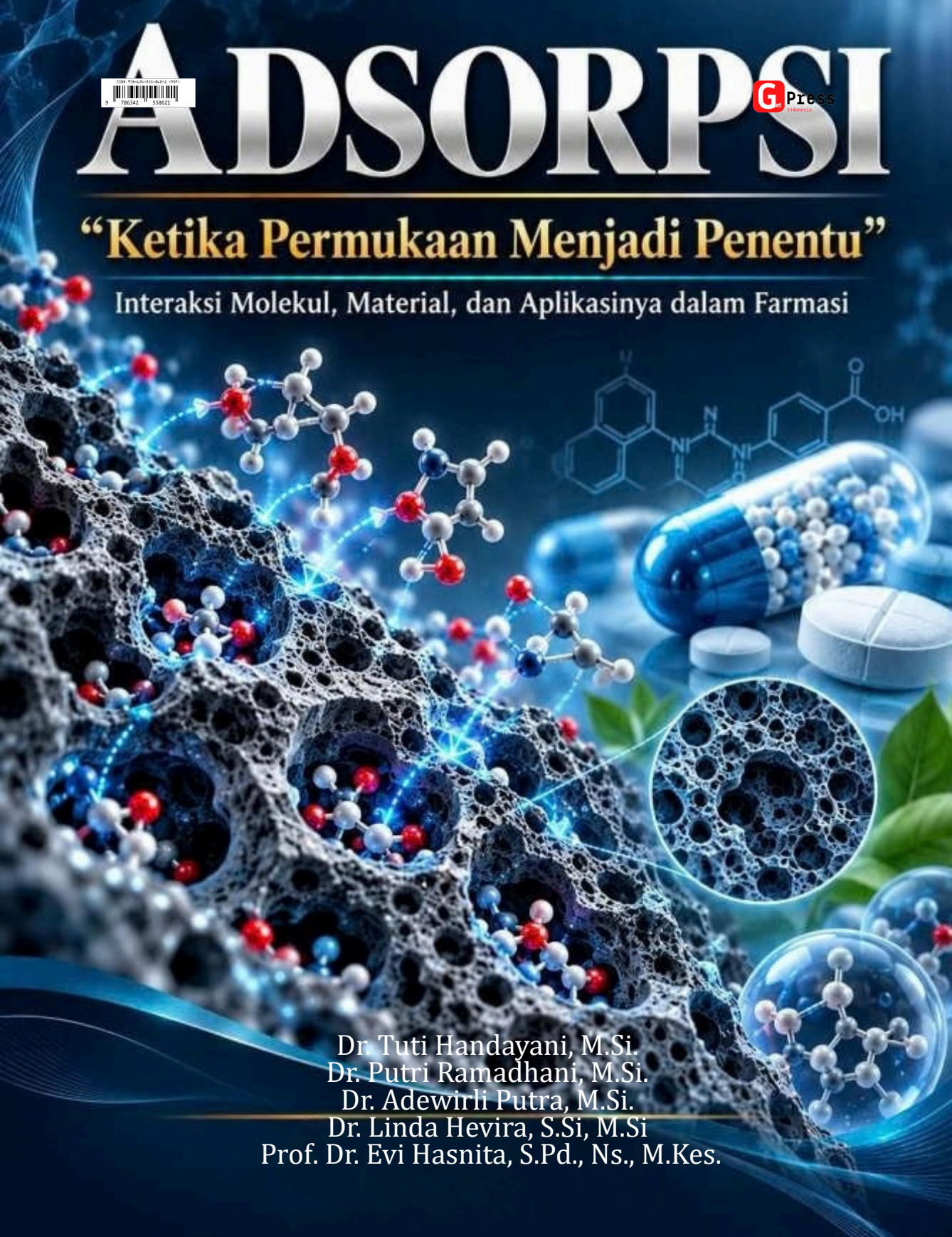
ADSORPSI

"Ketika Permukaan Menjadi Penentu"

Interaksi Molekul, Material, dan Aplikasinya dalam Farmasi



Dr. Tuti Handayani, M.Si.
Dr. Putri Ramadhani, M.Si.
Dr. Adewirli Putra, M.Si.
Dr. Linda Hevira, S.Si, M.Si
Prof. Dr. Evi Hasnita, S.Pd., Ns., M.Kes.

ADSORPSI
"Ketika Permukaan Menjadi Penentu"
Interaksi Molekul, Material, dan Aplikasinya dalam Farmasi

Penulis:

Dr. Tuti Handayani, M.Si.

Dr. Putri Ramadhani, M.Si.

Dr. Adewirli Putra, M.Si.

Dr. Linda Hevira, S.Si, M.Si

Prof. Dr. Evi Hasnita, S.Pd., Ns., M.Kes.

GET PRESS INDONESIA

ADSORPSI
"Ketika Permukaan Menjadi Penentu"
Interaksi Molekul, Material, dan Aplikasinya dalam Farmasi

Penulis :
Dr. Tuti Handayani, M.Si.
Dr. Putri Ramadhani, M.Si.
Dr. Adewirli Putra, M.Si.
Dr. Linda Hevira, S.Si, M.Si

Prof. Dr. Evi Hasnita, S.Pd., Ns., M.Kes.

ISBN: 978-634-255-862-1

Editor : Wiya Elsa Fitri, M.Si

Penyunting:

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka, S.Pd.

Penerbit : GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jl. Palarik RT 01 RW 06, Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah, Padang, Sumatera Barat

Website: www.getpress.co.id

Email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, November 2026

Hak cipta dilindngi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

PRAKATA

Puji syukur dipanjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku referensi akademik berjudul 'ADSORPSI: Ketika Permukaan Menjadi Penentu (Interaksi Molekul, Material, dan Aplikasinya dalam Farmasi)' ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai sumber rujukan komprehensif bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan praktisi di bidang ilmu farmasi, kimia, teknik lingkungan, dan sains material yang mendalami fenomena antarmuka padat-cair serta penerapannya dalam teknologi pengolahan sediaan dan lingkungan berkelanjutan.

Sistematika buku ini mencakup sepuluh bab yang saling berkesinambungan. Bab awal membahas fondasi teoretis interaksi molekuler, termodinamika antarmuka, kinetika difusi, dan kurva kesetimbangan isoterm. Bab pertengahan mengupas keanekaragaman material adsorben konvensional dan bioadsorben hayati ramah lingkungan. Bab lanjutan membedah secara aplikatif peranan adsorpsi dalam formulasi farmasi, sistem penghantaran obat amorf, dekontaminasi klinis racun, serta remediasi residu limbah farmasi berbahaya. Dua bab pamungkas dirancang khusus

untuk memandu metodologi penelitian modern, menyajikan panduan regresi nonlinier, validasi statistik bebas bias, serta strategi regenerasi dan ekonomi sirkular.

Setiap bab disusun dengan pendekatan pembelajaran berpusat pada mahasiswa, dilengkapi dengan capaian pembelajaran, uraian konseptual mendalam, tabel perbandingan, gambar ilustratif beresolusi tinggi, studi kasus terapan, dan soal latihan numerik. Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang tulus kepada seluruh rekan sejawat akademisi dan penerbit atas segala dukungan dan masukan berharga. Penulis menyadari buku ini masih memiliki ruang penyempurnaan, sehingga saran konstruktif dari pembaca sangat kami harapkan.

Padang, September 2026

Tim Penulis

DAFTAR ISI

		Halaman
PRAK ATA		v
DAFTAR ISI		vi
DAFTAR GAMBAR		vii
DAFTAR TABEL		viii
BAB 1	**KONSEP DASAR ADSORPSI**	**1**
	1.1 Definisi Adsorpsi dan Perbedaannya dengan Absorpsi	2
	1.2 Fisisorpsi dan Kemisorpsi	4
	1.3 Parameter Kuantitatif Dasar dalam Adsorpsi	7
	1.4 Sejarah Singkat dan Perkembangan Studi Adsorpsi	9
	1.5 Ruang Lingkup Aplikasi Adsorpsi dalam Farmasi dan Industri	11
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 1	13
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 1	15
BAB 2	**MEKANISME DAN TERMODINAMIKA ADSORPSI**	**17**
	2.1 Gaya-Gaya Antarmolekul yang Berperan dalam Adsorpsi	18
	2.2 Antarmuka Padat-Cair dan Titik Muatan Nol (pHpzc)	21
	2.3 Penurunan Parameter Termodinamika Adsorpsi	23
	2.4 Pengaruh Suhu dan Interpretasi Sifat Termodinamika	26
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 2	28
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 2	30
BAB 3	**ISOTERM ADSORPSI**	**32**
	3.1 Konsep Dasar Isoterm Adsorpsi	33
	3.2 Model Isoterm Langmuir	34
	3.3 Model Isoterm Freundlich	37

		Halaman
	3.4 Model Isoterm Alternatif: Temkin, Dubinin-Radushkevich, dan BET	39
	3.5 Kriteria Pemilihan Model Isoterm yang Sesuai	42
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 3	43
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 3	45
BAB 4	**KINETIKA ADSORPSI**	**47**
	4.1 Konsep Dasar Kinetika Adsorpsi	48
	4.2 Model Kinetika Pseudo-Orde Satu (Lagergren)	49
	4.3 Model Kinetika Pseudo-Orde Dua (Ho-McKay)	51
	4.4 Model Difusi Intrapartikel (Weber-Morris)	53
	4.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Laju Adsorpsi	55
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 4	57
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 4	59
BAB 5	**ADSORBEN KONVENSIONAL: KARBON AKTIF, ZEOLIT, DAN SILIKA GEL**	**61**
	5.1 Karbon Aktif: Struktur, Karakteristik, dan Metode Aktivasi	62
	5.2 Zeolit: Struktur Kristal dan Fungsi Molecular Sieve	65
	5.3 Silika Gel dan Resin Penukar Ion	67
	5.4 Pendekatan Modifikasi dan Fungsionalisasi Adsorben	69
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 5	71
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 5	73
BAB 6	**BIOADSORPSI DAN BIOSORBEN**	**75**
	6.1 Konsep Dasar Bioadsorpsi (Biosorpsi)	76
	6.2 Mekanisme Biosorpsi oleh Komponen Dinding Sel Biomassa	78
	6.3 Klasifikasi dan Sumber Keanekaragaman Biosorben	80
	6.4 Keunggulan, Keterbatasan, dan Modifikasi Kimia Biosorben	82
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 6	84
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 6	86
BAB 7	**APLIKASI ADSORPSI DALAM BIDANG FARMASI**	**88**

		Halaman
	7.1 Karbon Aktif Sebagai Antidotum Intoksikasi Keracunan Akut	89
	7.2 Adsorpsi dalam Formulasi dan Stabilitas Sediaan Obat	92
	7.3 Kromatografi Adsorpsi dalam Analisis dan Pemurnian Senyawa Obat	94
	7.4 Adsorpsi dalam Sistem Penghantaran Obat (Drug Delivery Systems)	95
	7.5 Biosorben sebagai Material Farmasi Berkelanjutan	98
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 7	99
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 7	101
BAB 8	**RANCANGAN PENELITIAN DAN PENGOLAHAN LIMBAH FARMASI DI LINGKUNGAN**	**103**
	8.1 Permasalahan Residu Limbah Farmasi sebagai Kontaminan Baru di Lingkungan	104
	8.2 Keunggulan Adsorpsi dalam Remediation Limbah Cair Farmasi	106
	8.3 Protokol Sistematis 6 Tahapan Perancangan Penelitian Adsorpsi	107
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 8	111
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 8	113
BAB 9	**ANALISIS DATA DAN INTERPRETASI HASIL ADSORPSI**	**115**
	9.1 Perhitungan Kapasitas dan Efisiensi Adsorpsi	116
	9.2 Analisis dan Interpretasi Isoterm Adsorpsi	119
	9.3 Analisis Kinetika Adsorpsi dan Mekanisme Perpindahan Massa	122
	9.4 Analisis Statistik dan Validasi Model Adsorpsi	124
	9.5 Penyajikan Data Ilmiah dan Pencegahan Overinterpretasi	127
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 9	129
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 9	131

		Halaman
BAB 10	**REGENERASI, REUSABILITY, DAN KEBERLANJUTAN ADSORBEN**	**133**
	10.1 Konsep Regenerasi dan Desorpsi Adsorben	134
	10.2 Reusability dan Stabilitas Siklik Adsorben	137
	10.3 Pemulihan Sumber Daya dan Hierarki Pengelolaan Adsorben Bekas	139
	10.4 Green Adsorption dan Integrasi Circular Economy	141
	Studi Kasus / Aplikasi Klinis Bab 10	143
	Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi Bab 10	145
DAFTAR PUSTAKA		147
GLOSARIUM LENGKAP STANDAR BUKU REFERENSI		154
INDEKS SUBJEK DAN PENGARANG		159
BIODATA PENULIS		163

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Diagram Skematis Perbedaan Fenomena Permukaan pada Adsorpsi dan Fenomena Ruah pada Absorpsi	3
Gambar 1.2	Profil Kurva Energi Potensial Interaksi pada Fisisorpsi dan Kemisorpsi sebagai Fungsi Jarak	6
Gambar 2.1	Plot Linier Van 't Hoff untuk Penentuan Entalpi dan Entropi Adsorpsi pada Sistem Endotermik dan Eksotermik	25
Gambar 3.1	Klasifikasi Bentuk Kurva Isoterm Kesetimbangan Berdasarkan Variasi Nilai Parameter Pemisahan RL	37
Gambar 3.2	Perbandingan Profil Kurva Isoterm Kesetimbangan Langmuir dan Freundlich	39
Gambar 4.1	Profil Kurva Kinetika Adsorpsi Model Pseudo-Orde Satu dan Pseudo-Orde Dua terhadap Data Eksperimen	53
Gambar 4.2	Plot Multi-Linier Model Difusi Intrapartikel Weber-Morris Menggambarkan Tiga Tahapan Perpindahan Massa	55
Gambar 5.1	Diagram Klasifikasi Porositas Material Adsorben Berdasarkan Rekomendasi IUPAC	66
Gambar 6.1	Skema Empat Mekanisme Utama Biosorpsi Kontaminan pada Dinding Sel Biomassa	80
Gambar 7.1	Skema Pemuatan Molekul Obat Sukar Larut ke dalam Saluran Silika Mesopori untuk Peningkatan Disolusi	97

Gambar 8.1	Diagram Alir Protokol Baku 6 Tahapan Perancangan Penelitian Adsorpsi Skala Laboratorium	109
Gambar 9.1	(a) Kurva Fitting Regresi Nonlinier Langmuir, dan (b) Plot Distribusi Residual Bebas Bias	121
Gambar 10.1	Perbandingan Retensi Kapasitas Adsorpsi antar Siklus Penggunaan Ulang pada Adsorben Komposit dan Mentah	138
Gambar 10.2	Hierarki Sirkular Pengelolaan Material Adsorben Jenuh (Spent Adsorbent)	140

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Perbandingan Komprehensif Karakteristik Fisisorpsi dan Kemisorpsi	5
Tabel 2.1	Interpretasi Parameter Termodinamika Adsorpsi	25
Tabel 3.1	Perbandingan Model-Model Isoterm Adsorpsi	41
Tabel 4.1	Perbandingan Karakteristik Model-Model Kinetika Adsorpsi	56
Tabel 5.1	Perbandingan Karakteristik Fisikokimia Adsorben Konvensional	70
Tabel 6.1	Keanekaragaman Jenis Biosorben dan Target Adsorbatnya	83
Tabel 7.1	Ringkasan Aplikasi Adsorpsi dan Bioadsorpsi dalam Bidang Farmasi	97
Tabel 8.1	Ringkasan Parameter Uji dalam Perancangan Penelitian Adsorpsi	110
Tabel 10.1	Perbandingan Metode-Metode Regenerasi Adsorben	136
Tabel G.1	Glosarium Lengkap Standar Buku Referensi Akademik	154

BAB 1
KONSEP DASAR ADSORPSI

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 1 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

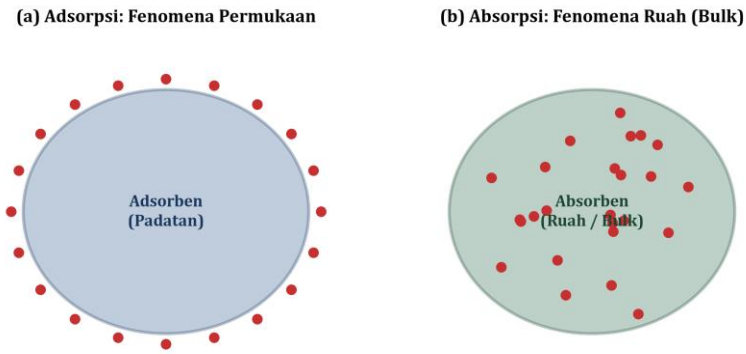
1. Menguraikan definisi adsorpsi secara komprehensif serta membedakannya secara tegas dengan fenomena absorpsi dan sorpsi.
2. Menganalisis perbedaan mendasar antara fisisorpsi dan kemisorpsi ditinjau dari jenis interaksi, termodinamika energi, sifat reversibilitas, dan spesifisitas permukaan.
3. Menghitung parameter kuantitatif dasar adsorpsi yang mencakup kapasitas adsorpsi kesetimbangan, kapasitas adsorpsi pada waktu tertentu, dan efisiensi penyisihan adsorbat.
4. Menjelaskan sejarah perkembangan studi adsorpsi serta memetakan ruang lingkup aplikasinya dalam teknologi pemisahan industri dan praktik kefarmasian modern.

1.1 Definisi Adsorpsi dan Perbedaannya dengan Absorpsi

Adsorpsi merupakan fenomena fisikokimia yang terjadi pada lapisan batas antarmuka ketika molekul, atom, atau ion dari fase fluida mengalami penempelan atau pengayaan konsentrasi pada permukaan suatu fase padat atau cair (Dabrowski, 2001; Ruthven, 1984). Bidang antarmuka memiliki karakteristik energi bebas yang berbeda dari bagian dalam materi ruah. Ketidakseimbangan gaya tarik antarmolekul pada permukaan menyebabkan permukaan material memiliki afinitas residual yang mampu menarik spesies asing dari lingkungannya (Atkins & de Paula, 2018). Material yang menyediakan permukaan aktif untuk proses penempelan dinamakan adsorben, sedangkan molekul atau ion yang terakumulasi pada permukaan tersebut dinamakan adsorbat (Dabrowski, 2001).

Perbedaan mendasar antara adsorpsi dan absorpsi terletak pada lokasi spasial terjadinya akumulasi spesies yang ditangkap dalam sistem (Atkins & de Paula, 2018; Putra et al., 2022). Adsorpsi sepenuhnya merupakan fenomena permukaan murni, di mana molekul adsorbat terdistribusi hanya pada bidang kontak terluar dan dinding pori material tanpa menembus kisi-kisi internal kristal atau matriks molekuler fase penyerap. Absorpsi merupakan

fenomena ruah di mana zat terlarut atau gas berdifusi masuk dan terlarut secara merata ke seluruh volume material penyerap, sebagaimana air yang terserap ke dalam spons atau gas karbon dioksida yang larut ke dalam larutan alkali (Ruthven, 1984).



Gambar 1.1 Diagram Skematis Perbedaan Fenomena Permukaan pada Adsorpsi dan Fenomena Ruah pada Absorpsi.

Istilah sorpsi diperkenalkan dalam literatur kimia fisika untuk mendeskripsikan kondisi di mana adsorpsi dan absorpsi berlangsung secara simultan sehingga pemisahan mekanisme keduanya secara eksperimental menjadi sulit dibedakan (Aksu, 2005; Worch, 2021). Desorpsi adalah proses kebalikan dari adsorpsi, yaitu pelepasan kembali molekul adsorbat dari permukaan adsorben menuju fase fluida bebas. Proses desorpsi memegang peranan krusial dalam regenerasi material adsorben agar dapat digunakan

kembali secara berkelanjutan dalam siklus pengolahan berulang (Baskar et al., 2022).

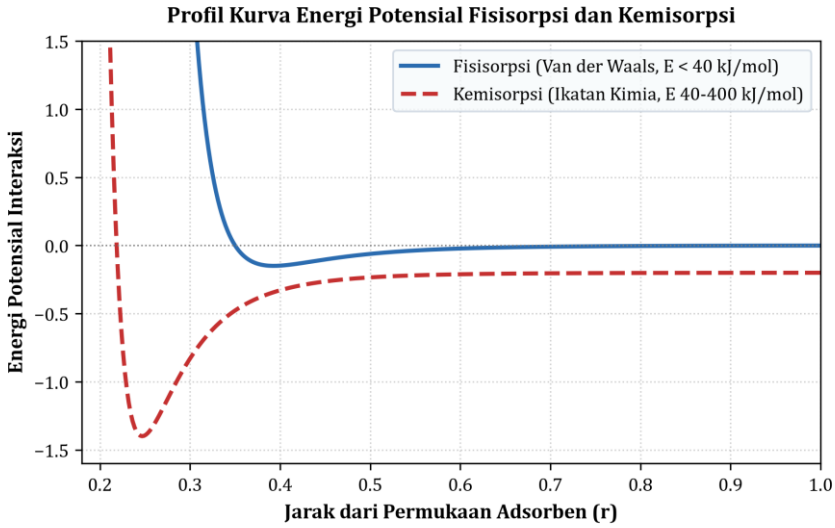
1.2 Fisisorpsi dan Kemisorpsi

Klasifikasi proses adsorpsi secara fundamental dibagi menjadi dua kategori utama berdasarkan kekuatan dan jenis interaksi yang terbentuk antara adsorbat dan permukaan adsorben, yaitu adsorpsi fisik (fisisorpsi) dan adsorpsi kimia (kemisorpsi) (Dabrowski, 2001; Rouquerol et al., 2014). Pemahaman mengenai distingsi kedua mekanisme ini sangat menentukan interpretasi kinetika, kebutuhan energi regenerasi, serta selektivitas material dalam aplikasi analitik maupun formulasi farmasi (Worch, 2021).

Fisisorpsi dikendalikan oleh gaya interaksi antarmolekul non-kovalen yang relatif lemah, terutama gaya van der Waals, gaya dispersi London, serta interaksi dipol-dipol (Atkins & de Paula, 2018; Brunauer et al., 1938). Fisisorpsi tidak melibatkan pembagian atau perpindahan elektron antara adsorbat dan permukaan adsorben sehingga struktur elektronik molekul adsorbat tetap utuh. Panas adsorpsi pada fisisorpsi bernilai rendah, umumnya berada pada rentang kurang dari 40 kJ/mol. Proses ini bersifat non-spesifik karena setiap gas atau zat terlarut dapat menempel pada permukaan padatan asalkan kondisi suhu dan tekanan

mendukung. Fisisorpsi bersifat sangat reversibel dan dapat membentuk lapisan ganda hingga banyak lapisan pada permukaan padatan berpori (Rouquerol et al., 2014).

Kemisorpsi melibatkan interaksi kimiawi yang kuat berupa pembentukan ikatan kovalen, ikatan koordinasi, atau transfer muatan ionik antara molekul adsorbat dan gugus fungsi spesifik pada permukaan adsorben (Langmuir, 1918; Thommes et al., 2015). Entalpi adsorpsi pada kemisorpsi bernilai tinggi, umumnya berkisar antara 40 hingga 400 kJ/mol, sebanding dengan energi ikatan kimia sejati. Kemisorpsi berlangsung dengan tingkat selektivitas dan spesifisitas yang sangat tinggi karena memerlukan kecocokan konfigurasi orbital dan reaktivitas kimia antara adsorbat dan situs aktif permukaan (Atkins & de Paula, 2018). Kemisorpsi dibatasi secara energetika hanya pada pembentukan satu lapisan tunggal karena pembentukan ikatan kimia langsung tidak dapat melampaui bidang permukaan atomik terluar (Langmuir, 1918).



Gambar 1.2 Profil Kurva Energi Potensial Interaksi pada Fisisorpsi dan Kemisorpsi sebagai Fungsi Jarak dari Permukaan.

Tabel 1.1 merangkum perbandingan karakteristik mendasar antara fisisorpsi dan kemisorpsi untuk memudahkan pemahaman komparatif bagi peneliti dan praktisi (Rouquerol et al., 2014; Worch, 2021).

Tabel 1.1 Perbandingan Komprehensif Karakteristik Fisisorpsi dan Kemisorpsi.

Parameter Pembeda	Fisisorpsi (Adsorpsi Fisik)	Kemisorpsi (Adsorpsi Kimia)
Jenis Gaya / Ikatan	Gaya van der Waals dan dispersi London	Ikatan kimia kovalen, ionik, atau koordinasi
Panas Adsorpsi (Delta H)	Rendah (< 40 kJ/mol)	Tinggi (40 - 400 kJ/mol)
Sifat Reversibilitas	Sangat reversibel melalui penurunan tekanan/suhu	Umumnya ireversibel atau membutuhkan eluen kuat

Ketebalan Lapisan	Dapat membentuk banyak lapisan (multilayer)	Terbatas hanya pada satu lapisan tunggal (monolayer)
Tingkat Spesifisitas	Non-spesifik terhadap jenis adsorbat	Sangat spesifik pada situs aktif tertentu
Pengaruh Suhu	Kapasitas serap menurun drastis saat suhu naik	Laju meningkat pada suhu tinggi (memerlukan energi aktivasi)

1.3 Parameter Kuantitatif Dasar dalam Adsorpsi

Evaluasi kinerja adsorben dalam sistem eksperimental memerlukan parameter kuantitatif standar yang diturunkan dari neraca massa analitik (Do, 1998; Putra et al., 2022). Parameter utama yang paling luas dilaporkan adalah kapasitas adsorpsi kesetimbangan, kapasitas adsorpsi pada waktu tertentu, dan persentase efisiensi penyisihan.

Kapasitas adsorpsi kesetimbangan (qe) mendeskripsikan massa adsorbat yang berhasil terakumulasi per satuan massa adsorben pada kondisi di mana laju adsorpsi telah setara dengan laju desorpsi (Ho & McKay, 1999; Worch, 2021). Persamaan neraca massa kesetimbangan dirumuskan sebagai berikut:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

Simbol qe menyatakan kapasitas adsorpsi kesetimbangan (mg/g), C0 adalah konsentrasi awal adsorbat dalam fase larutan (mg/L), Ce adalah konsentrasi sisa adsorbat pada saat kesetimbangan tercapai (mg/L), V adalah volume total larutan uji (L), dan m adalah massa kering adsorben yang digunakan (g) (Handayani et al., 2024; Putra et al., 2022).

Kapasitas adsorpsi pada sembarang waktu t (qt) digunakan dalam pemodelan kinetika untuk memantau perjalanan transfer massa menuju kesetimbangan (Lagergren, 1898; Plazinski et al., 2020), yang dihitung dengan rumus:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}$$

Simbol Ct mendefinisikan konsentrasi adsorbat yang tersisa dalam larutan pada waktu kontak t menit (Ho & McKay, 1999; Putra et al., 2024).

Efisiensi penyisihan (%R) menunjukkan fraksi persentase adsorbat yang berhasil dihilangkan dari larutan terhadap konsentrasi mula-mula (Aksu, 2005; Handayani et al., 2023), dirumuskan melalui hubungan:

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%$$

Interpretasi nilai efisiensi penyisihan harus selalu dikorelasikan secara cermat dengan massa adsorben yang diaplikasikan (Tran et al., 2017; Putra et al., 2026). Peningkatan dosis adsorben sering kali menaikkan nilai persentase penyisihan karena bertambahnya jumlah situs aktif total dalam wadah, tetapi nilai kapasitas adsorpsi per gram adsorben (qe) justru dapat mengalami penurunan akibat kejenuhan situs yang tidak merata atau terjadinya aglomerasi partikel.

1.4 Sejarah Singkat dan Perkembangan Studi Adsorpsi

Pemanfaatan fenomena adsorpsi telah berlangsung selama ribuan tahun dalam peradaban manusia kuno (Cooney, 1995; Dabrowski, 2001). Catatan sejarah di Mesir Kuno menunjukkan penggunaan arang kayu untuk mengobati gangguan pencernaan dan menyaring air minum sejak tahun 1500 sebelum Masehi. Penggunaan arang kayu untuk menghilangkan bau busuk pada luka gangren tercatat dalam tulisan Hippocrates pada masa Yunani Kuno.

Eksplorasi ilmiah fenomena adsorpsi modern dimulai pada akhir abad ke-18 melalui eksperimen terukur (Dabrowski, 2001; Marsh & Reinoso, 2006). Carl Wilhelm Scheele pada tahun 1773 mendokumentasikan kapasitas arang dalam mengikat berbagai jenis gas. Lowitz pada tahun

1785 menemukan kemampuan arang kayu dalam menghilangkan warna larutan gula asam tartrat, yang meletakkan dasar aplikasi adsorben dalam industri pemurnian pangan dan farmasi.

Perkembangan teoretis mencapai tonggak penting pada awal abad ke-20 dengan hadirnya formulasi matematis baku (Brunauer et al., 1938; Freundlich, 1909; Langmuir, 1918). Herbert Freundlich pada tahun 1909 merumuskan persamaan isoterm empiris pertama untuk sistem cairan. Irving Langmuir pada tahun 1918 mempublikasikan teori kinetika adsorpsi gas pada permukaan padatan berbasis pembentukan lapisan monolayer homogen, yang mengantarkannya meraih Hadiah Nobel Kimia pada tahun 1932. Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, dan Edward Teller pada tahun 1938 memperluas teori Langmuir menjadi model adsorpsi multilayer (teori BET) yang hingga saat ini menjadi standar internasional penentuan luas permukaan spesifik material.

Era penelitian kontemporer sejak dekade 1990-an bergeser pada rekayasa nanomaterial berpori teratur, kerangka logam organik, zeolit sintetis berpori mikro, silika mesopori fungsional, dan pemanfaatan biomassa hayati sebagai biosorben terbarukan guna mendukung prinsip

ekonomi sirkular dan kimia hijau (Crini & Lichtfouse, 2019; Nasra et al., 2025; Putra et al., 2025).

1.5 Ruang Lingkup Aplikasi Adsorpsi dalam Farmasi dan Industri

Aplikasi proses adsorpsi mencakup sektor yang sangat luas, mulai dari remediasi lingkungan hingga teknologi canggih manufaktur sediaan obat modern (Allen et al., 2021; Volesky, 2003). Aplikasi utama dalam praktik kefarmasian dan industri dapat dikelompokkan ke dalam beberapa ranah strategis:

1. Farmasi Klinis dan Toksikologi: Karbon aktif medis dosis tunggal maupun berulang diaplikasikan sebagai lini pertama dekontaminasi saluran pencernaan pada pasien intoksikasi oral akut untuk mengikat toksin sebelum diserap ke dalam sirkulasi darah sistemik (Cooney, 1995; Neuvonen & Elonen, 1988).
2. Teknologi Formulasi Farmasi: Silika koloidal berpori mikro digunakan sebagai glidan serbuk guna memperbaiki fluiditas massa granul dan kompresibilitas tablet, sekaligus melindungi zat aktif higroskopis dari hidrolisis (Allen et al., 2021).
3. Sistem Penghantaran Obat Terkontrol: Nanopartikel silika mesopori dan polimer fungsional digunakan sebagai

pembawa molekul obat hidrofobik untuk mempertahankan bentuk amorf obat, mencegah rekristalisasi, dan meningkatkan bioavailabilitas obat kelas II dan IV Biopharmaceutics Classification System (Charnay et al., 2004; Vallet-Regi et al., 2001).

4. Pemurnian dan Analisis Kimia Obat: Kromatografi adsorpsi cair padat, kromatografi lapis tipis, dan kromatografi kolom preparatif memanfaatkan perbedaan afinitas adsorpsi senyawa terhadap fase diam silika atau alumina untuk pemisahan dan isolasi bahan aktif fitofarmaka (Dabrowski, 2001; Ruthven, 1984).
5. Remediasi Lingkungan Fasilitas Kesehatan: Unit adsorpsi berbasis karbon aktif dan biosorben digunakan untuk mengolah limbah cair rumah sakit dan industri farmasi guna mengeliminasi residu antibiotik, analgesik, dan zat warna diagnostik sebelum dibuang ke badan air umum (Baskar et al., 2022; Putra et al., 2025).

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Aplikasi Klinis Karbon Aktif sebagai Tatalaksana Kedaruratan Keracunan Obat Oral di Rumah Sakit:

Seorang pasien dewasa dibawa ke Instalasi Gawat Darurat suatu rumah sakit rujukan setelah menelan 20 tablet parasetamol dosis 500 mg dalam upaya intoksikasi

diri, sekitar 45 menit sebelum kedatangan. Tim medis memutuskan pemberian karbon aktif teraktivasi dosis tunggal sebanyak 50 gram yang disuspensikan dalam 200 mL air melalui sonde lambung nasogastrik.

Mekanisme kerja utama suspensi karbon aktif adalah menyediakan luas permukaan kontak yang sangat masif, mencapai 1000 meter persegi per gram, dengan struktur pori mikro dan meso yang melimpah. Molekul parasetamol yang masih berada di lumen lambung dan usus halus terjerap ke dalam permukaan karbon aktif melalui interaksi fisisorpsi van der Waals dan interaksi ikatan hidrogen. Penjerapan ini membentuk kompleks parasetamol-karbon aktif yang stabil dan tidak dapat diserap oleh mukosa vili usus halus. Kompleks tersebut kemudian dikeluarkan secara aman dari tubuh melalui saluran cerna bersama feses. Evaluasi kadar parasetamol serum darah serial menunjukkan bahwa pemberian karbon aktif pada jam pertama paparan berhasil menekan bioavailabilitas racun hingga lebih dari 60%, sehingga mencegah risiko nekrosis hepatoselular akut pada pasien tersebut.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara adsorpsi dan absorpsi menggunakan analogi fenomena fisika dan berikan contoh konkret penerapannya dalam kehidupan sehari-hari.
2. Uraikan lima parameter kunci yang membedakan fisisorpsi dan kemisorpsi ditinjau dari kekuatan ikatan, entalpi interaksi, ketebalan lapisan molekuler, spesifisitas, dan reversibilitas.
3. Suatu uji laboratorium menggunakan 0,25 gram adsorben karbon aktif untuk mengolah 150 mL larutan parasetamol dengan konsentrasi mula-mula 200 mg/L. Setelah proses pengocokan mencapai kesetimbangan sempurna, analisis spektrofotometri UV-Vis menunjukkan konsentrasi parasetamol sisa dalam larutan adalah sebesar 35 mg/L. Hitunglah: (a) Kapasitas adsorpsi kesetimbangan (qe) dalam mg/g, dan (b) Persentase efisiensi penyisihan (%R) parasetamol dari larutan tersebut.
4. Mengapa pada penelitian adsorpsi, peningkatan massa adsorben sering kali meningkatkan nilai persentase penyisihan (%R) namun justru menurunkan nilai kapasitas adsorpsi per satuan massa (qe)? Jelaskan fenomena tersebut secara ilmiah.

5. Jelaskan mekanisme kerja karbon aktif dosis tunggal dalam tatalaksana klinis keracunan oral akut di instalasi gawat darurat.

BAB 2
MEKANISME DAN TERMODINAMIKA ADSORPSI

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 2 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menguraikan berbagai jenis gaya antarmolekul yang mengendalikan interaksi penjerapan pada antarmuka padat-cair.
2. Menjelaskan struktur antarmuka padat-cair, pembentukan lapisan ganda listrik, dan pengaruh titik muatan nol (pHpzc) terhadap selektivitas adsorpsi.
3. Menurunkan parameter termodinamika adsorpsi standar (Delta G, Delta H, dan Delta S) menggunakan persamaan kesetimbangan dan persamaan linier Van 't Hoff.
4. Mengevaluasi pengaruh suhu terhadap spontanitas dan kestabilan proses adsorpsi serta mengidentifikasi perbedaan karakter proses endotermik dan eksotermik.

2.1 Gaya-Gaya Antarmolekul yang Berperan dalam Adsorpsi

Mekanisme penempelan spesies adsorbat pada permukaan adsorben dikendalikan oleh serangkaian interaksi fisik dan kimia yang bekerja secara terpadu (Atkins & de Paula, 2018; Dabrowski, 2001). Kekuatan interaksi menentukan afinitas, kapasitas retensi, dan kemudahan desorpsi pada tahap regenerasi. Jenis-jenis gaya antarmolekul yang paling sering beroperasi dalam sistem adsorpsi fase cair mencakup:

1. Gaya Van der Waals dan Gaya Dispersi London: Interaksi elektrostatik lemah yang timbul akibat fluktuasi sesaat distribusi kerapatan elektron yang menghasilkan dipol terinduksi. Gaya ini beroperasi pada seluruh material berpori karbon dan menjadi penggerak utama fisisorpsi molekul organik non-polar (Marsh & Reinoso, 2006; Ruthven, 1984).
2. Interaksi Elektrostatik: Tarik-menarik atau tolak-menolak antara permukaan adsorben yang bermuatan listrik dengan spesies adsorbat terionisasi. Kekuatan interaksi elektrostatik sangat sensitif terhadap pH larutan karena pH menentukan derajat protonasi gugus fungsi permukaan adsorben dan derajat ionisasi molekul adsorbat (Putra et al., 2022; Tran et al., 2017).

3. Ikatan Hidrogen: Interaksi dipol khusus antara atom hidrogen yang terikat pada atom sangat elektronegatif dengan pasangan elektron bebas pada atom elektronegatif lain. Ikatan hidrogen berperan dominan dalam adsorpsi senyawa antibiotik dan biomolekul pada material yang kaya gugus hidroksil atau karboksil (Allen et al., 2021; Handayani et al., 2023).
4. Interaksi Pertukaran Ion: Pergantian stokiometris antara kation atau anion yang terikat lemah pada kerangka matriks adsorben dengan ion logam berat atau molekul obat kationik dari larutan (Putra & Fitri, 2016; Worch, 2021).
5. Kompleksasi Permukaan dan Pengkelatan: Pembentukan ikatan koordinasi antara ion logam transisi dengan ligan donor elektron yang terdapat pada gugus fungsi permukaan seperti gugus amina, tiol, atau fosfat (Fomina & Gadd, 2014; Nasra et al., 2025).
6. Interaksi Pi-Pi Stacking: Interaksi non-kovalen antara awan elektron orbital pi dari cincin aromatik adsorbat dengan permukaan bidang basal grafena atau karbon aktif yang kaya ikatan terkonjugasi (Handayani et al., 2024; Putra et al., 2025).

2.2 Antarmuka Padat-Cair dan Titik Muatan Nol (pHpzc)

Sistem adsorpsi larutan selalu melibatkan bidang antarmuka padat-cair yang memiliki sifat kelistrikan permukaan dinamis (Atkins & de Paula, 2018; Worch, 2021). Ketika adsorben padat dicelupkan ke dalam medium air, gugus fungsi permukaan mengalami proses ionisasi atau protonasi bergantung pada konsentrasi ion hidrogen. Pembagian muatan ini memicu pembentukan lapisan ganda listrik yang diterangkan melalui model Helmholtz, Gouy-Chapman, dan Stern. Lapisan dalam tersusun atas ion-ion lawan yang terikat kuat pada permukaan, sedangkan lapisan difus memanjang ke fase ruah cairan dengan kerapatan ion yang menurun secara eksponensial.

Karakteristik elektrokimia antarmuka padat-cair ditentukan oleh titik muatan nol atau point of zero charge (pHpzc) (Putra et al., 2022; Tran et al., 2017). Parameter pHpzc didefinisikan sebagai nilai pH larutan di mana kerapatan muatan listrik total netto pada permukaan adsorben bernilai nol. Hubungan antara nilai pH kerja terhadap pHpzc memiliki makna praktis yang sangat vital dalam memprediksi efektivitas adsorpsi:

1. Kondisi pH < pHpzc: Permukaan adsorben mengalami protonasi berlebih oleh ion hidronium sehingga permukaan

bermuatan netto positif. Kondisi ini sangat menguntungkan untuk adsorpsi adsorbat bermuatan negatif, seperti zat warna asam atau residu obat golongan antiinflamasi non-steroid dalam bentuk terionisasi (Handayani et al., 2023; Handayani et al., 2026).

2. Kondisi pH > pHpzc: Permukaan adsorben mengalami deprotonasi melepaskan ion hidrogen sehingga permukaan bermuatan netto negatif. Kondisi ini secara elektrostatik menarik spesies bermuatan positif, seperti kation logam berat beracun atau zat warna kationik (Fitri et al., 2021; Putra et al., 2024).

2.3 Penurunan Parameter Termodinamika Adsorpsi

Studi termodinamika adsorpsi memberikan landasan ilmiah fundamental untuk memahami kelayakan spontanitas proses, mekanisme fisikokimia yang mendasari, dan perubahan keteraturan sistem pada tingkat molekuler (Anastopoulos & Kyzas, 2016; Lima et al., 2019). Parameter termodinamika yang dievaluasi meliputi perubahan energi bebas Gibbs standar (Delta G), perubahan entalpi standar (Delta H), dan perubahan entropi standar (Delta S).

Energi bebas Gibbs standar dihitung melalui relasi termodinamika klasik (Atkins & de Paula, 2018; Chen et al., 2021):

$$\Delta G^\circ = -RT\ln K_d$$

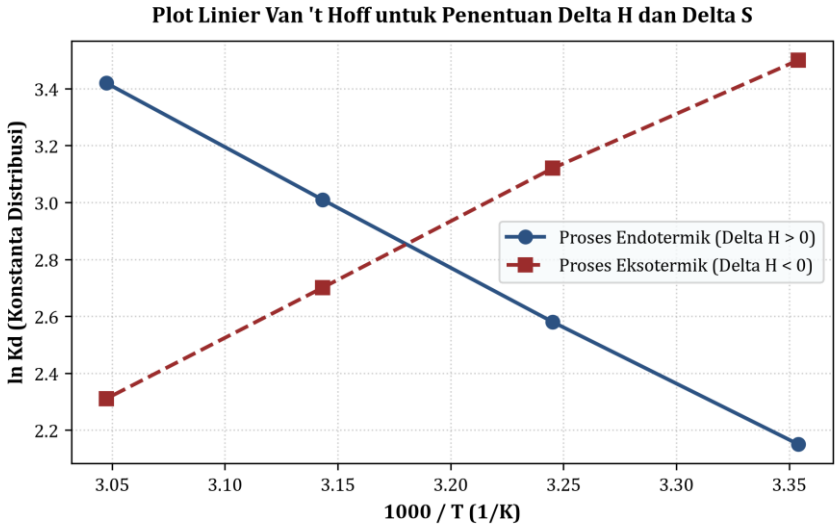
Simbol R menyatakan konstanta gas ideal (8,314 J/mol K), T adalah suhu mutlak sistem dalam satuan Kelvin (K), dan Kd merupakan konstanta distribusi kesetimbangan termodinamika tak berdimensi (Lima et al., 2021; Liu, 2009).

Hubungan mendasar antara energi bebas Gibbs dengan entalpi dan entropi dinyatakan melalui persamaan fundamental (Atkins & de Paula, 2018):

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$$

Penggabungan kedua persamaan di atas menghasilkan persamaan linier Van 't Hoff yang digunakan untuk menentukan nilai entalpi dan entropi secara simultan melalui variasi suhu pengujian (Handayani et al., 2024; Tran et al., 2017):

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT}$$



Gambar 2.1 Plot Linier Van 't Hoff untuk Penentuan Entalpi dan Entropi Adsorpsi pada Sistem Endotermik dan Eksotermik.

Analisis kemiringan dan perpotongan sumbu pada grafik hubungan antara ln Kd terhadap 1/T memberikan nilai parameter termodinamika sistem (Anastopoulos & Kyzas, 2016; Chen et al., 2021). Kemiringan garis merepresentasikan nilai -Delta H / R, sedangkan perpotongan garis pada sumbu vertikal merepresentasikan nilai Delta S / R.

2.4 Pengaruh Suhu dan Interpretasi Sifat Termodinamika

Suhu larutan memberikan dampak langsung terhadap energi kinetik molekul adsorbat, viskositas pelarut, dan mobilitas difusi melintasi lapisan batas cairan (Do, 1998; Worch, 2021). Evaluasi tanda dan besaran nilai parameter

termodinamika memberikan informasi mekanisme yang sangat spesifik:

1. Nilai Delta G Negatif: Mengindikasikan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara spontan dan layak secara termodinamika tanpa memerlukan input kerja dari luar sistem (Handayani et al., 2024; Lima et al., 2019).

2. Nilai Delta H Positif (Endotermik): Menunjukkan bahwa proses adsorpsi membutuhkan penyerapan kalor dari lingkungan. Peningkatan suhu sistem akan menggeser kesetimbangan ke arah penjerapan sehingga kapasitas adsorpsi meningkat pada suhu lebih tinggi, sebagaimana dibuktikan pada penjerapan zat warna metilen biru pada biomassa limbah jagung (Handayani et al., 2024; Putra et al., 2022).

3. Nilai Delta H Negatif (Eksotermik): Menunjukkan bahwa proses adsorpsi melepaskan kalor ke lingkungan. Peningkatan suhu justru menurunkan kapasitas kesetimbangan adsorpsi karena energi termal yang tinggi memicu molekul adsorbat terlepas kembali ke fase larutan (Atkins & de Paula, 2018; Ruthven, 1984).

4. Nilai Delta S Positif: Menggambarkan peningkatan ketidakteraturan atau keacakan pada bidang kontak antarmuka padat-cair selama proses adsorpsi, dipicu oleh

desolvasi molekul air pelarut yang sebelumnya terorganisasi rapi di sekitar ion adsorbat (Anastopoulos & Kyzas, 2016; Putra et al., 2026).

Tabel 2.1 menyajikan panduan komprehensif interpretasi fisikokimia dari kombinasi tanda parameter termodinamika adsorpsi untuk membedah karakter proses (Lima et al., 2021; Tran et al., 2017).

Tabel 2.1 Interpretasi Parameter Termodinamika Adsorpsi.

Delta G	Delta H	Delta S	Karakter Proses	Interpretasi Mekanisme dan Pengaruh Suhu
Negatif	Positif	Positif	Spontan, Endotermik	Afinitas meningkat pada suhu tinggi; didorong oleh peningkatan entropi antarmuka.
Negatif	Negatif	Positif	Spontan pada semua T	Sangat disukai secara energetika; entalpi dan entropi mendukung kelayakan proses.

Negatif	Negatif	Negatif	Spontan pada T rendah	Proses eksotermik murni (fisisorpsi); kapasitas adsorpsi menurun drastis saat suhu dinaikkan.
Positif	Positif	Negatif	Tidak Spontan	Proses tidak dapat berlangsung secara mandiri pada kondisi suhu yang diuji.

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Evaluasi Termodinamika Adsorpsi Doksisiklin pada Material Komposit Kitosan Berbasis Limbah:

Suatu penelitian kefarmasian mengevaluasi penjerapan residu antibiotik doksisiklin dari air limbah menggunakan komposit kitosan-magnetit pada rentang suhu 298 K, 308 K, dan 318 K. Data eksperimen menghasilkan nilai Kd yang meningkat seiring kenaikan suhu, yaitu 12,8 pada 298 K; 18,4 pada 308 K; dan 26,1 pada 318 K.

Perhitungan linier Van 't Hoff menghasilkan nilai Delta H standar sebesar +28,4 kJ/mol dan Delta S standar sebesar +115,2 J/mol K. Nilai Delta G standar pada ketiga suhu

berturut-turut bernilai -6,31 kJ/mol (298 K); -7,46 kJ/mol (308 K); dan -8,62 kJ/mol (318 K). Nilai Delta G yang semakin negatif mengonfirmasi peningkatan spontanitas adsorpsi pada suhu yang lebih hangat. Besaran Delta H di bawah 40 kJ/mol mengindikasikan bahwa interaksi utama masih didominasi oleh fisisorpsi elektrostatik dan ikatan hidrogen, sedangkan nilai Delta S yang bernilai positif kuat membuktikan bahwa proses penempelan doksisiklin melepaskan banyak molekul air terhidrasi dari permukaan komposit ke fase larutan, sehingga meningkatkan entropi derajat kebebasan pelarut secara signifikan.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Suatu adsorben biosorben berbasis serbuk sabut kelapa memiliki nilai pHpzc sebesar 5,4. Jelaskan bagaimana performa adsorpsi biosorben tersebut terhadap zat warna kationik metilen biru pada kondisi pH larutan 3,0 dan pada kondisi pH larutan 8,0.
2. Sebutkan dan jelaskan empat jenis interaksi antarmolekul yang dapat terjadi saat molekul obat antibiotik berikatan dengan permukaan karbon aktif teraktivasi.

3. Suatu eksperimen adsorpsi zat warna menghasilkan data konstanta distribusi Kd sebesar 8,5 pada suhu 298 K dan sebesar 14,2 pada suhu 318 K. Dengan mengasumsikan nilai R = 8,314 J/mol K, hitunglah: (a) Nilai perubahan entalpi standar (Delta H) dalam kJ/mol, (b) Nilai perubahan entropi standar (Delta S) dalam J/mol K, dan (c) Nilai perubahan energi bebas Gibbs standar (Delta G) pada suhu 298 K. Tentukan apakah proses tersebut berlangsung secara endotermik atau eksotermik serta spontan atau tidak spontan.
4. Mengapa pada banyak penelitian biosorpsi ion logam berat oleh biomassa kering, nilai perubahan entropi standar (Delta S) sering kali dilaporkan bernilai positif kuat? Jelaskan fenomena molekuler yang mendasarinya.
5. Jelaskan kelemahan konseptual yang sering muncul dalam publikasi ilmiah ketika peneliti menghitung parameter termodinamika adsorpsi menggunakan konstanta kesetimbangan yang memiliki satuan konsentrasi.

BAB 3
ISOTERM ADSORPSI

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 3 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menguraikan konsep fundamental kesetimbangan adsorpsi dan kurva isoterm dalam sistem fasa padat-cair.
2. Menganalisis landasan teoretis model isoterm Langmuir, menurunkan bentuk liniernya, serta menghitung faktor pemisahan tak berdimensi (RL).
3. Mengevaluasi penerapan model empiris isoterm Freundlich untuk menggambarkan penjerapan pada permukaan heterogen dan multilayer.
4. Membandingkan model isoterm alternatif (Temkin, Dubinin-Radushkevich, dan BET) serta memilih model matematis yang paling representatif berdasarkan kriteria goodness-of-fit.

3.1 Konsep Dasar Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi merupakan representasi grafis dan matematis yang menggambarkan hubungan kesetimbangan

antara jumlah massa adsorbat yang terakumulasi pada permukaan adsorben (qe) terhadap konsentrasi adsorbat yang tersisa dalam larutan (Ce) pada suhu konstan (Dabrowski, 2001; Foo & Hameed, 2010). Kurva isoterm menyediakan parameter fisikokimia mendasar mengenai kapasitas retensi teoritis maksimum material, intensitas daya tarik afinitas permukaan, tingkat homogenitas situs pengikatan, dan mekanisme pelapisan molekuler.

Kesetimbangan adsorpsi tercapai ketika laju penempelan molekul adsorbat dari fase ruah cairan ke permukaan padatan telah persis menyamai laju pelepasan molekul adsorbat kembali ke larutan (Al-Ghouti & Da'ana, 2020; Worch, 2021). Data isoterm diperoleh secara eksperimental melalui serangkaian pengujian sistem batch dengan memvariasikan konsentrasi awal larutan pada volume, massa adsorben, pH, dan suhu yang dijaga tetap hingga kondisi tunak tercapai.

3.2 Model Isoterm Langmuir

Model isoterm Langmuir dipublikasikan pertama kali oleh Irving Langmuir pada tahun 1918 berdasarkan pendekatan kinetika adsorpsi gas pada permukaan padatan murni (Langmuir, 1918). Model ini didasarkan pada empat asumsi fisikokimia fundamental:

1. Permukaan adsorben bersifat homogen sempurna, di mana semua situs pengikatan memiliki tingkat energi adsorpsi yang identik (Langmuir, 1918; Ruthven, 1984).
2. Adsorpsi berlangsung secara terlokalisasi, artinya setiap situs aktif hanya mampu mengakomodasi tepat satu molekul adsorbat membentuk lapisan monolayer tunggal (Langmuir, 1918).
3. Tidak terjadi interaksi lateral atau tolak-menolak antar molekul adsorbat yang bertetangga pada permukaan padatan (Langmuir, 1918).
4. Transmisi adsorpsi mencapai batas saturasi maksimum ketika seluruh situs aktif permukaan telah terisi penuh oleh adsorbat (Langmuir, 1918).

Persamaan nonlinier asli isoterm Langmuir dirumuskan sebagai berikut (Langmuir, 1918):

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Simbol qm menyatakan kapasitas adsorpsi monolayer maksimum teoritis (mg/g) dan KL adalah konstanta afinitas Langmuir yang merefleksikan kekuatan ikatan antara adsorbat dan adsorben (L/mg) (Foo & Hameed, 2010; Handayani et al., 2024).

Bentuk linier klasik persamaan Langmuir yang paling luas diaplikasikan untuk penentuan parameter adalah (Langmuir, 1918; Foo & Hameed, 2010):

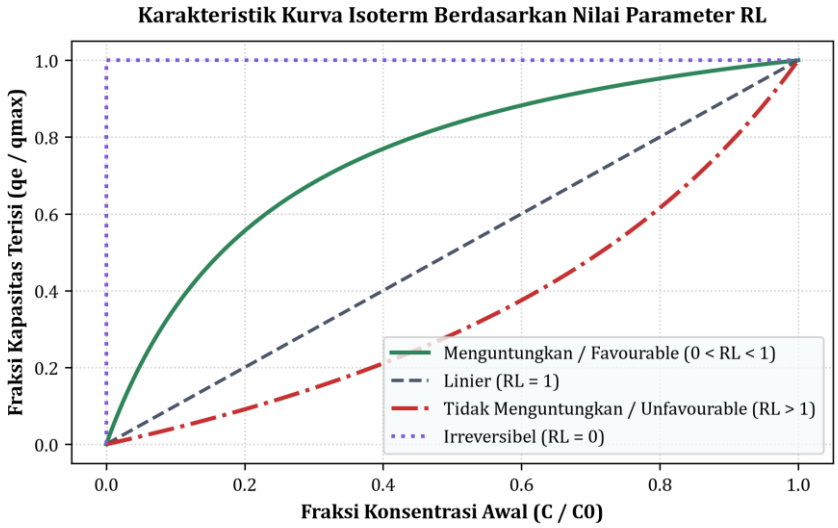
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m}$$

Karakteristik penting model Langmuir dievaluasi melalui parameter kesetimbangan tak berdimensi yang dinamakan faktor pemisahan atau parameter Hall (RL) (Al-Ghouti & Da'ana, 2020; Putra et al., 2026):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

Nilai RL mengindikasikan sifat kelayakan proses adsorpsi sistem pengujian:

1. Nilai RL = 0 mengindikasikan proses adsorpsi bersifat ireversibel sempurna (Foo & Hameed, 2010).
2. Nilai rentang 0 < RL < 1 mengindikasikan proses adsorpsi bersifat menguntungkan atau favourable (Handayani et al., 2023; Putra et al., 2026).
3. Nilai RL = 1 mengindikasikan isoterm bersifat linier murni (Foo & Hameed, 2010).
4. Nilai RL > 1 mengindikasikan proses adsorpsi tidak menguntungkan atau unfavourable (Al-Ghouti & Da'ana, 2020).



Gambar 3.1 Klasifikasi Bentuk Kurva Isoterm Kesetimbangan Berdasarkan Variasi Nilai Parameter Pemisahan RL Langmuir.

3.3 Model Isoterm Freundlich

Model isoterm Freundlich dikembangkan secara empiris oleh Herbert Freundlich pada tahun 1909 untuk mendeskripsikan fenomena penjerapan pada material dengan permukaan berenergi heterogen (Freundlich, 1909; Ayawei et al., 2017). Berbeda dengan model Langmuir, model Freundlich tidak mengasumsikan energi pengikatan yang seragam dan memungkinkan pembentukan banyak lapisan adsorbat.

Persamaan nonlinier isoterm Freundlich dinyatakan sebagai (Freundlich, 1909):

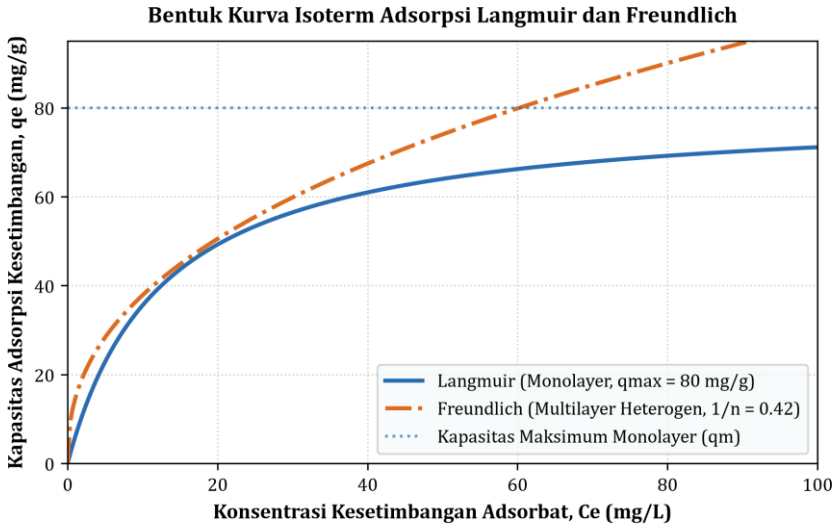
$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

Simbol KF merepresentasikan koefisien kapasitas adsorpsi Freundlich, sedangkan 1/n adalah parameter intensitas adsorpsi atau derajat heterogenitas permukaan (Freundlich, 1909; Handayani et al., 2024).

Transformasi bentuk logaritmik linier dari model Freundlich dirumuskan sebagai berikut (Ayawei et al., 2017; Freundlich, 1909):

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n}\log C_e$$

Nilai parameter 1/n memberikan interpretasi struktural mengenai afinitas sistem (Al-Ghouti & Da'ana, 2020; Putra et al., 2026). Nilai 1/n yang berada di antara 0,1 dan 1,0 mengindikasikan proses adsorpsi berlangsung secara sangat menguntungkan dengan situs aktif yang mudah diakses. Nilai 1/n yang mendekati nol mencerminkan heterogenitas permukaan yang sangat tinggi, sedangkan nilai 1/n lebih besar dari 1 menandakan kondisi interaksi kooperatif yang tidak menguntungkan.



Gambar 3.2 Perbandingan Profil Kurva Isoterm Kesetimbangan Langmuir (Mencapai Plateu Saturasi) dan Freundlich (Multilayer Terus Meningkat).

3.4 Model Isoterm Alternatif: Temkin, Dubinin-Radushkevich, dan BET

Pengembangan teori adsorpsi menghasilkan model lanjutan untuk mengakomodasi karakteristik sistem yang lebih kompleks (Ayawei et al., 2017; Foo & Hameed, 2010):

1. Model Isoterm Temkin: Model ini memperhitungkan efek interaksi tidak langsung antar molekul adsorbat. Temkin mengasumsikan bahwa kalor adsorpsi seluruh molekul dalam lapisan menurun secara linier terhadap pertambahan tutupan permukaan akibat interaksi tolak-menolak (Temkin & Pyzhev, 1940). Persamaan Temkin dinyatakan sebagai:

$$q_e = \frac{RT}{b_T} \ln(A_T C_e)$$

Simbol AT adalah konstanta pengikatan kesetimbangan Temkin (L/mg) dan bT adalah konstanta variasi kalor adsorpsi (J/mol) (Ayawei et al., 2017; Temkin & Pyzhev, 1940).

2. Model Isoterm Dubinin-Radushkevich (D-R): Model ini dirancang khusus untuk adsorpsi pada padatan mikropori dengan mekanisme pengisian volume pori (Dubinin & Radushkevich, 1947). Persamaan D-R tidak mengasumsikan permukaan homogen dan sangat bermanfaat untuk menduga energi bebas rata-rata adsorpsi (E) guna membedakan fisisorpsi dan kemisorpsi:

$$q_e = q_s \exp(-\beta \epsilon^2)$$

Potensial Polanyi (epsilon) dihitung melalui rumus (Dubinin & Radushkevich, 1947):

$$\epsilon = RT \ln\left(1 + \frac{1}{C_e}\right)$$

Nilai energi bebas rata-rata adsorpsi (E) per mol adsorbat dihitung melalui relasi (Dubinin & Radushkevich, 1947; Foo & Hameed, 2010):

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}}$$

Nilai E di bawah 8 kJ/mol mengindikasikan bahwa proses dikendalikan oleh fisisorpsi van der Waals (Ayawei et al., 2017; Handayani et al., 2024). Nilai E dalam rentang 8 hingga 16 kJ/mol mencerminkan mekanisme pertukaran ion, sedangkan nilai E di atas 16 kJ/mol mengonfirmasi mekanisme kemisorpsi sejati.

3. Model Isoterm BET (Brunauer-Emmett-Teller): Model ini memperluas teori Langmuir untuk adsorpsi gas multilayer pada material berpori (Brunauer et al., 1938; Rouquerol et al., 2014). BET mengasumsikan bahwa molekul adsorbat pada lapisan pertama bertindak sebagai situs adsorpsi bagi molekul pada lapisan kedua dan seterusnya, dengan entalpi adsorpsi lapisan lanjutan setara dengan entalpi kondensasi cairan murni.

Tabel 3.1 menyajikan rangkuman komparatif model-model isoterm adsorpsi utama beserta asumsi dan keterbatasannya (Foo & Hameed, 2010; Siderius et al., 2025).

Tabel 3.1 Perbandingan Model-Model Isoterm Adsorpsi.

Model Isoterm	Tipe Lapisan	Asumsi Sifat Permukaan	Persamaan Matematis	Parameter Kunci

Langmuir	Monolayer tunggal	Homogen sempurna, energi situs seragam	qe = (qm KL Ce) / (1 + KL Ce)	qm (kapasitas maks), KL, RL
Freundlich	Multilayer bertingkat	Heterogen, energi eksponensial	qe = KF Ce^(1/n)	KF (kapasitas), 1/n (intensitas)
Temkin	Multilayer terbatas	Interaksi adsorbat menurunkan kalor linier	qe = (RT/bT) ln(AT Ce)	AT (afinitas), bT (kalor adsorpsi)
Dubinin-Radushkevich	Pengisian pori mikro	Distribusi energi Gauss pada mikropori	qe = qs exp(-beta epsilon^2)	qs (kapasitas pori), E (energi bebas)

3.5 Kriteria Pemilihan Model Isoterm yang Sesuai

Pemilihan model isoterm yang paling representatif dalam suatu laporan riset tidak boleh hanya didasarkan pada perbandingan koefisien determinasi linier (R2) (Mikolajczyk et al., 2024; Siderius et al., 2025; Tran et al., 2017). Transformasi linier model seperti pada persamaan Langmuir dan Freundlich terbukti secara matematis mengubah struktur galat eksperimen dan memberikan bobot bias berlebih pada konsentrasi rendah atau tinggi. Evaluasi kecocokan model modern harus dilakukan melalui regresi nonlinier dengan membandingkan parameter

statistik ketelitian ganda seperti Root Mean Square Error (RMSE), Chi-Square, dan Akaike Information Criterion (AIC).

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Analisis Isoterm Adsorpsi Asam Mefenamat pada Karbon Aktif Berbasis Tempurung Kelapa Sawit:

Suatu penelitian teknologi lingkungan farmasi menguji penghilangan limbah obat antiinflamasi asam mefenamat dari larutan berair menggunakan karbon aktif tempurung sawit pada suhu 298 K dengan rentang konsentrasi awal 10 hingga 150 mg/L. Data kesetimbangan diuji menggunakan model Langmuir, Freundlich, dan Dubinin-Radushkevich.

Hasil analisis regresi nonlinier menunjukkan bahwa data kesetimbangan mengikuti model Langmuir dengan nilai R2 sebesar 0,994; RMSE sebesar 1,24 mg/g; kapasitas adsorpsi maksimum (qm) sebesar 84,6 mg/g; dan nilai KL sebesar 0,072 L/mg. Model Freundlich menghasilkan nilai R2 lebih rendah yaitu 0,942 dengan RMSE 4,18 mg/g. Nilai faktor pemisahan RL berada pada rentang 0,085 hingga 0,581 ($0 < RL < 1$), mengonfirmasi bahwa penjerapan asam mefenamat berlangsung secara menguntungkan pada lapisan tunggal monolayer yang homogen. Analisis lanjutan model D-R menghasilkan nilai energi bebas rata-rata E sebesar 6,4 kJ/mol, yang membuktikan bahwa mekanisme pengikatan

asam mefenamat pada karbon aktif didominasi oleh fisisorpsi melalui interaksi hidrofobik dan dispersi van der Waals.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Jelaskan empat asumsi teoretis utama yang mendasari perumusan model isoterm Langmuir dan uraikan keterbatasannya ketika diterapkan pada material biomassa hayati.
2. Suatu eksperimen adsorpsi menghasilkan data linier model Langmuir dengan persamaan regresi: Ce/qe = 0,025 Ce + 0,150. Tentukan: (a) Nilai kapasitas adsorpsi monolayer maksimum (qm) dalam mg/g, (b) Nilai konstanta afinitas Langmuir (KL) dalam L/mg, dan (c) Nilai parameter pemisahan RL untuk konsentrasi awal C0 sebesar 50 mg/L beserta interpretasi sifat kelayakannya.
3. Uraikan perbedaan interpretasi fisikokimia antara model isoterm Langmuir dan model isoterm Freundlich ditinjau dari karakteristik permukaan material adsorben.

4. Berdasarkan model Dubinin-Radushkevich, suatu proses penjerapan ion logam menghasilkan nilai beta sebesar 0,0032 mol2/J2. Hitunglah nilai energi bebas rata-rata adsorpsi (E) dalam kJ/mol dan tentukan jenis mekanisme penjerapan yang beroperasi.
5. Mengapa penggunaan regresi nonlinier sangat disarankan dibandingkan regresi linier dalam penentuan parameter isoterm adsorpsi pada publikasi ilmiah modern?

BAB 4
KINETIKA ADSORPSI

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 4 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan konsep laju adsorpsi dan tahapan berurutan dalam proses perpindahan massa dari fase larutan ke permukaan padat.
2. Menerapkan model kinetika Pseudo-Orde Satu (Lagergren) dan Pseudo-Orde Dua (Ho-McKay) serta menginterpretasikan konstanta laju yang diperoleh.
3. Menganalisis kurva difusi intrapartikel model Weber-Morris untuk mengidentifikasi tahap pengendali laju (rate-controlling step).
4. Mengevaluasi faktor-faktor operasional yang memengaruhi dinamika laju adsorpsi dalam perancangan reaktor adsorpsi farmasi dan lingkungan.

4.1 Konsep Dasar Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi mendeskripsikan laju pengambilan atau penangkapan spesies adsorbat dari fase fluida ke

permukaan padatan sebagai fungsi waktu kontak hingga tercapainya kondisi kesetimbangan dinamis (Do, 1998; Worch, 2021). Pemahaman kinetika merupakan persyaratan mendasar dalam merancang dimensi peralatan kontak, menghitung waktu retensi hidraulik minimum pada kolom pengolahan, dan mengungkap mekanisme perpindahan massa yang mengendalikan proses pemisahan (Plazinski et al., 2020; Putra et al., 2026).

Perjalanan molekul adsorbat dari fase ruah larutan menuju titik pengikatan akhir pada dinding pori adsorben padat melibatkan empat tahapan fisik yang berlangsung secara berurutan (Boyd et al., 1947; Weber & Morris, 1963):

1. Transportasi Ruah (Bulk Transport): Perpindahan molekul adsorbat melintasi badan larutan ruah menuju lapisan batas hidrodinamik cairan yang mengelilingi partikel adsorben. Tahap ini berlangsung sangat cepat bila sistem dilengkapi dengan pengadukan mekanik yang memadai (Worch, 2021).
2. Difusi Lapisan Batas Cairan (Film Diffusion atau External Mass Transfer): Difusi molekul adsorbat menembus lapisan tipis cairan stagnan yang menyelimuti permukaan luar partikel adsorben (Boyd et al., 1947).

3. Difusi Intrapartikel (Intraparticle Diffusion atau Pore Diffusion): Migrasi molekul adsorbat melintasi pori-pori internal material, baik melalui difusi pori berisi cairan maupun difusi permukaan (surface diffusion) di sepanjang dinding pori padatan (Weber & Morris, 1963).
4. Reaksi Pengikatan Adsorptif (Adsorptive Attachment): Tahap penempelan akhir molekul adsorbat pada situs aktif spesifik melalui fisisorpsi atau kemisorpsi. Tahap ini umumnya berlangsung sangat cepat, sehingga kinetika keseluruhan dikendalikan oleh salah satu tahap difusi sebelumnya (Plazinski et al., 2020).

4.2 Model Kinetika Pseudo-Orde Satu (Lagergren)

Model kinetika Pseudo-Orde Satu dirumuskan pertama kali oleh Sven Lagergren pada tahun 1898 berdasarkan kapasitas adsorpsi padatan, bukan berdasarkan konsentrasi zat terlarut (Lagergren, 1898). Model ini mengasumsikan bahwa laju pengisian situs aktif berbanding lurus dengan jumlah situs kosong yang masih tersedia pada permukaan adsorben pada setiap selang waktu tertentu (Plazinski et al., 2020).

Bentuk diferensial persamaan Lagergren dinyatakan sebagai hubungan laju penjerapan padatan terhadap kapasitas tersisa (Lagergren, 1898):

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

Integrasi persamaan di atas dengan menerapkan kondisi batas t = 0 (qt = 0) hingga t = t (qt = qt) menghasilkan persamaan kinetika bentuk eksponensial nonlinier (Do, 1998):

$$q_t = q_e(1 - \exp(-k_1 t))$$

Bentuk linier klasik dari persamaan Pseudo-Orde Satu dirumuskan melalui hubungan logaritmik sebagai berikut (Lagergren, 1898):

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

Simbol k1 merepresentasikan konstanta laju Pseudo-Orde Satu (1/menit) dan qe adalah kapasitas adsorpsi kesetimbangan teoritis (Lagergren, 1898). Plot grafik antara ln(qe - qt) terhadap waktu kontak t menghasilkan garis lurus dengan kemiringan -k1 dan intersep ln qe. Kelemahan mendasar model linier ini adalah ketergantungannya pada nilai qe eksperimen yang harus diketahui terlebih dahulu, serta adanya galat matematis yang besar saat sistem mendekati kesetimbangan di mana nilai (qe - qt) mendekati nol (Lima et al., 2019; Plazinski et al., 2020).

4.3 Model Kinetika Pseudo-Orde Dua (Ho-McKay)

Model kinetika Pseudo-Orde Dua dikembangkan dan dipopulerkan oleh Yuh-Shan Ho dan Gordon McKay pada tahun 1999 (Ho & McKay, 1999). Model ini mengasumsikan bahwa tahap penentu laju adsorpsi dikendalikan oleh kemisorpsi yang melibatkan gaya valensi melalui pertukaran atau pembagian elektron antara adsorbat dan gugus fungsional adsorben (Ho & McKay, 1998, 1999; Putra et al., 2024).

Persamaan laju diferensial Pseudo-Orde Dua dirumuskan sebagai kuadrat dari kapasitas situs adsorpsi yang belum terisi (Ho & McKay, 1999):

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

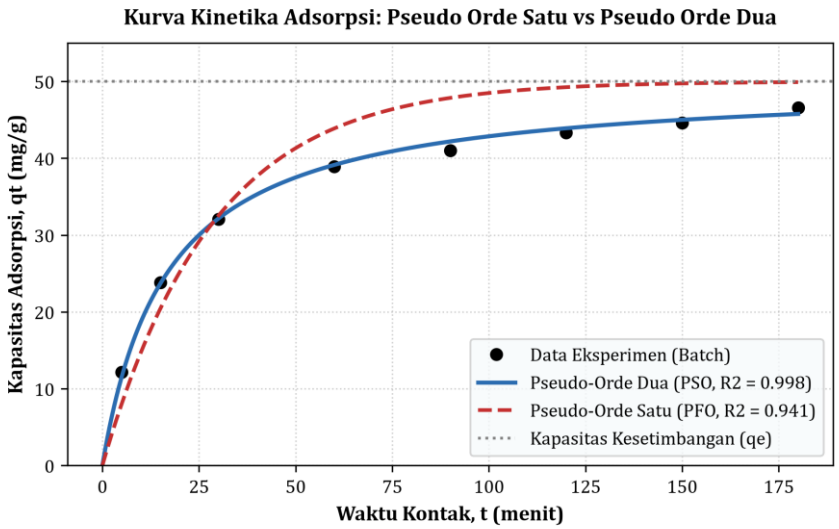
Integrasi matematis persamaan laju tersebut pada rentang batas waktu operasional menghasilkan persamaan nonlinier waktu (Ho & McKay, 1999):

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

Bentuk linier persamaan Pseudo-Orde Dua yang paling umum digunakan dalam analisis parameter eksperimen adalah (Ho & McKay, 1999):

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

Simbol k2 adalah konstanta laju Pseudo-Orde Dua (g/mg menit). Plot grafik hubungan t/qt terhadap t menghasilkan garis linier di mana nilai qe hasil perhitungan teoritis diperoleh langsung dari kebalikan nilai kemiringan garis (1/slope), sedangkan konstanta laju k2 dihitung dari nilai intersep (Ho & McKay, 1999; Handayani et al., 2024; Putra et al., 2022).



Gambar 4.1 Profil Kurva Kinetika Adsorpsi Model Pseudo-Orde Satu dan Pseudo-Orde Dua terhadap Data Eksperimen.

4.4 Model Difusi Intrapartikel (Weber-Morris)

Model empiris difusi intrapartikel dirumuskan oleh Walter J. Weber dan J. Carrell Morris pada tahun 1963 untuk

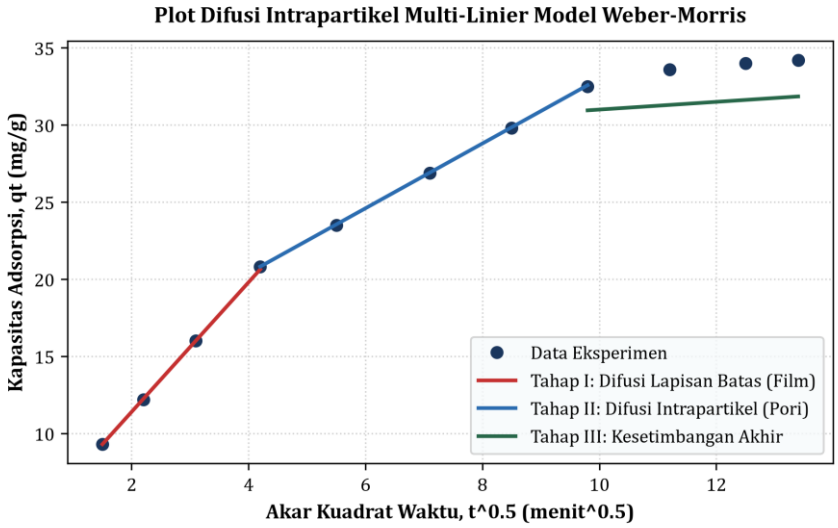
mengidentifikasi kontribusi tahanan difusi pori internal terhadap laju keseluruhan adsorpsi (Weber & Morris, 1963). Persamaan Weber-Morris dinyatakan sebagai hubungan fungsi akar kuadrat waktu kontak (Weber & Morris, 1963):

$$q_t = k_{id} t^{0.5} + C$$

Simbol kid menyatakan konstanta laju difusi intrapartikel (mg/g menit^0.5) dan C adalah konstanta intersep yang memberikan estimasi ketebalan lapisan batas hidrodinamik atau boundary layer effect (Weber & Morris, 1963; Putra et al., 2026).

Interpretasi grafik qt terhadap t^0.5 memberikan diagnosis mekanisme perpindahan massa yang sangat spesifik (Boyd et al., 1947; Weber & Morris, 1963):

1. Garis Linier Melewati Titik Pusat (C = 0): Kondisi di mana kurva berupa satu garis lurus tunggal yang memotong titik origin (0,0) membuktikan bahwa difusi intrapartikel merupakan satu-satunya tahap penentu laju proses adsorpsi (Weber & Morris, 1963).
2. Plot Multi-Linier dengan Intersep Positif (C > 0): Kondisi di mana kurva menunjukkan multilinearitas membuktikan bahwa proses adsorpsi dikendalikan oleh lebih dari satu mekanisme perpindahan massa secara simultan (Plazinski et al., 2020; Putra et al., 2022).



Gambar 4.2 Plot Multi-Linier Model Difusi Intrapartikel Weber-Morris Menggambarkan Tiga Tahapan Perpindahan Massa Berurutan.

Grafik multi-linier pada Gambar 4.2 umumnya memperlihatkan tiga daerah segmen berturut-turut yang mencerminkan rezim perpindahan massa (Weber & Morris, 1963; Handayani et al., 2024):

1. Segmen Pertama (Kemiringan Tajam): Mewakili difusi eksternal molekul adsorbat melintasi lapisan batas film cairan menuju permukaan luar partikel adsorben (Boyd et al., 1947).
2. Segmen Kedua (Kemiringan Sedang): Mewakili tahap difusi intrapartikel bertahap ke dalam jaringan makropori dan mesopori internal material (Weber & Morris, 1963).

3. Segmen Ketiga (Mendatar): Mewakili tahap kesetimbangan akhir di mana sebagian besar situs aktif internal telah jenuh dan laju difusi melambat drastis (Worch, 2021).

4.5 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Laju Adsorpsi

Laju pencapaian kesetimbangan adsorpsi dipengaruhi oleh interaksi variabel operasional sistem pengujian dalam media cair (Do, 1998; Worch, 2021):

1. Kecepatan Pengadukan (Agitasi): Kenaikan kecepatan putaran pengadukan menipiskan ketebalan lapisan batas cairan di sekitar adsorben, sehingga meminimalkan hambatan difusi film dan mempercepat laju penyerapan awal (Boyd et al., 1947; Putra et al., 2022).
2. Ukuran Partikel Adsorben: Partikel adsorben yang berukuran lebih kecil menyediakan luas permukaan luar yang lebih besar per satuan massa serta memperpendek jalur difusi pori internal, sehingga mempercepat pencapaian kesetimbangan kinetik (Worch, 2021).
3. Suhu Operasional: Kenaikan suhu meningkatkan energi kinetik molekul dan menurunkan viskositas pelarut air, yang secara bersamaan melipatgandakan koefisien difusi molekuler (Do, 1998; Handayani et al., 2024).

4. Konsentrasi Awal Adsorbat: Konsentrasi adsorbat yang lebih tinggi memberikan gaya dorong gradien konsentrasi (concentration driving force) yang lebih besar untuk mengatasi tahanan transfer massa antarmuka (Putra et al., 2024; Putra et al., 2026).

Tabel 4.1 merangkum karakteristik komparatif model-model kinetika adsorpsi yang paling sering diterapkan dalam literatur ilmiah terindeks Scopus (Ho & McKay, 1999; Lagergren, 1898; Plazinski et al., 2020; Weber & Morris, 1963).

Tabel 4.1 Perbandingan Karakteristik Model-Model Kinetika Adsorpsi.

Model Kinetika	Penemu / Tahun	Persamaan Linier	Parameter Kunci	Asumsi Mekanisme Utama
Pseudo-Orde Satu	Lagergren (1898)	ln(qe - qt) = ln qe - k1 t	k1 (1/menit), qe	Laju sebanding dengan jumlah situs kosong yang tersedia.
Pseudo-Orde Dua	Ho & McKay (1999)	t/qt = 1/(k2 qe^2) + t/qe	k2 (g/mg menit), qe	Laju dikendalikan kemisorpsi pembagian atau transfer elektron.
Difusi Intrapartikel	Weber & Morris (1963)	qt = kid t^0.5 + C	kid (mg/g min^0.5), C	Laju dikendalikan oleh difusi

				molekul di dalam pori material.
Model Elovich	Zeldowitsch (1934)	qt = (1/beta) ln(alpha beta t)	alpha (laju awal), beta	Kemisorpsi pada permukaan padatan yang sangat heterogen.

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Studi Dinamika Kinetika Penjerapan Antibiotik Siprofloksasin oleh Karbon Aktif Berbasis Tempurung Kelapa:

Suatu penelitian remediasi limbah fasilitas kesehatan mempelajari laju penjerapan siprofloksasin pada variasi waktu kontak 5 hingga 240 menit dengan konsentrasi awal antibiotik 100 mg/L dan dosis adsorben 1,0 g/L pada suhu ruang terkontrol.

Analisis kinetika menunjukkan bahwa pengambilan siprofloksasin berlangsung sangat cepat pada 30 menit pertama akibat ketersediaan situs permukaan luar yang melimpah. Model Pseudo-Orde Dua menghasilkan koefisien determinasi R2 sebesar 0,998 dengan nilai qe teoritis sebesar 82,6 mg/g, sangat mendekati nilai qe eksperimen sebesar 81,9 mg/g. Model Pseudo-Orde Satu menghasilkan

R2 hanya sebesar 0,912 dengan qe teoritis 48,3 mg/g yang menyimpang dari kenyataan eksperimen. Plot Weber-Morris menunjukkan karakteristik multi-linier dengan intersep C positif sebesar 18,4 mg/g, mengonfirmasi bahwa difusi film lapisan batas dan difusi intrapartikel pori bekerja bersama-sama dalam mengendalikan dinamika transfer massa siprofloksasin.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Uraikan empat tahapan berurutan perpindahan massa molekul zat terlarut dari badan larutan hingga terikat pada dinding pori adsorben padat.
2. Suatu pengujian kinetika adsorpsi menghasilkan persamaan garis linier model Pseudo-Orde Dua: t/qt = 0,018 t + 0,240. Tentukan: (a) Nilai kapasitas adsorpsi kesetimbangan teoritis (qe) dalam mg/g, dan (b) Nilai konstanta laju Pseudo-Orde Dua (k2) dalam satuan g/mg menit.
3. Jelaskan bagaimana grafik model Weber-Morris digunakan untuk membuktikan apakah difusi intrapartikel merupakan satu-satunya tahap pengendali laju atau terdapat keterlibatan difusi film.

4. Mengapa pada sebagian besar penelitian adsorpsi logam berat dan zat warna pada biosorben, model Pseudo-Orde Dua menghasilkan koefisien determinasi R2 yang jauh lebih tinggi dibandingkan model Pseudo-Orde Satu?
5. Jelaskan pengaruh ukuran diameter butiran adsorben terhadap laju pencapaian kesetimbangan kinetika dalam suatu reaktor berpengaduk.

BAB 5
ADSORBEN KONVENSIONAL: KARBON AKTIF, ZEOLIT, DAN SILIKA GEL

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 5 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menganalisis struktur mikro, metode aktivasi fisik dan kimia, serta kimia permukaan material karbon aktif industri dan farmasi.
2. Menjelaskan karakteristik kristalografi zeolit alam dan sintetis serta fungsinya sebagai penyaring molekuler (molecular sieve) dan penukar kation.
3. Menguraikan morfologi permukaan silika gel dan mekanisme pertukaran ion pada resin polimer sintetik.
4. Mengevaluasi berbagai teknik modifikasi permukaan untuk meningkatkan kapasitas retensi dan selektivitas penjerapan material adsorben.

5.1 Karbon Aktif: Struktur, Karakteristik, dan Metode Aktivasi

Karbon aktif merupakan material padatan berpori kaya karbon yang paling luas digunakan sebagai adsorben komersial di seluruh dunia (Marsh & Reinoso, 2006; Worch, 2021). Luas permukaan spesifik karbon aktif sangat tinggi, umumnya berkisar antara 500 hingga 1500 meter persegi per gram, dengan jaringan pori yang sangat berkembang (Rouquerol et al., 2014). Struktur mikrokristalin karbon aktif tersusun atas lapisan lembaran grafena tak beraturan yang saling bersilangan menghasilkan rongga pori dengan berbagai tingkatan ukuran (Marsh & Reinoso, 2006).

Klasifikasi ukuran pori pada material berpori karbon mengikuti rekomendasi International Union of Pure and Applied Chemistry (Thommes et al., 2015):

1. Mikropori (Micropores): Pori dengan diameter internal kurang dari 2 nanometer (< 2 nm). Mikropori menyumbang lebih dari 80% dari total luas permukaan spesifik karbon aktif dan berperan sebagai lokasi utama penjerapan molekul gas serta soluta organik kecil (Thommes et al., 2015; Worch, 2021).
2. Mesopori (Mesopores): Pori dengan diameter antara 2 hingga 50 nanometer (2 - 50 nm). Mesopori berfungsi sebagai jalur akses dan situs adsorpsi bagi molekul

berukuran sedang seperti antibiotik, zat warna sintetis, dan vitamin (Rouquerol et al., 2014; Thommes et al., 2015).

3. Makropori (Macropores): Pori dengan diameter lebih besar dari 50 nanometer (> 50 nm). Makropori menyumbang luas permukaan yang sangat kecil, tetapi bertindak sebagai jalan tol transportasi utama bagi fluida untuk menembus ke bagian dalam butiran partikel (Marsh & Reinoso, 2006; Thommes et al., 2015).



Gambar 5.1 Diagram Klasifikasi Porositas Material Adsorben Berdasarkan Rekomendasi IUPAC.

Proses pembuatan karbon aktif komersial melibatkan dua tahapan utama, yaitu karbonisasi (pirolisis bahan baku organik bebas oksigen pada suhu 400 - 600 derajat Celsius) dan proses aktivasi (Marsh & Reinoso, 2006). Dua jalur aktivasi yang umum diterapkan dalam rekayasa material adalah (Crini & Lichtfouse, 2019; Marsh & Reinoso, 2006):

1. Aktivasi Fisika (Aktivasi Termal): Arang hasil pirolisis direaksikan dengan gas pengoksidasi ringan seperti uap air (H2O) atau gas karbon dioksida (CO2) pada suhu tinggi antara 800 hingga 1000 derajat Celsius. Reaksi gasifikasi selektif ini mengikis atom-atom karbon yang tidak terorganisasi dan membuka pori-pori mikro yang sebelumnya tersumbat oleh residu tar (Marsh & Reinoso, 2006).
2. Aktivasi Kimia: Bahan baku biomassa dicampur secara intensif dengan agen aktivator kimia seperti asam fosfat (H3PO4), kalium hidroksida (KOH), atau seng klorida (ZnCl2), kemudian dipanaskan pada suhu relatif lebih rendah (450 - 700 derajat Celsius). Agen kimia bertindak sebagai dehidrator yang mencegah pembentukan tar dan menginduksi pembentukan struktur mesopori yang melimpah (Crini & Lichtfouse, 2019; Marsh & Reinoso, 2006).

5.2 Zeolit: Struktur Kristal dan Fungsi Molecular Sieve

Zeolit adalah mineral aluminosilikat kristalin terhidrasi yang memiliki kerangka tiga dimensi terbuka tersusun atas unit tetrahedral silikon [SiO4]4- dan aluminium [AlO4]5- yang saling berikatan melalui jembatan atom oksigen (Rouquerol et al., 2014; Worch, 2021). Substitusi atom

silikon (Si^{4+}) oleh aluminium (Al^{3+}) dalam kerangka kisi kristal menghasilkan defisit muatan positif, sehingga kisi zeolit memiliki muatan listrik kerangka yang bermuatan netto negatif (Worch, 2021).

Kelebihan muatan negatif pada kerangka zeolit dinetralkan oleh keberadaan kation penyeimbang yang dapat dipertukarkan seperti Na^+, K^+, Ca^{2+}, atau Mg^{2+} yang berlokasi di dalam rongga saluran kristal (Rouquerol et al., 2014). Zeolit memiliki ukuran bukaan pori saluran yang sangat seragam dan teratur dalam skala angstrom (0,3 hingga 1,0 nm). Keseragaman ukuran rongga ini memungkinkan zeolit menyeleksi molekul berdasarkan dimensi ukuran geometrisnya, sehingga material ini dikenal dengan sebutan penyaring molekuler atau molecular sieve (Thommes et al., 2015; Worch, 2021). Zeolit alam seperti klinoptilolit banyak dimanfaatkan untuk pengikatan kation logam berat dan amonium, sedangkan zeolit sintetis seperti tipe A, X, Y, dan ZSM-5 digunakan secara luas dalam katalisis kilang minyak dan pemurnian gas medis (Crini & Lichtfouse, 2019; Rouquerol et al., 2014).

5.3 Silika Gel dan Resin Penukar Ion

Silika gel adalah bentuk amorf dari silikon dioksida (SiO_2) yang memiliki struktur polimer koloidal berpori

dengan luas permukaan spesifik berkisar antara 300 hingga 800 m2/g (Rouquerol et al., 2014). Kimia permukaan silika gel didominasi oleh keberadaan gugus silanol (Si-OH) dan gugus siloksan (Si-O-Si). Gugus silanol bertindak sebagai situs pengikatan donor ikatan hidrogen dan pusat adsorpsi polar, yang menjadikan silika gel sebagai adsorben standar dalam kromatografi kolom dan kromatografi lapis tipis (KLT) serta bahan desikan pengering kemasan obat (Nasra et al., 2025; Rouquerol et al., 2014).

Resin penukar ion merupakan matriks polimer organik sintetis berikatan silang tinggi (umumnya kopolimer stirena dan divinilbenzena atau DVB) yang difungsionalisasi dengan gugus ionik aktif (Worch, 2021). Resin penukar kation asam kuat mengandung gugus sulfonat (-SO3-), sedangkan resin penukar anion basa kuat mengandung gugus amonium kuaterner (-N+(CH3)3). Resin penukar ion diaplikasikan secara intensif dalam industri farmasi untuk demineralisasi air produksi obat (purified water/WFI), formulasi sediaan lepas lambat berbasis kompleks obat-resin (resinate), dan penanganan hiperkalemia menggunakan resin natrium polistiren sulfonat (Allen et al., 2021; Worch, 2021).

5.4 Pendekatan Modifikasi dan Fungsionalisasi Adsorben

Modifikasi permukaan dilakukan untuk mengatasi keterbatasan kapasitas dan selektivitas adsorben alami terhadap kontaminan spesifik (Crini & Lichtfouse, 2019; Nasra et al., 2025). Tiga pendekatan fungsionalisasi yang umum diterapkan dalam rekayasa adsorben berkinerja tinggi adalah (Baskar et al., 2022; Nasra et al., 2025):

1. Modifikasi Kimia Asam dan Basa: Perlakuan oksidasi menggunakan asam nitrat ($HNO3$) atau hidrogen peroksida ($H2O2$) meningkatkan kerapatan gugus fungsi oksigen asam (karboksilat, fenolat, lakton) pada permukaan karbon aktif untuk memaksimalkan penjerapan kation logam (Marsh & Reinoso, 2006). Perlakuan basa atau perlakuan termal dengan gas amonia memasukkan gugus basa nitrogen yang ramah terhadap penjerapan molekul asam (Crini & Lichtfouse, 2019).
2. Impregnasi dan Doping Nanopartikel: Penyisipan oksida logam seperti nanopartikel besi oksida magnetit ($Fe3O4$) menghasilkan adsorben magnetik yang dapat dipisahkan secara cepat dari suspensi larutan menggunakan medan magnet luar tanpa memerlukan

tahap filtrasi sentrifugasi yang rumit (Baskar et al., 2022).

3. Pencangkokan Silan (Silanisasi): Penempelan molekul organosilan seperti 3-aminopropiltrietoksisilan (APTES) atau turunan etilendiamin pada permukaan silika xerogel untuk mengintroduksi gugus amina primer bebas yang sangat reaktif mengkelat ion logam berat dan biomolekul obat (Nasra et al., 2025; Rouquerol et al., 2014).

Tabel 5.1 merangkum perbandingan karakteristik fisikokimia dari keempat kelompok adsorben konvensional berdasarkan literatur terkini (Crini & Lichtfouse, 2019; Marsh & Reinoso, 2006; Rouquerol et al., 2014; Worch, 2021).

Tabel 5.1 Perbandingan Karakteristik Fisikokimia Adsorben Konvensional.

Jenis Adsorben	Bahan Dasar Penyusun	Luas Permukaan (m2/g)	Gugus Fungsi Dominan	Aplikasi Utama dalam Farmasi
Karbon Aktif	Biomassa, batu bara, tempurung	500 - 1500	Karboksilat, fenolat, kuinon	Antidotum keracunan oral, pemurnian bahan baku

Zeolit	Aluminosilikat kristalin	300 - 900	Jembatan Al-O-Si, kation Na+/Ca2+	Pemisahan gas medis, penukar ion efluen cair
Silika Gel	Silikon dioksida amorf	300 - 800	Gugus silanol terisolasi dan geminal	Fase diam kromatografi KLT, desikan kemasan
Resin Penukar Ion	Kopolimer stirena-DVB	50 - 200	Gugus sulfonat atau amonium	Purifikasi air steril WFI, pembawa sediaan lepas lambat

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Aplikasi Farmasetika Tablet Karbon Aktif sebagai Obat Gangguan Pencernaan dan Dispepsia:

Karbon aktif diformulasikan secara luas menjadi produk obat bebas (over-the-counter/OTC) dalam bentuk tablet atau kapsul dengan indikasi mengurangi perut kembung (flatulensi) dan meteorismus akibat akumulasi gas gastrointestinal berlebih. Produk komersial standar mengandung 250 hingga 300 mg karbon aktif bermutu farmasi (pharmaceutical grade) per tablet.

Kriteria keberhasilan formulasi tablet karbon aktif sangat dipengaruhi oleh proses kompresi dan pemilihan eksipien pengikat farmasi. Gaya penekanan mesin cetak tablet tidak boleh merusak struktur pori mikro dan meso

partikel karbon aktif. Apabila pori-pori internal runtuh atau tersumbat oleh eksipien polimerik berbobot molekul besar, kapasitas adsorpsi gas metana, hidrogen sulfida, dan senyawa berbau busuk akan menurun drastis. Evaluasi pengujian farmakope mensyaratkan uji daya serap karbon aktif farmasi terhadap senyawa penanda fenazon atau metilen biru sebelum bahan dinyatakan memenuhi syarat kelayakan rilis pasar.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Uraikan perbedaan mendasar antara mekanisme aktivasi fisika dan aktivasi kimia dalam sintesis karbon aktif bermutu tinggi ditinjau dari suhu, reagen, dan distribusi ukuran pori.
2. Mengapa struktur kisi kerangka zeolit memiliki muatan listrik netto bernilai negatif dan bagaimana peran kation penyeimbang dalam fenomena pertukaran ion?
3. Jelaskan peranan gugus silanol terisolasi pada permukaan silika gel dalam mekanisme pemisahan kromatografi lapis tipis (KLT) zat aktif obat.
4. Sebutkan dan jelaskan dua aplikasi penting resin penukar ion sintetis dalam bidang teknologi kefarmasian.

5. Mengapa penambahan nanopartikel magnetit (Fe3O4) pada material adsorben sangat menguntungkan ditinjau dari aspek operasional pemisahan fase pasca adsorpsi?

BAB 6
BIOADSORPSI DAN BIOSORBEN

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 6 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menguraikan konsep dasar bioadsorpsi (biosorpsi) dan membedakannya secara tegas dengan proses bioakumulasi aktif intraseluler.
2. Menganalisis peran gugus fungsi struktural dinding sel biomassa dalam mekanisme pengikatan adsorbat kontaminan.
3. Mengklasifikasikan keanekaragaman sumber biosorben alami yang berasal dari limbah pertanian, industri perikanan, alga, dan mikroorganisme.
4. Mengevaluasi keunggulan, keterbatasan, serta teknik modifikasi kimia biosorben (cross-linking dan grafting) guna memperkuat stabilitas struktural dan kapasitas serap.

6.1 Konsep Dasar Bioadsorpsi (Biosorpsi)

Bioadsorpsi atau biosorpsi merupakan proses fisikokimia pengikatan pasif spesies ion logam berat, molekul zat warna, residu obat-obatan, maupun polutan organik lainnya oleh biomassa hayati tanpa melibatkan proses metabolisme biologis aktif (Aksu, 2005; Fomina & Gadd, 2014; Volesky, 2003). Istilah biosorpsi secara spesifik merujuk pada penjerapan menggunakan biomassa yang tidak hidup (non-living biomass) atau sel inaktif, yang membedakannya secara mendasar dari fenomena bioakumulasi (Fitri et al., 2024; Putra & Fitri, 2021).

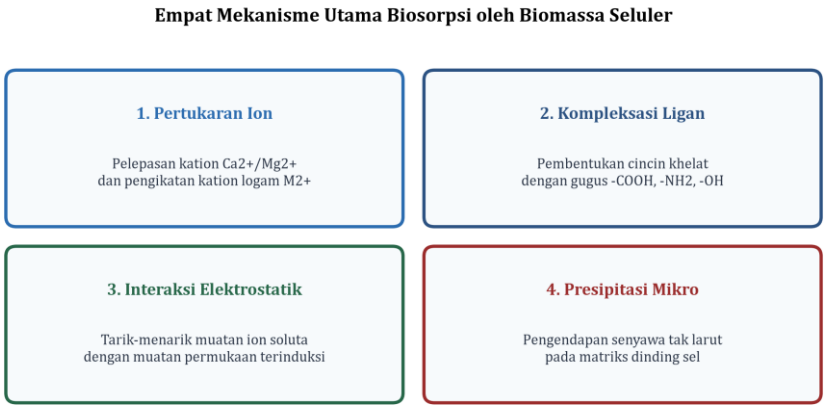
Bioakumulasi adalah proses aktif intraseluler yang berlangsung hanya pada organisme hidup yang sedang bermetabolisme, di mana zat asing diserap melintasi membran sel dan terakumulasi di dalam sitoplasma melalui mekanisme transport aktif yang memerlukan konsumsi energi adenosin trifosfat atau ATP (Fomina & Gadd, 2014). Biosorpsi pasif memiliki sejumlah keunggulan komparatif dibandingkan bioakumulasi aktif dalam pengolahan air limbah (Aksu, 2005; Fitri et al., 2021; Volesky, 2003):

1. Biosorpsi tidak terpengaruh oleh toksisitas kontaminan, sehingga mampu mengolah limbah dengan konsentrasi toksin mematikan yang akan membunuh mikroorganisme hidup (Aksu, 2005; Fitri et al., 2024).

2. Biosorpsi tidak memerlukan suplai nutrisi pertumbuhan, aerasi oksigen konstan, ataupun pengendalian aseptis medium yang mahal (Volesky, 2003).
3. Proses pengikatan fisikokimia berlangsung sangat cepat dan mencapai kesetimbangan dalam hitungan menit hingga jam (Wang & Chen, 2009; Putra et al., 2022).
4. Molekul atau ion yang terjerap pada biosorben dapat didesorpsi dan dipulihkan kembali menggunakan eluen kimia ringan, sehingga biomassa dapat diregenerasi dalam siklus berulang (Fomina & Gadd, 2014; Handayani et al., 2023).

6.2 Mekanisme Biosorpsi oleh Komponen Dinding Sel Biomassa

Permukaan dinding sel biomassa hayati kaya akan biopolimer kompleks seperti selulosa, hemiselulosa, lignin, kitin, kitosan, asam alginat, peptidoglikan, dan lipid (Crini, 2005; Michalak et al., 2013). Makromolekul ini mengemban susunan gugus fungsi aktif yang melimpah, meliputi gugus karboksil (-COOH), hidroksil (-OH), amina (-NH2), sulfhidril/tiol (-SH), karbonil (C=O), dan fosfat (-PO4^2-) yang bertindak sebagai situs koordinasi dan penukar ion (Wang & Chen, 2009; Putra et al., 2024).



Gambar 6.1 Skema Empat Mekanisme Utama Biosorpsi Kontaminan pada Dinding Sel Biomassa.

Interaksi penjerapan biosorpsi berlangsung melalui empat mekanisme fundamental pada permukaan dinding sel (Fomina & Gadd, 2014; Michalak et al., 2013; Volesky, 2003):

1. Pertukaran Kation (Cation Exchange): Kation logam ringan alami seperti kalsium (Ca2+), magnesium (Mg2+), dan proton (H+) yang terikat secara elektrostatis pada gugus karboksilat dan sulfonat dinding sel dilepaskan ke larutan untuk digantikan secara ekuivalen oleh kation kontaminan target seperti Pb2+, Cd2+, atau ion zat warna kationik (Putra & Fitri, 2016; Volesky, 2003).
2. Pembentukan Kompleks Koordinasi (Kompleksasi Ligan): Atom-atom donor elektron bebas seperti nitrogen pada gugus amina kitosan atau belerang pada gugus tiol berikatan koordinasi dengan orbital d kosong

dari ion logam berat transisi membentuk cincin kelat yang stabil (Crini, 2005; Wang & Chen, 2009).

3. Interaksi Tarik-Menarik Elektrostatik: Gaya tarik Coulomb antara permukaan dinding sel yang bermuatan negatif terionisasi dengan spesies adsorbat kationik, atau sebaliknya antara dinding sel terprotonasi positif dengan anion kontaminan (Aksu, 2005; Handayani et al., 2023).
4. Presipitasi Mikro Permukaan: Pembentukan endapan garam logam yang tidak larut pada permukaan biomassa, sering kali dipicu oleh pelepasan ion fosfat atau karbonat dari matriks seluler (Fomina & Gadd, 2014; Putra et al., 2025).

6.3 Klasifikasi dan Sumber Keanekaragaman Biosorben

Sumber daya biosorben berlimpah dan dapat diperoleh dari berbagai sektor biomassa hayati bernilai ekonomis rendah yang mendukung ekonomi sirkular (Crini, 2005; Michalak et al., 2013):

1. Biosorben Limbah Hasil Pertanian dan Perkebunan: Material lignoselulosa seperti jerami padi teraktivasi, kulit alpukat, limbah klobot jagung, sekam padi, bagas tebu, dan sabut kelapa (Handayani et al., 2023, 2026;

Putra et al., 2022). Keunggulan utamanya adalah ketersediaan yang sangat melimpah, biaya perolehan mendekati nol, dan kaya akan gugus hidroksil dan fenolat (Crini, 2005).

2. Biosorben Limbah Perikanan dan Cangkang Unggas: Cangkang krustasea (udang, kepiting) merupakan sumber kitin dan kitosan yang kaya gugus amina primer (-NH2), sedangkan limbah cangkang telur bebek kaya kalsium karbonat (CaCO3) berpori yang efektif menjerap zat warna anionik dan kationik (Putra et al., 2025, 2026).
3. Biosorben Biomassa Makroalga dan Mikroalga: Alga hijau seperti Chlorella vulgaris dan Cladophora fracta serta alga cokelat (Sargassum) kaya akan gugus fungsional karboksil dan sulfonat, menyediakan kapasitas penjerapan ion logam divalen Pb(II), Cu(II), dan Cd(II) yang sangat tinggi (Fitri et al., 2021, 2024; Putra & Fitri, 2016, 2021).
4. Biosorben Limbah Fermentasi Mikroorganisme: Biomassa ragi roti sisa industri fermentasi (Saccharomyces cerevisiae) dan miselium fungi industri antibiotik (Penicillium, Aspergillus) yang kaya akan glukan, mannan, dan fosfat (Aksu, 2005; Wang & Chen, 2009).

6.4 Keunggulan, Keterbatasan, dan Modifikasi Kimia Biosorben

Pemanfaatan biosorben mentah memiliki keunggulan dari aspek ramah lingkungan dan keterbaruan bahan baku (Crini, 2005; Volesky, 2003). Keterbatasan teknis biosorben mentah mencakup kekuatan mekanik partikel yang rendah, kecenderungan mudah membusuk akibat degradasi mikroba, pelepasan zat warna organik alami (ekstraktif) ke dalam air olahan, serta kelarutan kitosan dalam kondisi asam (Aksu, 2005; Fomina & Gadd, 2014).

Strategi rekayasa modifikasi kimia diterapkan untuk mengatasi keterbatasan tersebut guna melipatgandakan kinerja biosorpsi (Handayani et al., 2026; Putra et al., 2024):

1. Modifikasi Ikatan Silang (Cross-linking): Pereaksian biosorben polimer seperti kitosan dengan agen bifungsional seperti glutaraldehid atau epiklorohidrin. Reaksi ini mengikat rantai-rantai polimer menjadi jaringan tiga dimensi yang tahan terhadap larutan asam kuat dan memperkuat stabilitas mekanik butiran partikel (Crini, 2005; Wang & Chen, 2009).
2. Modifikasi Protein dan Pencangkokan Kimia (Chemical Grafting): Modifikasi permukaan biomassa pertanian menggunakan putih telur bebek (duck egg white) terbukti meningkatkan densitas gugus fungsional amida

dan amina, sehingga melipatgandakan kapasitas adsorpsi kation dan anion secara signifikan (Putra et al., 2024). Pengikatan kovalen molekul kelat seperti EDTA atau gugus fungsional amina sintetis pada biomassa juga memberikan selektivitas pengikatan yang sangat tajam (Nasra et al., 2025).

Tabel 6.1 menyajikan contoh keanekaragaman jenis biosorben beserta gugus fungsi penentu dan adsorbat target yang dikompilasi dari penelitian terkini (Fitri et al., 2021; Handayani et al., 2023, 2026; Putra et al., 2022, 2025, 2026; Wang & Chen, 2009).

Tabel 6.1 Keanekaragaman Jenis Biosorben dan Target Adsorbatnya.

Kategori Biosorben	Contoh Material Biomassa	Gugus Fungsi Kunci	Adsorbat Target Utama
Limbah Pertanian	Jerami padi, kulit alpukat, klobot jagung	Hidroksil, karboksilat, fenolat	Cr(VI), indigo carmine, metilen biru
Biopolimer Laut & Unggas	Kitosan dan cangkang telur bebek	Amina (-NH2), CaCO3 berpori	Cu(II), indigo carmine, metilen biru
Mikroalga & Makroalga	Chlorella vulgaris, Cladophora fracta	Karboksilat, sulfonat, fosfat	Pb(II), Cu(II), Cd(II), logam berat
Biomassa Mikroba	Limbah ragi Saccharomyces	Fosfat, mannan, peptidoglikan	Residu antibiotik,

			pewarna kationik
Biosorben Termodifikasi	Jerami padi termodifikasi putih telur	Amida, amino, karboksilat	Ion kromat Cr(VI), anion toksik

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Pemanfaatan Biosorben Berbasis Limbah Cangkang Telur Bebek untuk Pengolahan Zat Warna Limbah Laboratorium Medis:

Fasilitas laboratorium patologi klinik dan medis menghasilkan air buangan berkadar zat warna tinggi seperti metilen biru dan indigo carmine yang sulit terurai secara hayati serta berpotensi menimbulkan bahaya mutagenik bagi lingkungan perairan. Untuk menangani limbah tersebut secara ekonomis, biosorben cangkang telur bebek (duck eggshell) diaplikasikan sebagai penyerap ramah lingkungan berkemampuan tinggi.

Karakterisasi menunjukkan bahwa cangkang telur bebek mengandung kalsium karbonat dalam fase kristal kalsit dengan morfologi mikropori dan mesopori yang mendukung pertukaran ion dan interaksi elektrostatik. Pengujian adsorpsi pada air limbah laboratorium medis membuktikan bahwa cangkang telur bebek mampu menyerap zat warna metilen biru dengan efisiensi penyisihan melebihi 90% pada

kondisi pH netral hingga basa lemah. Kinetika penjerapan mengikuti model Pseudo-Orde Dua dan isoterm kesetimbangan cocok dengan model Langmuir, membuktikan pembentukan lapisan tunggal adsorbat pada permukaan homogen cangkang telur. Penerapan inovatif ini menunjukkan bahwa limbah biomassa hewani dapat ditransformasikan menjadi material adsorben fungsional berkinerja unggul untuk sanitasi lingkungan medis.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Jelaskan perbedaan prinsipil antara proses biosorpsi pasif menggunakan biomassa inaktif dengan proses bioakumulasi aktif pada sel mikroorganisme hidup ditinjau dari kebutuhan energi metabolik dan toleransi terhadap konsentrasi toksin.
2. Uraikan peran penting gugus amina (-NH2) dan karboksilat (-COOH) pada biomassa dalam mekanisme pertukaran ion dan pembentukan senyawa kompleks kelat dengan kation logam berat transisi.
3. Sebutkan contoh pemanfaatan limbah pertanian (seperti jerami padi, klobot jagung, atau kulit alpukat) dan limbah

unggas sebagai biosorben serta jelaskan kinerjanya dalam menyerap kontaminan target.

4. Mengapa modifikasi permukaan menggunakan putih telur bebek atau reaksi ikatan silang glutaraldehid mampu meningkatkan stabilitas dan kapasitas adsorpsi biosorben dalam larutan cair?
5. Jelaskan bagaimana aplikasi biosorben alga (seperti Chlorella vulgaris atau Cladophora fracta) dalam remediasi air lindi (leachate) mendukung tercapainya pilar pembangunan berkelanjutan dan ekonomi sirkular.

BAB 7
APLIKASI ADSORPSI DALAM BIDANG FARMASI

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 7 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menganalisis mekanisme kerja dan pedoman klinis penggunaan karbon aktif sebagai antidotum dekontaminasi darurat pada intoksikasi oral akut.
2. Menguraikan peranan fenomena adsorpsi dalam teknologi formulasi sediaan farmasi padat, sistem kestabilan, serta pencegahan inkompatibilitas kemasan.
3. Menjelaskan prinsip kromatografi adsorpsi cair-padat untuk pemisahan, pemurnian, dan standardisasi senyawa obat herbal dan sintesis.
4. Mengevaluasi penerapan material berpori silika mesopori dalam sistem penghantaran obat (drug delivery system) untuk meningkatkan disolusi obat sukar larut.

5. Menganalisis prospek pemanfaatan biopolimer alamiah dalam mewujudkan konsep farmasi berkelanjutan (green pharmacy).

7.1 Karbon Aktif Sebagai Antidotum Intoksikasi Keracunan Akut

Aplikasi adsorpsi yang paling krusial dalam farmasi klinis dan toksikologi kegawatdaruratan adalah pemanfaatan karbon aktif medis (activated charcoal) dosis tunggal maupun berulang sebagai terapi dekontaminasi saluran pencernaan (Cooney, 1995; Neuvonen & Elonen, 1988). Karbon aktif bekerja mengadsorpsi molekul toksin atau overdosis obat yang masih berada di lumen lambung dan usus halus sebelum molekul tersebut sempat mengalami absorpsi melintasi membran enterosit menuju sirkulasi darah sistemik (Allen et al., 2021; Cooney, 1995).

Kriteria efektivitas klinis terapi karbon aktif ditentukan oleh beberapa faktor fundamental dalam tatalaksana intoksikasi darurat (Cooney, 1995; Neuvonen & Elonen, 1988):

1. Waktu Pemberian Pasca Paparan (Golden Period): Karbon aktif memberikan efektivitas adsorpsi paling optimal bila diadministrasikan dalam kurun waktu satu jam pertama setelah racun tertelan. Penundaan pemberian

akan menurunkan fraksi obat yang dapat diikat karena sebagian besar massa toksin telah melewati pilorus lambung dan diserap di usus halus (Neuvonen & Elonen, 1988).

2. Rasio Dosis Adsorben terhadap Toksin: Pedoman toksikologi klinis merekomendasikan rasio bobot karbon aktif terhadap perkiraan bobot racun tertelan minimal 10 banding 1 (10:1). Dosis lazim dewasa berkisar antara 50 hingga 100 gram, sedangkan dosis pediatrik dihitung 1 gram per kilogram berat badan (1 g/kg BB) yang disuspensikan dalam air minum (Allen et al., 2021; Cooney, 1995).
3. Karakteristik Fisikokimia Racun: Karbon aktif mengikat sangat baik senyawa organik berbobot molekul sedang (100 - 1000 Da), molekul non-polar, dan senyawa non-terionisasi seperti parasetamol, karbamazepin, teofilin, fenobarbital, dan antidepresan trisiklik (Cooney, 1995). Karbon aktif tidak efektif mengadsorpsi ion logam berat anorganik (besi, timbal, litium), senyawa asam basa anorganik korosif, alkohol alifatik (metanol, etanol, etilen glikol), dan hidrokarbon minyak bumi (Allen et al., 2021).
4. Terapi Karbon Aktif Dosis Berulang (Multiple-Dose Activated Charcoal / MDAC): Pemberian dosis serial

(misalnya 25 gram setiap 2 hingga 4 jam) diterapkan untuk memicu fenomena dialisis gastrointestinal (gastrointestinal dialysis). Karbon aktif di lumen usus menciptakan gradien konsentrasi tajam yang menarik kembali molekul obat yang telah berada dalam darah kapiler mesenterika untuk berdifusi balik ke lumen usus dan langsung diadsorpsi, serta memutus siklus resirkulasi enterohepatik obat (Neuvonen & Elonen, 1988).

7.2 Adsorpsi dalam Formulasi dan Stabilitas Sediaan Obat

Prinsip interaksi antarmuka adsorpsi dimanfaatkan secara ekstensif dalam perancangan bentuk sediaan farmasi padat, cair, dan semipadat (Allen et al., 2021; Dahan et al., 2016):

1. Glidan dan Peningkat Aliran Serbuk: Silika koloidal bebas air (seperti Aerosil) dan magnesium silikat berpori nano ditambahkan dalam formulasi serbuk kempa langsung dan granulasi tablet pada konsentrasi 0,1% hingga 0,5%. Partikel silika menempel pada permukaan partikel bahan aktif dan eksipien melalui adsorpsi fisik, mengurangi gaya kohesi antarbutir, mengadsorpsi kelembapan udara mikro, dan

memperbaiki fluiditas serbuk menuju ruang kompresi mesin cetak tablet (Allen et al., 2021).

2. Desikan Pengering Kemasan Primer: Silika gel dan saringan molekuler zeolit dikemas dalam kantong kecil (canister) di dalam botol kemasan obat untuk mengadsorpsi uap air atmosferik. Penurunan kelembapan relatif internal mencegah hidrolisis zat aktif yang rentan rusak seperti antibiotik golongan beta-laktam dan aspirin (Allen et al., 2021; Worch, 2021).
3. Masalah Adsorpsi Tak Diinginkan pada Jalur Administrasi: Interaksi adsorpsi dapat menimbulkan kerugian klinis yang berbahaya bila zat aktif obat terjerap pada dinding kemasan primer atau set selang infus intravena polivinil klorida (PVC). Senyawa sangat lipofil seperti diazepam, nitrogliserin, klormetiazol, dan protein biologis dapat teradsorpsi masif pada selang infus, sehingga dosis obat riil yang masuk ke peredaran darah pasien jauh lebih rendah daripada perhitungan resep dokter (Dahan et al., 2016).
4. Inaktivasi Pengawet Antimikroba: Eksipien polimerik berbobot molekul besar (seperti gom arab, metilselulosa, dan polisorbat) dapat mengadsorpsi senyawa pengawet paraben (metilparaben dan propilparaben), sehingga menurunkan fraksi pengawet

bebas yang aktif melawan kontaminasi mikroba sediaan sirup (Allen et al., 2021).

7.3 Kromatografi Adsorpsi dalam Analisis dan Pemurnian Senyawa Obat

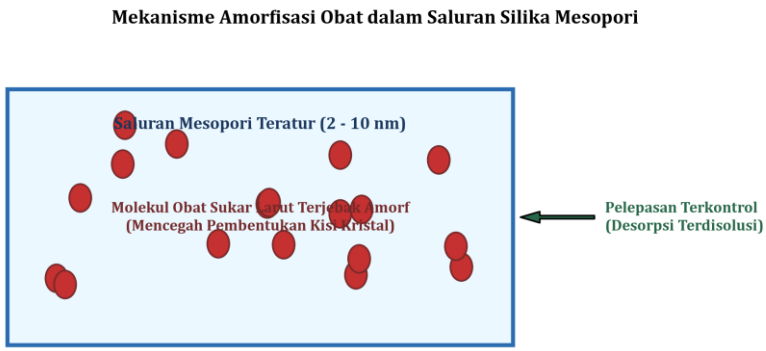
Kromatografi adsorpsi merupakan teknik pemisahan analitik dan preparatif yang didasarkan pada kompetisi molekul soluta dan molekul fase gerak untuk menempati situs aktif adsorpsi pada permukaan fase diam padat (Rouquerol et al., 2014; Worch, 2021). Dua konfigurasi utama yang menjadi pilar industri farmasi adalah:

1. Kromatografi Lapis Tipis (KLT): Menggunakan lempeng aluminium atau kaca yang dilapisi lapisan tipis silika gel atau alumina bermutu analitik dengan pengikat kalsium sulfat. KLT menjadi metode baku farmakope untuk identifikasi kemurnian zat aktif, deteksi pengotor degradasi obat, serta penapisan profil fitokimia ekstrak tanaman obat (Allen et al., 2021; Rouquerol et al., 2014).
2. Kromatografi Kolom Preparatif: Menggunakan kolom kaca atau baja yang dipadatkan dengan adsorben silika gel fase normal untuk mengisolasi dan memurnikan senyawa metabolit sekunder (seperti alkaloid, flavonoid, dan terpenoid) dari ekstrak fraksi kasar bahan alam

farmasi berdasarkan gradien elusi polaritas pelarut (Worch, 2021).

7.4 Adsorpsi dalam Sistem Penghantaran Obat (Drug Delivery Systems)

Pengembangan sistem penghantaran obat modern menghadapi tantangan berat berupa rendahnya kelarutan dalam air dari lebih dari 40% kandidat senyawa obat baru hasil sintesis kimia yang tergolong dalam kelas II dan IV BCS (Dahan et al., 2016; Vallet-Regi et al., 2007). Pemanfaatan material berpori nano, khususnya silika mesopori teratur seperti material MCM-41 dan SBA-15, menjadi terobosan strategis dalam meningkatkan bioavailabilitas obat oral (Charnay et al., 2004; Vallet-Regi et al., 2001).



Gambar 7.1 Skema Pemuatan Molekul Obat Sukar Larut ke dalam Saluran Silika Mesopori untuk Mempertahankan Bentuk Amorf dan Meningkatkan Laju Disolusi.

Mekanisme peningkatan kelarutan melalui silika mesopori berlangsung melalui fenomena pembatasan spasial atau spatial confinement effect (Charnay et al., 2004; Vallet-Regi et al., 2007):

1. Pemuatan Adsorptif Zat Aktif (Drug Loading): Molekul obat hidrofobik dilarutkan dalam pelarut organik mudah menguap, kemudian dikontakkan dengan serbuk silika mesopori. Molekul obat berdifusi masuk dan teradsorpsi kuat pada dinding pori yang berdiameter 2 hingga 10 nanometer (Charnay et al., 2004).
2. Pembentukan Keadaan Amorf Stabil: Diameter pori silika yang sangat sempit secara fisik mencegah molekul obat untuk menyusun diri kembali membentuk kisi-kisi kristal berenergi kisi tinggi saat pelarut diuapkan. Obat terperangkap dalam keadaan amorf dengan energi bebas permukaan yang tinggi (Vallet-Regi et al., 2001).
3. Peningkatan Laju Disolusi: Ketika sediaan mencapai cairan saluran pencernaan, bentuk amorf tidak memerlukan energi disosiasi kisi kristal untuk larut. Molekul air segera mendesak molekul obat keluar dari pori melalui proses desorpsi kompetitif cepat, sehingga meningkatkan konsentrasi jenuh obat dalam lumen usus dan melipatgandakan absorpsi sistemik (Dahan et al., 2016; Vallet-Regi et al., 2007).

7.5 Biosorben sebagai Material Farmasi Berkelanjutan

Konsep farmasi hijau (green pharmacy) mendorong transisi penggunaan polimer sintetis tak terurai menuju biopolimer alamiah yang terbarukan dan biokompatibel (Crini, 2005; Putra et al., 2025). Biopolimer kitosan dan asam alginat banyak dimanfaatkan sebagai matriks mikrokapsul penyalut enterik, pembawa hidrogel responsif stimulus pH, serta biosorben penangkap logam berat sisa katalis sintesis obat (Allen et al., 2021; Crini, 2005). Pemanfaatan biosorben cangkang telur dan biomassa pertanian terbukti sangat efektif dalam mendekontaminasi limbah cairan laboratorium formulasi farmasi (Putra et al., 2025, 2026).

Tabel 7.1 merangkum spektrum aplikasi fenomena adsorpsi dan bioadsorpsi dalam teknologi kefarmasian berdasarkan rujukan literatur ilmiah terkini (Allen et al., 2021; Cooney, 1995; Dahan et al., 2016; Putra et al., 2025; Vallet-Regi et al., 2001; Worch, 2021).

Tabel 7.1 Ringkasan Aplikasi Adsorpsi dan Bioadsorpsi dalam Bidang Farmasi.

Bidang Kefarmasian	Material Adsorben Digunakan	Prinsip Fisikokimia	Tujuan / Manfaat Klinis

Toksikologi Klinis	Karbon aktif farmasi	Fisisorpsi luas permukaan pori mikro	Menjerat racun di saluran cerna dan dialisis MDAC
Formulasi Tablet	Silika koloidal (Aerosil)	Adsorpsi kelembapan dan pelapis serbuk	Memperbaiki fluiditas serbuk kompresi langsung
Pengemasan Obat	Silika gel dan zeolit	Adsorpsi uap air selektif	Mencegah hidrolisis degradatif zat aktif higroskopis
Kimia Analisis	Silika gel kromatografi	Perbedaan afinitas adsorpsi fase diam	Pemisahan, identifikasi, dan pemurnian metabolit
Drug Delivery System	Silika mesopori (SBA-15)	Amorfisasi spasial dan desorpsi terkontrol	Meningkatkan kelarutan dan bioavailabilitas obat
Farmasi Berkelanjutan	Kitosan dan biosorben limbah	Biosorpsi pertukaran ion dan kelasi	Pengolahan limbah residu efluen pabrik farmasi

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Peningkatan Laju Disolusi Oral Obat Fenofibrat Menggunakan Pembawa Silika Mesopori SBA-15:

Fenofibrat merupakan agen penurun lipid lipofilik yang tergolong dalam kelas II BCS dengan kelarutan dalam air yang sangat rendah (< 0,5 mg/L), sehingga bioavailabilitas oralnya pada pasien hiperlipidemia sangat terbatas dan

tidak konsisten. Suatu riset formulasi memanfaatkan silika mesopori teratur tipe SBA-15 (diameter pori rata-rata 7,2 nm, luas permukaan 720 m2/g) untuk mengatasi masalah kelarutan tersebut.

Fenofibrat dimuat ke dalam pori SBA-15 melalui metode impregnasi pelarut etanol dengan efisiensi pemuatan mencapai 28% berat. Karakterisasi X-ray Diffraction (XRD) dan Differential Scanning Calorimetry (DSC) mengonfirmasi hilangnya puncak-puncak difraksi kristalin tajam dan puncak leleh endotermik obat, membuktikan fenofibrat telah terkonversi seutuhnya menjadi bentuk amorf di dalam pori nano. Uji disolusi in vitro pada medium simulasi cairan usus (pH 6,8) menunjukkan formulasi komposit fenofibrat-SBA-15 mampu melepaskan lebih dari 85% zat aktif dalam waktu 20 menit pertama, dibandingkan serbuk kristal fenofibrat murni yang hanya melarut kurang dari 15% pada rentang waktu yang sama. Pendekatan berbasis prinsip adsorpsi pori nano ini berhasil membuka peluang formulasi tablet oral bioekivalen dengan dosis zat aktif yang lebih rendah dan onset kerja yang lebih cepat.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Jelaskan mekanisme kerja karbon aktif dosis tunggal dalam mengikat toksin di saluran cerna dan mengapa waktu pemberian dalam satu jam pertama sangat memengaruhi keberhasilan terapi.
2. Uraikan konsep dialisis gastrointestinal pada terapi Multiple-Dose Activated Charcoal (MDAC) dan sebutkan dua contoh senyawa obat yang tepat diberikan tatalaksana tersebut.
3. Jelaskan peranan silika koloidal sebagai glidan dalam formulasi tablet kempa langsung dan mekanisme fisikokimia penstabilannya terhadap massa serbuk.
4. Mengapa molekul obat hidrofobik yang termuat di dalam saluran nano silika mesopori SBA-15 berada dalam keadaan amorf dan bagaimana keadaan tersebut dapat meningkatkan laju pelarutan obat oral?
5. Berikan dua contoh kasus kerugian klinis yang timbul akibat fenomena adsorpsi obat pada wadah kemasan primer polimer atau selang infus cairan intravena.

BAB 8
RANCANGAN PENELITIAN DAN PENGOLAHAN LIMBAH FARMASI DI LINGKUNGAN

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 8 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menganalisis ancaman ekologis dari residu farmasi sebagai pencemar baru (emerging contaminants) di badan air lingkungan.
2. Mengevaluasi keunggulan komparatif metode adsorpsi dan biosorpsi dibandingkan metode pengolahan limbah konvensional.
3. Merumuskan protokol operasional standar 6 tahapan perancangan penelitian adsorpsi skala laboratorium secara terstruktur.
4. Memilih teknik karakterisasi fisikokimia instrumen (FTIR, SEM-EDX, BET, XRD, pHpzc) yang relevan untuk membedah mekanisme penjerapan.

8.1 Permasalahan Residu Limbah Farmasi sebagai Kontaminan Baru di Lingkungan

Peningkatan konsumsi obat-obatan global untuk kesehatan manusia dan sektor peternakan memicu pelepasan residu senyawa aktif farmasi (pharmaceutical active compounds) ke dalam lingkungan perairan (Daughton & Ternes, 1999; Metcalf & Eddy, 2014). Kontaminan ini digolongkan sebagai pencemar yang baru

muncul atau emerging contaminants yang memiliki persistensi tinggi dan efek ekotoksikologis jangka panjang meskipun terdeteksi pada konsentrasi renik pada rentang nanogram hingga mikrogram per liter (Daughton & Ternes, 1999).

Golongan farmasi yang paling sering mencemari efluen perairan meliputi antibiotik (siprofloksasin, tetrasiklin, sulfametoksazol), analgesik non-steroid (diklofenak, ibuprofen, parasetamol), hormon steroid (etinilestradiol), agen penenang (karbamazepin), dan zat diagnostik radiokontras (Metcalf & Eddy, 2014). Ancaman paling berbahaya dari akumulasi residu antibiotik di perairan adalah fenomena tekanan seleksi mikroba pada konsentrasi sub-inhibitorik atau sub-inhibitory concentration (Daughton & Ternes, 1999). Paparan residu antibiotik dosis rendah secara terus-menerus memicu mutasi bakteri patogen dan mempercepat penyebaran gen resistensi antimikroba (antimicrobial resistance genes atau ARGs) melalui transfer gen horizontal antar mikroorganisme akuatik, yang berpotensi melahirkan galur bakteri kebal obat (superbugs) yang mengancam ketahanan kesehatan global (Daughton & Ternes, 1999; Metcalf & Eddy, 2014).

8.2 Keunggulan Adsorpsi dalam Remediasi Limbah Cair Farmasi

Pengolahan limbah konvensional seperti lumpur aktif biologis dan sedimentasi kimiawi terbukti tidak mampu mendegradasi struktur molekul farmasi recalcitrant yang stabil (Metcalf & Eddy, 2014). Teknologi oksidasi tingkat lanjut (Advanced Oxidation Processes atau AOPs) seperti fotokatalisis dan ozonasi sering kali terbentur pada biaya energi operasional yang sangat mahal serta risiko pembentukan produk samping degradasi (by-products) yang terkadang lebih toksik daripada senyawa induknya (Baskar et al., 2022).

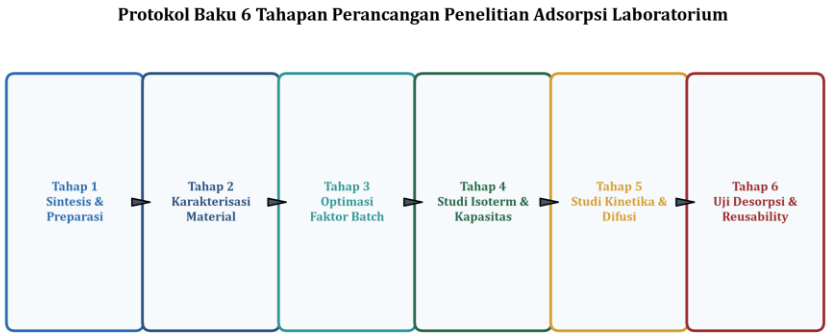
Metode adsorpsi dan bioadsorpsi menjadi pilihan teknologi paling prospektif karena memiliki sejumlah keunggulan komparatif (Crini, 2005; Putra et al., 2022, 2025):

1. Efisiensi penyisihan sangat tinggi untuk kontaminan berkonsentrasi renik hingga pekat (Putra et al., 2022).
2. Desain peralatan operasional yang sederhana, fleksibel, dan mudah dioperasikan di lapangan (Metcalf & Eddy, 2014).

3. Tidak menghasilkan lumpur limbah kimia beracun dan tidak memicu pembentukan produk samping mutagenik (Crini, 2005).
4. Ketersediaan bahan baku biosorben melimpah dari limbah biomassa pertanian dan industri pangan lokal yang mendukung prinsip ekonomi sirkular (Handayani et al., 2026; Putra et al., 2025).

8.3 Protokol Sistematis 6 Tahapan Perancangan Penelitian Adsorpsi

Pelaksanaan riset adsorpsi dan bioadsorpsi yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah memerlukan protokol perancangan bertahap yang runtut (Tran et al., 2017; Handayani et al., 2026).



Gambar 8.1 Diagram Alir Protokol Baku 6 Tahapan Perancangan Penelitian Adsorpsi Skala Laboratorium.

Enam tahapan pelaksanaan penelitian adsorpsi laboratorium dirumuskan secara sistematis (Tran et al., 2017; Baskar et al., 2022; Handayani et al., 2026):

1. Tahap 1 - Preparasi dan Aktivasi Adsorben

   Pemilihan bahan baku biomassa atau prekursor karbon, pencucian untuk menghilangkan kotoran pengotor terlarut, pengeringan pada oven suhu konstan, penggilingan dan pengayakan menggunakan mesh standar untuk memperoleh keseragaman ukuran butiran partikel, dilanjutkan dengan perlakuan aktivasi fisik atau modifikasi kimia (Putra et al., 2022).

2. Tahap 2 - Karakterisasi Fisikokimia Material

   Analisis instrumen komprehensif pada material adsorben sebelum dan sesudah adsorpsi untuk membuktikan mekanisme penjerapan (Nasra et al., 2025; Putra et al., 2024):

   a. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR): Mengidentifikasi gugus-gugus fungsi permukaan dan mendeteksi pergeseran bilangan gelombang pasca penyerapan (Putra et al., 2024).

   b. Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX): Memvisualisasikan topografi morfologi permukaan pori dan

menganalisis komposisi unsur atomik permukaan (Nasra et al., 2025).

c. Analisis BET (Brunauer-Emmett-Teller) dan BJH: Menentukan luas permukaan spesifik total, volume total pori, dan kurva distribusi diameter pori melalui adsorpsi-desorpsi gas nitrogen pada suhu 77 K (Thommes et al., 2015).

d. X-Ray Diffraction (XRD): Menganalisis derajat kristalinitas atau sifat amorf dari kerangka material penyerap (Nasra et al., 2025; Putra et al., 2025).

e. Penentuan Titik Muatan Nol (pHpzc): Mengukur titik perpotongan muatan permukaan melalui metode drift pH atau titrasi massa (Tran et al., 2017).

3. Tahap 3 - Optimasi Parameter Operasional Sistem Batch

   Pengujian faktor tunggal (one-factor-at-a-time atau OFAT) atau optimasi multivariabel menggunakan Response Surface Methodology (RSM) berbasis Central Composite Design (CCD) atau Box-Behnken (Box & Behnken, 1960; Handayani et al., 2026). Variabel yang dioptimasi meliputi pengaruh pH

larutan, dosis adsorben (g/L), waktu kontak pengocokan (menit), konsentrasi awal adsorbat (mg/L), dan suhu operasional (Handayani et al., 2026; Putra et al., 2022).

4. Tahap 4 - Studi Kesetimbangan Isoterm Adsorpsi

   Pengujian adsorpsi pada kondisi pH dan waktu optimum dengan memvariasikan konsentrasi awal soluta pada suhu konstan (Tran et al., 2017). Data kesetimbangan dimodelkan menggunakan persamaan nonlinier Langmuir, Freundlich, Temkin, dan Dubinin-Radushkevich (Lima et al., 2021).

5. Tahap 5 - Studi Dinamika Kinetika dan Mekanisme Difusi

   Pengambilan sampel analitik pada rentang interval waktu serial (misalnya 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240 menit) pada konsentrasi dan dosis optimum (Putra et al., 2022). Data laju dimodelkan dengan persamaan Pseudo-Orde Satu, Pseudo-Orde Dua, difusi intrapartikel Weber-Morris, dan model Elovich (Plazinski et al., 2020; Weber & Morris, 1963).

6. Tahap 6 - Uji Desorpsi, Regenerasi, dan Reusability

   Evaluasi potensi pelepasan kembali molekul adsorbat menggunakan berbagai eluen kimia regenerator (asam, basa, atau pelarut organik) dan pengujian

stabilitas retensi kapasitas serap minimum 3 hingga 5 siklus pakai ulang (Baskar et al., 2022; Handayani et al., 2023).

Tabel 8.1 merangkum parameter operasional dan kondisi uji laboratorium yang lazim diterapkan dalam penelitian adsorpsi limbah farmasi berdasarkan metodologi standar (Handayani et al., 2026; Metcalf & Eddy, 2014; Tran et al., 2017).

Tabel 8.1 Ringkasan Parameter Uji dalam Perancangan Penelitian Adsorpsi.

Parameter Operasional	Rentang Uji Standar Laboratorium	Metode Penentuan Optimum	Dampak Fisikokimia Utama
Nilai pH Larutan	Rentang pH 2,0 hingga 10,0	Kapasitas serap qe tertinggi	Mengendalikan muatan permukaan adsorben dan ionisasi obat
Dosis Adsorben	0,5 hingga 10,0 g/L	Titik infleksi efisiensi penyisihan	Menentukan jumlah situs aktif dan peluang aglomerasi butir
Waktu Kontak	5 hingga 360 menit	Kondisi laju q plateau (konstan)	Menentukan laju kinetika dan waktu retensi reaktor
Konsentrasi Awal	10 hingga 500 mg/L	Uji isoterm kesetimbangan	Memberikan gaya dorong gradien konsentrasi molekul
Suhu Operasional	298 K, 308 K, 318 K (25-45 C)	Plot linier termodinamika Van 't Hoff	Menentukan spontanitas serta sifat endotermik/eksotermik

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Remediasi Residu Antibiotik Tetrasiklin dari Efluen Rumah Sakit Menggunakan Biochar Sekam Padi Termodifikasi Besi:

Suatu penelitian merancang sistem pengolahan limbah cair rumah sakit terdesentralisasi untuk menyisihkan antibiotik tetrasiklin hidroklorida yang mencemari saluran pembuangan akhir pada konsentrasi rata-rata 25 mg/L dengan memanfaatkan limbah sekam padi melalui pirolisis dan modifikasi magnetit Fe3O4.

Uji optimasi menunjukkan kondisi adsorpsi optimum tercapai pada pH 5,0; dosis biochar 1,5 g/L; dan waktu kontak 90 menit dengan persentase penyisihan mencapai 94,8%. Analisis spektroskopi FTIR memperlihatkan hilangnya pita serapan karakteristik getaran cincin aromatik tetrasiklin dari larutan sisa dan munculnya puncak baru pada biochar pasca adsorpsi pada bilangan gelombang 1620 cm-1 (getaran C=O terkoordinasi) dan 1384 cm-1. Analisis kinetika mengonfirmasi kepatuhan data pada model Pseudo-Orde Dua (R2 = 0,996), sedangkan data isoterm paling sesuai dengan model Langmuir nonlinier dengan kapasitas maksimum (qm) sebesar 112,4 mg/g. Penerapan biochar magnetik ini membuktikan bahwa biomassa limbah lokal dapat dikonversi menjadi material bernilai tinggi

untuk memutus rantai penyebaran resistensi antimikroba di lingkungan perairan rumah sakit.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur:

1. Jelaskan mengapa keberadaan residu antibiotik di perairan lingkungan pada konsentrasi renik (sub-inhibitory concentration) dipandang sangat berbahaya bagi kesehatan masyarakat global.
2. Uraikan enam tahapan berurutan dalam merancang penelitian adsorpsi skala laboratorium dari tahap pemilihan bahan baku hingga uji penggunaan ulang material.
3. Jelaskan peranan teknik karakterisasi FTIR dan SEM-EDX dalam membuktikan terjadinya interaksi penjerapan molekul zat aktif obat pada permukaan material biosorben.
4. Sebutkan lima parameter operasional yang wajib dioptimasi dalam pengujian sistem batch dan uraikan pengaruh nilai pH larutan terhadap kinerja penjerapan.
5. Mengapa pengujian desorpsi dan regenerasi siklik (reusability) merupakan komponen penting yang

menentukan kelayakan komersial suatu material adsorben baru.

BAB 9
ANALISIS DATA DAN INTERPRETASI HASIL ADSORPSI

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 9 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu menguasai metode pemodelan dan evaluasi statistik data adsorpsi:

1. Menerapkan perhitungan neraca massa analitik secara tepat untuk menentukan kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan tanpa terjebak bias variasi massa.
2. Menganalisis kurva kesetimbangan isoterm menggunakan pendekatan regresi nonlinier guna menghindari distorsi galat matematis akibat transformasi linier.
3. Mengevaluasi dinamika kinetika adsorpsi dan membedah kontribusi mekanisme difusi film serta difusi intrapartikel melalui diagnosis residual multi-metode.
4. Menerapkan uji statistik validasi model yang mencakup koefisien determinasi (R2), Root Mean Square Error (RMSE), Chi-Square (chi^2), dan kriteria informasi AIC/BIC.

5. Menyajikan data, tabel, dan grafik hasil adsorpsi secara etis, ilmiah, dan terhindar dari spekulasi overinterpretasi mekanistik.

9.1 Perhitungan Kapasitas dan Efisiensi Adsorpsi

9.1.1 Data Dasar dalam Eksperimen Adsorpsi

Eksperimen adsorpsi fasa cair menghasilkan data primer berupa konsentrasi zat terlarut sebelum dan sesudah kontak dengan material penyerap (Tran et al., 2017; Worch, 2021). Evaluasi kinerja adsorben diturunkan dari neraca massa analitik dalam wadah tertutup. Konsentrasi awal adsorbat dinyatakan sebagai C0 (mg/L), konsentrasi sisa pada waktu t adalah Ct (mg/L), dan konsentrasi saat kesetimbangan tercapai adalah Ce (mg/L) (Putra et al., 2022, 2026).

Kapasitas adsorpsi pada waktu kontak t (qt) dihitung dengan rumus neraca massa fase padat (Tran et al., 2017):

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m}$$

Kapasitas adsorpsi pada keadaan kesetimbangan (qe) dinyatakan melalui rumus fundamental berikut (Tran et al., 2017):

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m}$$

Simbol V menyatakan volume larutan uji dalam liter (L) dan m adalah massa adsorben kering dalam gram (g) (Tran et al., 2017). Penggunaan persamaan neraca massa tersebut mengasumsikan bahwa seluruh penurunan konsentrasi analit dalam larutan terjadi murni akibat penjerapan pada permukaan padatan, bukan karena presipitasi kimia mandiri, fotodegradasi, atau adsorpsi pada dinding wadah pengujian (Lima et al., 2021). Penggunaan kontrol eksperimen tanpa adsorben (blank solution) merupakan syarat metodologis wajib untuk memvalidasi asumsi tersebut (Tran et al., 2017; Handayani et al., 2024).

9.1.2 Efisiensi Penyisihan Adsorbat

Efisiensi penyisihan (%R) menggambarkan fraksi persentase adsorbat yang berhasil dihilangkan dari fasa cair terhadap konsentrasi mula-mula (Putra et al., 2022; Worch, 2021):

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%$$

Nilai kapasitas adsorpsi (qe) dan efisiensi penyisihan (%R) memberikan perspektif informasi yang sangat berbeda mengenai performa adsorben (Tran et al., 2017). Kapasitas adsorpsi qe mengukur kemampuan intrinsik penjerapan material per satuan massa padatan, sedangkan

efisiensi penyisihan menggambarkan tingkat kebersihan akhir efluen larutan (Putra et al., 2025, 2026).

Contoh kasus numerik dapat memperjelas perbedaan interpretasi tersebut (Tran et al., 2017). Suatu eksperimen menggunakan 0,10 gram adsorben dalam 100 mL larutan dengan konsentrasi awal 100 mg/L menghasilkan konsentrasi kesetimbangan 20 mg/L (Putra et al., 2022). Kapasitas adsorpsi qe yang diperoleh adalah (100 - 20) x 0,1 / 0,10 = 80 mg/g dengan efisiensi penyisihan sebesar 80%. Nilai 80 mg/g tersebut tidak boleh langsung disebut sebagai kapasitas maksimum adsorben karena besaran qe sangat bergantung pada konsentrasi awal yang diuji dan belum tentu berada pada kondisi saturasi permukaan (Lima et al., 2021; Tran et al., 2017).

9.1.3 Pengaruh Massa Adsorben terhadap Interpretasi Data

Variasi massa adsorben pada volume dan konsentrasi larutan yang tetap sering kali menimbulkan kekeliruan interpretasi bila peneliti tidak memahami neraca massa secara utuh (Tran et al., 2017). Peningkatan dosis adsorben dari 1 g/L menjadi 5 g/L umumnya meningkatkan nilai efisiensi penyisihan dari 60% menjadi 95% karena ketersediaan total situs aktif dalam reaktor menjadi lima kali lipat lebih banyak (Putra et al., 2024; Worch, 2021).

Kapasitas adsorpsi per gram adsorben (qe) pada saat yang sama justru mengalami penurunan signifikan seiring naiknya dosis massa padatan (Tran et al., 2017). Penurunan nilai qe tersebut terjadi karena jumlah molekul adsorbat yang tersedia dalam larutan menjadi faktor pembatas (limiting factor), sehingga sebagian besar situs aktif adsorben tetap kosong dan tidak terisi penuh (Putra et al., 2022). Peneliti pemula kerap keliru menyimpulkan bahwa penambahan massa menurunkan kinerja adsorben, padahal fenomena tersebut murni konsekuensi pembagian matematis neraca massa (Tran et al., 2017).

9.2 Analisis dan Interpretasi Isoterm Adsorpsi

9.2.1 Makna Isoterm dalam Penelitian Adsorpsi

Kurva isoterm adsorpsi memetakan hubungan fungsional antara kapasitas kesetimbangan qe terhadap konsentrasi residu Ce pada suhu tetap (Al-Ghouti & Da'ana, 2020; Langmuir, 1918). Pemodelan isoterm menyediakan parameter fisikokimia untuk memprediksi kapasitas retensi jenuh maksimum material, memperkirakan afinitas interaksi antarmuka, dan memberikan petunjuk awal mengenai homogenitas energi permukaan (Freundlich, 1906; Lima et al., 2021).

9.2.2 Interpretasi Model Langmuir

Model Langmuir mengasumsikan penjerapan terjadi secara monolayer terlokalisasi pada situs aktif yang homogen secara energetika tanpa interaksi lateral antar molekul adsorbat (Langmuir, 1918). Persamaan nonlinier Langmuir dirumuskan sebagai hubungan matematis berikut (Langmuir, 1918; Tran et al., 2017):

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

Kapasitas monolayer maksimum (qm) mencerminkan kondisi teoretis ketika seluruh situs aktif permukaan tertutup sempurna oleh satu lapisan molekul adsorbat (Langmuir, 1918). Konstanta KL berkaitan langsung dengan energi bebas pengikatan, di mana nilai KL yang semakin besar menandakan afinitas permukaan yang semakin kuat (Al-Ghouti & Da'ana, 2020; Putra et al., 2026).

Karakteristik kurva Langmuir dievaluasi melalui faktor pemisahan tak berdimensi RL (Hall et al., 1966; Handayani et al., 2024):

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0}$$

Nilai RL yang berada dalam rentang 0 < RL < 1 menunjukkan bahwa proses adsorpsi bersifat menguntungkan

(favourable) pada seluruh rentang konsentrasi operasional yang dipelajari (Hall et al., 1966; Putra et al., 2022).

9.2.3 Interpretasi Model Freundlich

Model Freundlich merupakan model empiris untuk sistem adsorpsi pada permukaan heterogen berenergi eksponensial yang memungkinkan terjadinya pembentukan lapisan jamak atau multilayer (Freundlich, 1906). Bentuk matematis nonlinier model Freundlich dirumuskan sebagai (Freundlich, 1906; Lima et al., 2021):

$$q_e = K_F C_e^{1/n}$$

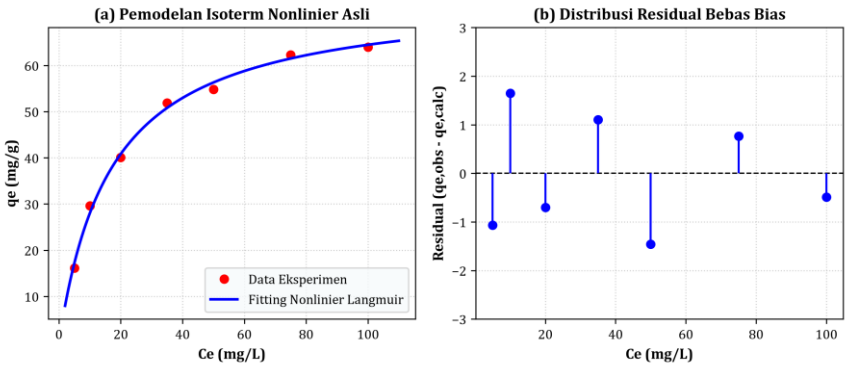
Parameter KF berkorelasi dengan kapasitas penjerapan relatif material, sedangkan 1/n mencerminkan intensitas adsorpsi atau derajat heterogenitas permukaan (Freundlich, 1906; Al-Ghouti & Da'ana, 2020). Nilai 1/n di bawah 1,0 mengonfirmasi bahwa proses adsorpsi berlangsung normal dan menguntungkan, di mana situs-situs aktif dengan afinitas tertinggi akan terisi terlebih dahulu pada konsentrasi rendah, diikuti oleh pengisian situs-situs berenergi lebih rendah seiring naiknya konsentrasi larutan (Handayani et al., 2023; Putra et al., 2026).

9.2.4 Transformasi Linier versus Regresi Nonlinier

Transformasi linier persamaan Langmuir (seperti plot Ce/qe terhadap Ce) atau Freundlich (plot log qe terhadap log

Ce) telah digunakan selama beberapa dekade untuk menyederhanakan perhitungan regresi (Lima et al., 2019; Tran et al., 2017). Literatur ilmiah modern (seperti publikasi Tran et al., 2017 dan Siderius et al., 2025) secara tegas mengkritisi pendekatan linierisasi tersebut.

Linearisasi secara matematis mendistorsi struktur galat eksperimen (error distribution) dan melanggar asumsi dasar homoskedastisitas pada analisis regresi kuadrat terkecil (Cherkasov, 2020; Lima et al., 2019). Transformasi linier memberikan pembobotan galat yang tidak proporsional pada titik-titik data konsentrasi rendah atau konsentrasi tinggi, sehingga parameter qm dan KL yang dihasilkan sering kali bias (Siderius et al., 2025; Tran et al., 2017). Penelitian adsorpsi modern sangat menganjurkan penerapan regresi nonlinier langsung menggunakan bentuk asli persamaan matematika untuk menjamin keakuratan estimasi parameter (Handayani et al., 2024; Mikolajczyk et al., 2024).



Gambar 9.1 (a) Kurva Fitting Regresi Nonlinier Langmuir terhadap Data Eksperimen, dan (b) Plot Distribusi Residual Acak Bebas Bias Sistematis.

9.3 Analisis Kinetika Adsorpsi dan Mekanisme Perpindahan Massa

9.3.1 Model Pseudo-Orde Satu dan Pseudo-Orde Dua

Kinetika adsorpsi dievaluasi melalui model Pseudo-Orde Satu Lagergren dan Pseudo-Orde Dua Ho-McKay (Ho & McKay, 1999; Lagergren, 1898; Plazinski et al., 2020). Persamaan nonlinier Pseudo-Orde Satu dinyatakan sebagai hubungan berikut (Lagergren, 1898):

$$q_t = q_e(1 - \exp(-k_1 t))$$

Persamaan nonlinier Pseudo-Orde Dua dinyatakan sebagai hubungan waktu terhadap pengisian situs aktif (Ho & McKay, 1999):

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

Kecocokan data terhadap model Pseudo-Orde Dua (ditandai oleh koefisien determinasi tinggi dan kesesuaian nilai qe kalkulasi dengan qe eksperimen) sering kali dijumpai pada sistem pengolahan polutan air (Ho & McKay, 1999; Putra et al., 2022, 2026). Peneliti harus berhati-hati agar tidak langsung menyimpulkan kemisorpsi murni hanya dari nilai R2 Pseudo-Orde Dua tanpa menyertakan konfirmasi karakterisasi spektroskopi permukaan seperti FTIR atau XPS (Plazinski et al., 2020; Putra et al., 2024).

9.3.2 Model Difusi Intrapartikel dan Tahanan Film Cairan

Model difusi intrapartikel Weber-Morris dirumuskan melalui persamaan akar kuadrat waktu kontak (Weber & Morris, 1963):

$$q_t = k_{id} t^{0.5} + C$$

Konstanta intersep C memberikan estimasi mengenai ketebalan lapisan batas hidrodinamik di sekitar partikel padatan (Weber & Morris, 1963; Boyd et al., 1947). Nilai C yang bernilai positif besar membuktikan adanya kontribusi signifikan dari tahanan difusi film eksternal pada menit-menit awal kontak sebelum proses difusi intrapartikel pori mengambil alih kendali transfer massa (Handayani et al., 2024; Putra et al., 2026).

9.4 Analisis Statistik dan Validasi Model Adsorpsi

9.4.1 Keterbatasan Koefisien Determinasi (R2)

Koefisien determinasi (R2) secara luas dilaporkan sebagai tolok ukur kecocokan model, namun metrik ini memiliki keterbatasan serius ketika membandingkan model linier terhadap model nonlinier, atau saat membandingkan model dua parameter (Langmuir) terhadap model tiga parameter (Redlich-Peterson atau Sips) (Mikolajczyk et al., 2024; Tran et al., 2017). Penambahan jumlah parameter estimasi secara otomatis meningkatkan nilai R2 tanpa selalu mencerminkan kesesuaian fisik model yang sebenarnya (Cherkasov, 2020; Siderius et al., 2025).

9.4.2 Metrik Evaluasi Galat Multi-Metode (RMSE, SSE, Chi-Square, AIC, BIC)

Validasi kecocokan model adsorpsi yang kredibel memerlukan evaluasi gabungan dari berbagai fungsi galat objektif (Lima et al., 2021; Mikolajczyk et al., 2024; Tran et al., 2017):

1. Root Mean Square Error (RMSE): Mengukur besaran akar kuadrat rata-rata dari kuadrat selisih antara nilai eksperimen dan nilai prediksi (Tran et al., 2017):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-p}\sum_{i=1}^{N}(q_{e,exp} - q_{e,cal})^2}$$

Simbol N adalah jumlah titik data pengamatan dan p adalah jumlah parameter model yang diestimasi (Mikolajczyk et al., 2024).

2. Sum of Squared Errors (SSE): Menjumlahkan kuadrat deviasi residual keseluruhan data pengamatan (Lima et al., 2021):

$$SSE = \sum_{i=1}^{N} (q_{e,exp} - q_{e,cal})^2$$

3. Statistik Uji Chi-Square (chi^2): Mengukur perbedaan kuadrat relatif terhadap nilai prediksi model untuk meminimalkan bias pada konsentrasi rendah (Tran et al., 2017):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N} \frac{(q_{e,exp} - q_{e,cal})^2}{q_{e,cal}}$$

4. Kriteria Informasi Akaike (Akaike Information Criterion / AIC): Memberikan penalti matematis terhadap model yang menggunakan jumlah parameter berlebih guna mencegah overfitting (Mikolajczyk et al., 2024):

$$AIC = N\ln\left(\frac{SSE}{N}\right) + 2p$$

5. Kriteria Informasi Bayesian (Bayesian Information Criterion / BIC): Memberikan penalti yang lebih tegas

berbasis ukuran sampel data pengamatan (Cherkasov, 2020; Mikolajczyk et al., 2024):

$$BIC = N\ln\left(\frac{SSE}{N}\right) + p\ln(N)$$

Model terbaik dipilih berdasarkan kombinasi nilai R2 tertinggi, nilai RMSE dan Chi-square terendah, serta nilai AIC dan BIC paling minimum (Mikolajczyk et al., 2024; Siderius et al., 2025; Tran et al., 2017).

9.4.3 Koreksi Perhitungan Termodinamika Bebas Dimensi

Publikasi terkini (seperti ulasan kritis Lima et al., 2021 dan Chen et al., 2021) menggarisbawahi kekeliruan konseptual yang sangat umum terjadi dalam perhitungan parameter termodinamika adsorpsi. Banyak artikel ilmiah langsung memasukkan konstanta kesetimbangan Langmuir (KL dalam L/mg) atau konstanta distribusi Kd (dalam mL/g) ke dalam rumus Delta G = -RT ln K (Chen et al., 2021; Lima et al., 2021). Tindakan tersebut secara termodinamika keliru karena argumen dalam fungsi logaritma natural (ln) wajib berupa besaran murni tak berdimensi (dimensionless) (Chen et al., 2021; Siderius et al., 2025).

Konversi konstanta kesetimbangan menuju bentuk standar tak berdimensi dapat dilakukan dengan mengalikan

konstanta afinitas terhadap massa jenis pelarut standar air murni (~1000 g/L) atau menggunakan fraksi mol/konsentrasi standar 1 mol/L (Chen et al., 2021; Lima et al., 2021). Peneliti harus secara eksplisit mendokumentasikan metode konversi satuan yang digunakan agar nilai Delta G yang dilaporkan sahih secara termodinamika klasik (Handayani et al., 2024; Lima et al., 2021).

9.5 Penyajian Data Ilmiah dan Pencegahan Overinterpretasi

Penyusunan laporan hasil riset adsorpsi yang bermutu menuntut standar integritas penyajian data yang tinggi (Mikolajczyk et al., 2024; Tran et al., 2017):

1. Penyajian Tabel Data Lengkap: Tabel hasil penentuan isoterm dan kinetika wajib menyertakan nilai parameter model, galat standar (standard error), nilai metrik RMSE, Chi-square, dan rentang konsentrasi uji operasional (Tran et al., 2017).
2. Pembuatan Grafik Saintifik yang Jelas: Grafik isoterm dan kinetika harus menampilkan titik-titik data eksperimen riil disertai bilah galat (error bars) dari minimal tiga kali replikasi (triplo), ditimpa dengan kurva garis regresi nonlinier mulus (Siderius et al., 2025).

3. Integrasi Karakterisasi Permukaan: Pembahasan mekanisme tidak boleh hanya berspekulasi dari hasil kurva isoterm semata, melainkan wajib diintegrasikan dengan data perubahan gugus fungsi FTIR, morfologi SEM, dan luas pori BET (Nasra et al., 2025; Putra et al., 2024).
4. Pencegahan Overinterpretasi Mekanistik: Peneliti tidak boleh mengklaim terjadinya kemisorpsi mutlak hanya karena nilai R2 Pseudo-Orde Dua tinggi, atau mengklaim monolayer homogen hanya dari nilai R2 Langmuir, tanpa didukung bukti spektroskopi ikatan kimia nyata (Plazinski et al., 2020; Putra et al., 2026).

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Aplikasi Regresi Nonlinier dan Validasi Statistik pada Adsorpsi Parasetamol oleh Karbon Mesopori:

Suatu penelitian mengevaluasi kapasitas penjerapan parasetamol dari limbah farmasi cair menggunakan karbon mesopori pada rentang konsentrasi 10 hingga 200 mg/L di mana data kesetimbangan diuji menggunakan regresi linier klasik dan regresi nonlinier langsung pada model Langmuir dan Freundlich.

Hasil analisis memperlihatkan perbedaan estimasi parameter yang sangat mencolok antara kedua metode

pemodelan. Regresi linier Langmuir (tipe 1) menghasilkan qm sebesar 96,2 mg/g dengan R2 sebesar 0,985. Regresi nonlinier menghasilkan qm sebesar 88,4 mg/g dengan R2 sebesar 0,996; RMSE sebesar 1,18 mg/g; dan Chi-square sebesar 0,82. Analisis distribusi residual pada regresi linier memperlihatkan pola melengkung sistematis (heteroskedastisitas parah), membuktikan bahwa linearisasi menimbulkan bias kalkulasi signifikan pada konsentrasi rendah. Penerapan regresi nonlinier menghasilkan sebaran residual acak di sekitar sumbu nol dan nilai estimasi parameter yang jauh lebih akurat untuk perancangan kolom adsorpsi kontinu skala industri.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur berdasarkan metodologi analisis data adsorpsi terkini:

1. Suatu pengujian menggunakan 0,20 gram adsorben dalam 100 mL larutan dengan konsentrasi awal adsorbat 150 mg/L menghasilkan konsentrasi akhir kesetimbangan sebesar 30 mg/L. Hitunglah: (a) Kapasitas adsorpsi kesetimbangan qe dalam mg/g, (b) Persentase efisiensi penyisihan (%R), dan (c) Jelaskan mengapa kedua

parameter tersebut memberikan informasi yang berbeda mengenai kinerja adsorben.

2. Jelaskan tiga kelemahan mendasar dari metode linearisasi persamaan isoterm Langmuir dan Freundlich dalam publikasi ilmiah kontemporer.
3. Uraikan mengapa koefisien determinasi R2 tidak memadai sebagai kriteria tunggal dalam membandingkan model dua parameter (Langmuir) dengan model tiga parameter seperti Sips atau Redlich-Peterson.
4. Bagaimana fungsi kriteria informasi AIC dan BIC dalam mencegah terjadinya fenomena overfitting pada analisis kurva adsorpsi?
5. Jelaskan tata cara konversi konstanta kesetimbangan Langmuir (KL) yang memiliki satuan L/mg agar memenuhi kaidah termodinamika bebas dimensi pada persamaan Van 't Hoff.

BAB 10
REGENERASI, REUSABILITY, DAN KEBERLANJUTAN ADSORBEN

Capaian Pembelajaran

Setelah menyelesaikan pembelajaran pada Bab 10 ini, pembaca dan mahasiswa diharapkan mampu menguasai strategi desorpsi, penggunaan ulang siklik, dan keberlanjutan material adsorben:

1. Menguraikan perbedaan mendasar antara desorpsi fisikokimia dan regenerasi menyeluruh pada material adsorben jenuh.
2. Menganalisis berbagai metode regenerasi material (kimia, termal, elektrokimia, dan biologis) beserta keunggulan dan keterbatasannya.
3. Mengevaluasi indikator stabilitas penggunaan ulang (reusability) dan membedah mekanisme penurunan kapasitas retensi antar siklus.
4. Menerapkan konsep ekonomi sirkular (circular economy) dan pemulihan sumber daya (resource recovery) dari material adsorben bekas atau spent adsorbent.

5. Mengintegrasikan kerangka penilaian daur hidup (Life Cycle Assessment / LCA) dan analisis tekno-ekonomi (Techno-Economic Analysis / TEA) dalam rekayasa adsorben masa depan.

10.1 Konsep Regenerasi dan Desorpsi Adsorben

10.1.1 Kejenuhan Adsorben dan Kebutuhan Regenerasi

Adsorben mengalami kondisi kejenuhan (exhaustion) ketika sebagian besar situs aktif permukaan yang relevan telah terisi oleh molekul adsorbat, sehingga kemampuan penyerapan efluen menurun drastis mendekati nol (Baskar et al., 2022; Worch, 2021). Pembuangan material adsorben jenuh langsung ke lingkungan tanpa pengolahan lanjutan bertentangan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan dan memicu pencemaran sekunder (Bayuo et al., 2024; Fouda-Mbanga et al., 2024).

Regenerasi merupakan proses pemulihan kapasitas adsorpsi material melalui pembersihan situs-situs aktif permukaan yang tersumbat, sehingga material dapat dioperasikan kembali pada siklus pengolahan selanjutnya secara berulang (Baskar et al., 2022; Putra et al., 2025).

10.1.2 Perbedaan Esensial antara Desorpsi dan Regenerasi

Distingsi antara desorpsi dan regenerasi perlu dipahami secara mendalam dalam rekayasa proses pemisahan (Baskar et al., 2022; Worch, 2021):

1. Desorpsi: Fenomena pelepasan spesies adsorbat dari permukaan adsorben menuju fasa cair atau gas eluen. Desorpsi merupakan proses perpindahan massa antarmuka yang spesifik terhadap interaksi soluta (Bayuo et al., 2024).
2. Regenerasi: Proses pemulihan fungsi material secara komprehensif yang mencakup pelepasan adsorbat (desorpsi), pemulihan reaktivitas gugus fungsional, dekontaminasi pengotor sekunder, serta rekonstruksi kestabilan pori dan mekanik padatan (Baskar et al., 2022; Fouda-Mbanga et al., 2024).

10.1.3 Pendekatan Metode Regenerasi Adsorben

Metode regenerasi material dikelompokkan ke dalam empat pendekatan utama berdasarkan mekanisme fisikokimianya (Bayuo et al., 2024; Fouda-Mbanga et al., 2024):

1. Regenerasi Kimia: Menggunakan larutan eluen kimia cair untuk mengubah kesetimbangan interaksi permukaan-adsorbat (Baskar et al., 2022):
    a. Elusi Asam (HCl, HNO_3, H_2SO_4): Sangat efektif melepaskan kation logam berat melalui proses protonasi kompetitif gugus fungsi karboksilat dan amina (Putra & Fitri, 2016; Putra et al., 2022).
    b. Elusi Basa (NaOH, KOH): Efektif mendesorpsi zat warna anionik dan senyawa obat asam organik melalui deprotonasi permukaan (Handayani et al., 2023; Putra et al., 2026).
    c. Pelarut Organik (Etanol, Metanol, Aseton): Memutus interaksi fisisorpsi hidrofobik dan gaya van der Waals molekul obat netral (Worch, 2021).
    d. Agen Pengkelat (EDTA, Asam Sitrat): Membentuk senyawa kompleks khelat yang sangat stabil dengan ion logam polivalen (Bayuo et al., 2024).
2. Regenerasi Termal: Pemanasan adsorben pada suhu tinggi (300 hingga 800 derajat Celsius) dalam atmosfer terkontrol untuk mendesorpsi gas volatil atau mendegradasi molekul organik yang terperangkap dalam pori (Marsh & Reinoso, 2006; Zhou et al., 2024).

3. Regenerasi Elektrokimia: Penerapan beda potensial listrik pada elektroda karbon untuk menginduksi desorpsi elektrostatik atau mendestruksi polutan organik secara oksidasi elektrokimia langsung (Baskar et al., 2022; Fouda-Mbanga et al., 2024).
4. Regenerasi Biologis dan Fotokatalitik: Pemanfaatan biofilm mikroba pengurai atau iradiasi sinar tampak pada semikonduktor komposit untuk mendegradasi kontaminan teradsorpsi secara in-situ (Faheem et al., 2025; Zhang et al., 2021).

Tabel 10.1 merangkum perbandingan metode regenerasi material adsorben berdasarkan kajian terkini (Baskar et al., 2022; Bayuo et al., 2024; Fouda-Mbanga et al., 2024).

Tabel 10.1 Perbandingan Metode-Metode Regenerasi Adsorben.

Metode Regenerasi	Mekanisme Kerja	Keunggulan Utama	Kelemahan dan Tantangan
Regenerasi Asam/Basa	Perubahan pH dan protonasi situs aktif	Murah, cepat, kondisi operasi lunak	Menghasilkan limbah eluen cair sekunder
Pelarut Organik	Pelarutan soluta dan pemutusan gaya London	Efektif untuk molekul obat lipofilik	Pelarut mudah menguap dan memerlukan distilasi
Regenerasi Termal	Pirolisis dan penguapan suhu tinggi	Efektif untuk senyawa organik kuat	Konsumsi energi tinggi, degradasi massa karbon

Regenerasi Elektrokimia	Oksidasi anodik dan polarisasi medan	Tanpa bahan kimia tambahan, kontrol presisi	Investasi modul reaktor elektroda mahal
Fotokatalitik	Degradasi radikal hidroksil oleh cahaya	Dekonstruksi polutan tuntas hingga CO2	Keterbatasan penetrasi cahaya pada serbuk pekat

10.2 Reusability dan Stabilitas Siklik Adsorben

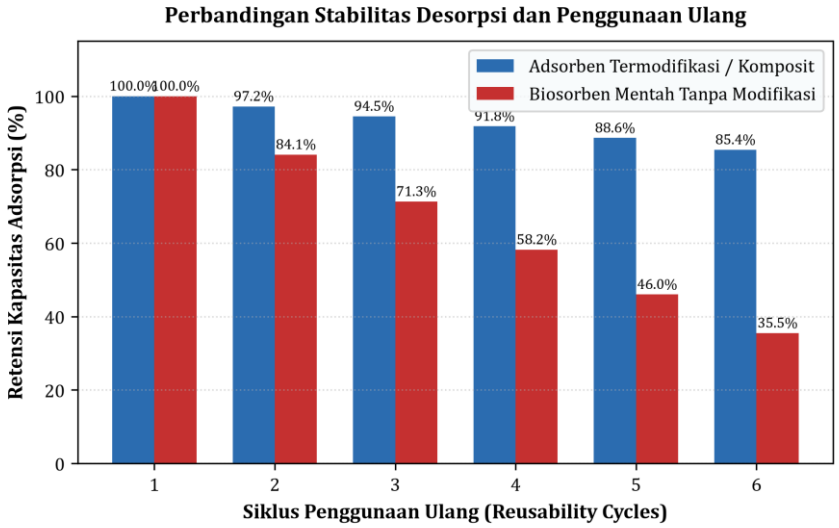
10.2.1 Parameter Evaluasi Reusability

Kemampuan penggunaan ulang (reusability) merupakan indikator penentu kelayakan komersial material (Baskar et al., 2022; Handayani et al., 2023). Efisiensi desorpsi (%D) dan retensi kapasitas siklik (Rn) dihitung melalui rumus neraca analitik (Bayuo et al., 2024):

$$\%D = \frac{C_{des}V_{des}}{q_e m} \times 100\%$$

$$R_n = \frac{q_{e,n}}{q_{e,1}} \times 100\%$$

Simbol Cdes adalah konsentrasi analit dalam cairan eluen (mg/L), Vdes adalah volume eluen (L), qe,n adalah kapasitas serap pada siklus ke-n, dan qe,1 adalah kapasitas serap pada siklus pertama (Baskar et al., 2022; Putra et al., 2025).



Gambar 10.1 Perbandingan Retensi Kapasitas Adsorpsi antar Siklus Penggunaan Ulang pada Adsorben Termodifikasi Komposit dan Biosorben Mentah.

10.2.2 Mekanisme Penurunan Kapasitas Siklik

Penurunan kapasitas serap seiring pertambahan siklus pengoperasian dipicu oleh tiga faktor fisikokimia utama (Bayuo et al., 2024; Fouda-Mbanga et al., 2024):

1. Penjepitan Ireversibel (Pore Blockage): Sebagian molekul adsorbat berikatan sangat kuat (kemisorpsi) pada pori-pori sempit dan tidak mampu dilepaskan oleh eluen lunak, sehingga mengurangi volume pori efektif (Handayani et al., 2023; Worch, 2021).
2. Kerusakan Gugus Fungsi Kimia: Perlakuan asam atau basa kuat secara berulang dapat mengikis atau

menghidrolisis gugus amina dan karboksil pada biopolimer (Baskar et al., 2022; Putra et al., 2024).

3. Kehilangan Massa Padatan: Pengikisan mekanik butiran partikel selama proses pengocokan, penyaringan, dan sentrifugasi menyebabkan hilangnya sebagian massa adsorben (Putra et al., 2022, 2025).

10.3 Pemulihan Sumber Daya dan Hierarki Pengelolaan Adsorben Bekas

Paradigma pengolahan limbah modern bertransformasi dari sekadar penghilangan polutan (pollutant removal) menuju pemulihan sumber daya bernilai (resource recovery) (Bagotia, 2025; Chaudhary et al., 2024). Adsorpsi bertindak sebagai unit pra-konsentrasi yang memadatkan soluta renik dari volume air limbah masif menjadi fase padatan pekat yang bernilai ekonomi (Zhou et al., 2024).



Gambar 10.2 Hierarki Sirkular Pengelolaan Material Adsorben Jenuh (Spent Adsorbent).

Hierarki pengelolaan spent adsorbent mengedepankan empat prioritas tindakan berkelanjutan (Bagotia, 2025; Chaudhary et al., 2024; Zhou et al., 2024):

1. Prioritas Pertama - Regenerasi dan Pakai Ulang: Mengoperasikan kembali adsorben dalam siklus penjerapan hingga mencapai batas retensi minimum (Handayani et al., 2023; Putra et al., 2022).
2. Prioritas Kedua - Pemulihan Logam Kritis: Mengekstraksi kembali kation logam strategis atau berharga seperti litium, nikel, kobalt, tembaga, dan perak dari eluen desorpsi terkonsentrasi (Baskar et al., 2022; Zhou et al., 2024).
3. Prioritas Ketiga - Upcycling Material: Mengkonversi material adsorben jenuh yang kaya karbon dan logam transisi menjadi katalis heterogen untuk reaksi kimia industri atau campuran geopolimer bahan konstruksi ramah lingkungan (Bagotia, 2025; Chaudhary et al., 2024).
4. Prioritas Terakhir - Solidifikasi dan Penimbunan Aman: Mengimobilisasi adsorben jenuh yang mengandung toksin persisten dalam matriks semen kedap air sebelum

ditimbun di fasilitas pembuangan limbah berbahaya atau landfill kelas 1 (Faheem et al., 2025).

10.4 Green Adsorption dan Integrasi Circular Economy

Konsep Green Adsorption menuntut rekayasa proses penjerapan yang memenuhi kriteria keberlanjutan holistik (Faheem et al., 2025; Li et al., 2023; Zhang et al., 2021):

1. Pemanfaatan Prekursor Terbarukan: Penggunaan limbah biomassa pertanian tanpa menimbulkan persaingan sumber daya pangan atau non-food biomass (Crini, 2005; Handayani et al., 2026; Putra et al., 2022).
2. Sintesis Bebas Toksin: Menghindari pelarut organik beracun dan meminimalkan konsumsi energi aktivasi termal (Li et al., 2023).
3. Trade-off Kapasitas dan Keberlanjutan: Mengutamakan material yang mudah diregenerasi berulang kali dengan kapasitas serap moderat dibandingkan material berkapasitas sangat tinggi namun bersifat sekali pakai atau disposable (Baskar et al., 2022).
4. Penilaian Daur Hidup (Life Cycle Assessment / LCA): Mengevaluasi jejak karbon (carbon footprint), potensi pemanasan global, dan konsumsi energi komparatif dari tahap ekstraksi bahan baku hingga pembuangan akhir (Zhang et al., 2021).

5. Analisis Tekno-Ekonomi (Techno-Economic Analysis / TEA): Mengkalkulasi biaya riil operasional per meter kubik air olahan untuk membuktikan kelayakan implementasi industri nyata (Faheem et al., 2025; Li et al., 2023).

Studi Kasus / Aplikasi Klinis

Studi Siklus Desorpsi dan Pemulihan Logam Tembaga dari Efluen Farmasi Menggunakan Biosorben Kitosan-Magnetit:

Suatu industri farmasi mengevaluasi reusability komposit kitosan-magnetit untuk mengolah efluen pencucian reaktor sintesis yang tercemar ion tembaga (Cu^{2+}) sebesar 60 mg/L di mana regenerasi dilakukan menggunakan eluen asam klorida (HCl 0,1 M) yang dikontakkan selama 30 menit pada suhu ruang.

Hasil pengujian 5 siklus berturut-turut memperlihatkan retensi kapasitas adsorpsi yang sangat stabil, yaitu 98,2% pada siklus kedua; 95,4% pada siklus ketiga; 92,1% pada siklus keempat; dan 88,7% pada siklus kelima. Efisiensi desorpsi Cu^{2+} pada setiap siklus melampaui 94%. Larutan eluen asam yang kaya ion tembaga terkonsentrasi diproses lebih lanjut melalui presipitasi elektrokimia untuk memulihkan tembaga murni padat bernilai ekonomi.

Penggunaan medan magnet luar memfasilitasi pemisahan fasa padatan dalam waktu kurang dari dua menit tanpa kehilangan massa partikel, membuktikan kelayakan komposit sebagai material adsorben sirkular yang unggul.

Soal Latihan Pemahaman dan Evaluasi

Jawablah pertanyaan dan soal evaluasi numerik berikut secara terstruktur berdasarkan kajian regenerasi dan keberlanjutan adsorben:

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara konsep desorpsi fisikokimia dengan konsep regenerasi material adsorben secara menyeluruh.
2. Uraikan mekanisme kerja eluen asam (HCl) dalam mendesorpsi kation logam berat dari permukaan biosorben yang kaya gugus karboksilat dan amina.
3. Suatu biosorben memiliki kapasitas adsorpsi awal sebesar 120 mg/g. Pada siklus kedua dihasilkan kapasitas 108 mg/g, siklus ketiga 96 mg/g, dan siklus keempat 84 mg/g. Hitunglah nilai persentase retensi kapasitas (Rn) pada setiap siklus dan analisis faktor penyebab penurunannya.
4. Sebutkan empat tingkatan dalam hierarki pengelolaan sirkular material adsorben bekas (spent adsorbent) dan berikan contoh konkret penerapannya.

5. Mengapa kajian Life Cycle Assessment (LCA) dan Techno-Economic Analysis (TEA) sangat krusial dalam menilai kelayakan adopsi adsorben baru di industri pengolahan air?

DAFTAR PUSTAKA

1. Aksu, Z. (2005). Application of biosorption for the removal of organic pollutants: A review. Process Biochemistry, 40(3-4), 997-1026.
2. Al-Ghouti, M. A., & Da'ana, D. A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. Journal of Hazardous Materials, 393, 122383.
3. Allen, L. V., Popovich, N. G., & Ansel, H. C. (2021). Ansel's Pharmaceutical Dosage Forms and Drug Delivery Systems (11th ed.). Philadelphia: Wolters Kluwer.
4. Anastopoulos, I., & Kyzas, G. Z. (2016). Are the thermodynamic parameters of adsorption correctly evaluated? Journal of Molecular Liquids, 218, 174-185.
5. Atkins, P., & de Paula, J. (2018). Atkins' Physical Chemistry (11th ed.). Oxford: Oxford University Press.
6. Ayawei, N., Ebelegi, A. N., & Wankasi, D. (2017). Modelling and interpretation of adsorption isotherms. Journal of Chemistry, 2017, 3039817.
7. Bagotia, N. (2025). Regeneration strategies for exhausted adsorbents used in water treatment: A

critical review. Journal of Environmental Management, 373, 123450.

8. Baskar, A. V., Bolan, N., Hoang, S. A., Sooriyakumar, P., Kumar, M., Singh, L., Jasemizad, T., Padhye, L. P., Singh, G., & Vinu, A. (2022). Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. Science of The Total Environment, 822, 153555.
9. Bayuo, J., Rwiza, M. J., Choi, J. W., Mtei, K. M., Hosseini-Bandegharaei, A., & Sillanpää, M. (2024). Adsorption and desorption mechanisms of pharmaceuticals from wastewater: Progress and challenges. Journal of Water Process Engineering, 58, 104812.
10. Box, G. E., & Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. Technometrics, 2(4), 455-475.
11. Boyd, G. E., Adamson, A. W., & Myers, L. S. (1947). The exchange adsorption of ions from aqueous solutions by organic zeolites. II. Kinetics. Journal of the American Chemical Society, 69(11), 2836-2848.
12. Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. Journal of the American Chemical Society, 60(2), 309-319.

13. Charnay, C., Bégu, S., Tourné-Péteilh, C., Nicole, L., Lerner, D. A., & Devoisselle, J. M. (2004). Inclusion of ibuprofen in mesoporous template silicas: Drug release and stability. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 57(3), 533-540.
14. Chaudhary, A., Usman, M., Haderlein, S., & Hanna, K. (2024). Carbonaceous materials for adsorptive removal of perfluoroalkyl substances: Adsorption mechanisms and regeneration strategies. Chemical Engineering Journal, 480, 148112.
15. Chen, T., Da, T., & Ma, Y. (2021). Reasonable calculation of the thermodynamic parameters from adsorption equilibrium constants. Journal of Chemical & Engineering Data, 66(9), 3466-3478.
16. Cherkasov, N. (2020). Liquid-phase adsorption: Common problems and how we could do better. Journal of Molecular Liquids, 308, 113009.
17. Cooney, D. O. (1995). Activated charcoal in medical applications. New York: Marcel Dekker.
18. Crini, G. (2005). Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. Progress in Polymer Science, 30(1), 38-70.

19. Crini, G., & Lichtfouse, E. (Eds.). (2019). Green Adsorbents for Pollutant Removal: Fundamentals and Design. Cham: Springer.

20. Dabrowski, A. (2001). Adsorption - from theory to practice. Advances in Colloid and Interface Science, 93(1-3), 135-224.

21. Dahan, A., Miller, J. M., & Amidon, G. L. (2016). Prediction of solubility and permeability class membership: Provisional BCS classification of the world's top drugs. The AAPS Journal, 11(4), 740-746.

22. Daughton, C. G., & Ternes, T. A. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change? Environmental Health Perspectives, 107(suppl 6), 907-938.

23. Do, D. D. (1998). Adsorption Analysis: Equilibria and Kinetics. London: Imperial College Press.

24. Dubinin, M. M., & Radushkevich, L. V. (1947). The equation of the characteristic curve of activated charcoal. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, 55, 331-337.

25. Faheem, M., Hassan, M. A., Du, J., & Wang, B. (2025). Harnessing potential of smart and conventional spent

adsorbents: Green management and circular economy. Resources, Conservation and Recycling, 201, 107330.

26. Fitri, W. E., Putra, A., & Febria, F. A. (2024). Removal of heavy metals using Chlorella vulgaris: A review. Jurnal Katalisator, 9(1), 148-162. https://doi.org/10.22216/jk.v5i2.5717
27. Fitri, W. E., Rahmatiqa, C., & Putra, A. (2021). Bioremediation of heavy metal Pb(II) and Cu(II) in leachate water using Chlorella vulgaris. Dalton: Jurnal Pendidikan Kimia Dan Ilmu Kimia, 4(1), 58-69. https://doi.org/10.31602/dl.v4i1.4877
28. Fomina, M., & Gadd, G. M. (2014). Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. Bioresource Technology, 160, 3-14.
29. Foo, K. Y., & Hameed, B. H. (2010). Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. Chemical Engineering Journal, 156(1), 2-10.
30. Fouda-Mbanga, B. G., Onotu, O. P., & Tywabi-Ngeva, Z. (2024). Advantages of the reuse of spent adsorbents and potential applications: A review. Environmental Science and Pollution Research, 31(2), 1789-1808.

31. Freundlich, H. (1909). Kapillarchemie: Eine darstellung der kolloidchemie und verwandter gebiete. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.

32. Handayani, C., Putra, A., Emriadi, E., Refilda, R., Zein, R., & Ighalo, J. O. (2026). Eco-friendly removal of indigo carmine from aqueous solutions using avocado peel: A response surface methodology approach. Advanced Journal of Chemistry, Section A, 9(4), 556-576. https://doi.org/10.48309/AJCA.2026.549396.1940

33. Handayani, T., Emriadi, Deswati, Ramadhani, P., & Zein, R. (2024). Modelling studies of methylene blue dye removal using activated corn husk waste: Isotherm, kinetic and thermodynamic evaluation. South African Journal of Chemical Engineering, 47, 15-27. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2023.10.003

34. Handayani, T., Emriadi, E., Deswati, D., Ramadhani, P., & Zein, R. (2023). Effective removal of indigo carmine in aqueous solutions using a low-cost adsorbent developed from corn husk waste: Synthesis, batch, and optimization studies. Pollution, 9(4), 1396-1413. https://doi.org/10.22059/poll.2023.355474.1813

35. Ho, Y. S., & McKay, G. (1998). A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant

removal on various sorbents. Process Safety and Environmental Protection, 76(4), 332-340.

36. Ho, Y. S., & McKay, G. (1999). Pseudo-second order model for sorption processes. Process Biochemistry, 34(5), 451-465.

37. Lagergren, S. (1898). Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe. Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar, 24(4), 1-39.

38. Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society, 40(9), 1361-1403.

39. Li, X., et al. (2023). Stimuli-responsive ion adsorbents for sustainable separation applications. ACS Nano, 17(18), 17691-17710.

40. Lima, E. C., Hosseini-Bandegharaei, A., Moreno-Pirajan, J. C., & Anastopoulos, I. (2019). A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters of adsorption: A neglected issue. Journal of Molecular Liquids, 273, 425-434.

41. Lima, E. C., Sher, F., Saeb, M. R., Abatal, M., & Seliem, M. K. (2021). Comments on 'Reasonable calculation of the thermodynamic parameters from adsorption

equilibrium constants'. Journal of Chemical & Engineering Data, 66(12), 4752-4754.

42. Liu, Y. (2009). Is the free energy change of adsorption correctly calculated? Journal of Chemical & Engineering Data, 54(7), 1981-1985.

43. Marsh, H., & Reinoso, F. R. (2006). Activated Carbon. Amsterdam: Elsevier Science.

44. Metcalf, L., & Eddy, H. P. (2014). Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

45. Michalak, I., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (2013). State of the art for the biosorption process: A review. Applied Biochemistry and Biotechnology, 170(6), 1389-1416.

46. Mikolajczyk, A. P., Fortela, D. L. B., & Berry, J. C. (2024). Evaluating the suitability of linear and nonlinear regression models for adsorption isotherms. Environmental Science and Pollution Research, 31(8), 12345-12360.

47. Nasra, E., Deswati, D., Safni, S., Putri, Y. E., Gemasih, M. I. S., & Putra, A. (2025). Synthesis and characterization of ethylenediamine-cupric ion functionalized fly-ash silica xerogel and ANN-based prediction of its heavy metal

adsorption performance. Journal of Ecological Engineering, 27(6), 14-29.

48. Neuvonen, P. J., & Elonen, E. (1988). Effect of activated charcoal on absorption and elimination of phenobarbital, carbamazepine and phenylbutazone in man. European Journal of Clinical Pharmacology, 17(5), 355-357.

49. Plazinski, W., Rudzinski, W., & Plazinski, W. (2020). Adsorption kinetics models in clay systems: The critical analysis of the pseudo-first- and pseudo-second-order kinetic equations. Applied Clay Science, 196, 105753.

50. Putra, A., & Fitri, W. E. (2016). Karakterisasi pertukaran ion timbal (II) dengan kalsium pada proses biosorpsi alga hijau Cladophora fracta. Jurnal Ipteks Terapan, 10(2), 103-111. https://doi.org/10.22216/jit.v10i2.421

51. Putra, A., & Fitri, W. E. (2021). Effectivity removal of cadmium toxic metals from leachate using Chlorella vulgaris non-living cell. International Conference on Nursing, Midwifery, Medical Laboratory Technology, Public Health, and Health Information Management (SeSICNiMPH 2021), 39, 345-349. https://doi.org/10.2991/ahsr.k.211026.069

52. Putra, A., et al. (2014). Biosorption of heavy metal ions from aqueous solutions using modified biomaterials. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2(1), 500-508.

53. Putra, A., Fauzia, S., Deswati, Arief, S., & Zein, R. (2022). Preparation, characterization, and adsorption performance of activated rice straw as a bioadsorbent for Cr(VI) removal from aqueous solution using a batch method. Desalination and Water Treatment, 264, 121-132. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28562

54. Putra, A., Fauzia, S., Deswati, D., Arief, S., & Zein, R. (2024). The potential of duck egg white as a modifier for activated rice straw to enhance Cr(VI) ions adsorption in an aqueous solution. South African Journal of Chemical Engineering, 48, 204-213. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.02.002

55. Putra, A., Fitri, W. E., Kurniawati, D., & Anggresani, L. (2026). Duck eggshell biosorbent for indigo carmine removal: Kinetic, isotherm, and adsorption mechanism studies. Jurnal Akademika Kimia, 5(2), 129-141. https://doi.org/10.22487/j24775185.2026.v15.i2.pp129-141

56. Putra, A., Fitri, W. E., Yuniko, F., Handayani, T., Hidayat, H., & Ighalo, J. O. (2025). Evaluating the potential of duck egg shell for methylene blue adsorption in medical laboratory wastewater. Pollution, 11(3), 828-845. https://doi.org/10.22059/poll.2025.383528.2598

57. Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G., & Sing, K. S. (2014). Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications (2nd ed.). Oxford: Academic Press.

58. Ruthven, D. M. (1984). Principles of Adsorption and Adsorption Processes. New York: John Wiley & Sons.

59. Siderius, D., Vanduyfhuys, L., Evans, J., Iacomi, P., Van Speybroeck, V., Bon, V., & Kaskel, S. (2025). Best-practice recommendations for reporting adsorption isotherms. Pure and Applied Chemistry, 97(1), 1-18.

60. Temkin, M. J., & Pyzhev, V. (1940). Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts. Acta Physicochimica URSS, 12, 327-356.

61. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A. V., Olivier, J. P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K. S. (2015). Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size

distribution (IUPAC Technical Report). Pure and Applied Chemistry, 87(9-10), 1051-1069.

62. Tran, H. N., You, S. J., Hosseini-Bandegharaei, A., & Chao, H. P. (2017). Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. Water Research, 120, 88-116.

63. Vallet-Regi, M., Balas, F., & Arcos, D. (2007). Mesoporous materials for drug delivery. Angewandte Chemie International Edition, 46(40), 7548-7558.

64. Vallet-Regi, M., Rámila, A., del Real, R. P., & Pérez-Pariente, J. (2001). A new property of MCM-41: Drug delivery system. Chemistry of Materials, 13(2), 308-311.

65. Volesky, B. (2003). Sorption and Biosorption. Montreal: BV Sorbex, Inc.

66. Wang, J., & Chen, C. (2009). Biosorbents for heavy metals removal and their future. Biotechnology Advances, 27(2), 195-226.

67. Weber, W. J., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of adsorption on carbon from solution. Journal of the Sanitary Engineering Division, 89(2), 31-60.

68. Worch, E. (2021). Adsorption Technology in Water Treatment: Fundamentals, Processes, and Modeling (2nd ed.). Berlin: De Gruyter.

69. Zhang, Y., et al. (2021). Electrochemical regeneration of carbon-based adsorbents: A review of regeneration mechanisms, processes and applications. Chemosphere, 263, 127923.

70. Zhou, F., Yang, Y., Wu, J., Wang, J., Xu, M., Zhou, W., Li, Y., & Li, H. (2024). Recycled calcium silicate hydrate adsorbents: Mechanisms and circular performance. Chemical Engineering Journal, 482, 148901.

GLOSARIUM

1	Absorpsi (Absorption)	Proses asimilasi atau penyerapan zat fluida ke dalam seluruh volume ruah (bulk) fasa penyerap, membentuk larutan atau dispersi homogen.
2	Adsorbat (Adsorbate)	Spesies atom, ion, atau molekul dari fasa gas maupun fasa cair yang terikat dan terkonsentrasi pada bidang antarmuka material penyerap.
3	Adsorben (Adsorbent)	Material fasa padat yang menyediakan bidang permukaan aktif dan struktur pori untuk mengikat molekul adsorbat.
4	Adsorpsi (Adsorption)	Fenomena antarmuka berupa pengayaan konsentrasi atau penempelan molekul fluida pada permukaan padatan akibat ketidakseimbangan energi permukaan.
5	Aktivasi Fisika (Physical Activation)	Proses pembukaan jaringan pori arang menggunakan gas pengoksidasi ringan (uap air atau CO2) pada rentang suhu 800 - 1000 derajat Celsius.
6	Aktivasi Kimia (Chemical Activation)	Proses pembentukan pori material berkarbon menggunakan reagen dehidrator kimiawi (H3PO4, KOH, atau ZnCl2) pada suhu 450 - 700 derajat Celsius.
7	Amorfisasi Obat (Drug Amorphization)	Transformasi keadaan molekul obat dari kisi kristal teratur menjadi wujud amorf berenergi tinggi untuk melipatgandakan kelarutan.
8	Antidotum Adsorptif	Zat terapeutik oral (karbon aktif) yang bekerja mengikat racun di lumen saluran cerna untuk mencegah absorpsi sistemik ke sirkulasi darah.

9	Bioadsorpsi (Biosorption)	Proses penjerapan pasif ion logam berat, pewarna, atau molekul obat oleh biomassa seluler inaktif melalui interaksi fisikokimia murni.
10	Bioakumulasi (Bioaccumulation)	Penumpukan zat kontaminan di dalam ruang intraseluler organisme hidup yang digerakkan oleh proses metabolisme aktif.
11	Biochar	Material padatan kaya karbon hasil dekomposisi termokimia biomassa hayati pada kondisi ketiadaan oksigen (pirolisis).
12	Biomassa Inaktif (Non-living Biomass)	Material biologis yang telah mengalami inaktivasi sehingga mekanisme penjerapan bebas dari ketergantungan nutrisi dan metabolisme.
13	Biopharmaceutics Classification (BCS)	Kerangka klasifikasi ilmiah zat aktif obat berdasarkan parameter kelarutan dalam air dan permeabilitas intestinal usus halus.
14	Brunauer-Emmett-Teller (BET)	Teori matematis adsorpsi gas multilayer pada padatan berpori untuk menentukan luas permukaan spesifik total material.
15	Circular Economy (Ekonomi Sirkular)	Model ekonomi restoratif yang bertujuan mempertahankan nilai produk dan material selama mungkin melalui regenerasi dan daur ulang limbah.
16	Cross-linking (Ikatan Silang)	Pembentukan ikatan kovalen antar rantai biopolimer (misalnya kitosan dengan glutaraldehid) untuk meningkatkan ketahanan asam dan mekanik.
17	Desorpsi (Desorption)	Proses pelepasan kembali molekul adsorbat dari situs aktif permukaan

		adsorben menuju fasa ruah fluida peregenerasi.
18	Dialisis Gastrointestinal (MDAC)	Penarikan molekul obat dari kapiler darah balik ke lumen usus yang dipicu gradien konsentrasi tajam dari pemberian karbon aktif berulang.
19	Difusi Intrapartikel (Intraparticle Diffusion)	Mekanisme perpindahan massa molekul adsorbat melintasi saluran pori-pori internal material penyerap.
20	Difusi Lapisan Batas (Film Diffusion)	Perpindahan massa molekul zat terlarut menembus lapisan tipis cairan stagnan yang menyelimuti permukaan luar butiran adsorben.
21	Dubinin-Radushkevich (D-R)	Model isoterm penjerapan mikropori berbasis pengisian volume yang digunakan untuk menduga nilai energi bebas rata-rata adsorpsi.
22	Emerging Contaminants	Senyawa pencemar baru (termasuk residu antibiotik dan analgesik) yang terdeteksi di lingkungan perairan dan berisiko ekotoksikologis.
23	Energi Bebas Gibbs (Delta G)	Parameter termodinamika penentu spontanitas reaksi; nilai negatif membuktikan proses berlangsung spontan secara termodinamika.
24	Entalpi Adsorpsi (Delta H)	Besaran kalor yang diserap (endotermik) atau dilepaskan (eksotermik) selama proses pembentukan interaksi antarmuka padat-cair.
25	Entropi Adsorpsi (Delta S)	Ukuran perubahan derajat keacakan molekuler pada lapisan batas kontak antarmuka selama proses penjerapan berlangsung.
26	Fisisorpsi (Physical Adsorption)	Adsorpsi yang dikendalikan oleh gaya van der Waals non-kovalen lemah,

		bersifat reversibel, dan memiliki kalor adsorpsi rendah (< 40 kJ/mol).
27	Freundlich Isotherm	Persamaan empiris yang menggambarkan kesetimbangan adsorpsi multilayer pada permukaan padatan yang memiliki energi situs heterogen.
28	FTIR Spectroscopy	Spektroskopi inframerah transformasi Fourier untuk mengidentifikasi vibrasi gugus-gugus fungsi organik pada permukaan material.
29	Glidan (Glidant)	Bahan tambahan farmasi (seperti silika koloidal) yang mengadsorpsi kelembapan mikro dan memperbaiki fluiditas serbuk cetak tablet.
30	Grafting (Pencangkokan Kimia)	Pengikatan kovalen molekul fungsional baru pada rantai biopolimer untuk melipatgandakan afinitas dan selektivitas penjerapan.
31	Green Adsorption	Pendekatan teknologi adsorpsi yang mengintegrasikan bahan baku biomassa terbarukan, proses sintesis ramah lingkungan, dan keberlanjutan siklus.
32	Green Pharmacy	Konsep kefarmasian yang mengintegrasikan perancangan obat terurai ramah lingkungan dan pengelolaan residu limbah sediaan.
33	Heteroskedastisitas	Pelanggaran asumsi dasar regresi di mana sebaran varians galat residual tidak konstan di sepanjang rentang konsentrasi data.
34	Homoskedastisitas	Kondisi ideal analisis regresi kuadrat terkecil di mana sebaran varians galat residual terdistribusi secara seragam dan konstan.

35	Ikatan Hidrogen (Hydrogen Bonding)	Atraksi dipol elektrostatik khusus antara atom hidrogen elektropositif dengan atom elektronegatif berpasangan elektron bebas.
36	Indeks Bias Model (Model Bias)	Penyimpangan sistematis nilai estimasi parameter akibat pemaksaan transformasi bentuk linier pada persamaan nonlinier.
37	Isoterm Adsorpsi (Adsorption Isotherm)	Kurva hubungan kesetimbangan antara jumlah analit teradsorpsi per gram adsorben terhadap konsentrasi residu larutan pada suhu tetap.
38	Kapasitas Adsorpsi (qe)	Massa zat adsorbat dalam miligram yang berhasil terikat secara stabil pada satu gram material adsorben kering saat kesetimbangan.
39	Kemisorpsi (Chemical Adsorption)	Adsorpsi yang melibatkan transfer elektron atau pembentukan ikatan kovalen/ionik kuat, spesifik, dan terbatas pada satu lapisan monolayer.
40	Kinetika Adsorpsi (Adsorption Kinetics)	Dinamika laju perpindahan massa dan pengikatan molekul adsorbat sebagai fungsi waktu kontak hingga tercapai kondisi tunak.
41	Kitosan (Chitosan)	Biopolimer poliaminosakarida kationik hasil deasetilasi basa senyawa kitin cangkang udang yang kaya gugus amina pengkelat.
42	Kompleksasi Ligan (Ligand Complexation)	Pembentukan ikatan koordinasi antara pasangan elektron bebas pada atom donor ligan dengan orbital d kosong ion logam transisi.
43	Kromatografi Adsorpsi	Teknik pemisahan zat berdasarkan perbedaan afinitas kompetitif penjerapan komponen analit terhadap fase diam padat.

44	Langmuir Isotherm	Model kesetimbangan adsorpsi monolayer terlokalisasi pada permukaan homogen dengan energi situs aktif yang seragam.
45	Life Cycle Assessment (LCA)	Metodologi evaluasi dampak lingkungan komprehensif dari suatu material mulai dari pengadaan bahan baku hingga pembuangan akhir.
46	Makropori (Macropores)	Pori material berdiameter bukaan lebih besar dari 50 nanometer yang bertindak sebagai saluran utama transportasi fluida internal.
47	Mesopori (Mesopores)	Pori material berdiameter antara 2 hingga 50 nanometer yang ideal untuk penjerapan molekul organik berukuran sedang.
48	Mikropori (Micropores)	Pori material berdiameter kurang dari 2 nanometer yang menyumbang fraksi terbesar dari total luas permukaan spesifik karbon.
49	Molecular Sieve (Saringan Molekuler)	Material berpori kristalin (zeolit) dengan bukaan rongga seragam skala angstrom yang memilah molekul berdasarkan ukuran geometri.
50	Overfitting Model	Kondisi matematis di mana persamaan model memiliki terlalu banyak parameter estimasi sehingga kehilangan kemampuan generalisasi fisik.
51	Parameter Pemisahan (RL)	Faktor tak berdimensi kesetimbangan Langmuir yang menentukan apakah proses adsorpsi bersifat favourable, linier, atau unfavourable.
52	Point of Zero Charge (pHpzc)	Nilai pH larutan di mana jumlah kerapatan muatan positif dan muatan negatif pada permukaan padatan bernilai persis seimbang.

53	Pore Blockage	Penyumbatan fisik atau penjepitan permanen rongga pori mikro oleh molekul adsorbat yang tidak dapat terlepas saat regenerasi.
54	Pseudo-Orde Dua (PSO)	Model kinetika laju adsorpsi yang mengasumsikan tahap penentu laju dikendalikan oleh mekanisme kemisorpsi valensi.
55	Pseudo-Orde Satu (PFO)	Model kinetika laju adsorpsi yang mengasumsikan laju pengisian berbanding lurus dengan kapasitas situs adsorpsi kosong.
56	Regenerasi Termal	Proses pemulihan struktur pori adsorben melalui pemanasan suhu tinggi dalam atmosfer terkontrol untuk mendegradasi adsorbat.
57	Resource Recovery	Teknologi pemulihan dan ekstraksi kembali material bernilai tinggi (seperti logam strategis) dari limbah efluen cair.
58	Resin Penukar Ion	Matriks polimer organik sintetis stirena-DVB yang difungsionalisasi dengan gugus ionik tetap untuk pertukaran stokiometris.
59	Reusability Adsorben	Kemampuan ketahanan suatu material penyerap untuk digunakan kembali secara berulang dalam beberapa siklus operasional.
60	Root Mean Square Error (RMSE)	Fungsi galat statistik yang mengukur akar kuadrat rata-rata deviasi selisih antara nilai eksperimen dan prediksi model.
61	SEM-EDX	Mikroskopi elektron pemindai terintegrasi spektrometri dispersi energi sinar-X untuk visualisasi morfologi dan komposisi unsur padatan.

62	Silika Koloidal (Aerosil)	Serbuk silikon dioksida amorf sub-mikron yang digunakan sebagai desikan dan agen pemodifikasi reologi massa serbuk obat.
63	Silika Mesopori (SBA-15/MCM-41)	Material silika sintetis berpori nano teratur dengan luas permukaan masif yang dimanfaatkan sebagai pembawa obat amorf.
64	Spent Adsorbent	Material adsorben padat bekas yang telah jenuh terisi oleh zat kontaminan pasca proses pemisahan fasa cair.
65	Sub-inhibitory Concentration	Konsentrasi antibiotik di bawah dosis letal yang merangsang adaptasi resistensi dan penyebaran gen kebal pada mikroba perairan.
66	Techno-Economic Analysis (TEA)	Kajian analisis biaya modal dan biaya operasional untuk menilai kelayakan finansial penerapan teknologi adsorpsi industri.
67	Temkin Isotherm	Model kesetimbangan adsorpsi yang mengasumsikan kalor penjerapan seluruh molekul menurun secara linier terhadap tutupan permukaan.
68	Upcycling Material	Transformasi limbah adsorben jenuh menjadi material baru berdaya guna lebih tinggi seperti katalis heterogen industri.
69	Van 't Hoff Plot	Kurva linier hubungan logaritma konstanta kesetimbangan terhadap kebalikan suhu mutlak untuk mengekstraksi Delta H dan Delta S.
70	Zeolit	Mineral aluminosilikat kristalin terhidrasi dengan struktur kerangka tetrahedral terbuka yang memiliki sifat penukar kation alami.

INDEKS

Absorpsi ruah (bulk)	2, 3, 14, 15
Adsorbat	2, 7, 8, 37, 54, 86, 132
Adsorben konvensional	69, 70, 78, 80
Aktivasi fisika	71, 78, 80, 82
Aktivasi kimia	71, 72, 78, 81
Amorfisasi obat	107, 108, 109, 111
Antidotum keracunan oral	11, 13, 101, 102, 110
BET (Brunauer-Emmett-Teller)	9, 44, 45, 122, 126
Bioakumulasi aktif	86, 87, 95
Bioadsorpsi pasif	86, 87, 89, 95
Biochar sekam padi	91, 93, 125, 126
Biomassa mikroba	90, 93, 95
Biopharmaceutics Classification (BCS)	12, 107, 110, 111
Circular economy (ekonomi sirkular)	93, 94, 157, 158, 159
Cross-linking (ikatan silang)	92, 94, 96
Dekontaminasi saluran cerna	13, 101, 102, 112
Desorpsi analitik	3, 28, 152, 153, 156
Dialisis gastrointestinal (MDAC)	102, 103, 110, 112
Difusi intrapartikel pori	54, 59, 60, 64, 139
Difusi lapisan batas cairan (film)	54, 59, 61, 64, 139
Doksisiklin	30, 31
Dubinin-Radushkevich model	43, 44, 45, 47, 49
Emerging contaminants	118, 119, 126, 127
Energi bebas Gibbs	25, 26, 28, 29, 31
Entalpi adsorpsi	4, 25, 26, 27, 28
Entropi adsorpsi	25, 26, 27, 28, 30

Fenofibrat	111, 112
Fisisorpsi van der Waals	4, 5, 6, 14, 21
Freundlich isotherm	9, 41, 42, 45, 48, 136
FTIR spectroscopy	122, 123, 125, 127, 144
Glidan serbuk tablet	12, 104, 110, 112
Grafting (pencangkokan)	92, 93, 96
Green adsorption	159, 160, 162
Green pharmacy	12, 110, 112
Heteroskedastisitas galat	136, 137, 145
Ho-McKay model	57, 58, 62, 138
Homoskedastisitas	136, 147
Ikatan hidrogen	21, 22, 31, 75, 102
Isoterm adsorpsi	36, 37, 45, 48, 135
Kapasitas kesetimbangan (qe)	7, 8, 14, 132, 133
Karbon aktif komersial	13, 70, 71, 78, 101
Kemisorpsi valensi	4, 5, 6, 14, 57
Kinetika adsorpsi	53, 54, 62, 64, 138
Kitosan cangkang udang	90, 93, 94, 96, 161
Kromatografi adsorpsi	12, 75, 106, 110
Lagergren model	9, 55, 56, 62, 138
Langmuir isotherm	9, 38, 39, 45, 48, 135
Lapisan ganda listrik	23, 24, 31
Life Cycle Assessment (LCA)	160, 162, 164
Makropori IUPAC	71, 72, 81
Mesopori IUPAC	71, 72, 81, 107
Mikropori IUPAC	70, 72, 81
Neraca massa analitik	7, 8, 132, 133, 146
Nonlinier regresi	46, 136, 137, 145, 146
Overfitting model	141, 147, 148
Parameter pemisahan (RL)	39, 40, 45, 48, 136

Parasetamol	13, 14, 101, 145
Point of zero charge (pHpzc)	23, 24, 31, 32, 123
Pore blockage	156, 162, 163
Pseudo-orde satu (PFO)	55, 56, 62, 138
Pseudo-orde dua (PSO)	57, 58, 62, 138
Regenerasi kimia	153, 154, 162
Regenerasi termal	153, 154, 162
Resource recovery	157, 158, 162
Resin penukar ion	76, 78, 81
Reusability adsorben	155, 156, 161, 162
RMSE (Root Mean Square Error)	140, 141, 146
SEM-EDX mikroskopi	122, 123, 126, 127, 144
Silika koloidal Aerosil	12, 104, 110, 112
Silika mesopori SBA-15	12, 107, 108, 109, 111
Siprofloksasin	63, 64, 118
Spent adsorbent	157, 158, 162
Sub-inhibitory concentration	119, 126, 127
Techno-Economic Analysis (TEA)	160, 162, 164
Temkin isotherm	43, 45, 49
Tetrasiklin hidroklorida	118, 125, 126
Upcycling material	158, 162
Validasi statistik	140, 141, 146
Van 't Hoff plot	26, 27, 31, 142
Weber-Morris model	59, 60, 62, 139
XRD difraktometri	123, 126, 144
Zeolit molecular sieve	73, 74, 78, 81

BIODATA PENULIS



Dr. Tuti Handayani, M.Si.
Merupakan dosen tetap pada Program Studi Farmasi Program Sarjana Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Fort De Kock, Bukittinggi. Beliau menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) pada Jurusan Kimia serta melanjutkan pendidikan Magister (S2) dan Doktor (S3) pada Program Studi Ilmu Kimia Universitas Andalas. Bidang keahlian yang ditekuni mencakup kimia fisika, kimia material, dan kimia antarmuka farmasi. Penulis aktif melakukan tridharma perguruan tinggi dan penelitian dalam pengembangan bahan alam serta sains antarmuka kefarmasian. Penulis dapat dihubungi melalui pos-el: tutihandayani@fdk.ac.id.



Dr. Putri Ramadhani, M.Si.
Merupakan peneliti pada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Indonesia. Bidang keahliannya mencakup *analytical and environmental chemistry*, biosorption, serta pengolahan air limbah. Aktivitas risetnya berfokus pada pemanfaatan material berbasis limbah sebagai biosorben untuk mengurangi pencemar, termasuk zat warna metilen biru dalam air. Karya ilmiahnya membahas modifikasi biosorben dan pemodelan proses adsorpsi. Penelitiannya berkontribusi pada pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih efektif dan berkelanjutan, serta mendukung penerapan prinsip kimia hijau di Indonesia.



Dr. Adewirli Putra, M.Si.
Merupakan dosen Universitas Syedza Saintika, Padang. Beliau memiliki kepakaran mendalam dalam bidang kimia fisik, kimia analitik, dan kimia lingkungan, dengan fokus riset spesifik pada teknologi biosorpsi, adsorpsi logam berat dan zat warna, pengolahan air limbah, bioremediasi mikroplastik, serta sintesis biomaterial ramah lingkungan berkelanjutan. Beliau menyelesaikan pendidikan doktoral bidang Kimia di Universitas Andalas dan sangat aktif mempublikasikan artikel riset pada jurnal internasional bereputasi. Pendekatan risetnya mengintegrasikan rekayasa material hayati, Response Surface Methodology (RSM), Artificial Neural Network (ANN), dan pemodelan kecerdasan buatan untuk mengendalikan pencemaran lingkungan global.

BIODATA PENULIS



Dr. Linda Hevira, S.Si, M.Si adalah dosen pada Program Studi Farmasi, Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Mohammad Natsir Bukittinggi. Penulis lahir di Dumai pada tanggal 2 Oktober 1974. Menyelesaikan pendidikan S1, S2, dan S3 pada Jurusan Kimia Universitas Andalas dan melanjutkan postdoctoral di Pusat Riset BRIN Cibinong, Jawa Barat.

Selain menjadi dosen, penulis juga aktif menulis dan tulisannya telah terbit di beberapa buku, jurnal nasional, dan internasional.

Google Scholar: https://bit.ly/48zYv5l

Email: lindahevira@gmail.com

Biodata Penulis



Prof. Dr. Evi Hasnita, S.Pd., Ns., M.Kes.

Merupakan akademisi dan dosen pada Fakultas Ilmu Kesehatan yang memiliki pengalaman dalam bidang pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Lahir di Padang pada 25 Desember 1962, beliau mendedikasikan diri dalam pengembangan ilmu pengetahuan, peningkatan kualitas pendidikan tinggi, serta pengembangan sumber daya manusia di bidang kesehatan. Sebagai akademisi, beliau berperan dalam pelaksanaan tridarma perguruan tinggi, meliputi pendidikan dan pengajaran, penelitian, serta pengabdian kepada masyarakat. Keterlibatan beliau dalam dunia akademik menjadi bagian dari upaya mendorong pengembangan ilmu pengetahuan yang relevan dengan kebutuhan masyarakat dan perkembangan teknologi. Melalui kontribusi akademik dan pengembangan keilmuan, beliau berkomitmen untuk mendukung kemajuan pendidikan tinggi serta menghasilkan karya ilmiah yang bermanfaat bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, dan masyarakat luas. Dalam penerbitan buku ini, beliau turut berkontribusi dalam memperkaya khazanah literatur ilmiah dan menyediakan sumber referensi yang dapat mendukung pengembangan ilmu pengetahuan serta penelitian lebih lanjut.