

# PEMANFAATAN MIKROALGA AMOBIL SEBAGAI ADSORBEN PADA PENYISIHAN ZAT WARNA *REACTIVE BLUE 4 (RB4)* DAN *REACTIVE RED 120 (RR120)* DALAM LIMBAH CAIR TEKSTIL

## *UTILIZATION OF AMOBILE MICROALGAE AS AN ADSORBENT TO REMOVE REACTIVE BLUE 4 (RB4) AND REACTIVE RED 120 (RR120) FROM TEXTILE WASTEWATER*

Edwan Kardena<sup>1</sup>, Malinda Syifa Yusharani<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kelompok Keahlian Rekayasa Air dan Limbah Cair, Institut Teknologi Bandung

<sup>2</sup>Program Magister Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

Email: kardena@pusat.itb.ac.id

Tanggal diterima: 26 Juli 2022, direvisi: 27 November 2022, disetujui terbit: 15 Desember 2022

### ABSTRAK

Pengolahan limbah zat warna dapat dilakukan dengan proses adsorpsi, namun mengalami keterbatasan biaya akibat harga adsorben yang mahal. Salah satu bahan baku adsorben potensial yang dapat digunakan adalah mikroalga. Penelitian ini menjelaskan proses pemanfaatan mikroalga dalam bentuk amobil sebagai adsorben untuk penyisihan *Reactive Blue 4 (RB4)* dan *Reactive Red 120 (RR120)*. Alga yang digunakan berupa alga *blooming* dari Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Bojongsoang yang dilakukan proses imobilisasi menggunakan silika. Adsorben diuji menggunakan FTIR, pH pzc, BET, dan SEM-EDS. Proses adsorpsi dilakukan dalam sistem *batch* (variasi perlakuan awal, pH, massa adsorben, dan waktu kontak) dan dalam reaktor kolom (variasi konsentrasi awal). Parameter yang diukur yaitu efisiensi penyisihan, model isoterm (Langmuir/Freundlich), kinetika reaksi (orde satu semu/orde dua semu), dan model kurva *breakthrough*. Hasil sistem *batch* menunjukkan kondisi adsorpsi terbaik terjadi menggunakan mikroalga-NaOH saat kondisi larutan pada pH 2 selama 4 jam dengan massa adsorben RB4=2,5 gram dan RR120=2 gram. Efisiensi penyisihan RB4 dan RR120 mencapai 98,58% dan 98,56%. Model isoterm cenderung mengikuti isoterm Langmuir dengan kinetika reaksi orde dua semu. Hasil sistem kolom menunjukkan adanya kenaikan konsentrasi awal memberikan waktu *breakthrough* yang lebih cepat dan kurva *breakthrough* paling sesuai dijelaskan menggunakan model Thomas dan Yoon-Nelson. Hasil adsorpsi RB4 dan RR120 menggunakan mikroalga amobil memberikan hasil yang lebih baik bila dibandingkan dengan karbon aktif dalam kondisi yang serupa.

**Kata kunci:** adsorpsi, mikroalga amobil, imobilisasi, pewarna, *reactive blue*, *reactive red*

### ABSTRACT

*The adsorption technique may be used to manage dyewastes, however costs are limited due to the high cost of the adsorbent. Microalgae may be one of the adsorbent raw materials that will be used. The removal of Reactive Blue 4 (RB4) and Reactive Red 120 (RR120) dyes using immobilized microalgae as an adsorbent is reported in this study. Blooming algae from the Bojongsoang Wastewater Treatment Plant (WWTP) were collected, which were immobilized with silica. FTIR, pH pzc, BET, and SEM-EDS were used to characterize the adsorbent. The adsorption method was carried out in a batch system (pre-treatment microalgae, pH, adsorbent mass, and contact duration variations) and in a column (variation of initial concentration). Removal efficiency, the Langmuir/Freundlich isotherm model, reaction kinetics (pseudo first order/pseudo second order), and breakthrough curve models were all evaluated. The maximum adsorption conditions were found in the batch system using microalgae-NaOH when the solution was at pH 2 for 4 hours and the adsorbent mass was RB4=2.5 grams and RR120=2 grams. RB4 and RR120 reported removal efficiency of 98.58 and 98.56 percent, respectively. The isotherm model tends to follow the Langmuir isotherm with pseudo-second-order reaction kinetics. The breakthrough curve was suitable described using the Thomas and Yoon-Nelson models, and the results of the column system indicated that an increase in initial concentration related to a faster breakthrough time. When adsorption process compared to activated carbon under the same conditions, dyes adsorption by immobilized microalgae showed better results.*

**Keywords:** adsorption, immobilized microalgae, immobilization, dyes, *reactive blue*, *reactive red*

## PENDAHULUAN

Pada tahun 2019, Kementerian Perindustrian memberikan laporan adanya kenaikan pertumbuhan industri salah satunya industri tekstil dan produk tekstil.<sup>1</sup> Dampaknya terjadi masalah lingkungan pencemaran limbah tekstil seperti yang terjadi di Rancaekek, Kabupaten Bandung.<sup>2</sup> Adapun karakteristik limbah tekstil didominasi 10-50% kandungan zat warna yang tidak terserap dalam serat kain.<sup>3</sup> Hal ini dapat mengganggu keseimbangan ekosistem sungai salah satunya yaitu terganggunya proses fotosintesis dan penurunan oksigen terlarut.<sup>4</sup> Beberapa teknologi *secondary* dan *tertiary treatment* seperti lumpur aktif,<sup>5</sup> *moving bed biofilm reactor*,<sup>6,7</sup> oksidasi kimia,<sup>8,9</sup> dan adsorpsi<sup>10,11</sup> dapat digunakan untuk mengolah limbah tekstil warna, dengan hasil efisiensi, biaya operasional, dan kemudahan proses yang bervariasi. Salah satu metode yang ditawarkan berupa adsorpsi menggunakan karbon aktif yang terbuat dari bahan alternatif yaitu alga. Hal ini dikarenakan alga memiliki ketersediaan yang melimpah di alam dengan efisiensi biosorpsi dan afinitas pengikatannya tinggi. Beberapa penelitian telah menggunakan alga untuk menyisihkan warna *malachite green*, metilen biru, dan *rhodamine B*.<sup>4</sup>

Dalam penelitian ini, akan dibuat adsorben dari alga *blooming* yang akan diimobilisasi dengan silika dan adsorpsi dilakukan dalam sistem *batch* serta dalam reaktor kolom. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui potensi dan kemampuan mikroalga amobil untuk menyisihkan zat warna *Reactive Blue 4* (RB4) dan *Reactive Red 120* (RR120). Beberapa variasi dilakukan seperti perlakuan awal mikroalga, pH, massa adsorben, dan waktu kontak untuk sistem *batch*, serta variasi konsentrasi awal untuk sistem kolom. Parameter adsorpsi lain seperti isoterm, kinetika, dan model kurva *breakthrough* yang sesuai juga diidentifikasi.

## METODE

### Alat

Pada penelitian ini peralatan yang digunakan adalah plankton net, mikroskop optic, FTIR (Shimadzu Prestige 21), pH pzc, BET (Nova Touch LX4), dan SEM-EDS (JEOL JSM 6510 LA).

### Bahan

Adapun bahan yang digunakan adalah mikroalga hasil penjarangan dari IPAL Bojongsoang Kabupaten Bandung, larutan NaOH, silika gel, dan larutan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

### Pembuatan Mikroalga Amobil dan Karakterisasi

Mikroalga diambil dari kolam maturasi Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Bojongsoang menggunakan *plankton net* (50 mesh). Jenis mikroalga ditentukan dengan pengamatan

secara mikroskopik. Mikroalga diberi perlakuan awal menggunakan NaOH 0,1 M 1:3 (v/v) diaduk selama 3 jam dan dikeringkan. Selanjutnya, mikroalga diimobilisasi dengan silika. Setiap 10 gram silika gel dilarutkan dengan NaOH 7% (120°C) selama 30 menit dan didinginkan. Larutan mikroalga (5g/100mL) dicampurkan dalam larutan silika dan campuran diberi tetesan H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 20% hingga terbentuk gel. Hasil gel dikeringkan dan adsorben yang digunakan memiliki ukuran >40 mesh. Mikroalga amobil kemudian dikarakterisasi dengan FTIR (Shimadzu Prestige 21), pH pzc, BET (Nova Touch LX4), dan SEM-EDS (JEOL JSM 6510 LA).

### Pembuatan Limbah Artifisial Zat Warna dan Kurva Kalibrasi

Limbah artifisial induk RB4 dan RR120 dibuat dengan melarutkan 1 g zat warna dan 0,2 g glukosa dalam 1 L akuades kemudian larutan diencerkan sesuai kebutuhan.<sup>12</sup> Pemindaian panjang gelombang maksimum dilakukan pada rentang 400-800 nm dengan spektrofotometer visibel (Genesys 30). Kurva kalibrasi dibuat dengan variasi konsentrasi larutan 20, 40, 60, 80, dan 100 ppm.

### Adsorpsi Sistem Batch

Adsorpsi sistem *batch* merupakan modifikasi penelitian sebelumnya.<sup>8</sup> Variasi yang dilakukan yaitu perlakuan awal, pH, massa adsorben, dan waktu kontak secara berurutan. Perlakuan awal mikroalga menggunakan NaOH dan HCl, variasi pH yaitu 2-10, variasi massa 1-3 g, variasi waktu kontak 30-300 menit dengan interval 30 menit. Setiap 100 mL larutan RB4 dan RR120 (Erlenmeyer 250 mL) dicampur dengan adsorben dan dilakukan pengadukan dengan alat *shaker* selama 4 jam. Hasil campuran kemudian disaring dan diukur absorbansinya dengan spektrofotometer visibel.

### Adsorpsi Sistem Kolom

Adsorpsi sistem kolom adalah modifikasi dari penelitian sebelumnya dengan variasi konsentrasi awal 50, 70, dan 100 ppm.<sup>13</sup> Ketinggian adsorben mikroalga amobil adalah 5 cm ( $\pm 25$  g) dengan laju alir 20 mL/menit. Hasil adsorpsi kolom diambil setiap 15 menit sekali dan hasilnya diukur dengan spektrofotometer visibel. Selain itu, mikroalga amobil juga digunakan untuk adsorpsi kolom efluen pembuangan limbah dengan pengkondisian kolom yang serupa. Kolom karbon aktif juga digunakan terhadap RB4 dan RR120 untuk membandingkan hasil adsorpsi dengan massa  $\pm 30$  g (h = 5cm).

### Studi Adsorpsi

Persentase penyisihan adsorpsi diukur dengan Persamaan (1). Adapun model isoterm

sistem *batch* adalah Langmuir atau Freundlich menggunakan Persamaan (2) dan (3).<sup>4</sup>

$$\% \text{ penyisihan} = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{Q_m K_L} + \frac{C_e}{Q_m} \quad (2)$$

$$\log q_e = \log k_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

Model kinetika reaksi menggunakan kinetika orde satu semu atau orde dua semu pada Persamaan (4) dan (5). Sementara itu, pada sistem kolom analisis model kurva *breakthrough* menggunakan model Thomas, Yoon-Nelson, dan Adam Bohart dengan Persamaan (6), (7), dan (8).<sup>14</sup>

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_f t \quad (4)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_y q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (5)$$

$$\ln\left(\frac{C_0}{C_t} - 1\right) = \frac{k_{TH} Q W}{F} - k_{TH} C_0 t \quad (6)$$

$$\ln \frac{C_t}{C_0 - C_t} = K_{YN} t - \tau K_{YN} \quad (7)$$

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = k_{AB} C_0 t - k_{AB} N_{AB} \left(\frac{z}{v}\right) \quad (8)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pembuatan Mikroalga Amobil

Mikroalga yang diambil dari IPAL dilakukan proses perlakuan awal untuk menghilangkan pengotor dan memodifikasi kandungan komponen kimia di permukaan mikroalga menggunakan larutan asam atau basa.<sup>9</sup> Selanjutnya, mikroalga diimobilisasi dengan silika untuk membentuk adsorben yang siap digunakan untuk proses adsorpsi.

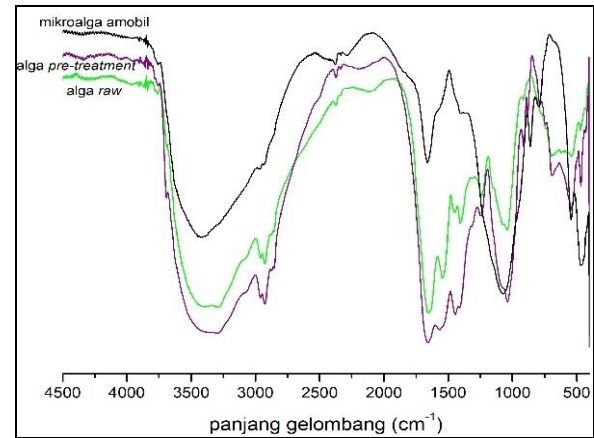
### Karakterisasi Jenis Mikroalga

Mikroalga yang diambil dari IPAL Bojongsoang diidentifikasi jenisnya secara mikroskopik dengan pengenceran 10 kali dan perbesaran 100 kali. Hasil pengamatan menunjukkan jenis alga yang dominan adalah jenis *Microcystis* sp. dan *Spirulina* sp. dari divisi *Cyanophyta* (alga hijau-biru).

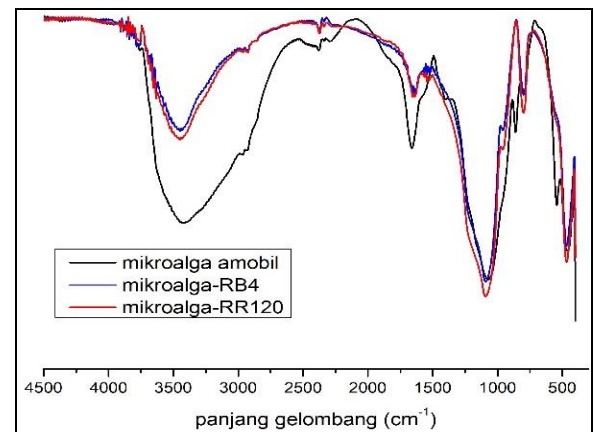
### Karakterisasi Jenis Mikroalga dengan FTIR

Komponen gugus fungsi mikroalga dapat ditentukan dari pita serapan FTIR yang ditunjukkan pada Gambar 1(a). Berdasarkan pita serapan kandungan gugus fungsi mikroalga *raw* yaitu gugus hidroksil (pita 3408 cm<sup>-1</sup>), gugus karboksil terbentuk dari ikatan karbonil (pita 1654 cm<sup>-1</sup>) dan ikatan CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub> (pita 2926 cm<sup>-1</sup>), dan gugus ester (pita 1039 cm<sup>-1</sup>). Hasil serupa dengan penelitian sebelumnya dari Manjunatha dan Girisha yang menggunakan mikroalga danau.<sup>15</sup> Hasil perlakuan awal memberikan efek pada pita serapan yang lebih tajam (pita 1600-an) sehingga gugus karboksil

terbentuk lebih banyak. Selain itu, gugus amida juga terbentuk dalam mikroalga-NaOH sehingga jumlah situs aktif mikroalga-NaOH ada empat jenis. Hasil FTIR mikroalga amobil menunjukkan adanya pembentukan gugus siloksan pada pita serapan 1076 cm<sup>-1</sup> sehingga meningkatkan daya serap terhadap zat warna.



(a)



(b)

**Gambar 1.** FTIR (a) Sebelum Adsorpsi dan (b) Setelah Adsorpsi

### Analisis pH pzc

Proses adsorpsi dipengaruhi muatan permukaan adsorben. Pengujian pH pzc dapat menunjukkan keadaan muatan adsorben dalam kondisi netral (nol). Pada pH rendah ion H<sup>+</sup> akan lebih banyak pada permukaan adsorben (muatan positif) sedangkan saat pH tinggi ion H<sup>+</sup> akan lebih banyak pada larutan (muatan negatif).<sup>16</sup> Nilai pH pzc mikroalga *raw* yaitu 6,75 serupa dengan penelitian sebelumnya.<sup>17</sup> Adapun nilai pH pzc mikroalga amobil adalah 10,02 yang mengalami pergeseran akibat proses perlakuan awal dan imobilisasi menggunakan larutan basa (NaOH).

### Analisis BET

Hasil uji BET mikroalga amobil dan karbon aktif dijabarkan dalam Tabel 1. Berdasarkan IUPAC, ukuran pori mikroalga adalah mesopori,

sedangkan karbon aktif adalah mikropori.<sup>18</sup> Luas permukaan mikroalga amobil 12,44 m<sup>2</sup>/g, sedangkan karbon aktif 737,53 m<sup>2</sup>/g. Luas permukaan mikroalga amobil hasil penelitian tergolong kecil, namun hasil ini masih lebih besar bila dibandingkan penelitian sebelumnya yang menggunakan spirulina untuk penyisihan *Direct Yellow 12* dengan luas permukaan 2,8 m<sup>2</sup>/g.<sup>19</sup>

**Tabel 1.** Hasil Uji BET

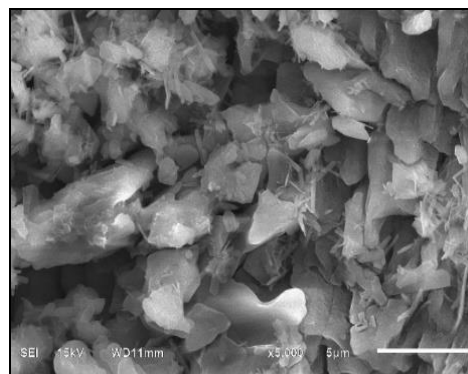
Parameter	Mikroalga amobil	Karbon aktif komersial
Ukuran pori	mesopori (2-50 nm)	Mikropori (< 2 nm)
Luas permukaan (m <sup>2</sup> /g)	12,44	737,529
Total volume pori (cc/g)	0,033	0,416
Rerata radius pori (nm)	26,07	1,129

**Analisis SEM – EDS**

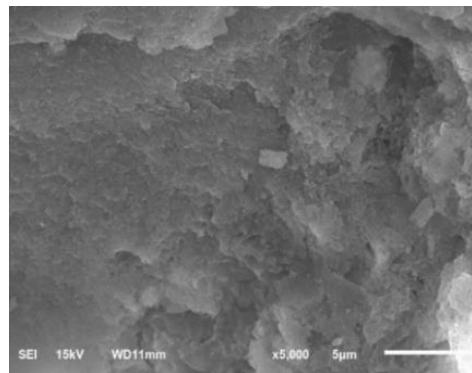
Berdasarkan Gambar 2(a), dapat diketahui bahwa morfologi mikroalga amobil membentuk pori yang berongga, sehingga dapat digunakan untuk menyerap molekul adsorbat. Gambaran pori yang terbentuk selaras dengan hasil uji BET dimana pori mikroalga amobil berukuran mesopori. Hasil EDS pada Tabel 2 menunjukkan adanya kandungan unsur organik dan logam dalam alga *raw* dan tersisihkan akibat proses perlakuan awal dalam mikroalga amobil.

Unsur dalam mikroalga amobil juga menunjukkan peningkatan massa dalam unsur O dan Si akibat pengaruh proses imobilisasi.

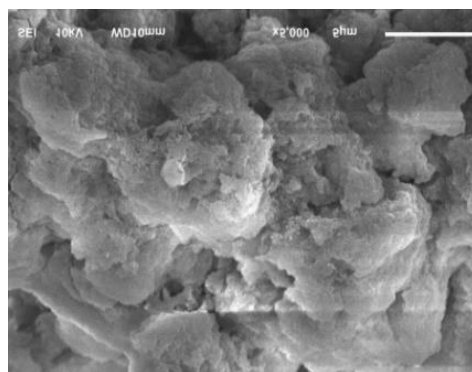
Unsur Na dan P yang terdeteksi pada mikroalga amobil dapat berasal dari material preparasi imobilisasi alga yang menggunakan sodium silikat serta asam fosfat dalam pembentukan gel.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 2.** Hasil SEM: (a) Mikroalga Amobil, (b) Mikroalga-RB4, dan (c) Mikroalga-RR120

**Tabel 2.** Hasil EDS Mikroalga Sebelum dan Sesudah Adsorpsi

Elemen	keV	% Massa				
		Mikroalga <i>raw</i>	Silika <i>raw</i>	Mikroalga amobil	Mikroalga amobil-RB4	Mikroalga amobil-RR120
C	0,28	46,5	-	15	10,4	12,62
N	0,39	19,4	-	-	-	0,55
O	0,53	31,2	54,82	46,31	51,54	53,51
Na	1,04	-	-	2,51	2	1,7
Mg	1,25	0,35	-	-	-	-
Si	1,74	0,17	45,18	36,18	36,07	31,63
P	2,01	0,56	-	-	10,4	12,62
S	2,31	0,36	-	-	-	-
K	3,31	0,94	-	-	-	-
Ca	3,69	0,44	-	-	-	-

**Tabel 3.** Parameter Isoterm Adsorpsi

Zat warna	Langmuir			Freundlich		
	Qm (mg/g)	b (L/mg)	R <sup>2</sup>	Kekuatan adsorpsi (n)	Kf (mg/g)	R <sup>2</sup>
<b>RB4</b>	0,36	0,130	0,903	2,177	7,504	0,596
<b>RR120</b>	4,57	9,634	0,999	31,646	4,924	0,7139

### Adsorpsi Batch

Analisis absorbansi larutan warna dilakukan pada panjang gelombang maksimum 595 nm (RB4) dan 520 nm (RR120). Mikroalga amobil dengan perlakuan awal NaOH memberikan penyisihan yang lebih baik (masing-masing sebesar 29,58% untuk RB4 dan 9,18% untuk RR120) dibandingkan dengan yang menggunakan perlakuan awal HCl (10,31% untuk RB4 dan 7,74% untuk RR120). Hal ini disebabkan kandungan gugus fungsi mikroalga-NaOH lebih banyak sehingga keterikatan dengan adsorbat juga lebih banyak terbentuk. Pada variasi pH larutan, baik RB4 maupun RR120 memberikan hasil terbaik pada kondisi pH 2. Hal ini sesuai dengan karakteristik RB4 dan RR120 yang merupakan zat warna anionik yang memiliki gugus *sulfonate* (SO<sup>3-</sup>) yang bermuatan negatif dengan muatan adsorben positif ditandai dengan nilai pH akhir larutan lebih kecil dari pH pzc adsorben.<sup>20</sup>

Massa adsorben paling baik untuk adsorpsi RB4 dan RR120 sebanyak 2,5 g dan 2 g secara berurutan dengan persentase penyisihan mencapai 98%. Kemampuan adsorpsi dipengaruhi oleh fluks konsentrasi larutan dengan permukaan adsorben sehingga ada kemungkinan bertambahnya jumlah adsorben namun kemampuan adsorpsinya menurun. Sementara itu, waktu kontak adsorpsi paling baik terjadi saat menit ke-240 (4 jam) dengan kapasitas adsorpsi RB4 3,941 mg/g dan RR120 4,891 mg/g. Hasil ini serupa dengan penelitian Lebron dkk. yang menggunakan adsorben alga.<sup>21</sup>

### Analisis Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi digunakan untuk mengetahui model pembentukan ikatan molekul antara adsorbat dengan adsorben, model yang paling umum digunakan adalah Langmuir dan Freundlich.<sup>4</sup> Dalam penelitian ini, proses adsorpsi mikroalga dengan RB4 dan RR120 cenderung mengikuti isoterm Langmuir dilihat nilai regresinya (R<sup>2</sup>) yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan isoterm Freundlich. Hal ini menunjukkan proses adsorpsi terjadi pada permukaan monolayer.<sup>19</sup> Nilai

kapasitas adsorpsi sebanding dengan konstanta adsorpsi dimana RR120 bernilai lebih besar dari RB4 yang ditunjukkan pada Tabel 3.

### Analisis Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi dapat menjelaskan mekanisme reaksi antara adsorben dengan adsorbat dan hasilnya digunakan sebagai acuan dalam merancang model skala pilot. Berdasarkan hasil analisis, model kinetika kedua zat warna cenderung mengikuti orde dua semu ditandai dengan nilai R<sup>2</sup>=0,99. Orde dua semu menjelaskan bahwa proses adsorpsi terjadi secara kemisorpsi sehingga terbentuk ikatan kimia antara adsorbat dan adsorben.<sup>22</sup> Hasil penelitian Da Rosa dkk. memberikan hasil serupa dengan mikroalga jenis *Chlorella pyrenoidosa*.<sup>4</sup> Nilai konstanta dan kapasitas adsorpsi kinetika reaksi RB4 dan RR120 dijabarkan dalam Tabel 4.

### Evaluasi Hasil FTIR dan SEM-EDS

Pita serapan FTIR setelah adsorpsi ditunjukkan pada Gambar 1(b), dimana pita serapan beberapa gugus aktif mengalami penurunan intensitas serapan yang mengindikasikan bahwa gugus fungsi menyerap zat warna. Proses penyerapan zat warna oleh gugus fungsi juga didukung oleh morfologi SEM setelah adsorpsi pada Gambar 2(b) dan 2(c), dimana pori mikroalga amobil terisi dengan molekul RB4 dan RR120. Data EDS hasil adsorpsi dalam Tabel 2 juga menunjukkan bahwa adanya perubahan persentase massa unsur bila dibandingkan dengan mikroalga amobil awal. Pada unsur karbon (C) mengalami penurunan persentase dari 15% menjadi 10% (RB4) dan 12% (RR120), sedangkan pada unsur oksigen (O) mengalami kenaikan persentase dari 46% menjadi 51% (RB4) dan 53% (RR120). Hal ini disebabkan dari terbentuknya ikatan selama proses adsorpsi, dimana molekul zat warna akan terikat pada gugus fungsi dalam pori adsorben sehingga kandungan unsur mengalami perubahan ataupun memunculkan unsur baru.

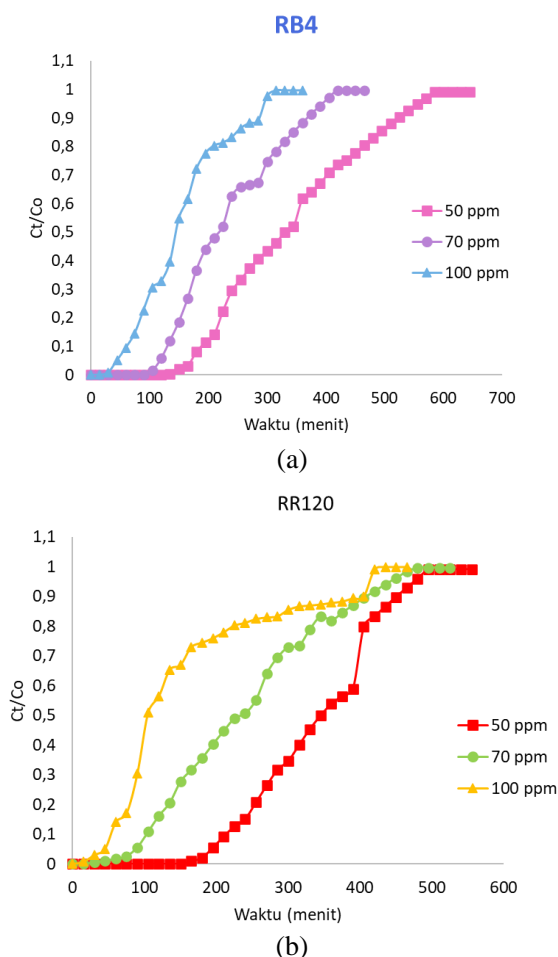
**Tabel 4.** Parameter Kinetika Adsorpsi

Zat warna	<i>Pseudo first</i>			<i>Pseudo second</i>			
	kf (min <sup>-1</sup> )	qe (mg/g)	R <sup>2</sup>	k <sub>s</sub> (g/mg.min)	qe (mg/g)	H (mg/g.min)	R <sup>2</sup>
<b>RB4</b>	0,019	4,434	0,947	0,008	4,307	0,149	0,994
<b>RR120</b>	0,015	0,587	0,822	0,175	4,840	4,095	0,999

### Analisis Adsorpsi Kolom

Adsorpsi kolom dilakukan dengan variasi konsentrasi awal dengan ketebalan adsorben mikroalga amobil 5 cm ( $\pm 25$  g) dan laju alir 20 mL/menit. Hasil menunjukkan kenaikan konsentrasi awal menyebabkan persentase penyisihan menurun dan proses adsorpsi berlangsung lebih cepat. Hal ini disebabkan kapasitas adsorben menjadi cepat jenuh dengan adanya kenaikan konsentrasi awal. Laporan penelitian serupa seperti zat warna metil hijau dan *Reactive Red 195*.<sup>14,23</sup>

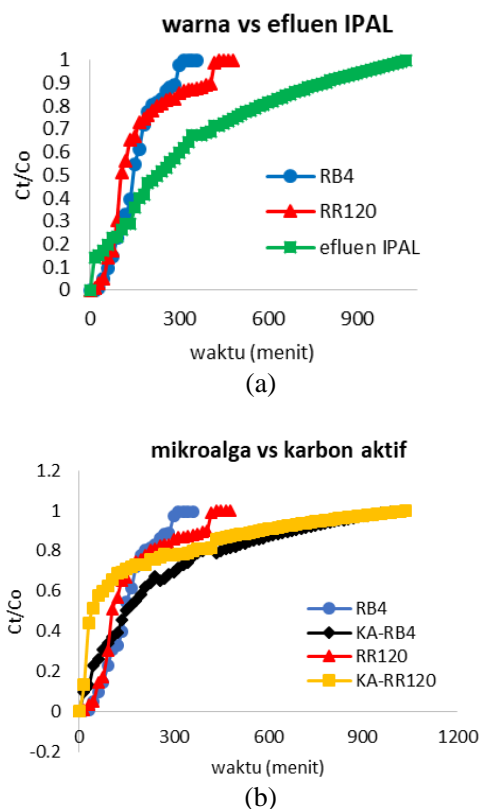
Kurva *breakthrough* diperoleh dengan memplotkan  $C_t/C_0$  setiap waktu adsorpsi. Hasil dari kurva tersebut diperoleh waktu *breakthrough* yang bernilai 5%  $C_0$  dan waktu *exhaust* yang bernilai 95%  $C_0$  dimana adsorben mendekati kondisi jenuh.<sup>24</sup> Kurva *breakthrough* RB4 dan RR120 ditunjukkan Gambar 3.



**Gambar 3.** Kurva *Breakthrough* (a) RB4 dan (b) RR120

Waktu *breakthrough* RB4 secara berurutan adalah 170 menit, 120 menit, dan 45 menit sedangkan RR120 yaitu 195 menit, 90 menit, dan 45 menit. Sementara itu, waktu *exhaust* RB4 berturut-turut yaitu terjadi pada menit ke-555, 397, dan 295, sedangkan RR120 terjadi pada menit ke-475, 443, dan 413.

Berdasarkan Gambar 4, dapat diketahui bahwa waktu proses adsorpsi mikroalga amobil terhadap RB4 dan RR120 terjadi lebih cepat ( $\pm 300 - 400$  menit) bila dibandingkan dengan efluen IPAL yang mencapai menit ke-1000. Selain itu, hasil adsorpsi mikroalga amobil terhadap RB4 dan RR120 juga memberikan waktu proses yang lebih cepat, yaitu sekitar 300 – 400 menit dibandingkan menggunakan karbon aktif, dimana waktu yang dibutuhkan untuk mencapai  $C_t/C_0$  95% yakni hingga 1000 menit. Hal ini disebabkan adanya kecocokan antara adsorben dan adsorbat baik dari segi muatan yang saling terikat maupun besaran molekul zat warna dengan ukuran pori adsorben.

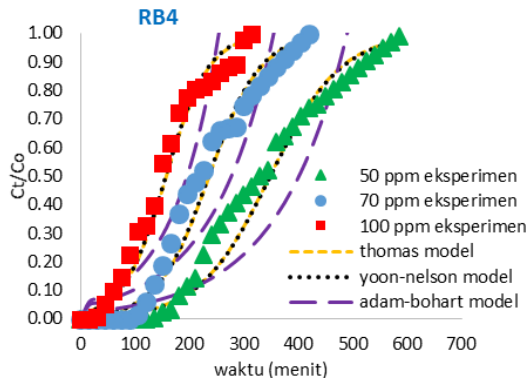


**Gambar 4.** Kurva *breakthrough*: (a) Warna vs Efluen IPAL Menggunakan Mikroalga Amobil dan (b) Mikroalga Amobil vs Karbon Aktif Terhadap RB4 dan RR120

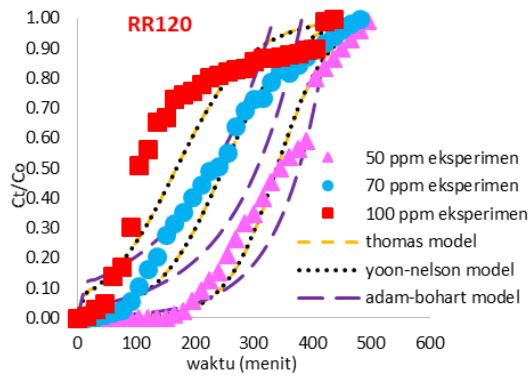
### Studi Adsorpsi Dinamis Model Thomas

Model Thomas merupakan model paling umum untuk mendeskripsikan adsorpsi sistem kolom.<sup>25</sup> Data hasil analisis model Thomas dengan variasi konsentrasi dijabarkan pada Tabel 5. Adanya kenaikan konsentrasi awal zat warna memberikan nilai konstanta Thomas ( $k_{TH}$ ) yang menurun dan kapasitas adsorpsi ( $Q$ ) yang meningkat. Hal ini disebabkan peningkatan resistensi *transport* massa dan dipengaruhi gradien konsentrasi adsorben dan adsorbat.<sup>23</sup> Nilai regresi ( $R^2$ )  $< 0,97$  sehingga faktor difusi internal dan

eksternal menjadi pembatas laju adsorpsi. Kurva *breakthrough* hasil model Thomas ditunjukkan pada Gambar 5.



(a)



(b)

**Gambar 5.** Kurva *Breakthrough* Hasil Pemodelan Thomas, Yoon-Nelson dan Adam Bohart: (a) RB4 dan (b) RR120

### Studi Adsorpsi Dinamis Model Yoon-Nelson

Model Yoon-Nelson digunakan untuk menganalisis waktu yang diperlukan untuk mencapai 50% *breakthrough*. Berdasarkan Tabel 5, dapat diketahui bahwa kenaikan konsentrasi awal zat warna sebanding dengan kenaikan konstanta Yoon-Nelson ( $k_{YN}$ ). Sebaliknya, kenaikan konsentrasi awal zat warna mengakibatkan waktu *breakthrough* lebih cepat terjadi. Model ini memberikan asumsi bahwa penurunan laju adsorpsi sebanding dengan adsorpsi adsorbat dan *breakthrough* adsorbat.<sup>23</sup> Kurva *breakthrough* hasil model Yoon-Nelson ditunjukkan pada Gambar 5.

### Studi Adsorpsi Dinamis Model Adam-Bohart

Model Adam-Bohart digunakan untuk menjelaskan bagian awal dari kurva *breakthrough* dengan *breakpoint* 10-50% dari titik jenuh.<sup>26</sup> Hasil analisis kurva model Adam Bohart dijabarkan pada Tabel 5. Nilai konstanta Adam-Bohart ( $k_{AB}$ ) menurun dengan adanya kenaikan konsentrasi zat warna, sedangkan nilai konsentrasi saturasi ( $N_{AB}$ ) meningkat. Hal ini menunjukkan kinetika sistem kolom didominasi oleh perpindahan massa eksternal pada bagian awal adsorpsi kolom.<sup>27</sup> Nilai regresi ( $R^2$ ) model Adam-Bohart lebih kecil bila dibandingkan model Thomas dan Yoon-Nelson sehingga kurang cocok untuk menjelaskan adsorpsi kolom RB4 dan RR120 menggunakan mikroalga amobil. Penelitian serupa juga dilaporkan oleh Nath dkk.<sup>28</sup> dan Nainamalai dkk.<sup>25</sup> Kurva *breakthrough* hasil model Adam-Bohart ditunjukkan pada Gambar 5.

**Tabel 5.** Parameter Model Thomas, Yoon-Nelson, dan Adam-Bohart Adsorpsi Kolom

Zat Warna		RB4			RR120		
Variasi konsentrasi		50 ppm	70 ppm	100 ppm	50 ppm	70 ppm	100 ppm
Parameter Thomas	$k_{TH} \times 10^{-4}$ (L/mg.menit)	3,1	3	2,6	4,6	2,5	1,6
	Q (mg/g)	12,424	12,470	12,565	13,483	13,685	13,717
	$R^2$	0,912	0,904	0,911	0,932	0,939	0,774
Parameter Yoon-Nelson	$k_{YN}$ (menit <sup>-1</sup> )	0,0154	0,0212	0,0256	0,0232	0,0178	0,0158
	$\tau$ (menit)	347,974	235,552	157,137	339,948	248,685	168,563
	$R^2$	0,916	0,904	0,911	0,932	0,939	0,774
Parameter Adam-Bohart	$k_{AB} \times 10^{-4}$ (L.mg.menit)	1,5	1,27	1,18	2,66	1,3	0,68
	$N_{AB}$ (mg/L)	13319,79	13471,87	13810,86	11660,77	14514,2	18083,61
	$R^2$	0,669	0,682	0,71	0,749	0,731	0,534

## KESIMPULAN

Adsorben mikroalga amobil dari alga *blooming* IPAL yang diimmobilisasi dengan silika memiliki potensi untuk menyisihkan zat warna RB4 dan RR120. Kemampuan adsorben mikroalga amobil dalam reaktor *batch* paling baik untuk kedua zat warna yaitu dengan perlakuan awal NaOH, zat warna pada pH 2, waktu kontak 4 jam, dengan massa adsorben 2,5 gram untuk RB4 dan 2 gram untuk RR120. Adsorpsi kolom dilakukan paling baik dengan konsentrasi awal rendah untuk memberikan hasil optimal. Model isoterm adsorpsi zat warna mengikuti isoterm Langmuir dan kinetika reaksi orde dua semu, dimana mekanisme adsorpsi secara kemisorpsi yang terikat pada lapisan *monolayer*. Model kurva *breakthrough* yang paling baik menjelaskan adsorpsi kolom zat warna adalah model Thomas dan Yoon-Nelson, dimana kapasitas kolom dan waktu setengah jenuh adsorben dapat ditentukan.

## PUSTAKA

- Kardena, E., dan Dewi, I. L. Penyisihan Pewarna Tekstil Reaktif oleh Jamur Pelapuk Putih dan Ekstrak Kasar Enzim Lakase yang Diproduksi pada Submerged Fermentation Form, *Jurnal Teknik Lingkungan*, **25**(10), 1–18 (2019).
- Komarawidjaja, W. Sebaran Limbah Cair Industri Tekstil dan Dampaknya di Beberapa Desa Kecamatan Rancaekek Kabupaten Bandung, *Jurnal Teknologi Lingkungan*, **17**(2), 118 (2016).  
<https://doi.org/10.29122/jtl.v17i2.1045>
- Blackburn, R. S. x Natural polysaccharides and their interactions with dye molecules: Applications in effluent treatment, *Environmental Science and Technology*, **38**(18), 4905–4909 (2016).  
<https://doi.org/10.1021/es049972n>
- Da Rosa, A. L. D., Carissimi, E., Dotto, G. L., Sander, H., dan Feris, L. A. Biosorption of rhodamine B dye from dyeing stones effluents using the green microalgae *Chlorella pyrenoidosa*, *Journal of Cleaner Production*, **198**, 1302–1310 (2018).  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.128>
- Widajatno, R.L., Kardena, E., Arifianingsih, N.N. and Helmy, Q. Activated Sludge: Conventional Dye Treatment Technique, In: Khadir, A., Muthu, S.S. (eds) Biological Approaches in Dye-Containing Wastewater. Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry. Springer, Singapore.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-19-0545-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0545-2_5)
- Suryawan, I.W.K., Septiariva, I.Y., Helmy, Q., Notodarmojo, S., Wulandari, M., Sari, N.K., Sarwono, A., Pratiwi, R., Lim, J. Comparison of Ozone Pre-Treatment and Post-Treatment Hybrid with Moving Bed Biofilm Reactor in Removal of Remazol Black 5. *International Journal of Technology*. Volume 12(4), pp. 728-738 (2022)  
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i4.4206>
- Suryawan, I. W. K., Helmy, Q., Notodarmojo, S., Pratiwi, R., & Septiariva, I. Y. Textile Dye Reactive Black 5 (RB5) Bio-Sorption with Moving Bed Biofilm Reactor and Activated Sludge. *Indonesian Journal of Environmental Management and Sustainability*, **5**(2), 67-71. (2021).  
<https://doi.org/10.26554/ijems.2021.5.2.67-71>
- Helmy, Q., Suryawan, I.W.K., Notodarmojo, S. Ozone-Based Processes in Dye Removal. In: Muthu, S.S., Khadir, A. (eds) *Advanced Oxidation Processes in Dye-Containing Wastewater. Sustainable Textiles: Production, Processing, Manufacturing & Chemistry*. Springer, Singapore. (2022).  
[https://doi.org/10.1007/978-981-19-0987-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0987-0_6)
- Wantoputri, N. I., Helmy, Q., & Notodarmojo, S. Textile Wastewater Post Treatment Using Ozonation. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, **18**(1), 56-63. (2021).  
<https://doi.org/10.14710/presipitasi.v18i1.56-63>
- Rahman, D. A., Helmy, Q., Syafila, M., & Gumilar, A. Adsorption of Dyes Using Graphene Oxide-Based Nano-Adsorbent: A Review. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, **19**(2), 384-397. (2022).  
<https://doi.org/10.14710/presipitasi.v19i2.384-397>
- Syafila, M., Helmy, Q., & Musthofa, A. M. H. Methylene Blue Adsorption by Activated Carbon and Nano-Activated Carbon from Biomass Waste: A Review. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, **19**(3), 553-565. (2022).  
<https://doi.org/10.14710/presipitasi.v0i0.553-565>
- Mohan, V. S., Rao, C. N., Prasad, K. K., dan Karthikeyan, J. Treatment of simulated Reactive Yellow 22 (Azo) dye effluents using *Spirogyra* species, *Waste Management*, **22**(6), 575–582 (2002).  
[https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(02\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(02)00030-2)
- Jain, S. N., dan Gogate, P. R. Efficient removal of Acid Green 25 dye from wastewater using



- activated *Prunus dulcis* as biosorbent: Batch and column studies, *Journal of Environmental Management*, **210**, 226–238 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.008>
14. Alardhi, S. M., Albayati, T. M., dan Alrubaye, J. M. Adsorption of the methyl green dye pollutant from aqueous solution using mesoporous materials MCM-41 in a fixed-bed column, *Helvion*, **6**(1), e03253 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.helivon.2020.e03253>
  15. Manjunatha, S., dan Girisha, S. Characterization of microalgal biomass through fourier transforms infrared (FT-IR) spectroscopy, *International Journal of Botany Studies*, **6**(1), 57–60 (2021).
  16. Dewi, S. H., dan Ridwan. Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Magnetik untuk Adsorpsi Kromium Heksavalen, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, **13**(2), 136–140 (2012).
  17. Silva, A., Coimbra, R. N., Escapa, C., Figueiredo, S. A., Freitas, O. M., dan Otero, M. Green microalgae *Scenedesmus obliquus* utilization for the adsorptive removal of nonsteroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs) from water samples, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**(10) (2020). <https://doi.org/10.3390/ijerph17103707>
  18. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., dan Sing, K. S. W. *Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)*, Pure and Applied Chemistry, **87**, 1051–1069 (2015). <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
  19. Marzbali, M. H., Mir, A. A., Pazoki, M., Pourjamshidian, R., dan Tabeshnia, M. Removal of direct yellow 12 from aqueous solution by adsorption onto spirulina algae as a high-efficiency adsorbent, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **5**(2), 1946–1956 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.03.018>
  20. Alhujaily, A., Yu, H., Zhang, X., dan Ma, F. Adsorptive removal of anionic dyes from aqueous solutions using spent mushroom waste, *Applied Water Science*, **10**(7), 1–12 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01268-2>
  21. Lebron, Y. A. R., Moreira, V. R., dan Santos, L. V. S. Studies on dye biosorption enhancement by chemically modified *Fucus vesiculosus*, Spirulina maxima and Chlorella pyrenoidosa algae, *Journal of Cleaner Production*, **240**, 118197 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118197>
  22. Kousha, M., Daneshvar, E., Sohrabi, M. S., Jokar, M., dan Bhatnagar, A. Adsorption of acid orange II dye by raw and chemically modified brown macroalga *Stoechospermum marginatum*, *Chemical Engineering Journal*, **192**, 67–76 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.03.057>
  23. Ashokan, P., Asaithambi, M., Sivakumar, V., dan Sivakumar, P. Batch and column mode adsorption studies of reactive red 195 dye using *Adenanthera paronina L* seed activated carbon. Groundwater for Sustainable Development 15, 100671 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100671>
  24. Metcalf dan Eddy. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal dan Reuse* (4th Edition), McGraw Hill Book.Co, New York (2003).
  25. Nainamalai, M., Palani, M., Soundarajan, B., dan Allwin, A. E. Decolorization of synthetic dye wastewater using packed bed electro-adsorption column, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, **130**, 160–168 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.06.013>
  26. Hummadi, K. K., Luo, S., dan He, S. Adsorption of methylene blue dye from the aqueous solution via bio-adsorption in the inverse fluidized-bed adsorption column using the torrefied rice husk, *Chemosphere*, **287**(P1), 131907 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131907>
  27. Rao, K. S., Anand, S., dan Venkateswarlu, P. Modeling the kinetics of Cd(II) adsorption on *Syzygium cumini L* leaf powder in a fixed bed mini column, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **17**(2), 174–181 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.02.003>
  28. Nath, J., Ray, L., dan Bera, D. Continuous removal of malachite green by calcium alginate immobilized *Bacillus cereus* M116 in packed bed column, *Environmental Technology and Innovation*, **6**, 132–140 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.06.002>

