

**LAPORAN TUGAS PEMODELAN**

**ADSORPSI KONTINU**



**UIN SUNAN AMPEL  
S U R A B A Y A**

**Nama:**

**Dwi Oktavia Ramadhani**

NIM. 09020523025

**Dosen Pengampu:**

**Ir. Teguh Taruna Utama, S.T., M.T**

NIP. 198705022023211021

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI**

**UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN AMPEL SURABAYA**

**2025**

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Adsorpsi adalah proses pemisahan zat terlarut dari fase cair ke permukaan padatan, dan pada praktik pengolahan limbah industri karbon aktif sering dipilih sebagai adsorben utama karena luas permukaan dan porositasnya yang tinggi. Pada kromium (Cr, terutama Cr(VI)), karbon aktif terbukti efektif menurunkan konsentrasi sampai ke level yang lebih aman jika kondisi operasi dan desain kolom disesuaikan. Penggunaan sistem adsorpsi kontinu (kolom) memungkinkan pengolahan aliran nyata secara terus-menerus, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi industri dibandingkan sistem batch. Studi pemodelan aliran, laju adsorpsi, dan regenerasi karbon aktif menjadi penting untuk mengoptimalkan desain unit pengolahan (Subhan, dkk., 2022).

Dalam sistem kolom adsorpsi kontinu, parameter operasi seperti laju alir, tinggi kolom, ukuran partikel karbon aktif, dan waktu kontak secara langsung menentukan durasi tinggal atau *residence time* dan efisiensi penjerapan kromium. Banyak studi lokal menunjukkan bahwa penurunan efisiensi pada laju alir tinggi terkait dengan waktu kontak yang lebih singkat sehingga ion kromium tidak sempat menembus pori dalam karbon aktif secara optimal. Analisis kurva terobosan atau *breakthrough curve* dan perhitungan kapasitas kolom pada berbagai laju alir menjadi langkah penting saat merancang unit kontinu. Rancangan yang baik menyeimbangkan laju pengolahan dan efisiensi penjerapan sehingga biaya operasional tetap terjaga (Rahman & Suryadri, 2022).

Sifat fisik dan kimia karbon aktif yang dihasilkan dari berbagai limbah agroindustri seperti tempurung kelapa, tongkol jagung, ampas kopi, atau bagasse berpengaruh besar terhadap kemampuan mengadsorpsi Cr(VI). Cara aktivasi baik secara fisik atau kimia, suhu karbonisasi, dan perlakuan permukaan menentukan luas permukaan spesifik, distribusi pori, dan gugus fungsional yang berperan pada interaksi dengan ion kromium. Karbon aktif dari bahan lokal dapat mencapai kapasitas adsorpsi yang kompetitif, asalkan proses produksi dan karakterisasinya dimodifikasi sesuai target kontaminan (Aprilianti, 2023).

Selain karakter adsorben, kondisi larutan seperti pH, suhu, dan konsentrasi awal kromium sangat memengaruhi mekanisme penjerapan dan bentuk isoterm yang berlaku pada kondisi setimbang. Untuk Cr(VI), pH berperan krusial karena menentukan bentuk spesies kromium di larutan (mis.  $\text{HCrO}_4^-$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ) sehingga memengaruhi afinitas terhadap permukaan bermuatan karbon aktif. Studi lokal merekomendasikan pengendalian pH sebelum kolom untuk meningkatkan performa dan mengurangi kebutuhan regenerasi. Dengan memahami pengaruh kondisi operasi ini, perancang kolom dapat memilih kondisi kerja yang memaksimalkan kapasitas dan umur layanan karbon aktif (Fitriyani, 2024).

Aplikasi praktis dari studi adsorpsi kontinu tidak hanya sebatas memperoleh kapasitas adsorpsi maksimum, tetapi juga meliputi evaluasi regenerasi adsorben, biaya siklus hidup, dan implementasi skala lapangan. Analisis teknis-ekonomi dan uji regenerasi misalnya pada desorpsi dengan NaOH atau  $\text{H}_2\text{SO}_4$  menjadi bagian penting untuk menilai kelayakan adopsi karbon aktif pada fasilitas pengolahan limbah kromium. Penelitian-penelitian terbaru di Indonesia menekankan perlunya pengujian kolom jangka panjang dan studi LCA (*life cycle assessment*) untuk memastikan solusi adsorpsi berkelanjutan dan terjangkau (Manurung & Ciawi, 2025).

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana hubungan antara waktu operasi pada sistem adsorpsi kontinu dengan efisiensi penyisihan logam kromium (Cr) menggunakan karbon aktif?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi awal logam kromium terhadap kemampuan karbon aktif dalam menyerap logam pada sistem kolom adsorpsi?
3. Kapan titik *breakthrough* dan *exhausted* tercapai selama proses adsorpsi berlangsung, serta bagaimana pengaruhnya terhadap kapasitas penjerapan karbon aktif?

## 1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengetahui hubungan antara waktu operasi sistem adsorpsi kontinu dengan persentase efisiensi penyisihan logam kromium (Cr) menggunakan karbon aktif.

2. Menganalisis pengaruh variasi konsentrasi awal logam kromium terhadap kapasitas penyerapan karbon aktif dalam kolom adsorpsi.
3. Menentukan titik *breakthrough* dan *exhausted* pada sistem adsorpsi kontinu serta menilai kinerja kolom dalam menurunkan kadar kromium di larutan.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

1. Memberikan informasi ilmiah mengenai efektivitas penggunaan karbon aktif sebagai adsorben dalam sistem adsorpsi kontinu untuk menurunkan kadar logam kromium (Cr) dari larutan.
2. Menjadi referensi dalam perancangan unit pengolahan limbah cair berbasis sistem kolom adsorpsi, khususnya pada industri yang menghasilkan limbah logam berat.
3. Menjadi dasar bagi penelitian lanjutan dalam pengembangan model matematis dan optimasi parameter operasi adsorpsi, seperti laju alir, waktu tinggal, dan kapasitas jenuh adsorben, guna meningkatkan efisiensi proses pengolahan air limbah secara berkelanjutan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Adsorpsi**

Adsorpsi adalah proses pemisahan zat terlarut dari fase cair atau gas yang kemudian melekat pada permukaan padatan atau adsorben melalui gaya fisik maupun kimia. Proses ini banyak digunakan dalam pengolahan air limbah karena kemampuannya menurunkan konsentrasi kontaminan hingga tingkat yang aman. Studi-lokal menunjukkan bahwa bahan adsorben alami maupun teraktivasi mampu mengikat ion logam berat secara efektif pada kondisi optimumnya. Oleh karena itu, penting memahami mekanisme adsorpsi agar desain sistem pengolahan limbah bisa lebih efisien dan ekonomis (Maryudi, dkk., 2021). Mekanisme adsorpsi meliputi beberapa tahap yaitu difusi massa ke permukaan adsorben, penetrasi ke dalam pori-pori adsorben, dan akhirnya terbentuk kesetimbangan antara fase cair dan padat. Pada tahap awal, banyak situs aktif kosong sehingga laju adsorpsi tinggi, namun saat mendekati kesetimbangan laju akan menurun karena sebagian besar situs telah terisi. Penelitian Indonesia telah menunjukkan bahwa perubahan ukuran partikel atau kecepatan pengadukan memengaruhi fase difusi ini. Mengetahui fase mana yang menjadi pembatas proses sangat penting untuk optimasi. (Fitriyani, 2024)

Terdapat dua jenis utama adsorpsi berdasarkan gaya yang berperan: fisika (physisorption) dan kimia (chemisorption). Physisorption ditandai oleh gaya van der Waals atau elektrostatik dan bersifat reversibel, sedangkan chemisorption melibatkan ikatan kimia kuat yang biasanya sulit dibalik. Dalam konteks pengolahan limbah logam, banyak penelitian memilih physisorption karena biaya rendah dan regenerasi lebih mudah. Namun, pemilihan jenis harus disesuaikan dengan target kontaminan dan kondisi operasional. Untuk karakterisasi adsorben dalam adsorpsi, parameter penting antara lain kapasitas adsorpsi (mg/g), efisiensi penghilangan (%), waktu kontak, dan kondisi operasi seperti pH dan suhu. Kajian Indonesia menunjukkan bahwa penurunan efisiensi sering terjadi bila nilai waktu kontak atau dosis adsorben tidak mencukupi (Sari & Suryani, 2023).

Dengan memiliki data karakterisasi yang baik, maka proses adsorpsi dapat dimodel dengan lebih akurat. Secara keseluruhan, pemahaman mendalam mengenai adsorpsi sebagai fenomena fisik-kimia merupakan langkah dasar sebelum masuk ke

desain sistem adsorpsi kontinu, karakteristik adsorben, atau pemodelan sistem. Tanpa memahami adsorpsi secara fundamental, risiko-reduksi untuk kegagalan rancangan akan lebih besar. Maka pada penelitian ini, pemahaman tentang adsorpsi menjadi dasar untuk seluruh analisis selanjutnya.

## 2.2 Sistem Adsorpsi Kontinu

Sistem adsorpsi kontinu atau kolom (*fixed-bed column system*) digunakan untuk pengolahan secara terus-menerus, berbeda dengan sistem batch yang dilakukan secara bertahap. Sistem ini banyak diaplikasikan di industri karena lebih efisien dalam mengolah volume besar dan dapat beroperasi dalam waktu lama tanpa penghentian proses. Efisiensi adsorpsi pada sistem kolom sangat dipengaruhi oleh desain kolom, laju alir, dan tinggi lapisan adsorben (Subhan, dkk., 2022). Pada sistem kolom, larutan yang mengandung logam berat dialirkkan melalui lapisan adsorben hingga situs aktif pada adsorben jenuh dan terbentuk *breakthrough curve*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju alir yang lebih rendah memberikan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena waktu kontak antara larutan dan adsorben lebih panjang (Rohmah, dkk., 2023). Namun, laju alir yang terlalu rendah dapat mengurangi efisiensi waktu operasi sehingga perlu dicari titik optimum.

Beberapa parameter penting yang memengaruhi kinerja kolom adsorpsi antara lain laju alir, tinggi bed, konsentrasi awal logam, dan ukuran partikel adsorben. Semakin tinggi kolom dan semakin kecil ukuran partikel, maka luas kontak antara larutan dan adsorben semakin besar sehingga efisiensi meningkat (Widiyanti, 2021). Oleh karena itu, desain kolom harus memperhatikan keseimbangan antara efisiensi dan biaya operasional. Sistem adsorpsi kontinu juga memiliki keunggulan dalam regenerasi adsorben dan kestabilan proses dibanding sistem batch. Adsorben dapat diregenerasi secara berkala tanpa harus menghentikan seluruh sistem. Karbon aktif yang digunakan pada sistem kolom dapat diregenerasi hingga empat siklus dengan penurunan efisiensi hanya sekitar 10% (Wicaksono, dkk., 2024).

Keunggulan sistem kolom antara lain bisa dioperasikan secara otomatis, kontinuitas proses lebih mudah, dan potensi regenerasi adsorben lebih baik dibanding batch. Namun kerugiannya adalah desain awal lebih rumit, risiko tersumbat lebih tinggi, dan perlu pemantauan kurva terobosan secara cermat. Oleh karena itu, penyusunan metodologi penelitian dan skema kolom sangat penting agar

hasilnya dapat diandalkan. Penelitian pada sistem kolom di Indonesia masih berkembang, terutama terkait pemodelan matematis dan skala industri kecil. Dalam penelitian ini, sistem kolom adsorpsi kontinu dipilih sebagai hal utama untuk menguji penyerapan logam kromium oleh karbon aktif.

### **2.3 Karbon Aktif**

Karbon aktif merupakan adsorben yang paling umum digunakan dalam proses adsorpsi karena memiliki luas permukaan besar, volume pori tinggi, dan banyak gugus fungsional aktif di permukaannya. Sifat-sifat ini memungkinkan karbon aktif mengikat berbagai polutan, termasuk logam berat seperti kromium. Karbon aktif hasil aktivasi kimia menggunakan  $H_3PO_4$  menunjukkan peningkatan luas permukaan hingga 30% dibanding aktivasi fisika (Danarto & Samun, 2023). Bahan dasar karbon aktif dapat berasal dari biomassa lokal seperti tempurung kelapa, ampas kopi, atau sekam padi. Pemanfaatan limbah biomassa ini mendukung konsep ekonomi sirkular karena mengubah limbah menjadi material bernilai tinggi. Karbon aktif dari ampas kopi mampu menurunkan kadar Cr(VI) hingga 95% pada kondisi pH 4 dan waktu kontak 60 menit (Fitriyani, 2024).

Karakteristik karbon aktif juga ditentukan oleh metode aktivasi, suhu karbonisasi, dan waktu pemanasan. Proses aktivasi kimia menghasilkan pori lebih banyak dibanding aktivasi fisika, sehingga kapasitas adsorpsi meningkat. Aktivasi menggunakan KOH pada suhu 600 °C menghasilkan luas permukaan optimum sebesar 820 m<sup>2</sup>/g (Yuliana, dkk., 2022). Selain itu, keberadaan gugus fungsional seperti -OH, -COOH, dan -C=O di permukaan karbon aktif memengaruhi kemampuan adsorpsi terhadap ion logam bermuatan. Gugus polar tersebut berperan penting dalam pembentukan ikatan ionik dengan kromium yang bermuatan negatif. Semakin banyak gugus fungsional yang aktif, maka semakin tinggi kapasitas adsorpsi karbon aktif terhadap ion logam (Wahyuni, dkk., 2023).

### **2.4 Logam Berat**

Logam berat adalah unsur logam yang memiliki massa jenis tinggi dan bersifat toksik meskipun pada konsentrasi rendah. Salah satu logam berat yang sering mencemari lingkungan adalah kromium, khususnya Cr(VI), yang bersifat karsinogenik dan beracun bagi organisme air. Paparan Cr(VI) dalam air limbah

industri penyamakan kulit dapat menyebabkan gangguan hati dan ginjal jika tidak diolah dengan benar (Maryudi, dkk., 2021). Sumber utama pencemaran kromium berasal dari industri elektroplating, penyamakan kulit, tekstil, dan pewarna logam. Cr(VI) memiliki mobilitas tinggi di lingkungan sehingga mudah menyebar ke air tanah dan sungai. Oleh karena itu, diperlukan metode pengolahan limbah yang efektif untuk menurunkan kadar logam ini hingga di bawah ambang batas yang ditetapkan pemerintah (Subhan, dkk., 2022).

Berbagai metode penghilangan logam berat telah dikembangkan, seperti presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, dan adsorpsi. Dari metode tersebut, adsorpsi dinilai paling efisien karena biayanya rendah, prosesnya sederhana, dan dapat diaplikasikan untuk berbagai jenis logam berat (Fitriyani, 2024). Dalam konteks pengolahan kromium, karbon aktif menjadi pilihan unggulan karena mampu menjerap Cr(VI) maupun Cr(III) secara efektif. Karbon aktif dari limbah tempurung kelapa dapat menurunkan kadar Cr(VI) hingga 93% pada kondisi optimum. Hasil tersebut menunjukkan potensi besar karbon aktif sebagai bahan adsorben ramah lingkungan.

## 2.5 Model Adsorpsi Sistem Kontinu

Model-model umum untuk mendeskripsikan performa kolom adsorpsi membantu peneliti dan perancang menentukan kapan kolom mulai terobosi dan seberapa besar kapasitas praktisnya. Di antara model yang sering dipakai ada Thomas, Yoon–Nelson, dan Yan yang masing-masing memberikan pendekatan berbeda untuk menginterpretasi kurva terobosan dan memprediksi perilaku kolom di kondisi operasi tertentu. Pemilihan model biasanya didasarkan pada kesederhanaan parameter yang dibutuhkan, kecocokan statistik terhadap data percobaan dan tujuan analisis untuk desain kapasitas, prediksi waktu terobosan 50%, atau evaluasi kinetika dalam kondisi nyata (Subhan, dkk., 2022).

Model Thomas populer karena kemudahan aplikasinya dan kemampuannya memberikan estimasi kapasitas kolom yang berguna untuk desain awal. Model ini cocok dipakai ketika sistem tidak terlalu dipengaruhi dispersi aksial yang besar dan ketika data terobosan menunjukkan pola yang relatif simetris; oleh karena itu model Thomas kerap dipakai sebagai titik awal pemodelan dalam studi kolom di Indonesia. Keterbatasannya adalah asumsi-asumsi sederhananya, seperti mengabaikan

beberapa mekanisme difusi sehingga untuk aplikasi industri yang kompleks perlu diverifikasi dengan metrik tambahan. Penelitian lapangan dan studi akademik di tanah air menunjukkan Thomas sering memberikan kecocokan yang baik pada rentang operasi laboratorium (Kardena & Syifa, 2022).

Model Yoon Nelson menonjol karena kesederhanaannya yaitu okus pada parameter waktu untuk mencapai 50% *breakthrough* dan tidak memerlukan informasi rinci tentang karakter adsorben. Keunggulan ini membuat Yoon Nelson berguna ketika data terbatas atau saat ingin cepat mendapatkan indikasi kapan kolom harus diregenerasi. Namun, karena tidak langsung memberikan kapasitas kolom, model ini biasanya dipakai berdampingan dengan Thomas atau model lainnya untuk mendapatkan gambaran desain yang komprehensif. Penggunaan model Yoon Nelson pada studi-studi di Indonesia menunjukkan hasil prediksi waktu break yang cukup andal untuk perencanaan operasi kolom (Wicaksono, dkk., 2024).

Model Adams–Bohart merupakan salah satu model awal yang digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi pada sistem kolom tetap (*fixed-bed column*). Model ini berfokus pada tahap awal proses adsorpsi, yaitu ketika bagian atas kolom baru mulai jenuh dan kurva terobosan mulai terbentuk. Konsep utama model ini adalah hubungan antara konsentrasi awal larutan, panjang kolom, dan waktu terobosan untuk memperkirakan laju perpindahan massa dari larutan ke permukaan adsorben. Model Adams–Bohart dapat memberikan prediksi yang baik terhadap fase awal penyerapan Cr(VI) menggunakan karbon aktif tempurung kelapa pada sistem kolom kontinu. Model ini cocok digunakan untuk memperkirakan waktu jenuh awal dan efisiensi adsorpsi pada laju alir tertentu, tetapi cenderung kurang akurat ketika kolom sudah mendekati kondisi jenuh total (Hendrasarie, 2022).

## **BAB III**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Adsorpsi adalah proses pemisahan zat terlarut dari fase cair atau gas yang kemudian melekat pada permukaan padatan atau adsorben melalui gaya fisik maupun kimia. Proses ini banyak digunakan dalam pengolahan air limbah karena kemampuannya menurunkan konsentrasi kontaminan hingga tingkat yang aman. Studi-lokal menunjukkan bahwa bahan adsorben alami maupun teraktivasi mampu mengikat ion logam berat secara efektif pada kondisi optimumnya. Oleh karena itu, penting memahami mekanisme adsorpsi agar desain sistem pengolahan limbah bisa lebih efisien dan ekonomis (Maryudi, dkk., 2021).

Sistem adsorpsi kontinu atau kolom (*fixed-bed column system*) digunakan untuk pengolahan secara terus-menerus, berbeda dengan sistem batch yang dilakukan secara bertahap. Sistem ini banyak diaplikasikan di industri karena lebih efisien dalam mengolah volume besar dan dapat beroperasi dalam waktu lama tanpa penghentian proses. Efisiensi adsorpsi pada sistem kolom sangat dipengaruhi oleh desain kolom, laju alir, dan tinggi lapisan adsorben (Subhan, dkk., 2022). Pada sistem kolom, larutan yang mengandung logam berat dialirkkan melalui lapisan adsorben hingga situs aktif pada adsorben jenuh dan terbentuk *breakthrough curve*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa laju alir yang lebih rendah memberikan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi karena waktu kontak antara larutan dan adsorben lebih panjang (Rohmah, dkk., 2023). Namun, laju alir yang terlalu rendah dapat mengurangi efisiensi waktu operasi sehingga perlu dicari titik optimum.

#### **3.1 Model Adams-Bohart**

Model Adams–Bohart merupakan salah satu model awal yang digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi pada sistem kolom tetap (*fixed-bed column*). Model ini berfokus pada tahap awal proses adsorpsi, yaitu ketika bagian atas kolom baru mulai jenuh dan kurva terobosan mulai terbentuk. Konsep utama model ini adalah hubungan antara konsentrasi awal larutan, panjang kolom, dan waktu terobosan untuk memperkirakan laju perpindahan massa dari larutan ke permukaan adsorben. Model Adams–Bohart dapat memberikan prediksi yang baik terhadap fase awal penyerapan Cr(VI) menggunakan karbon aktif tempurung kelapa pada

sistem kolom kontinu. Model ini cocok digunakan untuk memperkirakan waktu jenuh awal dan efisiensi adsorpsi pada laju alir tertentu, tetapi cenderung kurang akurat ketika kolom sudah mendekati kondisi jenuh total (Hendrasarie, 2022).

Berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 10 mg/liter..

**Tabel 3.1** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium,  
Konsentrasi awal 10 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Kosentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter		%		
1	1	10	0,1232	0,27	99%	-4,3965	0,0123
2	2	10	0,2229	0,54	98%	-3,8036	0,0223
3	3	10	0,3133	0,81	97%	-3,4632	0,0313
4	4	10	0,3435	1,08	97%	-3,3712	0,0344
5	5	10	0,2948	1,35	97%	-3,5240	0,0295
6	6	10	0,3597	1,62	96%	-3,3251	0,0360
7	7	10	0,4223	1,89	96%	-3,1646	0,0422
8	8	10	0,4826	2,16	95%	-3,0312	0,0483
<b>9</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>1,3374</b>	<b>2,43</b>	<b>87%</b>	-2,0119	0,1337
10	10	10	2,0053	2,7	80%	-1,6068	0,2005
11	11	10	3,4663	2,97	65%	-1,0595	0,3466
12	12	10	3,1463	3,24	69%	-1,1564	0,3146
13	13	10	3,2019	3,51	68%	-1,1388	0,3202
14	14	10	5,1916	3,78	48%	-0,6555	0,5192
15	15	10	6,1934	4,05	38%	-0,4791	0,6193
16	16	10	6,9031	4,32	31%	-0,3706	0,6903
17	17	10	8,0997	4,59	19%	-0,2108	0,8100
18	18	10	8,5449	4,86	15%	-0,1573	0,8545
19	19	10	9,5189	5,13	5%	-0,0493	0,9519
20	20	10	9,6024	5,4	4%	-0,0406	0,9602
21	21	10	9,2545	5,67	7%	-0,0775	0,9255
<b>22</b>	<b>22</b>	<b>10</b>	<b>9,4911</b>	<b>5,94</b>	<b>5%</b>	-0,0522	0,9491

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

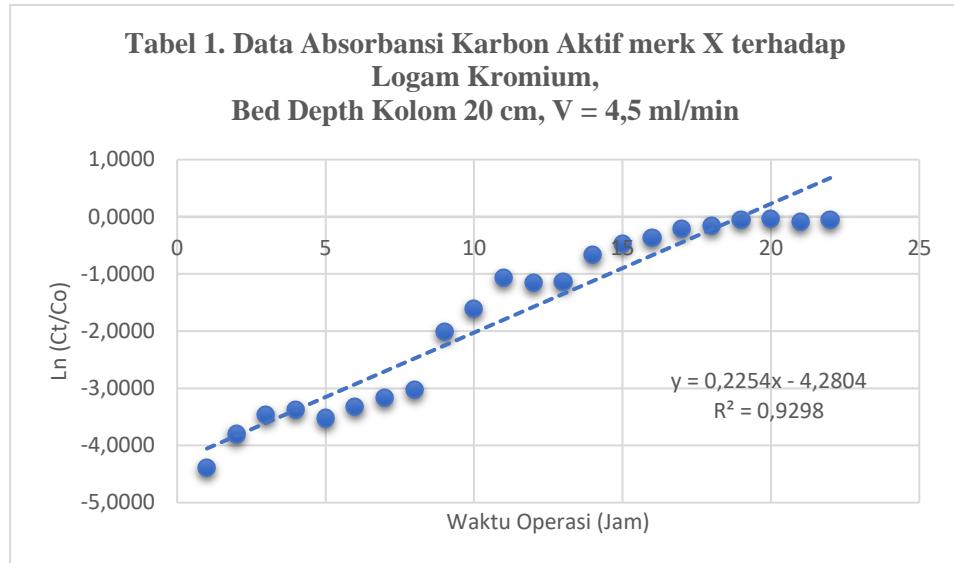
Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

$$a. \quad \text{Ln} (\text{Ct/Co}) = \text{LN} \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \text{LN} \frac{0,1232}{10} = -4,3965$$

$$b. \quad Ct/Co = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,1232}{10} = 0,0123$$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.



**Gambar 3.1 Grafik Tabel 1 Adams Bohart**

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 1 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.2 Hasil Perhitungan Tabel 1**

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	Kab	No	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			L/mg.jam	mg/l	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0225	362,871	0,9298
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0113	725,742	0,9298
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0075	1088,612	0,9298
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0056	1451,483	0,9298
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0045	1814,354	0,9298
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0038	2177,225	0,9298
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0032	2540,096	0,9298
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0028	2902,967	0,9298
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0025	3265,837	0,9298
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0023	3628,708	0,9298
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0020	3991,579	0,9298
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0019	4354,450	0,9298
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0017	4717,321	0,9298
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0016	5080,191	0,9298
15	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0015	5443,062	0,9298

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	Kab	No	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			L/mg.jam	mg/l	
16	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0014	5805,933	0,9298
17	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0013	6168,804	0,9298
18	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0013	6531,675	0,9298
19	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0012	6894,546	0,9298
20	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0011	7257,416	0,9298
21	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0011	7620,287	0,9298
22	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,2254	-4,2804	0,0010	7983,158	0,9298

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

$$a. \text{ Volume flowrate (Q)} = 4,5 \text{ ml/min}$$

$$b. \text{ Volume flowrate (Q)} = \frac{4,5 \frac{\text{ml}}{\text{jam}} \times 60}{1000} = 0,27 \text{ liter/jam}$$

$$c. A \text{ kolom} = \left(\frac{1}{4}\right) \pi \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$$

$$d. \text{ Linier flowrate} = \frac{\text{Volumetric flowrate}}{A \text{ kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$$

$$e. \text{ Kab} = \frac{\text{Slope}}{(Co Cr \times Waktu operasi)} = \frac{0,2254}{(10 \times 1)} = 0,0225 \frac{\text{L}}{\text{mg}} \cdot \text{jam}$$

$$f. \text{ No} = \frac{\text{Intersep} \times \text{Linier flowrate}}{\text{Kab} \times \text{Bed height}} = \frac{-4,2804 \times 38,217}{0,0225 \times 20} = 362,871 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

Adapun berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 15 mg/liter..

**Tabel 3.3** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, konsentrasi awal 15 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Kosentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
1	1	15	0,26	0,27	98%	-4,0551	0,0173
2	2	15	0,501	0,54	97%	-3,3992	0,0334
3	3	15	0,517	0,81	97%	-3,3678	0,0345
4	4	15	0,575	1,08	96%	-3,2614	0,0383
5	5	15	0,71	1,35	95%	-3,0505	0,0473
<b>6</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>0,882</b>	<b>1,62</b>	<b>94%</b>	-2,8336	0,0588
7	7	15	1,699	1,89	89%	-2,1780	0,1133
8	8	15	2,729	2,16	82%	-1,7041	0,1819
9	9	15	4,12	2,43	73%	-1,2922	0,2747

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Konsentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
10	10	15	4,176	2,7	72%	-1,2787	0,2784
11	11	15	6,18	2,97	59%	-0,8867	0,4120
12	12	15	7,33	3,24	51%	-0,7161	0,4887
13	13	15	8,796	3,51	41%	-0,5338	0,5864
14	14	15	11,064	3,78	26%	-0,3044	0,7376
15	15	15	13,662	4,05	9%	-0,0934	0,9108
16	16	15	14,218	4,32	5%	-0,0535	0,9479
17	17	15	14,056	4,59	6%	-0,0650	0,9371
<b>18</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>14,381</b>	<b>4,86</b>	<b>4%</b>	-0,0421	0,9587

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

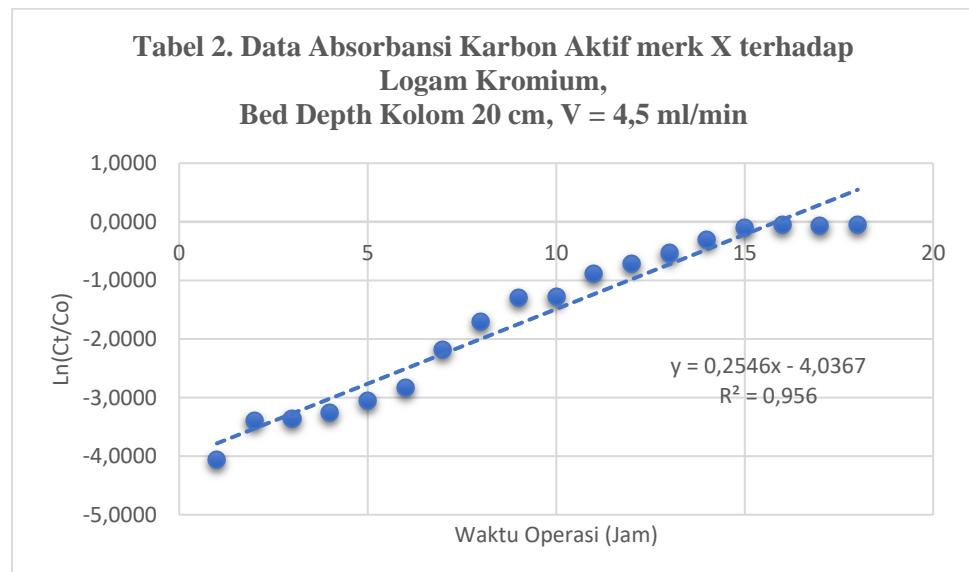
Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

$$\text{a. } \ln(Ct/Co) = LN \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = LN \frac{0,26}{15} = -4,0551$$

$$\text{b. } Ct/Co = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,26}{15} = 0,0173$$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.



**Gambar 3.2** Grafik Tabel 2 Adams Bohart

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 2 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.4** Hasil Perhitungan Tabel 2

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	Kab	No	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			L/mg.jam	mg/l	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0170	454,445	0,956
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0085	908,889	0,956
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0057	1363,334	0,956
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0042	1817,778	0,956
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0034	2272,223	0,956
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0028	2726,668	0,956
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0024	3181,112	0,956
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0021	3635,557	0,956
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0019	4090,001	0,956
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0017	4544,446	0,956
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0015	4998,890	0,956
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0014	5453,335	0,956
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0013	5907,780	0,956
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0012	6362,224	0,956
15	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0011	6816,669	0,956
16	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0011	7271,113	0,956
17	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0010	7725,558	0,956
18	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,2546	-4,0367	0,0009	8180,003	0,956

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Volume flowrate (Q) = 4,5 ml/min

b. Volume flowrate (Q) =  $\frac{4,5 \text{ ml}}{\text{jam} \times 60} = 0,27 \text{ liter/jam}$

c. A kolom =  $\left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$

d. Linier flowrate =  $\frac{\text{Volumetric flowrate}}{\text{A kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$

e. Kab =  $\frac{\text{Slope}}{(\text{Co Cr} \times \text{Waktu operasi})} = \frac{0,2546}{(15 \times 1)} = 0,0170 \frac{\text{L}}{\text{mg}} \cdot \text{jam}$

f. No =  $\frac{\text{Intersep} \times \text{Linier flowrate}}{\text{Kab} \times \text{Bed height}} = \frac{-4,0367 \times 38,217}{0,00170 \times 20} = 454,445 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

Adapun berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 20 mg/liter..

**Tabel 3.5** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, konsentrasi awal 15 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Kosentrasi setelah melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
1	1	20	0,346	0,27	98%	-4,0570	0,0173
2	2	20	0,668	0,54	97%	-3,3992	0,0334
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>0,946</b>	<b>0,81</b>	<b>95%</b>	-3,0512	0,0473
4	4	20	1,176	1,08	94%	-2,8336	0,0588
5	5	20	2,265	1,35	89%	-2,1782	0,1133
6	6	20	3,638	1,62	82%	-1,7043	0,1819
7	7	20	5,493	1,89	73%	-1,2923	0,2747
8	8	20	5,568	2,16	72%	-1,2787	0,2784
9	9	20	8,24	2,43	59%	-0,8867	0,4120
10	10	20	11,728	2,7	41%	-0,5338	0,5864
11	11	20	14,752	2,97	26%	-0,3044	0,7376
12	12	20	18,216	3,24	9%	-0,0934	0,9108
13	13	20	18,957	3,51	5%	-0,0536	0,9479
<b>14</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>19,175</b>	<b>3,78</b>	<b>4%</b>	-0,0421	0,9588

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

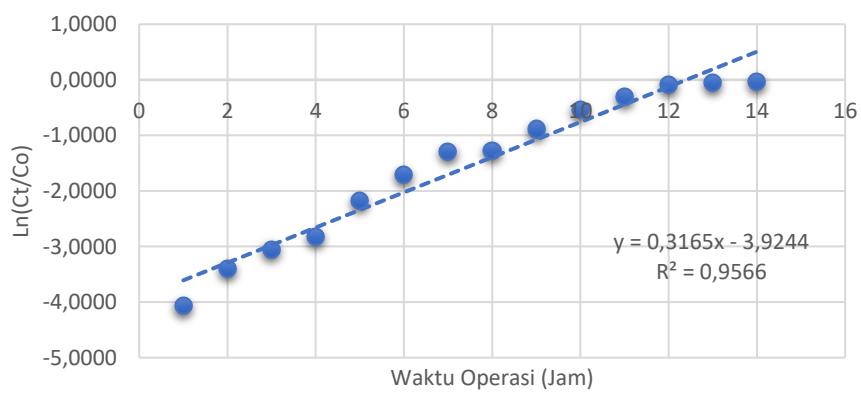
Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

$$a. \quad \text{Ln} (\text{Ct/Co}) = \text{LN} \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \text{LN} \frac{0,346}{20} = -4,0570$$

$$b. \quad \text{Ct/Co} = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,346}{20} = 0,0173$$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

Tabel 3. Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, Bed Depth Kolom 20 cm, V = 4,5 ml/min



### Gambar 3.3 Grafik Tabel 3 Adams Bohart

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 3 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.6** Hasil Perhitungan Tabel 3

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	Kab	No	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			L/mg.jam	mg/l	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0158	473,861	0,9566
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0079	947,722	0,9566
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0053	1421,584	0,9566
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0040	1895,445	0,9566
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0032	2369,306	0,9566
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0026	2843,167	0,9566
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0023	3317,028	0,9566
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0020	3790,890	0,9566
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0018	4264,751	0,9566
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0016	4738,612	0,9566
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0014	5212,473	0,9566
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0013	5686,334	0,9566
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0012	6160,196	0,9566
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,3165	-3,9244	0,0011	6634,057	0,9566

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Volume flowrate (Q) = 4,5 ml/min

b. Volume flowrate (Q) =  $\frac{4,5 \frac{ml}{jam} \times 60}{1000} = 0,27 \text{ liter/jam}$

c. A kolom =  $\left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$

d. Linier flowrate =  $\frac{\text{Volumetric flowrate}}{A \text{ kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$

e. Kab =  $\frac{\text{Slope}}{(Co Cr \times Waktu operasi)} = \frac{0,3165}{(20 \times 1)} = 0,0158 \frac{L}{mg} \cdot jam$

f. No =  $\frac{\text{Intersep} \times \text{Linier flowrate}}{\text{Kab} \times \text{Bed height}} = \frac{-3,9244 \times 38,217}{0,0158 \times 20} = 4473,861 \frac{mg}{l}$

Berdasarkan hasil grafik dan perhitungan yang telah dijelaskan sebelumnya, diketahui bahwa penerapan Model Adams–Bohart pada proses biosorpsi logam Kromium (VI) (Cr(VI)) dilakukan dengan konsentrasi awal 20 mg/L dan laju alir sebesar 4,5 mL/menit. Analisis ini membandingkan tiga variasi kedalaman kolom, yaitu 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Pada grafik, sumbu y menggambarkan nilai

$\ln(Ct/Co)$ , sedangkan sumbu x menunjukkan waktu pengamatan dalam satuan jam. Data hasil percobaan memperlihatkan adanya peningkatan nilai  $\ln(Ct/Co)$  seiring bertambahnya waktu, yang menandakan bahwa konsentrasi Cr(VI) pada efluen ( $Ct$ ) semakin mendekati konsentrasi awal ( $Co$ ).

Persamaan regresi linear yang diperoleh dari masing-masing kedalaman kolom adalah:  $y = 0,2254x - 4,2804$  ( $R^2 = 0,9298$ ) untuk kedalaman 10 cm;  $y = 0,2546x - 4,0367$  ( $R^2 = 0,956$ ) untuk kedalaman 15 cm; dan  $y = 0,3165x - 3,9244$  ( $R^2 = 0,9566$ ) untuk kedalaman 20 cm. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang berkisar antara 0,92 hingga 0,95 menunjukkan bahwa Model Adams–Bohart memiliki tingkat kecocokan yang cukup baik terhadap data eksperimental. Hal ini berarti model tersebut mampu menggambarkan perilaku awal proses adsorpsi pada sistem kolom dengan cukup akurat, khususnya pada fase awal terbentuknya kurva *breakthrough*.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman kolom, maka nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) juga semakin tinggi. Hal ini menandakan bahwa pada kedalaman kolom yang lebih besar, proses kontak antara larutan dan adsorben berlangsung lebih lama, sehingga penyerapan ion Cr(VI) menjadi lebih efektif dan data eksperimental lebih sesuai dengan prediksi model Adams–Bohart. Dengan meningkatnya tinggi bed kolom, jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi juga bertambah, sehingga memungkinkan penyerapan yang lebih merata di sepanjang kolom (Subhan, dkk., 2022). Selain itu, peningkatan kedalaman kolom juga memperpanjang waktu tinggal (*residence time*) larutan di dalam sistem, sehingga peluang partikel logam untuk berinteraksi dengan permukaan karbon aktif menjadi lebih besar. Peningkatan waktu kontak ini berperan penting dalam memperlambat terbentuknya kurva *breakthrough*, yang berarti kolom dapat bekerja lebih lama sebelum jenuh. Kondisi tersebut sesuai dengan hasil penelitian ini, di mana kurva *breakthrough* pada kedalaman 20 cm menunjukkan penyerapan paling efisien dibandingkan dengan kedalaman yang lebih rendah.

### 3.2 Model Yoon-Nelson

Model Yoon Nelson menonjol karena kesederhanaannya yaitu okus pada parameter waktu untuk mencapai 50% *breakthrough* dan tidak memerlukan informasi rinci tentang karakter adsorben. Keunggulan ini membuat Yoon Nelson

berguna ketika data terbatas atau saat ingin cepat mendapatkan indikasi kapan kolom harus diregenerasi. Namun, karena tidak langsung memberikan kapasitas kolom, model ini biasanya dipakai berdampingan dengan Thomas atau model lainnya untuk mendapatkan gambaran desain yang komprehensif. Penggunaan model Yoon Nelson pada studi-studi di Indonesia menunjukkan hasil prediksi waktu break yang cukup andal untuk perencanaan operasi kolom (Wicaksono, dkk., 2024).

Berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 10 mg/liter..

**Tabel 3.1** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium,

Konsentrasi awal 10 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Konsentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co-Ct)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter		%		
1	1	10	0,1232	0,27	99%	-4,3841	0,0123
2	2	10	0,2229	0,54	98%	-3,7811	0,0223
3	3	10	0,3133	0,81	97%	-3,4313	0,0313
4	4	10	0,3435	1,08	97%	-3,3362	0,0344
5	5	10	0,2948	1,35	97%	-3,4941	0,0295
6	6	10	0,3597	1,62	96%	-3,2884	0,0360
7	7	10	0,4223	1,89	96%	-3,1215	0,0422
8	8	10	0,4826	2,16	95%	-2,9817	0,0483
<b>9</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>1,3374</b>	<b>2,43</b>	<b>87%</b>	<b>-1,8683</b>	<b>0,1337</b>
10	10	10	2,0053	2,7	80%	-1,3830	0,2005
11	11	10	3,4663	2,97	65%	-0,6339	0,3466
12	12	10	3,1463	3,24	69%	-0,7786	0,3146
13	13	10	3,2019	3,51	68%	-0,7529	0,3202
14	14	10	5,1916	3,78	48%	0,0767	0,5192
15	15	10	6,1934	4,05	38%	0,4867	0,6193
16	16	10	6,9031	4,32	31%	0,8016	0,6903
17	17	10	8,0997	4,59	19%	1,4498	0,8100
18	18	10	8,5449	4,86	15%	1,7703	0,8545
19	19	10	9,5189	5,13	5%	2,9850	0,9519
20	20	10	9,6024	5,4	4%	3,1843	0,9602
21	21	10	9,2545	5,67	7%	2,5188	0,9255
<b>22</b>	<b>22</b>	<b>10</b>	<b>9,4911</b>	<b>5,94</b>	<b>5%</b>	<b>2,9259</b>	<b>0,9491</b>

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran nilai  $\ln(Ct/Co)$  dan  $Ct/Co$  pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a.  $\ln(Ct/Co-Ct)$

$$= \ln \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal} - \text{Konsentrasi setelah kolom}} = \ln \frac{0,1232}{10 - 0,1232} = -4,3841$$

b.  $Ct/Co = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,1232}{10} = 0,0123$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 1. Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium,  
Bed Depth Kolom 20 cm, V = 4,5 ml/min**



**Gambar 3.4 Grafik Tabel 1 Yoon-Nelson**

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 1 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.2 Hasil Perhitungan Tabel 1**

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KYN	$\tau$	$\tau$ Exp	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			jam <sup>-1</sup>	jam	jam	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KYN	$\tau$	$\tau_{Exp}$	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			jam <sup>-1</sup>	jam	jam	
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
15	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
16	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
17	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
18	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
19	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
20	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
21	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666
22	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	0,3795	-5,1387	0,3795	13,5407	13,1289	0,9666

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

$$a. \text{ Volume flowrate (Q)} = 4,5 \text{ ml/min}$$

$$b. \text{ Volume flowrate (Q)} = \frac{4,5 \frac{\text{ml}}{\text{jam}} \times 60}{1000} = 0,27 \text{ liter/jam}$$

$$c. A \text{ kolom} = \left(\frac{1}{4}\right) \pi \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$$

$$d. \text{ Linier flowrate} = \frac{\text{Volumetric flowrate}}{A \text{ kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$$

$$e. \tau = \frac{Intersep}{KYN} = \frac{-5,1387}{0,3795} = 13,5407 \text{ jam}$$

$$f. \tau_{exp} = 13,1289$$

Adapun berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 15 mg/liter.

**Tabel 3.3** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, konsentrasi awal 15 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Kosentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
1	1	15	0,26	0,27	98%	-4,0376	0,0173
2	2	15	0,501	0,54	97%	-3,3652	0,0334

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Konsentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
3	3	15	0,517	0,81	97%	-3,3327	0,0345
4	4	15	0,575	1,08	96%	-3,2223	0,0383
5	5	15	0,71	1,35	95%	-3,0021	0,0473
<b>6</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>0,882</b>	<b>1,62</b>	<b>94%</b>	<b>-2,7730</b>	<b>0,0588</b>
7	7	15	1,699	1,89	89%	-2,0578	0,1133
8	8	15	2,729	2,16	82%	-1,5033	0,1819
9	9	15	4,12	2,43	73%	-0,9711	0,2747
10	10	15	4,176	2,7	72%	-0,9524	0,2784
11	11	15	6,18	2,97	59%	-0,3557	0,4120
12	12	15	7,33	3,24	51%	-0,0453	0,4887
13	13	15	8,796	3,51	41%	0,3491	0,5864
14	14	15	11,064	3,78	26%	1,0335	0,7376
15	15	15	13,662	4,05	9%	2,3234	0,9108
16	16	15	14,218	4,32	5%	2,9004	0,9479
17	17	15	14,056	4,59	6%	2,7007	0,9371
<b>18</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>14,381</b>	<b>4,86</b>	<b>4%</b>	<b>3,1456</b>	<b>0,9587</b>

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Ln (Ct/Co)

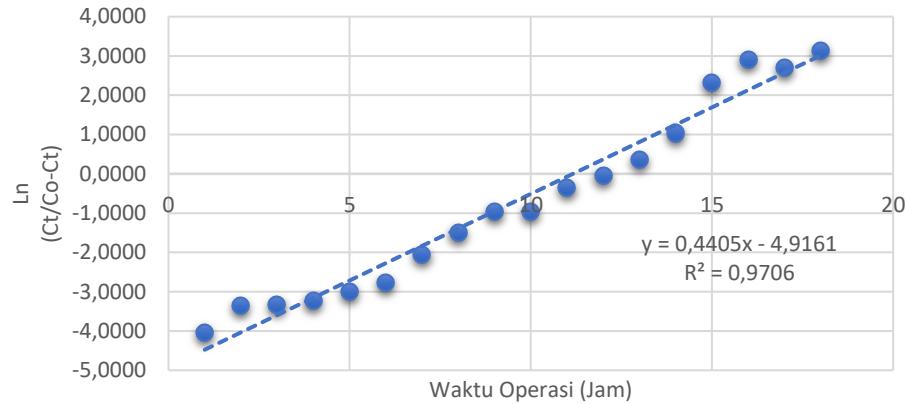
$$= \ln \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal} - \text{Konsentrasi setelah kolom}}$$

$$= \ln \frac{0,26}{15 - 0,26} = -4,0376$$

$$\text{b. Ct/Co} = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,1232}{15} = 0,0173$$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 2. Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, Bed Depth Kolom 20 cm, V = 4,5 ml/min**



**Gambar 3.5 Grafik Tabel 2 Yoon-Nelson**

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 2 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.4 Hasil Perhitungan Tabel 2**

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Limier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KYN	$\tau$	$\tau_{Exp}$	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			jam <sup>-1</sup>	jam	jam	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
15	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
16	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
17	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706
18	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	0,4405	-4,9161	0,4405	11,1603	11,0142	0,9706

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Volume flowrate ( $Q$ ) = 4,5 ml/min

b. Volume flowrate ( $Q$ ) =  $\frac{4,5 \frac{ml}{jam} \times 60}{1000}$  = 0,27 liter/jam

c. A kolom =  $\left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$

d. Linier flowrate =  $\frac{\text{Volumetric flowrate}}{A \text{ kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$

e.  $\tau = \frac{Intersep}{KYN} = \frac{-4,9161}{0,4405} = 11,1603 \text{ jam}$

f.  $\tau \exp = 11,0142 \text{ jam}$

Adapun berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 20 mg/liter..

**Tabel 3.5** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, konsentrasi awal 15 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Kosentrasi setelah melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
1	1	20	0,346	0,27	98%	-4,0396	0,0173
2	2	20	0,668	0,54	97%	-3,3652	0,0334
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>0,946</b>	<b>0,81</b>	<b>95%</b>	<b>-3,0028</b>	<b>0,0473</b>
4	4	20	1,176	1,08	94%	-2,7730	0,0588
5	5	20	2,265	1,35	89%	-2,0580	0,1133
6	6	20	3,638	1,62	82%	-1,5035	0,1819
7	7	20	5,493	1,89	73%	-0,9712	0,2747
8	8	20	5,568	2,16	72%	-0,9524	0,2784
9	9	20	8,24	2,43	59%	-0,3557	0,4120
10	10	20	11,728	2,7	41%	0,3491	0,5864
11	11	20	14,752	2,97	26%	1,0335	0,7376
12	12	20	18,216	3,24	9%	2,3234	0,9108
13	13	20	18,957	3,51	5%	2,9001	0,9479
<b>14</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>19,175</b>	<b>3,78</b>	<b>4%</b>	<b>3,1460</b>	<b>0,9588</b>

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

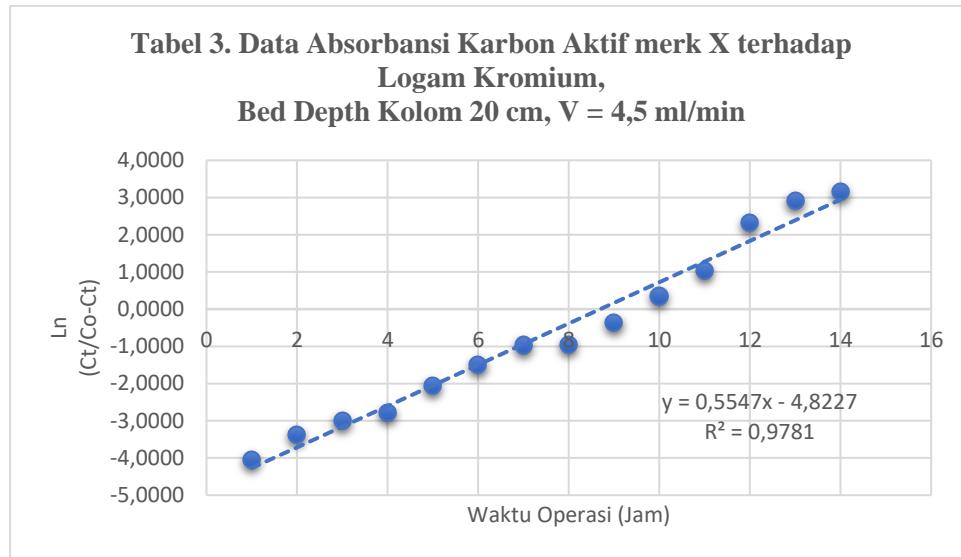
Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Ln (Ct/Co)

$$\begin{aligned}
 &= \ln \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal} - \text{Konsentrasi setelah kolom}} \\
 &= \ln \frac{0,346}{20 - 0,346} = -4,0396
 \end{aligned}$$

b.  $Ct/Co = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,346}{20} = 0,0173$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.



**Gambar 3.6** Grafik Tabel 3 Yoon-Nelson

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 3 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.6** Hasil Perhitungan Tabel 3

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KYN	$\tau$	$\tau$ Exp	$R^2$
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			jam <sup>-1</sup>	jam	jam	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KYN	$\tau$	$\tau_{Exp}$	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			jam <sup>-1</sup>	jam	jam	
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	0,5547	-4,8227	0,5547	8,6942	8,6446	0,9781

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Volume flowrate (Q) = 4,5 ml/min

b. Volume flowrate (Q) =  $\frac{4,5 \text{ ml}}{\text{jam}} \times 60}{1000} = 0,27 \text{ liter/jam}$

c. A kolom =  $\left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$

d. Linier flowrate =  $\frac{\text{Volumetric flowrate}}{A \text{ kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$

e.  $\tau = \frac{\text{Intersep}}{\text{KYN}} = \frac{-4,8227}{0,5547} = 8,6942 \text{ jam}$

f.  $\tau_{exp} = 8,6446 \text{ jam}$

Hasil analisis menunjukkan penerapan Model Yoon–Nelson pada proses biosorpsi logam Kromium (VI) (Cr(VI)) dengan konsentrasi awal 10 mg/L dan laju alir 4,5 mL/menit. Pengujian dilakukan pada tiga variasi kedalaman kolom, yaitu 10 cm (biru), 15 cm (merah), dan 20 cm (hijau). Pada grafik, sumbu y menggambarkan nilai  $\ln(Ct/(Co - Ct))$ , sedangkan sumbu x menunjukkan waktu pengamatan dalam satuan jam. Data hasil eksperimen memperlihatkan adanya tren linier positif pada setiap variasi kedalaman, yang sesuai dengan karakteristik Model Yoon–Nelson dalam memprediksi hubungan waktu terobosan (*breakthrough time*) dan penurunan efisiensi penyerapan terhadap waktu. Persamaan regresi linier yang diperoleh untuk masing-masing kedalaman kolom adalah:  $y = 0,3795x - 5,1387$  ( $R^2 = 0,9666$ ) untuk kedalaman 10 cm;  $y = 0,4405x - 4,9161$  ( $R^2 = 0,9706$ ) untuk kedalaman 15 cm; dan  $y = 0,5547x - 4,8227$  ( $R^2 = 0,9781$ ) untuk kedalaman 20 cm. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang tinggi, yaitu di atas 0,96, menunjukkan bahwa Model Yoon–Nelson mampu merepresentasikan data percobaan dengan sangat baik.

Hasil tersebut mengindikasikan bahwa semakin besar kedalaman kolom, maka kapasitas penyerapan terhadap ion Cr(VI) semakin meningkat karena waktu kontak antara larutan dan adsorben menjadi lebih lama. Model Yoon–Nelson juga terbukti efektif dalam menggambarkan perilaku kinetika penyerapan pada sistem

adsorpsi kontinu, di mana proses penurunan efisiensi penyerapan dapat diprediksi melalui parameter waktu terobosan ( $\tau$ ). Dengan demikian, model ini dapat dijadikan dasar untuk memperkirakan waktu optimum regenerasi kolom dan menentukan efisiensi operasi sistem biosorpsi logam berat seperti Kromium (VI).

### 3.3 Model Thomas

Model Thomas populer karena kemudahan aplikasinya dan kemampuannya memberikan estimasi kapasitas kolom yang berguna untuk desain awal. Model ini cocok dipakai ketika sistem tidak terlalu dipengaruhi dispersi aksial yang besar dan ketika data terobosan menunjukkan pola yang relatif simetris; oleh karena itu model Thomas kerap dipakai sebagai titik awal pemodelan dalam studi kolom di Indonesia. Keterbatasannya adalah asumsi-asumsi sederhananya, seperti mengabaikan beberapa mekanisme difusi sehingga untuk aplikasi industri yang kompleks perlu diverifikasi dengan metrik tambahan. Penelitian lapangan dan studi akademik di tanah air menunjukkan Thomas sering memberikan kecocokan yang baik pada rentang operasi laboratorium (Kardena & Syifa, 2022).

Berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 10 mg/liter..

**Tabel 3.1** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium,

Konsentrasi awal 10 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Konsentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co-Ct)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter		%		
1	1	10	0,1232	0,27	99%	4,3841	0,0123
2	2	10	0,2229	0,54	98%	3,7811	0,0223
3	3	10	0,3133	0,81	97%	3,4313	0,0313
4	4	10	0,3435	1,08	97%	3,3362	0,0344
5	5	10	0,2948	1,35	97%	3,4941	0,0295
6	6	10	0,3597	1,62	96%	3,2884	0,0360
7	7	10	0,4223	1,89	96%	3,1215	0,0422
8	8	10	0,4826	2,16	95%	2,9817	0,0483
9	9	10	1,3374	2,43	87%	1,8683	0,1337
10	10	10	2,0053	2,7	80%	1,3830	0,2005
11	11	10	3,4663	2,97	65%	0,6339	0,3466
12	12	10	3,1463	3,24	69%	0,7786	0,3146
13	13	10	3,2019	3,51	68%	0,7529	0,3202

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Kosentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co-Ct)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter		%		
14	14	10	5,1916	3,78	48%	-0,0767	0,5192
15	15	10	6,1934	4,05	38%	-0,4867	0,6193
16	16	10	6,9031	4,32	31%	-0,8016	0,6903
17	17	10	8,0997	4,59	19%	-1,4498	0,8100
18	18	10	8,5449	4,86	15%	-1,7703	0,8545
19	19	10	9,5189	5,13	5%	-2,9850	0,9519
20	20	10	9,6024	5,4	4%	-3,1843	0,9602
21	21	10	9,2545	5,67	7%	-2,5188	0,9255
<b>22</b>	<b>22</b>	<b>10</b>	<b>9,4911</b>	<b>5,94</b>	<b>5%</b>	-2,9259	0,9491

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

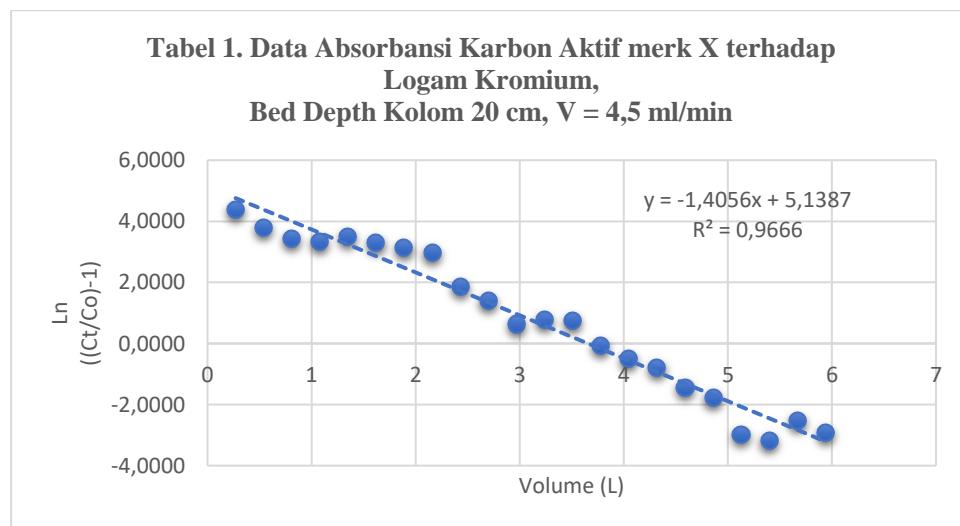
a.  $\ln((Ct/Co)-1))$

$$= \ln \left( \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal} - \text{Konsentrasi setelah kolom}} \right) - 1$$

$$= \ln \left( \frac{0,1232}{10 - 0,1232} \right) - 1 = 4,3841$$

b.  $Ct/Co = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,1232}{10} = 0,0123$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.



**Gambar 3.7 Grafik Tabel 1 Thomas**

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 1 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.2** Hasil Perhitungan Tabel 1

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KTH	qt	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			l/mg.jam	mg/g	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
15	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
16	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
17	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
18	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
19	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
20	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
21	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666
22	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	10	-1,4056	5,1387	0,0380	7,3411	0,9666

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Volume flowrate (Q) = 4,5 ml/min

b. Volume flowrate (Q) =  $\frac{4,5 \frac{ml}{jam} \times 60}{1000} = 0,27 \text{ liter/jam}$

c. A kolom =  $\left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$

d. Linier flowrate =  $\frac{\text{Volumetric flowrate}}{A \text{ kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$

e. KTH =  $\frac{\text{Slope} \times \text{Volume flowrate}}{\text{Co Cr}} = \frac{-1,4056 \times 0,27}{10} = 0,0380 \frac{L}{mg} \cdot jam$

f. qt =  $\frac{\text{Intersep} \times \text{Volume flowrate}}{\text{KTH} \times mg} = \frac{5,1387 \times 0,27}{0,0380 \times 4,98} = 7,3411 \text{ mg/g}$

Adapun berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 15 mg/liter.

**Tabel 3.3** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, konsentrasi awal 15 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Konsentrasi setelah Melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
1	1	15	0,26	0,27	98%	4,0376	0,0173
2	2	15	0,501	0,54	97%	3,3652	0,0334
3	3	15	0,517	0,81	97%	3,3327	0,0345
4	4	15	0,575	1,08	96%	3,2223	0,0383
5	5	15	0,71	1,35	95%	3,0021	0,0473
<b>6</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>0,882</b>	<b>1,62</b>	<b>94%</b>	<b>2,7730</b>	<b>0,0588</b>
7	7	15	1,699	1,89	89%	2,0578	0,1133
8	8	15	2,729	2,16	82%	1,5033	0,1819
9	9	15	4,12	2,43	73%	0,9711	0,2747
10	10	15	4,176	2,7	72%	0,9524	0,2784
11	11	15	6,18	2,97	59%	0,3557	0,4120
12	12	15	7,33	3,24	51%	0,0453	0,4887
13	13	15	8,796	3,51	41%	-0,3491	0,5864
14	14	15	11,064	3,78	26%	-1,0335	0,7376
15	15	15	13,662	4,05	9%	-2,3234	0,9108
16	16	15	14,218	4,32	5%	-2,9004	0,9479
17	17	15	14,056	4,59	6%	-2,7007	0,9371
<b>18</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>14,381</b>	<b>4,86</b>	<b>4%</b>	<b>-3,1456</b>	<b>0,9587</b>

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a.  $\ln((Ct/Co)-1))$

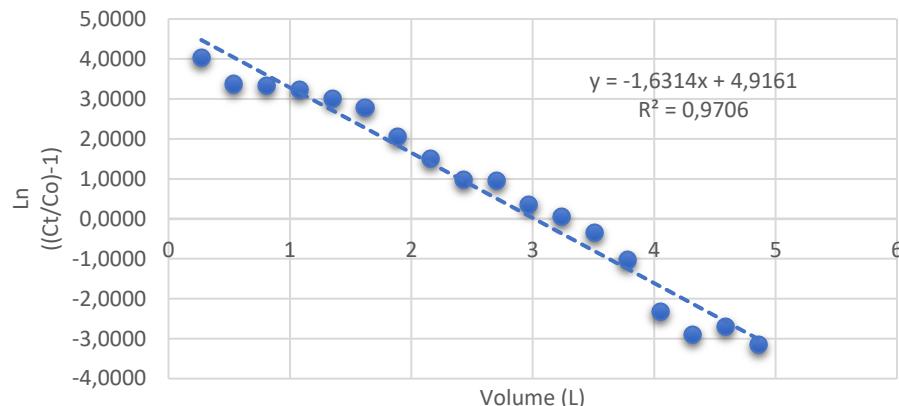
$$= \ln \left( \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal} - \text{Konsentrasi setelah kolom}} \right) - 1$$

$$= \ln \left( \frac{0,26}{15 - 0,26} \right) - 1 = 4,0376$$

$$\text{b. } Ct/Co = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,26}{15} = 0,0173$$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 2. Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, Bed Depth Kolom 20 cm, V = 4,5 ml/min**



**Gambar 3.8 Grafik Tabel 2 Thomas**

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 2 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.4 Hasil Perhitungan Tabel 2**

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KTH	qt	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			1/mg.jam	mg/g	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
15	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
16	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
17	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706
18	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	15	-1,6314	4,9161	0,0294	9,0766	0,9706

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Volume flowrate ( $Q$ ) = 4,5 ml/min

$$b. \text{ Volume flowrate } (Q) = \frac{4,5 \frac{\text{ml}}{\text{jam}} \times 60}{1000} = 0,27 \text{ liter/jam}$$

$$c. A \text{ kolom} = \left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 3^2 = 7,065 \text{ cm}^2$$

$$d. \text{ Linier flowrate} = \frac{\text{Volumetric flowrate}}{A \text{ kolom}} = \frac{270 \text{ ml/jam}}{7,065 \text{ cm}^2} = 38,217 \text{ cm/jam}$$

$$e. KTH = \frac{Slope \times Volume \text{ flowrate}}{Co Cr} = \frac{-1,6314 \times 0,27}{15} = 0,0294 \frac{L}{mg} \cdot \text{jam}$$

$$f. qt = \frac{Intersep \times Volume \text{ flowrate}}{KTH \times mg} = \frac{4,9161 \times 0,27}{0,0294 \times 4,98} = 9,9766 \text{ mg/g}$$

Adapun berikut merupakan data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium, dengan konsentrasi awal 20 mg/liter..

**Tabel 3.5** Data Absorbansi Karbon Aktif merk X terhadap Logam Kromium, konsentrasi awal 15 mg/liter

No	Waktu Operasi	Konsentrasi Awal	Konsentrasi setelah melewati Kolom	Volume Larutan Krom yang Melewati Kolom	Persentase Penyisihan	Ln (Ct/Co)	Ct/Co
perc	jam	mg/liter	mg/liter	liter	%		
1	1	20	0,346	0,27	98%	4,0396	0,0173
2	2	20	0,668	0,54	97%	3,3652	0,0334
<b>3</b>	<b>3</b>	<b>20</b>	<b>0,946</b>	<b>0,81</b>	<b>95%</b>	3,0028	0,0473
4	4	20	1,176	1,08	94%	2,7730	0,0588
5	5	20	2,265	1,35	89%	2,0580	0,1133
6	6	20	3,638	1,62	82%	1,5035	0,1819
7	7	20	5,493	1,89	73%	0,9712	0,2747
8	8	20	5,568	2,16	72%	0,9524	0,2784
9	9	20	8,24	2,43	59%	0,3557	0,4120
10	10	20	11,728	2,7	41%	-0,3491	0,5864
11	11	20	14,752	2,97	26%	-1,0335	0,7376
12	12	20	18,216	3,24	9%	-2,3234	0,9108
13	13	20	18,957	3,51	5%	-2,9001	0,9479
<b>14</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>19,175</b>	<b>3,78</b>	<b>4%</b>	-3,1460	0,9588

Warna Kuning = Titik Breakthrough

Warna Orange = Titik Exhausted (Aliran Limbah ke Kolom Dihentikan)

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran nilai Ln (Ct/Co) dan Ct/Co pada tabel data di atas yang diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

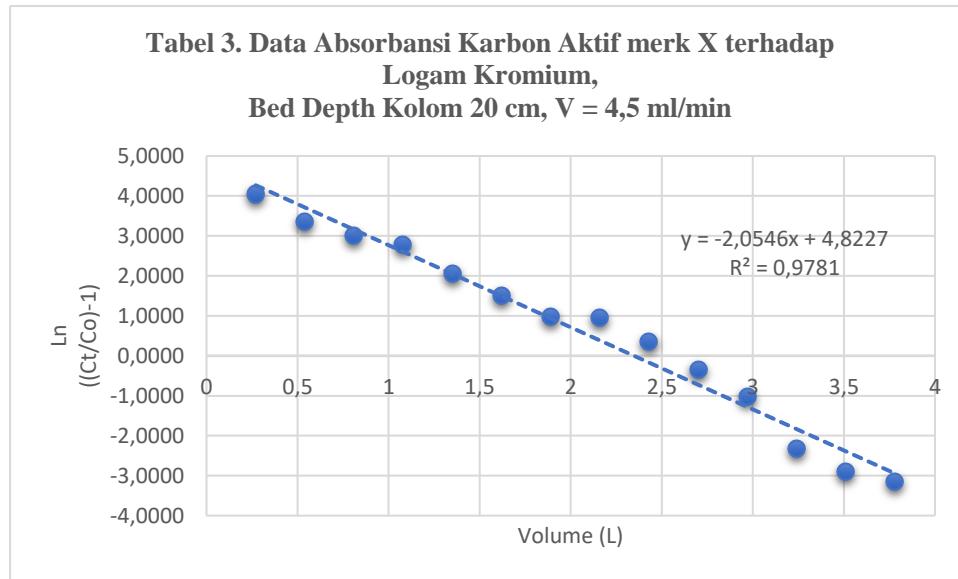
b. Ln (Ct/Co)

$$= \ln \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal} - \text{Konsentrasi setelah kolom}}$$

$$= \ln \frac{0,346}{20 - 0,346} = -4,0396$$

c.  $Ct/Co = \frac{\text{Konsentrasi setelah kolom}}{\text{Konsentrasi awal}} = \frac{0,346}{20} = 0,0173$

Berikut merupakan kurva grafik data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.



**Gambar 3.9** Grafik Tabel 3 Thomas

Adapun berikut ini merupakan hasil perhitungan pada tabel 3 data absorbansi karbon aktif merk X terhadap logam kromium dengan bed depth kolom 20 cm dan volume 4,5 ml/min.

**Tabel 3.6** Hasil Perhitungan Tabel 3

Waktu Operasi	Bed Height	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	Volumetric Flowrate (Q)	A Kolom	Linier Flowrate	Co Cr	Slope	Intersep	KTH	qt	R <sup>2</sup>
jam	cm	ml/min	ml/jam	liter/jam	cm <sup>2</sup>	cm/jam	mg/l			l/mg.jam	mg/g	
1	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
2	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
3	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
4	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
5	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
6	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
7	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
8	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
9	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
10	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
11	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
12	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
13	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781
14	20	4,5	270	0,27	7,065	38,217	20	-2,0546	4,8227	0,0277	9,4268	0,9781

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

a. Volume flowrate ( $Q$ ) = 4,5 ml/min

b. Volume flowrate ( $Q$ ) =  $\frac{4,5 \frac{ml}{jam} \times 60}{1000}$  = 0,27 liter/jam

c. A kolom =  $\left(\frac{1}{4}\right) \times 3,14 \times 3^2$  = 7,065 cm<sup>2</sup>

d. Linier flowrate =  $\frac{Volumetric\ flowrate}{A\ kolom}$  =  $\frac{270\ ml/jam}{7,065\ cm^2}$  = 38,217 cm/jam

e. KTH =  $\frac{Slope \times Volume\ flowrate}{Co\ Cr}$  =  $\frac{-2,0546}{20}$  = 0,277  $\frac{L}{mg} \cdot jam$

f. qt =  $\frac{Intersep \times Volume\ flowrate}{KTH \times mg}$  =  $\frac{4,8227 \times 0,27}{0,0277 \times 4,98}$  = 9,4268 mg/g

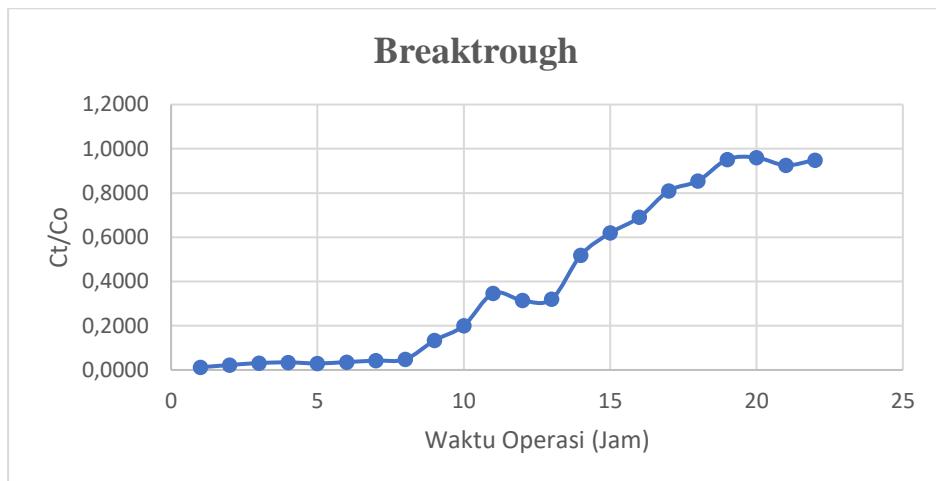
Hasil analisis memperlihatkan perbandingan Model Thomas pada proses biosorpsi logam Kromium (VI) (Cr(VI)) dengan konsentrasi awal 10 mg/L dan laju alir sebesar 4,5 mL/menit. Percobaan dilakukan pada tiga variasi kedalaman kolom, yaitu 10 cm, 15 cm, dan 20 cm. Pada grafik, sumbu y menunjukkan nilai ln(Co/Ct), sedangkan sumbu x menggambarkan volume efluen (L) yang dihasilkan. Data eksperimental pada ketiga variasi kedalaman kolom menunjukkan tren penurunan nilai ln(Co/Ct) seiring bertambahnya volume efluen, yang berarti konsentrasi efluen (Ct) semakin mendekati konsentrasi awal (Co). Hal ini menandakan bahwa efisiensi biosorpsi menurun secara bertahap seiring waktu operasi kolom berlangsung.

Persamaan regresi linear yang diperoleh dari masing-masing kedalaman kolom adalah:  $y = -1,4056x + 5,1387$  ( $R^2 = 0,9666$ ) untuk kedalaman 10 cm;  $y = -1,6314x + 4,9161$  ( $R^2 = 0,9706$ ) untuk kedalaman 15 cm; dan  $y = -2,0546x + 4,8227$  ( $R^2 = 0,9781$ ) untuk kedalaman 20 cm. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang tinggi, yaitu di atas 0,96, menunjukkan bahwa Model Thomas memiliki tingkat kesesuaian yang sangat baik terhadap data hasil percobaan. Artinya, model ini dapat menggambarkan hubungan antara volume efluen dan perubahan konsentrasi Cr(VI) secara akurat pada sistem adsorpsi kontinu. Berdasarkan hasil tersebut, semakin dalam kolom yang digunakan, semakin besar pula kapasitas penyerapan logam yang terjadi karena waktu kontak antara larutan dan adsorben menjadi lebih lama. Namun, pada saat yang sama, peningkatan volume efluen juga mempercepat kejemuhan adsorben, sehingga efisiensi biosorpsi akan menurun di tahap akhir operasi. Konstanta Thomas cenderung menurun seiring meningkatnya konsentrasi

awal logam dalam larutan, tetapi kapasitas adsorpsinya justru meningkat karena jumlah ion logam yang terserap menjadi lebih banyak.

### 3.4 Kurva Breakthrough dan Penyisihan

Adapun kurva atau grafik dari breakthrough yaitu terdapat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3.10** Kurva Breakthrough Konsentrasi 10 mg/L\

Berikut merupakan tabel yang membahas tentang penyisihan efisiensi pada soal di Tabel 1.

**Tabel 3.7** Penyisihan Efisiensi Tabel 1

Menghitung Penyisihan Efisiensi Tabel 1			
Luas Kurva (A total)	Waktu Kontak ke x Volume Larutan ke	45,63	mg.jam/liter
Luas Areal	Ct 1 ke * perbedaan jam/Co	1,57195	mg.jam/liter
A sorpsi	Luas Kurva - Luas Area	44,0581	mg.jam/liter
Wcr	A sorpsi * V	11,8957	mg.jam/liter
Ecr	Wcr/Co*V*jam ke*100%	33,8908%	%

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

- a. Luas kurva = Waktu operasi x Volume larutan setelah kolom  
=  $17 \times 4,59 = 45,63$  mg.jam/liter
- b. Luas areal = 1,57195 mg.jam/liter
- c. A sorpsi = Waktu kontak Volume larutan – luas area

$$= 45,63 - 1,57195 = 44,0581 \text{ mg.jam/liter}$$

d. Wcr

$$= A \text{ sorpsi} \times \text{Volume setelah kolom}$$

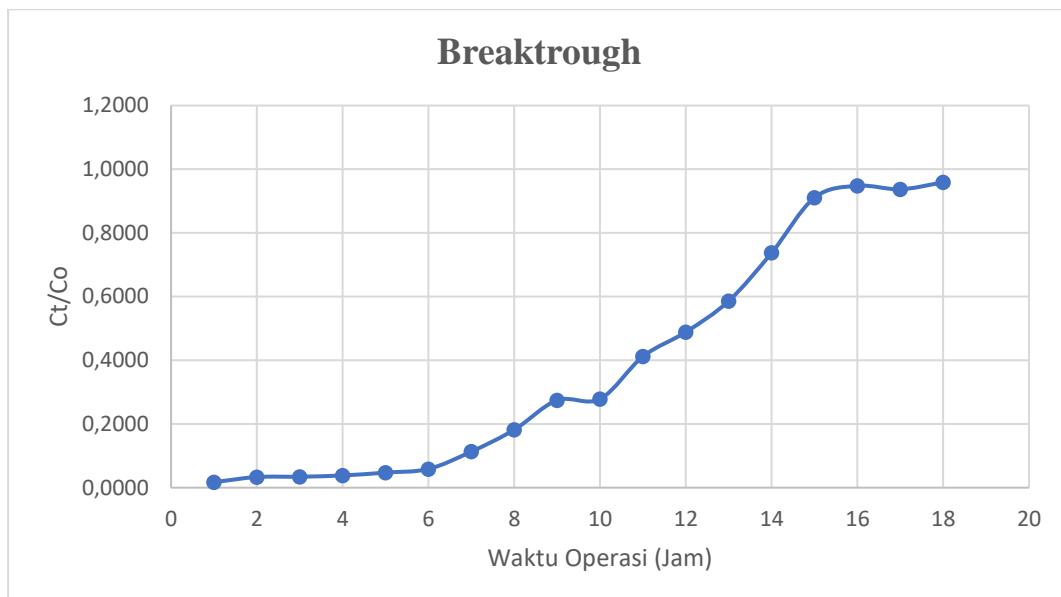
$$= 44,0581 \times 0,27 = 11,8957 \text{ mg.jam/liter}$$

e. E cr

$$= \frac{Wcr}{Konsentrasi awal \times Volume setelah kolom \times Waktu operasi}$$

$$= \frac{11,8957}{10 \times 0,1232 \times 0,1232 \times 0,27 \times 1} = 33,89 \%$$

Adapun kurva atau grafik dari breakthrough yaitu terdapat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3.11** Kurva Breakthrough Konsentrasi 15 mg/L\

Berikut merupakan tabel yang membahas tentang penyisihan efisiensi pada soal di Tabel 1.

**Tabel 3.7** Penyisihan Efisiensi Tabel 2

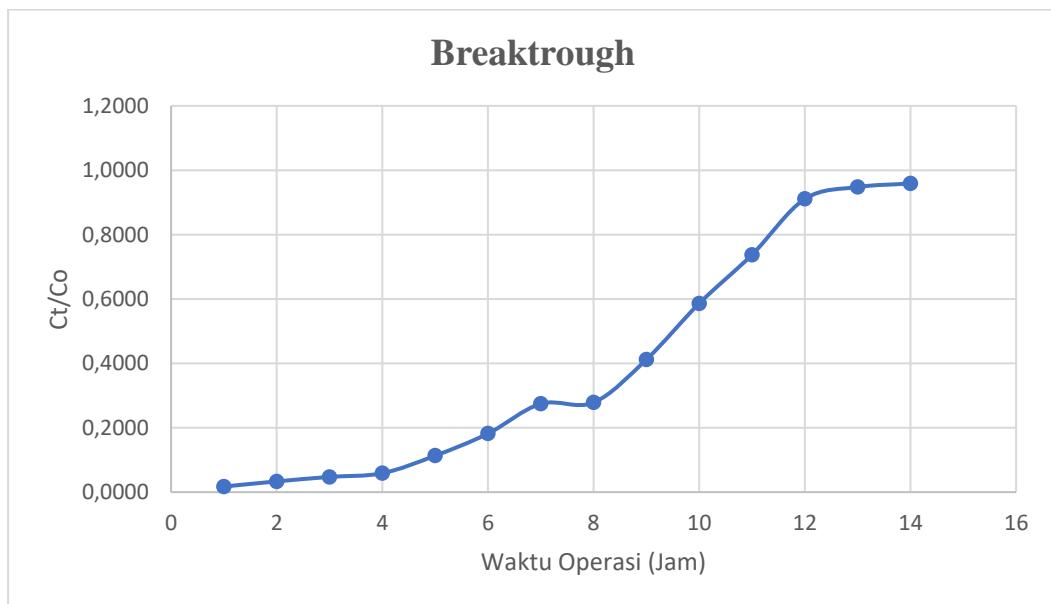
<b>Menghitung Penyisihan Efisiensi Tabel 2</b>			
Luas Kurva (A total)	Waktu Kontak ke x Volume Larutan ke	32,67	mg.jam/liter
Luas Areal	Ct 1 ke * perbedaan jam/Co	1,4899	mg.jam/liter
A sorpsi	Luas Kurva - Luas Area	31,1801	mg.jam/liter
Wcr	A sorpsi * V	8,41862	mg.jam/liter
Ecr	Wcr/Co*V*jam ke*100%	18,8970%	%

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

- a. Luas kurva = Waktu operasi x Volume larutan setelah kolom  
 $= 11 \times 2,97 = 32,67 \text{ mg.jam/liter}$   
 b. Luas areal = 1,4899 mg.jam/liter  
 c. A sorpsi = Waktu kontak Volume larutan – luas area  
 $= 32,67 - 1,4899 = 31,1801 \text{ mg.jam/liter}$   
 d. Wcr = A sorpsi x Volume setelah kolom  
 $= 31,1801 \times 0,27 = 8,41862 \text{ mg.jam/liter}$   
 e. E cr = 
$$\frac{W_{cr}}{\text{Konsentrasi awal} \times \text{Volume setelah kolom} \times \text{Waktu operasi}}$$
  
 $= \frac{8,41862}{15 \times 0,27 \times 1} = 18,897 \%$

Adapun kurva atau grafik dari breakthrough yaitu terdapat pada gambar dibawah ini.



**Gambar 3.12** Kurva Breakthrough Konsentrasi 20 mg/L

Berikut merupakan tabel yang membahas tentang penyisihan efisiensi pada soal di Tabel 1.

**Tabel 3.7** Penyisihan Efisiensi Tabel 3

Menghitung Penyisihan Efisiensi Tabel 2			
Luas Kurva (A total)	Waktu Kontak ke x Volume Larutan ke	17,28	mg.jam/liter
Luas Areal	Ct 1 ke * perbedaan jam/Co	1,0050	mg.jam/liter
A sorpsi	Luas Kurva - Luas Area	16,2750	mg.jam/liter

Menghitung Penyisihan Efisiensi Tabel 2			
Wcr	A sorpsi * V	4,39425	mg.jam/liter
Ecr	Wcr/Co*V*jam ke*100%	10,1719%	%

Sumber: Hasil Perhitungan, 2025

Berikut merupakan penjabaran dari tabel di atas. Sebagai contoh, pada baris pertama diperoleh melalui langkah-langkah sebagai berikut.

- a. Luas kurva = Waktu operasi x Volume larutan setelah kolom  
=  $11 \times 2,97 = 32,67 \text{ mg.jam/liter}$
- b. Luas areal =  $1,4899 \text{ mg.jam/liter}$
- c. A sorpsi = Waktu kontak Volume larutan – luas area  
=  $17,28 - 1,0050 = 16,2750 \text{ mg.jam/liter}$
- d. Wcr = A sorpsi x Volume setelah kolom  
=  $16,275 \times 0,27 = 8,41862 \text{ mg.jam/liter}$
- e. E cr = 
$$\frac{Wcr}{Konsentrasi awal \times Volume setelah kolom \times Waktu operasi}$$
$$= \frac{4,39425}{20 \times 0,27 \times 1} = 10,1719 \%$$

## **BAB IV**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **4.1 Kesimpulan**

1. Berdasarkan hasil analisis, hubungan antara waktu operasi sistem adsorpsi kontinu dengan efisiensi penyisihan logam Kromium (Cr) menunjukkan bahwa semakin lama waktu operasi, efisiensi penyerapan cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya jumlah situs aktif pada karbon aktif seiring berjalannya waktu, sehingga kemampuan adsorben dalam menjerap ion logam berkurang. Dengan demikian, waktu operasi yang lebih panjang berkorelasi dengan penurunan efisiensi biosorpsi akibat kejemuhan permukaan adsorben.
2. Variasi konsentrasi awal logam Kromium (Cr) berpengaruh signifikan terhadap kapasitas penyerapan karbon aktif. Semakin tinggi konsentrasi awal, kapasitas adsorpsi karbon aktif meningkat karena jumlah ion logam yang tersedia untuk diserap juga lebih besar. Namun, pada konsentrasi yang terlalu tinggi, proses penyerapan berlangsung lebih cepat sehingga adsorben lebih cepat jenuh dan efisiensi total penyerapan menurun.
3. Berdasarkan hasil pemodelan dan kurva terobosan (*breakthrough curve*), titik *breakthrough* dan *exhausted* berhasil ditentukan untuk masing-masing kedalaman kolom. Titik *breakthrough* menandai saat di mana efisiensi adsorpsi mulai menurun secara signifikan, sedangkan titik *exhausted* menunjukkan kondisi jenuh total adsorben. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kolom dengan kedalaman lebih besar memiliki waktu *breakthrough* yang lebih lama dan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi, sehingga performa kolom dalam menurunkan kadar Kromium (Cr) pada sistem kontinu dapat dikategorikan efektif.

#### **4.2 Saran**

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan variasi laju alir dan tinggi kolom yang lebih luas agar dapat memperoleh model adsorpsi kontinu yang lebih akurat dalam menggambarkan hubungan antara waktu operasi dan efisiensi penyisihan logam Kromium (Cr).

2. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut terhadap proses regenerasi karbon aktif, untuk mengetahui kemampuan adsorben digunakan kembali setelah mencapai kondisi jenuh. Hal ini penting guna meningkatkan efisiensi ekonomi dan keberlanjutan proses adsorpsi.
3. Disarankan untuk melakukan studi lanjutan dengan menggunakan jenis biomassa lokal lain sebagai bahan dasar karbon aktif, sehingga dapat ditemukan alternatif adsorben yang lebih ramah lingkungan, murah, dan memiliki kapasitas penyerapan yang tinggi terhadap logam berat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aprilianti, R. (2024). *Pengaruh variasi massa karbon aktif dan waktu kontak terhadap kemampuan kinetika adsorpsi karbon aktif*. Jurnal Riset Fisika Indonesia.
- Danarto, E., & Samun, M. (2023). *Pengaruh Aktivasi Kimia terhadap Karakteristik Karbon Aktif dari Limbah Biomassa Lokal*. Jurnal Kimia dan Lingkungan, 7(2), 45–53.
- Fitriyani, G. (2024). *Pemanfaatan Karbon Aktif Ampas Kopi untuk Penyerapan Cr(VI) pada Limbah Elektroplating*. Jurnal Teknik Lingkungan UNESA, 9(1), 12–18.
- Kardena, E., & Syifa Yusharani, M. (2022). PEMANFAATAN MIKROALGA AMOBIL SEBAGAI ADSORBEN PADA PENYISIHAN ZAT WARNA REACTIVE BLUE 4 (RB4) DAN REACTIVE RED 120 (RR120) DALAM LIMBAH CAIR TEKSTIL.
- Manurung, M., Ratnayani, O., & Ciawi, Y. (2025). Karbon dari Bahan Alam sebagai Adsorben Ramah Lingkungan: Potensi, Tantangan, dan Aplikasinya. *Nata Palemahan: Journal of Environmental Engineering Innovations*, 2(1), 38-48.
- Maryudi, M., Suryono, E., & Rachmawati, D. (2021). *Teknologi Pengolahan Limbah Industri Penyamak Kulit dengan Kandungan Kromium*. Jurnal Teknik Kimia & Lingkungan, 5(1), 89–98.
- Rahman, T., Muis, L., & Suryadri, H. (2022). Pengaruh Berat Unggu terhadap Efisiensi dan Kapasitas Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B dengan Sistem Kontinyu. *Jurnal Engineering*, 4(1), 32-38.
- Rohmah, N., Wulandari, F., & Kurniawan, A. (2023). *Analisis Efisiensi Adsorpsi Kolom Karbon Aktif terhadap Ion Logam Berat*. Jurnal Rekayasa Lingkungan, 6(2), 56–63.
- Subhan, R., Shidiqi, M. F., Saptati, N. H., & Ismuyanto, B. (2022). *Studi Model Adsorpsi Cr(VI) Menggunakan Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa pada Sistem Kolom dengan Variasi Laju Alir*. RBAET Journal, 6(2), 1–6.
- Wahyuni, L., Nugroho, T., & Widodo, A. (2023). *Pengaruh Gugus Fungsional Karbon Aktif terhadap Penyerapan Logam Berat Cr(VI)*. Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan, 10(2), 33–41.
- Widiyanti, S. E. (2021). *Beberapa Model Adsorpsi Dinamis Kolom Fixed-Bed*. Prosiding SNP2M 2021, 67–74.

- Wicaksono, D., Anjani, T., & Lestari, S. (2024). *Regenerasi Adsorben Karbon Aktif dalam Sistem Kolom untuk Pengolahan Limbah Cair*. Jurnal Teknologi Lingkungan Berkelanjutan, 11(1), 22–30.
- Yuliana, F., Pradana, G., & Mulyadi, R. (2022). *Optimasi Suhu Aktivasi terhadap Luas Permukaan Karbon Aktif dari Sekam Padi*. Jurnal Rekayasa Material dan Energi, 5(4), 88–96.