada Cmodel maupun Cdata terhadap waktu(t). Kedua jenis zat warna, yaitu *methylene blue* dan *methyl orange* menunjukkan profil yang sama. Contoh profil C terhadap t ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Grafik C terhadap t pada *methylene blue*  
( $C_0=10$  ppm dan  $T=50^\circ\text{C}$ )



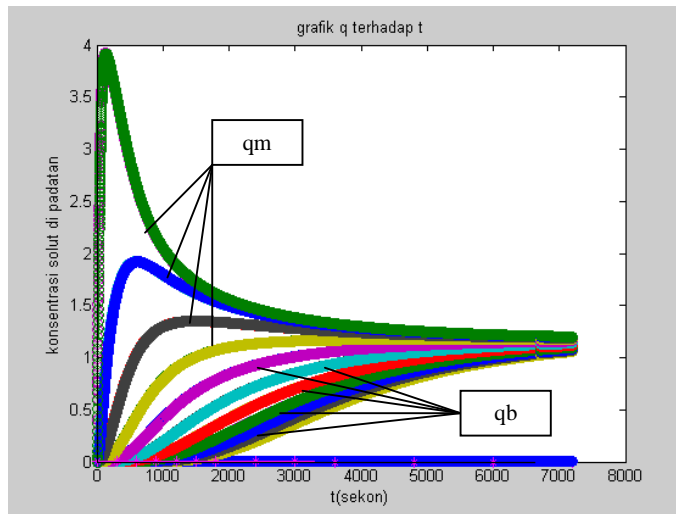
Gambar 4.7 Grafik C terhadap t pada *methyl orange*  
( $C_0=10$  ppm dan  $T=50^\circ\text{C}$ )

Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 menunjukkan bahwa konsentrasi zat warna pada fasa cair (C) mula-mula mengalami penurunan secara cepat kemudian laju penurunan C berangsur-angsur melambat hingga tercapai nilai C yang konstan. Penurunan konsentrasi zat warna pada larutan disebabkan karena adanya perbedaan konsentrasi zat warna pada larutan dan pada permukaan karbon aktif sehingga terjadi perpindahan massa zat warna dari larutan ke permukaan karbon aktif secara konveksi. Laju perpindahan massa zat warna dari larutan ke

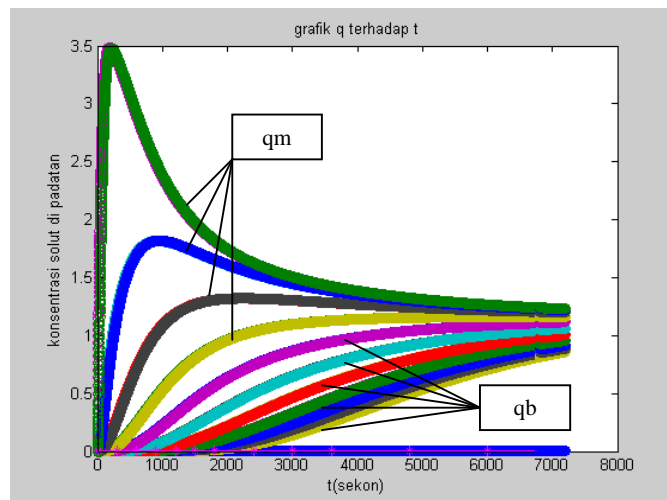
permukaan karbon aktif dipengaruhi oleh koefisien perpindahan massa pada fasa cair ( $k_f$ ). Nilai akhir konsentrasi yang konstan menunjukkan bahwa pada saat konsentrasi zat warna di larutan sama dengan konsentrasi zat warna pada karbon aktif, karbon aktif telah mengalami kejenuhan sehingga perpindahan massa zat warna dari larutan ke permukaan karbon aktif tidak berlangsung lagi. Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 juga menunjukkan profil yang sama untuk  $C_{model}$  maupun  $C_{data}$ .  $C_{data}$  yang diperoleh dari percobaan hampir mendekati  $C_{model}$ . Hal ini menunjukkan bahwa *Heterogenous Surface Diffusion Model* cocok untuk menunjukkan karakteristik perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif.

#### **4.2.1.2 Profil konsentrasi solut di fasa padatan pada *macropore*( $q_m$ ) terhadap waktu( $t$ ) dan posisi( $r$ )**

Korelasi-korelasi pada *Heterogenous Surface Diffusion Model* diselesaikan dengan program MATLAB sehingga diperoleh nilai parameter-parameter  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$ . Nilai parameter yang telah diperoleh dapat digunakan untuk mendapatkan harga  $q$  tiap selang waktu tertentu dan pada posisi tertentu. Data  $q$  terhadap waktu dialurkan sehingga diperoleh profil konsentrasi zat warna di fasa padatan karbon aktif ( $q$ ), baik pada *macropore*( $q_m$ ) maupun pada *micropore*( $q_b$ ) terhadap waktu( $t$ ). Kedua jenis zat warna, yaitu *methylene blue* dan *methyl orange* menunjukkan profil yang sama. Contoh profil  $q$  terhadap  $t$  pada *methylene blue* dan *methyl orange* ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Grafik q terhadap t pada *methylene blue*  
( $C_0=10$  ppm dan  $T=50^\circ\text{C}$ )

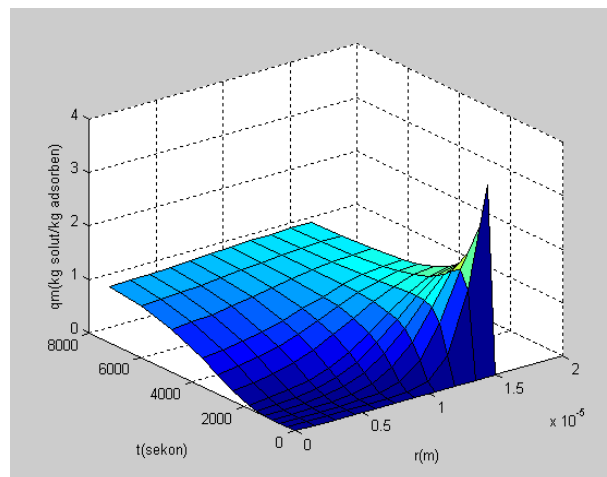


Gambar 4.9 Grafik q terhadap t pada *methyl orange*  
( $C_0=10$  ppm dan  $T=50^\circ\text{C}$ )

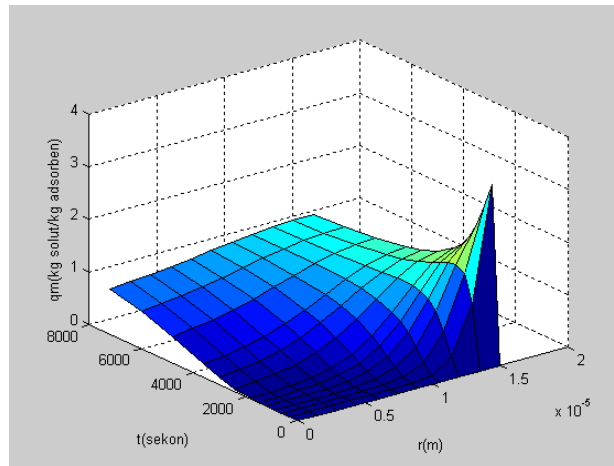
Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan bahwa konsentrasi zat warna pada *macropore* ( $q_m$ ) mula-mula mengalami peningkatan tetapi setelah selang waktu tertentu mengalami penurunan drastis hingga konstan pada konsentrasi tertentu. Peningkatan  $q_m$  pada saat awal disebabkan karena terjadi mula-mula terjadi perpindahan massa zat warna dari permukaan karbon aktif ke *macropore* karbon aktif secara difusi molekular sehingga konsentrasi zat warna

pada *macropore* mengalami peningkatan drastis. Laju perpindahan massa zat warna dari permukaan karbon aktif ke *macropore* dipengaruhi oleh koefisien difusi permukaan ( $D_s$ ). Perpindahan massa zat warna terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi zat warna pada permukaan karbon aktif dan *macropore*. Setelah selang waktu tertentu, konsentrasi zat warna pada *macropore* mengalami penurunan yang disebabkan karena terjadi perpindahan massa zat warna dari *macropore* ke dalam *micropore* karbon aktif. Konsentrasi zat warna pada *macropore* dan *micropore* pada akhirnya mencapai konsentrasi yang sama (konstan). Hal tersebut menunjukkan bahwa pada saat mencapai nilai konsentrasi yang konstan, karbon aktif mengalami kejenuhan sehingga tidak terjadi lagi perpindahan massa dari *macropore* ke *micropore*.

Contoh profil konsentrasi solut di *macropore* karbon aktif ( $q_m$ ) terhadap waktu ( $t$ ) dan posisi ( $r$ ) pada *methylene blue* dan *methyl orange* ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11.



Gambar 4.10 Grafik  $q_m$  terhadap  $t$  dan  $r$  pada *methylene blue*  
( $C_0=10$  ppm dan  $T=50^\circ\text{C}$ )



Gambar 4.11 Grafik  $q_m$  terhadap  $t$  dan  $r$  pada *methyl orange*  
( $C_0=10$  ppm dan  $T=50^\circ\text{C}$ )

Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 menunjukkan bahwa nilai konsentrasi solut di *macropore* ( $q_m$ ) akan semakin meningkat jika posisi semakin jauh dari pusat karbon aktif ( $r$  semakin besar). Hal ini cukup logis karena solut yang mula-mula berada di permukaan karbon aktif kemudian akan terserap ke dalam pori karbon aktif sehingga semakin besar  $r$  maka semakin besar konsentrasi solut di *macropore* ( $q_m$ ).

#### 4.2.1.3 Profil konsentrasi solut di fasa padatan pada *micropore* ( $q_b$ ) terhadap waktu ( $t$ )

Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan bahwa konsentrasi zat warna pada *micropore* ( $q_b$ ) mula-mula rendah tetapi terus mengalami peningkatan hingga konstan pada konsentrasi tertentu. Hal ini disebabkan karena terjadi perpindahan massa zat warna dari *macropore* ke dalam *micropore* karbon aktif. Laju perpindahan massa zat warna dari *macropore* ke *micropore* dipengaruhi oleh koefisien laju adsorpsi pada *micropore* ( $k_b$ ). Perpindahan massa zat warna dari *macropore* ke dalam *micropore* karbon aktif juga menyebabkan peningkatan  $q_b$  terhadap waktu. Perpindahan massa zat warna terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi zat warna pada *macropore* dan *micropore*. Konsentrasi zat warna pada *macropore* dan *micropore* pada akhirnya mencapai konsentrasi yang sama (konstan). Hal tersebut menunjukkan bahwa pada saat mencapai nilai konsentrasi

yang konstan, karbon aktif mengalami kejenuhan sehingga tidak terjadi lagi perpindahan massa dari *macropore* ke *micropore*.

#### 4.2.2 Pengaruh temperatur (T) terhadap parameter $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan $f$

Pada percobaan penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi dilakukan variasi temperatur, yaitu 30°C, 40°C, 50°C, dan 60°C. Tujuan dari variasi temperatur dalam percobaan utama yaitu untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap parameter  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$ . Hasil  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$  untuk zat warna *methylene blue* dan *methyl orange* ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Nilai  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$  untuk *methylene blue*

		Parameter	TEMPERATUR (°C)			
			30	40	50	60
KONSENTRASI (ppm)	10	$k_f$ (m/s)	4,26E-03	7,87E-03	9,91E-03	9,92E-03
		$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)	5,45E-15	8,32E-15	1,11E-14	1,16E-14
		$k_b$ (1/s)	4,26E-02	6,81E-02	9,02E-02	1,02E-01
		$f$	5,19E-01	5,04E-01	5,05E-01	5,00E-01
		SSE	2,15E-22	7,08E-23	6,32E-21	2,08E-20
	20	$k_f$ (m/s)	6,35E-03	9,02E-03	1,10E-02	1,13E-02
		$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)	5,90E-15	8,93E-15	1,09E-14	1,19E-14
		$k_b$ (1/s)	5,40E-02	7,88E-02	1,02E-01	1,05E-01
		$f$	5,08E-01	5,23E-01	5,28E-01	5,02E-01
		SSE	2,89E-21	7,46E-21	9,78E-20	3,18E-21
	30	$k_f$ (m/s)	7,34E-03	1,08E-02	1,15E-02	1,24E-02
		$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)	6,93E-15	1,04E-14	1,10E-14	1,20E-14
		$k_b$ (1/s)	6,46E-02	9,26E-02	1,04E-01	1,06E-01
		$f$	5,07E-01	5,10E-01	5,16E-01	5,04E-01
		SSE	3,53E-20	2,52E-23	3,31E-21	7,96E-21

Tabel 4.5 Nilai  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$  untuk *methyl orange*

		Parameter	TEMPERATUR (°C)			
			30	40	50	60
KONSENTRASI (ppm)	10	$k_f$ (m/s)	4,30E-03	5,27E-03	6,16E-03	7,67E-03
		$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)	2,69E-15	6,19E-15	7,44E-15	7,60E-15
		$k_b$ (1/s)	5,95E-03	1,73E-02	2,14E-02	2,35E-02
		$f$	5,90E-01	5,55E-01	5,59E-01	5,84E-01
		SSE	1,34E-23	3,41E-22	1,88E-22	2,10E-21
	20	$k_f$ (m/s)	4,82E-03	6,09E-03	7,14E-03	8,77E-03
		$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)	4,64E-15	6,58E-15	7,49E-15	8,73E-15
		$k_b$ (1/s)	1,28E-02	2,18E-02	3,07E-02	3,30E-02
		$f$	5,18E-01	5,12E-01	5,52E-01	5,32E-01
		SSE	6,98E-22	1,60E-22	3,94E-21	2,04E-24
	30	$k_f$ (m/s)	4,88E-03	6,97E-03	9,58E-03	1,08E-02
		$D_s$ (m <sup>2</sup> /s)	4,65E-15	8,80E-15	8,81E-15	9,12E-15
		$k_b$ (1/s)	2,93E-02	3,04E-02	3,27E-02	3,97E-02
		$f$	5,80E-01	5,00E-01	5,56E-01	5,60E-01
		SSE	3,30E-22	3,97E-22	2,25E-20	5,84E-22

Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur maka nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair ( $k_f$ ), koefisien difusi permukaan ( $D_s$ ), dan koefisien laju adsorpsi pada *micropore* ( $k_b$ ) semakin tinggi. Peningkatan nilai  $k_f$ ,  $D_s$ , dan  $k_b$  terhadap temperatur disebabkan karena semakin tinggi temperatur maka semakin besar energi yang dapat digunakan untuk mempercepat pergerakan molekul-molekul zat warna untuk berpindah dari larutan ke permukaan karbon aktif, kemudian menuju *macropore* dan berakhir pada *micropore*.<sup>[11]</sup> Pergerakan molekul-molekul zat warna yang semakin cepat menyebabkan laju perpindahan massa zat warna makin cepat sehingga nilai  $k_f$ ,  $D_s$ , dan  $k_b$  semakin tinggi. Sedangkan nilai fraksi dari kapasitas total adsorpsi pada *macropore* ( $f$ ) tidak dipengaruhi oleh temperatur.

Korelasi yang menghubungkan koefisien difusivitas permukaan ( $D_s$ ) dengan temperatur ( $T$ ) adalah<sup>[3][8][37]</sup>:

$$D_s = \frac{D_{s,0} \exp(-E / RT)}{\left(1 - \frac{q_e}{q_{\max}}\right)}$$



dengan :

$D_s$  = koefisien difusi permukaan ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$D_{s,0}$  = koefisien difusi permukaan saat  $q=0$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$E$  = energi aktivasi (kJ)

$R$  = konstanta gas (8.31 kJ/mol.K)

$T$  = temperatur (K)

$q_e$  = konsentrasi adsorbat di fasa padatan saat kesetimbangan pada saat  $t$   
(mg/g)

$q_{\max}$  = konsentrasi adsorbat maksimum di fasa padatan saat kesetimbangan  
(mg/g)

$$D_{AB} = \frac{kT}{6\pi\mu_B R_A}$$

dengan:

$D_{AB}$  = difusivitas untuk sistem biner ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$k$  = tetapan Boltzman ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^2\text{K}$ )

$T$  = temperatur (K)

$\mu_B$  = viskositas liquid ( $\text{kg}/\text{cm}\cdot\text{s}$ )

$R_A$  = jari-jari solut (cm)

Berdasarkan kedua korelasi tersebut, diperoleh bahwa semakin tinggi temperatur( $T$ ) maka nilai koefisien difusi permukaan( $D_s$ ) akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan nilai  $D_s$  yang diperoleh dari percobaan utama dengan variasi temperatur yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Bilangan Sherwood merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang umum digunakan untuk menunjukkan ukuran perpindahan massa biner yang terjadi pada fluida isothermal dengan satuan molar. Bilangan ini tidak hanya berkaitan dengan koefisien perpindahan massa, tetapi juga merupakan fungsi dari bilangan Reynolds dan bilangan Schmidt.<sup>[28][36]</sup>

$$N_{sh} = \frac{k_f D_p}{D_i} = a + b N_{Re}^c N_{Sc}^d$$

dengan:

$N_{Sh}$  = bilangan Sherwood

$N_{Re}$  = bilangan Reynolds =  $\rho ND^2/\mu$  (N=kecepatan rotasi, D=diameter impeller)

$N_{Sc}$  = bilangan Schmidt =  $\mu/\rho D_i$

$k_f$  = koefisien perpindahan massa

$D_p$  = diameter partikel adsorben

$D_i$  = difusivitas komponen i dalam campuran

a,b,c,d = konstanta (c>d)

Berdasarkan persamaan Sherwood, diperoleh bahwa semakin tinggi temperatur(T) maka viskositas( $\mu$ ) larutan zat warna semakin rendah sehingga menyebabkan nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair( $k_f$ ) akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan nilai  $k_f$  yang diperoleh dari percobaan utama dengan variasi temperatur yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

#### 4.2.3 Pengaruh konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ) terhadap parameter $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan $f$

Pada percobaan penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi dilakukan variasi konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ), yaitu 10ppm, 20ppm, dan 30ppm. Tujuan dari variasi  $C_0$  dalam percobaan utama yaitu untuk mengetahui pengaruh konsentrasi awal larutan zat warna terhadap parameter  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$ . Hasil  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$  untuk zat warna *methylene blue* dan *methyl orange* ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ) maka nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair( $k_f$ ), koefisien difusi permukaan( $D_s$ ), dan koefisien laju adsorpsi pada *micropore*( $k_b$ ) semakin tinggi. Peningkatan nilai  $k_f$ ,  $D_s$ , dan  $k_b$  terhadap  $C_0$  disebabkan karena semakin tinggi konsentasi awal larutan zat warna maka semakin besar perbedaan konsentrasi yang menjadi *driving force* bagi perpindahan massa zat warna dari larutan ke permukaan karbon aktif, kemudian menuju *macropore* dan berakhir pada *micropore*. Semakin besar perbedaan

konsentrasi yang menjadi *driving force* mempercepat pergerakan molekul-molekul zat warna yang menyebabkan laju perpindahan massa zat warna makin cepat sehingga nilai  $k_f$ ,  $D_s$ , dan  $k_b$  semakin tinggi. Sedangkan nilai fraksi dari kapasitas total adsorpsi pada *macropore*(f) tidak dipengaruhi oleh konsentrasi awal larutan zat warna.<sup>[1]</sup>

Korelasi yang menghubungkan koefisien difusivitas permukaan ( $D_s$ ) dengan konsentrasi solut di fasa padatan (adsorben) adalah<sup>[1][6]</sup>:

$$D_s = D_{s,0} \exp \{k(q/q_{sat})\}$$

dengan:

$D_s$  = koefisien difusi permukaan ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$D_{s,0}$  = koefisien difusi permukaan saat  $q=0$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$k$  = parameter

$q$  = konsentrasi solut di fasa padatan ( $\text{mg/g}$ )

$q_{sat}$  = konsentrasi adsorbat di fasa padatan saat kesetimbangan ( $\text{mg/g}$ )

$$D_s = D_{s,0} (k \cdot q)^n$$

dengan:

$D_s$  = koefisien difusi permukaan ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$D_{s,0}$  = koefisien difusi permukaan saat  $q=0$  ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$k$  = koefisien perpindahan massa intrapartikel padatan ( $\text{cm/s}$ )

$q$  = konsentrasi solut di fasa padatan ( $\text{mg/g}$ )

$n$  = konstanta isoterm Freundlich

Kedua korelasi di atas menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ) maka semakin besar konsentrasi solut di fasa padatan ( $q$ ) sehingga nilai koefisien difusi permukaan ( $D_s$ ) akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan nilai  $D_s$  yang diperoleh dari percobaan utama dengan variasi konsentrasi awal larutan zat warna yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Bilangan Sherwood merupakan suatu bilangan tak berdimensi yang umum digunakan untuk menunjukkan ukuran perpindahan massa biner yang terjadi pada fluida isothermal dengan satuan molar. Bilangan ini tidak hanya berkaitan dengan

koefisien perpindahan massa, tetapi juga merupakan fungsi dari bilangan Reynolds dan bilangan Schmidt. <sup>[28][36]</sup>

$$N_{sh} = \frac{k_f D_p}{D_i} = a + b N_{Re}^c N_{Sc}^d$$

dengan:

$N_{Sh}$  = bilangan Sherwood

$N_{Re}$  = bilangan Reynolds =  $\rho N D^2 / \mu$  (N=kecepatan rotasi, D=diameter impeller)

$N_{Sc}$  = bilangan Schmidt =  $\mu / \rho D_i$

$k_f$  = koefisien perpindahan massa

$D_p$  = diameter partikel adsorben

$D_i$  = difusivitas komponen i dalam campuran

a,b,c,d = konstanta (c>d)

Berdasarkan persamaan Sherwood, diperoleh bahwa semakin tinggi konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ) maka densitas ( $\rho$ ) larutan zat warna semakin tinggi sehingga menyebabkan nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair ( $k_f$ ) akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan nilai  $k_f$  yang diperoleh dari percobaan utama dengan variasi konsentrasi awal larutan zat warna yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

#### 4.2.4 Pengaruh jenis zat warna terhadap parameter $k_f$ , $D_s$ , $k_b$ , dan $f$

Pada percobaan penentuan kinetika dan perpindahan massa adsorpsi dilakukan variasi jenis zat warna, yaitu *methylene blue* dan *methyl orange*. Tujuan dari jenis zat warna dalam percobaan utama yaitu untuk mengetahui pengaruh jenis zat warna yang digunakan terhadap parameter  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$ . Hasil  $k_f$ ,  $D_s$ ,  $k_b$ , dan  $f$  untuk zat warna *methylene blue* dan *methyl orange* ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan bahwa nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair ( $k_f$ ), koefisien difusi permukaan ( $D_s$ ), dan koefisien laju adsorpsi pada *micropore* ( $k_b$ ) pada *methylene blue* lebih tinggi daripada *methyl orange*. Hal ini disebabkan karena *methylene blue* memiliki berat molekul yang

lebih kecil daripada berat molekul *methyl orange* (  $M_r$  *methylene blue* = 319,85 g/mol, sedangkan  $M_r$  *methyl orange* = 327,33 g/mol). Semakin kecil berat molekul zat warna maka ukuran partikel zat warna semakin kecil sehingga gerak molekul zat warna makin cepat dan molekul zat warna makin mudah terserap ke dalam pori adsorben. Oleh karena itu, semakin kecil  $M_r$  zat warna maka laju adsorpsi semakin meningkat (ditandai dengan nilai  $D_s$ ,  $k_f$ , dan  $k_b$  yang lebih tinggi).<sup>[1][5]</sup> Sedangkan nilai fraksi dari kapasitas total adsorpsi pada *macropore*(f) hampir sama untuk kedua jenis zat warna (jenis zat warna tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap f).<sup>[1]</sup>

Korelasi yang menghubungkan koefisien difusivitas permukaan ( $D_s$ ) dengan jari-jari solut( $R_A$ ) adalah<sup>[37]</sup>:

$$D_{AB} = \frac{kT}{6\pi\mu_B R_A}$$

dengan:

$D_{AB}$  = difusivitas untuk sistem biner ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

$k$  = tetapan Boltzman ( $\text{kg}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^2\text{K}$ )

$T$  = temperatur (K)

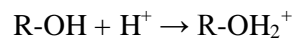
$\mu_B$  = viskositas liquid ( $\text{kg}/\text{cm}\cdot\text{s}$ )

$R_A$  = jari-jari solut (cm)

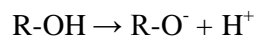
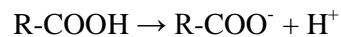
Korelasi di atas menunjukkan bahwa bahwa semakin kecil berat molekul zat warna maka ukuran partikel zat warna semakin kecil ( $R_A$  makin kecil) sehingga nilai koefisien difusi permukaan( $D_s$ ) akan semakin meningkat.  $M_r$  *methylene blue* lebih kecil daripada  $M_r$  *methyl orange* maka ukuran partikel *methylene blue* lebih kecil daripada ukuran partikel *methyl orange* sehingga  $D_s$  *methylene blue* >  $D_s$  *methyl orange*. Hal ini sesuai dengan nilai  $D_s$  yang diperoleh dari percobaan utama dengan variasi konsentrasi awal larutan zat warna yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Karbon aktif mempunyai kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap polutan organik yang mengalami peningkatan dari kompleksitas gugus fungsional. Pada permukaan karbon aktif dapat terjadi proses oksidasi yang menghasilkan gugus fungsional yang menyebabkan karbon bersifat amfoter (dapat bersifat asam atau

basa). Permukaan karbon aktif mengandung setidaknya lima tipe gugus kimia, seperti gugus karboksilat, gugus laktonik, gugus fenolik, gugus karbonil, dan gugus eter.<sup>[3]</sup> Terbentuknya gugus fungsional ini mengakibatkan permukaan karbon aktif menjadi reaktif dan mempengaruhi kemampuan adsorpsinya.<sup>[11]</sup> Karbon aktif memperlihatkan kapasitas adsorpsi yang tinggi terhadap ion  $H^+$  dan  $OH^-$ . Reaksi pada permukaan karbon yang bersifat basa dapat ditunjukkan dalam bentuk:



Reaksi disosiasi asam pada gugus permukaan karbon aktif dapat dituliskan sebagai berikut:



Selain sifat permukaan karbon aktif, nilai pH dari larutan zat warna juga mempengaruhi proses adsorpsi. pH larutan menyebabkan permukaan karbon aktif menjadi bermuatan sehingga permukaan karbon aktif dapat bersifat asam atau basa. Sifat permukaan karbon aktif tersebut menyebabkan karbon aktif memiliki afinitas dan kapasitas adsorpsi yang berbeda terhadap tiap jenis zat warna (*basic dyes* atau *acid dyes*). Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan  $pH = p_{zc} = 6,31$  dimana pada kondisi tersebut pH larutan tidak mempengaruhi kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap zat warna.

## BAB V

### KESIMPULAN

1. pH yang tidak memberikan pengaruh terhadap adsorpsi karbon aktif terhadap zat warna ( $pH_{pzc}$ ) sebesar 6,31.
2. Panjang gelombang maksimum untuk *methylene blue* adalah 665nm.
3. Panjang gelombang maksimum untuk *methyl orange* adalah 465nm.
4. Persamaan kalibrasi spektrofotometer untuk larutan *methylene blue* :  $A = 0,178 C$ .
5. Persamaan kalibrasi spektrofotometer untuk larutan *methyl orange*:  $A = 0,075 C$ .
6. *Heterogenous Surface Diffusion Model* cocok untuk menunjukkan karakteristik perpindahan massa yang terjadi pada proses adsorpsi zat warna dengan karbon aktif.
7. Koefisien difusi permukaan( $D_s$ ) dipengaruhi oleh konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ), temperatur operasi (T), dan jenis zat warna.
8. Untuk *methylene blue* dan *methyl orange*, semakin tinggi temperatur maka nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair( $k_f$ ), koefisien difusi permukaan( $D_s$ ), dan koefisien laju adsorpsi pada *micropore*( $k_b$ ) semakin tinggi.
9. Untuk *methylene blue* dan *methyl orange*, semakin tinggi konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ) maka nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair( $k_f$ ), koefisien difusi permukaan( $D_s$ ), dan koefisien laju adsorpsi pada *micropore*( $k_b$ ) semakin tinggi.
10. Nilai koefisien perpindahan massa pada fasa cair( $k_f$ ), koefisien difusi permukaan( $D_s$ ), dan koefisien laju adsorpsi pada *micropore*( $k_b$ ) untuk *methylene blue* lebih besar daripada *methyl orange*.
11. Nilai fraksi dari kapasitas total adsorpsi pada *macropore*(f) tidak dipengaruhi oleh konsentrasi awal larutan zat warna ( $C_0$ ), temperatur operasi (T), dan jenis zat warna.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Ketaren, S, (1986), "Minyak dan Lemak Pangan", Jakarta, Universitas Indonesia Press.
2. Hameed, B.H.; Ahmad, A.A.; Aziz, N., (2007), "*Isotherm, kinetics and thermodynamics of acid dye adsorption on activated palm ash*", *Chemical Engineering Science*, **133**, 193-203.
3. McKay, Gordon; C. K., Danny; Tsang, David H. K.; Potter, John F., (2003), "*Applications of Multipore Model for the Mechanism Identification during the Adsorption of Dye on Activated Carbon and Bagasse Pith*", *Langmuir*, **19**, 722-730.
4. McKay, Gordon; Choy, Keith K.H.; Potter, John F., (2004), "*Film-pore diffusion models-analytical and numerical solutions*", *Langmuir*, **59**, 501-521.
5. Al-Duri, Bushra; Yang, Xiaoyan, (2005), "*Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of reactive dyes on activated carbon*", *J. Colloid and Interface Sci.*, **287**, 25-34.
6. Choong, Thomas S.Y.; Wong, T.N.; Chuah, T.G., (2006), "*Film-pore-concentration-dependent surface diffusion model for the adsorption of dye onto palm kernel shell activated carbon*", *J. Colloid and Interface Sci.*, **301**, 436-440.
7. McKay, Gordon; Keith; Choy, K.H.; Potter, John F., (2001), "*A Film-Pore-Surface Diffusion Model for the Adsorption of Acid Dyes on Activated Carbon*", *Adsorption*, **7**, 231-247.
8. Laplanche, A.; Baup, S.; Jaffre, C.; Wolbert, D., (2000), "*Adsorption of Pesticides onto Granular Activated Carbon: Determination of Surface Diffusivities Using Simple Batch Experiments*", *Adsorption*, **6**, 219-228.
9. Irvine, Robert L., (1993), "*Activated Carbon Adsorption and Desorption of Toluene in Aqueous Phase*", *AIChE J.*, **39**, 2027-2039.



10. McKay, Gordon; Chen, Buning; Hui, Chi Wai, (2001), “*Pore-Surface Diffusion Modelling for Dyes from Effluent on Pith*”, *Langmuir*, **17**, 740-748.
11. Othmer, Kirk, (1992), “*Encyclopedia of Chemical Technology: Bearing Materials to Carbon*”, 4<sup>th</sup> ed., USA, John Wiley and Sons, Inc.
12. Seader, J.D., Henley, E.J, (1998), “*Separation Process Principles*”, New York, John Wiley & Sons, Inc.
13. Fletcher, Asleigh, (2008), “*Porosity and Sorption Behaviour*”, [www.staff.ncl.ac.uk/a.j.fletcher/adsorption.htm](http://www.staff.ncl.ac.uk/a.j.fletcher/adsorption.htm).
14. Wikipedia Indonesia, (2008), “*Karbon Aktif*”, <http://id.wikipedia.org/wiki/Karbon> aktif.
15. K. Vasanth Kumar, K. Subanandam, V. Ramamurthi and S. Sivanesan, (2004), “*Solid Liquid Adsorption for Wastewater Treatment : Principle Design and Operation*”, <http://www.greenpages.htm>.
16. “*Regeneration / Active Carbon*”, <http://www.lenntech.com>.
17. Do, D.D.; Rice, R.G., (1987), “*On the Relative Importance of Pore and Surface Diffusion in Non-equilibrium Adsorption Rate Processes*”, *Chemical Engineering Science*, **42**, 2269-2284.
18. “*Air Filtration*”, <http://buildingprotection.rdecom.army.mil/basic/af.htm>.
19. Wikipedia, (2006), “*Adsorbate*”, <http://en.wikipedia.org/wiki/Adsorbate>.
20. “*Basic Dyes*”, [http://www.jagson.com/paper\\_dyes.htm](http://www.jagson.com/paper_dyes.htm).
21. Wikipedia, (2008), “*Acid Dye*”, [http://en.wikipedia.org/wiki/Acid\\_dye](http://en.wikipedia.org/wiki/Acid_dye).
22. “*Methylene Blue*”, <http://www.answers.com/topic/methylene-blue>.
23. “*Methyl Red*”, <http://www.answers.com/topic/methyl-red>.
24. “*Methyl Orange*”, <http://www.answers.com/topic/methyl-orange-2>.
25. “*Basic Operating Principles of the Sorptomatic 1990*”, [saf.chem.ox.ac.uk/.../BET/sorpoptprin.html](http://saf.chem.ox.ac.uk/.../BET/sorpoptprin.html).
26. “*Activated Carbon 101*”, <http://www.carbochem.com>.
27. Tim Dosen Teknik Kimia, (2007), “*Modul Praktikum Laboratorium Teknologi Kimia II: Liquid Adsorption*”, Fakultas Teknologi Industri Unika Parahyangan, Jurusan Teknik Kimia, Bandung.

28. Perry, Robert H., (1984), "*Perry's Chemical Engineers' Handbook*", 6<sup>th</sup> ed., Singapore, McGraw Hill International.
29. "Material Safety Data Sheet UNICAT Unicarbon", <http://www.unicatcatalyst.com>.
30. "MSDS Carbon, Activated, Powder", [www.bacharach-inc.com](http://www.bacharach-inc.com).
31. Deltrex Chemicals, (2000), "Activated Carbon", [www.cleantec.com](http://www.cleantec.com).
32. "Safety Data for Methylene Blue", [http://msds.chem.ox.ac.uk/ME/methylene\\_blue.html](http://msds.chem.ox.ac.uk/ME/methylene_blue.html).
33. "Safety Data for Methyl Red", [http://msds.chem.ox.ac.uk/ME/methyl\\_red.html](http://msds.chem.ox.ac.uk/ME/methyl_red.html).
34. "Safety Data for Methyl Orange", [http://ptcl.chem.ox.ac.uk/~hmc/hsci/chemicals/methyl\\_orange.html](http://ptcl.chem.ox.ac.uk/~hmc/hsci/chemicals/methyl_orange.html).
35. Perry, Robert H., (1984), "*Perry's Chemical Engineers' Handbook*", 6<sup>th</sup> ed., Singapore, McGraw Hill International.
36. Geankoplis, C.J., (1993), "*Transport Processes and Unit Operations*", 3<sup>rd</sup> ed., USA, Prentice Hall International.
37. B. Byron Bird, Warren E., Edwin N., (2002), "*Transport Phenomena*", 2<sup>nd</sup> ed., USA, John Wiley and Sons, Inc.