

**UJI KEMAMPUAN ADSORBEN NANOKOMPOSIT
MXENE/ECENG GONDOK DALAM PENYISIHAN LOGAM
TEMBAGA (Cu) DARI AIR LIMBAH ARTIFISIAL DENGAN
VARIASI RASIO NANOKOMPOSIT DAN KONSENTRASI
ADSORBAT**

TUGAS AKHIR

Sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan
Program Strata-1
Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Andalas

Oleh:

M. ZAKI FARHAN

1810943020

Dosen Pembimbing:

BUDHI PRIMASARI, S.T.,M.Sc

Dr. PUTI SRI KOMALA



**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2022**

LEMBAR PENGESAHAN

**UJI KEMAMPUAN ADSORBEN NANOKOMPOSIT
MXENE/ECENG GONDOK DALAM PENYISIHAN LOGAM
TEMBAGA (Cu) DARI AIR LIMBAH ARTIFISIAL DENGAN
VARIASI RASIO NANOKOMPOSIT DAN KONSENTRASI
ADSORBAT**

Nama : M. Zaki Farhan

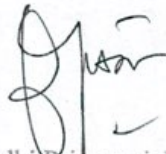
NIM : 1810943020

Lulus Sidang Tugas Akhir tanggal: 12 September 2022

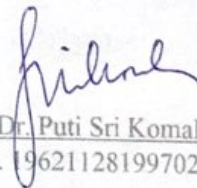
Disetujui oleh:

Pembimbing Utama,

Kopembimbing,



Budhi Primasari, M.Sc
NIP. 197207311997022001



Dr. Puti Sri Komala
NIP. 196211281997022001

Disahkan oleh:
Ketua Departemen,



Rizki Aziz, Ph.D
NIP. 197610312005011001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang ditulis dengan judul: **Uji Kemampuan Adsorben Nanokomposit Mxene/Eceng Gondok dalam Penyisihan Logam Tembaga (Cu) dari Air Limbah Artifisial dengan Variasi Rasio Nanokomposit dan Konsentrasi Adsorbat** adalah benar hasil kerja/karya saya sendiri dan bukan merupakan tiruan hasil kerja/karya orang lain, kecuali kutipan pustaka yang sumbernya dicantumkan. Jika kemudian hari pernyataan ini tidak benar, maka status kelulusan dan gelar yang saya peroleh menjadi batal dengan sendirinya.

Padang, 12 September 2022

Yang membuat pernyataan,

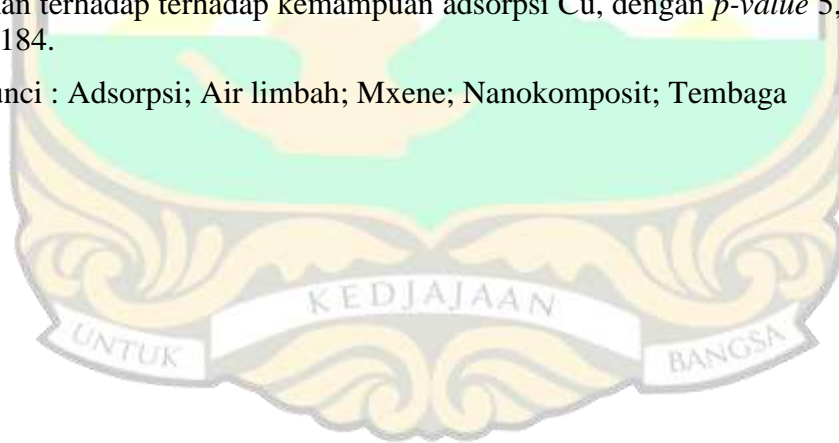


M. Zaki Farhan
NIM. 1810943020

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi nanokomposit MXene dengan penyisipan nanoserat eceng gondok dalam menyisihkan logam Cu dari air limbah. Penelitian dilakukan secara *batch* menggunakan larutan artifisial Cu. Percobaan dilakukan pada pH 5 dan dosis adsorben 1 g/L dengan memvariasikan rasio nanokomposit 10:1 dan 20:1, dan konsentrasi adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L. Konsentrasi Cu dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS). Karakterisasi adsorben dilakukan dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX). Ukuran partikel adsorben dianalisis menggunakan *Particle Size Analysis* (PSA). Efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi Cu yang didapatkan masing-masing 48,53-87,43% dan 2,43-28,43 mg/g. Penyisihan Cu terbaik diperoleh pada rasio nanokomposit 20:1 dan konsentrasi adsorbat 25 mg/L yaitu 87,43% dan 21,86 mg/g. Kemampuan adsorpsi Mxene/Eceng Gondok lebih baik dibandingkan Mxene tanpa modifikasi maupun Eceng Gondok saja. Percobaan adsorpsi pada air limbah elektroplating artifisial menunjukkan penyisihan 72,89% dan kapasitas adsorpsi 18,22 mg/g. Persamaan isoterm yang sesuai dengan penelitian ini adalah isoterm Freundlich dengan $R^2 = 0,8509$ dan nilai $K_F = 0,002$ yang menunjukkan adsorpsi Cu terjadi di beberapa lapisan permukaan adsorben. Kinetika adsorpsi yang sesuai yaitu *pseudo second-order* yang artinya orde dua parsial terhadap gugus fungsi adsorben dan orde nol parsial terhadap konsentrasi adsorbat dalam larutan. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar konsentrasi adsorbat maka semakin besar nilai efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi hingga batas jenuhnya. Uji ANOVA dan uji-t menunjukkan bahwa perbedaan konsentrasi adsorbat maupun perbedaan rasio nanokomposit memberikan perbedaan yang signifikan terhadap kemampuan adsorpsi Cu, dengan *p-value* $5,547 \times 10^{-17} - 0,02184$.

Kata kunci : Adsorpsi; Air limbah; Mxene; Nanokomposit; Tembaga



ABSTRACT

This study aimed to increase the adsorption capacity of MXene in removing Cu from wastewater by intercalating MXene with water hyacinth nanofibers. The experiment was conducted in batch reactor. The adsorption was carried out at pH 5, adsorbent dose of 1 g/L with varying the nanocomposite ratio 10:1 and 20:1, and varying adsorbate concentrations, from 5, 15, 25, and 35 mg/L. The concentration of Cu was analyzed using Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS). Adsorbent was characterized using Scanning Electron Microscope (SEM) and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX). Particle size was analyzed using Particle Size Analysis (PSA). The efficiencies and adsorption capacities were 48,53-87,43% and 2,43-28,43 mg/g respectively. The highest Cu removal was obtained at 20:1 nanocomposite ratio and 25 mg/L adsorbate concentration with removal efficiency of 87.43% and adsorption capacity of 21.86 mg/g. The adsorption capacity of MXene/Water Hyacinth was higher than the MXene and Water Hyacinth. The adsorption experiment on artificial electroplating wastewater showed 72,89% removal and adsorption capacity of 18,22 mg/g. The adsorption isotherm fitted to Freundlich isotherm with $R^2 = 0,8509$ and K_F value = 0,002, which shows that Cu was adsorbed in multi-layer on the adsorbent. . The adsorption kinetics fit to pseudo second order, the decreasing is partial second order to the adsorbent functional groups and partial zero order to the concentration of adsorbate. The results showed that increasing adsorbate concentration increased removal efficiency and adsorption capacity until saturated. ANOVA and t-test showed that the differences in adsorbate concentrations and ratio of nanocomposites would result significant differences in the removal efficiency and adsorption capacity, with p-value of $5,547 \times 10^{-17} - 0,02184$.

Keywords: Adsorption; Copper; MXene; Nanocomposite; Wastewater

KATA PENGANTAR



Alhamdulillahirabbil'aalamiin, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Uji Kemampuan Adsorben Nanokomposit Mxene/Eceng Gondok dalam Penyisihan Logam Tembaga (Cu) dari Air Limbah Artifisial dengan Variasi Rasio Nanokomposit dan Konsentrasi Adsorbat**. Tidak lupa shalawat dan salam penulis sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita menuju alam yang penuh dengan ilmu pengetahuan seperti saat ini. Penulisan Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana pada Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas. Penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak, baik langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Orangtua yang penulis sayangi, papa Khairul Nizam, S.Pi, M.M. dan mama Zurmachdaniar A.Md, serta adik-adik tersayang M. Nabil Rafif, M. Akhdan Mafaza, dan Aisyah Uzma Fakhira yang telah memberikan semangat, motivasi, kasih sayang, dukungan dan doa dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini;
2. Ibu Budhi Primasari, M.Sc. dan Ibu Dr. Puti Sri Komala selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, semangat, dukungan, nasehat, waktu, kesempatan dan doa dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini;
3. Ibu Reri Afrianita, M.T. dan Bapak Dr. Eng. Zulkarnaini selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini;
4. Ibu Tivany Edwin M.Eng selaku Ketua Prodi dan Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas yang telah membantu penulis memberikan arahan selama menjalani setiap tahapan Tugas Akhir ini;

5. Bapak Rizki Aziz, Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas dan juga dosen pembimbing akademik yang telah memberikan arahan dalam penyelesaian tugas akhir;
6. Ibu Syofni, S.Si selaku Analis Laboratorium Air di Departemen Teknik Lingkungan dan Uni Firda Winengsih yang telah memberikan bantuan, arahan dan semangat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini;
7. Bapak dan Ibu dosen serta tenaga pendidik Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas yang telah memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis;
8. Rekan seperjuangan tugas akhir MXene dan MXene/ EG, Andin, Rafli, Rizky, Radit, Meuthia, Fathiya, dan Jeje yang selalu menyertai dan saling berbagi semangat dan ilmu dalam menyelesaikan tugas akhir ini;
9. Tim Asisten Laboratorium Air periode 2021/2022 yang telah menemani dan saling membantu dalam melaksanakan tanggung jawab di Laboratorium Air;
10. Teman seperjuangan ÉLEPHASE yang tidak akan pernah bisa ditemukan di tempat dan waktu yang lain, beragam sifat dan karakter, yang banyak mengajarkan hal-hal yang luar biasa, dan tidak akan pernah terganti serta telah mengisi hari-hari penulis selama 4 tahun belakangan ini;
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang turut membantu Penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Penulis menerima segala bentuk kritik dan saran demi kesempurnaan laporan ini dan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga Allah membalas kebaikan dengan yang lebih baik, Aamiin ya Rabbal ‘Aalamiin.

Padang, 12 September 2022

Wassalam,

M. Zaki Farhan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Pencemaran Air Limbah oleh Logam Berat	6
2.2 Logam Cu	7
2.2.1 Sumber Logam Cu	9
2.2.2 Keberadaan Logam Cu di Air Limbah.....	9
2.2.3 Dampak Pencemaran Logam Cu.....	10
2.3 Kebijakan Tentang Konsentrasi Logam Cu di Perairan.....	13
2.3.1 <i>Stream Standard</i>	13
2.3.2 <i>Emission Standard</i>	14
2.4 Adsorpsi	15
2.4.1 Faktor yang Memengaruhi Adsorpsi.....	18
2.4.2 Adsorben.....	19
2.5 Sistem Adsorpsi	20
2.5.1 Sistem Batch	20
2.5.2 Sistem Kontinu (Kolom).....	21
2.6 Efisiensi Penyisihan dan Kapasitas Adsorpsi	22
2.7 Isoterm Adsorpsi	22
2.7.1 Isoterm Langmuir.....	23
2.7.2 Isoterm Freundlich	25
2.8 Kinetika Adsorpsi	26

2.9	MXene	30
2.9.1	Karakteristik MXene.....	32
2.9.2	Aplikasi MXene	33
2.10	Eceng Gondok.....	34
2.11	Uji t.....	36
2.12	Uji ANOVA.....	37
2.13	Penelitian Terkait	39
2.13.1	<i>Nanosheet</i> $Ti_3C_2T_x$ MXene Dua Dimensi untuk Penyisihan Tembaga yang Efisien dari Air Limbah Simulasi Elektroplating	39
2.13.2	Nanokomposit Multifungsi dengan Kekuatan dan Kapasitansi Tinggi Menggunakan MXene/Nanoselulosa	39
2.13.3	Penyisihan Logam Zn dan Cr dari Air Limbah Industri menggunakan Tangkai Daun, Daun, dan Akar Eceng Gondok.....	40
2.13.4	MXene/Komposit Alginat sebagai Adsorben dalam Penyisihan Logam Pb dan Logam Cu dari Larutan Artifisial.....	40
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		42
3.1.	Umum	42
3.2.	Tahapan Penelitian.....	42
3.3.	Studi Literatur	43
3.4.	Persiapan Percobaan	43
3.4.1	Persiapan Peralatan yang Digunakan	43
3.4.2	Persiapan Bahan.....	44
3.5.	Karakterisasi Material.....	49
3.5.1.	SEM-EDX.....	49
3.5.2.	PSA	50
3.6.	Percobaan Adsorpsi	50
3.7.	Analisis dan Pembahasan Hasil Percobaan.....	53
3.8.	Analisis Statistik	58
3.8.1.	Uji ANOVA.....	58
3.8.2.	Uji-t	59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		60
4.1	Umum	60
4.2	Karakterisasi Adsorben.....	60
4.2.1.	SEM- EDX.....	60
4.2.2.	Analisis Ukuran Partikel	63

4.3	Percobaan Adsorpsi Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok	65
4.3.1	Percobaan Adsorpsi menggunakan Larutan Artifisial dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat.....	65
4.3.1.1.	Variasi Konsentrasi Adsorbat dengan Adsorben MXene/Eceng Gondok Rasio 10:1	65
4.3.1.2.	Variasi Konsentrasi Adsorbat dengan Adsorben MXene/Eceng Gondok Rasio 20:1	68
4.3.1.3.	Analisis Hubungan Variasi Konsentrasi Adsorbat terhadap Kemampuan Adsorpsi.....	71
4.3.2	Percobaan Adsorpsi menggunakan Larutan Artifisial dengan Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok	74
4.3.2.1	Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L.....	74
4.3.2.2	Variasi Rasio Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 15 mg/L.....	77
4.3.2.3	Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L.....	80
4.3.2.4	Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 35 mg/L.....	82
4.3.2.5	Analisis Hubungan Variasi Rasio Nanokomposit terhadap Kemampuan Adsorpsi.....	85
4.4	Analisis Statistik	88
4.4.1	Uji ANOVA.....	89
4.4.2	Uji-t.....	90
4.5	Perbandingan Kinerja Adsorpsi MXene/ Eceng Gondok dengan Kontrol	91
4.6	Penentuan Persamaan Isoterm	95
4.7	Penentuan Kinetika Adsorpsi.....	98
4.8	Rekapitulasi Penyisihan Cu Terbaik	101
4.9	Percobaan Aplikasi pada Limbah Elektroplating Artifisial	103
BAB V PENUTUP.....		107
5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran	108
DAFTAR PUSTAKA.....	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat-sifat Logam Cu	9
Tabel 2.2	Kandungan Tembaga dari Berbagai Air Limbah	11
Tabel 2.3	Baku Mutu Air Nasional Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021	14
Tabel 2.4	Baku Mutu Air Laut Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021	14
Tabel 2.5	Baku Mutu Limbah berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia nomor 5 Tahun 2014	15
Tabel 2.6	Perbandingan Mekanisme Adsorpsi antara Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia.....	18
Tabel 2.7	Persamaan Matematika Model Isoterm Langmuir	25
Tabel 2.8	Penelitian Terdahulu.....	40
Tabel 3.1	Pengenceran Larutan Artifisial.....	48
Tabel 3.2	Variasi Percobaan.....	52
Tabel 3.3	Matrik Percobaan.....	52
Tabel 3.4	Persamaan Matematika Model Isoterm Langmuir	56
Tabel 3.5	Kinetika Adsorpsi	58
Tabel 3.6	Format Umum Tabel ANOVA.....	59
Tabel 4.1	Hasil EDX dari Material MAX, MXene Tanpa Modifikasi, MXene/ Eceng Gondok 10:1, dan MXene/ Eceng Gondok 20:1	62
Tabel 4.2	Hasil Analisis Ukuran Partikel Adsorben.....	64
Tabel 4.3	Hasil Uji ANOVA	90
Tabel 4.4	Hasil Uji -t terhadap Variasi Rasio Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok	91
Tabel 4.5	Hasil Uji -t terhadap Adsorben MXene tanpa Modifikasi dengan Adsorben MXene/ Eceng Gondok.....	91
Tabel 4.6	Rekapitulasi Efisiensi Penyisihan dan Kapasitas Adsorpsi dari Adsorben Mxene/ Eceng Gondok dan Adsorben Kontrol.....	95
Tabel 4.7	Rekapitulasi Nilai Konstanta Isoterm Langmuir dan Freundlich dari Proses Adsorpsi Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok	95

Tabel 4.8	Hasil Perhitungan dalam Penentuan Kinetika Adsorpsi dengan Adsorben MXene/Eceng Gondok.....	98
Tabel 4.9	Nilai Koefisien Determinasi (R^2) dan Konstanta Laju Adsorpsi (k) Kinetika Adsorpsi Logam Cu Menggunakan MXene/ Eceng Gondok Variasi Terbaik	101
Tabel 4. 10	Rekapitulasi Penyisihan Cu Terbaik pada Percobaan Adsorpsi.....	102



DAFTAR GAMBAR

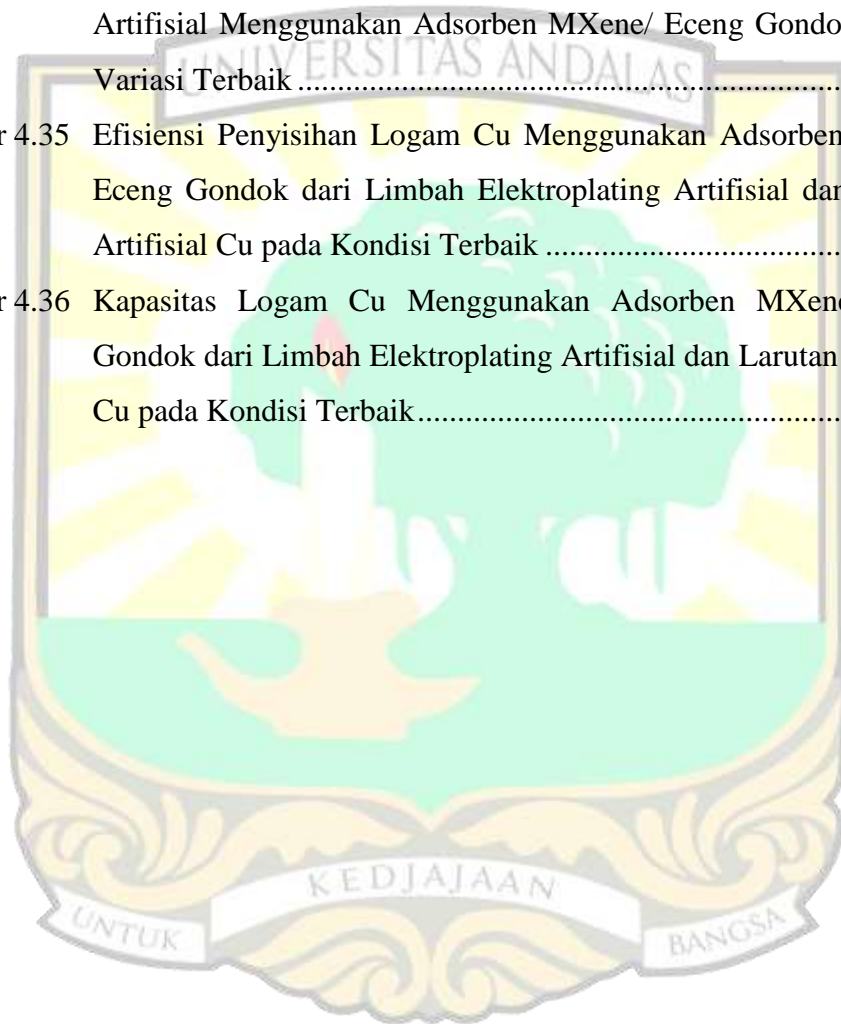
Gambar 2.1	Logam Tembaga (Cu).....	8
Gambar 2.2	Ilustrasi Adsorpsi Sistem Batch.....	21
Gambar 2.3	Ilustrasi Adsorpsi Sistem Kontinu.....	21
Gambar 2.4	Skema Grafik Isoterm Langmuir.....	24
Gambar 2.5	Skema Grafik Isoterm Freundlich	26
Gambar 2.6	Hubungan antara Konsentrasi terhadap Waktu pada Orde Nol.....	27
Gambar 2.7	Hubungan antara Konsentrasi terhadap Waktu pada Orde Satu	28
Gambar 2.8	Hubungan antara Konsentrasi terhadap Waktu pada Orde Dua.....	28
Gambar 2.9	Hubungan antara Selisih Kapasitas Adsorpsi terhadap Waktu pada <i>Pseudo-First Order</i>	29
Gambar 2.10	Hubungan antara Kapasitas Adsorpsi terhadap Waktu pada <i>Pseudo-Second Order</i>	30
Gambar 2.11	a) Prekursor MAX (Ti ₃ AlC ₂) dalam Bentuk Bubuk (b) Sintesis MXene (Ti ₃ C ₂ T _x) dari Fasa Dua Dimensi MAX, c) Skema Reaksi Pembentukan MXene dari MAX dengan Metode <i>Etching</i> dan <i>Sonication</i>	31
Gambar 2.12	Gambar SEM dan TEM Lembaran Berukuran Nano dari MXene (Ti ₃ C ₂ T _x) yang Telah Dietsa Menggunakan Larutan HF	32
Gambar 2.13	(a) Mekanisme Adsorpsi MXene dalam Penyisihan Logam Pb (II), (b) Tampak Atas dari MXene yang Sudah Kontak dengan Logam Pb (II).....	33
Gambar 2.14	Eceng Gondok	35
Gambar 2.15	Mekanisme Adsorpsi Eceng Gondok yang Dikalsinasi dalam Penyisihan Logam Cd ²⁺ dan Cu ²⁺	36
Gambar 3.1	Diagram Alir Tahapan Penelitian.....	45
Gambar 4.1	Hasil SEM A) Material MAX, B) MXene Tanpa Modifikasi, C) MXene/ Eceng Gondok 10:1, D) MXene/ Eceng Gondok 20:1.....	61
Gambar 4.2	Grafik Distribusi Ukuran Partikel Adsorben	63
Gambar 4.3	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L	66

Gambar 4.4	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L	67
Gambar 4.5	Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L	68
Gambar 4.6	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L	69
Gambar 4.7	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L	70
Gambar 4.8	Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L	70
Gambar 4.9	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat dalam Kondisi Terbaik	71
Gambar 4.10	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat dalam Kondisi Terbaik	72
Gambar 4.11	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 5 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	75
Gambar 4.12	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 5 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	76
Gambar 4.13	Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan	

	Konsentrasi Awal Adsorbat 5 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	76
Gambar 4.14	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 15 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	78
Gambar 4.15	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 15 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	79
Gambar 4.16	Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 15 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	80
Gambar 4.17	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 25 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	81
Gambar 4.18	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 25 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	81
Gambar 4.19	Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 25 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	82
Gambar 4.20	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 35 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	83
Gambar 4.21	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan	

	Konsentrasi Awal Adsorbat 35 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	84
Gambar 4.22	Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 35 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1.....	85
Gambar 4.23	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Rasio Nanokomposit dalam Kondisi Terbaik.....	86
Gambar 4.24	Kapasitas Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Rasio Nanokomposit dalam Kondisi Terbaik.....	86
Gambar 4.25	Penurunan Konsentrasi Adsorbat pada Percobaan Adsorpsi dengan Adsorben Mxene tanpa Modifikasi dan Adsorben Nanoserat Selulosa Eceng Gondok.....	92
Gambar 4.26	Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Mxene, Adsorben Nanoserat Selulosa Eceng Gondok, dan Adsorben MXene/ Eceng Gondok.....	93
Gambar 4.27	Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Mxene, Adsorben Nanoserat Selulosa Eceng Gondok, dan Adsorben MXene/ Eceng Gondok.....	94
Gambar 4.28	Kurva Isoterm Langmuir Tipe 1 pada Percobaan Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok	96
Gambar 4.29	Kurva Isoterm Freundlich pada Percobaan Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok.	96
Gambar 4.30	Kinetika Orde Nol Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik.....	99
Gambar 4.31	Kinetika Orde Satu Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik.....	99

Gambar 4.32 Kinetika Orde Dua Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik.....	99
Gambar 4.33 Kinetika <i>Pseudo- First Order</i> Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik	100
Gambar 4.34 Kinetika <i>Pseudo- Second Order</i> Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik	100
Gambar 4.35 Efisiensi Penyisihan Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dari Limbah Elektroplating Artifisial dan Larutan Artifisial Cu pada Kondisi Terbaik	104
Gambar 4.36 Kapasitas Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dari Limbah Elektroplating Artifisial dan Larutan Artifisial Cu pada Kondisi Terbaik.....	105



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran A Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 dan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2022
- Lampiran B *Standard Methode* dan SNI 6989.6:2009
- Lampiran C Pembuatan Larutan Artifisial
- Lampiran D Data Percobaan dan Perhitungan Adsorpsi
- Lampiran E Data Penentuan Isoterm Adsorpsi
- Lampiran F Data Penentuan Kinetika Adsorpsi
- Lampiran G Uji Statistik
- Lampiran H Dokumentasi



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Logam tembaga (Cu) merupakan salah satu contoh logam berat yang menjadi indikator pencemaran oleh air limbah. Logam Cu merupakan logam yang bersifat esensial karena dibutuhkan dalam jumlah tertentu oleh organisme. Menurut *World Health Organization* (WHO) kebutuhan logam Cu untuk manusia adalah 20-30 $\mu\text{g}/\text{kg}$ berat badan. Logam Cu dapat menimbulkan efek toksik dalam kadar tertentu (Setiawan dkk., 2019). Logam Cu yang melebihi kadar tertentu dapat menyebabkan efek negatif terhadap kesehatan manusia, seperti pendarahan pada jalur Gastrointestinal, penyakit Wilson dan Kinsky, nyeri sendi, insomnia, kejang, anemia, *shock*, koma, dan meninggal (Irianti dkk., 2017).

Berbagai metode yang digunakan dalam penyisihan logam berat dari dalam air adalah *ion exchange*, koagulasi, membran, dan adsorpsi. Beberapa metode ini hanya cocok untuk limbah dengan konsentrasi logam berat yang tinggi. Sementara itu metode lain seperti koagulasi akan menimbulkan limbah baru dalam proses penyisihan polutan, dan biaya yang dibutuhkan tinggi karena dalam prosesnya menggunakan bahan kimia. Dari berbagai metode penyisihan logam berat ini adsorpsi lebih sering digunakan sebagai metoda penyisihan logam berat karena memiliki sistem yang sederhana, efektif, dan efisien. Adsorpsi terdiri atas adsorbat dan adsorben yang mudah dibuat. Adsorpsi merupakan proses transfer molekul pada permukaan padatan. Proses ini terjadi karena adanya gaya fisik (gaya Van der Waals) ataupun ikatan kimia (Hu & Xu, 2019).

Salah satu hasil pengembangan bahan adsorpsi berkapasitas tinggi yaitu polimer baru karbida logam transisi dua dimensi (2D) yang dikenal sebagai MXene. MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) dibentuk dengan prekursor MAX (Ti_3AlC_2) direaksikan melalui proses *etching* dengan larutan Asam Fluorida (HF) (Ding dkk., 2017). MXene memiliki struktur unik yang menunjukkan sifat hidrofilik dan memiliki gugus fungsi yang aktif dengan jumlah yang berlimpah di permukaannya, sehingga MXene merupakan adsorben yang efektif untuk banyak molekul dan dapat digunakan untuk penyisihan polutan. Dalam penelitian Shahzad dkk., (2017), DL- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

(*Delaminated MXene*) sebagai adsorben dapat menyisihkan logam Cu dalam larutan artifisial 1000 ppm 2,7 kali lebih tinggi dari karbon aktif dengan penyisihan 98,29 % dan kapasitas adsorpsi 78,45 mg/g. Bagaimanapun, MXene mempunyai kelemahan jika direaksikan di dalam air, yaitu material dua dimensi yang dimiliki MXene mudah menumpuk sehingga kapasitas adsorpsi semakin kecil dan banyak gugus fungsi di permukaan MXene yang tidak berfungsi. Untuk itu dibutuhkan penyisipan material di antara lapisan adsorben MXene sehingga dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi. (Zhang dkk., 2018).

Beberapa material yang digunakan untuk penyisipan di antara lapisan MXene yaitu Sodium Alginat, Senyawa alkali, Asam amino, dan serat alam (bioserat) . Salah satu sumber serat alam adalah eceng gondok. Eceng gondok merupakan hama perairan yang tumbuh cepat di iklim tropis dan subtropis. Eceng gondok mengandung 60% serat selulosa yang dapat menjadi adsorben yang efektif dalam penyisihan logam berat. Selulosa merupakan komponen utama dari serat alami yang memengaruhi sifat mekanik dari serat tersebut. Salah satu jenis selulosa adalah Nanoselulosa yang berukuran 1-100 nm. Nanoselulosa memiliki kepadatan rendah, sifat mekanik yang baik, dan ramah lingkungan (Asrofi dkk., 2018). Dalam penelitian Ramirez-Muñoz dkk., (2021), adsorben eceng gondok dapat menyisihkan kandungan Cu^{2+} dalam larutan artifisial 200 mg/L dengan kapasitas penyisihan sebesar 131,14 mg/g. Nanoserat eceng gondok dapat menjadi alternatif material penyisip antar lapisan MXene sehingga lapisan adsorben tidak menumpuk di dalam air dan memperbesar luas permukaan penjerapan logam untuk proses adsorpsi.

Berdasarkan uraian di atas, dilakukan penelitian mengenai proses adsorpsi menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok, yaitu Mxene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) yang dimodifikasi dengan penyisipan nanoselulosa dari batang eceng gondok di antara lapisan MXene untuk menyisihkan logam berat Cu dari air limbah. Percobaan dilakukan untuk menentukan kapasitas adsorpsi, persamaan isotherm adsorpsi, dan kinetika adsorpsi yang sesuai untuk mempelajari mekanisme adsorpsi yang terjadi pada proses adsorpsi Cu oleh MXene/Eceng Gondok ditinjau dari variasi rasio nanokomposit dan konsentrasi awal logam Cu. Hasil penelitian ini

diharapkan dapat melengkapi informasi kemampuan Mxene sebagai adsorben dan menjadi alternatif teknologi pengolahan air limbah yang mengandung logam berat.

1.2 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penulisan tugas akhir ini adalah untuk menguji kemampuan nanokomposit Mxene/Eceng Gondok sebagai adsorben untuk menyisihkan logam Cu dari air limbah menggunakan sistem *batch*.

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok;
2. Menentukan kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan Cu oleh adsorben nanokomposit MXene/ Eceng Gondok serta variasi konsentrasi awal logam Cu dan rasio nanokomposit terbaik;
3. Menentukan parameter isoterm dan kinetika adsorpsi MXene/Eceng Gondok terhadap logam Cu.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan kemampuan adsorpsi material MXene dua dimensi dalam menyisihkan logam berat dari air limbah dengan cara menyisipkan nanoserat Eceng Gondok di antara lapisan MXene tersebut;
2. Memperbaiki kualitas air limbah yang mengandung logam berat sehingga tidak berbahaya jika dibuang ke saluran drainase atau badan air;
3. Sebagai studi pendahuluan dalam pemanfaatan Mxene/Eceng Gondok sebagai adsorben sebelum dilakukannya penerapan ke lapangan untuk mengolah air limbah.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pada tugas akhir ini adalah:

1. Percobaan adsorpsi dilakukan terhadap larutan artifisial yang mengandung logam berat Cu;
2. Percobaan menggunakan nanokomposit MXene/Eceng Gondok, MXene ($Ti_3C_2T_x$) dibuat dari MAX (Ti_3AlC_2) dengan metode *etching* (Song dkk., 2020), nanoserat Eceng Gondok dibuat dengan metode *digester sonication*

(Asrofi dkk., 2018), dan nanokomposit MXene/Eceng Gondok dibuat dengan metode sonikasi dan pencampuran kimia (Wei dkk., 2018);

3. Karakterisasi adsorben yaitu MAX, MXene tanpa modifikasi, dan MXene/Eceng Gondok menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*, *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX)*, dan *Particle Size Analysis (PSA)*;
4. Percobaan adsorpsi dilakukan dengan sistem *batch* menggunakan nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan variasi rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok dan konsentrasi adsorbat;
5. Analisis konsentrasi logam Cu dilakukan dengan metode *Direct Air-Acetylene* dengan *Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS)* sesuai Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 20th Edition;
6. Persamaan isoterm yang diuji kesesuaiannya yaitu Freundlich dan Langmuir.
7. Penentuan Kinetika Adsorpsi.
8. Percobaan aplikasi terhadap air limbah elektroplating artifisial menggunakan kondisi terbaik dari percobaan adsorpsi menggunakan larutan artifisial Cu.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan latar belakang, maksud dan tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas tentang logam berat, parameter Cu, proses adsorpsi menggunakan material dua dimensi, adsorben yang efektif, Mxene dan nanokomposit eceng gondok sebagai adsorben dan teori-teori pendukung lainnya yang berkaitan dengan penelitian

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang tahapan penelitian yang dilakukan, studi literatur, persiapan percobaan mencakup alat dan bahan, metode analisis laboratorium, lokasi dan waktu penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan hasil penelitian disertai pembahasannya.

BAB V **PENUTUP**

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran berdasarkan penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan.





BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pencemaran Air Limbah oleh Logam Berat

Air merupakan unsur penting dalam pemenuhan kebutuhan manusia dan makhluk hidup lainnya sehingga air yang dimanfaatkan selalu dijaga jumlah dan kualitasnya (Dawud dkk., 2016). Pemanfaatan air oleh manusia tidak hanya sekedar untuk keperluan air minum, namun sudah menjangkau aspek-aspek lain seperti industri, pariwisata, pertanian, peternakan, perumahan, pertambangan, dan lain-lain. Air juga digunakan sebagai produk komersial yang menjadi komoditas yang diperdagangkan, baik untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri maupun untuk meningkatkan perekonomian dalam bentuk ekspor impor (Prayogo, 2016).

Seiring berjalannya waktu, kualitas perairan di seluruh dunia mengalami penurunan akibat pencemaran air yang makin marak terjadi (Dawud dkk., 2016). Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, Pencemaran Air adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia sehingga melampaui Baku Mutu Air yang telah ditetapkan. Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah, air limbah adalah sisa dari suatu usaha dan/atau kegiatan yang berwujud cair. Air limbah domestik adalah air limbah yang berasal dari usaha dan/atau kegiatan pemukiman, rumah makan, perkantoran, perniagaan, apartemen dan asrama.

Logam merupakan salah satu parameter penting dalam mengukur kualitas air limbah. Logam pencemar yang terkandung dalam air limbah didominasi oleh kandungan logam berat. Logam berat secara umum merupakan logam dengan massa jenis, massa atom, dan nomor atom yang tinggi. Logam berat secara kriteria masih memiliki kesamaan dengan logam-logam lainnya, perbedaannya terletak dari pengaruh logam berat tersebut apabila berikatan dengan makhluk hidup (Putri & Sabani, 2018). Logam berat adalah unsur-unsur kimia dengan bobot jenis lebih besar dari 5 gr/cm³ dan memiliki nomor atom antara 22 sampai 92. Terdapat 80 dari 109 unsur kimia di muka bumi ini yang telah teridentifikasi sebagai jenis

logam berat (Sasongko dkk., 2017). Logam berat dibagi ke dalam 2 jenis yaitu logam berat esensial merupakan logam dalam jumlah tertentu yang sangat dibutuhkan oleh organisme, dalam jumlah yang berlebihan, logam tersebut bisa menimbulkan efek toksik, contohnya adalah Zn, Cu, Fe, Co, Mn dan lain sebagainya. Logam berat tidak esensial merupakan logam yang keberadaannya dalam tubuh manusia masih belum diketahui manfaatnya, bahkan bersifat toksik seperti Hg, Cr, Cd, Pb dan lain sebagainya (Asriyani, 2017). Logam berat dengan konsentrasi rendah dibutuhkan dalam perkembangan dan pertumbuhan makhluk hidup. Akumulasi kadar logam berat dalam jumlah sedikit menjadi banyak akan menyebabkan fungsi logam berat berubah sebagai racun yang berdampak bagi makhluk hidup. Logam berat dalam jumlah yang banyak dapat mencemari tanah. Logam Fe, As, Cd, Pb, Hg, Mn, Ni, Cr, Zn, dan Cu berpotensi menimbulkan pencemaran pada tanah karena jumlah penggunaannya yang ekstensif dan tingkat toksisitas yang tinggi (Putri & Sabani, 2018).

Logam berat yang mencemari lingkungan juga akan menyebabkan keseimbangan ekologis menjadi terganggu. Tembaga dalam bentuk ion Cu^{2+} dengan dosis yang tinggi menjadi salah satu jenis logam berat yang berpotensi mencemari lingkungan dan dapat menyebabkan kematian bagi makhluk hidup yang terkontaminasi logam tembaga. Tembaga dalam dosis rendah merupakan salah satu elemen mikro esensial yang penting yaitu sebagai substrat yang sangat penting dalam kelangsungan hidup makhluk hidup. Tembaga dalam bentuk ion Cu^{2+} bersifat xenobiotik dikarenakan bersifat anorganik toksik dan *non-biodegradable* (Beoang, 2019).

2.2 Logam Cu

Tembaga adalah logam pertama yang pernah digunakan oleh manusia. Namanya tampaknya berasal dari pulau Siprus yang pada zaman dahulu memasok tembaga ke Yunani, Roma, dan negara-negara Mediterania lainnya. Orang Romawi menyebutnya 'bijih dari Siprus (*aes cyprium*)', kemudian lebih sering dikenal sebagai *cuprum* (tembaga). Pada awal sejarah umat manusia, paduan tembaga dengan kandungan timah antara 20 dan 50% digunakan untuk produksi cermin karena reflektifitasnya yang tinggi. Tembaga, dengan penggunaan tahunan lebih

dari 15 juta ton, adalah bahan logam terpenting ketiga. Hanya baja dan aluminium yang digunakan dalam jumlah yang lebih tinggi. Logam tembaga (Cu) merupakan logam yang memiliki sumber yang melimpah di seluruh penjuru dunia (Feron, 2007).

Tembaga secara kimiawi merupakan unsur ke-29 dengan golongan II B dalam tabel periodik. Logam ini memiliki jumlah 29 elektron dan memiliki 11 isotop mulai dari ^{58}Cu sampai ^{68}Cu (Massey dkk., 1973). Tembaga dapat membentuk berbagai macam senyawa, biasanya dengan bilangan oksidasi +1 dan +2. Senyawa tembaga yang paling sederhana adalah biner, hanya mengandung dua unsur, dengan unsur utama adalah oksida, sulfida, dan halida. Sebanyak 400 komposisi paduan tembaga yang berbeda secara umum dikelompokkan dengan contoh seperti, tembaga, paduan tembaga tinggi, kuningan, perunggu, tembaga nikel, tembaga-nikel-seng (perak nikel), tembaga bertimbal dan paduan khusus (Chen & Thyssen, 2018).

Tembaga (Cu) adalah logam jingga kemerahan yang lunak dan dapat ditempa, serta liat. Tembaga memiliki potensial elektroda standar 0,34 volt, menunjukkan bahwa tembaga merupakan reduktor terlemah dibandingkan logam-logam lain yang terdapat pada air limbah seperti logam Pb, Cd, dan Cr (Sukmawati, 2020). Tembaga memiliki massa atom standar 63,546 g/mol. Logam Cu mempunyai titik lebur sebesar 1357,77 K dan memiliki titik didih 2835 K. Logam ini banyak digunakan pada pabrik yang memproduksi alat-alat listrik, gelas dan zat warna yang biasanya bercampur dengan logam lain seperti *alloy* dengan perak, skandium, timah putih dan seng (Asriyani, 2017). Bentuk fisik logam tembaga (Cu) dapat dilihat pada **Gambar 2.1** berikut.



Gambar 2.1 Logam Tembaga (Cu)

Sumber: Wikipedia

Sifat-sifat fisik dan kimia dari logam tembaga (Cu) dapat dilihat pada **Tabel 2.1** berikut:

Tabel 2.1 Sifat-sifat Logam Cu

Sifat	Keterangan
Warna	Jingga Kemerahan
Nama, Lambang, Nomor Atom	Tembaga, Cu, 29
Massa Atom	63,546 g/mol
Konfigurasi Elektron	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹
Fase	Padat
Massa Jenis (sekitar suhu kamar)	8,94 g/cm ³
Titik Lebur	1357,77 K
Titik Didih	2835 K
Bilangan Oksidasi	1,2,3,4
Elektronegativitas	1,90
Jari-jari atom	128 pm

Sumber: Asriyani, 2017

2.2.1 Sumber Logam Cu

Logam tembaga merupakan logam esensial yang keberadaannya cukup banyak ditemukan baik di tanah maupun di perairan. Logam ini secara alami dapat dihasilkan dari peristiwa alam seperti batuan mineral yang mengalami pengikisan dan air hujan yang membawa partikulat tembaga yang berada di udara. Logam tembaga secara non alamiah masuk ke lingkungan didominasi oleh aktivitas manusia. Aktivitas manusia yang merugikan kerap kali menimbulkan pencemaran lingkungan yang mengakibatkan konsentrasi pencemar seperti logam tembaga meningkat. Aktivitas manusia yang menyebabkan pencemaran tembaga di lingkungan yaitu pembuangan limbah industri yang memakai tembaga dalam proses produksinya, serta penggunaan pestisida yang berlebihan (Rompegading dkk., 2021).

2.2.2 Keberadaan Logam Cu di Air Limbah

Logam Cu merupakan logam esensial yang dibutuhkan oleh hewan dan tumbuhan dengan kadar tertentu dan keberadaannya dapat dijumpai di perairan alami. Logam Cu dijumpai di perairan sebagai garam-garam Cu divalen yang sangat mudah larut di air. Apabila masuk kedalam perairan yang alkalis, ion Cu mengalami presipitasi sebagai tembaga hidroksida [Cu(OH)₂] dan karbonat [CuCO₃]. Perairan alami mengandung kadar logam Cu sebesar < 0.02 mg/L.

Perairan laut mengandung Logam Cu yang berkisar antara 0.001-0.025 mg/L. (Jainal dkk., 2019).

Air limbah industri *tailing* mengandung konsentrasi logam Cu pada air limbah berkisar antara 0,09 mg/L-0,84 mg/L (Metboki dkk., 2019). Industri perak dapat menghasilkan air limbah dengan konsentrasi logam Cu yang sangat tinggi yaitu 201,90 ppm. Tinggi rendahnya konsentrasi logam Cu pada air limbah tersebut tergantung kepada jenis industri yang menghasilkan air limbah (Sekarwati dkk., 2015). Penelitian yang diadakan oleh Pulungan & Embun, (2017) menunjukkan bahwa konsentrasi logam Cu pada limbah elektroplating di Kota Bandar Lampung sebesar 15,12 mg/L. Penelitian Fuad dkk., (2013) menunjukkan konsentrasi logam Cu pada limbah elektroplating di daerah Sukadono, Jawa Timur sebesar 20,13 mg/L. Berdasarkan penelitian yang telah diadakan oleh Qordhowi, (2019) yang menganalisis kadar Logam Cu di air tanah di Kampung Kalawi Timur, Ampang, Kota Padang didapatkan konsentrasi logam Cu pada air tanah sebesar 2,021 mg/L. keberadaan logam Cu pada air tanah ini disebabkan oleh lokasi sumur tempat pengambilan air tanah terdapat area perbengkelan. Jarak antara sumur dan bengkel yaitu ± 1 m dengan kedalaman sumur 3,5 m. Konsentrasi logam Cu dari berbagai air limbah dapat dilihat pada **Tabel 2.2**

2.2.3 Dampak Pencemaran Logam Cu

Logam Cu merupakan salah satu logam berat yang berbahaya bagi makhluk hidup. Bagi manusia, jika paparan logam Cu sudah sampai pada organ hati maka dapat menyebabkan terjadinya penyakit *hepatic cirrhosis*. Logam Cu yang sudah menginfeksi bagian otak manusia akan menyebabkan terjadinya disfungsi otak dan selubung mielin pada neuron akan mengalami kerusakan sehingga sistem saraf akan menjadi terganggu. Selain itu paparan logam Cu akan menurunkan kinerja ginjal dalam melakukan hemodialisis dan ekskresi pada manusia (Chairiyah dkk., 2013).

Tabel 2.2 Kandungan Tembaga dari Berbagai Air Limbah

NO	Judul	Penulis	Jenis Limbah	Konsentrasi Cu	Satuan
1	Uji Efektifitas Dan Efisiensi Filter Biomassa Menggunakan Sabut Kelapa (<i>Cocos Nucifera</i>) Sebagai Bioremoval Untuk Menurunkan Kadar Logam (Cd, Fe, Cu), Total Padatan Tersuspensi (TSS) Dan Meningkatkan pH Pada Limbah Air Asam Tambang Batubara	(Pinandari dkk., 2011)	Limbah batubara dari PT Pamapersada Nusantara	0,25	mg/l
2	Kemampuan <i>Chaetoceros calcitrans</i> (<i>Paulsen</i>) <i>Takano</i> dalam Menurunkan Kadar Logam Berat Tembaga (Cu) pada Limbah Tekstil	(Fitriyanto dkk., 2017)	Limbah Tekstil	0,595	mg/l
3	Penurunan Kadar Tembaga (Cu) pada Limbah Cair Industri <i>Electroplating</i> Menggunakan Cangkang Telur Ayam Potong Teraktivasi Termal	(Ratnasari dkk., 2017)	Limbah Cair <i>Electroplating</i>	0,91	mg/l
4	Pemanfaatan Arang Ampas Tebu Sebagai Adsorben Ion Logam Cd, Cr, Cu dan Pb dalam Air Limbah	(Apriliyani, 2010)	Limbah Lab Terpadu UIN Syarif Hidayatullah Jakarta	1,4	mg/l
5	Kandungan Logam Berat Cu (Tembaga) Dan Pb (Timbal) Pada Air Dan Sedimen Di Kawasan Industri Teluk Lampung, Provinsi Lampung	(Permata dkk., 2018)	Air dan sedimen pada kawasan industri Teluk Lampung	49,98	mg/l
6	Pemanfaatan Pektin Dari Kulit Jeruk Manis Sebagai Biosorben Dalam Menurunkan Kadar Tembaga (Cu) Pada Limbah Cair Industri <i>Electroplating</i>	(Pulungan & Embun, 2017)	Limbah <i>electroplating</i> bandar lampung	15,12	mg/l
7	Efektivitas Kombinasi <i>Salvinia Molesta</i> dengan <i>Hydrilla Verticillata</i> dalam Remediasi Logam Cu pada Limbah <i>Electroplating</i>	(Fuad dkk., 2013)	Limbah <i>electroplating</i> daerah sukodono	20,13	mg/l
8	Pemanfaatan Kulit Pisang Kepok Sebagai Adsorben Untuk Menyisihkan Logam Cu	(Alifaturrahma & Hendriyanto, 2018)	Limbah <i>electroplating</i>	128,9	mg/l
9	Analisis Logam Tembaga (Cu) Pada Buangan Limbah Tromol (Tailing) Pertambangan Poboya	(Nuriadi dkk., 2013)	Limbah Pengolahan emas pada	204,92	mg/kg

NO	Judul	Penulis	Jenis Limbah	Konsentrasi Cu	Satuan	
			pertambangan emas Poboya	151,85	mg/kg	
				79,51	mg/kg	
					167,78	mg/kg
					190,68	mg/kg
					rata-rata	mg/kg
				158,94		

Makhluk hidup yang tinggal di perairan sangat peka terhadap dampak yang ditimbulkan akibat perairan yang memiliki kadar Cu berlebih. Fitoplankton dapat mengalami kematian akibat paparan Konsentrasi Cu terlarut dalam air laut sebesar 0,01 mg/L dapat menghambat aktivitas enzim dalam pembelahan sel fitoplankton. Konsentrasi Cu terlarut sebesar 0,17-100 mg/L dapat membunuh organisme akuatik terutama *crustacea* dalam waktu 96 jam (Mustafa dkk, 2021)

Sebuah penelitian yang diadakan oleh (Maharajan dkk., 2016) yang meneliti mengenai ikan kakap putih (*Lates calcarifer*) yang telah terpapar logam tembaga selama 28 hari. Penelitian ini menjelaskan bahwa akumulasi tembaga yang terdapat di berbagai organ ikan kakap menyebabkan banyaknya cacat secara histopatologi. Paparan tembaga telah merusak struktur insang pada ikan kakap putih. Jaringan insang ikan kakap putih yang telah terpapar tembaga juga mengalami pelebaran pembuluh darah lokal. Perubahan struktur insang ini berdampak pada ikan yang akan mengalami hipoksia dan gangguan pernapasan dengan keseimbangan ion asam basa.

2.3 Kebijakan Tentang Konsentrasi Logam Cu di Perairan

Air limbah yang tidak diolah sebelum dibuang ke lingkungan dapat menjadi pencemar yang merusak lingkungan karena kandungan logam yang sangat banyak, sehingga diperlukan baku mutu yang menjadi standar pengolahan air limbah agar aman dibuang ke lingkungan. Provinsi Sumatera Barat belum memiliki peraturan yang mengatur tentang kualitas logam Cu yang diperbolehkan di perairan. Menurut *Environmental Protection Agency* (EPA) kadar tembaga (Cu^{2+}) maksimum dalam air limbah adalah sebesar 1,3 mg/L, sedangkan menurut *World Health Organization* (WHO) kandungan logam berat tembaga (Cu^{2+}) maksimum yang diperbolehkan dalam air sebesar 1,5 mg/L (Utama dkk., 2016).

2.3.1 Stream Standard

Peraturan yang mengatur tentang baku mutu Logam Cu di perairan yaitu Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup lampiran VI

untuk Baku Mutu Air Nasional dan lampiran VIII untuk Baku Mutu Air Laut. Baku mutu parameter logam Cu dapat dilihat pada **Tabel 2.3** dan **Tabel 2.4** berikut:

Tabel 2.3 Baku Mutu Air Nasional Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021

Parameter	Jenis Air	Satuan	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4
Tembaga	Air Sungai dan Sejenisnya	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,2
	Air Danau dan Sejenisnya		0,02	0,02	0,02	0,2

Sumber: Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021*

Keterangan:

1. Kelas satu merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut;
2. Kelas dua merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut;
3. Kelas tiga merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi tanaman, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut;
4. Kelas empat merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanaman dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Tabel 2.4 Baku Mutu Air Laut Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021

Parameter	Jenis Air	Satuan	Pelabuhan	Wisata Bahari	Biota Laut
Tembaga	Air Laut	mg/l	0,05	0,05	0,008

Sumber: Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021

2.3.2 Emission Standard

Peraturan yang mengatur tentang baku mutu Logam Cu di air limbah yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. Baku mutu parameter logam Cu per kategori air limbahnya dapat dilihat pada **Tabel 2.5** berikut:

Tabel 2.5 Baku Mutu Limbah berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia nomor 5 Tahun 2014

Parameter	Jenis Industri	Satuan	Kadar Maksimum yang Diperbolehkan
Tembaga	Pelapisan Logam dan Galvanis		0,5
	Baterai Timbal Asam (Aki)		1
	Elektronika		0,6
	Petrokimia Hulu		3
	<i>Polyethylene Terephthalate (PET)</i>		3
	Soda Kostik atau Khlor	mg/l	1
	Cat		0,8
	Pestisida		1
	Fasilitas Pelayanan Kesehatan		2
	Usaha dan/atau Kegiatan yang Belum Memiliki Baku Mutu Air Limbah yang Ditetapkan		Golongan I = 2 Golongan II = 3

Sumber: Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses perpindahan massa di mana zat yang ada dalam fase cair diadsorpsi atau terakumulasi pada fase padat dan dengan demikian zat yang diadsorpsi dikeluarkan dari cairan. Adsorpsi merupakan proses mengumpulkan zat yang ada dalam larutan pada *interface* yang sesuai. Adsorpsi merupakan proses yang melibatkan adsorbat dan adsorben. Bagian yang mengalami adsorpsi ke permukaan disebut sebagai adsorbat, dan padatan di mana konstituen diadsorpsi disebut sebagai adsorben. Selama proses adsorpsi, spesies terlarut diangkut ke dalam granula adsorben padat berpori melalui difusi dan kemudian teradsorpsi ke permukaan bagian dalam yang luas dari adsorben (Crittenden dkk., 2017). Perpindahan massa yang terjadi terdiri dari dua fasa yaitu gas-padat dan cair-padat (Reynolds & Richards, 1996)

Absorpsi dan Adsorpsi merupakan dua proses yang memiliki perbedaan yang signifikan. Absorpsi gas merupakan proses dimana campuran gas dibawa ke dalam kontak dengan cairan untuk tujuan melarutkan satu atau lebih komponen campuran ke dalam cairan. Absorpsi adalah fenomena massal, dan tingkat

pemisahan dibatasi oleh kelarutan gas yang terlibat. Sebaliknya, adsorpsi adalah fenomena permukaan, dan tingkat adsorpsi dibatasi oleh hubungan isoterm adsorpsi yang relevan. Adsorpsi dapat dilakukan dengan melewati aliran gas dan cairan melalui kolom yang dikemas secara bersamaan atau berlawanan arah. Proses ini terdiri dari dua fase bergerak (gas dan cair) dan fase diam (pengemasan kolom), yang menyediakan area antarmuka untuk kontak cairan/gas. Dalam adsorpsi tipe *fixed-bed*, cairan yang akan diolah melewati *bed* yang telah dilengkapi dengan adsorben. Proses ini melibatkan dua fase, fase fluida bergerak dan fase padat stasioner dari adsorben. Adsorpsi dapat diartikan sebagai proses dalam keadaan tunak, sedangkan adsorpsi dalam tipe *fixed-bed* pada dasarnya dilakukan dalam keadaan tidak tunak. Akibatnya, perencanaan yang diperlukan untuk desain adsorpsi *fixed-bed* lebih luas daripada adsorpsi (Tien, 2019).

Mekanisme dalam adsorpsi memiliki beberapa tahapan yaitu (Reynolds & Richards, 1996):

1. Mekanisme ini dimulai saat substansi suatu larutan mengalami perpindahan menuju lapisan film atau *boundary layer* yang ada di sekeliling;
2. Kemudian dilanjutkan dengan difusi substansi yang telah melewati lapisan film hingga ke permukaan adsorben, proses ini dinamakan *film diffusion*;
3. Dilanjutkan difusi substansi sebelumnya ke dalam kapiler berpori di dalam adsorben, proses ini dinamakan *pore diffusion*;
4. Substansi tersebut telah diadsorpsi pada pori adsorben.

Berdasarkan interaksi molekul antara adsorben dan adsorbat, proses adsorpsi diartikan sebagai spesies terlarut terkonsentrasi pada permukaan padat melalui reaksi kimia (*chemisorption*) atau daya tarik fisik (*physical adsorption*) ke permukaan (Tien, 2019). Secara garis besar adsorpsi dibagi atas (Adamson, 1997):

1. Adsorpsi Fisika

Adsorpsi fisika terjadi akibat adanya ikatan kimia yaitu ikatan antar molekul adsorbat dan adsorben yang terjadi akibat gaya Van der Waals. Substansi terlarut akan diadsorpsi oleh permukaan media jika gaya tarik molekul antara substansi dan permukaan media adsorben lebih besar dibandingkan gaya tarik antara substansi terlarut dan larutan. Gaya Van der Waals pada adsorpsi fisika

relatif kecil dan reaksinya bersifat reversibel. Adsorpsi fisik ini terjadi pada zat-zat yang bersuhu rendah dengan adsorpsi relatif rendah. Perubahan panas pada proses adsorpsi mempunyai derajat yang sama dengan panas kondensasi dari gas menjadi cair. Sehubungan dengan itu, gaya yang menahan adsorpsi molekul-molekul fluida biasanya cepat tercapai dan bersifat reversibel karena energi yang dibutuhkan sangat kecil. Energi yang dilepaskan pada adsorpsi fisika relatif rendah yaitu sekitar 20,9 kJ/mol karena molekul terikat sangat lemah.

2. Adsorpsi Kimia

Ikatan kimia yang terbentuk antara substansi terlarut dalam larutan dengan molekul dalam adsorben menyebabkan terjadinya adsorpsi kimia. *Ion exchange* merupakan contoh adsorpsi kimia dengan reaksinya yang bersifat *irreversible*. Adsorpsi ini bersifat spesifik dan terjadi akibat adanya ikatan kimia antara adsorben dengan adsorbat yang menghasilkan panas lebih besar dibandingkan adsorpsi fisika. Adsorpsi kimia terjadi pada suhu yang tinggi. Akibat adanya ikatan kimia, maka pada permukaan adsorben dapat berbentuk suatu lapisan yang apabila dibiarkan terus-menerus dapat menghambat proses adsorpsi zat lainnya. Pada adsorpsi kimia partikel melekat pada permukaan dengan membentuk ikatan kimia (biasanya ikatan kovalen). Adsorpsi kimia menghasilkan pembentukan lapisan monomolekuler adsorbat pada permukaan melalui gaya-gaya dari valensi sisa dari molekul-molekul pada permukaan. Adsorpsi kimia menjelaskan bahwa pada permukaan adsorben terdapat situs aktif yang jumlahnya sebanding terhadap luas permukaan adsorben. Oleh karena itu, jika situs aktif pada permukaan dinding sel adsorben telah jenuh oleh ion logam, maka penambahan konsentrasi tidak dapat lagi meningkatkan kemampuan adsorpsi dari adsorben tersebut.

Mekanisme adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia tercantum pada **Tabel 2.6**.

Tabel 2.6 Perbandingan Mekanisme Adsorpsi antara Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia

Parameter	Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
Pemakaiannya Untuk Pengolahan Air	Sering digunakan dalam pengolahan air	Jarang digunakan dalam pengolahan air
Laju Proses	Dibatasi oleh transfer massa	Variabel
Jenis Ikatan	Ikatannya nonspesifik seperti gaya Van der Waals	Ikatannya spesifik, seperti pertukaran elektron dan ikatan kimia di permukaan
Tipe Reaksi	Reversibel, Eksotermik	Nonreversibel, eksotermik
Energi Adsorpsi	4-40 kJ/mol	> 200 kJ/mol

Sumber: Crittenden dkk., 2017

2.4.1 Faktor yang Memengaruhi Adsorpsi

Proses adsorpsi dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain (Eckenfelder, 1999):

1. Luas permukaan adsorben

Proses adsorpsi tergantung pada banyaknya tumbukan yang terjadi antara partikel-partikel adsorbat dan adsorben. Tumbukan efektif antara partikel itu akan meningkat dengan meningkatnya luas permukaan. Jadi, semakin besar luas permukaan adsorben maka penyerapan yang terjadi semakin merata.

2. Konsentrasi adsorbat

Konsentrasi adsorbat sangat berpengaruh terhadap penyerapan adsorbat oleh adsorben. Pada permukaan penyerap, terdapat sejumlah sisi aktif dengan luas permukaan penyerap. Jadi dengan memperbesar konsentrasi larutan serapan adsorbat akan meningkat secara linier hingga konsentrasi tertentu.

3. pH

pH mempunyai pengaruh dalam proses adsorpsi. pH lingkungan sangat memengaruhi sifat gugus aktif dari adsorben dan adsorbatnya.

4. Waktu kontak

Waktu kontak merupakan suatu hal yang sangat menentukan dalam proses adsorpsi. Waktu kontak yang lebih lama memungkinkan proses difusi dan penempelan molekul adsorbat berlangsung lebih baik. Waktu kontak untuk mencapai keadaan setimbang pada proses serapan logam oleh adsorben berkisar antara beberapa menit hingga beberapa jam.

5. Tumbukan antar partikel

Proses adsorpsi tergantung pada banyaknya tumbukan yang terjadi antara partikel-partikel adsorbat dan adsorben. Tumbukan antar partikel ini dapat dipercepat dengan adanya kenaikan suhu.

6. Diameter Adsorben

Diameter suatu adsorben memengaruhi seberapa banyak adsorbat yang akan terikat pada adsorben. Semakin besar diameter suatu adsorben maka adsorbat yang terikat juga semakin banyak begitu juga sebaliknya.

2.4.2 Adsorben

Adsorben merupakan fasa padat, cair, maupun gas yang berakumulasi dengan adsorbat dalam proses adsorpsi (Tchobanoglous, 2003). Sebagian besar zat padat memiliki beberapa kapasitas adsorpsi untuk gas dan/atau cairan, tetapi hanya beberapa dari zat padat yang memenuhi persyaratan yang diperlukan untuk memenuhi syarat sebagai adsorben untuk penggunaan praktis. Beberapa adsorben yang paling banyak digunakan adalah (Tien, 2019) :

a. Karbon Aktif

Karbon aktif dapat dihasilkan dari karbonisasi bahan seperti batok kelapa, batu bara, lignit, kayu, dan sejenisnya, diikuti oleh aktivasi dengan udara atau uap. Hal ini digunakan secara luas untuk pemulihan uap organik, *decoloring* larutan cair, dan perawatan serta pengolahan air minum dan air limbah.

b. Alumina Aktif

Al_2O_3 dibuat dengan menghilangkan air dari koloid alumina. Adsorben ini memiliki kapasitas tinggi untuk uap air, dan digunakan terutama sebagai pengering untuk gas dan cairan. Alumina aktif dapat diaktifkan kembali untuk digunakan kembali.

c. Silika Aktif

Silika aktif dibuat dari gel yang diendapkan dengan perlakuan asam larutan natrium silikat. Silika aktif digunakan terutama untuk dehidrasi udara dan menghilangkan spesies beracun dari udara untuk tujuan perlindungan pribadi.

d. Zeolit

Kebanyakan adsorben memiliki pori-pori meliputi berbagai ukuran. Zeolit molekuler adalah polimer anorganik kristal aluminosilikat, alkali, atau unsur alkali tanah seperti Na, K, dan Ca. Sel kristal dapat menjebak materi yang teradsorpsi, dan diameter adsorben dipengaruhi oleh komposisi kristal. Zeolit molekuler sangat berguna dalam pemisahan campuran hidrokarbon

e. Adsorben Polimer

Adsorben ini dibuat dari polimerisasi stirena dan divinil benzena atau ester akrilik untuk menyerap organik nonpolar dari air larutan atau zat terlarut polar. Secara umum, adsorben polimer lebih mahal daripada adsorben lainnya, sehingga penggunaan adsorben ini cenderung selektif.

2.5 Sistem Adsorpsi

Sistem adsorpsi terbagi dua, yaitu adsorpsi dengan sistem *batch* dan adsorpsi sistem kontinu (kolom). Adsorpsi sistem *batch* dilakukan dengan cara mencampurkan adsorben dalam larutan adsorbat, lalu diaduk untuk mendapatkan kontak yang merata, sehingga terjadi proses adsorpsi. Adsorpsi sistem kolom dilakukan dengan cara adsorben secara kontinu berkontak dengan adsorbat, sehingga proses kontak yang terjadi relatif konstan (Tchobanoglous, 2003).

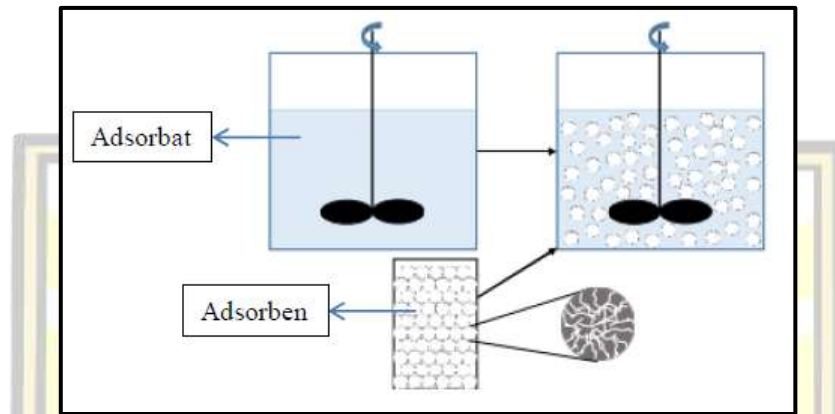
2.5.1 Sistem Batch

Adsorpsi sistem *batch* merupakan suatu adsorpsi yang menggunakan wadah yang berisi air yang akan dianalisis. Air tersebut dikontakkan dengan adsorben dengan kecepatan dan waktu tertentu. Adsorben dan air kemudian dipisahkan dengan cara penyaringan. Komponen yang telah terikat oleh adsorben dilepaskan kembali dengan melarutkan adsorben dalam pelarut tertentu. Sistem *batch* sering digunakan apabila air yang akan diolah volumenya relatif tidak terlalu besar dan digunakan untuk proses penjernihan air. (McCabe dkk., 2004).

Adsorpsi sistem *batch* memiliki beberapa keunggulan seperti pengoperasiannya yang lebih mudah serta tidak ada pengaruh zat lain yang akan mengganggu proses adsorpsi karena pembersihan alat langsung dilakukan setelah proses adsorpsi selesai, hasil analisis dapat dipantau dengan baik dan sebagian besar peneliti menggunakan sistem *batch* untuk menganalisis kelayakan sistem adsorpsi. Dari segi biaya operasional sistem *batch* juga lebih murah. Sistem *batch* juga memiliki

beberapa kekurangan yaitu hanya bisa digunakan untuk limbah skala kecil dan tidak memungkinkan untuk skala besar seperti industri (Patel, 2019).

Adsorpsi sistem *batch* menggunakan pengadukan dengan gerakan melingkar, dimana adsorbat dan adsorben akan berkontak selama proses pengadukan. Ilustrasi adsorpsi sistem *batch* dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.

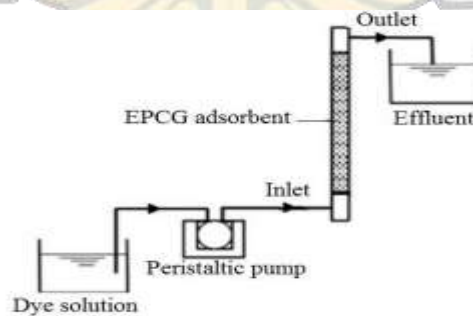


Gambar 2.2 Ilustrasi Adsorpsi Sistem Batch

Sumber: Brandani, 2020

2.5.2 Sistem Kontinu (Kolom)

Sistem kontinu (kolom) menggunakan silinder vertikal atau horizontal. Air yang akan diolah dialirkan secara konstan ke dalam suatu kolom adsorpsi yang berisi adsorben dengan kecepatan aliran tertentu. Kemudian komponen yang ingin disisahkan akan diserap oleh adsorben (McCabe dkk., 2004). Sistem kontak antara adsorben dan adsorbat yang biasanya digunakan dalam metode kolom adalah *fixed bed* dan *moving bed*. *Fixed bed* beroperasi secara *upflow* maupun *downflow* (Reynolds & Richards, 1996). Ilustrasi adsorpsi sistem kontinu dapat dilihat pada **Gambar 2.3**



Gambar 2.3 Ilustrasi Adsorpsi Sistem Kontinu

Sumber: Nguyen dkk., 2021

2.6 Efisiensi Penyisihan dan Kapasitas Adsorpsi

Efisiensi penyisihan merupakan persentase yang menyatakan efisiensi adsorben dalam menyerap kontaminan pada larutan adsorbat. Efisiensi penyisihan dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 2.1** (Kamath dkk., 2019):

$$E = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100\% \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

- E = Penyisihan (%)
- C₀ = Konsentrasi awal adsorbat (mg/L)
- C = Konsentrasi akhir adsorbat (mg/L)

Kapasitas adsorpsi merupakan kapasitas yang dimiliki oleh adsorben dalam menyerap kontaminan pada larutan adsorbat. Kapasitas adsorpsi dinyatakan dalam mg/g adsorben. Besar kapasitas adsorpsi dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 2.2** (Kamath dkk., 2019):

$$q_e = \frac{(C_0 - C)V}{m} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- q = Kapasitas adsorpsi (mg/g)
- C₀ = Konsentrasi awal adsorbat (mg/L)
- C = Konsentrasi akhir adsorbat (mg/L)
- V = Volume larutan (L)
- m = Massa adsorben (g)

2.7 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi adalah metode yang paling sering digunakan untuk menentukan keadaan kesetimbangan dari sistem adsorpsi. Cara ini dapat memberikan informasi yang berguna mengenai adsorbat, adsorben, dan proses adsorpsi. Isoterm adsorpsi membantu dalam penentuan luas permukaan adsorben, volume pori-pori, distribusi ukuran pori-pori adsorben, panas adsorpsi, dan daya

serap relatif gas atau uap pada adsorben tertentu. Beberapa persamaan isoterm adsorpsi telah diturunkan. Ada tiga kemungkinan pendekatan teoritis untuk menurunkan isoterm adsorpsi yaitu (Bansal & Meenakshi, 2005) :

1. Pendekatan kinetik
2. Pendekatan statistik
3. Pendekatan termodinamika

Dalam pendekatan kinetik, kondisi kesetimbangan telah tercapai jika laju adsorpsi sama dengan laju desorpsi pada kesetimbangan. Dalam pendekatan statistik, konstanta kesetimbangan diwakili oleh rasio fungsi partisi situs kosong, molekul teradsorpsi, dan molekul fase gas. Persamaan isoterm dapat diperoleh dengan menyamakan rasio ini dengan rasio konsentrasi adsorbat yang sesuai. Pendekatan ini memiliki keuntungan yang memberikan nilai statistik untuk konstanta yang tidak dapat dievaluasi oleh pendekatan kinetik. Kesetimbangan juga dapat ditentukan secara pendekatan termodinamika, dengan menggunakan kondisi bahwa usaha yang dilakukan dalam mentransfer sejumlah kecil gas dari fase gas ke permukaan pada suhu konstan adalah nol (Bansal & Meenakshi, 2005).

2.7.1 Isoterm Langmuir

Persamaan isoterm Langmuir adalah isoterm adsorpsi pertama yang dikembangkan secara teoritis. Banyak persamaan yang diusulkan kemudian dan yang sesuai dengan hasil eksperimen pada rentang yang luas didasarkan pada persamaan ini, atau persamaan ini telah dikembangkan menggunakan konsep Langmuir. Dengan demikian, persamaan Langmuir masih mempertahankan posisi penting dalam teori adsorpsi fisika serta adsorpsi kimia. Persamaan ini juga telah diturunkan menggunakan pendekatan termodinamika dan statistik tetapi pendekatan kinetik yang umum digunakan dalam penurunannya. Ilmuwan Amerika Irving Langmuir menurunkan persamaan ini berdasarkan asumsi tertentu. Hal yang penting dalam asumsi Isoterm ini adalah (Bansal & Meenakshi, 2005):

1. Zat yang teradsorpsi (atom atau molekul atau ion) melekat pada permukaan pada situs terlokalisasi tertentu.
2. Setiap situs menampung satu dan hanya satu zat teradsorpsi.

- Keadaan energi masing-masing entitas yang teradsorpsi adalah sama di semua tempat pada permukaan, terlepas dari ada atau tidak adanya zat lain yang diserap di tempat yang berdekatan. Dengan demikian, model Langmuir (juga disebut model terlokalisasi) mengasumsikan bahwa permukaannya sangat halus dan homogen dan bahwa interaksi lateral antara zat yang teradsorpsi dapat diabaikan.

Persamaan Isoterm Langmuir dapat dilihat pada **Persamaan 2.3** (Tchobanoglous, 2003):

$$q_e = \frac{ab C_e}{1 + b C_e} \dots\dots\dots(2.3)$$

Konstanta isoterm Langmuir dapat ditentukan dengan plot data C_e/q_e pada sumbu y terhadap C_e pada sumbu x sehingga diperoleh **Persamaan 2.4** (Tchobanoglous, 2003):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C_e \dots\dots\dots(2.4)$$

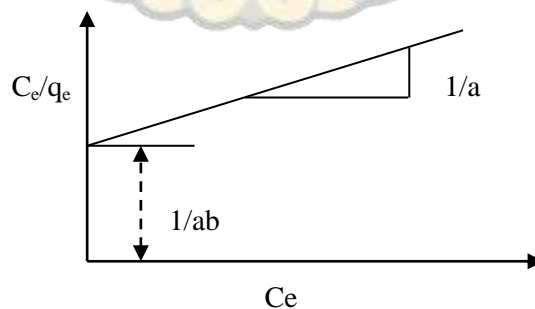
Dimana:

q_e = kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

C_e = konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah diadsorpsi (mg/L)

a, b = konstanta empiris

Dari persamaan tersebut dapat dijadikan kedalam grafik pada **Gambar 2.4** berikut.



Gambar 2.4 Skema Grafik Isoterm Langmuir
Sumber: Jain dkk., 2019

Konstanta Isoterm Langmuir juga dapat ditentukan dari empat jenis tipe linearisasi dan regresi sederhana yang akan menghasilkan estimasi parameter yang berbeda. Empat persamaan yang dapat digunakan adalah plot antara C_e/q_e dengan nilai C_e untuk Isoterm Langmuir tipe 1, $1/q_e$ dan $1/C_e$ untuk Isoterm Langmuir Tipe 2, q_e dan q_e/C_e untuk Isoterm Langmuir tipe 3, q_e/C_e dan q_e untuk Isoterm Langmuir Tipe 4. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Tabel 2.7**.

Kesesuaian pola isoterm adsorpsi Langmuir dapat dinyatakan dalam istilah parameter kesetimbangan R_L atau faktor pemisah (*the separation factor*). Nilai R_L terdiri dari empat jenis yang mengindikasikan isoterm yang terjadi, antara lain $R_L > 1$ yang merupakan tipe isoterm tidak sesuai (*unfavourable*), $R_L = 1$ menunjukkan tipe linear, $0 < R_L < 1$ menunjukkan tipe isoterm sesuai (*favourable*) dan $R_L = 0$ menunjukkan tipe isoterm dimana adsorpsi terjadi secara *irreversible*. Nilai R_L dapat ditentukan dari **Persamaan 2.5**:

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \dots \dots \dots (2.5)$$

Tabel 2.7 Persamaan Matematika Model Isoterm Langmuir

Isoterm	Persamaan	Persamaan Linear	Plot
Langmuir Tipe 1		$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L q_m}$	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e
Langmuir Tipe 2	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$	$\frac{1}{q_e}$ vs $\frac{1}{C_e}$
Langmuir Tipe 3		$q_e = q_m - \left(\frac{1}{K_L} \right) \frac{q_e}{C_e}$	q_e vs $\frac{q_e}{C_e}$
Langmuir Tipe 4		$\frac{C_e}{q_e} = K_L q_m - K_L q_e$	$\frac{q_e}{C_e}$ vs q_e

Sumber: Langmuir, 1918

2.7.2 Isoterm Freundlich

Isoterm Freundlich dapat digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi pada berbagai konsentrasi. Adsorben yang mengikuti persamaan isoterm Freundlich diasumsikan memiliki permukaan heterogen yang terdiri dari situs-situs dengan potensi adsorpsi yang berbeda, dan setiap situs diasumsikan menyerap molekul (Çeçen & Özgür, 2012). Persamaan isoterm Freundlich adalah bentuk sederhana dari isoterm Langmuir. Persamaan ini lebih penting untuk adsorpsi kimia, meskipun beberapa data adsorpsi fisik juga telah ditemukan sesuai dengan

persamaan ini (Bansal & Meenakshi, 2005). Freundlich merumuskan persamaan isotermnya dalam **Persamaan 2.6** (Tchobanoglous, 2003):

$$q_e = kC_e^{1/n} \dots\dots\dots(2.6)$$

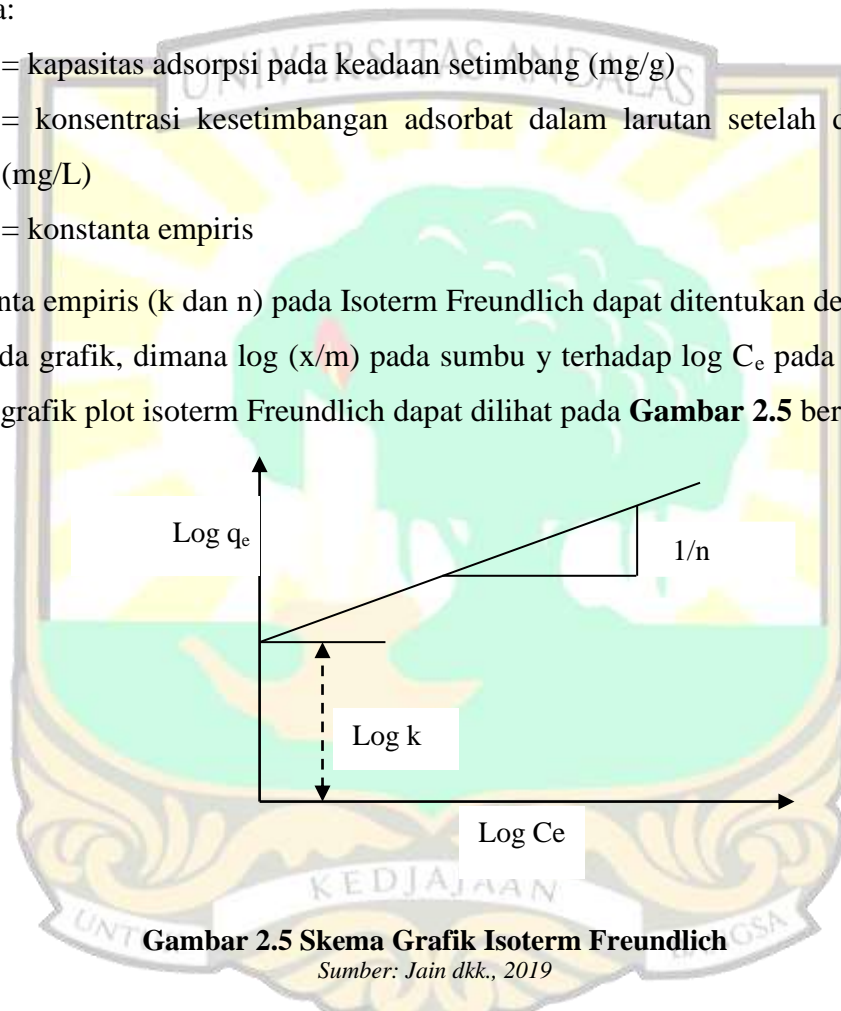
Apabila persamaan isoterm tersebut dilogartimkan akan menjadi **Persamaan 2.7**:

$$\text{Log } q_e = \text{log } k + \frac{1}{n} \text{log } C_e \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana:

- q_e = kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)
- C_e = konsentrasi kesetimbangan adsorbat dalam larutan setelah diadsorpsi (mg/L)
- k, n = konstanta empiris

Konstanta empiris (k dan n) pada Isoterm Freundlich dapat ditentukan dengan plot data pada grafik, dimana $\text{log } (x/m)$ pada sumbu y terhadap $\text{log } C_e$ pada sumbu x . Skema grafik plot isoterm Freundlich dapat dilihat pada **Gambar 2.5** berikut.



Gambar 2.5 Skema Grafik Isoterm Freundlich
Sumber: Jain dkk., 2019

2.8 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi menggambarkan tingkat laju penyerapan adsorbat oleh adsorben. Karakteristik kemampuan penyerapan adsorben terhadap adsorbat dapat dilihat dari laju adsorpsinya. Laju adsorpsi dapat diketahui dari konstanta laju adsorpsi (k) dan orde reaksi yang dihasilkan dari suatu model kinetika adsorpsi. Tahap pengujian laju adsorpsi dapat dilakukan dengan menduga orde reaksi (Hajar dkk.,

2016). Analisa kinetika adsorpsi didasarkan pada kinetika orde nol, orde satu dan orde dua, yaitu sebagai berikut (Hajar dkk., 2016) (Astuti, 2018):

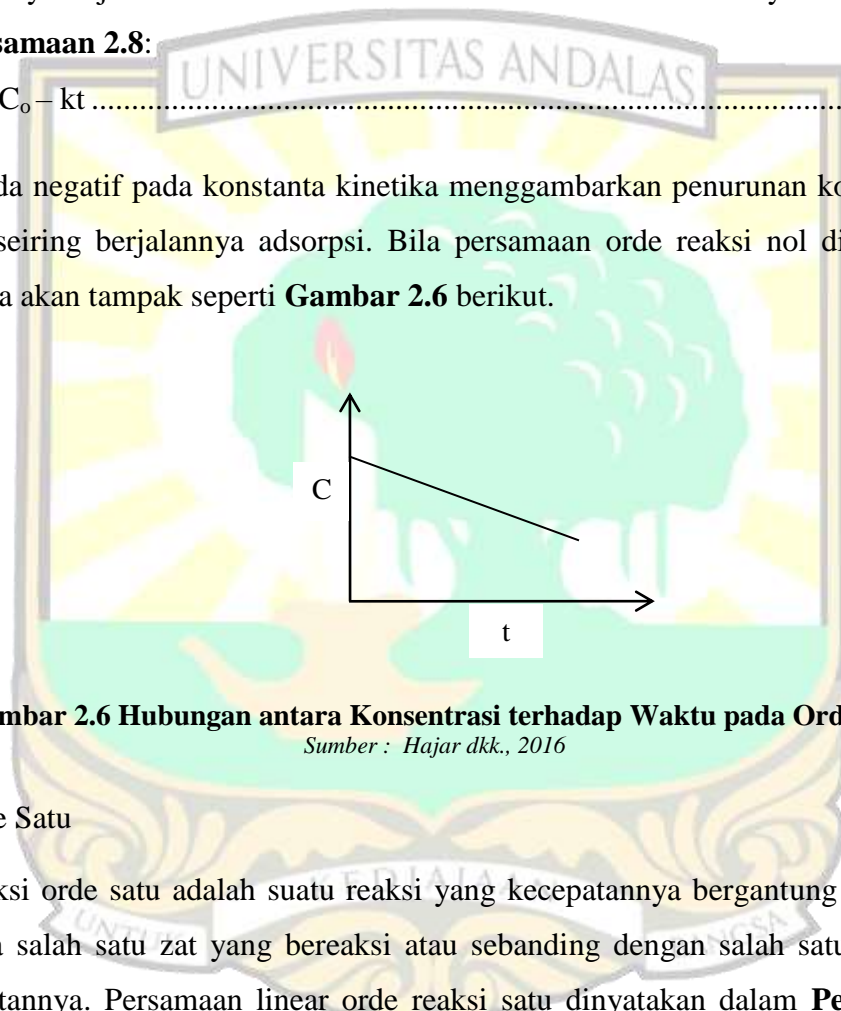
a) Orde Nol

Suatu reaksi dikatakan mempunyai orde nol jika besarnya laju reaksi tidak dipengaruhi oleh berapapun perubahan konsentrasi pereaksinya. Artinya seberapapun peningkatan konsentrasi pereaksi tidak akan mempengaruhi besarnya laju reaksi. Persamaan linear orde reaksi nol dinyatakan dalam

Persamaan 2.8:

$$C = C_0 - kt \dots\dots\dots (2.8)$$

Tanda negatif pada konstanta kinetika menggambarkan penurunan konsentrasi Cu seiring berjalannya adsorpsi. Bila persamaan orde reaksi nol di plotkan, maka akan tampak seperti **Gambar 2.6** berikut.



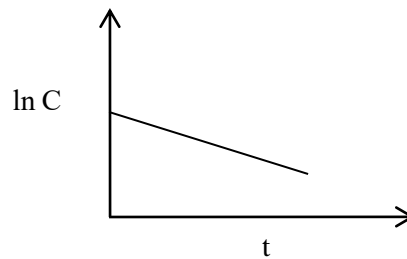
Gambar 2.6 Hubungan antara Konsentrasi terhadap Waktu pada Orde Nol
Sumber : Hajar dkk., 2016

b) Orde Satu

Reaksi orde satu adalah suatu reaksi yang kecepatannya bergantung hanyalah pada salah satu zat yang bereaksi atau sebanding dengan salah satu pangkat reaktannya. Persamaan linear orde reaksi satu dinyatakan dalam **Persamaan 2.9:**

$$\ln C = -kt + \ln C_0 \dots\dots\dots (2.9)$$

Bila persamaan linear orde satu di plotkan, maka akan tampak seperti **Gambar 2.7** berikut.



Gambar 2.7 Hubungan antara Konsentrasi terhadap Waktu pada Orde Satu

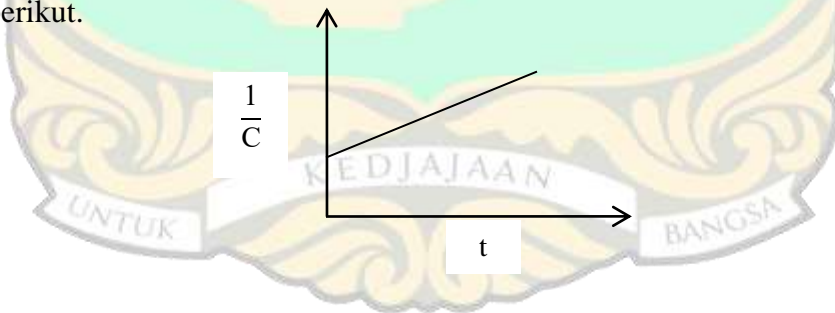
Sumber : Hajar dkk., 2016

c) Orde Dua

Reaksi orde dua adalah suatu reaksi yang kelajuannya berbanding lurus dengan hasil kali konsentrasi dua reaktannya atau berbanding langsung dengan kuadrat konsentrasi salah satu reaktannya. Jika mekanisme adsorpsi yang terjadi adalah reaksi orde dua dimana kecepatan adsorpsi yang terjadi berbanding lurus dengan dua konsentrasi pengikutnya atau satu pengikut berpangkat dua. Laju kinetika adsorpsi orde dua dinyatakan dalam **Persamaan 2.10**:

$$\frac{1}{C} = kt + \frac{1}{C_0} \dots\dots\dots (2.10)$$

Bila persamaan linear orde dua di plotkan, maka akan tampak seperti **Gambar 2.8** berikut.



Gambar 2.8 Hubungan antara Konsentrasi terhadap Waktu pada Orde Dua

Sumber : Hajar dkk., 2016

Keterangan:

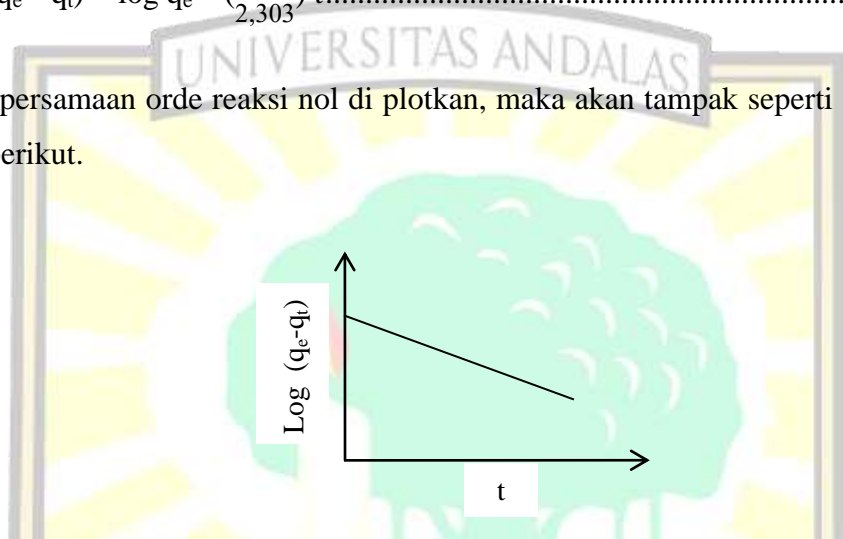
- C = konsentrasi A pada saat t = t (mg/L)
- C₀ = konsentrasi A pada saat t = 0 (mg/L)
- k = konstanta kinetika (menit⁻¹)
- t = waktu (menit)

d) *Pseudo-First Order*

Kinetika *pseudo- first order* menyatakan orde satu parsial terhadap konsentrasi gugus fungsi adsorben yang bebas dan orde nol parsial terhadap jumlah adsorbat di larutan. Persamaan linear *pseudo- first order* merupakan persamaan Lagergren dinyatakan dalam **Persamaan 2.11**:

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k}{2,303}\right) t \dots\dots\dots (2.11)$$

Bila persamaan orde reaksi nol di plotkan, maka akan tampak seperti **Gambar 2.9** berikut.



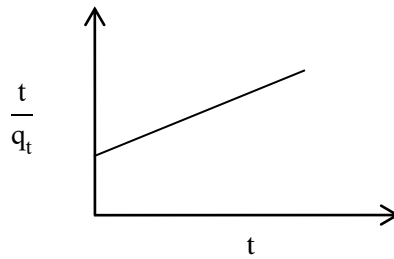
Gambar 2.9 Hubungan antara Selisih Kapasitas Adsorpsi terhadap Waktu pada *Pseudo-First Order*
 Sumber : Astuti, 2018

e) *Pseudo-Second Order*

Kinetika *pseudo-second order* menyatakan orde dua parsial terhadap konsentrasi gugus fungsi adsorben yang bebas dan orde nol parsial terhadap jumlah adsorbat di larutan. Persamaan linear *pseudo- first order* merupakan persamaan Ho dan McKay yang dinyatakan dalam **Persamaan 2.12**:

$$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{kq_e^2}\right) + \left(\frac{1}{q_e}\right)t \dots\dots\dots (2.12)$$

Bila persamaan linear orde satu di plotkan, maka akan tampak seperti **Gambar 2.10** berikut.



Gambar 2.10 Hubungan antara Kapasitas Adsorpsi terhadap Waktu pada *Pseudo-Second Order*

Sumber : Astuti, 2018

Keterangan:

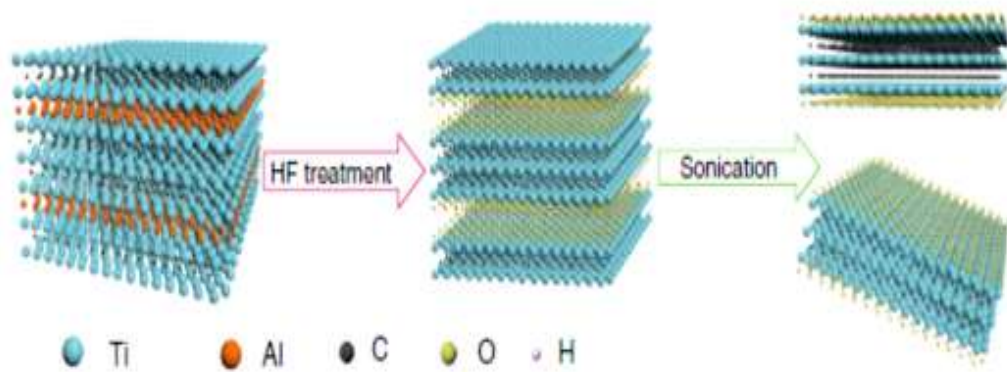
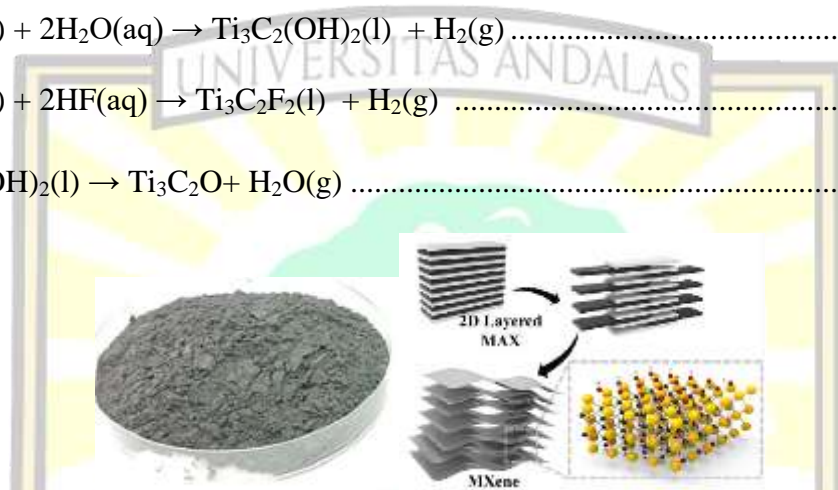
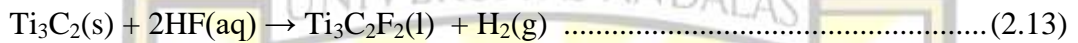
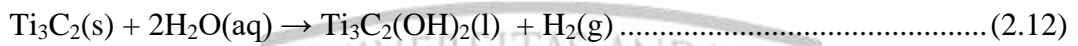
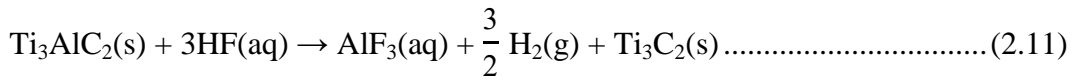
- q_e = kapasitas adsorpsi dalam keadaan setimbang (mg/g)
- q_t = kapasitas adsorpsi pada waktu t (mg/g)
- k = konstanta kinetika (menit⁻¹)
- t = waktu (menit)

Parameter kinetika adsorpsi orde nol, orde satu, dan *pseudo-first order* mempunyai grafik persamaan linear dengan gradien negatif. Kinetika adsorpsi orde dua dan *pseudo-second order* mempunyai grafik persamaan linear dengan gradien positif. Gradien positif maupun negatif pada persamaan linear masing-masing parameter kinetika tidak menjadi faktor penentu parameter kinetika terbaik pada proses adsorpsi. Gradien persamaan linear pada kinetika adsorpsi menjelaskan pengurangan konsentrasi adsorbat pada setiap waktu kontak adsorpsi (Astuti, 2018).

2.9 MXene

MXene adalah salah satu nanomaterial dua dimensi (2D) yang merupakan salah satu jenis karbida logam transisi, nitrida dan karbonitrida (Saththasivam dkk., 2019). Secara umum, Mxene dapat diformulasikan sebagai $M_{n+1}X_nT_x$, dimana X diartikan sebagai logam transisi (Ti, Sc, V, Cr, Mo, Zr, Hf, Nb, Ta, dan W), X adalah karbon (C) atau nitrida (N) dengan nilai $n = 1-3$, dan T_x adalah atom yang berikatan di permukaan nanomaterial Mxene. Atom yang berikatan yaitu hidroksida (OH⁻), fluor (F⁻) dan oksigen (O⁻) (Tunesi dkk., 2021). MXene dibentuk dengan prekursor MAX (Ti_3AlC_2) yang direaksikan dengan larutan Asam Fluorida (HF) dengan metode *etching*. Ikatan antara unsur Ti-Al

merupakan ikatan logam, ikatan antara unsur Ti–C adalah ikatan kovalen, dan ikatan Ti dengan gugus fungsi O, OH, dan F adalah ikatan ion (Yan dkk., 2019). Adapun reaksi pembentukan MXene dari prekursor MAX (Ti₃AlC₂) dan Larutan Asam Fluorida (HF) dengan metode *etching* adalah sebagai berikut (Ahmad dkk., 2021):



Gambar 2.11 a) Prekursor MAX (Ti₃AlC₂) dalam Bentuk Bubuk (b) Sintesis MXene (Ti₃C₂T_x) dari Fasa Dua Dimensi MAX, c) Skema Reaksi Pembentukan MXene dari MAX dengan Metode *Etching* dan *Sonication*

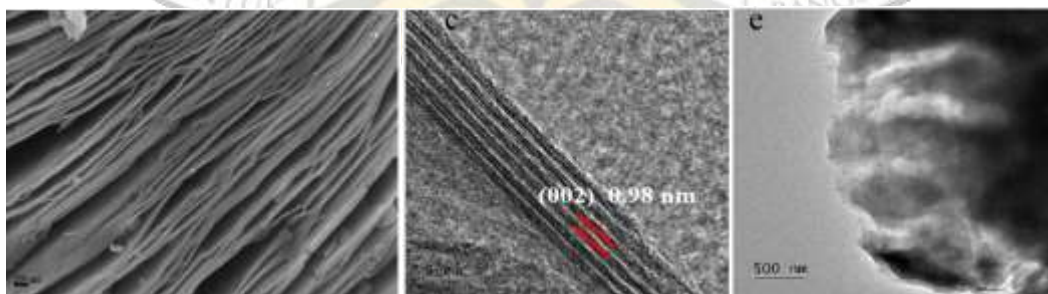
Sumber : Shuck dkk., 2020, Hwang dkk., 2020, Ahmad dkk., 2021

Secara umum, permukaan hidrofilik bermanfaat untuk adsorpsi spesies polar atau ionik. Ikatan kimia pada permukaan MXene terhadap gugus fungsional menunjukkan bahwa gugus –F tidak stabil ketika MXene digunakan untuk adsorben di sebagian besar keadaan. Gugus –O dan –OH ditemukan lebih stabil, dan terminasi –F akan digantikan oleh gugus –OH pada saat pembilasan dan/atau

penyimpanan dalam air. Jadi, sebagian besar ikatan MXene dengan gugus fungsional yang diperoleh dengan menggunakan metode etsa kimia adalah gugus $-OH$ dan $-O$. Ini mungkin mengapa MXene selalu menunjukkan kapasitas adsorpsi yang sangat tinggi (dalam satuan gram adsorbat per gram adsorben) bahkan dibandingkan dengan nanomaterial berbasis karbon, seperti *graphene*, meskipun berat atom unsur logam transisi biasanya besar (Zhang dkk., 2018).

2.9.1 Karakteristik MXene

Morfologi dan analisis unsur MXene ($Ti_3C_2T_x$) yang dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan spektroskopi sinar-X dispersi energi (SEM-EDX) dan Mikroskop Transmisi Elektron (TEM). Analisis menunjukkan prekursor MAX (Ti_3AlC_2) mempunyai lapisan yang rapat karena ikatan logam Ti-Al yang kuat. MAX (Ti_3AlC_2) yang telah diberi perlakuan HF menjadi MXene ($Ti_3C_2T_x$) menunjukkan struktur *multilayer* dan kandungan logam Al yang berkurang secara signifikan, dimana kerapatan lapisan tidak serapat lapisan pada prekursor MAX. Hal ini membuktikan bahwa MAX (Ti_3AlC_2) yang mengandung logam Al berhasil digantikan dengan gugus fungsi yang berikatan pada lapisan permukaan MXene ($-O$, $-OH$, dan $-F$). Hasil analisis SEM dan TEM dapat dilihat pada **Gambar 2.12** (Kong dkk., 2021). Pada penelitian Shahzad dkk., (2017), diperoleh bahwa analisis EDX mampu mengkonfirmasi keberadaan Cu dalam tiap lapisan adsorben DL- $Ti_3C_2T_x$ setelah adsorpsi Cu^{2+} , menunjukkan bahwa ion logam teradsorpsi ke permukaan MXene ($Ti_3C_2T_x$). Selain itu, dapat juga dilihat keberadaan kelompok terminal permukaan (O, OH, dan F) pada MXene ($Ti_3C_2T_x$).



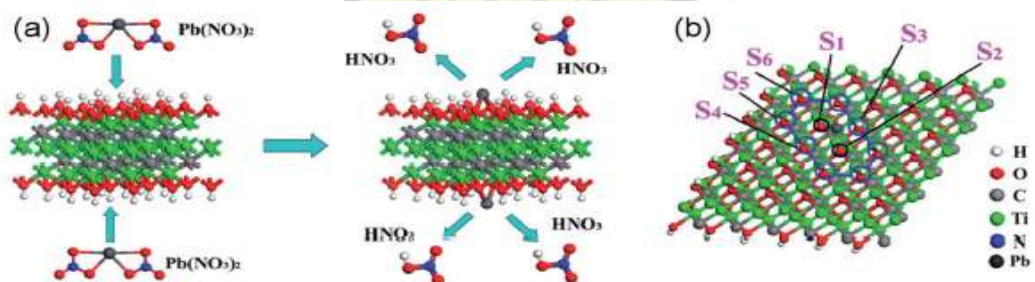
Gambar 2.12 Gambar SEM dan TEM Lembaran Berukuran Nano dari MXene ($Ti_3C_2T_x$) yang Telah Dietsa Menggunakan Larutan HF

Sumber : Kong dkk., 2021

2.9.2 Aplikasi MXene

Sebagai nanomaterial MXene dapat digunakan dalam pemurnian air dan aplikasi remediasi lingkungan karena luas permukaannya yang luas, hidrofilitas, fungsionalitas permukaan, kelimpahan, sintesis yang mudah, dan karakteristik ramah lingkungan. MXene juga telah digunakan secara luas dalam aplikasi pengolahan air, termasuk membran pemurnian air, penghilangan logam berat, deionisasi kapasitif, dan pelapis antimikroba (Saththasivam dkk., 2019). Membran MXene dengan jalur transpor molekul yang sangat pendek dan sejumlah besar saluran nano menunjukkan pemurnian air yang sangat baik (lebih dari 1000 $\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{bar}^{-1}$) dan tingkat penyisihan yang baik (lebih dari 90%) untuk molekul dengan ukuran sekitar 2,5 nm (Ding dkk., 2017).

MXene merupakan adsorben yang dapat menyisihkan ion logam dalam air melalui interaksi elektrostatik dan kimia. MXene yang dibuat dengan perlakuan pengelupasan kimia (*chemical exfoliation*) dan interkalasi dengan alkali dapat mengadsorpsi logam Pb (II). Mekanisme adsorpsi pada percobaan ini adalah ion Pb (II) yang terperangkap dalam perangkap potensial hidroksil, membentuk ikatan kuat antara atom Pb dan oksigen (hidroksil kehilangan atom H), seperti yang ditunjukkan pada **Gambar. 2.13**. Situs hidroksil yang berbeda dan gugus fungsi yang berbeda memiliki pengaruh yang besar pada perilaku adsorpsi MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2(\text{OH})_x\text{F}_{2-x}$) untuk ion Pb(II) gugus hidroksil vertikal ke atom titanium menunjukkan kecenderungan yang lebih kuat untuk menghilangkan ion daripada struktur adsorpsi lainnya, dan terminasi penempatan F pada alk-MXene menurunkan efisiensi adsorpsi sementara interkalasi atom Li, Na, dan K mempercepatnya (Zhang dkk., 2018).



Gambar 2.13 (a) Mekanisme Adsorpsi MXene dalam Penyisihan Logam Pb (II), (b) Tampak Atas dari MXene yang Sudah Kontak dengan Logam Pb (II)

Sumber : Zhang dkk., 2018

Minat terhadap pengembangan Nanokomposit MXene pada saat ini juga meningkat cukup besar meskipun skalanya masih lebih kecil jika dibandingkan dengan penelitian tentang MXene itu sendiri. Nanokomposit MXene pertama kali ditemukan pada tahun 2014, dimana $Ti_3C_2T_x$ MXene yang paling banyak dipelajari hingga saat ini ditambahkan ke *polydiallyldimethylammonium chloride* (PDDA) dan *polyvinyl alcohol* (PVA) dimana keduanya adalah polimer hidrofilik. Terdapat banyak polimer induk yang sudah digunakan termasuk polimer hidrofilik seperti PVA dan *polyacrylic acid* (PAA), biopolimer, polietilen, polietilen oksida, *polypropylene* dan masih banyak lagi (Carey & Barsoum, 2021). Penggunaan langsung *Multilayer* MXene merupakan metode produksi nanokomposit karena mendapatkan hasil sekitar 100% sedangkan hasil dari koloid MXene hanya mendapatkan hasil kurang 20%. *Multilayer* ini akan terdiri atas tumpukan kecil dari lembaran MXene tunggal yang masih membutuhkan banyak pengelupasan kulit. Ada tiga teknik pemrosesan nanokomposit MXene yaitu dengan filtrasi, polimerisasi in situ dan peleburan (Carey & Barsoum, 2021).

2.10 Eceng Gondok

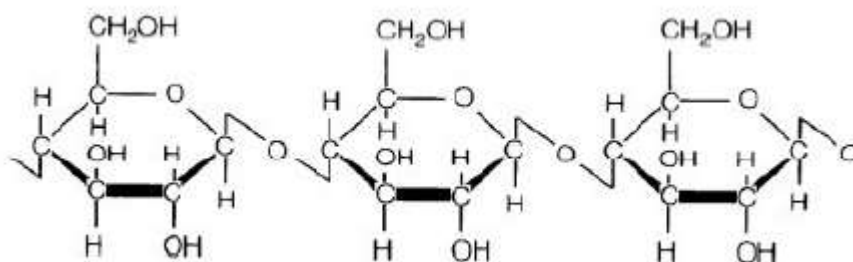
Eceng gondok (*Eichornia Crassipes*) merupakan tumbuhan perairan yang termasuk dalam famili *Pontederiaceae*. Tumbuhan eceng gondok berasal dari perairan di Amerika Selatan dan didatangkan pertama kali di Indonesia pada tahun 1894. Eceng gondok hidup di iklim tropis dan subtropis. Eceng gondok tumbuh mengapung di atas permukaan air atau lahan-lahan basah. Tanaman ini banyak dijumpai di daerah rendah di pinggiran sawah, danau, waduk, rawa, dan di kawasan industri di pinggir sungai. Eceng gondok digolongkan sebagai hama perairan yang mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan dan berkembang biak secara cepat. Tempat tumbuh yang ideal bagi tanaman eceng gondok adalah perairan yang dangkal dan berair keruh, dengan suhu berkisar antara 28-30°C dan kondisi pH berkisar 4-12. Di perairan yang dalam dan berair jernih di dataran tinggi, tanaman ini sulit tumbuh. Eceng gondok mampu menghisap air dan menguapkannya ke udara melalui proses evaporasi. Tumbuhan eceng gondok dapat dilihat pada **Gambar 2.14** (Marhadi dkk., 2018).



Gambar 2.14 Eceng Gondok

Sumber :Marhadi dkk., 2018

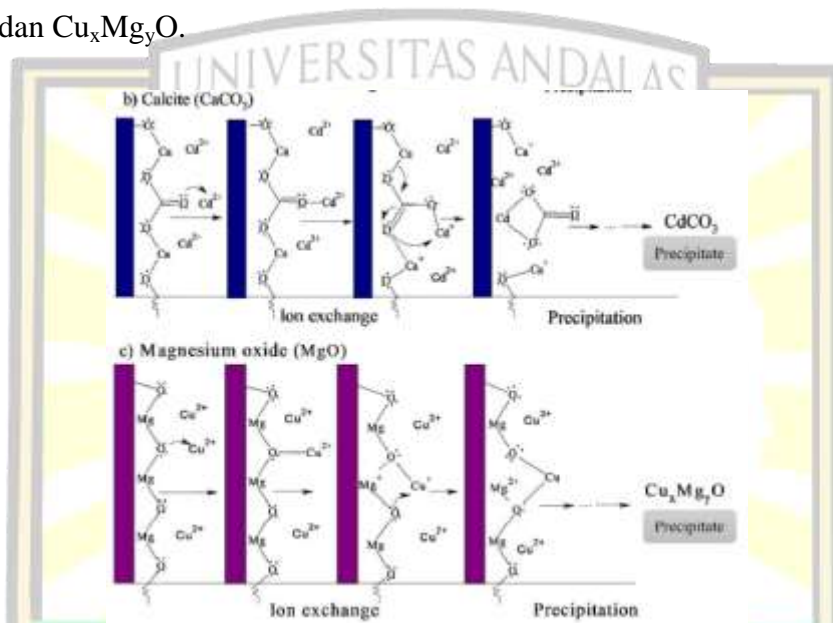
Eceng gondok merupakan tanaman yang tumbuh dengan cepat dan strukturnya mengandung kandungan lignin yang sedikit dan selulosa yang cukup banyak (Tanpichai dkk., 2019). Eceng gondok mengandung 60% selulosa, 8% hemiselulosa, dan 17% lignin (Asrofi dkk., 2017). Selulosa merupakan polimer dengan berat molekul yang besar, terdiri dari unit berulang β -D-glukopiranosil yang dihubungkan oleh ikatan glikosidik (Fahma dkk., 2010). Selulosa mempunyai pH optimal netral yaitu 7. Selulosa dengan pH basa akan meningkatkan kristalinitas dari selulosa dan selulosa dengan pH asam akan merusak struktur polimer pada selulosa (Asrofi dkk., 2018). Nanoselulosa dalam eceng gondok memiliki manfaat yaitu dapat terurai dengan alami di lingkungan setelah selesai dimanfaatkan, dapat dijadikan matriks penguat dalam pembuatan nanokomposit, biomaterial, dan membran pada proses filtrasi. Nanoselulosa dipilih karena mempunyai massa jenis yang kecil, kenaikan suhu yang rendah sifat mekanik yang unggul, biokompatibilitas, dan rasio permukaan terhadap volume yang besar (Tanpichai dkk., 2019) Struktur selulosa pada eceng gondok dapat dilihat pada **Gambar 2.15**.



Gambar 2.15 Struktur Kimia dari Selulosa

Sumber: Asrofi dkk., 2017

Eceng gondok yang dimodifikasi dapat menjadi adsorben dalam penyisihan logam berat. Penelitian yang dilaksanakan oleh Ramirez-Muñoz dkk., (2021) yaitu penyisihan logam Cd^{2+} dan Cu^{2+} 200 mg/L dari larutan artifisial secara *batch adsorption* dengan adsorben eceng gondok yang telah dikalsinasi sehingga mengandung kapur $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Mekanisme adsorpsi ditunjukkan pada **Gambar 2.16** dengan permukaan adsorben yang masing-masing mengandung CaCO_3 dan MgO mengalami proses *ion exchange* dengan logam Cd^{2+} dan Cu^{2+} membentuk CdCO_3 dan $\text{Cu}_x\text{Mg}_y\text{O}$.



Gambar 2.16 Mekanisme Adsorpsi Eceng Gondok yang Dikalsinasi dalam Penyisihan Logam Cd^{2+} dan Cu^{2+}
 Sumber : Ramirez-Muñoz dkk., 2021

2.11 Uji t

Uji t merupakan analisis statistik yang dikembangkan oleh William S. Gosset pada tahun 1915. Uji ini dapat digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara dua nilai rata-rata sampel atau tidak. Dua nilai rata-rata sampel dapat dibedakan dari satu kelompok sampel atau dari dua kelompok sampel (Rusydi & Fadhli, 2018). Uji t satu sampel merupakan uji yang tergolong hipotesis deskriptif. Uji t memiliki dua rumus berdasarkan nilai standar deviasi populasi atau sampel. Jika standar deviasi (s) diketahui, rumus yang digunakan yaitu **Persamaan 2.14**:

$$Z_{hitung} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}} \dots \dots \dots (2.15)$$

Dimana:

Z_{hitung} = harga yang dihitung yang menunjukkan nilai standar deviasi pada distribusi normal (tabel z)

x = rata-rata nilai yang diperoleh dari hasil pengumpulan data

μ_0 = rata-rata nilai yang dihipotesiskan

σ = standar deviasi populasi yang diketahui

n = jumlah populasi

Jika standar deviasi (s) tidak diketahui, maka rumus yang digunakan adalah

Persamaan 2.15:

$$t_{hitung} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s / \sqrt{n}} \dots \dots \dots (2.16)$$

Dimana:

t_{hitung} = harga yang dihitung yang menunjukkan nilai standar deviasi pada distribusi t (tabel t)

x = rata-rata nilai yang diperoleh dari hasil pengumpulan data

μ_0 = rata-rata nilai yang dihipotesiskan

s = standar deviasi sampel

n = jumlah populasi

2.12 Uji ANOVA

Anova atau *Analysis of Variance* merupakan bagian dari metode analisis statistika yang biasanya digunakan untuk menguji perbandingan dua atau lebih rata-rata suatu data populasi atau sampel. Anova sering diistilahkan sebagai uji-F atau *Fisher Test*, yang merupakan pengembangan lebih lanjut dari uji-t. uji-t atau uji-z biasanya digunakan untuk studi komparatif dua rata-rata dari sekumpulan data populasi, sedangkan uji-F atau Anova bisa lebih. Uji Anova dalam analisisnya menggunakan tabel F untuk menentukan apakah terdapat perbandingan dua atau

lebih rata-rata suatu data populasi atau sampel (Bustami dkk., 2014). Asumsi pengujian ANOVA yaitu (Rinaldi dkk., 2020):

1. Populasi yang akan diuji berdistribusi normal
2. Varian/ragam dan populasi yang diuji sama

Uji ANOVA dapat digolongkan dalam dua jenis yaitu (Rinaldi dkk.,2020):

1. Uji ANOVA Klasifikasi Satu Arah

Uji ANOVA satu arah adalah uji ANOVA yang mengamati satu kriteria. Misalkan ada p populasi yang masing-masing dengan nilai tengah $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p$. Hipotesis yang akan diuji dalam ANOVA ini adalah:

- a) $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_p$ (semua nilai tengah sama)
- b) $H_1 : \exists \mu_i \neq \mu_j$ (ada sekurang-kurangnya sepasang nilai tengah μ_i dan μ_j yang tidak sama)

2. Uji ANOVA Klasifikasi Dua Arah

Uji ANOVA dua arah adalah suatu teknik statistik inferensia parametris yang digunakan untuk menguji hipotesis komparatif dari dua sampel secara serempak bila sampel memiliki dua kategori atau lebih. Dua kategori yang digunakan terdiri dari tiga hipotesis yang diuji yaitu:

- a) $H_0 : \alpha_i = 0$ untuk setiap $i = 1, 2, 3, \dots, b$
 H_0 : paling sedikit ada satu $\alpha_i \neq 0$
- b) $H_0 : \beta_j = 0$ untuk setiap $j = 1, 2, 3, \dots, k$
 H_0 : paling sedikit ada satu $\beta_j \neq 0$
- c) $H_0 : (\alpha\beta)_{ij} = 0$ untuk setiap $i = 1, 2, 3, \dots, b$ dan $j = 1, 2, 3, \dots, k$
 H_0 : paling sedikit ada satu $(\alpha\beta)_{ij} \neq 0$

Dalam uji ANOVA terdapat nilai ANOVA atau F_{hitung} yang merupakan perbandingan dari varian antar grup dengan varian dalam grup. Nilai ANOVA atau F_{hitung} akan dibandingkan dengan nilai F_{tabel} yang didapatkan dari tabel F. Nilai F_{tabel} ditentukan berdasarkan tingkat kepercayaan, derajat bebas antar grup, dan derajat bebas antar grup (Bustami dkk., 2014).

2.13 Penelitian Terkait

Penelitian terkait nanokomposit MXene-Eceng Gondok sebagai adsorben dalam menyisihkan logam Cu pada air limbah belum ada sampai saat ini. Para peneliti sudah mengembangkan MXene sebagai adsorben dalam menyisihkan logam berat (Cr,Pb,Cu) dengan kapasitas adsorpsi 250 mg/g (Cr), 36,6 mg/g (Pb), dan 78,45 mg/g (Cu). Para peneliti juga memodifikasi MXene dengan perlakuan khusus seperti penambahan alkali dan penyelipan partikel Fe₂O₃ diantara lembaran MXene. Peneliti juga mengembangkan nanokomposit MXene yang diberi nanoselulosa. Berikut beberapa penelitian terkait yang membahas tentang nanokomposit MXene dengan nanoselulosa:

2.13.1 *Nanosheet* Ti₃C₂T_x MXene Dua Dimensi untuk Penyisihan Tembaga yang Efisien dari Air Limbah Simulasi Elektroplating

Penelitian yang dilaksanakan oleh Shahzad dkk., (2017) mengenai penyisihan Logam Cu dari air limbah dengan DL-Ti₃C₂T_x (*Delaminated* MXene) Sebagai Adsorben. Adsorben dibuat dengan adsorben MXene yang dimodifikasi dengan proses delaminasi. Delaminasi merupakan proses yang menggunakan Ultrasonik yang berfungsi dalam memisahkan *multi layer* menjadi *single layer* MXene. Adsorben yang dimodifikasi diteliti dalam penyisihan logam Cu dari larutan artifisial dengan konsentrasi 25 mg/L. Hasil penelitian didapatkan kapasitas adsorpsi sebesar 78,45 mg/g dengan efisiensi penyisihan 98,29 %. Dosis Adsorben terbaik yaitu 1 g/L. Waktu kontak adsorpsi mencapai waktu terbaik pada waktu 3 menit. MXene sangat direkomendasikan dalam penyisihan logam Cu dalam air limbah.

2.13.2 Nanokomposit Multifungsi dengan Kekuatan dan Kapasitansi Tinggi Menggunakan MXene/Nanoselulosa

Penelitian yang dilaksanakan oleh Tian dkk., (2019) dengan membuat elektroda nanokomposit dari MXene/Nanofibril Selulosa. Elektroda dibuat dengan memvariasikan konsentrasi CNF yang ada pada elektroda. Hasil penelitian didapatkan MXene dengan CNF 20% menunjukkan kekuatan mekanik sebesar 341 MPa dengan mempertahankan kapasitansi yang tinggi yaitu 298F/g dan

konduktivitas yang tinggi sebesar 295 S/cm. Hal ini menunjukkan bahwa MXene/Nanofibril Selulosa dapat digunakan sebagai superkapasitor mikroflexibel dengan ukuran yang presisi dan juga sebagai perangkat dengan struktur yang ringan.

2.13.3 Penyisihan Logam Zn dan Cr dari Air Limbah Industri menggunakan Tangkai Daun, Daun, dan Akar Eceng Gondok

Penelitian yang dilaksanakan oleh Hemalatha dkk., (2020) mengenai adsorpsi logam Zn dan logam Cr dengan adsorben tangkai daun, daun, dan akar eceng gondok. Adsorben dibuat dengan cara mengambil tanaman eceng gondok dan memisahkan bagiannya menjadi tangkai daun, daun, dan akar lalu dijemur selama 5 hari. Tanaman kering digiling dan diayak menggunakan aringan mesh 150 μ . Adsorben yang sudah dibuat lalu diteliti dalam penyisihan logam Zn dan Cr dengan variasi dosis adsorben, pH sampel air limbah, konsentrasi logam Zn dan Cr masing-masing sampel, dan waktu kontak sampel. Hasil penelitian didapatkan efisiensi penyisihan logam Zn sebesar 98,9% dengan dosis terbaik 0,8 g, pH terbaik 11, konsentrasi adsorbat terbaik 170 mg/L, dan waktu kontak terbaik 30 menit. Penyisihan logam Cr didapatkan efisiensi penyisihan logam Cr sebesar 96,4% dengan dosis terbaik 1 g, pH terbaik 5, konsentrasi adsorbat terbaik 55 ppm, dan waktu kontak terbaik 30 menit. Dapat ditunjukkan bahwa adsorben yang dibuat dari tangkai daun, daun, dan akar eceng gondok dapat menyisihkan logam Zn dan logam Cr dari air limbah industri dengan baik.

2.13.4 MXene/Komposit Alginat sebagai Adsorben dalam Penyisihan Logam Pb dan Logam Cu dari Larutan Artifisial

Penelitian yang dilaksanakan oleh Dong dkk., (2019) mengenai penyisihan Logam Pb²⁺ dan Cu²⁺ dari larutan artifisial menggunakan adsorben MXene yang dimodifikasi dengan penambahan sodium alginat untuk memperbesar jarak antar lapisan MXene dan meningkatkan efisiensi penyisihan dengan penambahan gugus fungsi amino dan karboksil dari sodium alginat. Adsorben dibuat dengan MAX melalui proses *etching* dengan larutan HF 40% menjadi MXene. 0,16 g MXene ditambahkan dengan sodium alginat dengan berat yang bervariasi, lalu ditambahkan 20 mL *aquadest* dan diaduk selama 6 jam. Campuran yang telah

diaduk didinginkan selama 24 jam. Adsorben MXene/Komposit Alginat diuji kemampuan adsorpsinya dengan 1,5 mM larutan artifisial Pb^{2+} dan Cu^{2+} . Hasil adsorpsi menunjukkan efisiensi penyisihan logam Pb^{2+} sebesar 86,7% dengan kapasitas adsorpsi 382,7 mg/g. Adsorpsi terhadap logam Cu^{2+} menunjukkan efisiensi penyisihan sebesar 63,5% dengan kapasitas adsorpsi sebesar 87,6 mg/g. MXene dengan modifikasi sodium alginat dapat dijadikan alternatif adsorben pada adsorpsi karena kemampuan adsorpsi yang cukup bagus dan gugus fungsi pada permukaan adsorben yang melimpah.



Tabel 2.8 Penelitian Terdahulu

No	Logam yang disisihkan	Adsorben	Variasi Percobaan	Kondisi Terbaik	Hasil Penelitian	Peneliti
1	Pb(II)	MXene ($Ti_3C_2T_x$)	<ul style="list-style-type: none"> - Dosis adsorben (mg/L): 5, 10, 25, dan 50 - Konsentrasi awal (mg/L): 1, 1,5, 2, 2,5, 5, 6,5, dan 8 - pH : 2, 3, 4, 5, dan 6 - waktu adsorpsi: 0, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 480, dan 1440 menit - suhu: 293, 303, dan 313 K - <i>background</i> ion: NaCl, KCl, $CaCl_2$, dan $MgCl_2$ pada konsentrasi yang berbeda, sehingga 50, 250, dan 1000 $\mu S/cm$ - terdapat logam berat lain Cu(II), Zn(II), dan Cd(II) 	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrasi awal (mg/L): 2 - Dosis adsorben (mg/L): 50 - pH : 6 - waktu adsorpsi: 120 menit - suhu: 293 K 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapasitas adsorpsi 36,6 mg/g - Isoterm: Freundlich 	(Jun dkk., 2020)
2	Cr(VI)	MXene ($Ti_3C_2T_x$)	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrasi awal (g/L): 0,4; 0,6; 0,8 dan 2 - pH : 2, 5, 7, 10 dan 13 - waktu adsorpsi: 2,4,6,7 dan 8 jam - suhu: 25°C - menggunakan mesh 200 	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrasi awal (mg/L): 50 - Dosis adsorben (mg/L): 2 - pH : 5 - waktu adsorpsi: 2 jam - suhu: 25°C 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapasitas adsorpsi 250 mg/g 	(Ying dkk., 2015)
3	Cr(VI)	MXene ($Ti_3C_2T_x$)	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrasi awal (mg/L): 100 - pH : 7 - waktu adsorpsi: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, dan 14 jam - suhu: 25°C - menggunakan mesh 400 	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrasi awal (mg/L): 100 - pH : 7 - waktu adsorpsi: 8 jam - suhu: 25°C 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapasitas adsorpsi 80 mg/g 	(Tang dkk., 2018)
6	Ba(II)	MXene ($Ti_3C_2T_x$)	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrasi awal (mg/L): 1,6,11,21,55 	<ul style="list-style-type: none"> - Konsentrasi awal (mg/L): 55 	<ul style="list-style-type: none"> - Kapasitas adsorpsi 9,3 	(Fard dkk., 2017)

No	Logam yang disisihkan	Adsorben	Variasi Percobaan	Kondisi Terbaik	Hasil Penelitian	Peneliti
			<ul style="list-style-type: none"> - pH : 6-7 - waktu adsorpsi: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 110, 120, dan 130 menit - suhu: 25°C 	<ul style="list-style-type: none"> - pH : 7 - waktu adsorpsi: 10 menit - suhu: 25°C 	mg/g	
7	<i>Methylene Blue dan Acid Blue</i>	MXene (Ti ₃ C ₂ T _x)	<ul style="list-style-type: none"> - Dosis adsorben (g/L): 25, 50, 75 dan 100 - Konsentrasi awal (mg/L): 5; 7,5; 10; 20; 40) - pH : 3,5; 7; 9,5 - waktu adsorpsi: 0-24 jam - suhu: 293, 303, dan 313 K - Background ion: NaCl 300 μS/cm, CaCl₂ 300 μS/cm, Na₂SO₄ 300 μS/cm, NaCl 600 μS/cm 	<ul style="list-style-type: none"> - Dosis adsorben (g/L) : 100 - Konsentrasi awal (mg/L): 10 - pH: MB (9,5); AB (3,5) - Waktu adropsi : 8 jam - Suhu: MB (313K); AB (303K) 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi Penyisihan: 80% - Isoterm: Freundlich - Kapasitas Adsorpsi: MB : 140 mg/g; AB 200 mg/g 	(Jun dkk., 2020)
8	Zn(II) dan Cr(II)	Eceng Gondok	<ul style="list-style-type: none"> - Dosis Adsorben (g): 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2 - pH: 3, 5, 7, 9, 11 - Konsentrasi Adsorbat (mg/L): Cr: 27,5; 55; 82,5; 110 Zn: 42,5; 85; 127; 170 - Waktu Kontak (menit): 15, 30, 45, 60, dan 75 	<ul style="list-style-type: none"> - Logam Cr Dosis Adsorben: 1 g pH: 5 Konsentrasi Adsorbat: 55 mg/L Waktu Kontak: 30 menit - Logam Zn Dosis Adsorben: 0,8 g pH: 11 Konsentrasi Adsorbat: 170 mg/L Waktu Kontak: 30 menit 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi Penyisihan untuk logam Cr sebesar 96,% dan logam Zn sebesar 98,9% - Isoterm: Langmuir 	(Hemalatha dkk., 2020)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum

Penelitian tugas akhir ini dilakukan untuk menguji kemampuan nanokomposit Mxene dan eceng gondok sebagai adsorben untuk menyisihkan logam berat Cu. Percobaan dilakukan dengan memvariasikan variasi waktu kontak, konsentrasi awal logam Cu dan rasio nanokomposit. Percobaan aplikasi dilakukan dengan menggunakan kondisi terbaik yang didapatkan terhadap air limbah. Berdasarkan kondisi terbaik yang didapatkan dapat diperoleh efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi dan isotherm adsorpsi.

3.2. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi studi literatur, studi karakteristik limbah yang mengandung logam berat Cu, pembuatan MXene dari MAX, pembuatan nanoserat eceng gondok, pembuatan adsorben MXene/Eceng Gondok, persiapan percobaan penelitian dan percobaan adsorpsi menggunakan variasi konsentrasi adsorbat dan rasio nanokomposit. Penelitian dilakukan di Laboratorium Air dan Laboratorium Penelitian Departemen Teknik Lingkungan Universitas Andalas. Percobaan *Ultrasonication*, SEM, dan EDX dilakukan di Departemen Teknik Mesin Universitas Andalas, dan Analisis Partikel menggunakan PSA (*Particle Size Analysis*) dilakukan di Departemen Farmasi Universitas Andalas. Setelah itu dilakukan pengolahan data dan pembahasan terhadap hasil percobaan. Pembahasan meliputi analisis kondisi terbaik yang didapat dari variasi percobaan yaitu variasi konsentrasi adsorbat dan variasi rasio nanokomposit, analisis statistik yaitu uji ANOVA dan uji-t, penentuan persamaan isotherm adsorpsi yaitu Freundlich dan Langmuir, penentuan kinetika adsorpsi yaitu Orde Nol, Orde Satu, Orde Dua, *Pseudo First-Order*, dan *Pseudo Second-Order*, dan analisis efisiensi penyisihan serta kapasitas adsorpsi Cu pada percobaan aplikasi menggunakan limbah elektroplating artifisial. Metodologi penelitian diuraikan pada diagram alir yang dapat dilihat pada **Gambar 3.1**

3.3. Studi Literatur

Studi literatur sangat penting untuk sebuah penelitian. Studi literatur ini bertujuan untuk mendapatkan informasi dan teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan agar penelitian yang dilakukan memiliki tujuan yang berkaitan dengan hasil penelitian terdahulu dan nantinya data yang diperoleh bisa lebih akurat. Studi literatur dalam dalam laporan ini mengkaji tentang pencemaran air limbah, pencemaran air limbah akibat logam berat Cu, kandungan Cu dalam air limbah, karakteristik Cu, mekanisme adsorpsi, faktor-faktor yang memengaruhi proses adsorpsi, sistem adsorpsi *batch*, penjelasan tentang MXene murni sebagai adsorben, dan penjelasan tentang Eceng Gondok.

3.4. Persiapan Percobaan

Persiapan percobaan yang dilakukan meliputi persiapan peralatan yang digunakan yaitu peralatan pada persiapan adsorben, alat *Ultrasonic Probe*, persiapan bahan pembuatan Mxene, persiapan nanoserat eceng gondok dan persiapan larutan artifisial yang mengandung logam berat Cu.

3.4.1 Persiapan Peralatan yang Digunakan

Peralatan yang digunakan adalah peralatan untuk persiapan adsorben, percobaan adsorpsi dan analisis konsentrasi logam Cu dengan AAS.

a. Persiapan Alat

- 1) Spatula
- 2) Cawan,
- 3) Saringan *mesh* ukuran 500 *mesh* (0,026 mm)
- 4) *Beaker* plastik 100 mL
- 5) Erlenmeyer plastik 100 mL
- 6) Erlenmeyer vakum 500 mL
- 7) Labu Ukur 100 mL dan 1000 mL
- 8) Pipet takar dan bola hisap
- 9) Tabung Reaksi
- 10) Corong
- 11) Desikator

- 12) Neraca analitik (AND, HR-60),
- 13) Kertas Saring *Whatman* No. 42
- 14) *Magnetic stirrer*
- 15) *Oven*

b. Persiapan adsorben

- 1) *Tube centrifuge* 10 mL, digunakan sebagai wadah MXene
- 2) Sentrifuge, digunakan untuk mengendapkan dan menetralkan pH MXene
- 3) pH meter, digunakan untuk pengaturan pH
- 4) *Ultrasonic Probe* (FS-1200N), digunakan untuk membuat ukuran partikel menjadi berukuran nano

c. Percobaan Adsorpsi

- 1) Shaker (Inova 2300) digunakan untuk mengaduk dan mengontakkan larutan dengan MXene
- 2) pH meter, digunakan untuk pengaturan pH
- 3) Pompa Vakum, digunakan untuk penyaringan campuran adsorben dengan adsorbat

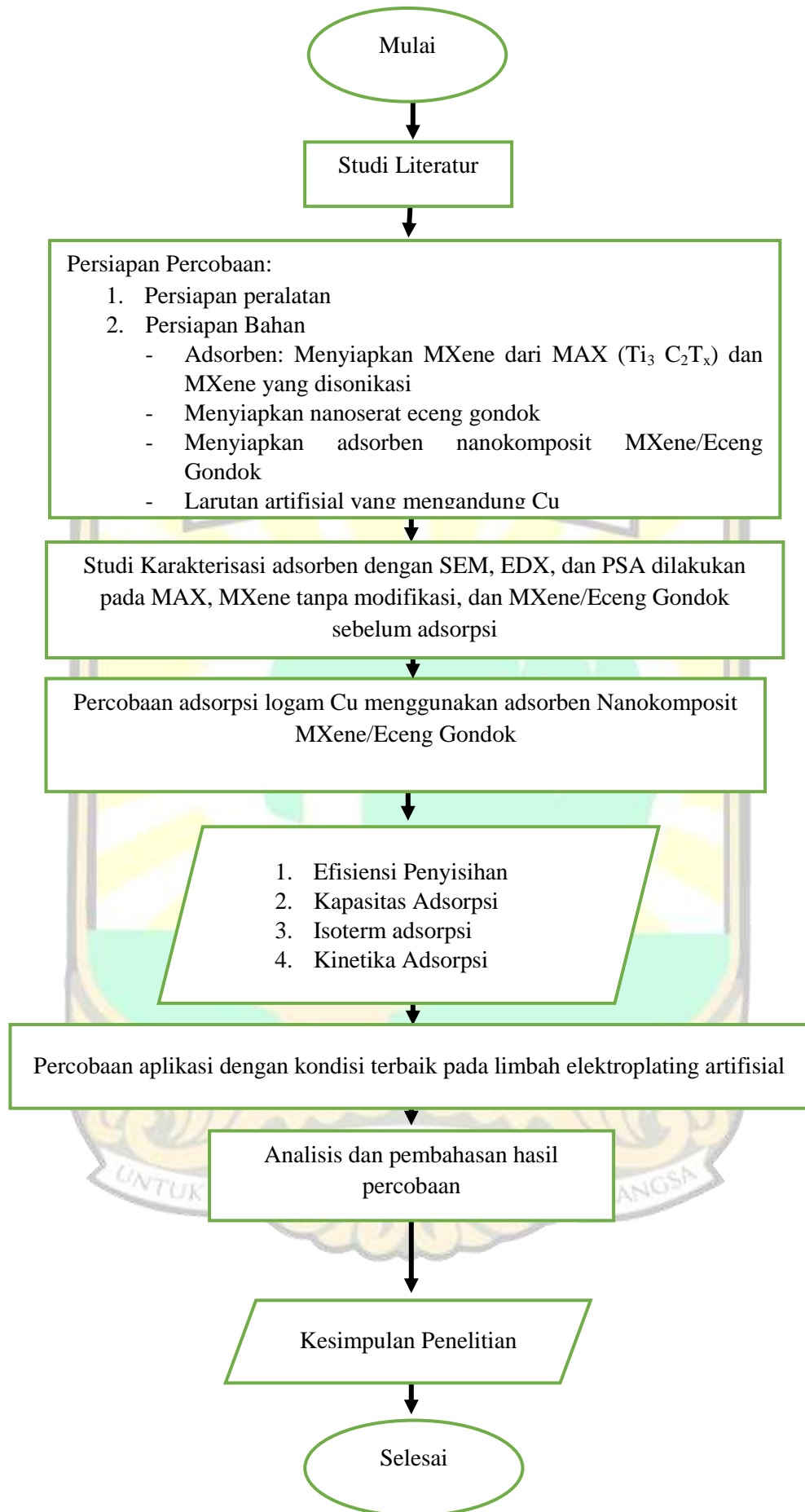
d. Analisis pengukuran Logam

Standard Methods APHA, 22nd, Ed, 2012 Part 3111 B

- 1) *Hotplate* Listrik untuk memanaskan larutan
- 2) AAS (Varian AA240) untuk menganalisis kadar Cu dalam adsorbat
- 3) ICPE-9000 SHIMADZU untuk menganalisis kadar logam dalam larutan

3.4.2 Persiapan Bahan

Bahan yang digunakan untuk membuat adsorben adalah MXene dan nanoserat eceng gondok. MXene dibuat dari serbuk MAX yang dibeli dalam fasa Ti_3AlC_2 yang dicampurkan dengan larutan asam fluorida (HF 50%) dengan metode *etching* (Song dkk., 2020). Nanoserat eceng gondok dibuat dengan metode *digester-sonication* sesuai penelitian Asrofi et al., (2018). MXene/Eceng Gondok dibuat dengan metode pencampuran kimia sesuai penelitian Wei dkk., (2018).



Gambar 3.1 Diagram Alir Tahapan Penelitian

a. Adsorben

1) MXene

Cara kerja yang dilakukan dalam menyiapkan Mxene adalah (Song dkk., 2020); (Shahzad dkk., 2017):

1. 10 gram MAX disaring menggunakan saringan *mesh* 500 mesh agar mendapatkan MAX yang lebih halus;
2. 2 gram MAX yang telah disaring direndam dengan HF 50% sebanyak 20 ml di dalam *beaker* plastik;
3. Larutan HF dan MAX diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan putaran 100 rpm di suhu ruangan selama 24 jam;
4. Campuran yang telah selesai diaduk dimasukkan ke dalam *tube centrifuge* 10 mL untuk dilanjutkan dengan proses penetralan menggunakan sentrifugen.
5. Campuran disentrifugasi dengan putaran 5.000 rpm selama 20 menit, lalu buang HF atau cairan yang terpisah dengan endapan MXene dan tuang aquades ke dalam *tube centrifuge* yang berisi endapan MXene.
6. Campuran tadi disentrifugasi kembali dengan putaran 5.000 rpm selama 20 menit, ukur pH dari campuran tersebut, lalu buang cairan yang terpisah dengan endapan MXene dan tuang aquades ke dalam *tube centrifuge* yang berisi endapan MXene . Lakukan proses ini hingga mendapatkan pH larutan ~6. pH campuran setelah sentrifugasi harus lebih besar dari 6 untuk memastikan MXene sudah bersih dari larutan HF yang ikut bereaksi.
7. Jika pH larutan sudah mencapai ~6, endapan MXene yang di dalam *tube* dituangkan ke dalam cawan, keringkan MXene di dalam oven selama 24 jam dengan suhu 60°C.
8. MXene yang telah kering dilarutkan dalam 200 mL aquades dan disonikasi menggunakan *Ultrasonic Probe Sonicator* dengan daya 720 W dan frekuensi 20 kHz selama 30 menit.

2) Eceng Gondok

Cara kerja untuk mempersiapkan nanoserat selulosa dari batang eceng gondok dengan metode *digester- sonication* (Asrofi dkk., 2018) adalah :

1. Eceng Gondok dijemur selama tiga hari hingga kering;
 2. Eceng gondok dipotong-potong sebesar 1 cm lalu timbang dengan menggunakan neraca analitik;
 3. Larutan NaOH 15% ditambahkan kepada eceng gondok;
 4. Eceng gondok dimasukkan ke dalam *autoclave* dan dipanaskan selama enam jam;
 5. Eceng gondok dikeringkan selama 2 hari;
 6. 15 gr eceng gondok ditambahkan dengan larutan NaOH 5% lalu diaduk menggunakan *stirrer* selama 4 jam dengan suhu 60°C;
 7. Serat eceng gondok direndam di dalam larutan NaOCl-HAC dengan perbandingan 4:1 selama 2 jam hingga adanya perubahan warna dari coklat menjadi putih;
 8. Cairan yang tersisa dikeluarkan lalu basuh serat dengan aquades hingga pH menjadi 7;
 9. Serat eceng gondok diaduk menggunakan *stirrer* dengan larutan HCl 5 M dengan kecepatan 300 rpm dan suhu 60°C selama 20 jam lalu diaduk kembali dengan larutan HCl 3,5 M dengan kecepatan 300 rpm dan suhu 60°C selama 20 jam;
 10. Cairan yang tersisa dikeluarkan lalu basuh serat dengan aquades hingga pH menjadi 7;
 11. 1 ml endapan eceng gondok ditambahkan dengan *aquadest* hingga volume menjadi 200 ml;
 12. 200 ml eceng gondok dimasukkan ke alat *Ultrasonic Probe Sonicator* dan disonikasi dengan daya 600 W dan frekuensi 20 KHz selama 1 jam;
- 3) MXene/Eceng Gondok

Cara kerja untuk mempersiapkan nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan metode pencampuran kimia (Wei dkk., 2018) adalah :

1. Campurkan suspensi MXene dan eceng gondok dengan perbandingan berat MXene:Eceng Gondok adalah 20:1 (1,08 gr MXene dan 0,108 gr Eceng Gondok dalam 48 mL campuran suspensi) dan 10:1 (2,16 gr

MXene dan 0,108 gr Eceng Gondok dalam 66 mL campuran suspensi) ke dalam *Beaker Glass*;

2. Campuran MXene/Eceng Gondok diaduk menggunakan *stirrer* dengan kecepatan 100 rpm dan suhu 80°C selama 1 jam;
3. Campuran MXene/Eceng Gondok yang sudah diaduk disentrifugasi sebanyak satu kali;
4. Endapan MXene/Eceng Gondok yang sudah disentrifugasi dituang ke cawan dan dioven dengan suhu 60°C selama 24 jam.

b. Larutan Artifisial

Larutan artifisial merupakan larutan yang dibuat dengan menambahkan larutan logam dengan konsentrasi tertentu ke dalam *aquabidest* yang dijadikan sebagai pelarut. Bahan yang digunakan dalam pembuatan larutan ini adalah kristal Tembaga (II) Sulfat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sebanyak 3,928 g yang dilarutkan dalam 1 L air untuk membuat larutan induk tembaga dengan konsentrasi 1000 mg/L. Air yang dijadikan sebagai pelarut yaitu *aquabidest*. Larutan artifisial diencerkan dengan pengenceran bertingkat dari Larutan artifisial konsentrasi 1000 mg/L menjadi larutan artifisial konsentrasi 100 mg/L, kemudian diencerkan lagi menjadi larutan artifisial konsentrasi 5 mg/L, 15 mg/L, 25 mg/L, dan 35 mg/L. pengenceran larutan artifisial dapat dilihat pada **Tabel 3.1** dan perhitungan pengenceran larutan artifisial dapat dilihat pada **Lampiran C**.

Tabel 3.1 Pengenceran Larutan Artifisial

No	Pengenceran	Konsentrasi Larutan Induk (mg/L)	Volume Larutan Induk yang Dibutuhkan (mL)	Konsentrasi Larutan Artifisial (mg/L)	Volume Larutan Artifisial yang Digunakan (mL)
1	Pertama	1.000	100	100	1.000
	(Larutan Artifisial Cu 100 mg/L)				
2	Kedua	100	50	5	1.000
	(Larutan Artifisial Cu 5, 15, 25, dan 35 mg/L)	100	150	15	1.000
		100	250	25	1.000
		100	350	35	1.000

c. Air Limbah Elektroplating Artifisial

Proses elektroplating menghasilkan air limbah elektroplating yang mengandung berbagai jenis ion logam berat seperti logam Cu, logam Cr, logam Pb, dan logam

Cd (Liu dkk., 2020). Penelitian ini menggunakan air limbah dalam bentuk artifisial karena industri pengolahan logam di wilayah Kota Padang tidak memberikan izin untuk mengambil sampel air limbah yang dihasilkan. Air limbah elektroplating artifisial merupakan air limbah yang dibuat dengan melarutkan larutan logam dengan konsentrasi yang mendekati konsentrasi logam dalam air limbah elektroplating sebenarnya ke dalam *aquabidest* yang dijadikan sebagai pelarut. Konsentrasi logam pada air limbah elektroplating artifisial yang dibuat mengacu kepada penelitian Liu dkk., (2013) yaitu konsentrasi logam Cr, Pb, dan Cd masing-masing sebesar 20 mg/L, 10 mg/L, dan 15 mg/L. Bahan yang digunakan dalam pembuatan larutan induk limbah elektroplating artifisial 1.000 ppm adalah kristal Tembaga (II) Sulfat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sebanyak 1,964 gr yang dilarutkan dalam 500 mL *aquabidest*, kristal Kalium Dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) sebanyak 2,829 gr yang dilarutkan dalam 500 mL *aquabidest*, kristal Kadmium Klorida (CdCl_2) sebanyak 0,815 gr yang dilarutkan dalam 500 mL *aquabidest*, dan kristal Timbal (II) Nitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) sebanyak 0,7993 gr yang dilarutkan dalam 500 mL *aquabidest*. Setelah pembuatan larutan induk limbah artifisial, dilakukan penentuan konsentrasi logam menggunakan *Inductively Couple Plasma Emission* (ICPE) untuk menentukan konsentrasi masing-masing logam dari air limbah artifisial. Perhitungan pengenceran konsentrasi air limbah elektroplating artifisial dapat dilihat pada **Lampiran C**.

3.5. Karakterisasi Material

Karakterisasi material adsorben bertujuan untuk melihat bentuk, rasio, dan ukuran dari adsorben. Karakterisasi material pada penelitian ini meliputi analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM), *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX), dan *Particle Size Analysis* (PSA). Material yang dianalisis karakterisasinya yaitu MAX (Ti_3AlC_2), MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$), dan MXene/Eceng Gondok sebelum adsorpsi. Karakterisasi material adsorben dianalisis sebelum modifikasi dan sesudah modifikasi.

3.5.1. SEM-EDX

Scanning Electron Microscope (SEM) pada adsorben bertujuan untuk menganalisis bentuk morfologi adsorben dalam ukuran mikroskopis dengan

perbesaran 10.000 kali dan 12.000 kali. Komposisi dan kandungan unsur-unsur kimia pada adsorben dianalisis menggunakan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDX). Analisis dilakukan Laboratorium SEM-EDX Departemen Teknik Mesin Universitas Andalas. Material yang dianalisis yaitu MAX, MXene, dan MXene/ Eceng Gondok dengan rasio 10:1 dan 20:1 dengan berat masing-masing material yang dianalisis yaitu 0, 25 gram. Langkah kerja analisis SEM yaitu:

1. Sebuah pistol elektron memproduksi sinar elektron dan dipercepat dengan anoda;
2. Lensa magnetik memfokuskan elektron menuju ke sampel (MAX, MXene, dan MXene/ Eceng Gondok dengan rasio 10:1 dan 20:1);
3. Sinar elektron yang terfokus memindai keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai;
4. Ketika elektron mengenai sampel maka sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor (CRT).

3.5.2. PSA

Particle Size Analysis (PSA) pada adsorben bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran dari adsorben secara mikroskopis. Analisis dilakukan menggunakan *Laser Diffraction Particle Size Analysis* SALD-2300 dengan rentang deteksi ukuran partikel 280.000 μm - 0,030 μm . Adsorben yang dianalisis yaitu adsorben MXene/Eceng Gondok rasio 20:1, adsorben MXene/ Eceng Gondok rasio 10:1, dan adsorben MXene tanpa modifikasi. Analisis dilakukan untuk membuktikan ukuran sudah berukuran mikroskopis atau tidak. Analisis dilakukan di Laboratorium Teknologi Terapan Steril Departemen Farmasi Universitas Andalas

3.6. Percobaan Adsorpsi

Percobaan adsorpsi pada penelitian kali ini menggunakan adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan variasi rasio 10:1 dan 20:1 dan konsentrasi larutan artifisial Cu yaitu 5, 15, 25, dan 35 mg/L. Hasil percobaan adsorpsi pada kondisi terbaik selanjutnya diterapkan pada percobaan aplikasi menggunakan air limbah elektroplating artifisial. Percobaan kontrol juga dilakukan menggunakan adsorben MXene tanpa modifikasi dan adsorben nanoserat eceng gondok untuk

membandingkan kinerja adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan adsorben kontrol.

a. Percobaan Adsorpsi Menggunakan Larutan Artifisial

Cara kerja yang dilakukan dalam percobaan adsorpsi menggunakan larutan artifisial yaitu:

1. 5 buah Erlenmeyer 100 ml digunakan sebagai wadah dalam percobaan adsorpsi untuk masing-masing konsentrasi 5, 15, 25, dan 35 mg/L;
2. Larutan artifisial dengan variasi konsentrasi 5 mg/L diambil sebanyak 50 mL dan dimasukkan ke dalam 5 buah Erlenmeyer 100 mL pertama, selanjutnya larutan artifisial dengan konsentrasi 15 mg/L diambil sebanyak 50 mL dan dimasukkan ke dalam 5 buah Erlenmeyer 100 mL kedua, seterusnya langkah yang sama dilakukan terhadap variasi konsentrasi 25 mg/L dan 35 mg/L ;
3. pH larutan artifisial diukur, selanjutnya pH larutan disesuaikan menjadi 5 dengan ditambahkan larutan HCL 0,1 N untuk menurunkan pH dan NaOH 0,5 N untuk menaikkan pH larutan;
4. Adsorben dicampurkan ke dalam Erlenmeyer 100 mL yang berisi larutan artifisial 50 mL dengan dosis adsorben 1 g/L (0,05 g MXene/ Eceng Gondok dalam 50 mL campuran adsorben dengan adsorbat);
5. Semua Erlenmeyer dikocok dengan kecepatan 200 rpm menggunakan *shaker* ;
6. Erlenmeyer pertama diambil campuran yang telah diadsorpsi selama 10 menit, erlenmeyer kedua diambil campuran yang telah diadsorpsi selama 20 menit, seterusnya langkah yang sama dilakukan sampai adsorpsi berlangsung selama 50 menit setiap selang waktu 10 menit adsorpsi ;
7. Campuran yang sudah dikocok disaring menggunakan kertas saring *whatman* No. 42;
8. Setelah disaring filtrat dimasukan ke dalam botol sampel dan siap untuk dianalisis kandungan Cu dengan metode *Direct Air –Acetylene* (Greenberg dkk., 1999) menggunakan AAS yang cara analisisnya dapat dilihat pada

Lampiran B.

Percobaan adsorpsi bertujuan untuk menentukan kondisi terbaik proses adsorpsi secara *batch* untuk penyisihan Cu. Adsorben (MXene/Eceng Gondok) dimasukkan ke dalam desikator, kemudian konsentrasi Cu sebelum dan sesudah

diukur dengan menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* AAS. Parameter percobaan adsorpsi yaitu dosis adsorben, pH adsorbat, konsentrasi adsorbat dan waktu kontak. Tujuannya untuk mendapatkan nilai terbaik dari masing-masing variasi tersebut. Variasi parameter yang digunakan pada adsorpsi sistem *batch* terdapat pada **Tabel 3.2** berikut.

Tabel 3.2 Variasi Percobaan

No	Parameter	Variasi
1.	Ukuran Partikel	500 mesh (Shahzad dkk., 2017)
2.	pH	5 (Shahzad dkk., 2017)
3.	Dosis Adsorben (g/L)	1 (Shahzad dkk., 2017)
4.	Rasio Nanokomposit	20:1 (Su dkk., 2021); 10:1 (Cao dkk., 2018)
5.	Konsentrasi Adsorbat (mg/L)	5, 15, 25, 35 (Gan dkk., 2019)
6.	Waktu kontak (menit)	10, 20, 30, 40, 50 (Gan dkk., 2019)

Urutan percobaan variasi adsorpsi atau matrik percobaan dapat dilihat pada **Tabel 3.3**. Dalam pelaksanaan percobaan variasi adsorpsi ini, pada saat dilakukan variasi terhadap parameter yang diuji, parameter yang lain diatur tetap.

Tabel 3.3 Matrik Percobaan

No	Ukuran Partikel (mesh)	pH	Dosis Adsorben (g/L)	Parameter			Hasil
				Rasio nanokomposit (g)	Konsentrasi Adsorbat (mg/L)	Waktu Kontak (menit)	
1	500	5	1	20:1	5	10	Konsentrasi Adsorbat Terbaik, Rasio nanokomposit terbaik
						20	
2	500	5	1	10:1	15	30	Kontrol dengan Adsorben MXene dan Eceng Gondok
						25	
						40	
3	500	5	1	-	Konsentrasi Adsorbat Terbaik	50	Kontrol dengan Adsorben MXene dan Eceng Gondok
						10	
						20	
						30	
						40	
						50	

Hasil dari percobaan adsorpsi dengan larutan artifisial berupa konsentrasi awal adsorbat, konsentrasi akhir adsorbat, volume larutan, dan massa adsorben digunakan dalam analisis kapasitas adsorpsi, isoterm adsorpsi, dan kinetika adsorpsi.

b. Percobaan Adsorpsi Menggunakan Air Limbah *Electroplating* Artifisial

Percobaan aplikasi ini dilakukan pada air limbah *electroplating* artifisial dengan menggunakan kondisi terbaik yang didapat pada percobaan adsorpsi. Percobaan pada sampel air limbah dilakukan secara triplo dan menggunakan kontrol agar

percobaan lebih akurat. Percobaan untuk adsorpsi pada sampel dilakukan pada pH terbaik yang telah didapatkan saat menggunakan larutan artifisial, MXene/Eceng Gondok dengan dosis adsorben terbaik, waktu kontak adsorben terbaik dan konsentrasi awal adsorbat terbaik. Filtrat campuran yang telah disaring setelah adsorpsi akan dianalisis menggunakan *Inductively Coupled Plasma Emission* (ICPE). Hasil dari percobaan aplikasi menggunakan air limbah *electroplating* artifisial berupa efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi.

c. Percobaan Kontrol menggunakan Adsorben MXene dan Adsorben Eceng Gondok

Percobaan kontrol digunakan untuk melihat perbandingan kinerja adsorpsi MXene/ Eceng Gondok terhadap adsorben MXene tanpa modifikasi dan adsorben nanoserat selulosa eceng gondok. MXene tanpa modifikasi merupakan MXene yang dibuat dengan metode *etching* tanpa proses sonikasi dan nanoserat selulosa eceng gondok merupakan nanoselulosa yang diisolasi dari batang eceng gondok. Percobaan pada parameter kontrol dilakukan secara triplo dan menggunakan kondisi penyisihan Cu terbaik dari percobaan adsorpsi menggunakan adsorben MXene/ Eceng Gondok. Hasil dari percobaan adsorpsi menggunakan parameter kontrol yaitu efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi selanjutnya dibandingkan dengan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi menggunakan adsorben MXene/ Eceng Gondok.

3.7. Analisis dan Pembahasan Hasil Percobaan

Tahapan penelitian selanjutnya adalah pengolahan data dari hasil percobaan dan menganalisis dari hasil tersebut. Pengolahan data dan pembahasan yang dikaji meliputi penurunan konsentrasi, efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, kondisi terbaik penyisihan pada adsorpsi sistem *batch*, dan penentuan persamaan isoterm adsorpsi yang sesuai.

a. Efisiensi Penyisihan Cu

Efisiensi penyisihan merupakan penurunan konsentrasi Cu oleh adsorben MXene/Eceng Gondok. Efisiensi dinyatakan dengan persentase dan besarnya dapat dihitung berdasarkan **Persamaan 3.1**:

$$E = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\% \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana:

E = Penyisihan (%)

C_o = Konsentrasi awal adsorbat (larutan artifisial Cu dan air limbah elektroplating artifisial) (mg/L)

C_e = Konsentrasi akhir adsorbat (larutan artifisial Cu dan air limbah elektroplating artifisial) (mg/L)

Efisiensi penyisihan (E) dapat dihitung dengan mengetahui konsentrasi awal adsorbat yang belum mengalami proses adsorpsi (C_o) dan konsentrasi akhir adsorbat (C_e) yang telah mengalami proses adsorpsi pada setiap waktu kontak yang telah diatur tetap.

b. Kapasitas Adsorpsi Cu

Kapasitas adsorpsi merupakan kemampuan yang dimiliki oleh adsorben dalam menjerap kontaminan pada larutan adsorbat. Kapasitas adsorpsi dinyatakan dalam berat miligram adsorbat yang terjerap dalam gram adsorben yang dapat dihitung dengan menggunakan **Persamaan 3.2:**

$$q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana:

q_e = Kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

C_o = Konsentrasi awal adsorbat (larutan artifisial Cu dan air limbah) (mg/L)

C_e = Konsentrasi akhir adsorbat (larutan artifisial Cu dan air limbah) (mg/L)

V = Volume campuran (L)

m = Massa adsorben (g)

Kapasitas adsorpsi (q_e) dapat dihitung dengan mengetahui selisih konsentrasi awal adsorbat yang belum mengalami proses adsorpsi (C_o) dan konsentrasi akhir adsorbat yang telah mengalami proses adsorpsi (C_e) pada setiap waktu kontak yang telah diatur tetap 10–50 menit. Volume yang dibutuhkan merupakan volume

campuran antara adsorben dan adsorbat yang mengalami proses adsorpsi (V) dan massa yang dibutuhkan merupakan adsorben (m).

c. Penentuan Persamaan Isoterm

Persamaan isoterm adsorpsi digunakan untuk mengetahui proses adsorpsi yang terjadi secara fisika atau secara kimia. Pada penentuan persamaan isoterm data yang digunakan yaitu data adsorpsi dengan variasi konsentrasi awal adsorbat (5, 15, 25, dan 35 mg/L) dan data adsorpsi dengan variasi dosis adsorben (0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1 g/L). Isoterm yang digunakan yaitu isoterm Langmuir dan isoterm Freundlich.

Persamaan Isoterm Langmuir yaitu **Persamaan 3.3** (Tchobanoglous, 2003):

$$q_e = \frac{ab C_e}{1 + b C_e} \dots\dots\dots(3.3)$$

Dimana:

a = Kapasitas adsorpsi (q_m)

b = Konstanta Langmuir (K_L)

Pada persamaan isoterm Langmuir kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan (q_e) didapatkan dari percobaan adsorpsi sebelumnya menggunakan variasi konsentrasi awal adsorbat dan variasi dosis adsorben. Konsentrasi adsorbat pada saat kesetimbangan (C_e) didapatkan dari percobaan adsorpsi sebelumnya menggunakan variasi konsentrasi awal adsorbat dan variasi dosis adsorben. Konstanta Isoterm Langmuir dapat ditentukan dengan plot data C_e/q_e pada sumbu y terhadap C_e pada sumbu x sehingga diperoleh **Persamaan 3.4** dan **Persamaan 3.5** (Tchobanoglous, 2003):

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C_e \dots\dots\dots(3.4)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m \cdot K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \dots\dots\dots(3.5)$$

Grafik C_e/q_e pada sumbu y terhadap C_e pada sumbu x yang dilinearisasi membentuk persamaan linear y = mx + c. Nilai Kapasitas kesetimbangan

Langmuir ($1/q_m$) ditentukan dengan nilai m pada persamaan linear. Konstanta isoterm Langmuir ($1/q_m \cdot K_L$) ditentukan dengan nilai kapasitas kesetimbangan langmuir ($1/q_m$) yang dikalikan dengan nilai konstanta c pada persamaan linear. Isoterm Langmuir memiliki empat tipe persamaan isoterm dan setiap tipe persamaan isoterm diujikan pada penelitian ini. Persamaan matematika model isoterm Langmuir dapat dilihat pada **Tabel 3.4**

Tabel 3.4 Persamaan Matematika Model Isoterm Langmuir

Isoterm	Persamaan	Persamaan Linear	Plot
Langmuir Tipe 1		$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} C_e + \frac{1}{K_L q_m}$	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e
Langmuir Tipe 2	$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$	$\frac{1}{q_e} = \left(\frac{1}{K_L q_m} \right) \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_m}$	$\frac{1}{q_e}$ vs $\frac{1}{C_e}$
Langmuir Tipe 3		$q_e = q_m - \left(\frac{1}{K_L} \right) \frac{q_e}{C_e}$	q_e vs $\frac{q_e}{C_e}$
Langmuir Tipe 4		$\frac{C_e}{q_e} = K_L q_m - K_L q_e$	$\frac{q_e}{C_e}$ vs q_e

Sumber: Langmuir, 1918

Persamaan Isoterm adsorpsi Freundlich yaitu **Persamaan 3.6** (Tchobanoglous, 2003):

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \dots \dots \dots (3.6)$$

Dimana:

q_e = kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang (mg/g)

K_f = Faktor kapasitas Freundlich

C_e = Konsentrasi akhir adsorbat saat kesetimbangan setelah adsorpsi selesai (mg/L)

$1/n$ = Intensitas Parameter Freundlich

Pada **Persamaan 3.6** kapasitas adsorpsi pada saat kesetimbangan (q_e) didapatkan dari percobaan adsorpsi sebelumnya menggunakan variasi konsentrasi awal adsorbat dan variasi dosis adsorben. Konsentrasi adsorbat pada saat kesetimbangan (C_e) didapatkan dari percobaan adsorpsi sebelumnya menggunakan variasi konsentrasi awal adsorbat dan variasi dosis adsorben. Konstanta pada Isoterm Freundlich (K_f dan n) dapat ditentukan dengan plot data pada grafik $\log q_e$ pada sumbu y terhadap $\log C_e$ pada sumbu x, dan diperoleh **Persamaan 3.7** (Tchobanoglous, 2003):

$$\text{Log } q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots(3.7)$$

Grafik $\log (x/m)$ pada sumbu y terhadap $\log C_e$ pada sumbu x yang dilinearisasi membentuk persamaan linear $y = mx + c$. Nilai Konstanta isoterm Freundlich (K_f) ditentukan dengan nilai $\log K_f$ sama dengan nilai konstanta c pada persamaan linear. Nilai intensitas parameter Freundlich didapatkan dari nilai m pada persamaan linear.

Grafik isoterm Freundlich dan Langmuir yang sudah dilinearisasi menghasilkan koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh dari masing-masing persamaan. Koefisien determinasi adalah pengukuran statistik yang menguji bagaimana perbedaan dalam variabel terikat dapat dijelaskan oleh perbedaan dalam variabel bebas. Dengan kata lain, koefisien ini menilai seberapa kuat hubungan linier antara dua variabel yang diplotkan pada sumbu x dan sumbu y (Rinaldi dkk., 2020). Koefisien determinasi digunakan untuk menilai persamaan isoterm yang sesuai dengan percobaan ini.

d. Penentuan Kinetika Adsorpsi

Tahap pengujian kinetika adsorpsi dapat dilakukan dengan menduga orde reaksi. Data yang digunakan pada penentuan kinetika adsorpsi yaitu data adsorpsi pada penyisihan Cu terbaik. Analisa kinetika adsorpsi didasarkan pada kinetika orde nol, orde satu, orde dua, *pseudo first-order*, dan *pseudo second-order* yang semuanya diuji pada penelitian ini. Grafik masing-masing parameter kinetika pada sumbu y terhadap waktu (t) pada sumbu x yang dilinearisasi membentuk persamaan linear $y = mx + c$. Nilai C_0 dan q_e bisa ditentukan dengan nilai c pada persamaan linear. Nilai konstanta kinetika masing-masing parameter bisa ditentukan dengan nilai m pada persamaan linear. Parameter kinetika yang telah dihitung akan menghasilkan grafik kinetika adsorpsi dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang akan dianalisis untuk menentukan kinetika yang sesuai pada proses adsorpsi. Kinetika adsorpsi yang sesuai dengan proses adsorpsi dilihat dari parameter kinetika dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 dibandingkan parameter kinetika lain (Simonin, 2016). Persamaan kinetika pada

masing-masing parameter kinetika yaitu sebagai berikut (Hajar dkk., 2016) (Astuti, 2018).

Tabel 3.5 Kinetika Adsorpsi

Orde	Rumus	Hubungan
Orde Nol	$C = C_0 - kt$	Konsentrasi terhadap waktu ($t - C_0$)
Orde Satu	$\ln C = -kt + \ln C_0$	Konsentrasi terhadap waktu ($t - \ln C$)
Orde Dua	$\frac{1}{C} = kt + \frac{1}{C_0}$	Konsentrasi terhadap waktu ($t - 1/C$)
<i>Pseudo First-Order</i>	$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k}{2,303}\right)t$	Kapasitas terhadap waktu ($t - \log(q_e - q_t)$)
<i>Pseudo Second-Order</i>	$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{kq_e^2}\right) + \left(\frac{1}{q_e}\right)t$	Kapasitas terhadap waktu ($t - 1/q_e$)

Sumber: Hajar dkk., 2016; Astuti, 2018

3.8. Analisis Statistik

Analisis statistik pada penelitian ini digunakan untuk melihat adanya perbedaan yang signifikan pada efisiensi dan kapasitas adsorpsi terhadap variasi percobaan adsorpsi. Analisis statistik yang digunakan yaitu uji ANOVA dan uji-T

3.8.1. Uji ANOVA

Uji statistik pada penelitian ini bertujuan untuk melihat terdapatnya perbedaan yang signifikan atau tidak pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi dengan variasi konsentrasi adsorbat dikarenakan penelitian dilakukan secara triplo. Uji statistik yang dilakukan adalah uji ANOVA yang diolah dengan *Microsoft Excel*. *Microsoft Excel* dapat membaca berbagai jenis data atau memasukkan data secara langsung ke dalam data editor. Hipotesis awal dalam penelitian ini adalah:

- (H_0) tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada data percobaan;
- (H_1) terdapat perbedaan yang signifikan pada data percobaan

Tabel 3.6 Format Umum Tabel ANOVA

<i>Source of Variation</i>	<i>Degree of Freedom (df)</i>	<i>Sum of Squares (SS)</i>	<i>Mean of squares (MS)</i>	$F_{\text{test}} (R_{U_F})$
Antar sampel (<i>factor variation</i>)	k-1	<i>SS factor</i>	α^2 antara	$R_{U_f} = F_{\text{test}} = \alpha^2$ antara/ α^2 dalam
Dalam sampel (<i>error variation</i>)	T-k	<i>SS error</i>	α^2 dalam	
Total	T-1	<i>SS factor + SS error</i>		

Sumber : (Harinaldi, 2005)

3.8.2. Uji-t

Uji -t merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk menguji diantara dua buah *mean* data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi yang diambil apakah terdapat atau tidak perbedaan yang signifikan. Uji-t dilakukan terhadap dua buah rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok dan terhadap adsorben MXene tanpa modifikasi dengan adsorben MXene/ Eceng Gondok. Analisis uji-t pada penelitian ini menggunakan program *Microsoft Excel*

Data yang dimasukkan yaitu data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi pada rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok 10:1 dan 20:1, dan data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi MXene tanpa modifikasi dengan MXene/ Eceng Gondok. Output yang didapatkan berupa nilai signifikansi antara dua data yang homogen. Tingkat kepercayaan yang dipakai pada uji-t adalah 0,05 atau 95%. Jika nilai signifikansi (*p-value*) pada sampel bernilai >0,05 maka tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua ukuran partikel. Selanjutnya jika nilai signifikansi (*p-value*) bernilai <0,05 maka terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

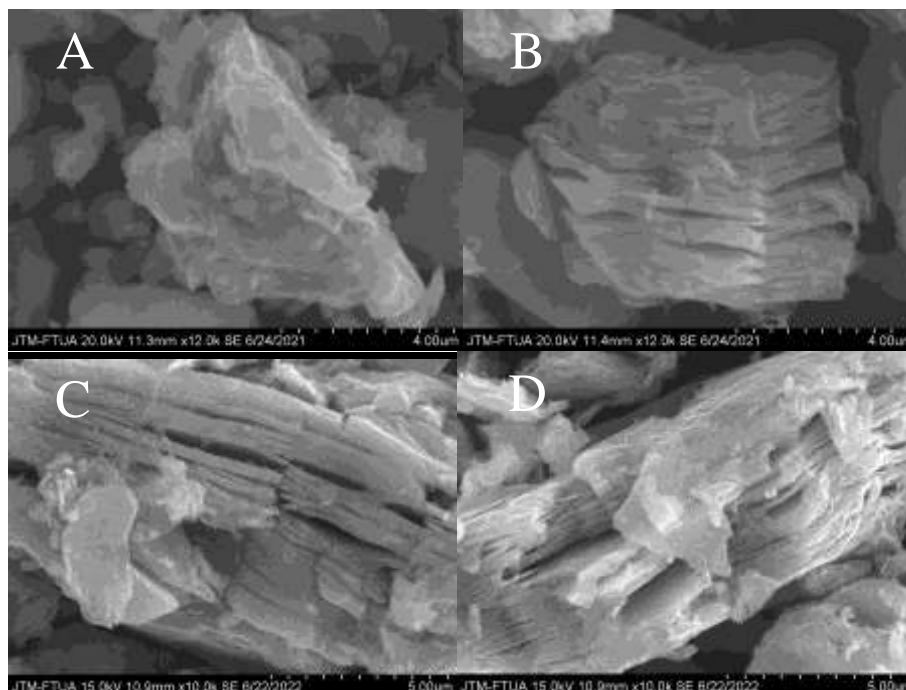
Bab ini menjelaskan mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan dan pembahasannya. Percobaan pada penelitian ini dilakukan secara triplo yaitu dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap variasinya. Hasil yang diperoleh yaitu hasil percobaan adsorpsi secara *batch* menggunakan adsorben MXene/Eceng Gondok terhadap larutan artifisial, analisis statistik yaitu uji-T dan uji ANOVA, perbandingan kinerja adsorpsi MXene/ Eceng Gondok terhadap percobaan kontrol, analisis ukuran partikel, penentuan isoterm adsorpsi, dan penentuan kinetika adsorpsi yang sesuai.

4.2 Karakterisasi Adsorben

Karakterisasi adsorben adalah analisis adsorben berdasarkan bentuk fisik dan kandungan unsur kimia yang terkandung pada adsorben. Adsorben yang dianalisis karakterisasinya yaitu MAX, MXene tanpa modifikasi, dan MXene/ Eceng Gondok. Analisis dilakukan untuk melihat perbedaan bentuk adsorben, ukuran partikel adsorben, dan unsur-unsur kimia yang terkandung pada masing-masing adsorben. Karakterisasi adsorben yang dilakukan yaitu analisis SEM- EDX dan analisis ukuran partikel menggunakan *Particle Size Analysis*.

4.2.1. SEM- EDX

Analisis SEM- EDX dilakukan untuk melihat bentuk morfologi dan unsur-unsur kimia yang terkandung secara mikroskopis dalam material MAX (Ti_3AlC_2), MXene ($Ti_3C_2T_x$), dan MXene/Eceng Gondok dengan rasio 10:1 dan 20:1. Perbesaran yang digunakan pada analisis SEM-EDX yaitu sebesar 10.000 kali. Material yang dijadikan adsorben dianalisis sebelum adsorpsi dan sesudah adsorpsi. Hasil analisis SEM MAX, MXene tanpa modifikasi, dan MXene/ Eceng Gondok dengan rasio 10:1 dan 20:1 dapat dilihat pada **Gambar 4.1**. Hasil analisis EDX berupa kandungan unsur kimia dalam MAX, MXene tanpa modifikasi, dan MXene/ Eceng Gondok dengan rasio 10:1 dan 20:1 dapat dilihat pada **Tabel 4.1**



Gambar 4.1 Hasil SEM A) Material MAX, B) MXene Tanpa Modifikasi, C) MXene/ Eceng Gondok 10:1, D) MXene/ Eceng Gondok 20:1

Berdasarkan hasil SEM pada **Gambar 4.1** dapat dilihat perbedaan bentuk morfologi dari MAX (Ti_3AlC_2), MXene ($Ti_3C_2T_x$), dan MXene/Eceng Gondok dengan rasio 10:1 dan 20:1. Pada **Gambar 4.1 A** struktur MAX tidak dalam bentuk lapisan dengan struktur rapat dan tidak beraturan, hal ini dikarenakan MAX mengandung unsur Al yang berikatan kuat dengan logam Ti. **Gambar 4.1 B** menunjukkan MAX yang sudah di etas menggunakan larutan HF menjadi MXene dengan bentuk morfologi yang beraturan dan ada jarak pada tiap lapisannya. Jarak antar lapisan MXene terbentuk karena reaksi MAX dengan larutan HF mengakibatkan ikatan logam antara logam Ti dan logam Al digantikan oleh ikatan ion logam Ti dengan gugus fungsi terminasi. Gugus fungsi terminasi merupakan gugus fungsi yang terletak di permukaan adsorben. Gugus fungsi terminasi berperan dalam proses penyerapan adsorbat pada proses adsorpsi yaitu O, OH, dan F (Yan dkk., 2019). **Gambar 4.1 C** menunjukkan bentuk morfologi MXene/Eceng Gondok dengan rasio 10:1 yang beraturan dan jarak antar lapisan yang lebih besar dibandingkan MXene tanpa modifikasi, hal ini disebabkan oleh proses sonikasi yaitu proses pemberian gelombang ultrasonik untuk mengecilkan dan menyeragamkan ukuran partikel MXene mengakibatkan ukuran partikel MXene makin kecil sehingga jarak antar lapisan MXene semakin besar. Untuk

mempertahankan jarak antar lapisan MXene agar tidak menumpuk maka dilakukan penyisipan nanoserat eceng gondok. Lapisan yang masih menumpuk pada struktur MXene/ Eceng Gondok 10:1 disebabkan oleh akumulasi nanoserat selulosa yang menutupi ruang antar lapisan MXene/Eceng Gondok. **Gambar 4.1 D** menunjukkan MXene/ Eceng Gondok dengan rasio 20:1 memiliki sedikit lapisan yang menumpuk, hal ini dikarenakan kandungan MXene pada adsorben yang lebih banyak dibandingkan MXene/ Eceng Gondok sehingga tidak terjadi penumpukkan nanoserat selulosa eceng gondok pada tiap lapisan adsorben. Nanoserat selulosa eceng gondok yang berada pada tiap lapisan adsorben mempertahankan jarak antar lapisan sehingga MXene/Eceng Gondok tidak mudah menumpuk.

Tabel 4.1 Hasil EDX dari Material MAX, MXene Tanpa Modifikasi, MXene/ Eceng Gondok 10:1, dan MXene/ Eceng Gondok 20:1

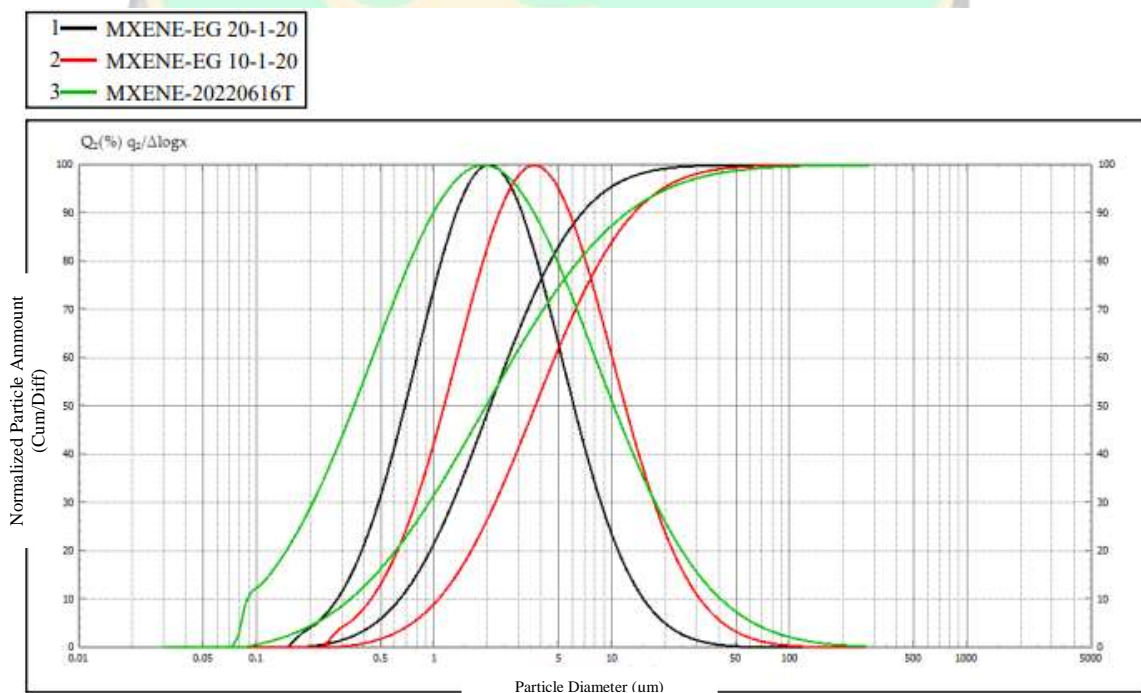
Material	Kandungan Unsur Kimia (%)			
	Ti	Al	C	F
MAX	62,06	13,40	24,54	-
MXene	52,27	1,07	20,91	25,44
MXene/Eceng Gondok 10 :1	38,61	2,22	40,33	18,85
MXene/Eceng Gondok 20 :1	31,97	1,97	44,85	21,21

Tabel 4.1 menunjukkan adanya perbedaan kandungan unsur kimia pada setiap material yang dianalisis. Material MAX mengandung Ti 62,06%, Al 13,40%, C 24,54%, dan tidak ada kandungan unsur F pada material. Unsur F yang tidak ada pada material disebabkan oleh MAX belum mengalami proses *etching* menggunakan larutan HF sehingga ikatan kimia yang ada pada material adalah ikatan unsur Ti dengan Al. MXene mengandung Ti 52,27%, Al 1,07%, C 20,91%, dan F 25,44%. MXene yang terbentuk dari proses *etching* antara MAX dengan larutan HF dapat menghilangkan ikatan logam antara unsur Ti dengan Al dan digantikan oleh gugus fungsi terminasi O, OH, dan F (Shuck dkk., 2020). Kandungan unsur Al yang masih ada dalam jumlah yang sedikit disebabkan oleh proses *etching* yang tidak berjalan sempurna sehingga masih ada ikatan antara unsur Ti dan Al. MXene/ Eceng Gondok dengan rasio 10:1 mengandung Ti 38,61%, Al 2,22%, C 40,33%, dan F 18,85%. Kandungan unsur C yang lebih banyak pada MXene/ Eceng Gondok 10:1 berasal dari penambahan nanoselulosa

dari eceng gondok. Selulosa merupakan polimer organik dengan monomer β -D-glukopiranososa yang mengandung unsur C, H, dan O (Asrofi dkk., 2018). MXene/ Eceng Gondok dengan rasio 20:1 mengandung Ti 31,97%, Al 1,97%, C 44,85%, dan F 21,21%. Peningkatan kandungan C dan F pada MXene/ Eceng Gondok 20:1 berasal dari kandungan MXene yang lebih banyak pada adsorben MXene/ Eceng Gondok 20:1 dibandingkan MXene/ Eceng Gondok 10:1.

4.2.2. Analisis Ukuran Partikel

Analisis ukuran partikel bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran dari adsorben MXene/Eceng Gondok secara mikroskopis. Analisis dilakukan menggunakan *Laser Diffraction Particle Size Analysis* SALD-2300 dengan rentang deteksi ukuran partikel 280 μm – 0,030 μm . Adsorben yang dianalisis yaitu adsorben MXene/Eceng Gondok rasio 20:1, adsorben MXene/ Eceng Gondok rasio 10:1, dan adsorben MXene tanpa modifikasi. Data yang dimasukkan untuk membuat grafik distribusi normal ukuran partikel adalah ukuran partikel dalam satuan μm dan grafik persebaran kumulatif ukuran partikel adalah perbandingan persen kumulatif dan persen perbedaan masing-masing ukuran partikel. Hasil analisis ukuran partikel menggunakan *Laser Diffraction Particle Size Analysis* SALD-2300 dapat dilihat pada **Gambar 4.2** dan **Tabel 4.2**.



Gambar 4.2 Distribusi Ukuran Partikel Adsorben

Tabel 4.2 Hasil Analisis Ukuran Partikel Adsorben

No	Material	Median (μm)	Modus (μm)	Mean (μm)	Standar Deviasi
1	MXene/ Eceng Gondok 20:1	2,041	2,239	2,057	0,398
2	MXene/ Eceng Gondok 10:1	3,670	3,548	3,702	0,427
3	MXene	1,935	1,778	1,988	0,597

Gambar 4.2 menunjukkan distribusi ukuran partikel dari masing-masing material MXene, MXene/ Eceng Gondok 10:1, dan MXene/ Eceng Gondok 20:1. Cara pembacaan grafik distribusi ukuran partikel yaitu titik puncak grafik distribusi dinyatakan sebagai nilai modus dan titik berat grafik distribusi dinyatakan sebagai nilai mean atau rata-rata ukuran partikel. Cara pembacaan grafik persebaran kumulatif ukuran partikel yaitu sumbu x dinyatakan sebagai ukuran partikel yang terbaca dan sumbu y dinyatakan sebagai persen partikel yang sudah terbaca oleh sistem deteksi ukuran partikel. Hasil analisis ukuran partikel masing-masing adsorben yaitu MXene tanpa modifikasi dengan distribusi ukuran partikel MXene 0,082 μm –280 μm , MXene/ Eceng Gondok 10:1 dengan distribusi ukuran partikel 0,269 μm –255,539 μm , dan MXene/ Eceng Gondok 20:1 dengan distribusi ukuran partikel 0,170 μm –102,436 μm . Berdasarkan hasil analisis ukuran partikel didapatkan pada **Tabel 4.2** rata-rata ukuran partikel untuk Adsorben MXene tanpa modifikasi sebesar 1,988 μm , adsorben MXene/Eceng Gondok dengan rasio 10:1 sebesar 3,702 μm , dan adsorben MXene/Eceng Gondok dengan rasio 20:1 sebesar 2,057 μm . nanoserat eceng gondok tidak dapat dianalisa ukuran partikelnya karena ukuran partikel nanoserat eceng gondok tidak berada dalam rentang pembacaan alat penganalisis ukuran partikel. Berdasarkan hasil analisis ukuran partikel dapat disimpulkan adsorben yang digunakan pada penelitian kali ini dengan ukuran partikel terkecil adalah MXene/Eceng Gondok dengan rasio 20:1.

Tabel 4.2 mengenai ukuran partikel antara MXene/ Eceng Gondok 10:1 dan MXene/ Eceng Gondok 20:1 menunjukkan ukuran partikel MXene/ Eceng Gondok 20:1 lebih kecil dibandingkan MXene/ Eceng Gondok 10:1, yaitu berukuran 2,057 μm . Ukuran partikel yang lebih kecil akan meningkatkan luas permukaan adsorben, luas permukaan adsorben yang meningkat mengakibatkan interaksi antar partikel adsorben dan adsorbat lebih banyak terjadi, sehingga

kemampuan adsorpsi logam Cu dari larutan artifisial dengan adsorben MXene/ Eceng Gondok 20:1 lebih baik dibandingkan MXene/ Eceng Gondok 10:1.

4.3 Percobaan Adsorpsi Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok

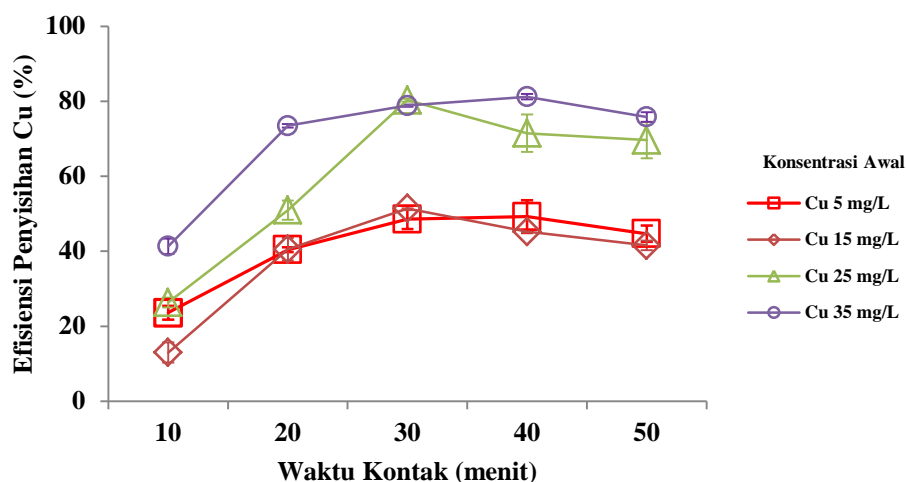
Percobaan adsorpsi yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan kondisi terbaik dari dua parameter yang divariasikan. Variasi yang dipilih yaitu rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok dan konsentrasi adsorbat. Kondisi terbaik dapat dilihat dari hasil efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi logam Cu yang paling tinggi dengan menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok. Hasil percobaan adsorpsi selanjutnya akan dianalisis sesuai dengan teori mengenai adsorpsi dan literatur-literatur terkait.

4.3.1 Percobaan Adsorpsi menggunakan Larutan Artifisial dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat

Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dilakukan dengan variasi konsentrasi adsorbat, konsentrasi adsorbat yang digunakan yaitu 5 mg/L, 15 mg/L, 25 mg/L, dan 35 mg/L. Parameter ukuran partikel, pH adsorbat, dosis adsorben, dan waktu kontak diatur tetap pada percobaan ini. Ukuran partikel adsorben yang digunakan yaitu 500 mesh, pH adsorbat diatur menjadi pH 5, dosis adsorben diatur menjadi 1 g/L, dan waktu kontak diatur 10, 20, 30, 40, dan 50 menit.

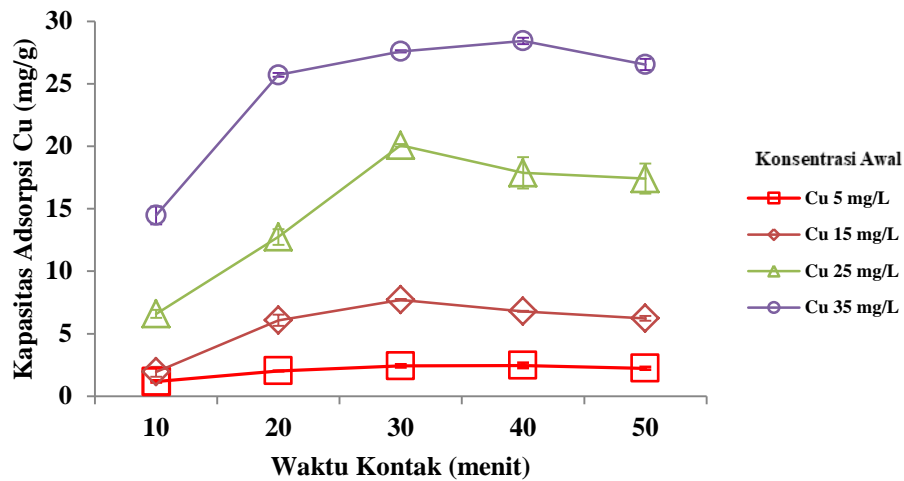
4.3.1.1. Variasi Konsentrasi Adsorbat dengan Adsorben MXene/Eceng Gondok Rasio 10:1

Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dilakukan dengan variasi konsentrasi adsorbat. Rasio adsorben yang digunakan yaitu rasio berat kering MXene dan eceng gondok sebesar 10:1. Grafik efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, dan penurunan konsentrasi adsorbat dapat dilihat pada **Gambar 4.3**, **Gambar 4.4**, dan **Gambar 4.5**.



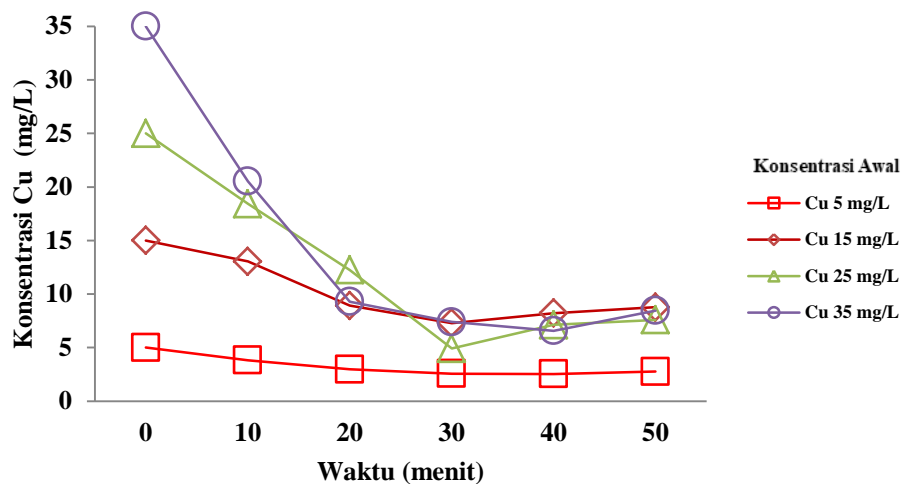
Gambar 4.3 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artfisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan tertinggi pada adsorben dengan rasio 10:1 berbeda tiap konsentrasi adsorbatnya. Pada percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 5 mg/L dan 35 mg/L efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan persentase penyisihan masing-masing sebesar 49,25% dan 81,23%. Efisiensi penyisihan tertinggi pada percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 15 mg/L dan 25 mg/L terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan persentase penyisihan masing-masing sebesar 51,43% dan 80,31%. Pada **Gambar 4.3** dapat dilihat semakin lama proses adsorpsi berlangsung, maka akan terjadi peningkatan efisiensi penyisihan logam Cu yang beragam pada masing-masing konsentrasi adsorbat hingga mencapai waktu 30 menit dan 40 menit. Efisiensi penyisihan mengalami penurunan setelah adsorpsi berlangsung selama 40 menit dan 50 menit karena pada saat adsorpsi berlangsung pada waktu 30 dan 40 menit telah terjadi penjerapan maksimum molekul Cu oleh adsorben MXene/Eceng Gondok. Pada menit ke-40 dan menit ke-50 kondisi adsorben sudah jenuh sehingga terjadi pelepasan molekul adsorbat ke dalam campuran adsorpsi.



Gambar 4.4 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

Berdasarkan percobaan yang dilakukan, terlihat pada **Gambar 4.4** kapasitas penyerapan logam Cu maksimum oleh adsorben dengan rasio 10:1 berbeda tiap konsentrasi adsorbatnya. Kapasitas adsorpsi mengalami peningkatan seiring berjalannya proses adsorpsi pada percobaan dengan variasi konsentrasi adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L hingga mencapai kapasitas adsorpsi tertinggi di waktu kontak 30 menit dan 40 menit. Kapasitas adsorpsi tertinggi pada percobaan dengan variasi konsentrasi adsorbat 5 mg/L dan 35 mg/L dengan nilai masing-masing sebesar 2,46 mg/g dan 28,43 mg/g yang terjadi pada waktu kontak 40 menit. Percobaan dengan variasi konsentrasi adsorbat 15 mg/L dan 25 mg/L menunjukkan kapasitas adsorpsi terbaik terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai kapasitas masing-masing sebesar 7,71 mg/g dan 20,08 mg/g. Pada waktu kontak 40 menit dan 50 menit kapasitas adsorpsi pada tiap variasi konsentrasi adsorbat mulai mengalami penurunan karena adsorben yang menyerap adsorbat telah mencapai kondisi setimbang yang berarti semua gugus fungsi adsorben sudah mengikat molekul adsorbat pada proses adsorpsi.

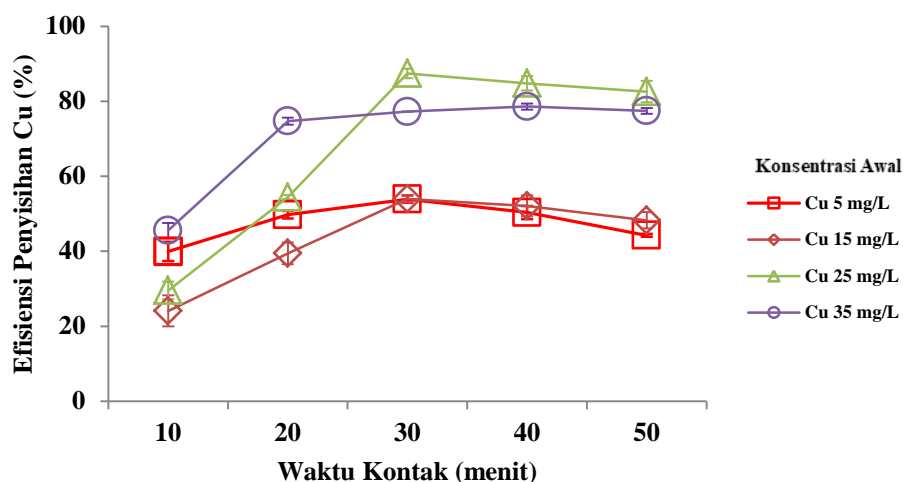


Gambar 4.5 Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifiisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

Terlihat pada **Gambar 4.5** hubungan antara penurunan konsentrasi logam Cu dan waktu kontak dengan adsorben MXene/Eceng Gondok rasio 10:1 berbeda tiap konsentrasi adsorbatnya. Pada percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 5 mg/L dan 35 mg/L penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 2,538 mg/L dan 6,570 mg/L. Percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 15 mg/L dan 25 mg/L menunjukkan penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai konsentrasi akhir 7,286 mg/L dan 4,926 mg/L. Penurunan konsentrasi adsorbat akan semakin besar seiring lamanya berlangsung adsorpsi hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Konsentrasi akhir adsorbat akan meningkat pada waktu kontak 40 dan 50 menit karena adsorpsi pada waktu kontak tersebut telah mencapai keadaan setimbang.

4.3.1.2. Variasi Konsentrasi Adsorbat dengan Adsorben MXene/Eceng Gondok Rasio 20:1

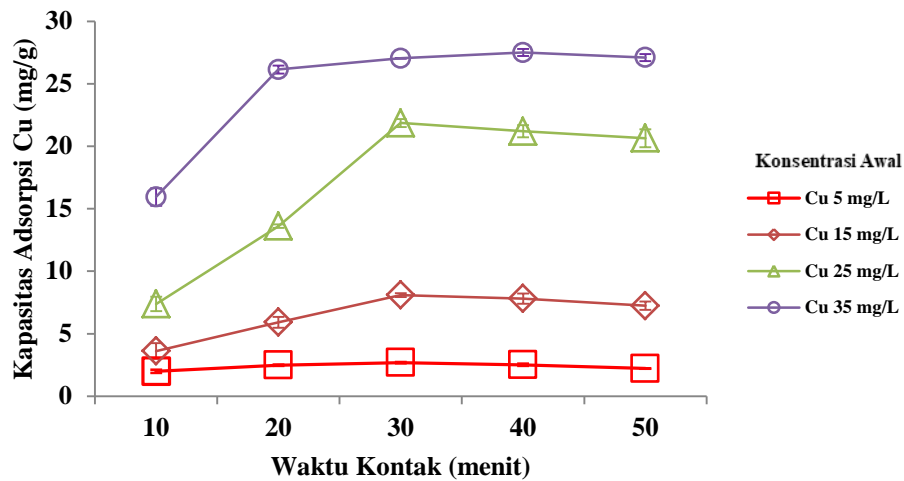
Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dilakukan dengan variasi konsentrasi adsorbat. Rasio adsorben yang digunakan yaitu rasio berat kering MXene dan eceng gondok sebesar 20:1. Grafik efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, dan penurunan konsentrasi adsorbat dapat dilihat pada **Gambar 4.6**, **Gambar 4.7**, dan **Gambar 4.8**.



Gambar 4.6 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artfisiel dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

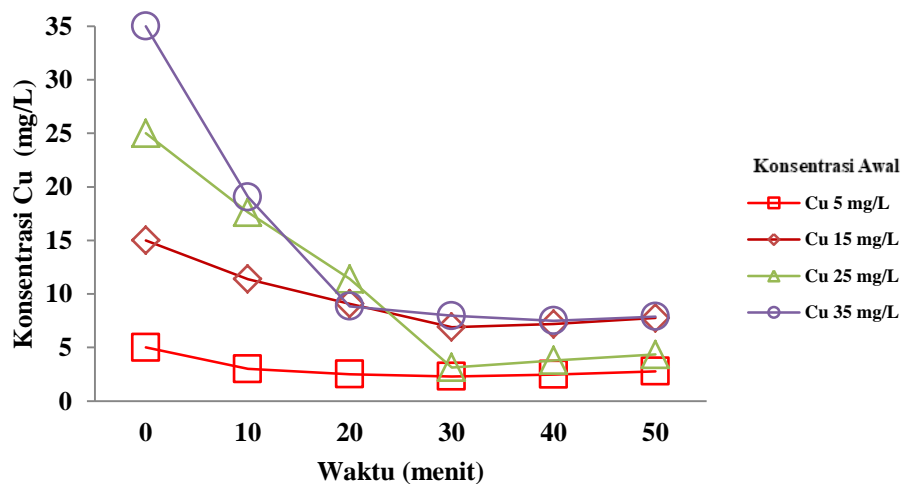
Gambar 4.6 menunjukkan efisiensi penyisihan adsorpsi dengan adsorben rasio 20:1 berbeda tiap konsentrasi adsorbatnya. Percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 5, 15, dan 25 mg/L menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan persentase penyisihan masing-masing sebesar 53,89%, 53,96%, dan 87,43%. Efisiensi penyisihan tertinggi pada percobaan dengan variasi konsentrasi adsorbat 35 mg/L adalah sebesar 78,59% yang terjadi pada waktu kontak 40 menit. Efisiensi penyisihan adsorpsi akan semakin meningkat seiring berlangsungnya adsorpsi hingga mencapai efisiensi penyisihan tertinggi pada waktu kontak 30 menit dan 40 menit. Setelah itu efisiensi penyisihan akan menurun karena adsorpsi telah mencapai kesetimbangan.

Gambar 4.7 menunjukkan kapasitas adsorpsi dengan adsorben rasio 20:1 berbeda tiap konsentrasi adsorbatnya. Kapasitas adsorpsi tertinggi pada percobaan dengan variasi konsentrasi adsorbat 5, 15, dan 25 mg/L dengan nilai masing-masing sebesar 2,69 mg/g, 8,09 mg/g, dan 21,86 mg/g yang terjadi pada waktu kontak 30 menit. Percobaan dengan variasi konsentrasi adsorbat 35 mg/L menunjukkan kapasitas adsorpsi terbaik terjadi pada waktu kontak 40 menit



Gambar 4.7 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artfisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

dengan nilai kapasitas 27,50 mg/g. Kapasitas adsorpsi pada setiap variasi konsentrasi adsorbat mengalami peningkatan hingga waktu 30 menit dan 40 menit. Pada waktu kontak 40 menit dan 50 menit kapasitas adsorpsi pada tiap variasi konsentrasi adsorbat mulai mengalami penurunan karena adsorben yang menjerap adsorbat telah mencapai kondisi setimbang yang berarti semua gugus fungsi adsorben sudah mengikat molekul adsorbat pada proses adsorpsi.



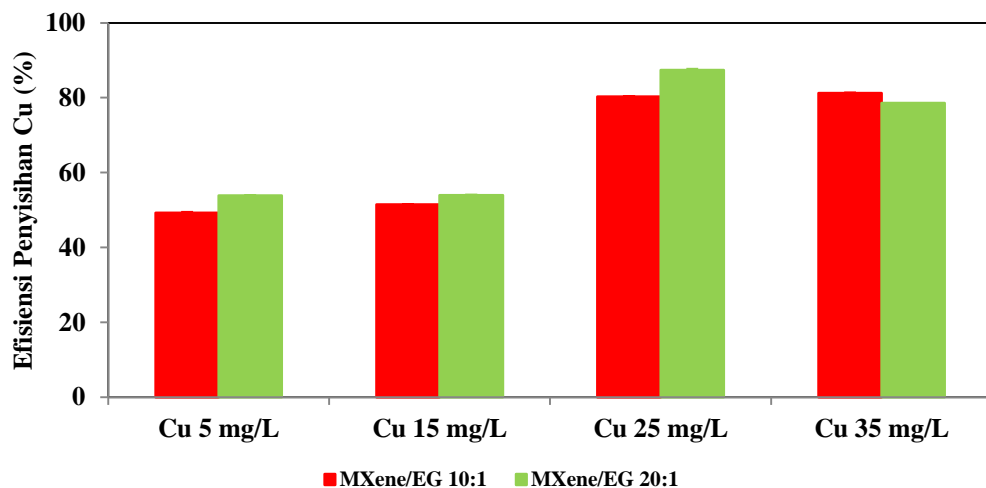
Gambar 4.8 Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artfisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1 pada Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

Gambar 4.8 menunjukkan hubungan antara penurunan konsentrasi logam Cu dan waktu kontak dengan adsorben MXene/Eceng Gondok rasio 20:1 berbeda tiap

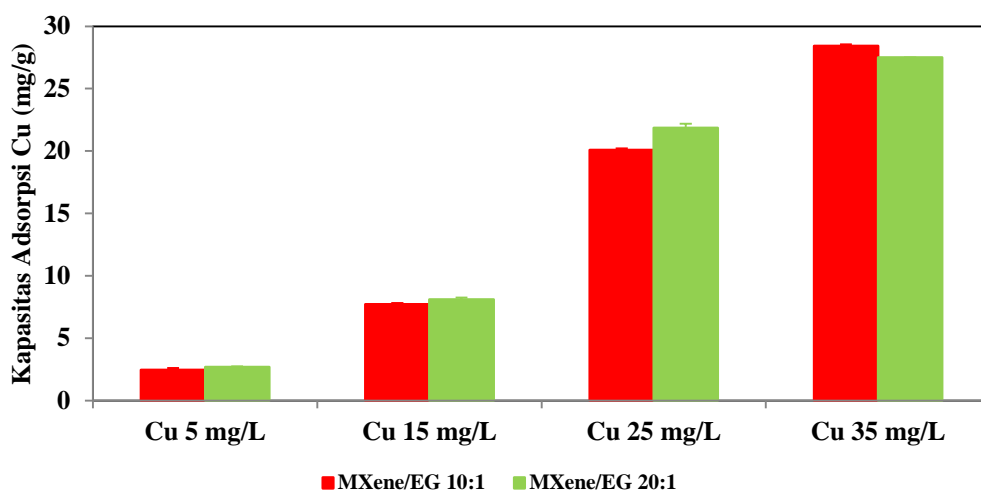
konsentrasi adsorbatnya. Penurunan konsentrasi tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dan 40 menit. Penurunan konsentrasi tertinggi pada waktu kontak 30 menit terjadi pada percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 5, 15, dan 25 mg/L dengan konsentrasi akhir adsorbat masing-masing 2,305 mg/L, 6,906 mg/L, dan 3,141 mg/L. Percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 35 mg/L menunjukkan penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 7,495 mg/L. Penurunan konsentrasi adsorbat akan semakin besar seiring lamanya berlangsung adsorpsi hingga mencapai kondisi kesetimbangan. Konsentrasi akhir adsorbat akan meningkat pada waktu kontak 40 dan 50 menit karena adsorpsi pada waktu kontak tersebut telah mencapai keadaan setimbang.

4.3.1.3. Analisis Hubungan Variasi Konsentrasi Adsorbat terhadap Kemampuan Adsorpsi

Berdasarkan hasil percobaan adsorpsi logam Cu dari larutan artifisial dengan variasi konsentrasi adsorbat didapatkan nilai efisiensi penyisihan tertinggi dan kapasitas adsorpsi terbaik. Hasil percobaan adsorpsi dengan variasi konsentrasi adsorbat yaitu efisiensi penyisihan tertinggi, dan kapasitas adsorpsi terbaik dapat dilihat pada **Gambar 4.9** dan **Gambar 4.10**.



Gambar 4.9 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat dalam Kondisi Terbaik



Gambar 4.10 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat dalam Kondisi Terbaik

Berdasarkan **Gambar 4.9** percobaan adsorpsi mengalami peningkatan efisiensi penyisihan pada konsentrasi adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L pada adsorben MXene/Eceng Gondok dengan rasio 10:1, sedangkan adsorben MXene/Eceng Gondok dengan rasio 20:1 percobaan adsorpsi mengalami peningkatan efisiensi penyisihan pada konsentrasi adsorbat 5, 15, dan 25 mg/L dan mengalami penurunan efisiensi penyisihan saat konsentrasi adsorbat ditingkatkan menjadi 35 mg/L. **Gambar 4.10** juga menunjukkan kapasitas adsorpsi mengalami peningkatan mulai dari konsentrasi 5, 15, 25, dan 35 mg/L. Hubungan variasi konsentrasi adsorbat dengan kemampuan adsorpsi menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi adsorbat yang digunakan dalam percobaan adsorpsi maka semakin besar nilai efisiensi penyisihan yang didapatkan hingga adsorben mencapai kondisi jenuh yaitu kemampuan maksimal adsorben dalam menyerap adsorbat, namun kapasitas adsorpsi akan mengalami peningkatan apabila konsentrasi adsorbat diperbesar. Peningkatan konsentrasi adsorbat yang memengaruhi kemampuan adsorpsi terjadi karena tumbukan antara adsorben dan adsorbat akan lebih banyak terjadi sehingga kapasitas adsorpsi akan meningkat, namun jumlah adsorbat yang melebihi adsorben akan menyebabkan efisiensi adsorpsi menurun secara termodinamika (Guo dkk., 2021). Menurut Gan dkk., (2019), peningkatan konsentrasi adsorbat akan menyebabkan peningkatan gaya penggerak untuk perpindahan massa pada proses adsorpsi. Peningkatan gaya

penggerak akan meningkatkan jumlah adsorbat yang terjerap oleh adsorben, sehingga kapasitas adsorpsi meningkat apabila konsentrasi adsorbat ditingkatkan.

Penelitian Gan dkk., (2019) yang meneliti tentang adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben MXene dengan modifikasi penambahan polimer asam amino. Gan dkk., (2019) melaporkan penambahan polimer asam amino pada MXene dapat memperbesar jarak antar lapisan MXene dan memberikan akses bagi gugus fungsi permukaan adsorben dalam menjerap molekul adsorbat. Penyisipan polimer asam amino pada Mxene juga dapat menambah gugus fungsi baru pada adsorben menjadi gugus fungsi O, OH, F, COOH, dan NH₂. Konsentrasi adsorbat yang digunakan adalah 5, 10, 15, 20, 25, dan 30 mg/L. Penelitian Gan dkk., (2019) menunjukkan kapasitas adsorpsi meningkat dari 10,5 mg/g menjadi 33,5 mg/g apabila konsentrasi awal adsorbat ditingkatkan. Hal ini disebabkan oleh banyaknya gugus fungsi pada permukaan adsorben yang berikatan dengan molekul adsorbat Cu jika konsentrasi adsorbat ditingkatkan. Hasil ini relevan dengan penelitian ini yang mana pada variasi konsentrasi adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi Cu dari 2,43 mg/g menjadi 28,43 mg/g. Penelitian Guo dkk., (2021) yang meneliti kemampuan adsorben *graphene* oksida dalam mengadsorpsi logam Cu dengan variasi konsentrasi adsorbat 100- 1000 mg/L menunjukkan efisiensi penyisihan logam Cu menurun seiring bertambahnya konsentrasi adsorbat dengan efisiensi penyisihan 95–89%, namun kapasitas adsorpsi meningkat dengan kapasitas adsorpsi 250–1.750 mg/g. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa semakin bertambahnya konsentrasi adsorbat pada proses adsorpsi, maka efisiensi penyisihan akan menurun apabila adsorben sudah mencapai kondisi setimbang. Namun kapasitas adsorpsi akan meningkat apabila konsentrasi adsorbat meningkat. Hasil ini relevan dengan penelitian ini yang mana pada konsentrasi adsorbat 35 mg/L efisiensi penyisihan adsorpsi mulai mengalami penurunan dari 87,43% menjadi 78,59% pada adsorben MXene/ Eceng Gondok 20:1 namun kapasitas adsorpsi mengalami peningkatan dari 21,86 mg/g menjadi 27,50 mg/g. Penelitian Fard dkk., (2017) yang meneliti adsorpsi Mxene dalam menyisihkan logam Ba dengan variasi konsentrasi adsorbat (mg/L) 1, 6, 11, 21, dan 55 menunjukkan konsentrasi adsorbat terbaik sebesar 1 mg/L dengan efisiensi

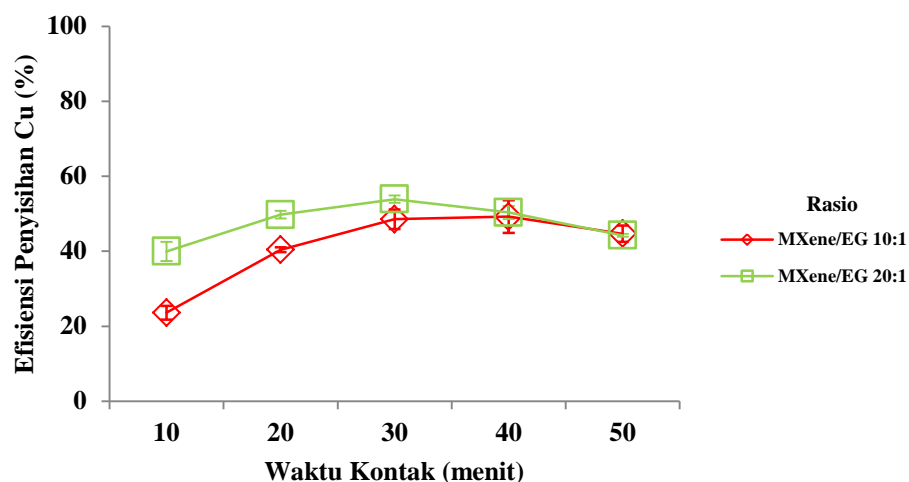
penyisihan sebesar 95%. Efisiensi penyisihan semakin menurun jika konsentrasi adsorbat ditingkatkan hingga pada konsentrasi adsorbat 55 mg/L efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 80%. Penurunan efisiensi penyisihan jika konsentrasi adsorbat ditingkatkan terjadi karena pada saat adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 1 mg/L, gugus fungsi adsorben mampu menjerap molekul adsorbat Ba lebih banyak dibandingkan percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat lebih tinggi, sehingga adsorben membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai kondisi setimbang. Semakin meningkat efisiensi penyisihan maka kapasitas adsorpsi akan meningkat hingga proses adsorpsi mencapai kesetimbangan, namun jika konsentrasi awal adsorbat ditingkatkan maka efisiensi penyisihan akan menurun tetapi kapasitas adsorpsi terus meningkat.

4.3.2 Percobaan Adsorpsi menggunakan Larutan Artifisial dengan Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok

Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan variasi rasio nanokomposit, rasio nanokomposit yang digunakan yaitu perbandingan berat kering MXene dengan nanoselulosa dari eceng gondok dengan rasio perbandingan 10:1 dan 20:1. Parameter ukuran partikel, pH adsorbat, dosis adsorben, dan waktu kontak diatur tetap pada percobaan ini. Ukuran partikel adsorben yang digunakan yaitu 500 mesh, pH adsorbat diatur menjadi pH 5, dosis adsorben diatur menjadi 1 g/L, dan waktu kontak diatur 10, 20, 30, 40, dan 50 menit.

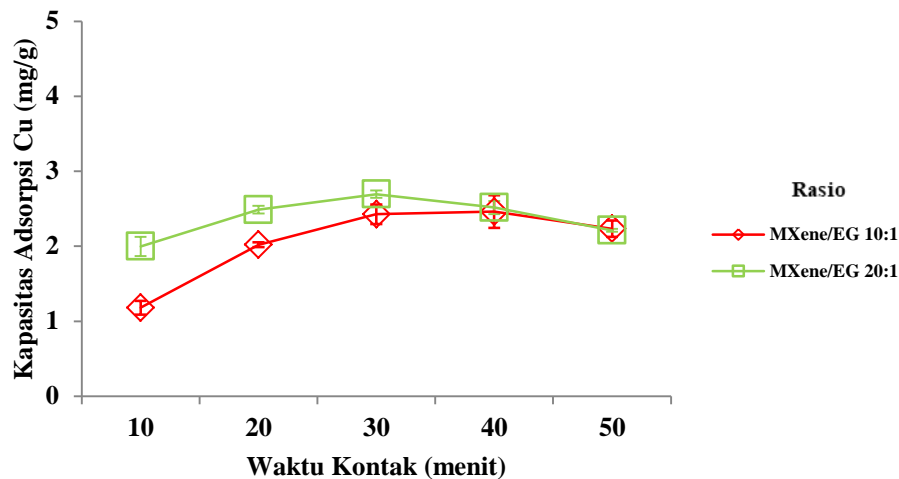
4.3.2.1 Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L

Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dilakukan dengan variasi rasio nanokomposit. Variasi rasio adsorben yang digunakan yaitu perbandingan berat kering MXene dan eceng gondok sebesar 10:1 dan 20:1. Konsentrasi adsorbat yang digunakan sebesar 5 mg/L. Grafik efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, dan penurunan konsentrasi adsorbat dapat dilihat pada **Gambar 4.11**, **Gambar 4.12**, dan **Gambar 4.13**.



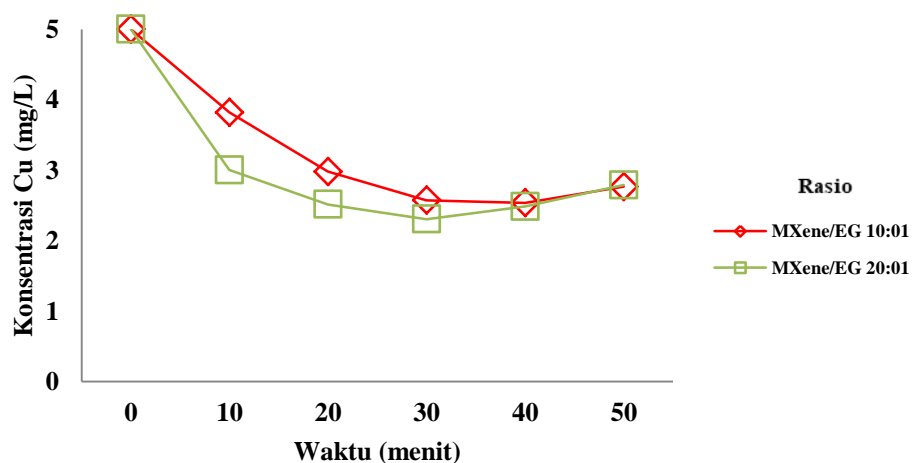
Gambar 4. 11 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 5 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Gambar 4.11 menunjukkan efisiensi penyisihan adsorpsi dengan konsentrasi awal adsorbat 5 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan persentase penyisihan sebesar 49,25%. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai penyisihan 53,89%. Efisiensi penyisihan menurun pada waktu 50 menit dan 40 menit setelah percobaan adsorpsi mencapai efisiensi penyisihan tertinggi. Efisiensi penyisihan mengalami penurunan setelah adsorpsi berlangsung selama 50 menit dan 40 menit karena pada saat adsorpsi berlangsung pada waktu 40 dan 30 menit telah terjadi penjerapan maksimum molekul Cu oleh adsorben MXene/Eceng Gondok. Pada menit ke-50 dan menit ke-40 kondisi adsorben sudah jenuh sehingga terjadi pelepasan molekul adsorbat ke dalam campuran adsorpsi.



Gambar 4.12 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 5 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Gambar 4.12 menunjukkan kapasitas adsorpsi dengan konsentrasi awal adsorbat 5 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 2,46 mg/g. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai kapasitas 2,69 mg/g. Setelah percobaan adsorpsi menunjukkan kapasitas maksimum pada masing-masing rasio, kapasitas adsorpsi mengalami penurunan pada waktu kontak 50 menit dan 40 menit.

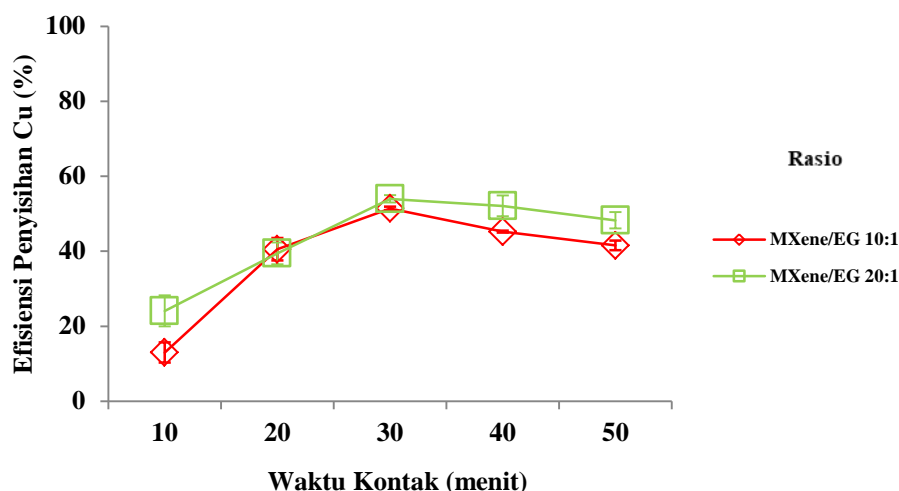


Gambar 4.13 Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 5 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Terlihat pada **Gambar 4.13** hubungan antara penurunan konsentrasi logam Cu dan waktu kontak dengan adsorben MXene/Eceng Gondok pada konsentrasi awal adsorbat 5 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 2,538 mg/L. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai konsentrasi akhir 2,305 mg/L. Konsentrasi akhir adsorbat pada waktu 50 dan 40 menit mengalami kenaikan karena adsorpsi telah mencapai keadaan setimbang yang berarti adsorben telah jenuh dalam menyerap adsorbat, sehingga terjadi pelepasan molekul Cu pada campuran adsorpsi. Pada **Gambar 4.11**, **Gambar 4.12**, dan **Gambar 4.13** disimpulkan bahwa pada percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 5 mg/L adsorben MXene/ Eceng Gondok 20:1 mempunyai kemampuan adsorpsi lebih baik dibandingkan adsorben MXene/ Eceng Gondok 10:1.

4.3.2.2 Variasi Rasio Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 15 mg/L

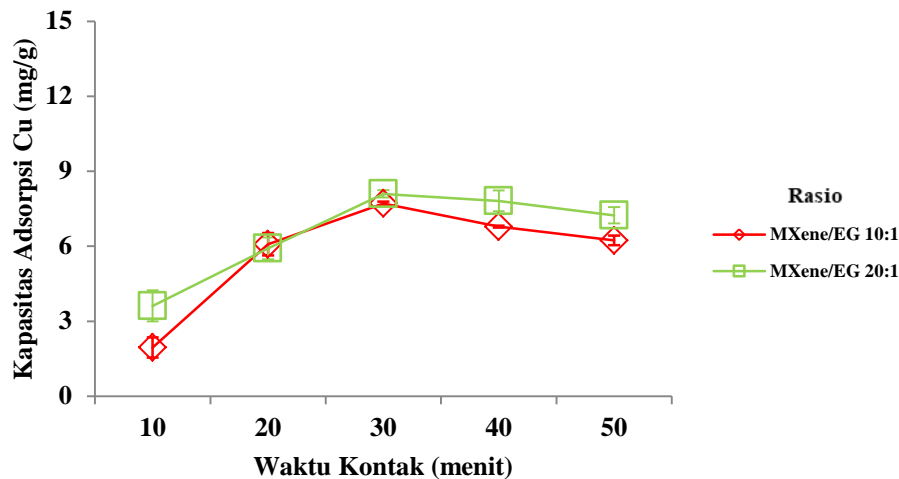
Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dilakukan dengan variasi rasio nanokomposit. Variasi rasio adsorben yang digunakan yaitu perbandingan berat kering MXene dan eceng gondok sebesar 10:1 dan 20:1. Konsentrasi adsorbat yang digunakan sebesar 15 mg/L. Grafik efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, dan penurunan konsentrasi adsorbat dapat dilihat pada **Gambar 4.14**, **Gambar 4.15**, dan **Gambar 4.16**.



Gambar 4.14 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artfisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 15 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

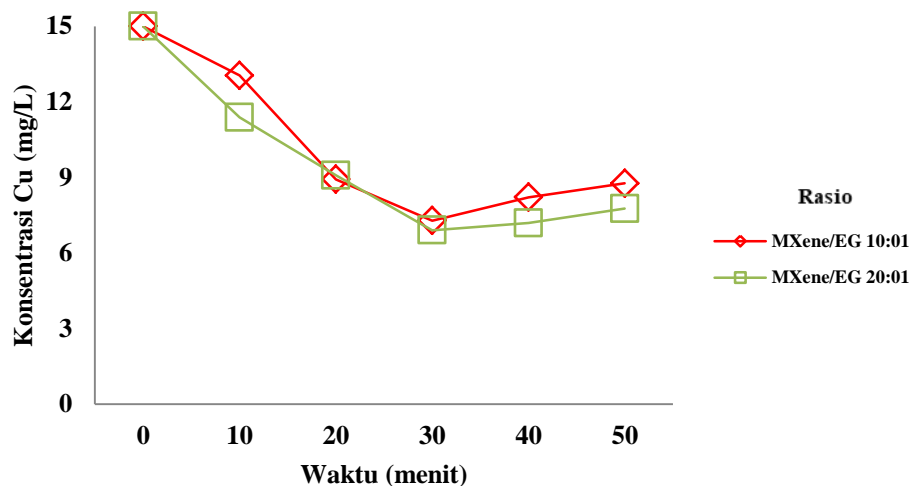
Efisiensi penyisihan adsorpsi pada **Gambar 4.14** dengan konsentrasi awal adsorbat 15 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan persentase penyisihan sebesar 51,43%. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai penyisihan 53,96%. Efisiensi penyisihan mengalami penurunan pada waktu kontak 40 menit karena semua gugus fungsi permukaan adsorben telah berikatan dengan molekul Cu dalam adsorbat.

Kapasitas adsorpsi MXene/ Eceng Gondok pada tiap rasionya dengan konsentrasi awal adsorbat 15 mg/L ditunjukkan pada **Gambar 4.15**. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 7,71 mg/g. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai kapasitas 8,09 mg/g. Pada waktu kontak 40 menit kapasitas adsorpsi mengalami penurunan karena adsorpsi telah berada dalam keadaan setimbang.



Gambar 4.15 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 15 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Terlihat pada **Gambar 4.16** hubungan antara penurunan konsentrasi logam Cu dan waktu kontak dengan adsorben MXene/Eceng Gondok pada konsentrasi awal adsorbat 15 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 7,286 mg/L. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai konsentrasi akhir adsorbat sebesar 6,906 mg/L. Setelah proses adsorpsi mencapai keadaan terbaik konsentrasi akhir adsorbat mengalami peningkatan pada menit 40. Berdasarkan **Gambar 4.14**, **Gambar 4.15**, dan **Gambar 4.16** disimpulkan bahwa pada percobaan adsorpsi dengan adsorben MXene/ Eceng Gondok 20:1 mempunyai kemampuan adsorpsi lebih baik dibandingkan adsorben MXene/ Eceng Gondok 10:1 pada konsentrasi adsorbat 15 mg/L.

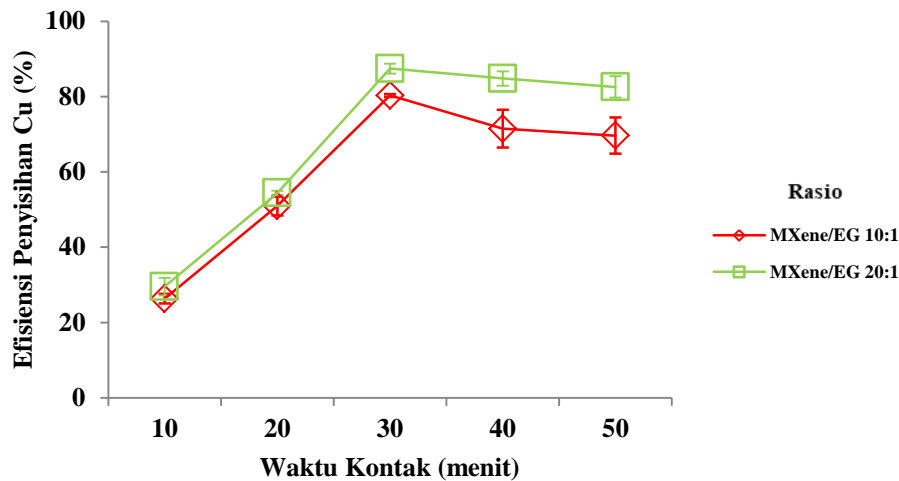


Gambar 4.16 Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifiisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 15 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

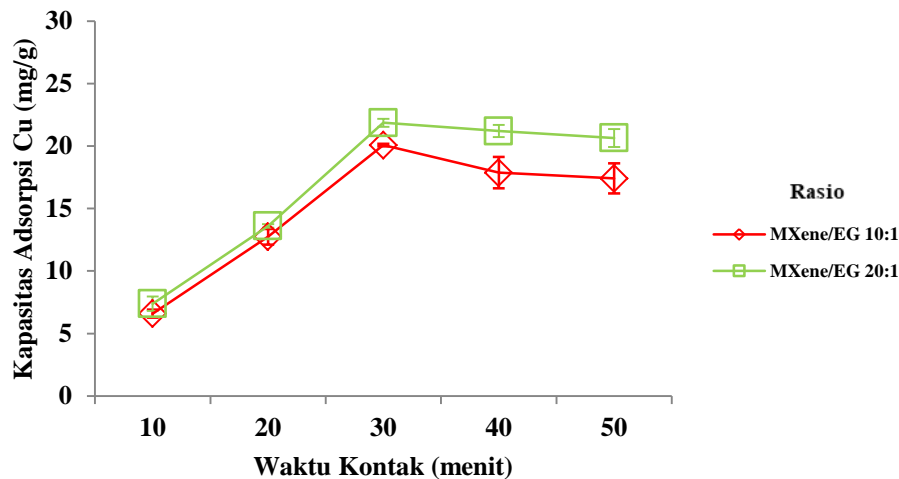
4.3.2.3 Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L

Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dilakukan dengan variasi rasio nanokomposit. Variasi rasio adsorben yang digunakan yaitu perbandingan berat kering MXene dan eceng gondok sebesar 10:1 dan 20:1. Konsentrasi adsorbat yang digunakan sebesar 25 mg/L. Grafik efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, dan penurunan konsentrasi adsorbat dapat dilihat pada **Gambar 4.17**, **Gambar 4.18**, dan **Gambar 4.19**.

Gambar 4.17 menunjukkan efisiensi penyisihan adsorpsi yang berbeda tiap rasio nanokompositnya dengan konsentrasi awal adsorbat 25 mg/L. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan persentase penyisihan sebesar 80,31%. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai penyisihan 87,43%. Pada waktu kontak 40 menit terjadi penurunan efisiensi penyisihan adsorpsi karena adsorpsi telah mencapai keadaan setimbang.

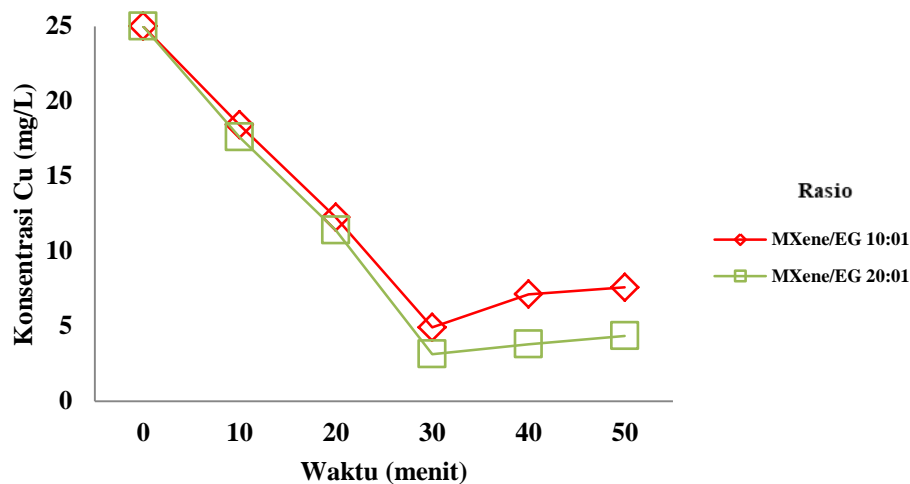


Gambar 4.17 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 25 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1



Gambar 4.18 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 25 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Gambar 4.18 menunjukkan kapasitas adsorpsi dengan konsentrasi awal adsorbat 25 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 20,08 mg/g. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai kapasitas 21,86 mg/g. Kapasitas adsorpsi mengalami penurunan pada waktu kontak 40 menit karena semua gugus fungsi adsorben telah menjerap molekul Cu pada adsorbat.

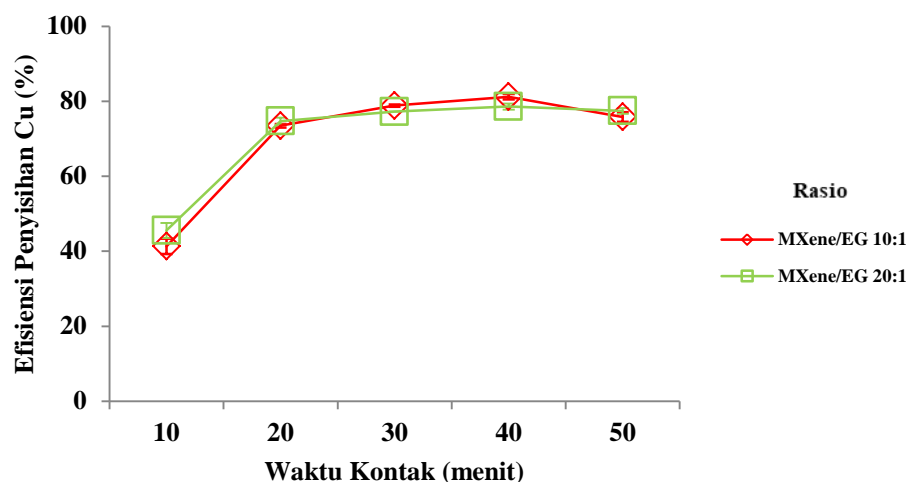


Gambar 4.19 Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 25 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Terlihat pada **Gambar 4.19** hubungan antara penurunan konsentrasi logam Cu dan waktu kontak dengan adsorben MXene/Eceng Gondok pada konsentrasi awal adsorbat 25 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 4,924 mg/L. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai konsentrasi akhir 3,141 mg/L. Konsentrasi akhir adsorbat mengalami kenaikan pada waktu kontak adsorpsi 40 menit. **Gambar 4.17**, **Gambar 4.18**, dan **Gambar 4.19** menunjukkan kemampuan adsorpsi logam Cu dengan adsorben MXene/Eceng Gondok 20:1 lebih baik dibandingkan adsorben MXene/Eceng Gondok 10:1 pada konsentrasi awal adsorbat 25 mg/L.

4.3.2.4 Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok dengan Konsentrasi Adsorbat 35 mg/L

Percobaan adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben nanokomposit MXene/Eceng Gondok dilakukan dengan variasi rasio nanokomposit. Variasi rasio adsorben yang digunakan yaitu perbandingan berat kering MXene dan eceng gondok sebesar 10:1 dan 20:1. Konsentrasi adsorbat yang digunakan sebesar 35 mg/L. Grafik efisiensi penyisihan, kapasitas adsorpsi, dan penurunan konsentrasi adsorbat dapat dilihat pada **Gambar 4.20**, **Gambar 4.21**, dan **Gambar 4.22**.

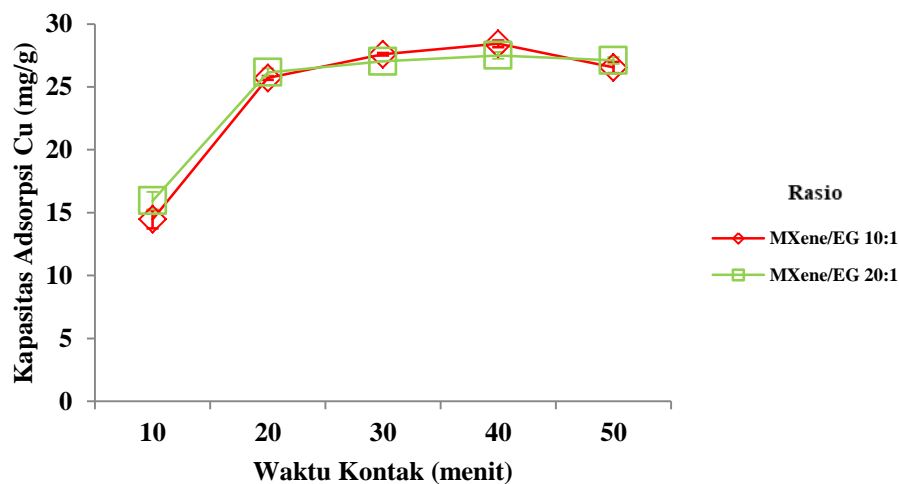


Gambar 4.20 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artfisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 35 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Gambar 4.20 menunjukkan efisiensi penyisihan adsorpsi dengan konsentrasi awal adsorbat 35 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan persentase penyisihan sebesar 81,23%. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan nilai penyisihan 78,59%. Efisiensi penyisihan adsorpsi mengalami penurunan pada waktu kontak 50 menit. Waktu kontak adsorpsi yang dibutuhkan untuk mencapai penyisihan Cu terbaik pada percobaan dengan konsentrasi adsorbat 35 mg/L lebih lama dibandingkan percobaan dengan konsentrasi adsorbat 5, 15, dan 25 mg/L, hal ini terjadi karena kandungan Cu pada konsentrasi adsorbat 35 mg/L lebih banyak dibandingkan konsentrasi 5, 15, dan 25 mg/L, sehingga dibutuhkan waktu yang lebih lama bagi adsorben untuk mencapai kemampuan terbaik dalam menjerap adsorbat. Penelitian Fard dkk., (2017) yang meneliti adsorpsi Mxene dalam menyisihkan logam Ba dengan variasi konsentrasi adsorbat (mg/L) 1–55 mg/L menunjukkan bahwa pada konsentrasi adsorbat 1 mg/L waktu kontak yang dibutuhkan untuk mencapai penyisihan Ba terbaik adalah 20 menit, sedangkan pada konsentrasi adsorbat 55 mg/L waktu kontak yang dibutuhkan untuk mencapai penyisihan Ba terbaik adalah 90 menit. Waktu kontak terbaik yang lebih cepat pada konsentrasi adsorbat 1 mg/L disebabkan oleh banyaknya gugus fungsi

MXene yang belum menjerap molekul barium sehingga penjerapan molekul Ba oleh adsorben lebih banyak terjadi, hal ini memengaruhi laju adsorpsi hingga mencapai kesetimbangan yang lebih cepat dibandingkan percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 55 mg/L.

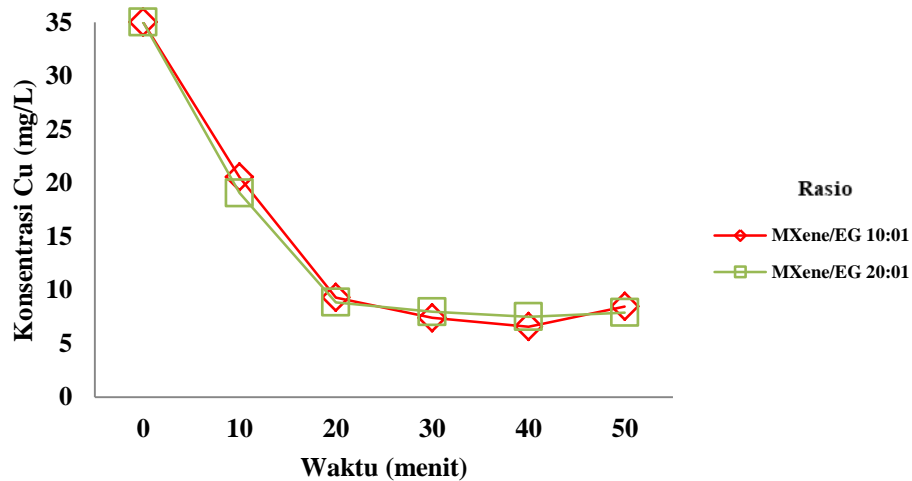
Gambar 4.21 menunjukkan kapasitas adsorpsi dengan konsentrasi awal adsorbat 35 mg/L berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan kapasitas adsorpsi sebesar 28,43 mg/g. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1 menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan nilai kapasitas 27,50 mg/g. Seluruh gugus fungsi permukaan adsorben telah berikatan dengan molekul adsorbat Cu pada waktu kontak 40 menit sehingga pada proses adsorpsi dengan waktu kontak 50 menit kapasitas adsorpsi mengalami penurunan.



Gambar 4.21 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 35 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

Hubungan antara penurunan konsentrasi logam Cu dan waktu kontak dengan adsorben MXene/Eceng Gondok pada konsentrasi awal adsorbat 35 mg/L yang ditunjukkan dalam **Gambar 4.22** berbeda tiap rasio nanokompositnya. Pada percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 10:1 penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 6,570 mg/L. Percobaan adsorpsi dengan rasio nanokomposit 20:1

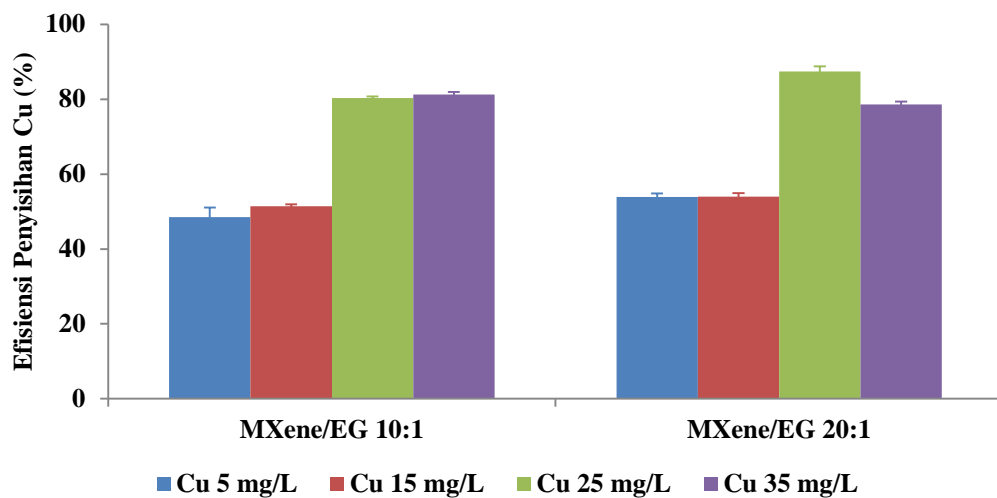
menunjukkan penurunan konsentrasi adsorbat tertinggi terjadi pada waktu kontak 40 menit dengan nilai konsentrasi akhir 7,495 mg/L. Konsentrasi akhir adsorbat mengalami peningkatan pada waktu kontak 50 menit. **Gambar 4.20**, **Gambar 4.21**, dan **Gambar 4.22** menunjukkan kemampuan adsorpsi logam Cu dengan adsorben MXene/Eceng Gondok 10:1 lebih baik dibandingkan adsorben MXene/Eceng Gondok 20:1 pada konsentrasi awal adsorbat 25 mg/L.



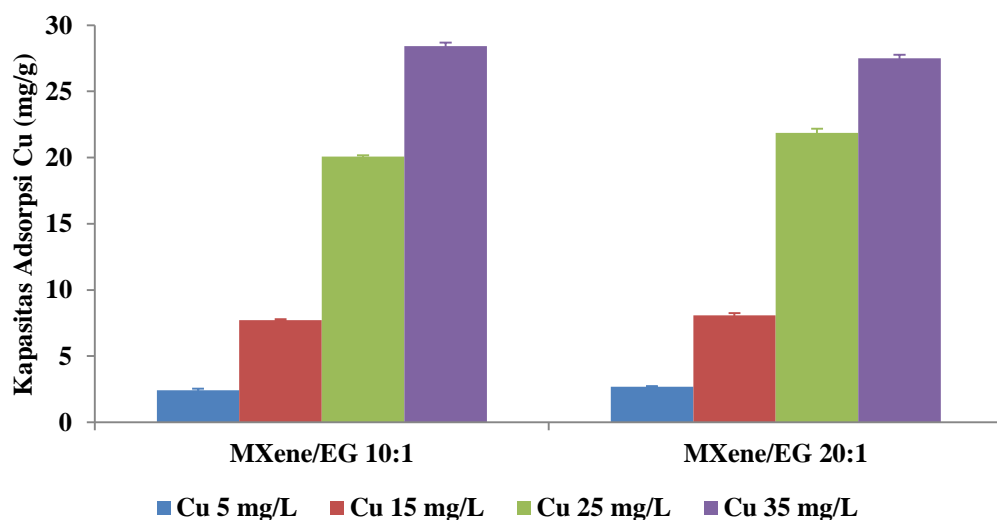
Gambar 4.22 Penurunan Konsentrasi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 35 mg/L pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1

4.3.2.5 Analisis Hubungan Variasi Rasio Nanokomposit terhadap Kemampuan Adsorpsi

Berdasarkan hasil percobaan adsorpsi logam Cu dari larutan artifisial dengan variasi rasio nanokomposit didapatkan nilai efisiensi penyisihan tertinggi dan kapasitas adsorpsi terbaik. Hasil percobaan adsorpsi dengan variasi konsentrasi adsorbat yaitu efisiensi penyisihan tertinggi dan kapasitas adsorpsi terbaik dan konsentrasi akhir adsorbat terkecil dapat dilihat pada **Gambar 4.23** dan **Gambar 4.24**.



Gambar 4.23 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Rasio Nanokomposit dalam Kondisi Terbaik



Gambar 4.24 Kapasitas Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Rasio Nanokomposit dalam Kondisi Terbaik
 Berdasarkan **Gambar 4.23** percobaan adsorpsi menunjukkan efisiensi penyisihan lebih tinggi dengan rasio nanokomposit 20:1 pada konsentrasi adsorbat 5, 15, dan 25 mg/L, sedangkan pada konsentrasi adsorbat 35 mg/L efisiensi penyisihan lebih tinggi dengan rasio nanokomposit 10:1. **Gambar 4.24** menunjukkan kapasitas adsorpsi logam Cu lebih baik dengan menggunakan adsorben Mxene/ Eceng Gondok rasio 20:1 pada konsentrasi adsorbat 5, 15, dan 25 mg/L, sedangkan pada konsentrasi adsorbat 35 mg/L kapasitas adsorpsi lebih tinggi pada adsorben Mxene/ Eceng Gondok rasio 10:1.

Percobaan adsorpsi dengan konsentrasi adsorbat 5 mg/L menunjukkan kemampuan adsorpsi terbaik terjadi pada waktu kontak 30 menit pada adsorben MXene/Eceng Gondok 20:1 dan waktu kontak 40 menit untuk MXene/ Eceng Gondok 10:1. Waktu kontak terbaik yang berbeda pada percobaan dengan masing-masing adsorben disebabkan oleh kandungan MXene pada MXene/Eceng Gondok 20:1 yang lebih banyak dibandingkan MXene/Eceng Gondok 10:1 akan memperbanyak jumlah gugus fungsi terminasi O, OH, dan F dalam menjerap adsorbat pada permukaan MXene/Eceng Gondok, sehingga penjerapan adsorbat berlangsung lebih cepat dan waktu kontak yang dibutuhkan untuk adsorpsi mencapai keadaan setimbang juga lebih cepat.

Peningkatan efisiensi dan kapasitas adsorpsi disebabkan oleh rasio antara MXene dan nanoselulosa eceng gondok mempengaruhi kandungan unsur kimia yang ada pada adsorben. Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan rasio nanokomposit 10:1 memiliki gugus fungsi terminasi O, OH, dan F yang lebih sedikit dibandingkan Adsorben Mxene/ Eceng Gondok dengan rasio nanokomposit 20:1, sehingga kemampuan Mxene/ Eceng Gondok dengan rasio nanokomposit 10:1 dalam menjerap logam Cu tidak sebaik MXene/ Eceng Gondok dengan rasio nanokomposit 20:1 pada percobaan adsorpsi dengan konsentrasi awal Cu 5, 15, dan 25 mg/L. Struktur MXene/ Eceng Gondok 10:1 yang cenderung masih rapat seperti gambar SEM MXene/ Eceng Gondok 10:1 pada **Gambar 4.1 C** juga menghambat logam Cu untuk dijerap oleh gugus fungsi terminasi pada permukaan adsorben. Lapisan yang masih menumpuk pada adsorben disebabkan oleh jumlah nanoselulosa yang terakumulasi menutup permukaan MXene yang berisikan gugus fungsi terminasi. Adsorben Mxene/ Eceng Gondok 20:1 memiliki gugus fungsi terminasi O, OH, dan F yang lebih banyak sehingga kemampuan adsorpsi lebih baik karena gugus fungsi terminasi mampu menjerap banyak ion Cu^{2+} dari larutan artifisial. **Gambar 4.1 D** yang merupakan gambar SEM MXene/ Eceng Gondok 20:1 menunjukkan nanoselulosa pada eceng gondok memperbesar dan mempertahankan jarak antar lapisan MXene sehingga tidak ada lapisan adsorben yang menumpuk dan gugus fungsi terminasi dapat menjerap ion Cu^{2+} tanpa dihalangi oleh akumulasi nanoselulosa eceng gondok.

Percobaan adsorpsi dengan adsorben MXene/Eceng Gondok 10:1 menunjukkan kemampuan adsorpsi terbaik terjadi dengan konsentrasi adsorbat 35 mg/L. Kandungan nanoserat selulosa yang lebih banyak pada MXene/Eceng Gondok 10:1 mengakibatkan gugus fungsi terminasi OH pada adsorben juga meningkat. Selulosa merupakan polimer karbohidrat dengan gugus fungsi OH terdapat pada susunan polimernya. Pada penelitian Guo dkk., (2016) yang meneliti kemampuan adsorpsi MXene dalam menyisihkan logam Cu berdasarkan energi ikatannya, disimpulkan bahwa energi ikatan gugus fungsi OH dengan molekul Cu lebih besar dibandingkan energi ikatan gugus fungsi F dengan molekul Cu, yaitu sebesar 1,765 eV. Energi ikatan yang besar pada gugus fungsi OH terhadap molekul Cu akan meningkatkan kemampuan adsorpsi MXene dalam menjerap logam Cu. Penelitian Wei dkk., (2018) mengenai adsorpsi metilen biru dengan MXene yang dimodifikasi dengan penambahan senyawa alkali menjelaskan gugus fungsi OH dapat menjerap molekul adsorbat yang berukuran lebih kecil sehingga dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi MXene.

Penelitian Dong dkk., (2019) yang meneliti adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben MXene yang dimodifikasi penyisipan sodium alginat memvariasikan rasio sodium alginat yang dicampurkan dengan MXene yaitu 30, 40, 50, 60, 70, dan 80%. Hasil penelitian menunjukkan adsorben mengalami peningkatan kemampuan adsorpsi pada rasio 30–70%, namun pada rasio 80% adsorben mengalami penurunan kemampuan adsorpsi. Hal tersebut terjadi akibat sodium alginat tidak hanya mengisi lapisan MXene, tetapi juga menutupi permukaan MXene, sehingga kemungkinan membuat MXene kehilangan sebagian dari kemampuan adsorpsinya karena gugus fungsi permukaan adsorben yang ditutupi sodium alginat.

4.4 Analisis Statistik

Analisis statistik pada penelitian ini bertujuan untuk melihat ada atau tidaknya perbedaan yang signifikan pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing variasi percobaan. Analisis statistik yang ditentukan yaitu uji ANOVA dan uji- T . Analisis statistik dilakukan menggunakan aplikasi *microsoft excel*.

4.4.1 Uji ANOVA

Uji ANOVA bertujuan untuk melihat terdapatnya perbedaan yang signifikan atau tidak pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi dengan variasi konsentrasi adsorbat. Jenis uji ANOVA yang digunakan yaitu uji ANOVA *single factor*. Hipotesis awal (H_0) pada uji ANOVA yaitu tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi. Hipotesis alternatif (H_1) pada uji ANOVA yaitu terdapat perbedaan yang signifikan pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi. Tingkat kepercayaan yang digunakan dari rentang 90–99% adalah 95% yang berarti kemungkinan terdapat perbedaan yang signifikan pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi adalah 95% dan terdapat 5% (0,05) kemungkinan tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi. Hasil uji ANOVA dapat dilihat pada **Tabel 4.3**

Tabel 4.3 menunjukkan nilai F_{hitung} yang merupakan perbandingan varian antar konsentrasi adsorbat dengan varian dalam percobaan adsorpsi pada tiap variasinya, yaitu bernilai 493,6229–38.697,34. F_{tabel} didapatkan dari tabel F, yaitu bernilai 4,066181. Hasil analisis uji ANOVA menunjukkan $F_{hitung} > F_{tabel}$ untuk masing-masing rasio nanokomposit dengan nilai *p-value* atau nilai signifikansi yang kecil dari nilai tingkat kepercayaan (α) yaitu 0,05. Berdasarkan analisis dapat disimpulkan bahwa hipotesis awal (H_0) ditolak dan hipotesis alternatif (H_1) diterima yang artinya terdapat perbedaan yang signifikan dari efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi yang dihasilkan dari percobaan adsorpsi dengan variasi konsentrasi adsorbat. Hal ini menandakan adanya pengaruh konsentrasi adsorbat terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing proses adsorpsi.

Tabel 4. 3 Hasil Uji ANOVA

		Penyisihan Logam Cu					
		<i>P- value</i>		F_{hitung}	F_{tabel}	Hasil	Kesimpulan
MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1	Efisiensi Penyisihan	2,047 10^{-9}	x	493,6229	4,066181	$F_{hitung} >$ F_{tabel}	H_0 ditolak, H_1 diterima
	Kapasitas Adsorpsi	5,547 10^{-17}	x	38.697,34	4,066181	$F_{hitung} >$ F_{tabel}	H_0 ditolak, H_1 diterima
MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1	Efisiensi Penyisihan	0,146 10^{-9}	x	958,5496	4,066181	$F_{hitung} >$ F_{tabel}	H_0 ditolak, H_1 diterima
	Kapasitas Adsorpsi	5,747 10^{-15}	x	12.127,56	4,066181	$F_{hitung} >$ F_{tabel}	H_0 ditolak, H_1 diterima

4.4.2 Uji-t

Uji- t bertujuan untuk melihat adanya perbedaan yang signifikan atau tidak pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi dengan variasi rasio nanokomposit MXene/ Eceng Gondok. Uji-t juga dilakukan untuk melihat adanya perbedaan yang signifikan atau tidak pada data efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi adsorben MXene dengan adsorben MXene/ Eceng Gondok. Tingkat kepercayaan yang dipakai pada uji-t adalah ($P < 0,05$) atau 95%. Jika nilai signifikansi pada sampel bernilai $> 0,05$ maka tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua ukuran partikel. Selanjutnya jika nilai signifikansi bernilai $< 0,05$ maka terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua perbandingan rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok. Hasil uji-t dapat dilihat pada **Tabel 4.4**

Berdasarkan **Tabel 4.4**, t_{hitung} merupakan nilai yang dihitung dan menunjukkan nilai standar deviasi pada distribusi t, yaitu bernilai 3,36168–10,02486. t_{tabel} merupakan nilai yang didapatkan dari tabel t, yaitu sebesar 2,35336–2,91999. Hasil uji-t pada setiap konsentrasi adsorbat menunjukkan nilai $t_{hitung} > t_{tabel}$ dengan *p-value* atau nilai signifikansi kecil dari nilai tingkat kepercayaan (α) yaitu 0,05. Dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi MXene/Eceng Gondok dengan variasi rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok Hal ini menandakan bahwa terdapatnya pengaruh perbedaan rasio nanokomposit MXene/ Eceng Gondok yang digunakan terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing proses adsorpsi.

Tabel 4.4 Hasil Uji –t terhadap Variasi Rasio Nanokomposit MXene/ Eceng Gondok

		<i>p-value</i>	<i>t_{hitung}</i>	<i>t_{tabel}</i>	Hasil
Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L	Efisiensi penyisihan	0,02184	3,36168	2,35336	t-hitung > t tabel
	Kapasitas Adsorpsi	0,02184	3,36168	2,35336	t-hitung > t tabel
Konsentrasi Adsorbat 15 mg/L	Efisiensi penyisihan	0,01365	4,03973	2,35336	t-hitung > t tabel
	Kapasitas Adsorpsi	0,01365	4,03973	2,35336	t-hitung > t tabel
Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Efisiensi penyisihan	0,00592	9,11036	2,91999	t-hitung > t tabel
	Kapasitas Adsorpsi	0,00592	9,11036	2,91999	t-hitung > t tabel
Konsentrasi Adsorbat 35 mg/L	Efisiensi penyisihan	0,00490	10,02486	2,91999	t-hitung > t tabel
	Kapasitas Adsorpsi	0,00490	10,02486	2,91999	t-hitung > t tabel

Tabel 4.5 Hasil Uji –t terhadap Adsorben MXene tanpa Modifikasi dengan Adsorben MXene/ Eceng Gondok

		<i>p-value</i>	<i>t_{hitung}</i>	<i>t_{tabel}</i>	Hasil
Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L	Efisiensi penyisihan	0,00074	26,02924	2,91999	t-hitung > t tabel
	Kapasitas Adsorpsi	0,00074	26,02924	2,91999	t-hitung > t tabel

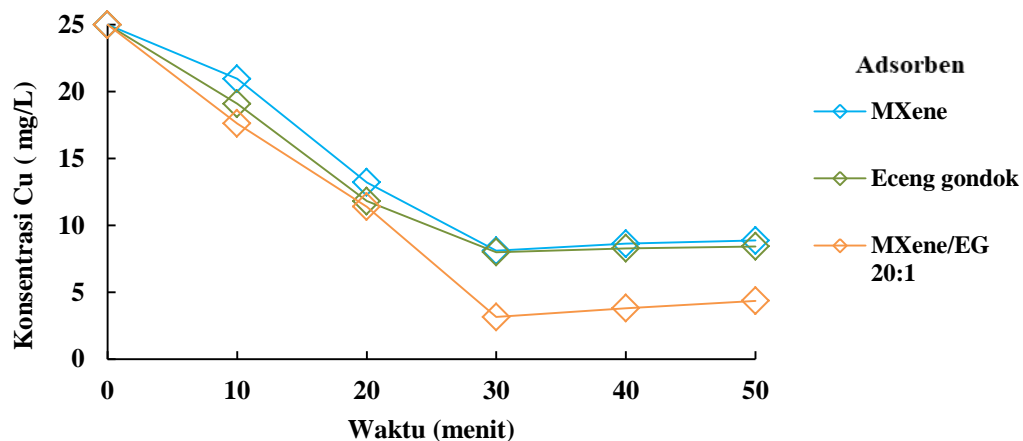
Berdasarkan **Tabel 4.5** pada setiap konsentrasi adsorbat nilai t-hitung > t-tabel dengan tingkat kepercayaan 95%. Dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan terhadap efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi MXene tanpa modifikasi dengan MXene/Eceng Gondok. Hal ini menandakan bahwa terdapatnya pengaruh penyisipan nanoserat selulosa eceng gondok pada MXene/ Eceng Gondok terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi pada masing-masing proses adsorpsi.

4.5 Perbandingan Kinerja Adsorpsi MXene/ Eceng Gondok dengan Kontrol

Percobaan adsorpsi pada penelitian kali ini menggunakan kontrol yang bertujuan untuk membandingkan kinerja adsorpsi MXene/Eceng Gondok terhadap adsorben kontrol. Adsorben kontrol yang dibandingkan yaitu adsorben MXene tanpa modifikasi dan adsorben nanoserat selulosa eceng gondok sebelum digabungkan dengan MXene. Parameter kondisi adsorpsi yang digunakan dalam percobaan menggunakan adsorben kontrol mengacu terhadap kondisi terbaik dari percobaan adsorpsi menggunakan MXene/ Eceng Gondok. Kondisi terbaik yang digunakan yaitu pH adsorbat 5, dosis adsorbat 1 g/L, dan konsentrasi adsorbat dari larutan

artifisial 25 mg/L. penurunan konsentrasi adsorbat pada percobaan adsorpsi dengan adsorben MXene tanpa modifikasi dan adsorben nanoserat selulosa eceng gondok dapat dilihat pada **Gambar 4.25**.

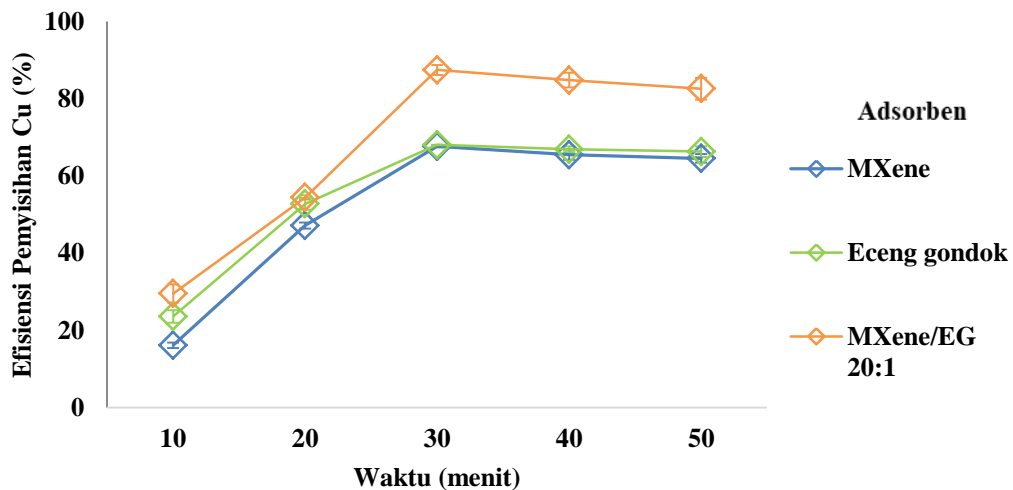
Gambar 4.25 menunjukkan hubungan penurunan konsentrasi adsorbat terhadap waktu akibat adsorpsi menggunakan adsorben MXene dan adsorben nanoserat selulosa eceng gondok. Adsorben MXene mengalami penurunan konsentrasi tertinggi pada waktu kontak 30 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 8,095 mg/L. Adsorben nanoserat selulosa eceng gondok dapat menyisihkan adsorbat dengan penurunan konsentrasi tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 7,991 mg/L



Gambar 4.25 Penurunan Konsentrasi Adsorbat pada Percobaan Adsorpsi dengan Adsorben Mxene/Eceng Gondok, MXene tanpa Modifikasi, dan Adsorben Nanoserat Selulosa Eceng Gondok

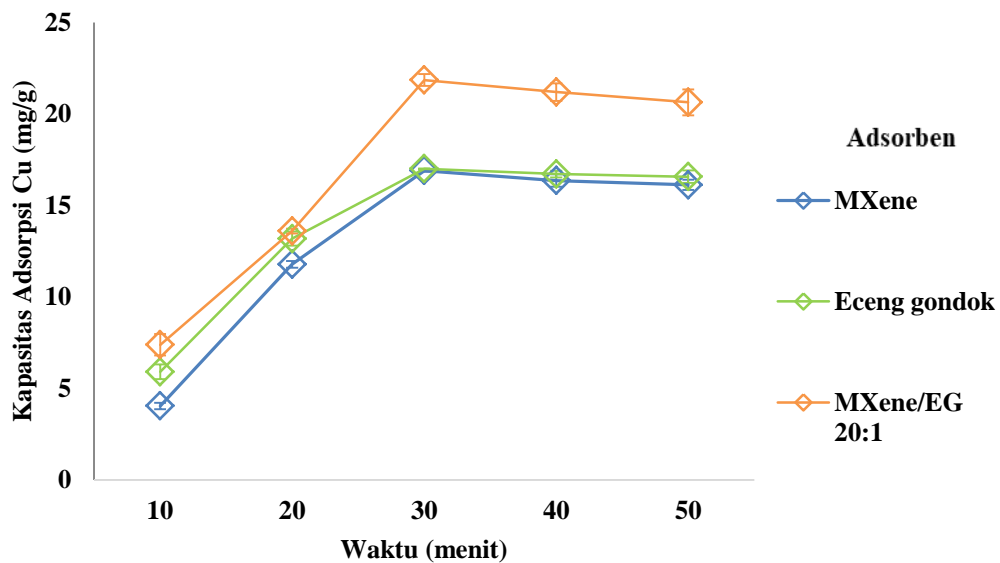
Berdasarkan data penurunan konsentrasi pada adsorben kontrol disimpulkan nanoserat selulosa eceng gondok dapat menyisihkan logam Cu dari larutan artifisial lebih baik dibandingkan adsorben MXene tanpa modifikasi. Hal ini menunjukkan adsorben nanoserat selulosa eceng gondok dapat menjadi material pendukung dalam meningkatkan kemampuan adsorpsi MXene dengan cara mempertahankan jarak antar lapisan MXene agar MXene tidak menumpuk di dalam air. Perbandingan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi MXene/Eceng Gondok dengan adsorben kontrol dapat dilihat pada **Gambar 4.26** dan **Gambar 4.27**

Dapat dilihat pada **Gambar 4.26** efisiensi penyisihan logam Cu dari larutan artifisial menggunakan adsorben MXene dan adsorben kontrol. Adsorben MXene tanpa modifikasi memiliki efisiensi penyisihan tertinggi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai efisiensi 67,62%. Nanoserat selulosa eceng gondok memiliki efisiensi penyisihan tertinggi 68,04% pada waktu kontak 30 menit. Efisiensi penyisihan logam Cu dari larutan artifisial tertinggi dengan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dalam kondisi terbaik terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai efisiensi 87,43%. Dapat disimpulkan bahwa MXene/ Eceng Gondok dalam kondisi terbaik dapat menyisihkan logam Cu dari larutan artifisial lebih baik dibandingkan MXene tanpa modifikasi dan nanoserat selulosa eceng gondok.



Gambar 4. 26 Efisiensi Penyisihan Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Mxene, Adsorben Nanoserat Selulosa Eceng Gondok, dan Adsorben MXene/ Eceng Gondok

Gambar 4.27 menunjukkan perbandingan perbandingan kapasitas adsorpsi logam Cu dari larutan artifisial menggunakan adsorben MXene/ Eceng Gondok dan adsorben kontrol. Pada grafik ditunjukkan kapasitas adsorpsi MXene tertinggi terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan nilai kapasitas 16,905 mg/g. Kapasitas adsorpsi nanoserat selulosa eceng gondok sebesar 17,009 mg/g di waktu kontak 30 menit. MXene/ Eceng Gondok dalam kondisi terbaik memiliki kapasitas adsorpsi 21,859 mg/g.



Gambar 4. 27 Kapasitas Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial dengan Adsorben Mxene, Adsorben Nanoserat Selulosa Eceng Gondok, dan Adsorben MXene/ Eceng Gondok

Berdasarkan perbandingan kapasitas adsorpsi masing-masing adsorben, adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan kondisi terbaik memiliki kapasitas adsorpsi lebih baik dibandingkan adsorben MXene tanpa modifikasi dan adsorben nanoserat selulosa eceng gondok. Kemampuan adsorpsi MXene/Eceng Gondok yang lebih baik disebabkan oleh penambahan gugus fungsi OH dari nanoselulosa yang dapat menjerap ion Cu^{2+} , sehingga gugus fungsi yang menjerap logam Cu lebih banyak dibandingkan adsorben kontrol. Hasil yang sama juga didapatkan oleh Gan dkk., (2019) yang menunjukkan MXene yang dimodifikasi dengan penambahan asam amino mempunyai kapasitas adsorpsi lebih baik dibandingkan MXene tanpa modifikasi. Hal ini disebabkan oleh kontribusi gugus fungsi dari asam amino yaitu gugus fungsi COOH dan NH_2 yang dapat menjerap ion Cu^{2+} sehingga gugus fungsi permukaan adsorben MXene/Asam Amino yang dapat menjerap ion Cu^{2+} lebih banyak dibandingkan adsorben MXene tanpa modifikasi. Rekapitulasi dari efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi dari adsorben MXene/ Eceng Gondok, MXene tanpa modifikasi, dan nanoserat selulosa eceng gondok dapat dilihat pada **Tabel 4.6.**

Tabel 4.6 Rekapitulasi Efisiensi Penyisihan dan Kapasitas Adsorpsi dari Adsorben MXene/ Eceng Gondok dan Adsorben Kontrol

Adsorben	Efisiensi Penyisihan (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
MXene/ Eceng Gondok 20:1	87,43	21,86
Nanoserat Selulosa Eceng Gondok	68,04	17,01
MXene tanpa Modifikasi	67,62	16,91

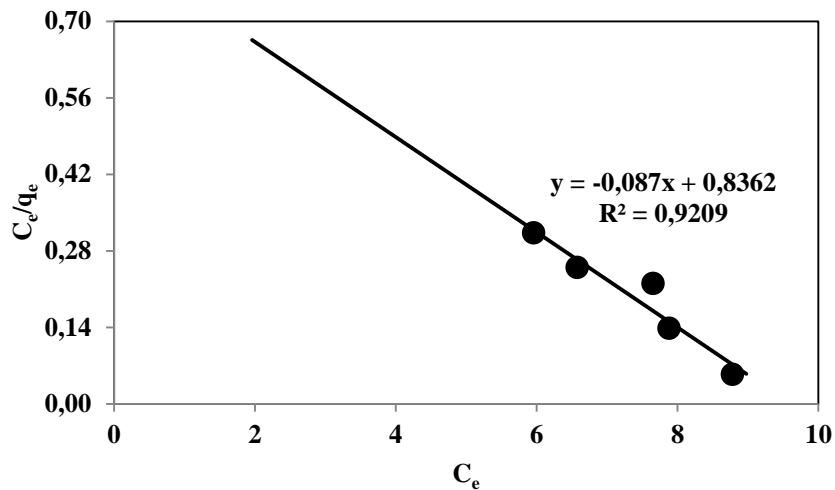
4.6 Penentuan Persamaan Isoterm

Isoterm adsorpsi bertujuan untuk menentukan proses adsorpsi yang terjadi. Isoterm adsorpsi menunjukkan hubungan antara konsentrasi adsorben yang tersisa dalam larutan setelah kesetimbangan dengan jumlah adsorbat yang teradsorpsi. Data yang digunakan pada penentuan persamaan isoterm adsorpsi adalah konsentrasi akhir adsorbat yang telah diadsorpsi menggunakan MXene/ Eceng Gondok. Persamaan isoterm paling sesuai ditunjukkan dengan koefisien determinasi (R^2) pada grafik persamaan linear dan nilai konstanta masing-masing isoterm. Hasil penentuan persamaan isoterm Langmuir dan Freundlich ditunjukkan pada **Tabel 4.7**. Kurva persamaan salah satu tipe isoterm Langmuir dan isoterm Freundlich dapat dilihat pada **Gambar 4.28** dan **Gambar 4.29**

Tabel 4.7 Rekapitulasi Nilai Konstanta Isoterm Langmuir dan Freundlich dari proses Adsorpsi Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok

Model Isoterm	Plot	Persamaan Garis	R^2	q_m	K_L
Langmuir					
Tipe 1	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e	$y = -0,087x + 0,8362$	0,9209	-11,494	-0,104
Tipe 2	$\frac{1}{q_e}$ vs $\frac{1}{C_e}$	$y = 0,8175x - 0,0844$	0,9578	-11,848	-0,103
Tipe 3	q_e vs $\frac{q_e}{C_e}$	$y = 9,316x - 9,9181$	0,9995	-9,918	-0,107
Tipe 4	$\frac{q_e}{C_e}$ vs q_e	$y = 0,1073x + 1,0681$	0,9995	-9,954	-0,107
Freundlich					
	Log q_e vs Log C_e	$y = 5,022x - 2,6944$	0,8509	5,022	0,002021

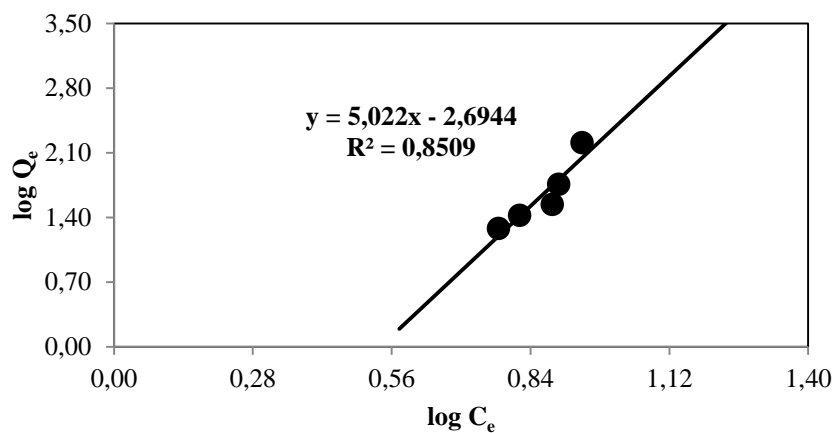
Gambar 4.28 menunjukkan persamaan isoterm langmuir tipe 1 yaitu $y = -0,087x + 0,8362$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) 0,9209. Berdasarkan analisis isoterm langmuir didapatkan nilai kapasitas adsorpsi parameter Langmuir (q_m) sebesar -11,494 dan konstanta kesetimbangan (K_L) sebesar -0,104.



Gambar 4. 28 Kurva Isoterm Langmuir Tipe 1 pada Percobaan Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok

Nilai negatif pada kapasitas adsorpsi parameter Langmuir dan konstanta kesetimbangan berasal dari nilai kapasitas adsorpsi pada kondisi setimbang yang semakin meningkat dan nilai konsentrasi akhir adsorbat pada kondisi setimbang yang semakin menurun. Data variasi dosis yang dicobakan yaitu 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; dan 1 g/L juga mempengaruhi besar kapasitas adsorpsi sehingga kurva yang dihasilkan membentuk persamaan linear dengan nilai negatif.

Gambar 4.29 menunjukkan persamaan isoterm Freundlich yaitu $y = 5,022x - 2,6944$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) 0,8509. Berdasarkan analisis isoterm langmuir didapatkan nilai konstanta kesetimbangan parameter Freundlich (K_f) sebesar 0,002021 dan nilai intensitas adsorpsi ($1/n$) sebesar 5,022.



Gambar 4. 29 Kurva Isoterm Freundlich pada Percobaan Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok

Berdasarkan penjelasan mengenai isoterm adsorpsi dapat disimpulkan bahwa isoterm yang sesuai pada percobaan adsorpsi menggunakan adsorben MXene/Eceng Gondok dalam menyisihkan logam Cu dari larutan artifisial jika dilihat dari nilai koefisien determinasi (R^2) adalah isoterm Langmuir. Isoterm Langmuir memiliki koefisien determinasi (R^2) yang lebih besar yaitu 0,9209, namun nilai konstanta kesetimbangan Langmuir (K_L) dan nilai kapasitas adsorpsi parameter Langmuir (q_m) bernilai negatif sehingga isoterm Langmuir tidak memenuhi syarat sebagai isoterm yang sesuai untuk menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi. Menurut Shikuku dkk., (2015) nilai koefisien determinasi (R^2) Isoterm Langmuir yang tinggi, namun nilai konstanta kesetimbangan Langmuir (K_L) dan nilai kapasitas adsorpsi parameter Langmuir (q_m) yang negatif tidak memiliki arti fisik dan tidak dapat menggambarkan proses adsorpsi yang dilakukan. Isoterm Freundlich lebih sesuai digunakan untuk menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi karena nilai konstanta kesetimbangan Freundlich (K_F) dan nilai intensitas adsorpsi ($1/n$) yang positif. Isoterm Freundlich menunjukkan bahwa proses adsorpsi akan terjadi pada beberapa lapisan di permukaan adsorben (*multilayer*). Isoterm Freundlich menunjukkan proses adsorpsi berlangsung secara fisika yaitu terjadi ikatan molekul antara adsorbat dengan gugus fungsi adsorben yang disebabkan oleh gaya tarik menarik yaitu gaya Van der Waals membentuk ikatan yang lemah dan reaksi yang terjadi bersifat reversibel.

Nilai K_f yang diperoleh merupakan kapasitas adsorpsi yaitu sebesar 0,002021 L/g dan nilai $1/n$ didapatkan 5,022. Menurut Atkins dkk., (2018) nilai $1/n$ yang lebih kecil dari 1 menunjukkan kondisi adsorben yang menguntungkan (*favourable*) untuk dimanfaatkan sebagai adsorben dikarenakan interaksi adsorben dan adsorbat yang kuat. Semakin besar nilai $1/n$ maka interaksi antara adsorben dan adsorbat semakin lemah. Berdasarkan nilai $1/n$ yang didapatkan dari penelitian ini, dapat disimpulkan adsorpsi logam Cu dari larutan artifisial menggunakan adsorben MXene/Eceng Gondok bersifat *unfavourable*. Hal ini dikarenakan interaksi yang lemah antara adsorbat dengan adsorben sehingga ikatan mudah lepas dari permukaan adsorben yang menyebabkan adsorpsi tidak optimal.

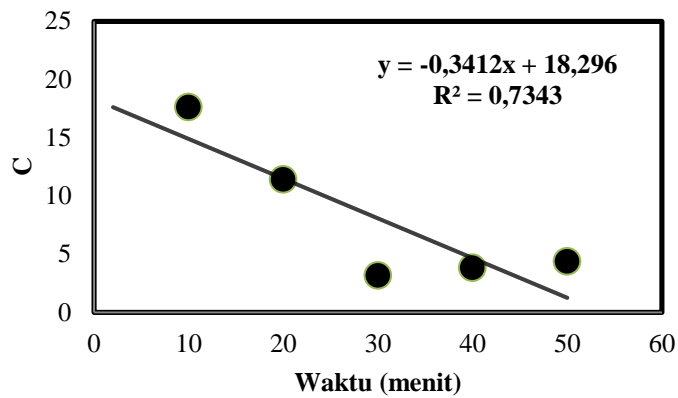
4.7 Penentuan Kinetika Adsorpsi

Menurut Hajar dkk., (2016) kinetika adsorpsi menggambarkan tingkat laju penyerapan yang terjadi pada adsorben terhadap adsorbat. Laju adsorpsi dapat diketahui dari konstanta laju adsorpsi (k) dan orde reaksi yang dihasilkan dari suatu model kinetika adsorpsi. Analisa kinetika adsorpsi didasarkan pada kinetika orde nol, orde satu, orde dua, *pseudo first-order*, dan *pseudo second-order*.

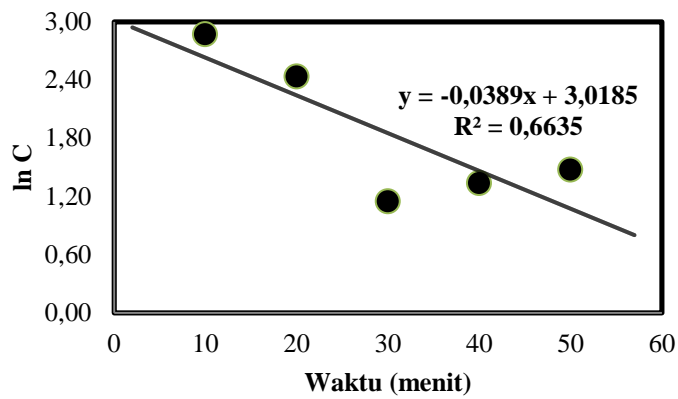
Kinetika adsorpsi logam Cu dengan adsorben MXene/ Eceng Gondok ditentukan dengan menggunakan variasi rasio nanokomposit dan variasi konsentrasi adsorbat. Parameter ukuran partikel, pH adsorbat, dosis adsorben, dan waktu kontak diatur tetap pada percobaan ini. Ukuran partikel adsorben yang digunakan yaitu 500 mesh, pH adsorbat diatur menjadi pH 5, dosis adsorben diatur menjadi 1 g/L, dan waktu kontak diatur 10, 20, 30, 40, dan 50 menit. Data hasil perhitungan penentuan kinetika adsorpsi logam Cu *pseudo first-order* dan *pseudo second-order* untuk variasi terbaik yaitu rasio nanokomposit 20:1 dengan konsentrasi adsorbat 25 mg/L. Hasil perhitungan dalam penentuan kinetika adsorpsi dapat dilihat pada **Tabel 4.8**. Grafik kinetika adsorpsi untuk orde nol, orde satu, orde dua, *pseudo first-order*, dan *pseudo second-order* dapat dilihat pada **Gambar 4.30, Gambar 4.31, Gambar 4.32, Gambar 4.33, dan Gambar 4.34**.

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan dalam Penentuan Kinetika Adsorpsi dengan Adsorben MXene/Eceng Gondok

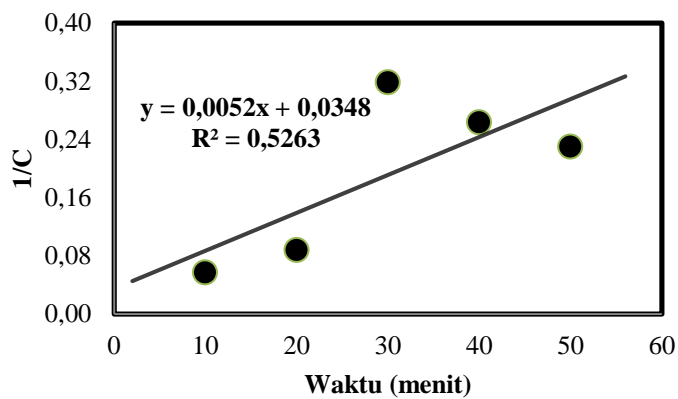
Variasi	t	Konsentrasi Awal (C_0)	Konsentrasi Akhir (C)	Ln C	1/C	q_t	q_e	$\log(q_t - q_e)$	t/q_t
Rasio 20:1, Konsentrasi 25 mg/L	10	25	17,615	2,869	0,057	7,385	21,859	1,161	1,354
	20	25	11,396	2,433	0,088	13,604		0,917	1,470
	30	25	3,141	1,145	0,318	21,859		1,000	1,372
	40	25	3,798	1,335	0,263	21,202		-0,182	1,887
	50	25	4,356	1,472	0,230	20,644		0,084	2,422



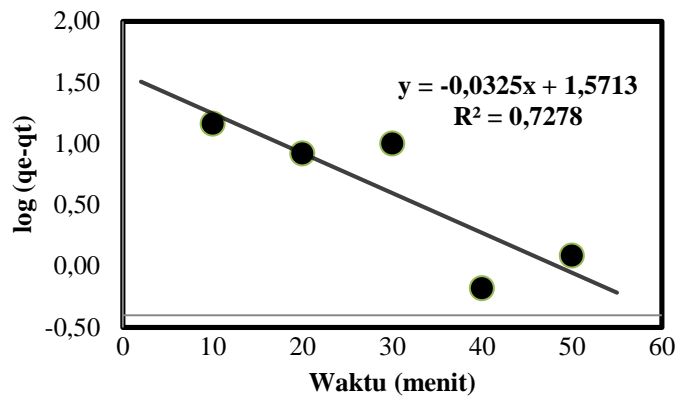
Gambar 4.30 Kinetika Orde Nol Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik



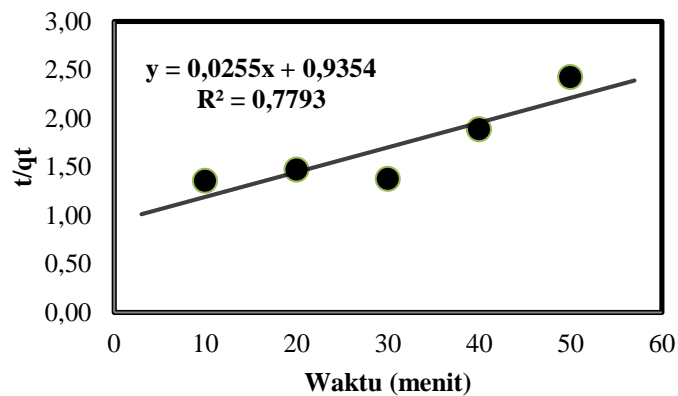
Gambar 4.31 Kinetika Orde Satu Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik



Gambar 4.32 Kinetika Orde Dua Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik



Gambar 4.33 Kinetika *Pseudo- First Order* Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik



Gambar 4.34 Kinetika *Pseudo- Second Order* Adsorpsi Logam Cu dari Larutan Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dengan Variasi Terbaik

Berdasarkan grafik kinetika adsorpsi pada **Gambar 4.30**, **Gambar 4.31**, **Gambar 4.32**, **Gambar 4.33**, dan **Gambar 4.34** dapat dilihat bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) dan konstanta laju adsorpsi (k) pada kinetika adsorpsi orde nol, orde satu, orde dua, *pseudo first-order*, dan *pseudo second-order* dapat dilihat pada **Tabel 4.9**

Tabel 4.9 Nilai Koefisien Determinasi (R^2) dan Konstanta Laju Adsorpsi (k) Kinetika Adsorpsi Logam Cu Menggunakan MXene/ Eceng Gondok Variasi Terbaik

Variasi Terbaik	Model Kinetika		Parameter	
	Orde	R^2	k	
Rasio 20:1, Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Orde Nol	0,7343	-0,3412	
	Orde Satu	0,6635	-0,0389	
	Orde Dua	0,5263	0,0052	
	<i>Pseudo Order</i>	R^2	q_e	k
	<i>Pseudo First- Order</i>	0,7278	37,2649	0,0748
	<i>Pseudo Second- Order</i>	0,7793	39,2157	0,0007

Berdasarkan **Tabel 4.10** dapat disimpulkan kinetika adsorpsi yang digunakan dalam adsorpsi logam Cu dengan adsorben MXene/ Eceng Gondok pada variasi terbaik yaitu kinetika adsorpsi *pseudo second-order* dengan nilai koefisien determinasi (R^2) 0,7793, nilai kapasitas adsorpsi pada keadaan setimbang 39,2157 mg/g dan nilai konstanta laju adsorpsi (k) 0,0007. Kinetika adsorpsi *pseudo-second order* menunjukkan orde dua parsial terhadap konsentrasi gugus fungsi adsorben dan orde nol parsial terhadap konsentrasi adsorbat dalam larutan pada proses adsorpsi MXene/ Eceng Gondok. Kinetika adsorpsi juga diteliti oleh Kong dkk., (2021) menunjukkan kinetika adsorpsi logam Cr menggunakan MXene/ Asam Amino adalah kinetika *pseudo second-order* yang menunjukkan orde dua parsial terhadap konsentrasi gugus fungsi adsorben dan orde nol parsial terhadap konsentrasi adsorbat dalam larutan. Penelitian Dong dkk., (2019) juga meneliti kinetika adsorpsi logam Cu menggunakan adsorben MXene/ Alginat menunjukkan kinetika adsorpsi yang terjadi adalah kinetika *pseudo second-order*. Berdasarkan penelitian terkait disimpulkan proses adsorpsi MXene yang dimodifikasi dengan penyisipan nanomaterial di antara lapisan MXene untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi mengikuti kinetika *pseudo second-order*.

4.8 Rekapitulasi Penyisihan Cu Terbaik

Berdasarkan hasil percobaan adsorpsi dengan variasi rasio nanokomposit dan konsentrasi adsorbat, diperoleh kondisi terbaik untuk tiap parameter yang divariasikan. Rekapitulasi kondisi terbaik penyisihan logam Cu dari larutan artifisial menggunakan adsorben MXene/ Eceng Gondok dapat dilihat pada **Tabel 4.10**

Tabel 4. 10 Rekapitulasi Penyisihan Cu Terbaik pada Percobaan Adsorpsi

Variasi Percobaan	Efisiensi Penyisihan (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Isoterm Adsorpsi	Kinetika Adsorpsi
Rasio Nanokomposit 20:1, Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	87,43%	21,86	Freundlich	<i>Pseudo Second-Order</i>

Tabel 4.10 menunjukkan percobaan adsorpsi menggunakan MXene/ Eceng Gondok dalam penyisihan logam Cu dari larutan artifisial pada kondisi terbaik yaitu variasi rasio nanokomposit Mxene/Eceng Gondok 20:1 dan konsentrasi adsorbat Cu 25 mg/L dengan efisiensi penyisihan 87,43% dan kapasitas adsorpsi sebesar 21,86 mg/g. Peningkatan konsentrasi adsorbat dari 5 mg/L menjadi 35 mg/L akan meningkatkan gaya penggerak untuk perpindahan massa adsorbat pada saat adsorpsi sehingga kapasitas adsorpsi meningkat dari 2,43 mg/g menjadi 28,43 mg/g. Konsentrasi adsorbat yang meningkat juga akan memperlambat laju adsorpsi dan waktu kontak yang dibutuhkan untuk mencapai kesetimbangan adsorpsi lebih lama, yaitu dari 30 menit menjadi 40 menit pada konsentrasi 35 mg/L. Konsentrasi adsorbat yang lebih rendah menyebabkan gugus fungsi terminasi Mxene/Eceng Gondok yang belum menjerap molekul Cu lebih banyak sehingga adsorpsi berlangsung lebih cepat dalam mencapai kondisi setimbang, yaitu berlangsung selama 30 menit.

Mxene/Eceng Gondok 20:1 memiliki kemampuan adsorpsi lebih baik dibandingkan Mxene/Eceng Gondok 10:1. Hal ini terjadi berdasarkan hasil SEM (*Scanning Electron Microscope*) Mxene/Eceng Gondok 20:1 pada **Gambar 4.1D** memiliki struktur adsorben yang lebih renggang pada tiap lapisannya sehingga jumlah gugus fungsi terminasi O, OH, dan F lebih banyak berfungsi dalam menjerap molekul Cu pada adsorpsi. Hasil analisis EDX (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) pada **Tabel 4.1** menunjukkan kandungan Mxene pada Mxene/Eceng Gondok 20:1 lebih banyak dibandingkan Mxene/Eceng Gondok 10:1, sehingga jumlah gugus fungsi terminasi O, OH, dan F pada permukaan adsorben lebih banyak dan molekul Cu yang dijerap oleh gugus fungsi terminasi lebih banyak. Hasil PSA (*Particle Size Analysis*) pada **Tabel 4.2** menunjukkan ukuran partikel rata-rata Mxene/Eceng Gondok 20:1 lebih kecil dibandingkan Mxene/Eceng Gondok 10:1, ukuran partikel adsorben yang lebih kecil akan

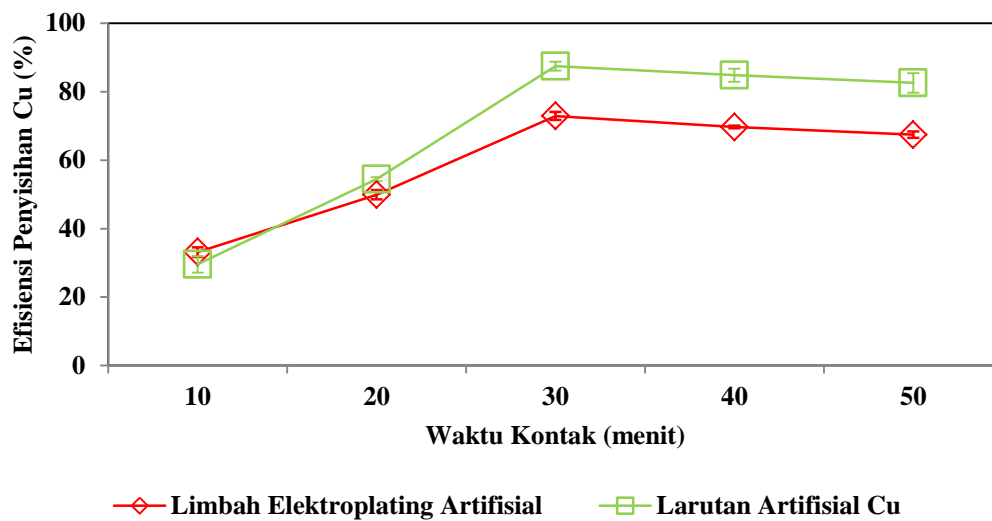
memperbesar luas permukaan dari adsorben sehingga penjerapan molekul Cu oleh adsorbat lebih banyak terjadi.

Isoterm yang menggambarkan proses adsorpsi yang terjadi adalah isoterm Freundlich dengan nilai intensitas parameter Freundlich ($1/n$) yaitu 5,022 dan konstanta kesetimbangan (K_f) sebesar 0,002021. Isoterm Freundlich menggambarkan adsorpsi berlangsung pada beberapa lapisan adsorben (*multilayer*) dan adsorpsi berlangsung karena adanya ikatan molekul antara adsorbat dengan gugus fungsi adsorben akibat gaya Van der Waals. Kinetika adsorpsi yang sesuai dengan percobaan adsorpsi adalah *pseudo second-order* dengan nilai konstanta kinetika (k) sebesar 0,0007 yang berarti orde dua parsial terhadap gugus fungsi adsorben dan orde nol parsial terhadap konsentrasi adsorbat pada campuran adsorpsi. Gugus fungsi adsorben yang banyak tersedia dalam menyerap adsorbat pada Mxene/Eceng Gondok 20:1 dibandingkan dengan Mxene/Eceng Gondok 10:1 akan meningkatkan frekuensi penjerapan adsorbat pada proses adsorpsi. Frekuensi penjerapan yang lebih banyak terjadi akan mempercepat laju adsorpsi dalam mencapai keadaan setimbang sehingga waktu kontak adsorpsi yang dibutuhkan dalam mencapai kesetimbangan lebih cepat, yaitu berlangsung selama 30 menit. Dengan memodifikasi adsorben Mxene menjadi Mxene/Eceng Gondok, struktur adsorben menjadi lebih renggang dan gugus fungsi terminasi adsorben yang tersedia (O, OH, dan F) lebih banyak. Modifikasi adsorben meningkatkan efisiensi penyisihan adsorpsi dari 67,62% menjadi 87,43% dan kapasitas adsorpsi meningkat dari 16,91 mg/g menjadi 21,86 mg/g. Kondisi terbaik pada percobaan adsorpsi menggunakan larutan artifisial Cu diterapkan pada percobaan aplikasi menggunakan limbah elektroplating artifisial.

4.9 Percobaan Aplikasi pada Limbah Elektroplating Artifisial

Limbah elektroplating artifisial merupakan limbah elektroplating dengan kandungan logam Cu, Cr, Cd, dan Pb yang dibentuk dengan konsentrasi masing-masing logam mendekati konsentrasi logam pada air limbah elektroplating sebenarnya. Konsentrasi Cu pada air limbah elektroplating artifisial 25 mg/L, dan konsentrasi ion lain pada air limbah yaitu Pb, Cd, dan Cr masing-masing 10 mg/L, 15 mg/L, dan 20 mg/L. Percobaan aplikasi menggunakan air limbah

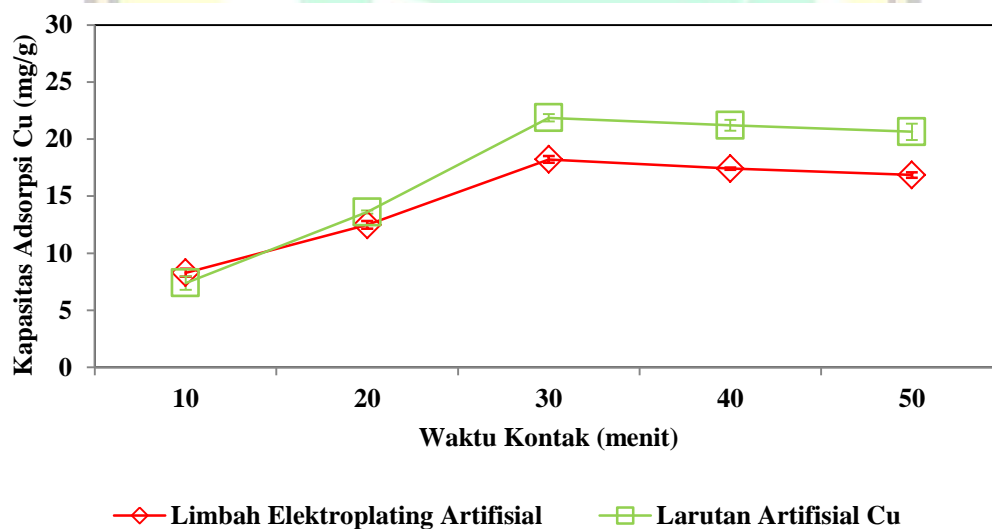
elektroplating artifisial dilakukan dengan menerapkan kondisi terbaik masing-masing parameter variasi yang telah diperoleh pada percobaan adsorpsi menggunakan larutan artifisial yang mengandung logam Cu saja. Percobaan aplikasi dilakukan pada pH 5, dosis adsorben 1 g/L, dan rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok 20:1. Hasil percobaan aplikasi menggunakan limbah elektroplating artifisial yaitu grafik efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi dapat dilihat pada **Gambar 4.35** dan **Gambar 4.36**



Gambar 4. 35 Efisiensi Penyisihan Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dari Limbah Elektroplating Artifisial dan Larutan Artifisial Cu pada Kondisi Terbaik

Gambar 4.35 menunjukkan efisiensi penyisihan logam Cu dari air limbah elektroplating artifisial dan dari larutan artifisial Cu menggunakan adsorben MXene/ Eceng Gondok pada kondisi terbaik. Percobaan aplikasi menunjukkan efisiensi penyisihan logam Cu tertinggi dengan limbah elektroplating artifisial dengan konsentrasi Cu 25 mg/L, konsentrasi Pb 10 mg/L, konsentrasi Cd 15 mg/L, dan konsentrasi Cr 20 mg/L terjadi pada waktu kontak 30 menit dengan efisiensi penyisihan 72,89%. Percobaan adsorpsi menggunakan larutan artifisial Cu menunjukkan efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 87,43% yang terjadi pada waktu kontak 30 menit. Efisiensi penyisihan logam Cu pada limbah elektroplating artifisial lebih rendah dibandingkan efisiensi penyisihan logam Cu pada larutan artifisial Cu. Perbedaan nilai efisiensi terjadi akibat adanya kehadiran ion Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} yang mempengaruhi kemampuan adsorpsi. Pengaruh kehadiran ion lain

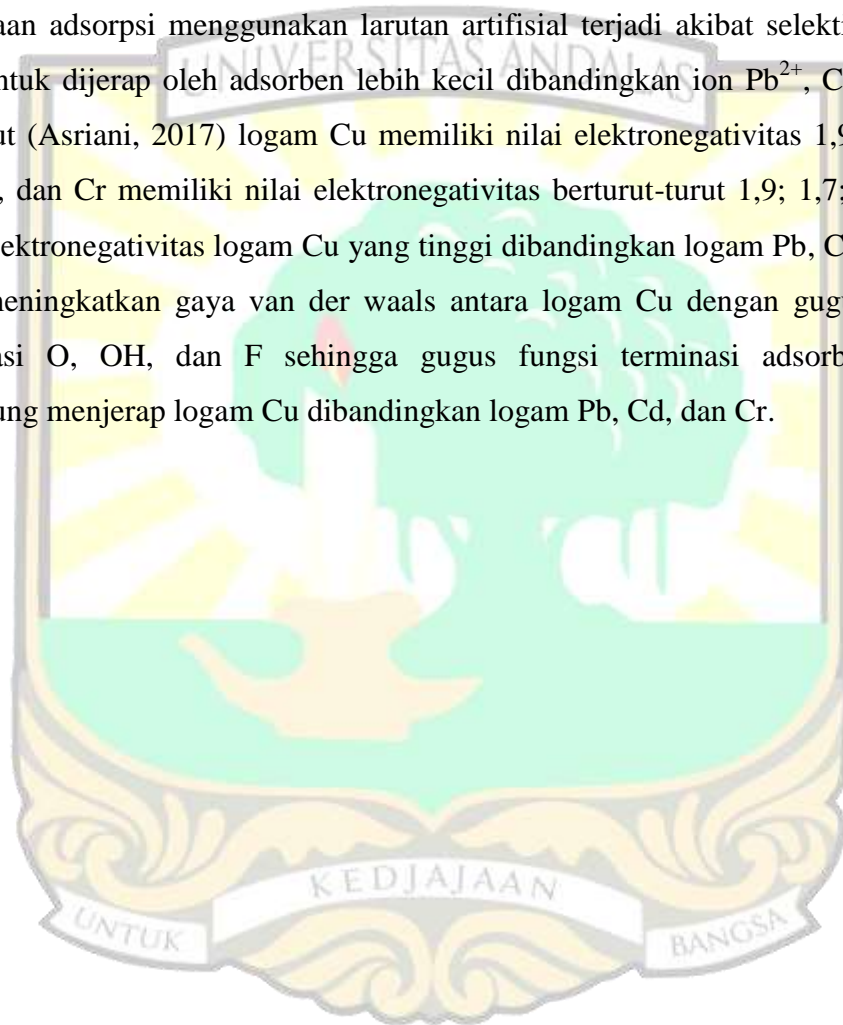
pada proses adsorpsi juga terdapat pada penelitian Kong dkk., (2021) yang meneliti adsorpsi logam Cr dari air limbah artifisial menggunakan adsorben MXene dengan modifikasi penambahan asam amino menunjukkan kehadiran ion Cu^{2+} , Fe^{3+} , Ni^{2+} , Cl^- , dan SO_4^{2-} tidak mempengaruhi kemampuan adsorpsi dari MXene/ Asam Amino dalam mengadsorpsi logam Cr. Hal ini disebabkan oleh pH pada adsorbat logam Cr yaitu pH 2 mengakibatkan proses adsorpsi logam Cr dengan kondisi asam memiliki kemampuan adsorpsi lebih baik. Hasil ini relevan pada penelitian ini yang mana proses adsorpsi berlangsung dengan kondisi asam yaitu pH 5. pH 5 pada percobaan ini merujuk dari penelitian Shahzad dkk., (2017) yang menunjukkan kemampuan terbaik penyisihan logam Cu dari larutan artifisial menggunakan adsorben MXene yang didelaminasi berlangsung pada pH 5, kemampuan adsorben dalam mengadsorpsi logam Cu lebih baik dan pengaruh ion Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} tidak mengurangi kemampuan adsorben MXene/ Eceng Gondok dalam mengadsorpsi logam Cu secara drastis.



Gambar 4. 36 Kapasitas Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/ Eceng Gondok dari Limbah Elektroplating Artifisial dan Larutan Artifisial Cu pada Kondisi Terbaik

Berdasarkan **Gambar 4.36** kapasitas adsorpsi MXene/ Eceng Gondok dengan adsorbat limbah elektroplating artifisial berbeda dengan adsorbat larutan artifisial Cu. Percobaan aplikasi menunjukkan kapasitas adsorpsi logam Cu dengan limbah elektroplating artifisial dengan konsentrasi Cu 25 mg/L, konsentrasi Pb 10 mg/L, konsentrasi Cd 15 mg/L, dan konsentrasi Cr 20 mg/L tertinggi sebesar 18,22 mg/g

yang terjadi pada waktu kontak 30 menit. Percobaan adsorpsi menggunakan adsorbat larutan artifisial Cu menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar 21,86 mg/g terjadi pada waktu kontak 30 menit. Kapasitas adsorpsi limbah elektroplating artifisial yang lebih rendah dibandingkan kapasitas adsorpsi larutan artifisial Cu disebabkan oleh penjerapan ion Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} pada permukaan adsorben sehingga ion Cu^{2+} yang dijerap lebih sedikit dibandingkan penjerapan terhadap larutan artifisial Cu. Ion Cu^{2+} yang dijerap lebih sedikit dibandingkan percobaan adsorpsi menggunakan larutan artifisial terjadi akibat selektivitas ion Cu^{2+} untuk dijerap oleh adsorben lebih kecil dibandingkan ion Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} . Menurut (Asriani, 2017) logam Cu memiliki nilai elektronegativitas 1,9. Logam Pb, Cd, dan Cr memiliki nilai elektronegativitas berturut-turut 1,9; 1,7; dan 1,6. Nilai elektronegativitas logam Cu yang tinggi dibandingkan logam Pb, Cd, dan Cr akan meningkatkan gaya van der Waals antara logam Cu dengan gugus fungsi terminasi O, OH, dan F sehingga gugus fungsi terminasi adsorben lebih cenderung menjerap logam Cu dibandingkan logam Pb, Cd, dan Cr.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil percobaan adsorpsi menggunakan adsorben Nanokomposit MXene/Eceng gondok dalam menyisihkan logam Cu dari larutan artifisial dan air limbah elektroplating artifisial dengan variasi rasio nanokomposit dan konsentrasi adsorbat dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Nanokomposit adsorben Mxene/Eceng Gondok berhasil dibuat, dibuktikan oleh hasil analisis SEM dan EDX yang menunjukkan perbedaan bentuk morfologi dan struktur antara MXene tanpa modifikasi dengan MXene/Eceng Gondok. MXene/ Eceng Gondok memiliki kandungan unsur C lebih banyak dibandingkan MXene tanpa modifikasi akibat penambahan selulosa pada MXene/Eceng Gondok;
2. Efisiensi penyisihan logam berat Cu yang didapatkan adalah 48,53–87,43% dan kapasitas adsorpsi 2,43– 28,43 mg/g. Penyisihan dan kapasitas adsorpsi tertinggi dihasilkan oleh MXene/Eceng Gondok dengan rasio nanokomposit 20:1 dan konsentrasi awal adsorbat 25 mg/L, yaitu 87,43 % dan 21,86 mg/g;
3. Persamaan isoterm yang sesuai dengan adsorpsi logam Cu adalah isoterm Freundlich dengan nilai konstanta kesetimbangan (K_f) sebesar 0,002021 dan intensitas adsorpsi parameter Freundlich ($1/n$) sebesar 5,022. Hal ini menunjukkan bahwa jenis adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi fisika dan adsorpsi berlangsung pada beberapa lapisan atau *multilayer*. Kinetika adsorpsi yang sesuai adalah kinetika *pseudo second-order* dengan nilai koefisien determinasi (R^2) 0,7793 dan nilai k 0,0007. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi berlangsung dengan orde dua parsial terhadap konsentrasi gugus fungsi adsorben yang bebas dan orde nol parsial terhadap jumlah adsorbat di larutan

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan terdapat beberapa saran yang dapat dilaksanakan untuk penelitian kedepannya yaitu :

1. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan konsentrasi adsorbat yang lebih besar dan rasio nanokomposit dengan jumlah MXene lebih banyak;
2. Perlu dilakukan uji kemurnian kandungan selulosa pada nanoserat eceng gondok sebelum dicampurkan pada MXene.



DAFTAR PUSTAKA

- Adamson, & W, A. (1997). *Physical chemistry of surfaces by Arthur Adamson, Alice Petry Gast (z-lib.org)*.
- Ahmad, S., Ashraf, I., Mansoor, M. A., Rizwan, S., & Iqbal, M. (2021). An overview of recent advances in the synthesis and applications of the transition metal carbide nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(3), 1–36. <https://doi.org/10.3390/nano11030776>
- Alifaturrahma dan Hendriyanto. (2018). *Pemanfaatan Kulit Pisang Kepok Sebagai Adsorben UNTUK MENYISIHKAN LOGAM Cu*. 8(2), 105–111.
- Apriliani, A. (2010). Pemanfaatan Arang Ampas Tebu sebagai Adsorben Ion Logam Cd, Cr, Cu dan Pb dalam Air Limbah. *Repositoy UIN*, 1–91.
- Asriani. (2017). *Identifikasi Logam Tembaga (Cu) pada Zonasi Radius 1-5 Km Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Antang Makassar terhadap Pengaruh Kualitas Air Sumur Gali*.
- Asrofi, M., Abral, H., Kasim, A., & Pratoto, A. (2017). XRD and FTIR Studies of Nanocrystalline Cellulose from Water Hyacinth (*Eichornia crassipes*) Fiber. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 29, 9–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/jmnm.29.9>
- Asrofi, M., Abral, H., Kasim, A., Pratoto, A., Mahardika, M., Park, J. W., & Kim, H. J. (2018). Isolation of Nanocellulose from Water Hyacinth Fiber (WHF) Produced via Digester-Sonication and Its Characterization. *Fibers and Polymers*, 19(8), 1618–1625. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-7953-1>
- Astuti, W. (2018). Adsorpsi Menggunakan Material Berbasis Lignoselulosa. In *Unnes Press*.
- Atkins, P., de Paula, J., & Keeler, J. (2018). *Physical Chemistry 11th Edition*. 9–25.
- Badli Rompegading, A., Fadhillah Muhlis, N., Arfadilla, R., Indah Sari, N.,

Muliana, A., Gani, M., Rinaldy, A., Faqhi, M. S., Gusfira, A., Tantu, Z., Trywulan Syah, U., & Irfandi, R. (n.d.). DETEKSI AWAL KANDUNGAN LOGAM TEMBAGA (Cu) PADA TANAMAN KANGKUNG DARAT (*Ipomoea reptans*). *BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi Dan Sains*, 4(2), 2598–7453. <https://doi.org/10.31539/bioedusains.v4i2.2790>

Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). Activated Carbon Adsorption. In *Taylor & Francis* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/BF02276400>

Beoang, A. K. R. V. (2019). *Penyisihan Logam Berat Tembaga (Cu²⁺) Oleh Bakteri Indigenous*. <https://doi.org/10.31227/osf.io/ed3gj>

Brandani, S. (2020). Kinetics of liquid phase batch adsorption experiments. *Adsorption*. <https://doi.org/10.1007/s10450-020-00258-9>

Bustami, Abdullah, D., & Fadlisyah. (2014). *Statistika; Terapannya pada Bidang Informatika*. 1–186.

Cao, W. T., Chen, F. F., Zhu, Y. J., Zhang, Y. G., Jiang, Y. Y., Ma, M. G., & Chen, F. (2018). Binary Strengthening and Toughening of MXene/Cellulose Nanofiber Composite Paper with Nacre-Inspired Structure and Superior Electromagnetic Interference Shielding Properties. *ACS Nano*, 12(5), 4583–4593. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b00997>

Carey, M., & Barsoum, M. W. (2021). MXene polymer nanocomposites: a review. *Materials Today Advances*, 9, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2020.100120>

Cecen, O. A. (n.d.). *Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment Integration of Adsorption and Biological Treatment by Ferhan Çeçen, Özgür Aktaş (z-lib.org).pdf*.

Chairiyah, R. R., Guchi, H., & Rauf, A. (2013). Bioremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Cd, Cu, dan Pb dengan Menggunakan Endomikoriza. *Jurnal Online Agroekoteknologi*, 41(3), 470–482.

Chen, J. K., & Thyssen, J. P. (n.d.). *Metal Allergy*.

- Dawud, M., Namara, I., Chayati, N., & Taqwa, F. M. L. (2016). Analisis Sistem Pengendalian Pencemaran Air Sungai Cisadane Kota Tangerang Berbasis Masyarakat. *Jurnal.Umj.Ac.Id/Index.Php/Semnastek*, 6(November), 1–8. <https://media.neliti.com/media/publications/173218-ID-analisis-sistem-pengendalian-pencemaran.pdf>
- Ding, L., Wei, Y., Wang, Y., Chen, H., Caro, J., & Wang, H. (2017). A Two-Dimensional Lamellar Membrane: MXene Nanosheet Stacks. *Angewandte Chemie - International Edition*, 56(7), 1825–1829. <https://doi.org/10.1002/anie.201609306>
- Dong, Y., Sang, D., He, C., Sheng, X., & Lei, L. (2019). Mxene/alginate composites for lead and copper ion removal from aqueous solutions. *RSC Advances*, 9(50), 29015–29022. <https://doi.org/10.1039/c9ra05251h>
- Fahma, F., Iwamoto, S., Hori, N., Iwata, T., & Takemura, A. (2010). Isolation, preparation, and characterization of nanofibers from oil palm empty-fruit-bunch (OPEFB). *Cellulose*, 17(5), 977–985. <https://doi.org/10.1007/s10570-010-9436-4>
- Fard, A. K., Mckay, G., Chamoun, R., Rhadfi, T., Preud'Homme, H., & Atieh, M. A. (2017). Barium removal from synthetic natural and produced water using MXene as two dimensional (2-D) nanosheet adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 317, 331–342. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.090>
- Feron, D. (2007). *Corrosion behaviour and protection*.
- Fitriyanto, E. B., Soeprbowati, T. R., & Hariyati, R. (2017). Kemampuan *Chaetoceros calcitrans* (Paulsen) Takano dalam Menurunkan Kadar Logam Berat Tembaga (Cu) pada Limbah Tekstil. *Bioma : Berkala Ilmiah Biologi*, 18(2), 102. <https://doi.org/10.14710/bioma.18.2.102-106>
- Fuad, M. T., Aunurohim, & NurHidayati, T. (2013). Efektivitas Kombinasi *Salvinia molesta* dengan *Hydrilla verticillata* dalam Remediasi Logam Cu pada Limbah Elektroplating. *Jurnal Sains Dan Seni POMITS*, 2(1), 240–246.

- Gan, D., Huang, Q., Dou, J., Huang, H., Chen, J., & Liu, M. (2019). Applied Surface Science Bioinspired functionalization of MXenes (Ti_3C_2Tx) with amino acids for efficient removal of heavy metal ions. *Applied Surface Science*, November, 144603. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144603>
- Greenberg, A. E., Clesceri, L. S., & Eaton, A. D. (1999). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *Public Health*, 51(1), 940–940. <https://doi.org/10.2105/AJPH.51.6.940-a>
- Guo, T., Bulin, C., Ma, Z., Li, B., Zhang, Y., Zhang, B., Xing, R., & Ge, X. (2021). Mechanism of Cd(II) and Cu(II) Adsorption onto Few-Layered Magnetic Graphene Oxide as an Efficient Adsorbent. *ACS Omega*, *Ii*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01770>
- Guo, X., Zhang, X., Zhao, S., Huang, Q., & Xue, J. (2016). High Adsorption Capacity of Heavy Metals on Two-dimensional MXenes: An Ab Initio Study with Molecular Dynamics Simulation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(1), 228–233. <https://doi.org/10.1039/c5cp06078h>
- Harinaldi. (2005). *Prinsip-Prinsip Statistik Untuk Teknik dan Sains* (Erlangga).
- Hemalatha, D., Narayanan, R. M., & Sanchitha, S. (2020). Removal of Zinc and Chromium from industrial wastewater using water hyacinth (*E. crassipes*) petiole, leaves and root powder: Equilibrium study. *Materials Today: Proceedings*, 43(xxxx), 1834–1838. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.725>
- Hu, H., & Xu, K. (2019). Physicochemical technologies for HRP and risk control. In *High-Risk Pollutants in Wastewater*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816448-8.00008-3>
- Hwang, S. K., Kang, S. M., Rethinasabapathy, M., Roh, C., & Huh, Y. S. (2020). MXene: An emerging two-dimensional layered material for removal of radioactive pollutants. *Chemical Engineering Journal*, 397(April), 125428. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125428>

- Ibnu Hajar, E. W., Sitorus, R. S., Mulianingtias, N., & Welan, F. J. (2016). *Efektivitas Adsorpsi Logam Pb 2+ dan Cd 2+ Menggunakan Media Adsorben Cangkang Telur Ayam*. 5(1), 1–7.
- Ibnu Hajar, E. W., Sitorus, R. S., Mulianingtias, N., & Welan, F. J. (2018). Efektivitas Adsorpsi Logam Pb²⁺ dan Cd²⁺ Menggunakan Media Adsorben Cangkang Telur Ayam. *Konversi*, 5(1), 1. <https://doi.org/10.20527/k.v5i1.4771>
- Irianti, T. T., Kuswadi, Nuranto, S., & Budiyatni, A. (2017). Logam Berat dan Kesehatan. *Grafika Indah ISBN: 979820492-1, January 2017*, 1–131.
- Jain, G. K. (Guarav K., Ahmad, F. J. (Farhan J., & Khar, R. K. (Roop K. (2019). *Theory and practice of physical pharmacy* (1st ed.). Elsevier.
- Jainal, Ghitarima, R. E. (2020). *KANDUNGAN LOGAM BERAT CU, CD DAN PB PADA IKAN HASIL TANGKAP PANCING DI PERAIRAN PESISIR KOTA BONTANG KALIMANTAN TIMUR*. 7(2), 9–19.
- John C. Crittenden, R. Rhodes Trussell, David W. Hand, K. J. H. and G. T. (2017). *MHW's Water Treatment Principles and Design*.
- Jun, B. M., Heo, J., Taheri-Qazvini, N., Park, C. M., & Yoon, Y. (2020). Adsorption of selected dyes on Ti₃C₂T_x MXene and Al-based metal-organic framework. *Ceramics International*, 46(3), 2960–2968. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.09.293>
- Jun, B. M., Her, N., Park, C. M., & Yoon, Y. (2020). Effective removal of Pb(ii) from synthetic wastewater using Ti₃C₂T_x MXene. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 6(1), 173–180. <https://doi.org/10.1039/c9ew00625g>
- Kamath, S., Ramanjaneyalu, V. G. V., & Kamila, S. (2019). Application of ZnO Nano Rods for the Batch Adsorption of Cr(VI): A Study of Kinetics and Isotherms. *American Journal of Applied Sciences*, 16(3), 101–112. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2019.101.112>

- Kong, A., Sun, Y., Peng, M., Gu, H., Fu, Y., Zhang, J., & Li, W. (2021). Amino-functionalized MXenes for efficient removal of Cr(VI). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 617(March), 126388. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126388>
- Kothandaraman, V. (1969). Industrial Water Pollution Control. In *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* (Vol. 5, Issue 2, pp. 73–74). <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04890.x>
- Langmuir, I. (1918). The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Mica. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361–1403.
- Liu, T., Yang, X., Wang, Z. L., & Yan, X. (2013). Enhanced chitosan beads-supported Fe₀-nanoparticles for removal of heavy metals from electroplating wastewater in permeable reactive barriers. *Water Research*, 47(17), 6691–6700. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.006>
- Liu, Y., Khan, A., Wang, Z., Chen, Y., Zhu, S., Sun, T., Liang, D., & Yu, H. (2020). Upcycling of electroplating sludge to prepare erdite-bearing nanorods for the adsorption of heavy metals from electroplating wastewater effluent. *Water (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041027>
- Maharajan, A., Kitto, M. R., Paruruckumani, P. S., & Ganapiriya, V. (2016). Histopathology biomarker responses in Asian sea bass, *Lates calcarifer* (Bloch) exposed to copper. *The Journal of Basic & Applied Zoology*, 77, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jobaz.2016.02.001>
- Marhadi, M., Wibowo, H., & Kurniawan, V. A. (2018). Analisis Penurunan Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) dalam Perbaikan Kualitas Air Ditinjau Dari Parameter Timbal (Pb) dan Besi (Fe). *Jurnal Civronlit Unbari*, 3(2), 82. <https://doi.org/10.33087/civronlit.v3i2.37>
- Massey, A. . (1973). *The Chemistry of Copper, Silver, and Gold*.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriot, P. (2004). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7th Editio). McGraw-Hill Education.

- Metboki, M., Ernawati, R., & Pertambangan, J. T. (2019). *Analisis Kandungan Logam Berat Pada Tailing Pencucian Mangan PT . Anugerah Nusantara Sejahtera Di Kabupaten. 2019*(November), 54–58.
- Mustafa, A., Asaf, R., Kamariah, & Radiarta, I. N. (2021). Konsentrasi dan Status Mutu Logam Berat dalam Air dan Sedimen di Kawasan Pesisir Kabupaten Kepulauan Sangihe. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(April), 15–38.
- Nguyen, T. A., Nguyen, V. T., Tran, T. T. H., Le, T. Q. N., & Nguyen, N. H. (2021). Batch and column adsorption of reactive dyes by eggshell powder-chitosan gel core-shell material. *Moroccan Journal of Chemistry*, 9(1), 018–027. <https://doi.org/10.48317/IMIST.PRSM/morjchem-v9i1.19674>
- Nuriadi, Napitupulu, M., & Rahman, N. (2013). ANALISIS LOGAM TEMBAGA (Cu) PADA BUANGAN LIMBAH TROMOL (TAILING) PERTAMBANGAN POBOYA Analysis of Copper (Cu) Metal On Drum Waste Disposal (Tailings) at Poboya Mining. *J. Akad.Kim.2*, 2(May), 90–96.
- Patel, H. (2019). Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. *Applied Water Science*, 9(3), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0927-7>
- Permata, M. A. D., Purwiyanto, A. I. S., & Diansyah, G. (2018). Kandungan Logam Berat Cu (Tembaga) Dan Pb (Timbal) Pada Air Dan Sedimen Di Kawasan Industri Teluk Lampung, Provinsi Lampung. *Journal of Tropical Marine Science*, 1(1), 7–14. <https://doi.org/10.33019/jour.trop.mar.sci.v1i1.667>
- Pinandari, A. W., Fitriana, D. N., Nugraha, A., & Suhartono, E. (2011). *Uji Efektifitas Dan Efisiensi Filter Biomassa Menggunakan Sabut Kelapa (Cocos nucifera) SEBAGAI BIOREMOVAL UNTUK MENURUNKAN KADAR LOGAM (Cd, Fe, Cu), TOTAL PADATAN TERSUSPENSII (TSS) DAN MENINGKATKAN pH PADA LIMBAH AIR ASAM TAMBANG*

BATUBARA. January.

Prayogo, T. (2016). Kajian Kondisi Air Tanah Dangkal Daerah Wonomarto Kabupaten Lampung Utara. In *Jurnal Teknologi Lingkungan* (Vol. 15, Issue 2, p. 107). <https://doi.org/10.29122/jtl.v15i2.1604>

Pulungan, A. F., & Embun. (2017). PEMANFAATAN PEKTIN DARI KULIT JERUK MANIS SEBAGAI BIOSORBEN DALAM MENURUNKAN KADAR TEMBAGA (Cu) PADA LIMBAH CAIR INDUSTRI ELEKTROPLATING. *Jurnal Ilmiah Farmasi IMELDA*, 1(1), 10–17.

Qordhowi, F. A. (2019). *Studi Regenerasi Adsorben Batu Apung Sungai Pasak Pariaman yang Telah Dimodifikasi dengan Pelapisan Mg untuk Menyisihkan Logam Tembaga (Cu) Total dari Air Tanah.*

Ramirez-Muñoz, A., Pérez, S., Muñoz-Saldaña, J., Flórez, E., & Acelas, N. (2021). Eco-friendly materials obtained through a simple thermal transformation of water hyacinth (*Eichhornia Crassipes*) for the removal and immobilization of Cd²⁺ and Cu²⁺ from aqueous solutions. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 16(June). <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100574>

Ratnasari, N. D., Moelyaningrum, A. D., & Ellyke. (2017). Penurunan Kadar Tembaga (Cu) pada Limbah Cair Industri Elektroplating Menggunakan Cangkang Telur Ayam Potong Teraktivasi Termal. *Sanitasi: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 9(2), 56–62. <http://journalsanitasi.keslingjogja.net/index.php/sanitasi>

Reynolds, T. D., & Richards, P. A. (1996). Unit operations and processes in environmental engineering 2nd ed. In *PWS series in engineering*. (p. 25,350,749).

Rinaldi, Novalia, & Syazali, M. (2020). *Statistika Inferensial untuk Ilmu Sosial dan Pendidikan.*

Rusydi, A., & Fadhli, M. (2018). *Statistika Pendidikan: Teori dan Praktik Dalam*

Pendidikan. In *Cv. Widya Puspita*.

- Sabani, & Putri, W. K. (2015). Aktivasi Zeolit Alam sebagai Adsorben Logam Berat Mg, Al, dan ZnO Menggunakan Larutan NaOH. *Bioilmi Edisi Agustus*, 3(2), 45–50.
- Sasongko, A., Yulianto, K., & Sarastri, D. (2017). Verifikasi Metode Penentuan Logam Kadmium (Cd) dalam Air Limbah Domestik dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom. *JST (Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 6(2), 228. <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v6i2.10699>
- Saththasivam, J., Wang, K., Yiming, W., Liu, Z., & Mahmoud, K. A. (2019). A flexible Ti₃C₂T_x (MXene)/paper membrane for efficient oil/water separation. *RSC Advances*, 9(29), 16296–16304. <https://doi.org/10.1039/c9ra02129a>
- Sekarwati, N., Murachman, B., & Sunarto. (2015). Dampak logam berat Cu (tembaga) dan Ag (perak) pada limbah cair industri perak terhadap kualitas air sumur dan kesehatan masyarakat serta upaya pengendaliannya di Kota Gede Yogyakarta. *Jurnal Ekosains*, VII(1), 13. <http://pasca.uns.ac.id/s2ilmulingkungan/wp-content/uploads/sites/25/2016/09/PUBLIKASI-NOVITA.pdf>
- Setiawan, A., Basyiruddin, F., & Dermawan, D. (2019). Biosorpsi Logam Berat Cu(II) Menggunakan Limbah *Saccharomyces Cerevisiae*. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 16(1), 29. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v16i1.29-35>
- Shahzad, A., Rasool, K., Miran, W., Nawaz, M., Jang, J., Mahmoud, K. A., & Lee, D. S. (2017). Two-Dimensional Ti₃C₂T_x MXene Nanosheets for Efficient Copper Removal from Water. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 5(12), 11481–11488. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02695>
- Shikuku, V. O., Donato, F. F., Kowenje, C. O., Zanella, R., & Prestes, O. D. (2015). A comparison of adsorption equilibrium, kinetics and

thermodynamics of aqueous phase clomazone between faujasite X and a natural zeolite from Kenya. *South African Journal of Chemistry*, 68(January), 245–252. <https://doi.org/10.17159/0379-4350/2015/v68a33>

Shuck, C. E., Sarycheva, A., Anayee, M., Levitt, A., Zhu, Y., Uzun, S., Balitskiy, V., Zahorodna, V., Gogotsi, O., & Gogotsi, Y. (2020). Scalable Synthesis of Ti₃C₂T_x MXene. *Advanced Engineering Materials*, 22(3), 1–8. <https://doi.org/10.1002/adem.201901241>

Simonin, J. P. (2016). On the comparison of pseudo-first order and pseudo-second order rate laws in the modeling of adsorption kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 300, 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.079>

Song, G., Kang, R., Guo, L., Ali, Z., Chen, X., Zhang, Z., Yan, C., Lin, C. Te, Jiang, N., & Yu, J. (2020). Highly flexible few-layer Ti₃C₂MXene/cellulose nanofiber heat-spreader films with enhanced thermal conductivity. *New Journal of Chemistry*, 44(17), 7186–7193. <https://doi.org/10.1039/d0nj00672f>

Su, T., Liu, N., Gao, Y., Lei, D., Wang, L., Ren, Z., Zhang, Q., Su, J., & Zhang, Z. (2021). MXene/cellulose Nanofiber-foam Based High Performance Degradable Piezoresistive Sensor with greatly expanded interlayer distances. *Nano Energy*, 87(March). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106151>

Sukmawati, W. (2020). *Redoks Dan Elektrokimia*. 1–19.

Tang, Y., Yang, C., & Que, W. (2018). A novel two-dimensional accordion-like titanium carbide (MXene) for adsorption of Cr(VI) from aqueous solution. *Journal of Advanced Dielectrics*, 8(5). <https://doi.org/10.1142/S2010135X18500352>

Tanpichai, S., Biswas, S. K., Witayakran, S., & Yano, H. (2019). Water Hyacinth: A Sustainable Lignin-Poor Cellulose Source for the Production of Cellulose Nanofibers. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(23), 18884–18893. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b04095>

- Tchobanoglous, G. (2003a). *Wastewater Engineering*.
- Tchobanoglous, G. (2003b). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse (Metcalf)*. *Journal of Chemical Information and Modeling*.
- Tian, W., VahidMohammadi, A., Reid, M. S., Wang, Z., Ouyang, L., Erlandsson, J., Pettersson, T., Wågberg, L., Beidaghi, M., & Hamedi, M. M. (2019). Multifunctional Nanocomposites with High Strength and Capacitance Using 2D MXene and 1D Nanocellulose. *Advanced Materials*, 31(41). <https://doi.org/10.1002/adma.201902977>
- Tien, C. (2019). Introduction to Adsorption. In *Introduction to Adsorption*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816446-4.09991-7>
- Tunesi, M. M., Soomro, R. A., Han, X., Zhu, Q., Wei, Y., & Xu, B. (2021). Application of MXenes in environmental remediation technologies. *Nano Convergence*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40580-021-00255-w>
- Utama, S., Kristianto, H., & Andreas, A. (2016). Adsorpsi Ion Logam Kromium (Cr (Vi)) Menggunakan Karbon Aktif dari Bahan Baku Kulit Salak. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan," Yogyakarta*(17 Maret 2016), 1–6.
- Wei, Z., Peigen, Z., Wubian, T., Xia, Q., Yamei, Z., & ZhengMing, S. (2018). Alkali Treated Ti₃C₂T_x MXenes and Their Dye Adsorption Performance. *Materials Chemistry and Physics*, 206, 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.12.034>
- Yan, H., Li, W., Li, H., Fan, X., & Zhu, M. (2019). Ti₃C₂ MXene nanosheets toward high-performance corrosion inhibitor for epoxy coating. *Progress in Organic Coatings*, 135(March), 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.06.013>
- Ying, Y., Liu, Y., Wang, X., Mao, Y., Cao, W., Hu, P., & Peng, X. (2015). Two-dimensional titanium carbide for efficiently reductive removal of highly toxic chromium(VI) from water. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(3),

1795–1803. <https://doi.org/10.1021/am5074722>

Zhang, Y., Wang, L., Zhang, N., & Zhou, Z. (2018). Adsorptive environmental applications of MXene nanomaterials: A review. *RSC Advances*, 8(36), 19895–19905. <https://doi.org/10.1039/c8ra03077d>



LAMPIRAN

LAMPIRAN A

(Peraturan)

LAMPIRAN A1
(PerMen LH No. 5 Tahun
2014)



SALINAN

-1-

PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP REPUBLIK INDONESIA

NOMOR 5 TAHUN 2014

TENTANG

BAKU MUTU AIR LIMBAH

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP REPUBLIK INDONESIA,

Menimbang : bahwa untuk melaksanakan ketentuan Pasal 20 ayat (5) huruf b, Undang-Undang nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, perlu menetapkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup tentang Pengelolaan Baku Mutu Air Limbah;

Mengingat : 1. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lembar Negara Republik Indonesia tahun 2009 nomor 140);

2. Peraturan Pemerintah Nomor 19 Tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran dan/atau Perusakan Laut (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1999 Nomor 32, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 3816);

3. Peraturan Pemerintah Nomor 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2001 Nomor 153, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4161);

4. Peraturan Pemerintah Nomor 38 Tahun 2007 tentang Pembagian Urusan Pemerintahan Antara Pemerintah, Pemerintah Daerah Provinsi, dan Pemerintah Daerah Kabupaten/Kota (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2007 Nomor 82, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2007 Nomor 4737);

5. Peraturan Pemerintah Nomor 27 Tahun 2012 tentang Izin Lingkungan (Lembaran Negara Republik Indonesia tahun 2012 nomor 48);

6. Peraturan ...

LAMPIRAN I
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI PELAPISAN LOGAM DAN GALVANIS

Parameter	Kadar Paling Tinggi Pelapisan Logam (mg/L)	Beban Paling Tinggi Pelapisan Logam (gr/m ²)	Kadar Paling Tinggi Galvanisasi (mg/L)	Beban Paling Tinggi Galvanisasi (gr/m ²)
TSS	20	0,4	20	0,04
Cu	0,5	0,01	0,5	0,001
Zn	1,0	0,02	1,0	0,0005
Cr ⁶⁺	0,1	0,002	-	-
Cr	0,5	0,01	-	-
Cd	0,05	0,001	0,05	0,0001
Pb	0,1	0,002	0,1	0,0002
Ni	1,0	0,02	1,0	0,002
CN	0,2	0,004	0,2	0,0004
Ag	0,5	0,01	0,5	0,001
pH	6 – 9		6 – 9	
Kuantitas air limbah paling tinggi	20 L per m ² produk pelapisan logam		2 L per m ² produk pelapisan logam	

Catatan:

Penghitungan Beban Paling Tinggi atau Beban Maksimum (BM):

$$BM = \frac{\text{Kadar Paling Tinggi (mg/L)}}{\text{(mg/L)}} \times \frac{\text{Kuantitas Air Limbah Paling Tinggi (L/m}^2\text{)/1000}}{\text{(L/m}^2\text{)/1000}}$$

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XII
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI BATERAI TIMBAL ASAM (AKI)

- A. Baku Mutu Air Limbah bagi industri timbal asam yang telah beroperasi pada saat ditetapkan Peraturan Menteri ini.

Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Paling Tinggi Baterai Timbal Asam (AKI) (kg/ton bahan baku)
COD	mg/L	75	0,75
TSS	mg/L	25	0,25
Pb	mg/L	0,3	0,003
Cu	mg/L	1,0	0,01
Minyak dan Lemak	mg/L	3	0,03
SO ₄	gr/L	5	50
pH	6 – 9		
Debit Air Limbah Paling Tinggi: liter per Kg bahan baku Pb			10

- B. Baku Mutu Air Limbah bagi:
1. industri timbal asam yang telah beroperasi pada saat ditetapkan Peraturan Menteri ini dan akan menambahkan unit baru; atau
 2. perencanaan industri timbal asam sedang disusun dan beroperasi setelah ditetapkannya Peraturan Menteri ini.

Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Paling Tinggi Baterai Timbal Asam (AKI) (kg/ton bahan baku)
COD	mg/L	75	0,75
TSS	mg/L	25	0,25
Pb	mg/L	0,2	0,002
Cu	mg/L	1,0	0,01
Minyak dan Lemak	mg/L	3	0,03
SO ₄	gr/L	4	40
pH	6 – 9		
Debit Air Limbah Paling Tinggi: liter per Kg bahan baku Pb			10

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XXIV
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI ELEKTRONIKA

Parameter	Satuan	Kosentrasi
A. Parameter Fisika		
TSS	mg/l	60
BOD ₅	mg/l	50
COD	mg/l	110
pH	-	6 - 9
B. Parameter Kimia		
NH ₃ -N	mg/l	10
F	mg/l	10
Fenol	mg/l	0,5
Minyak & Lemak	mg/l	10
Cu	mg/l	0,6
Zn	mg/l	5
Cr ⁶⁺	mg/l	0,1
Cd	mg/l	0,1
Hg	mg/l	0,002
Pb	mg/l	0,1
Ni	mg/l	0,5

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XXVII
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI PETROKIMIA HULU

Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi
pH	-	6 - 9
BOD	mg/l	100
COD	mg/l	200
TSS	mg/l	150
Minyak dan Lemak	mg/l	15
Fenol	mg/l	1
Cr	mg/l	1
Cu	mg/l	3
Zn	mg/l	10
Ni	mg/l	0,5
Kuantitas Air Limbah Paling Tinggi	m ³ /ton bahan baku	0,6

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XXXI
 PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
 REPUBLIK INDONESIA
 NOMOR 5 TAHUN 2014
 TENTANG
 BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
 INDUSTRI POLYETHYLENE TEREFALAT (PET)

Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi
pH		6 - 9
BOD	mg/l	75
COD	mg/l	150
TSS	mg/l	100
Minyak dan Lemak	mg/l	10
Crom (Cr)	mg/l	1
Tembaga (Cu)	mg/l	3
Seng (Zn)	mg/l	10
Kuantitas Air Limbah Paling Tinggi	m ³ /ton produk	2,0

Catatan:

Metode Penghitungan Baku Mutu Air Limbah Bagi Industri PTA dan PET yang Melakukan Pengolahan Air Limbah Secara Terpadu

Debit air limbah paling tinggi gabungan :

$$Q = (PPTA * QPTA) + (PPET * QPET)$$

Kadar air limbah paling tinggi gabungan untuk parameter i :

$$Ci = (CPTA,i * PPTA * QPTA) + (CPET,i * PPET * QPET) / Q$$

Keterangan:

- Q (m³/hari) : debit air limbah paling tinggi gabungan
 QPTA (m³/ton) : kuantitas air limbah paling tinggi untuk industri PTA
 : 4,5 m³/ton (empat koma lima meter kubik per ton) produk PTA.
 QPET (m³/ton) : kuantitas air limbah paling tinggi untuk industri PET
 : 2 m³/ton (dua meter kubik per ton) produk PET
 PPTA (ton/hari) : jumlah produksi PTA
 PPET (ton/hari) : jumlah produksi PET
 Ci (mg/L) : kadar paling tinggi gabungan untuk parameter i
 CPTA,i (mg/L) : kadar paling tinggi industri PTA untuk parameter i
 CPET,i (mg/L) : kadar paling tinggi industri PET untuk parameter i

Contoh Penghitungan :

Suatu industri PTA dan PET menghasilkan 100 ton/jam (seratus ton per jam) PTA dan 60 ton/jam (enam puluh ton per jam) PET, maka baku mutunya adalah:

Debit air limbah paling tinggi:

$$Q = (100 * 4,5) + (60 * 2)$$

$$= 570 \text{ m}^3/\text{jam}$$

Kadar paling tinggi untuk parameter BOD :

Dari baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan industri asam tereftalat :

CPTA, BOD = 150 mg/liter

QPTA = 4,5 m³/ton produk PTA

Dari baku mutu air limbah bagi usaha dan/atau kegiatan industri polyethylene tereftalat:

CPET, BOD = 75 mg/liter

QPET = 2 m³/ton produk PTA

Maka,

$$CBOD = (150 * 100 * 4,5) + (75 * 60 * 2) / 570$$

$$= 76500 / 570$$

$$= 134 \text{ mg/liter}$$

Metode penghitungan yang sama dilakukan juga untuk parameter lainnya.

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XXXII
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI PETROKIMIA HULU

Parameter	Satuan	Kadar Paling Tinggi
BOD	mg/liter	100
COD	mg/liter	200
TSS	mg/liter	150
Minyak dan Lemak	mg/liter	15
Fenol	mg/liter	1
Cr	mg/liter	1
Cu`	mg/liter	3
Zn	mg/liter	10
Ni	mg/liter	0,5
pH	-	6,0 – 9,0
Kuantitas air limbah paling tinggi	m3/ton bahan baku	0,6

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XXXIV
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI SODA KOSTIK ATAU KHLOR

Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (gram/ton)
TSS	25	75,0
Cl ₂ tersisa (khlor)	0,5	1,5
Tembaga (Cu)	1,0	3,0
Timbal (Pb)	0,8	2,4
Sen (Zn)	1,0	3,0
Krom Total (Cr)	0,5	1,5
Nikel (Ni)	1,2	3,6
Raksa (Hg)	0,004	0,012
pH	6,0 – 9,0	
Debit Limbah Paling Tinggi	3,0 m ³ per ton produk soda kostik atau 3,4 m ³ per ton Cl ₂	

Catatan :

1. Kadar paling tinggi untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam milligram parameter per Liter air limbah.
2. Beban pencemaran paling tinggi untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam gram parameter per ton produk soda kostik.

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XXXVIII
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI CAT

Parameter	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (gram/m ³)
BOD ₅	80	40
TSS	50	25
Merkuri (Hg)	0,01	0,005
Seng (Zn)	1,0	0,50
Timbal (Pb)	0,30	0,15
Tembaga (Cu)	0,80	0,40
Krom Heksavalen (Cr+6)	0,20	10
Titanium (Ti)	0,40	0,20
Kadmium (Cd)	0,08	0,04
Fenol	0,20	0,10
Minyak dan Lemak	10	5
pH	6,0- 9,0	
Debit Limbah	0,5 L per L produk cat water base	
Paling tinggi	Zero Discharge untuk cat solvent base	

Catatan:

1. Cat berbahan dasar solven harus tidak boleh di buang ke perairan umum. semua limbah cair yang dihasilkan harus ditampung atau diolah kembali dan tidak boleh di buang diperairan umum.
2. Kadar paling tinggi untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam miligram parameter per liter air limbah.
3. Beban pencemaran paling tinggi untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam gram parameter per m³ produk cat.

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XL
PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 5 TAHUN 2014
TENTANG
BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
INDUSTRI PESTISIDA

Parameter	Pembuatan Pestisida Teknis		Formulasi Pengemasan
	Kadar Paling Tinggi (mg/L)	Beban Pencemaran Paling Tinggi (kg/ton produk)	Kadar Paling Tinggi (mg/L)
BOD5	30	0,60	15
COD	100	2,00	50
TSS	25	0,50	15
Fenol	2	0,04	1,5
Bensena	0,1	0,002	0
Toluena	0,1	0,002	0
Total-CN	0,8	0,016	0
Tembaga (Cu)	1,0	0,02	0
Total-NH3	1,0	0,02	-
Bahan Aktif Total	1,0	0,02	0,05
pH	6,0- 9,0		6,0 - 9,0
Debit Limbah Paling Tinggi	20 m ³ per ton produk		

Catatan:

1. Kadar paling tinggi untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam miligram parameter per liter air limbah.
2. Beban pencemaran paling tinggi untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam kilogram parameter per ton produk pestisida.

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XLIV
 PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
 REPUBLIK INDONESIA
 NOMOR 5 TAHUN 2014
 TENTANG
 BAKU MUTU AIR LIMBAH

BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
 FASILITAS PELAYANAN KESEHATAN

A. Fasilitas Pelayanan Kesehatan yang melakukan Pengolahan Limbah Domestik

Parameter	Konsentrasi Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
Fisika		
Suhu	38	°C
Zat padat terlarut	2.000	mg/L
Zat padat tersuspensi	200	mg/L
Kimia		
pH	6-9	
BOD	50	mg/L
COD	80	mg/L
TSS	30	mg/L
Minyak dan Lemak	10	mg/L
MBAS	10	mg/L
Amonia Nitrogen	10	mg/L
Total Coliform	5.000	(MPN/100 ml)

B. Fasilitas Pelayanan Kesehatan yang melakukan Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun

Fasilitas Kesehatan yang melakukan pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun, yang hasil pengolahannya disalurkan ke IPAL, maka wajib memenuhi Baku Mutu Air Limbah Domestik sebagaimana Bagian A, dan Baku Mutu Air Limbah dengan parameter tambahan sebagai berikut:

Parameter	Konsentrasi Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
Kimia		
pH	6 - 9	mg/L
Besi, terlarut (Fe)	5	mg/L
Mangan, terlarut (Mn)	2	mg/L
Barium, (Ba)	2	mg/L
Tembaga, (Cu)	2	mg/L
Seng, (Zn)	5	mg/L
Krom valensi enam, (Cr6+)	0,1	mg/L
Krom total, (Cr)	0,5	mg/L
Kadmium, (Cd)	0,05	mg/L
Merkuri, (Hg)	0,002	mg/L
Timbal, (Pb)	0,1	mg/L
Stanum, (Sn)	2	mg/L

Parameter	Konsentrasi Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
Arsen, (As)	0,1	mg/L
Selenium, (Se)	0,05	mg/L
Nikel, (Ni)	0,2	mg/L
Kobal, (Co)	0,4	mg/L
Sianida, (CN)	0,05	mg/L
Sulfida, (S=)	0,05	mg/L
Flourida, (F-)	2	mg/L
Klorin bebas, (Cl ₂)	1	mg/L
Amoniak bebas, (NH ₃ -N)	1	mg/L
Nitrat (NO ₃ -N)	20	mg/L
Nitrit (NO ₂ -N)	1	mg/L
Senyawa aktif biru metilen, (MBAS)	5	mg/L
Fenol	0,5	mg/L
AOX	0,5	mg/L
PCBs	0,005	mg/L
PCDFs	10	mg/L
PCDDs	10	mg/L

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

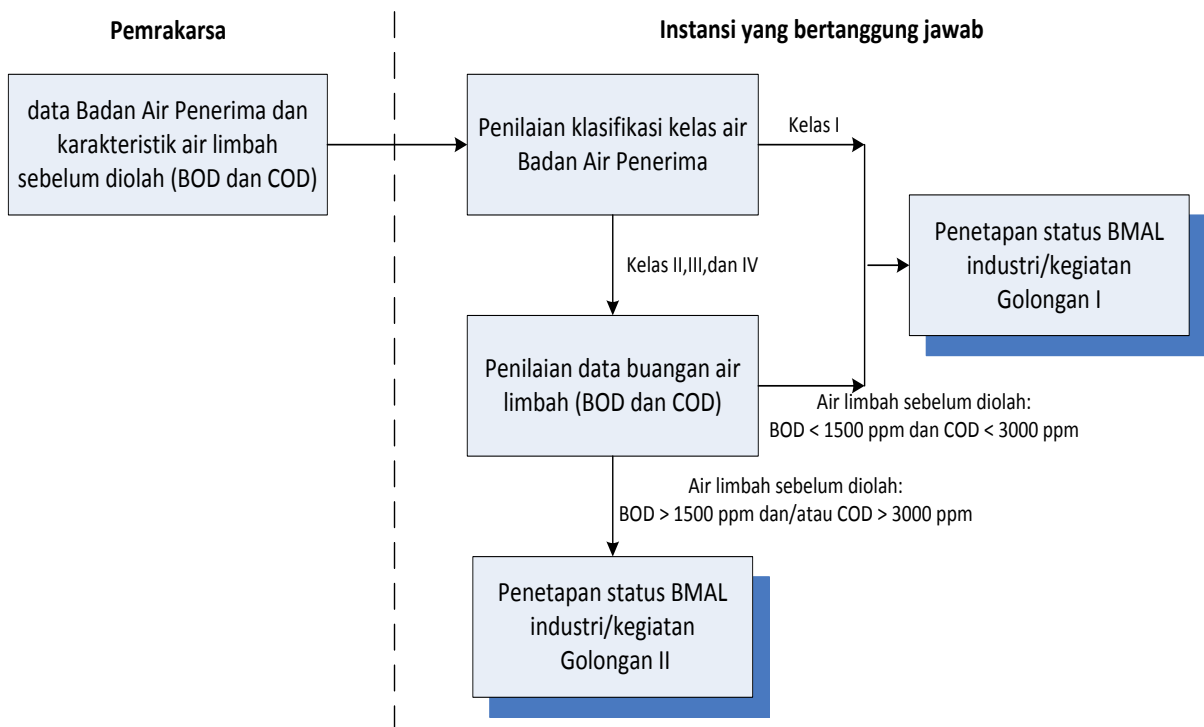
Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN XLVII
 PERATURAN MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
 REPUBLIK INDONESIA
 NOMOR 5 TAHUN 2014
 TENTANG
 BAKU MUTU AIR LIMBAH

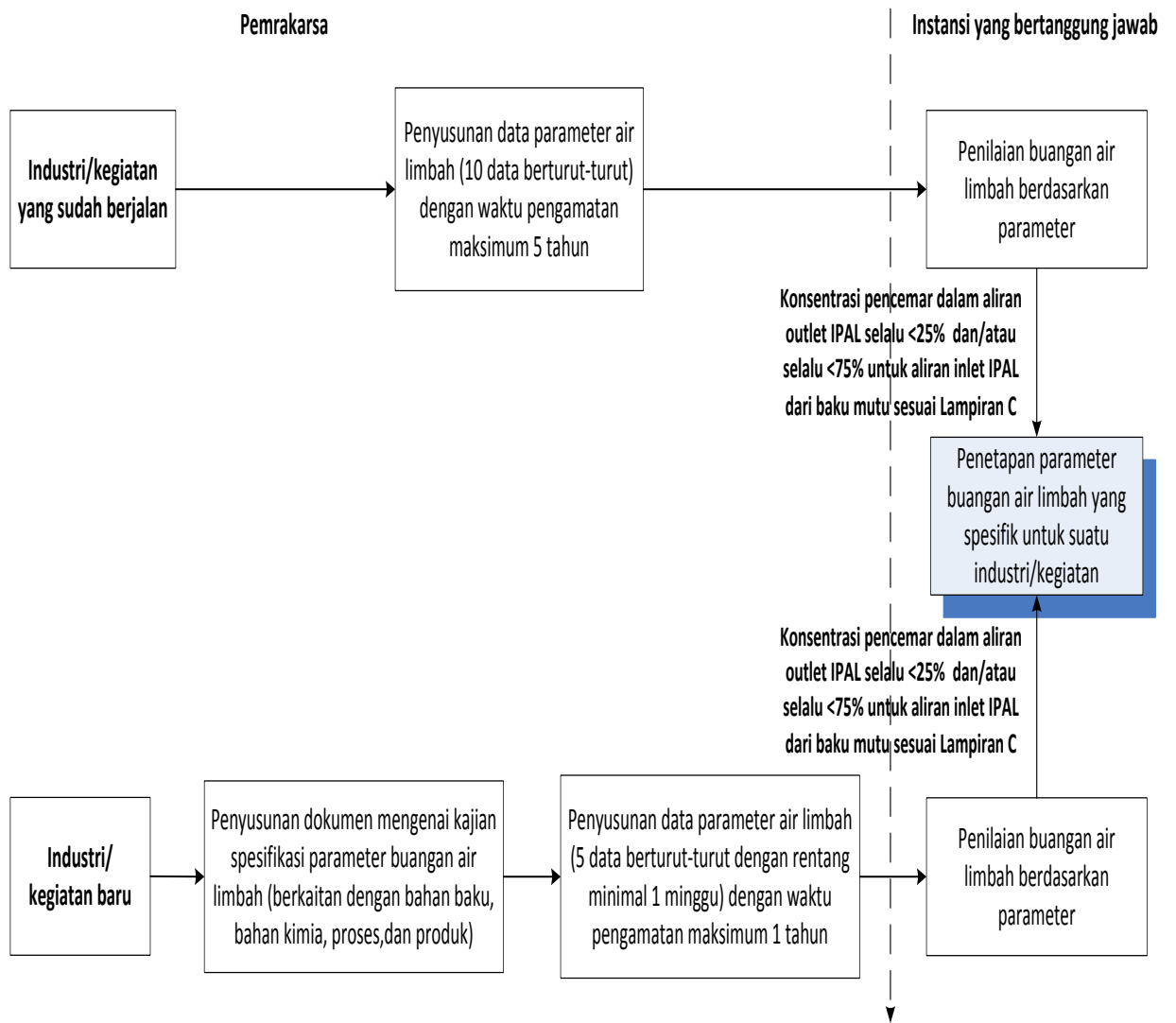
BAKU MUTU AIR LIMBAH BAGI USAHA DAN/ATAU KEGIATAN
 YANG BELUM MEMILIKI BAKU MUTU AIR LIMBAH YANG DITETAPKAN

Parameter	Satuan	GOLONGAN	
		I	II
Temperatur	°C	38	40
Zat padat larut (TDS)	mg/L	2.000	4.000
Zat padat suspensi (TSS)	mg/L	200	400
pH	-	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
Besi terlarut (Fe)	mg/L	5	10
Mangan terlarut (Mn)	mg/L	2	5
Barium (Ba)	mg/L	2	3
Tembaga (Cu)	mg/L	2	3
Seng (Zn)	mg/L	5	10
Krom Heksavalen (Cr ⁶⁺)	mg/L	0,1	0,5
Krom Total (Cr)	mg/L	0,5	1
Cadmium (Cd)	mg/L	0,05	0,1
Air Raksa (Hg)	mg/L	0,002	0,005
Timbal (Pb)	mg/L	0,1	1
Stanum (Sn)	mg/L	2	3
Arsen (As)	mg/L	0,1	0,5
Selenium (Se)	mg/L	0,05	0,5
Nikel (Ni)	mg/L	0,2	0,5
Kobalt (Co)	mg/L	0,4	0,6
Sianida (CN)	mg/L	0,05	0,5
Sulfida (H ₂ S)	mg/L	0,5	1
Fluorida (F)	mg/L	2	3
Klorin bebas (Cl ₂)	mg/L	1	2
Amonia-Nitrogen (NH ₃ -N)	mg/L	5	10
Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	20	30
Nitrit (NO ₂ -N)	mg/L	1	3
Total Nitrogen	mg/L	30	60
BOD ₅	mg/L	50	150
COD	mg/L	100	300
Senyawa aktif biru metilen	mg/L	5	10
Fenol	mg/L	0,5	1
Minyak & Lemak	mg/L	10	20
Total Bakteri Koliform	MPN/ 100 mL	10.000	

A. Golongan Industri



B. Pengurangan Parameter Pemeriksaan



MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

Keterangan:

1. Tanda * : dilengkapi dengan bagan atau tampilan posisi titik penataan atau pengambilan sampel.
2. Tanda ** : nilai diisi sesuai dengan baku mutu air limbah.
3. Laporan ini dibuat di atas kertas berlogo atau kop laboratorium yang bersangkutan.

MENTERI LINGKUNGAN HIDUP
REPUBLIK INDONESIA,

ttd

BALTHASAR KAMBUAYA

Salinan sesuai dengan aslinya
Kepala Biro Hukum dan Humas

Rosa Vivien Ratnawati

LAMPIRAN A2
(PP RI No.22 Tahun 2021)



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

LAMPIRAN VI
PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 22 TAHUN 2021
TENTANG
PENYELENGGARAAN PERLINDUNGAN DAN
PENGELOLAAN LINGKUNGAN HIDUP

BAKU MUTU AIR NASIONAL

I. BAKU MUTU AIR SUNGAI DAN SEJENISNYA

No	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
1.	Temperatur	°C	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Perbedaan dengan suhu udara di atas permukaan air
2.	Padatan terlarut total (TDS)	mg/L	1.000	1.000	1.000	2.000	Tidak berlaku untuk muara
3.	Padatan tersuspensi total (TSS)	mg/L	40	50	100	400	
4.	Warna	Pt-Co Unit	15	50	100	-	Tidak berlaku untuk air gambut (berdasarkan kondisi alaminya)
5.	Derajat keasaman (pH)		6-9	6-9	6-9	6-9	Tidak berlaku untuk air gambut (berdasarkan kondisi alaminya)
6.	Kebutuhan oksigen biokimiawi (BOD)	mg/L	2	3	6	12	

7. Kebutuhan . . .



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

- 2 -

No	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
7.	Kebutuhan oksigen kimiawi (COD)	mg/L	10	25	40	80	
8.	Oksigen terlarut (DO)	mg/L	6	4	3	1	Batas minimal
9.	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/L	300	300	300	400	
10.	Klorida (Cl ⁻)	mg/L	300	300	300	600	
11.	Nitrat (sebagai N)	mg/L	10	10	20	20	
12.	Nitrit (sebagai N)	mg/L	0,06	0,06	0,06	-	
13.	Amoniak (sebagai N)	mg/L	0,1	0,2	0,5	-	
14.	Total Nitrogen	mg/L	15	15	25	-	
15.	Total Fosfat (sebagai P)	mg/L	0,2	0,2	1,0	-	
16.	Fluorida (F ⁻)	mg/L	1	1,5	1,5	-	
17.	Belerang sebagai H ₂ S	mg/L	0,002	0,002	0,002	-	
18.	Sianida (CN ⁻)	mg/L	0,02	0,02	0,02	-	
19.	Klorin bebas	mg/L	0,03	0,03	0,03	-	Bagi air baku air minum tidak dipersyaratkan
20.	Barium (Ba) terlarut	mg/L	1,0	-	-	-	
21.	Boron (B) terlarut	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	
22.	Merkuri (Hg) terlarut	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,005	
23.	Arsen (As) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,10	
24.	Selenium (Se) terlarut	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,05	
25.	Besi (Fe) terlarut	mg/L	0,3	-	-	-	
26.	Kadmium (Cd) terlarut	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	

27. Kobalt . . .



**PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA**

- 3 -

No	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
27.	Kobalt (Co) terlarut	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	
28.	Mangan (Mn) terlarut	mg/L	0,1	-	-	-	
29.	Nikel (Ni) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,1	
30.	Seng (Zn) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	2	
31.	Tembaga (Cu) terlarut	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,2	
32.	Timbal (Pb) terlarut	mg/L	0,03	0,03	0,03	0,5	
33.	Kromium heksavalen (Cr-VI)	mg/L	0,05	0,05	0,05	1	
34.	Minyak dan lemak	mg/L	1	1	1	10	
35.	Deterjen total	mg/L	0,2	0,2	0,2	-	
36.	Fenol	mg/L	0,002	0,005	0,01	0,02	
37.	Aldrin/ Dieldrin	µg/L	17	-	-	-	
38.	BHC	µg/L	210	210	210	-	
39.	Chlordane	µg/L	3	-	-	-	
40.	DDT	µg/L	2	2	2	2	
41.	Endrin	µg/L	1	4	4	-	
42.	Heptachlor	µg/L	18	-	-	-	
43.	Lindane	µg/L	56	-	-	-	
44.	Methoxychlor	µg/L	35	-	-	-	
45.	Toxapan	µg/L	5	-	-	-	
46.	Fecal Coliform	MPN/100 mL	100	1.000	2.000	2.000	
47.	Total Coliform	MPN/100 mL	1.000	5.000	10.000	10.000	
48.	Sampah		nihil	nihil	nihil	nihil	
49.	Radioaktivitas						
	Gross-A	Bq/L	0,1	0,1	0,1	0,1	
	Gross-B	Bq/L	1	1	1	1	

II. BAKU . . .



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

- 4 -

II. BAKU MUTU AIR DANAU DAN SEJENISNYA

No.	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
1.	Temperatur	°C	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Dev 3	Perbedaan dengan suhu udara di atas permukaan air
2.	Padatan terlarut total (TDS)	mg/L	1.000	1.000	1.000	1.000	
3.	Padatan tersuspensi total (TSS)	mg/L	25	50	100	400	
4.	Transparansi	m	10	4	2,5	-	
5.	Warna	Pt-Co Unit	15	50	100	-	
6.	Derajat keasaman (pH)		6-9	6-9	6-9	6-9	Tidak berlaku untuk air gambut (berdasarkan kondisi alaminya)
7.	Kebutuhan oksigen biokimiawi (BOD)	mg/L	2	3	6	12	
8.	Kebutuhan oksigen kimiawi (COD)	mg/L	10	25	40	80	
9.	Oksigen terlarut (DO)	mg/L	6	4	3	1	Batas minimal
10.	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/L	300	300	300	400	
11.	Klorida (Cl ⁻)	mg/L	300	300	300	600	

12. Total . . .



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

- 5 -

No.	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
12.	Total Nitrogen	mg/L	0,65	0,75	1,90	-	
13.	Total Fosfat (sebagai P)	mg/L	0,01	0,03	0,1	-	
14.	Fluorida (F ⁻)	mg/L	1	1,5	1,5	-	
15.	Belerang sebagai H ₂ S	mg/L	0,002	0,002	0,002	-	
16.	Sianida (CN ⁻)	mg/L	0,02	0,02	0,02	-	
17.	Klorin bebas	mg/L	0,03	0,03	0,03	-	Bagi air baku air minum tidak dipersyaratkan
18.	Barium (Ba) terlarut	mg/L	1,0	-	-	-	
19.	Boron (B) terlarut	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	
20.	Merkuri (Hg) terlarut	mg/L	0,001	0,002	0,002	0,005	
21.	Arsen (As) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,1	
22.	Selenium (Se) terlarut	mg/L	0,01	0,05	0,05	0,05	
23.	Besi (Fe) terlarut	mg/L	0,3	-	-	-	
24.	Kadmium (Cd) terlarut	mg/L	0,01	0,01	0,01	0,01	
25.	Kobalt (Co) terlarut	mg/L	0,2	0,2	0,2	0,2	
26.	Mangan (Mn) terlarut	mg/L	0,4	0,4	0,5	1,0	
27.	Nikel (Ni) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,1	

28. Seng . . .



**PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA**

- 6 -

No.	Parameter	Unit	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 4	Keterangan
28.	Seng (Zn) terlarut	mg/L	0,05	0,05	0,05	2,0	
29.	Tembaga (Cu) terlarut	mg/L	0,02	0,02	0,02	0,2	
30.	Timbal (Pb) terlarut	mg/L	0,03	0,03	0,03	0,5	
31.	Kromium heksavalen (Cr-(VI))	mg/L	0,05	0,05	0,05	1	
32.	Minyak dan lemak	mg/L	1	1	1	10	
33.	Deterjen total	mg/L	0,2	0,2	0,2	-	
34.	Fenol	mg/L	0,002	0,005	0,01	0,02	
35.	Aldrin/ Dieldrin	µg/L	17	-	-	-	
36.	BHC	µg/L	210	210	210	-	
37.	Chlordane	µg/L	3	-	-	-	
38.	DDT	µg/L	2	2	2	2	
39.	Endrin	µg/L	1	4	4	-	
40.	Heptachlor	µg/L	18	-	-	-	
41.	Lindane	µg/L	56	-	-	-	
42.	Methoxychlor	µg/L	35	-	-	-	
43.	Toxapan	µg/L	5	-	-	-	
44.	Fecal Coliform	MPN/100 mL	100	1.000	2.000	2.000	
45.	Total Coliform	MPN/100 mL	1.000	5.000	10.000	10.000	
46.	Klorofil-a	mg/m ³	10	50	100	200	
47.	Sampah		nihil	nihil	nihil	nihil	
48.	Radioaktivitas						
	Gross-A	Bq/L	0,1	0,1	0,1	0,1	
	Gross-B	Bq/L	1	1	1	1	

Keterangan . . .



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

- 7 -

Keterangan:

Kelas satu merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk air baku air minum, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Kelas dua merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk prasarana/sarana rekreasi air, pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi pertanaman, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Kelas tiga merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk pembudidayaan ikan air tawar, peternakan, air untuk mengairi tanaman, dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

Kelas empat merupakan air yang peruntukannya dapat digunakan untuk mengairi pertanaman dan/atau peruntukan lain yang mempersyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut.

PRESIDEN REPUBLIK INDONESIA,

ttd.

JOKO WIDODO

Salinan sesuai dengan aslinya

KEMENTERIAN SEKRETARIAT NEGARA
REPUBLIK INDONESIA

Deputi Bidang Perundang-undangan dan
Administrasi Hukum,



Silvanna Djaman



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

LAMPIRAN VIII
PERATURAN PEMERINTAH REPUBLIK INDONESIA
NOMOR 22 TAHUN 2021
TENTANG
PENYELENGGARAAN PERLINDUNGAN DAN
PENGELOLAAN LINGKUNGAN HIDUP

BAKU MUTU AIR LAUT

NO	PARAMETER	SATUAN	PELABUHAN	WISATA BAHARI	BIOTA LAUT
1.	Warna	Pt. Co	-	30	-
2.	Kecerahan	m	>3	>6	<i>coral</i> : >5 <i>mangrove</i> : - lamun: >3
3.	Kekeruhan	NTU	-	5	5
4.	Kebauan	-	tidak berbau	tidak berbau	Alami
5.	Padatan tersuspensi total	mg/L	80	20	<i>coral</i> : 20 <i>mangrove</i> : 80 lamun: 20
6.	Sampah	-	Nihil	Nihil	Nihil
7.	Suhu	°C	alami	Alami	alami <i>coral</i> : 28-30 <i>mangrove</i> : 28-32 lamun: 28-30
8.	Lapisan minyak	-	Nihil	Nihil	nihil
9.	pH	-	6,5 - 8,5	7 - 8,5	7 - 8,5
10.	Salinitas	‰	alami	Alami	alami <i>coral</i> : 33-34 <i>mangrove</i> : s/d 34 lamun: 33-34

11. Oksigen . . .



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

- 2 -

NO	PARAMETER	SATUAN	PELABUHAN	WISATA BAHARI	BIOTA LAUT
11.	Oksigen terlarut (DO, <i>dissolved oxygen</i>)	mg/L	-	>5	>5
12.	BOD ₅ (Kebutuhan Oksigen Biokimia, KOB)	mg/L	-	10	20
13.	Amonia total (NH ₃ -N)	mg/L	0,3	0,02	0,3
14.	Ortofosfat (PO ₄ -P)	mg/L	-	0,015	0,015
15.	Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	-	0,06	0,06
16.	Sianida (CN-)	mg/L	-	-	0,5
17.	Sulfida (H ₂ S)	mg/L	0,03	0,002	0,01
18.	Hidrokarbon Petroleum Total (TPH)	mg/L	1	-	0,02
19.	Senyawa Fenol total	mg/L	0,002	0,001	0,002
20.	PAH (Poliaromatik hidrokarbon)	mg/L	-	0,003	0,003
21.	PCB (poliklor bifenil)	µg/L	0,01	0,005	0,01
22.	Surfaktan (deterjen) sebagai MBAS	mg/L	1	0,001	1
23.	Minyak dan Lemak	mg/L	5	1	1

24. Pestisida . . .



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

- 3 -

NO	PARAMETER	SATUAN	PELABUHAN	WISATA BAHARI	BIOTA LAUT
24.	Pestisida				
	a. BHC	µg/L	-	210	210
	b. Aldrin / Dieldrin	µg/L	-	17	-
	c. Chlordane	µg/L	-	3	-
	d. DDT	µg/L	-	2	2
	e. Heptachlor	µg/L	-	18	-
	f. Lindane	µg/L	-	56	-
	g. Methoxy-chlor	µg/L	-	35	-
	h. Endrin	µg/L	-	1	4
	i. Toxaphan	µg/L	-	5	-
25.	TBT (tri butil tin)	µg/L	0,01	-	0,01
26.	Raksa (Hg)	mg/L	0,003	0,002	0,001
27.	Kromium heksavalen (Cr(VI))	mg/L	-	0,002	0,005
28.	Arsen (As)	mg/L	-	0,025	0,012
29.	Kadmium (Cd)	mg/L	0,01	0,002	0,001
30.	Tembaga (Cu)	mg/L	0,05	0,05	0,008
31.	Timbal (Pb)	mg/L	0,05	0,005	0,008
32.	Seng (Zn)	mg/L	0,1	0,095	0,05
33.	Nikel (Ni)	mg/L	-	0,075	0,05
34.	Fecal coliform	Jml/100 mL	-	200	-

35. Coliform . . .



PRESIDEN
REPUBLIK INDONESIA

- 4 -

NO	PARAMETER	SATUAN	PELABUHAN	WISATA BAHARI	BIOTA LAUT
35.	Coliform (total)	Jml/100 mL	1000	1000	1000
36.	Patogen	sel/100 mL	-	nihil	nihil
37.	Fitoplankton	sel/mL	-	1000	1000
38.	Radioaktifitas	Bq/L	-	4	4

Keterangan:

1. Alami adalah kondisi normal di alam, yang bervariasi dalam sehari (siang, malam) atau bervariasi karena musim. Data pemantauan sebagai acuan.
 - a. Untuk suhu, diperbolehkan terjadi perubahan sampai dengan 2°C (dua derajat Celcius) dari suhu alami.
 - b. Untuk salinitas, diperbolehkan terjadi perubahan sampai dengan 5% (lima persen) dari salinitas rata-rata musiman.
2. Fitoplankton bila melebihi 1000 sel/ml (seribu sel per milliliter) perlu disebutkan minimal 5 (lima) jenis fitoplankton yang melimpah, apakah termasuk kelompok *Harmful Algal Blooms* (HABs).

PRESIDEN REPUBLIK INDONESIA,

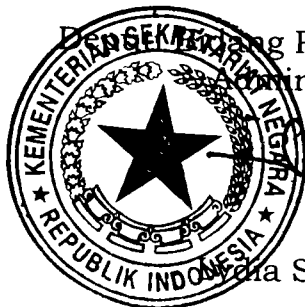
ttd.

JOKO WIDODO

Salinan sesuai dengan aslinya

KEMENTERIAN SEKRETARIAT NEGARA
REPUBLIK INDONESIA

Direktori Perundang-undangan dan
Administrasi Hukum,



Silvanna Djaman

LAMPIRAN B
(SNI/*STANDARD*
***METHODE*)**

LAMPIRAN B.1
(STANDARD METHODE
FOR THE EXAMINATION
OF WATER AND
WASTEWATER 22TH
EDITION 2012 PART 3111)

Standard Methods

FOR THE

Examination
of Water and
Wastewater

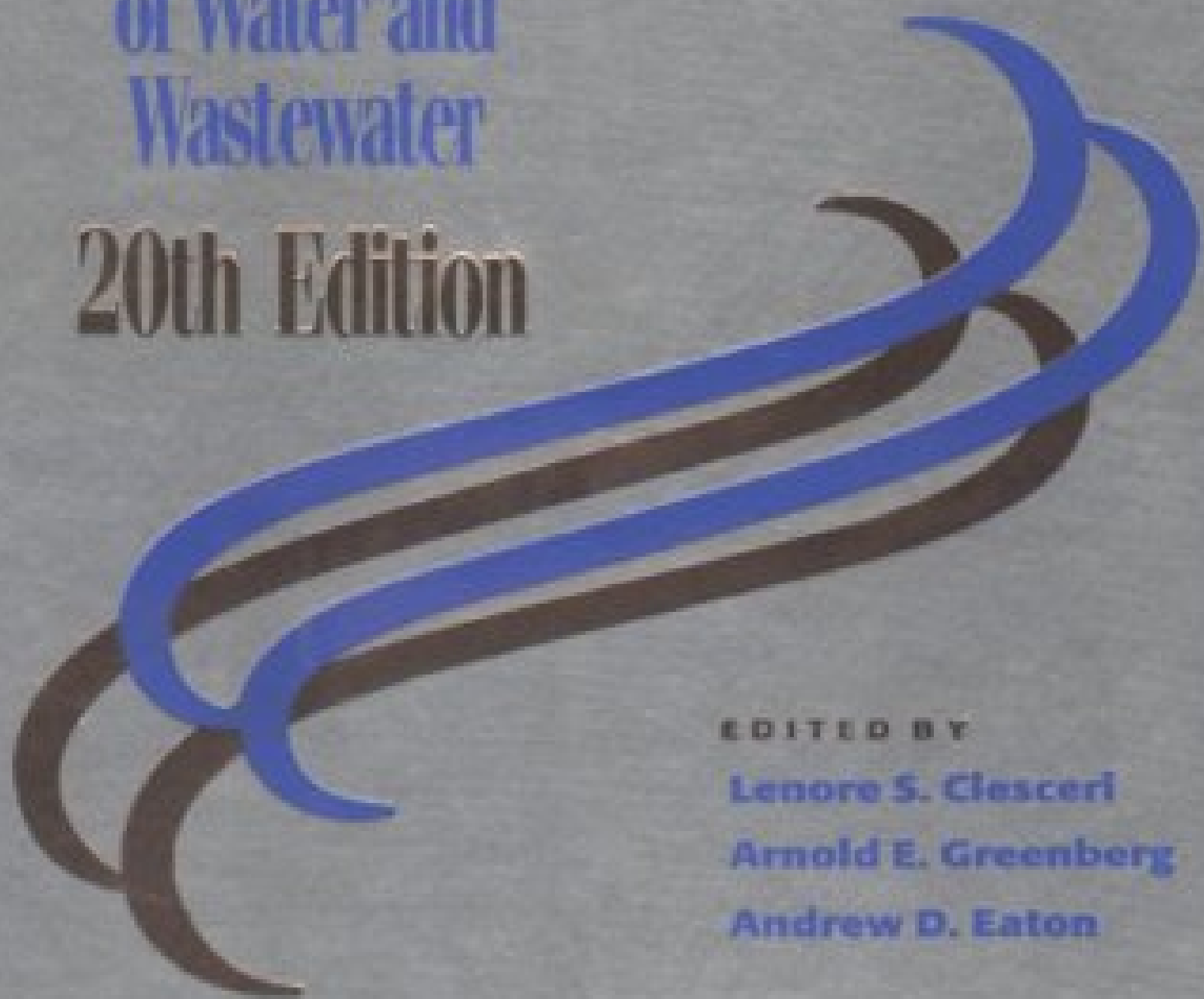
20th Edition

EDITED BY

Lenore S. Clesceri

Arnold E. Greenberg

Andrew D. Eaton



Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

little metal is present add an amount close to the middle of the linear range of the test. Recovery of added metal should be between 85 and 115%.

Analyze an additional standard solution after every ten samples or with each batch of samples, whichever is less, to confirm that the test is in control. Recommended concentrations of standards to be run, limits of acceptability, and reported single-operator precision data are listed in Table 3111:III.

See Section 3020 for additional recommended quality control procedures.

8. References

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1986. Annual Book of ASTM Standards, Volume 11.01, Water and Environmental Technology. American Soc. Testing & Materials, Philadelphia, Pa.
2. U.S. DEPARTMENT HEALTH, EDUCATION AND WELFARE. 1970. Water Metals No. 6, Study No. 37. U.S. Public Health Serv. Publ. No. 2029, Cincinnati, Ohio.
3. U.S. DEPARTMENT HEALTH, EDUCATION AND WELFARE. 1968. Water Metals No. 4, Study No. 30. U.S. Public Health Serv. Publ. No. 999-UTH-8, Cincinnati, Ohio.
4. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1983. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. Cincinnati, Ohio.

9. Bibliography

- KAHN, H.L. 1968. Principles and Practice of Atomic Absorption. Advan. Chem. Ser. No. 73, Div. Water, Air & Waste Chemistry, American Chemical Soc., Washington, D.C.
- RAMIRIZ-MUNOZ, J. 1968. Atomic Absorption Spectroscopy and Analysis by Atomic Absorption Flame Photometry. American Elsevier Publishing Co., New York, N.Y.
- SLAVIN, W. 1968. Atomic Absorption Spectroscopy. John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- PAUS, P.E. 1971. The application of atomic absorption spectroscopy to the analysis of natural waters. *Atomic Absorption Newsletter* 10:69.
- EDIGER, R.D. 1973. A review of water analysis by atomic absorption. *Atomic Absorption Newsletter* 12:151.
- PAUS, P.E. 1973. Determination of some heavy metals in seawater by atomic absorption spectroscopy. *Fresenius Zeitschr. Anal. Chem.* 264:118.
- BURRELL, D.C. 1975. Atomic Spectrometric Analysis of Heavy-Metal Pollutants in Water. Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor, Mich.

3111 B. Direct Air-Acetylene Flame Method

1. General Discussion

This method is applicable to the determination of antimony, bismuth, cadmium, calcium,

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

cesium, chromium, cobalt, copper, gold, iridium, iron, lead, lithium, magnesium, manganese, nickel, palladium, platinum, potassium, rhodium, ruthenium, silver, sodium, strontium, thallium, tin, and zinc.

2. Apparatus

Atomic absorption spectrometer and associated equipment: See Section 3111A.6. Use burner head recommended by the manufacturer.

3. Reagents

a. *Air*, cleaned and dried through a suitable filter to remove oil, water, and other foreign substances. The source may be a compressor or commercially bottled gas.

b. *Acetylene*, standard commercial grade. Acetone, which always is present in acetylene cylinders, can be prevented from entering and damaging the burner head by replacing a cylinder when its pressure has fallen to 689 kPa (100 psi) acetylene.

CAUTION: *Acetylene gas represents an explosive hazard in the laboratory. Follow instrument manufacturer's directions in plumbing and using this gas. Do not allow gas contact with copper, brass with >65% copper, silver, or liquid mercury; do not use copper or brass tubing, regulators, or fittings.*

c. *Metal-free water:* Use metal-free water for preparing all reagents and calibration standards and as dilution water. Prepare metal-free water by deionizing tap water and/or by using one of the following processes, depending on the metal concentration in the sample: single distillation, redistillation, or sub-boiling. Always check deionized or distilled water to determine whether the element of interest is present in trace amounts. (NOTE: *If the source water contains Hg or other volatile metals, single- or redistilled water may not be suitable for trace analysis because these metals distill over with the distilled water. In such cases, use sub-boiling to prepare metal-free water.*)

d. *Calcium solution:* Dissolve 630 mg calcium carbonate, CaCO_3 , in 50 mL of 1 + 5 HCl. If necessary, boil gently to obtain complete solution. Cool and dilute to 1000 mL with water.

e. *Hydrochloric acid*, HCl, 1%, 10%, 20% (all v/v), 1 + 5, 1 + 1, and conc.

f. *Lanthanum solution:* Dissolve 58.65 g lanthanum oxide, La_2O_3 , in 250 mL conc HCl. Add acid slowly until the material is dissolved and dilute to 1000 mL with water.

g. *Hydrogen peroxide*, 30%.

h. *Nitric acid*, HNO_3 , 2% (v/v), 1 + 1, and conc.

i. *Aqua regia:* Add 3 volumes conc HCl to 1 volume conc HNO_3 .

j. *Standard metal solutions:* Prepare a series of standard metal solutions in the optimum concentration range by appropriate dilution of the following stock metal solutions with water containing 1.5 mL conc HNO_3 /L. Stock standard solutions are available from a number of commercial suppliers. Alternatively, prepare as described below. Thoroughly dry reagents before

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

use. In general, use reagents of the highest purity. For hydrates, use fresh reagents.

- 1) *Antimony*: Dissolve 0.2669 g $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ in water, add 10 mL 1 + 1 HCl and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Sb.
- 2) *Bismuth*: Dissolve 0.100 g bismuth metal in a minimum volume of 1 + 1 HNO_3 . Dilute to 1000 mL with 2% (v/v) HNO_3 ; 1.00 mL = 100 μg Bi.
- 3) *Cadmium*: Dissolve 0.100 g cadmium metal in 4 mL conc HNO_3 . Add 8.0 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Cd.
- 4) *Calcium*: Suspend 0.2497 g CaCO_3 (dried at 180° for 1 h before weighing) in water and dissolve cautiously with a minimum amount of 1 + 1 HNO_3 . Add 10.0 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Ca.
- 5) *Cesium*: Dissolve 0.1267 g cesium chloride, CsCl, in 1000 mL water; 1.00 mL = 100 μg Cs.
- 6) *Chromium*: Dissolve 0.1923 g CrO_3 in water. When solution is complete, acidify with 10 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Cr.
- 7) *Cobalt*: Dissolve 0.1000 g cobalt metal in a minimum amount of 1 + 1 HNO_3 . Add 10.0 mL 1 + 1 HCl and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Co.
- 8) *Copper*: Dissolve 0.100 g copper metal in 2 mL conc HNO_3 , add 10.0 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Cu.
- 9) *Gold*: Dissolve 0.100 g gold metal in a minimum volume of aqua regia. Evaporate to dryness, dissolve residue in 5 mL conc HCl, cool, and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Au.
- 10) *Iridium*: Dissolve 0.1147 g ammonium chloroiridate, $(\text{NH}_4)_2\text{IrCl}_6$, in a minimum volume of 1% (v/v) HCl and dilute to 100 mL with 1% (v/v) HCl; 1.00 mL = 500 μg Ir.
- 11) *Iron*: Dissolve 0.100 g iron wire in a mixture of 10 mL 1 + 1 HCl and 3 mL conc HNO_3 . Add 5 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Fe.
- 12) *Lead*: Dissolve 0.1598 g lead nitrate, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, in a minimum amount of 1 + 1 HNO_3 , add 10 mL conc HNO_3 , and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Pb.
- 13) *Lithium*: Dissolve 0.5323 g lithium carbonate, Li_2CO_3 , in a minimum volume of 1 + 1 HNO_3 . Add 10.0 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Li.
- 14) *Magnesium*: Dissolve 0.1658 g MgO in a minimum amount of 1 + 1 HNO_3 . Add 10.0 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Mg.
- 15) *Manganese*: Dissolve 0.1000 g manganese metal in 10 mL conc HCl mixed with 1 mL

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

conc HNO_3 . Dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Mn.

16) *Nickel*: Dissolve 0.1000 g nickel metal in 10 mL hot conc HNO_3 , cool, and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Ni.

17) *Palladium*: Dissolve 0.100 g palladium wire in a minimum volume of aqua regia and evaporate just to dryness. Add 5 mL conc HCl and 25 mL water and warm until dissolution is complete. Dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Pd.

18) *Platinum*: Dissolve 0.100 g platinum metal in a minimum volume of aqua regia and evaporate just to dryness. Add 5 mL conc HCl and 0.1 g NaCl and again evaporate just to dryness. Dissolve residue in 20 mL of 1 + 1 HCl and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Pt.

19) *Potassium*: Dissolve 0.1907 g potassium chloride, KCl, (dried at 110°C) in water and make up to 1000 mL; 1.00 mL = 100 μg K.

20) *Rhodium*: Dissolve 0.386 g ammonium hexachlororhodate, $(\text{NH}_4)_3\text{RhCl}_6 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$, in a minimum volume of 10% (v/v) HCl and dilute to 1000 mL with 10% (v/v) HCl; 1.00 mL = 100 μg Rh.

21) *Ruthenium*: Dissolve 0.205 g ruthenium chloride, RuCl_3 , in a minimum volume of 20% (v/v) HCl and dilute to 1000 mL with 20% (v/v) HCl; 1.00 mL = 100 μg Ru.

22) *Silver*: Dissolve 0.1575 g silver nitrate, AgNO_3 , in 100 mL water, add 10 mL conc HNO_3 , and make up to 1000 mL; 1.00 mL = 100 μg Ag.

23) *Sodium*: Dissolve 0.2542 g sodium chloride, NaCl, dried at 140°C, in water, add 10 mL conc HNO_3 and make up to 1000 mL; 1.00 mL = 100 μg Na.

24) *Strontium*: Suspend 0.1685 g SrCO_3 in water and dissolve cautiously with a minimum amount of 1 + 1 HNO_3 . Add 10.0 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water: 1 mL = 100 μg Sr.

25) *Thallium*: Dissolve 0.1303 g thallium nitrate, TlNO_3 , in water. Add 10 mL conc HNO_3 and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Tl.

27) *Zinc*: Dissolve 0.100 g zinc metal in 20 mL 1 + 1 HCl and dilute to 1000 mL with water; 1.00 mL = 100 μg Zn.

4. Procedure

a. *Sample preparation*: Required sample preparation depends on the metal form being measured.

If dissolved metals are to be determined, see Section 3030B for sample preparation. If total or acid-extractable metals are to be determined, see Section 3030C through K. For all samples, make certain that the concentrations of acid and matrix modifiers are the same in both samples and standards.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

When determining Ca or Mg, dilute and mix 100 mL sample or standard with 10 mL lanthanum solution (§ 3 f) before aspirating. When determining Fe or Mn, mix 100 mL with 25 mL of Ca solution (§ 3 d) before aspirating. When determining Cr, mix 1 mL 30% H₂O₂ with each 100 mL before aspirating. Alternatively use proportionally smaller volumes.

b. Instrument operation: Because of differences between makes and models of atomic absorption spectrometers, it is not possible to formulate instructions applicable to every instrument. See manufacturer's operating manual. In general, proceed according to the following: Install a hollow-cathode lamp for the desired metal in the instrument and roughly set the wavelength dial according to Table 3111:I. Set slit width according to manufacturer's suggested setting for the element being measured. Turn on instrument, apply to the hollow-cathode lamp the current suggested by the manufacturer, and let instrument warm up until energy source stabilizes, generally about 10 to 20 min. Readjust current as necessary after warmup. Optimize wavelength by adjusting wavelength dial until optimum energy gain is obtained. Align lamp in accordance with manufacturer's instructions.

Install suitable burner head and adjust burner head position. Turn on air and adjust flow rate to that specified by manufacturer to give maximum sensitivity for the metal being measured. Turn on acetylene, adjust flow rate to value specified, and ignite flame. Let flame stabilize for a few minutes. Aspirate a blank consisting of deionized water containing the same concentration of acid in standards and samples. Zero the instrument. Aspirate a standard solution and adjust aspiration rate of the nebulizer to obtain maximum sensitivity. Adjust burner both vertically and horizontally to obtain maximum response. Aspirate blank again and rezero the instrument. Aspirate a standard near the middle of the linear range. Record absorbance of this standard when freshly prepared and with a new hollow-cathode lamp. Refer to these data on subsequent determinations of the same element to check consistency of instrument setup and aging of hollow-cathode lamp and standard.

The instrument now is ready to operate. When analyses are finished, extinguish flame by turning off first acetylene and then air.

c. Standardization: Select at least three concentrations of each standard metal solution (prepared as in § 3 j above) to bracket the expected metal concentration of a sample. Aspirate blank and zero the instrument. Then aspirate each standard in turn into flame and record absorbance.

Prepare a calibration curve by plotting on linear graph paper absorbance of standards versus their concentrations. For instruments equipped with direct concentration readout, this step is unnecessary. With some instruments it may be necessary to convert percent absorption to absorbance by using a table generally provided by the manufacturer. Plot calibration curves for Ca and Mg based on original concentration of standards before dilution with lanthanum solution. Plot calibration curves for Fe and Mn based on original concentration of standards before dilution with Ca solution. Plot calibration curve for Cr based on original concentration of standard before addition of H₂O₂.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

d. Analysis of samples: Rinse nebulizer by aspirating water containing 1.5 mL conc HNO_3 /L. Aspirate blank and zero instrument. Aspirate sample and determine its absorbance.

5. Calculations

Calculate concentration of each metal ion, in micrograms per liter for trace elements, and in milligrams per liter for more common metals, by referring to the appropriate calibration curve prepared according to ¶ 4c. Alternatively, read concentration directly from the instrument readout if the instrument is so equipped. If the sample has been diluted, multiply by the appropriate dilution factor.

6. Bibliography

WILLIS, J.B. 1962. Determination of lead and other heavy metals in urine by atomic absorption spectrophotometry. *Anal. Chem.* 34:614.

Also see Section 3111A.8 and Section 3111A.9.

3111 C. Extraction/Air-Acetylene Flame Method

1. General Discussion

This method is suitable for the determination of low concentrations of cadmium, chromium, cobalt, copper, iron, lead, manganese, nickel, silver, and zinc. The method consists of chelation with ammonium pyrrolidine dithiocarbamate (APDC) and extraction into methyl isobutyl ketone (MIBK), followed by aspiration into an air-acetylene flame.

2. Apparatus

- a. Atomic absorption spectrometer and associated equipment:* See Section 3111A.6.
- b. Burner head,* conventional. Consult manufacturer's operating manual for suggested burner head.

3. Reagents

- a. Air:* See Section 3111B.3a.
- b. Acetylene:* See Section 3111B.3b.
- c. Metal-free water:* See Section 3111B.3c.
- d. Methyl isobutyl ketone (MIBK),* reagent grade. For trace analysis, purify MIBK by redistillation or by sub-boiling distillation.
- e. Ammonium pyrrolidine dithiocarbamate (APDC) solution:* Dissolve 4 g APDC in 100 mL water. If necessary, purify APDC with an equal volume of MIBK. Shake 30 s in a separatory funnel, let separate, and withdraw lower portion. Discard MIBK layer.
- f. Nitric acid,* HNO_3 , conc, ultrapure.

LAMPIRAN B.2
(SNI 6989.6:2009)

Air dan air limbah – Bagian 6: Cara uji tembaga (Cu) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) – nyala



Daftar isi

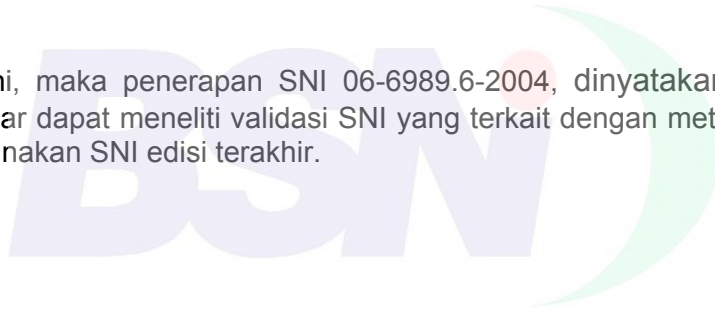
Daftar isi	i
Prakata	ii
1 Ruang lingkup	1
2 Istilah dan definisi.....	1
3 Cara uji.....	2
4 Pengendalian mutu.....	5
5 Presisi dan bias	6
6 Rekomendasi.....	6
Lampiran A (normatif) Pelaporan.....	7
Lampiran B (informatif) Pemakaian asam lain bersama dengan asam nitrat untuk persiapan contoh uji.....	8
Bibliografi.....	9
Tabel B.1 – Pemakaian asam lain bersama dengan asam nitrat untuk persiapan contoh uji.....	8

Prakata

Standar Nasional Indonesia (SNI) ini merupakan hasil revisi dari SNI 06-6989.6-2004, *Air dan air limbah - Bagian 6: Cara uji tembaga (Cu) dengan alat Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala*. SNI ini menggunakan referensi dari metode standar internasional yaitu *Standard Methods for the Examination Of Water and Wastewater 21 th Edition*, editor L.S.Clesceri, A.E.Greenberg, A.D.Eaton, APHA, AWWA and WPCF, Washington DC (2005), *Electrothermal Atomic Absorption Spectrofotometric Method*. SNI ini telah melalui uji coba di laboratorium pengujian dalam rangka validasi dan verifikasi metode serta dikonsensuskan oleh Subpanitia Teknis 13-03-S1, *Kualitas Air* dari Panitia Teknis 13-03, *Kualitas Lingkungan dan Manajemen Lingkungan* dengan para pihak terkait.

SNI ini telah disepakati dan disetujui dalam rapat konsensus dengan peserta rapat yang mewakili produsen, konsumen, ilmuwan, instansi teknis dan pemerintah terkait pada tanggal 11 September 2007 di Serpong. Selanjutnya SNI ini telah melalui tahap jajak pendapat pada tanggal 11 Juni 2008 sampai dengan 11 Agustus 2008. Kemudian SNI ini telah melalui tahap jajak pendapat pada tanggal 18 Maret 2009 sampai dengan 18 Juni 2009, dengan hasil akhir RASNI.

Dengan ditetapkannya SNI ini, maka penerapan SNI 06-6989.6-2004, dinyatakan tidak berlaku lagi. Pemakai SNI agar dapat meneliti validasi SNI yang terkait dengan metode ini, sehingga dapat selalu menggunakan SNI edisi terakhir.



Air dan air limbah – Bagian 6: Cara uji tembaga (Cu) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala

1 Ruang lingkup

Metode ini digunakan untuk penentuan logam tembaga (Cu) total dan terlarut dalam air dan air limbah secara spektrofotometri serapan atom-nyala (SSA) pada kisaran kadar Cu 0,2 mg/L sampai dengan 10 mg/L dengan panjang gelombang 324,7 nm.

2 Istilah dan definisi

2.1

air bebas mineral

air yang diperoleh dengan cara penyulingan ataupun proses demineralisasi sehingga diperoleh air dengan konduktivitas lebih kecil dari 2 $\mu\text{S}/\text{cm}$

2.2

blind sample

larutan baku dengan kadar analit tertentu yang diperlakukan seperti contoh uji

2.3

kurva kalibrasi

grafik yang menyatakan hubungan kadar larutan kerja dengan hasil pembacaan serapan yang merupakan garis lurus

2.4

larutan induk logam tembaga (Cu)

larutan yang mempunyai kadar logam tembaga 100 mg Cu/L yang digunakan untuk membuat larutan baku dengan kadar yang lebih rendah

2.5

larutan baku logam tembaga (Cu)

larutan induk logam tembaga yang diencerkan dengan air bebas mineral sampai kadar tertentu

2.6

larutan kerja logam tembaga (Cu)

larutan baku logam tembaga yang diencerkan, digunakan untuk membuat kurva kalibrasi

2.7

larutan blanko

air bebas mineral yang perlakuannya sama dengan contoh uji

2.8

larutan pengencer

larutan yang digunakan untuk mengencerkan larutan kerja, yang dibuat dengan cara menambahkan asam nitrat pekat ke dalam air bebas mineral hingga pH ≤ 2

2.9

larutan pencuci

larutan yang digunakan untuk mencuci semua peralatan gelas dan plastik

2.10

spike matrix

contoh uji yang diperkaya dengan larutan baku dengan kadar tertentu

2.11

tembaga terlarut

tembaga dalam air yang dapat lolos melalui saringan membran berpori 0,45 µm

2.12

tembaga total

tembaga yang terlarut dan tersuspensi dalam air setelah dilakukan proses pemanasan dengan asam kuat

3 Cara uji

3.1 Prinsip

Analit logam tembaga dalam nyala udara asetilen diubah menjadi bentuk atomnya, menyerap energi radiasi elektromagnetik yang berasal dari lampu katoda dan besarnya serapan berbanding lurus dengan kadar analit.

3.2 Bahan

- a) air bebas mineral;
- b) asam nitrat (HNO₃) pekat p.a;
- c) logam tembaga (Cu) dengan kemurnian minimum 99,7%;
- d) gas asetilen (C₂H₂) HP dengan tekanan minimum 100 psi;
- e) larutan pengencer HNO₃ 0,05 M;
Larutkan 3,5 mL HNO₃ pekat ke dalam 1000 mL air bebas mineral dalam gelas piala.
- f) larutan pencuci HNO₃ 5% (v/v);
Tambahkan 50 mL asam nitrat pekat ke dalam 800 mL air bebas mineral dalam gelas piala 1000 mL, lalu tambahkan air bebas mineral hingga 1000 mL dan homogenkan.
- g) larutan kalsium
Larutkan 630 mg kalsium karbonat (CaCO₃) dalam 50 mL HCl (1+5). Bila perlu larutan dididihkan untuk menyempurnakan larutan. Dinginkan dan encerkan dengan air bebas mineral hingga 1 liter.
- h) udara tekan.

3.3 Peralatan

- a) Spektrofotometer Serapan Atom (SSA)-nyala;
- b) lampu katoda berongga (*Hollow Cathode Lamp*, HCL) tembaga;
- c) gelas piala 100 mL dan 250 mL;
- d) pipet volumetrik 10,0 mL; dan 50,0 mL;
- e) labu ukur 50,0 mL; 100,0 mL dan 1000,0 mL;
- f) *Erlenmeyer* 100 mL;
- g) corong gelas;
- h) kaca arloji;
- i) pemanas listrik;
- j) seperangkat alat saring vakum;
- k) saringan membran dengan ukuran pori 0,45 µm;
- l) timbangan analitik dengan ketelitian 0,0001 g; dan
- m) labu semprot.

3.4 Pengawetan contoh uji

Bila contoh uji tidak dapat segera diuji, maka contoh uji diawetkan sesuai petunjuk di bawah ini:

Wadah	:	Botol plastik (<i>polyethylene</i>) atau botol gelas
Pengawet	:	a) Untuk logam terlarut, saring dengan saringan membran berpori 0,45 μm dan diasamkan dengan HNO_3 hingga $\text{pH} \leq 2$. b) Untuk logam total, asamkan dengan HNO_3 hingga $\text{pH} \leq 2$.
Lama Penyimpanan	:	6 bulan
Kondisi Penyimpanan	:	Suhu ruang

3.5 Persiapan pengujian

3.5.1 Persiapan contoh uji tembaga terlarut

Siapkan contoh uji yang telah disaring dengan saringan membran berpori 0,45 μm dan diawetkan. Contoh uji siap diukur.

3.5.2 Persiapan contoh uji tembaga total

Siapkan contoh uji untuk pengujian tembaga total, dengan tahapan sebagai berikut:

- homogenkan contoh uji, pipet 50,0 mL contoh uji dan masukkan ke dalam gelas piala 100 mL atau *Erlenmeyer* 100 mL;
- tambahkan 5 mL HNO_3 pekat, bila menggunakan gelas piala, tutup dengan kaca arloji dan bila dengan *Erlenmeyer* gunakan corong sebagai penutup;
- panaskan perlahan-lahan sampai sisa volumenya 15 mL - 20 mL;
- jika destruksi belum sempurna (tidak jernih), maka tambahkan lagi 5 mL HNO_3 pekat, kemudian tutup gelas piala dengan kaca arloji atau tutup *Erlenmeyer* dengan corong dan panaskan lagi (tidak mendidih). Lakukan proses ini secara berulang sampai semua logam larut, yang terlihat dari warna endapan dalam contoh uji menjadi agak putih atau contoh uji menjadi jernih;

CATATAN Jika destruksi tidak sempurna, lihat tabel pada Lampiran B.

- bilas kaca arloji dan masukkan air bilasannya ke dalam gelas piala;
- pindahkan contoh uji ke dalam labu ukur 50,0 mL (saring bila perlu) dan tambahkan air bebas mineral sampai tepat tanda tera dan dihomogenkan;

CATATAN Tambahkan *matrix modifier* (larutan kalsium) dan atau atasi gangguan pengukuran sesuai dengan SSA yang digunakan.

- contoh uji siap diukur absorbansinya.

3.5.3 Pembuatan larutan induk logam tembaga 100 mg Cu /L

- timbang $\pm 0,1000$ g logam tembaga, masukkan ke dalam labu ukur 1000,0 mL. Tambahkan 2 mL HNO_3 pekat sampai larut (≈ 100 mg Cu/L);
- tambahkan 10 mL HNO_3 pekat dan air bebas mineral hingga tepat tanda tera, kemudian homogenkan;

c) hitung kadar tembaga berdasarkan hasil penimbangan.

CATATAN Larutan ini dapat dibuat dari larutan standar 1000 mg Cu/L siap pakai.

3.5.4 Pembuatan larutan baku logam tembaga 10 mg Cu/L

- a) pipet 10 mL larutan induk tembaga 100 mg Cu/L, masukkan ke dalam labu ukur 100 mL;
- b) tepatkan dengan larutan pengencer sampai tanda tera.

3.5.5 Pembuatan larutan kerja logam tembaga

Buat deret larutan kerja dengan 1 (satu) blanko dan minimal 3 (tiga) kadar yang berbeda secara proporsional dan berada pada rentang pengukuran.

3.6 Pembuatan kurva kalibrasi dan pengukuran contoh uji

3.6.1 Pembuatan kurva kalibrasi

Kurva kalibrasi dibuat dengan tahapan sebagai berikut:

- a) operasikan alat dan optimasikan sesuai dengan petunjuk penggunaan alat untuk pengukuran tembaga;

CATATAN 1 Salah satu cara optimasi alat dengan uji sensitifitas.

CATATAN 2 Tambahkan *matrix modifier* (larutan kalsium) dan atau atasi gangguan pengukuran sesuai dengan SSA yang digunakan.

- b) aspirasikan larutan blanko ke dalam SSA-nyala kemudian atur serapan hingga nol;
- c) aspirasikan larutan kerja satu persatu ke dalam SSA-nyala, lalu ukur serapannya pada panjang gelombang 324,7 nm, kemudian catat;
- d) lakukan pembilasan pada selang aspirator dengan larutan pengencer;
- e) buat kurva kalibrasi dari data pada butir 3.6.1.c) di atas, dan tentukan persamaan garis lurusnya;
- f) jika koefisien korelasi regresi linier (r) < 0,995, periksa kondisi alat dan ulangi langkah pada butir 3.6.1 b) sampai dengan c) hingga diperoleh nilai koefisien $r \geq 0,995$.

3.6.2 Cara uji

Uji kadar tembaga dengan tahapan sebagai berikut:

- a) aspirasikan contoh uji ke dalam SSA-nyala lalu ukur serapannya pada panjang gelombang 324,7 nm. Bila diperlukan, lakukan pengenceran;

CATATAN 1 Bila hasil pengukuran untuk tembaga terlarut diluar kisaran pengukuran, maka lakukan pengenceran dan ulangi langkah 3.5.1

CATATAN 2 Bila hasil pengukuran untuk tembaga total diluar kisaran pengukuran, maka lakukan pengenceran dan ulangi langkah 3.5.2

- b) catat hasil pengukuran.

3.7 Perhitungan

Kadar logam tembaga (Cu) dihitung sebagai berikut:

$$\text{Cu (mg/L)} = C \times f_p \quad (1)$$

Keterangan:

C adalah kadar yang didapat hasil pengukuran (mg/L);

f_p adalah faktor pengenceran.

4 Pengendalian mutu

- Gunakan bahan kimia berkualitas murni (pa).
- Gunakan alat gelas bebas kontaminasi.
- Gunakan alat ukur yang terkalibrasi.
- Dikerjakan oleh analis yang kompeten.
- Lakukan analisis dalam jangka waktu yang tidak melampaui waktu penyimpanan maksimum.
- Koefisien korelasi regresi linier (r) lebih besar atau sama dengan 0,995 dengan intersepsi lebih kecil atau sama dengan batas deteksi.
- Lakukan analisis blanko dengan frekuensi 5% - 10% per *batch* (satu seri pengukuran) atau minimal 1 kali untuk jumlah contoh uji kurang dari 10 sebagai kontrol kontaminasi.
- Lakukan analisis duplo dengan frekuensi 5% - 10% per *batch* atau minimal 1 kali untuk jumlah contoh uji kurang dari 10 sebagai kontrol ketelitian analisis. Jika Perbedaan Persen Relatif (*Relative Percent Difference, RPD*) lebih besar dari 10% maka dilakukan pengukuran selanjutnya hingga diperoleh nilai RPD kurang dari atau sama dengan 10%.

Persen RPD

$$\%RPD = \frac{|\text{hasil pengukuran} - \text{duplikat pengukuran}|}{(\text{hasil pengukuran} + \text{duplikat pengukuran})/2} \times 100\% \quad (2)$$

- Lakukan kontrol akurasi dengan *spike matrix* atau salah satu standar kerja dengan frekuensi 5% - 10% per *batch* atau minimal 1 kali untuk 1 *batch*. Kisaran persen temu balik untuk *spike matrix* adalah 85% - 115% dan untuk standar kerja 90% - 110%.

Persen temu balik (% *recovery*, %R)

$$\%R = \left(\frac{A - B}{C} \right) \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

A adalah kadar contoh uji yang diperkaya (*spike*) (mg/L);

B adalah kadar contoh uji (mg/L);

C adalah kadar standar yang ditambahkan (*target value*) (mg/L).

CATATAN 1 Volume *spike matrix* yang ditambahkan maksimal 5% dari volume contoh uji.

CATATAN 2 Hasil akhir kadar contoh uji yang diperkaya (*spike matrix*) berkisar 2 kali kadar contoh uji. Kadar contoh uji yang sudah diperkaya berada pada kisaran rentang pengukuran.

5 Presisi dan bias

Standar ini telah melalui uji banding metode dengan peserta 10 laboratorium pada kadar 5 mg Cu/L dengan tingkat presisi (%RSD) 6,91% dan akurasi (bias metode) 3,82%.

6 Rekomendasi

- a) Lakukan analisis *blind sample*.
- b) Buat *control chart* untuk akurasi dan presisi analisis.



Lampiran A
(normatif)
Pelaporan

Catat pada buku kerja hal-hal sebagai berikut:

- 1) Parameter yang dianalisis.
- 2) Nama analis.
- 3) Tanggal analisis.
- 4) Rekaman hasil pengukuran duplo.
- 5) Rekaman kurva kalibrasi.
- 6) Nomor contoh uji.
- 7) Tanggal penerimaan contoh uji.
- 8) Rekaman hasil perhitungan.
- 9) Hasil pengukuran persen *spike matrix* atau standar kerja dan CRM atau *blind sample* (bila dilakukan).
- 10) Kadar analit dalam contoh uji.



Lampiran B
(informatif)

Pemakaian asam lain bersama dengan asam nitrat untuk persiapan contoh uji

**Tabel B.1 - Pemakaian asam lain bersama dengan asam nitrat
untuk persiapan contoh uji**

Asam	Disarankan untuk analisis	Bisa berguna untuk contoh uji	Tidak disarankan untuk analisis
HCl	Ag	Sb, Ru, Sn	Th, Pb
H ₂ SO ₄	Ti	-	Ag, Pb, Ba
HClO ₄	-	Bahan organik	-
HF	-	Bahan yang mengandung silika	-



Bibliografi

Standard Methods, *Examination of Water and Wastewater* 21st Edition, 2005, Method 3111B.

Komite Akreditasi Nasional, SR 02, *Persyaratan tambahan untuk akreditasi laboratorium pengujian kimia dan biologi*, 2004









BADAN STANDARDISASI NASIONAL - BSN
Gedung Manggala Wanabakti Blok IV Lt. 3-4
Jl. Jend. Gatot Subroto, Senayan Jakarta 10270
Telp: 021- 574 7043; Faks: 021- 5747045; e-mail : bsn@bsn.go.id

LAMPIRAN C
(PEMBUATAN LARUTAN
ARTIFISIAL)

PEMBUATAN LARUTAN ARTIFISIAL Cu DAN AIR LIMBAH ARTIFISIAL *ELECTROPLATING*

1. Larutan Artifisial Cu

Bahan:

- Tembaga (II) Sulfat ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
- *Aquabidest*
- *Aquadest*

Alat:

- Spatula
- Neraca analitik
- Labu ukur 1000 mL
- Labu semprot
- Kaca arloji
- Corong

Prosedur:

Larutan standar Cu 1000 mg/L dibuat dengan melarutkan serbuk ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Jumlah zat yang akan dilarutkan ditimbang dan dihitung dengan rumus:

$$\begin{aligned} \text{mg zat per 1 liter larutan} &= \frac{\text{BM CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}{\text{BA Cu}} \times \text{konsentrasi larutan} \\ &= \frac{249,6}{63,54} \times 1000 \text{ mg/L} \\ &= 3.928 \text{ mg dalam 1 liter larutan} \\ &= 1.964 \text{ mg dalam 500 ml larutan} \end{aligned}$$

Dari larutan induk 1000 mg/L dijadikan larutan artifisial 100 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 1000 \text{ mg/L} \times V_1 &= 100 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\ V_1 &= 100 \text{ mL} \end{aligned}$$

Dari larutan standar 100 ppm dijadikan larutan artifisial 5 mg/L dalam 1000 mL

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 100 \text{ mg/L} \times V_1 &= 5 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$V_1 = 50 \text{ mL}$$

Dari larutan standar 100 ppm dijadikan larutan artifisial 15 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 100 \text{ mg/L} \times V_1 &= 15 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\ V_1 &= 150 \text{ mL} \end{aligned}$$

Dari larutan standar 100 ppm dijadikan larutan artifisial 25 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 100 \text{ mg/L} \times V_1 &= 25 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\ V_1 &= 250 \text{ mL} \end{aligned}$$

Dari larutan standar 100 ppm dijadikan larutan artifisial 35 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned} M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\ 100 \text{ mg/L} \times V_1 &= 35 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\ V_1 &= 350 \text{ mL} \end{aligned}$$

2. Larutan Artifisial Cr

Bahan:

- Kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$)
- *Aquabidest*

Alat:

- Spatula
- Neraca analitik
- Labu ukur 1000 mL
- Labu semprot
- Kaca arloji
- Corong

Prosedur:

Larutan standar Cr 1000 mg/L dibuat dengan melarutkan serbuk $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$.

Jumlah zat yang akan dilarutkan ditimbang dan dihitung dengan rumus:

$$\text{mg zat per 1 liter larutan} = \frac{\text{BM } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}{\text{BA Cr}} \times \text{konsentrasi larutan}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{294,185}{51,996} \times 1000 \text{ mg/L} \\
&= 5.657 \text{ mg dalam 1 liter larutan} \\
&= 2.829 \text{ mg dalam 500 ml larutan}
\end{aligned}$$

Dari larutan induk 1000 ppm dijadikan larutan artifisial 100 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned}
M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
1000 \text{ mg/L} \times V_1 &= 100 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\
V_1 &= 100 \text{ mL}
\end{aligned}$$

Dari larutan standar 100 ppm dijadikan larutan artifisial 20 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned}
M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
100 \text{ mg/L} \times V_1 &= 20 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\
V_1 &= 200 \text{ mL}
\end{aligned}$$

3. Larutan Artifisial Cd

Bahan:

- Kadmium Klorida (CdCl_2)
- *Aquabidest*

Alat:

- Spatula
- Neraca analitik
- Labu ukur 1000 mL
- Labu semprot
- Kaca arloji
- Corong

Prosedur:

Larutan standar Cd 1000 mg/L dibuat dengan melarutkan serbuk CdCl_2 .

Jumlah zat yang akan dilarutkan ditimbang dan dihitung dengan rumus:

$$\begin{aligned}
 \text{mg zat per 1 liter larutan} &= \frac{\text{BM CdCl}_2}{\text{BA Cd}} \times \text{konsentrasi larutan} \\
 &= \frac{183,32}{112,411} \times 1000 \text{ mg/L} \\
 &= 1.631 \text{ mg dalam 1 liter larutan} \\
 &= 815 \text{ mg dalam 500 ml larutan}
 \end{aligned}$$

Dari larutan induk 1000 ppm dijadikan larutan artifisial 100 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 1000 \text{ mg/L} \times V_1 &= 100 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\
 V_1 &= 100 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

Dari larutan standar 100 ppm dijadikan larutan artifisial 15 ppm dalam 1000 mL

$$\begin{aligned}
 M_1 \times V_1 &= M_2 \times V_2 \\
 100 \text{ mg/L} \times V_1 &= 15 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL} \\
 V_1 &= 150 \text{ mL}
 \end{aligned}$$

4. Larutan Artifisial Pb

Bahan:

- Timbal (II) Nitrat ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)
- *Aquabidest*

Alat:

- Spatula
- Neraca analitik
- Labu ukur 1000 mL
- Labu semprot
- Kaca arloji
- Corong

Prosedur:

Larutan standar Pb 1000 mg/L dibuat dengan melarutkan serbuk $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Jumlah zat yang akan dilarutkan ditimbang dan dihitung dengan rumus:

$$\begin{aligned}
 \text{mg zat per 1 liter larutan} &= \frac{\text{BM Pb}(\text{NO}_3)_2}{\text{BA Pb}} \times \text{konsentrasi larutan} \\
 &= \frac{331,29}{207,19} \times 1000 \text{ mg/L} \\
 &= 1.5985 \text{ mg dalam 1 liter larutan} \\
 &= 799 \text{ mg dalam 500 ml larutan}
 \end{aligned}$$

Dari larutan induk 1000 ppm dijadikan larutan artifisial 100 ppm dalam 1000 mL

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$1000 \text{ mg/L} \times V_1 = 100 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL}$$

$$V_1 = 100 \text{ mL}$$

Dari larutan standar 100 ppm dijadikan larutan artifisial 10 ppm dalam 1000 mL

$$M_1 \times V_1 = M_2 \times V_2$$

$$100 \text{ mg/L} \times V_1 = 10 \text{ mg/L} \times 1000 \text{ mL}$$

$$V_1 = 100 \text{ mL}$$

5. Pencampuran Adsorben MXene/Eceng Gondok

Bahan:

- Suspensi MXene yang telah diultrasonik dengan berat jenis 12 g/200 mL
- Suspensi nanoserat eceng gondok yang telah diultrasonik dengan berat jenis 0,36 g/100 mL

Alat:

- *Beaker Glass* 300 mL
- Gelas Ukur 100 mL
- Hotplate
- Termometer

Prosedur:

Suspensi nanoserat eceng gondok diambil sebanyak 30 mL. Berat 30 mL nanoserat eceng gondok dapat dihitung dengan rumus:

$$\begin{aligned} \text{Berat eceng gondok} &= \text{berat jenis nanoserat eceng gondok} \times \text{volume suspensi} \\ &= \frac{0,36 \text{ g}}{100 \text{ mL}} \times 30 \text{ mL} \\ &= 0,108 \text{ g} \end{aligned}$$

Berat 30 mL nanoserat eceng gondok yang didapatkan digunakan untuk menentukan berat MXene yang diperlukan dengan rasio berat 10:1 dan 20:1.

Untuk rasio 10:1

$$\begin{aligned} \text{Berat MXene} &= \text{rasio MXene/Eceng Gondok} \times \text{berat eceng gondok} \\ &= \frac{10}{1} \times 0,108 \text{ g} \\ &= 1,08 \text{ g} \end{aligned}$$

Untuk rasio 20:1

$$\begin{aligned} \text{Berat MXene} &= \text{rasio MXene/Eceng Gondok} \times \text{berat eceng gondok} \\ &= \frac{20}{1} \times 0,108 \text{ g} \end{aligned}$$

$$= 2,16 \text{ g}$$

Berat MXene yang didapatkan selanjutnya digunakan untuk menentukan volume suspensi MXene yang diperlukan untuk pencampuran dengan suspensi nanoserat eceng gondok.

Perhitungan volume MXene yang dibutuhkan:

Untuk rasio 10:1

$$\begin{aligned} \text{Volume MXene} &= \frac{\text{berat MXene}}{\text{berat jenis MXene}} \\ &= \frac{1,08 \text{ g}}{\frac{12 \text{ g}}{200 \text{ mL}}} \\ &= 18 \text{ mL} \end{aligned}$$

Untuk rasio 20:1

$$\begin{aligned} \text{Volume MXene} &= \frac{\text{berat MXene}}{\text{berat jenis MXene}} \\ &= \frac{2,16 \text{ g}}{\frac{12 \text{ g}}{200 \text{ mL}}} \\ &= 36 \text{ mL} \end{aligned}$$

Masing-masing suspensi MXene dan eceng gondok dicampurkan ke dalam *beaker glass* dan diaduk menggunakan *hotplate* dengan kecepatan 100 rpm dan temperatur 80 °C selama satu jam. Campuran yang telah diaduk lalu disentrifugasi dan diambil endapannya. Endapan selanjutnya akan dioven selama 24 jam dengan temperatur 60 °C

LAMPIRAN D
(DATA PERCOBAAN DAN
PERHITUNGAN
ADSORPSI)

**LAMPIRAN D.1
(DATA ADSORPSI
MXENE/ECENG
GONDOK)**

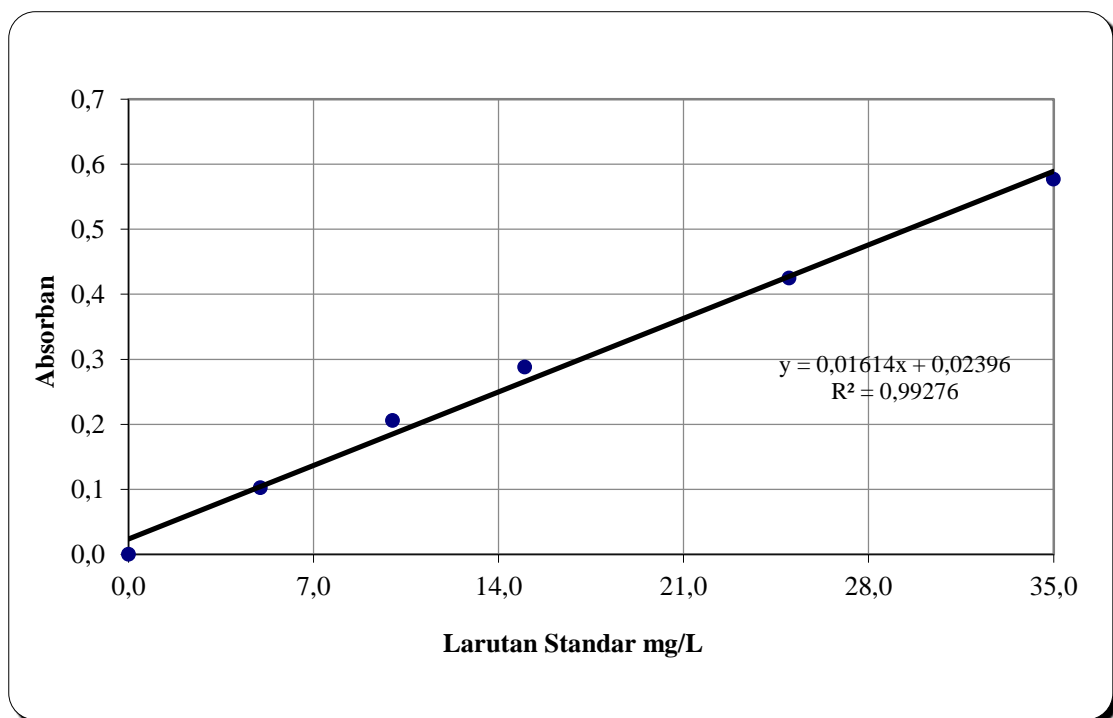
DATA PERCOBAAN DAN PERHITUNGAN

Analisis konsentrasi logam berat Cu pada sampel menggunakan *Atomic Absorption Spectrofotometry* (AAS) sesuai Standard Methods APHA, 22nd, Ed, 2012 Part 3111 B . Konsentrasi akhir sampel terbaca dengan nilasi absorbannya. Untuk menentukan nilai konsentrasi sampel maka diperlukan rentang konsentrasi larutan standar dalam bentuk nilai absorbansi yang mewakili rentang konsentrasi sampel.

Tabel D. 1 Larutan Standar Logam Berat Cu

Larutan Standar (mg/L)	Absorban
0,0000	0,00000
5,0000	0,10244
10,0000	0,20556
15,0000	0,28760
25,0000	0,42445
35,0000	0,57637

Data diatas kemudian diplot ke dalam grafik dengan konsentrasi larutan standar sebagai sumbu x dan absorbansi sebagai sumbu y, kemudian ditentukan persamaan regresi linear persamaan tersebut. Persamaan regresi yang didapat dari grafik larutan standar dapat digunakan untuk mengetahui konsentrasi Cu pada sampel yang akan dianalisis dengan mengganti konstanta “y” pada persamaan regresi dengan nilai absorbansi sampel.



Gambar D. 1 Grafik Linear Larutan Standar Cu

A. Percobaan Adsorpsi Logam Berat Cu pada Air Limbah Artifisial

Percobaan adsorpsi logam berat Cu dilakukan menggunakan adsorben MXene yang diberi penyisipan nanoserat Eceng Gondok menggunakan variasi komposisi nanokomposit yaitu 10:1 dan 20:1 dan konsentrasi adsorbat yaitu 5, 15, 25, dan 35 mg/L. Parameter lain tetap yaitu pada dosis adsorben 1 g/L, pH 5, dan waktu kontak adsorpsi 10–50 menit. Berikut adalah tabel hasil percobaan adsorpsi MXene yang diberi penyisipan nanoserat Eceng Gondok menggunakan variasi komposisi nanokomposit dan konsentrasi adsorbat.

Tabel D. 1 Hasil percobaan Adsorpsi MXene/Eceng Gondok dengan Variasi Komposisi Nanokomposit dan Konsentrasi Adsorbat terhadap Penyisihan Logam Berat Cu

Variasi Percobaan	Sampel	Waktu	Konsentrasi Awal (mg/L)	Adsorban/Cons	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi
MXENE-ECENG GONDOK 10:1												
Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L	Artifisial	10 (1)	5	0,0872	3,918	3,820	21,64	23,60	1,85	1,082	1,180	0,093
		10 (2)		0,0854	3,808		23,84			1,192		
		10 (3)		0,0842	3,734		25,32			1,266		
	Artifisial	20 (1)		0,0725	3,009	2,980	39,81	40,40	0,63	1,991	2,020	0,032
		20 (2)		0,0715	2,947		41,07			2,053		
		20 (3)		0,0721	2,985		40,31			2,015		
	Artifisial	30 (1)		0,0676	2,705	2,574	45,90	48,53	2,58	2,295	2,426	0,129
		30 (2)		0,0654	2,569		48,62			2,431		
		30 (3)		0,0635	2,447		51,07			2,553		
	Artifisial	40 (1)		0,0625	2,390	2,538	52,21	49,25	4,38	2,610	2,462	0,219
		40 (2)		0,0632	2,434		51,33			2,566		
		40 (3)		0,0690	2,789		44,21			2,211		
	Artifisial	50 (1)		0,0668	2,652	2,766	46,96	44,68	2,22	2,348	2,234	0,111
		50 (2)		0,0687	2,773		44,54			2,227		
		50 (3)		0,0703	2,873		42,54			2,127		
Konsentrasi Adsorbat 15 mg/L	Artifisial	10 (1)	15	0,2342	13,023	13,052	13,18	12,99	2,68	1,977	1,948	0,402
		10 (2)		0,2413	13,467		10,22			1,533		
		10 (3)		0,2284	12,665		15,57			2,335		
	Artifisial	20 (1)		0,1762	9,432	8,924	37,12	40,51	2,99	5,568	6,076	0,448
		20 (2)		0,1626	8,588		42,75			6,412		
		20 (3)		0,1652	8,751		41,66			6,249		
	Artifisial	30 (1)		0,1426	7,348	7,286	51,01	51,43	0,48	7,652	7,714	0,072
		30 (2)		0,1418	7,302		51,32			7,698		
		30 (3)		0,1403	7,208		51,95			7,792		

Variasi Percobaan	Sampel	Waktu	Konsentrasi Awal (mg/L)	Adsorban/Cons	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi	
	Artifisial	40 (1)		0,1562	8,193	8,215	45,38	45,23	0,25	6,807	6,785	0,038	
		40 (2)		0,1573	8,259		44,94			6,741			
		40 (3)		0,1562	8,193		45,38			6,807			
		Artifisial		50 (1)	0,1652	8,753	8,769	41,64	41,54	1,29	6,247	6,231	0,193
		50 (2)		0,1687	8,969	40,21		6,031					
		50 (3)		0,1625	8,584	42,78		6,416					
Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Artifisial	10 (1)	25	0,3244	18,612	18,418	25,55	26,33	1,29	6,388	6,582	0,322	
		10 (2)		0,3152	18,047		27,81			6,953			
		10 (3)		0,3241	18,596		25,62			6,404			
		Artifisial		20 (1)	0,2253	12,475	12,258	50,10	50,97	2,53	12,525	12,742	0,634
		20 (2)		0,2298	12,755	48,98		12,245					
		20 (3)		0,2103	11,545	53,82		13,455					
		Artifisial		30 (1)	0,1028	4,882	4,924	80,47	80,31	0,39	20,118	20,076	0,098
		30 (2)		0,1023	4,853	80,59		20,147					
		30 (3)		0,1052	5,036	79,86		19,964					
		Artifisial		40 (1)	0,1172	5,777	7,128	76,89	71,49	5,02	19,223	17,872	1,256
		40 (2)		0,1573	8,259	66,96		16,741					
		40 (3)		0,1426	7,348	70,61		17,652					
		Artifisial		50 (1)	0,1242	6,213	7,590	75,15	69,64	4,81	18,787	17,410	1,202
		50 (2)		0,1599	8,423	66,31		16,577					
		50 (3)		0,1553	8,135	67,46		16,865					
Konsentrasi Adsorbat 35 mg/L	Artifisial	10 (1)	35	0,3653	21,146	20,532	39,58	41,34	2,06	13,854	14,468	0,722	
		10 (2)		0,3583	20,713		40,82			14,287			
		10 (3)		0,3425	19,736		43,61			15,264			
		Artifisial		20 (1)	0,1763	9,437	9,289	73,04	73,46	0,46	25,563	25,711	0,161
		20 (2)		0,1711	9,118	73,95		25,882					
		20 (3)		0,1743	9,312	73,40		25,688					
		Artifisial		30 (1)	0,1425	7,347	7,405	79,01	78,84	0,27	27,653	27,595	0,096
		30 (2)		0,1426	7,351	79,00		27,649					
		30 (3)		0,1453	7,515	78,53		27,485					

Variasi Percobaan	Sampel	Waktu	Konsentrasi Awal (mg/L)	Adsorban/Cons	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi
	Artifisial	40 (1)		0,1252	6,270	6,570	82,09	81,23	0,74	28,730	28,430	0,260
		40 (2)		0,1324	6,721		80,80			28,279		
		40 (3)		0,1324	6,721		80,80			28,279		
	Artifisial	50 (1)		0,1525	7,962	8,458	77,25	75,83	1,27	27,038	26,542	0,443
		50 (2)		0,1662	8,813		74,82			26,187		
		50 (3)		0,1628	8,600		75,43			26,400		
MXENE-ECENG GONDOK 20:1												
Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L	Artifisial	10 (1)	5	0,0726	3,014	3,002	39,73	39,97	2,54	1,986	1,998	0,127
		10 (2)		0,0703	2,869		42,62			2,131		
		10 (3)		0,0744	3,122		37,55			1,878		
	Artifisial	20 (1)		0,0637	2,462	2,513	50,76	49,73	1,03	2,538	2,487	0,051
		20 (2)		0,0654	2,565		48,70			2,435		
		20 (3)		0,0645	2,513		49,74			2,487		
	Artifisial	30 (1)		0,0603	2,250	2,305	55,01	53,89	0,98	2,750	2,695	0,049
		30 (2)		0,0615	2,327		53,46			2,673		
		30 (3)		0,0617	2,340		53,21			2,660		
	Artifisial	40 (1)		0,0653	2,559	2,484	48,82	50,33	1,72	2,441	2,516	0,086
		40 (2)		0,0644	2,502		49,95			2,498		
		40 (3)		0,0625	2,390		52,21			2,610		
	Artifisial	50 (1)		0,0687	2,773	2,788	44,54	44,24	0,36	2,227	2,212	0,018
		50 (2)		0,0689	2,783		44,35			2,217		
		50 (3)		0,0693	2,808		43,83			2,192		
Konsentrasi Adsorbat 15 mg/L	Artifisial	10 (1)	15	0,2019	11,026	11,385	26,49	24,10	4,14	3,974	3,615	0,621
		10 (2)		0,2019	11,027		26,49			3,973		
		10 (3)		0,2193	12,102		19,32			2,898		
	Artifisial	20 (1)		0,1728	9,222	9,085	38,52	39,44	2,91	5,778	5,915	0,436
		20 (2)		0,1763	9,436		37,10			5,564		
		20 (3)		0,1627	8,596		42,69			6,404		
	Artifisial	30 (1)		0,1328	6,741	6,906	55,06	53,96	0,98	8,259	8,094	0,146

Variasi Percobaan	Sampel	Waktu	Konsentrasi Awal (mg/L)	Adsorban/Cons	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi	
		30 (2)		0,1363	6,957	7,189	53,62	52,07	2,77	8,043	7,811	0,416	
		30 (3)		0,1373	7,020		53,20			7,980			
	Artifisial	40 (1)		0,1453	7,515		49,90			7,485			
		40 (2)		0,1423	7,332		51,12			7,668			
		40 (3)			0,1324	6,721	7,761	55,20	48,26	2,18	8,279	7,239	0,327
	Artifisial	50 (1)		0,1552	8,131	45,79		6,869					
		50 (2)		0,1452	7,512	49,92		7,488					
		50 (3)			0,1473	7,639	49,07	7,361					
Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Artifisial	10 (1)	25	0,3029	17,283	17,615	30,87	29,54	2,35	7,717	7,385	0,587	
		10 (2)		0,3192	18,292		26,83			6,708			
		10 (3)		0,3027	17,270		30,92			7,730			
	Artifisial	20 (1)		0,2091	11,471	11,396	54,12	54,42	0,54	13,529	13,604	0,136	
		20 (2)		0,2054	11,239		55,04			13,761			
		20 (3)		0,2092	11,477		54,09			13,523			
	Artifisial	30 (1)		0,0765	3,255	3,141	86,98	87,43	1,30	21,745	21,859	0,324	
		30 (2)		0,0787	3,393		86,43			21,607			
		30 (3)		0,0688	2,776		88,90			22,224			
	Artifisial	40 (1)		0,0834	3,683	3,798	85,27	84,81	1,93	21,317	21,202	0,481	
		40 (2)		0,0938	4,327		82,69			20,673			
		40 (3)		0,0786	3,385		86,46			21,615			
	Artifisial	50 (1)		0,0987	4,631	4,356	81,48	82,58	2,85	20,369	20,644	0,713	
		50 (2)		0,1029	4,891		80,44			20,109			
	50 (3)	0,0812	3,546	85,81	21,454								
Konsentrasi Adsorbat 35 mg/L	Artifisial	10 (1)	35	0,3324	19,110	19,059	45,40	45,55	2,01	15,890	15,941	0,704	
		10 (2)		0,3425	19,736		43,61			15,264			
		10 (3)		0,3198	18,331		47,63			16,669			
	Artifisial	20 (1)		0,1627	8,596	8,853	75,44	74,71	0,91	26,404	26,147	0,320	
		20 (2)		0,1652	8,751		75,00			26,249			
		20 (3)		0,1726	9,211		73,68			25,789			
	Artifisial	30 (1)		0,1524	7,958	7,963	77,26	77,25	0,03	27,042	27,037	0,009	

Variasi Percobaan	Sampel	Waktu	Konsentrasi Awal (mg/L)	Adsorban/Cons	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi
		30 (2)		0,1527	7,973		77,22			27,027		
		30 (3)		0,1524	7,958		77,26			27,042		
	Artifisial	40 (1)		0,1500	7,809	7,495	77,69	78,59	0,78	27,191	27,505	0,272
		40 (2)		0,1425	7,344		79,02			27,656		
		40 (3)		0,1423	7,332		79,05			27,668		
	Artifisial	50 (1)		0,1552	8,131	7,898	76,77	77,43	0,79	26,869	27,102	0,276
		50 (2)		0,1526	7,970		77,23			27,030		
		50 (3)		0,1465	7,594		78,30			27,406		

Tabel D. 3 Hasil percobaan Adsorpsi MXene/Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Cu Terbaik terhadap Air Limbah Elektroplating Artifisial

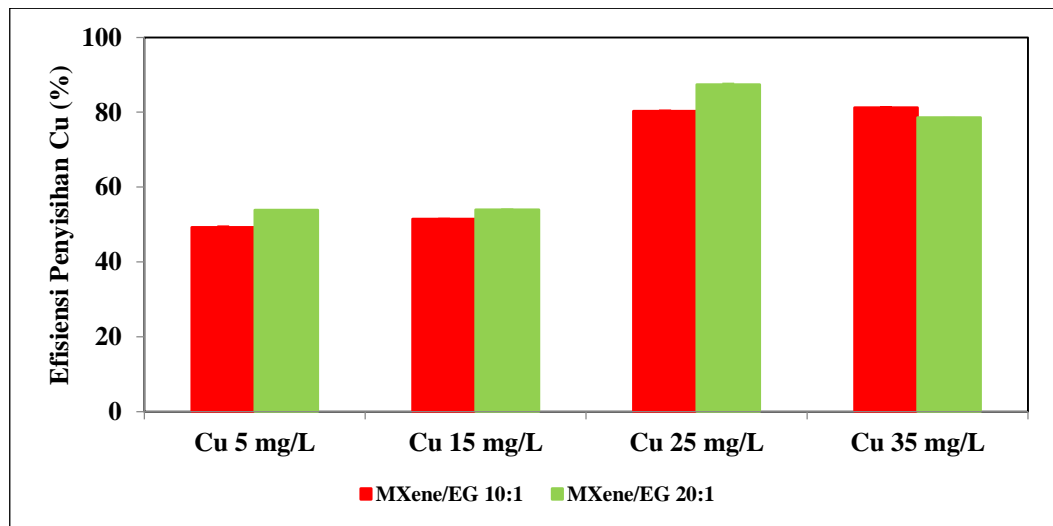
Waktu	Komposisi Nanokomposit	Konsentrasi Logam (mg/L)	Konsentrasi Akhir 1 (mg/L)	Konsentrasi Akhir 2 (mg/L)	Konsentrasi Akhir 3 (mg/L)	Konsentrasi Akhir Rata Rata (mg/L)	Standar Deviasi
10 Menit	20:01	Cu 25 mg/L	16,76521	17,03472	16,34721	16,71571	0,34642
20 Menit			12,91447	12,32841	12,32893	12,52394	0,33821
30 Menit			6,58025	7,10665	6,64520	6,77737	0,28701
40 Menit			7,69535	7,52534	7,53010	7,58360	0,09681
50 Menit			7,93453	8,11510	8,40021	8,14995	0,23479
10 Menit		Cr 20 mg/L	18,63333	18,33333	18,53333	18,50000	0,15275
20 Menit			15,34721	15,66871	15,32487	15,44693	0,19239
30 Menit			13,75621	13,55872	13,54234	13,61909	0,11903
40 Menit			14,21452	14,31452	14,35782	14,29562	0,07349
50 Menit			15,35426	14,67584	15,34752	15,12587	0,38976
10 Menit		Cd 15 mg/L	11,40000	10,60000	11,83333	11,27778	0,62568
20 Menit			9,91838	9,37069	9,91655	9,73521	0,31568
30 Menit			6,87412	6,95741	5,64131	6,49095	0,73699

Waktu	Komposisi Nanokomposit	Konsentrasi Logam (mg/L)	Konsentrasi Akhir 1 (mg/L)	Konsentrasi Akhir 2 (mg/L)	Konsentrasi Akhir 3 (mg/L)	Konsentrasi Akhir Rata Rata (mg/L)	Standar Deviasi
40 Menit			7,59552	7,30862	7,89310	7,59908	0,29226
50 Menit			7,68448	7,66724	7,36034	7,57069	0,18237
10 Menit		Pb 10 mg/L	8,96667	9,03333	9,00000	9,00000	0,03333
20 Menit			7,54123	7,61478	8,45620	7,87074	0,50836
30 Menit			5,78521	5,56741	5,78562	5,71275	0,12587
40 Menit			6,32478	6,47895	6,42321	6,40898	0,07806
50 Menit			6,85721	7,85412	6,64575	7,11903	0,64533

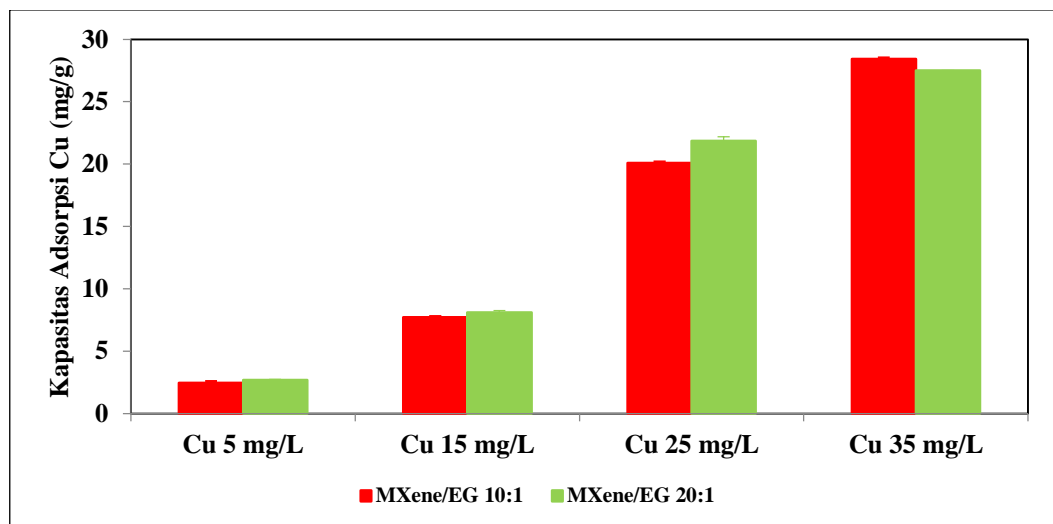
Tabel D. 4 Hasil perhitungan Efisiensi Penyisihan Cu dan Kapasitas Adsorpsi Cu MXene/Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Cu Terbaik terhadap Air Limbah Elektroplating Artifisial

Variasi Percobaan	Waktu (menit)	Konsentrasi Awal (mg/L)	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi
MXENE/ ECENG GONDOK 20:1										
Air Limbah Elektroplating Artifisial Cu 25 mg/L	10 (1)	25	16,765	16,716	32,94	33,14	1,39	8,235	8,284	0,346
	10 (2)		17,035		31,86			7,965		
	10 (3)		16,347		34,61			8,653		
	20 (1)		12,914	12,524	48,34	49,90	1,35	12,086	12,476	0,338
	20 (2)		12,328		50,69			12,672		
	20 (3)		12,329		50,68			12,671		
	30 (1)		6,580	6,777	73,68	72,89	1,15	18,420	18,223	0,287
	30 (2)		7,107		71,57			17,893		
	30 (3)		6,645		73,42			18,355		
	40 (1)		7,695	7,584	69,22	69,67	0,39	17,305	17,416	0,097
	40 (2)		7,525		69,90			17,475		

Variasi Percobaan	Waktu (menit)	Konsentrasi Awal (mg/L)	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi
	40 (3)		7,530		69,88			17,470		
	50 (1)		7,935	8,150	68,26	67,40	0,94	17,065	16,850	0,235
	50 (2)		8,115		67,54			16,885		
	50 (3)		8,400		66,40			16,600		



Gambar D. 2 Rekapitulasi Efisiensi Penyisihan MXene Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1 pada Konsentrasi 5 mg/L, 15 mg/L, 25 mg/L, dan 35 mg/L



Gambar D. 3 Kapasitas Adsorpsi MXene Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1 pada Konsentrasi 5 mg/L, 15 mg/L, 25 mg/L, dan 35 mg/L

Tabel D. 5 Rekapitulasi Efisiensi Penyisihan dan Kapasitas Adsorpsi MXene Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dan 20:1 pada Konsentrasi 5 mg/L, 15 mg/L, 25 mg/L, dan 35 mg/L

Variasi Percobaan	Rasio Nanokomposit 10:1			
	Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L	Konsentrasi Adsorbat 15 mg/L	Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Konsentrasi Adsorbat 35 mg/L
Efisiensi Penyisihan (%)	49,25	51,43	80,31	81,23
Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	2,46	7,71	20,08	28,43
Variasi Percobaan	Rasio Nanokomposit 20:1			
	Konsentrasi Adsorbat 5 mg/L	Konsentrasi Adsorbat 15 mg/L	Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Konsentrasi Adsorbat 35 mg/L
Efisiensi Penyisihan (%)	53,89	53,96	87,43	78,59
Kapasitas Adsorpsi	2,69	8,09	21,86	27,50

(mg/g)

Contoh Perhitungan Pada Variasi Rasio Nanokomposit 10:1 dengan Konsentrasi Awal Adsorbat 5 mg/L:

- Perhitungan Konsentrasi Akhir (pada waktu kontak 10 menit)

$$y = 0,01614x + 0,02396$$

$$x = \frac{y - 0,02396}{0,01614}$$

$$x = \frac{0,0856 - 0,02396}{0,01614}$$

$$x = 3,820 \text{ mg/L}$$

- Efisiensi Penyisihan

$$E = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100\%$$

$$E = \frac{(5 - 3,820) \text{ mg/L}}{5 \text{ mg/L}} \times 100\%$$

$$E = 23,60\%$$

- Kapasitas Adsorpsi

$$\text{Kapasitas adsorpsi (mg/g)} = \frac{(C_o - C_e)V}{m}$$

$$\text{Kapasitas adsorpsi (mg/g)} = \frac{(5 \text{ mg/L} - 3,820 \text{ mg/L}) 0,05 \text{ L}}{0,05 \text{ g}}$$

$$\text{Kapasitas adsorpsi (mg/g)} = 1,18 \text{ mg/g}$$

LAMPIRAN D.2
(DATA ADSORPSI
MXENE)

Percobaan adsorpsi logam berat Cu dilakukan menggunakan adsorben kontrol yaitu MXene tanpa modifikasi. Parameter adsorpsi yang digunakan yaitu pada dosis adsorben 1 g/L, pH 5, konsentrasi adsorbat 25 mg/L, dan waktu kontak adsorpsi 10–50 menit. Berikut adalah tabel hasil percobaan adsorpsi MXene tanpa modifikasi.

Tabel D.6 Hasil percobaan Adsorpsi MXene Tanpa Modifikasi dengan Kondisi Penyisihan Cu Terbaik

Variasi Percobaan	Sampel	Waktu	Konsentrasi Awal (mg/L)	Adsorban/Cons	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi
MXENE TANPA MODIFIKASI												
pH 5, Dosis 1 g/L, Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Artifisial	10 (1)	25	0,403	20,789	20,964	16,84	16,15	0,72	4,211	4,036	0,180
		10 (2)		0,410	21,150		15,40			3,850		
		10 (3)		0,407	20,952		16,19			4,048		
	Artifisial	20 (1)		0,264	13,400	13,215	46,40	47,14	0,75	11,600	11,785	0,188
		20 (2)		0,256	13,024		47,90			11,976		
		20 (3)		0,260	13,222		47,11			11,778		
	Artifisial	30 (1)		0,162	8,053	8,095	67,79	67,62	0,24	16,947	16,905	0,060
		30 (2)		0,164	8,164		67,35			16,836		
		30 (3)		0,163	8,069		67,72			16,931		
	Artifisial	40 (1)		0,173	8,597	8,632	65,61	65,47	1,34	16,403	16,368	0,334
		40 (2)		0,180	8,982		64,07			16,018		
		40 (3)		0,167	8,317		66,73			16,683		
	Artifisial	50 (1)		0,178	8,900	8,872	64,40	64,51	1,12	16,100	16,128	0,279
		50 (2)		0,183	9,136		63,46			15,864		
		50 (3)		0,172	8,580		65,68			16,420		

LAMPIRAN D.3
(DATA ADSORPSI ECENG
GONDOK)

Percobaan adsorpsi logam berat Cu dilakukan menggunakan adsorben kontrol yaitu Eceng Gondok. Parameter adsorpsi yang digunakan yaitu pada dosis adsorben 1 g/L, pH 5, konsentrasi adsorbat 25 mg/L, dan waktu kontak adsorpsi 10–50 menit. Berikut adalah tabel hasil percobaan adsorpsi Eceng Gondok.

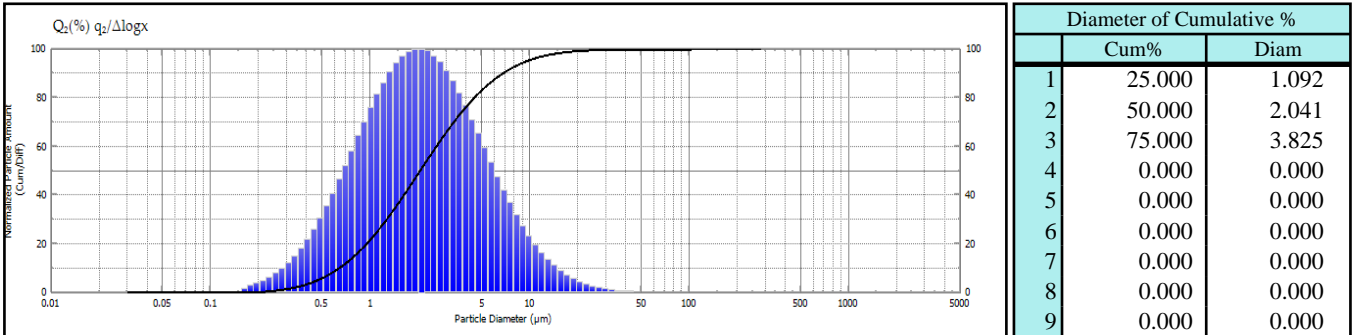
Tabel D.6 Hasil percobaan Adsorpsi Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Cu Terbaik

Variasi Percobaan	Sampel	Waktu	Konsentrasi Awal (mg/L)	Adsorban/Cons	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Rata-rata Konsentrasi Akhir	Efisiensi Penyisihan (%)	Rata-rata Efisiensi Penyisihan (%)	Standar Deviasi Efisiensi Penyisihan	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Rata-rata Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Standar Deviasi Kapasitas Adsorpsi
ECENG GONDOK												
pH 5, Dosis 1 g/L, Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Artifisial	10 (1)	25	0,37627	19,35428	19,095	22,58	23,62	1,61	5,646	5,905	0,403
		10 (2)		0,37526	19,30095		22,80			5,699		
		10 (3)		0,36256	18,63041		25,48			6,370		
	Artifisial	20 (1)		0,24135	12,23073	11,809	51,08	52,76	1,52	12,769	13,191	0,380
		20 (2)		0,23140	11,70539		53,18			13,295		
		20 (3)		0,22736	11,49208		54,03			13,508		
	Artifisial	30 (1)		0,16117	7,99736	7,991	68,01	68,04	0,06	17,003	17,009	0,015
		30 (2)		0,16124	8,00106		68,00			16,999		
		30 (3)		0,16072	7,97360		68,11			17,026		
	Artifisial	40 (1)		0,16940	8,43189	8,276	66,27	66,90	0,72	16,568	16,724	0,181
		40 (2)		0,16725	8,31837		66,73			16,682		
		40 (3)		0,16270	8,07814		67,69			16,922		
	Artifisial	50 (1)		0,17677	8,82101	8,427	64,72	66,29	1,36	16,179	16,573	0,341
		50 (2)		0,16544	8,22281		67,11			16,777		
		50 (3)		0,16572	8,23759		67,05			16,762		

LAMPIRAN D.4
(DATA HASIL *PARTICLE*
***SIZE ANALYSIS*)**

Particle Size Analysis (PSA) pada adsorben bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran dari adsorben secara mikroskopis. Analisis dilakukan menggunakan *Laser Diffraction Particle Size Analysis* SALD-2300 dengan rentang deteksi ukuran partikel 280.000 μm - 0,030 μm . Adsorben yang dianalisis yaitu adsorben MXene/Eceng Gondok rasio 20:1, adsorben MXene/Eceng Gondok rasio 10:1, dan adsorben MXene tanpa modifikasi. Analisis dilakukan untuk membuktikan ukuran sudah berukuran mikroskopis atau tidak. Analisis dilakukan di Laboratorium Teknologi Terapan Steril Jurusan Farmasi Universitas Andalas

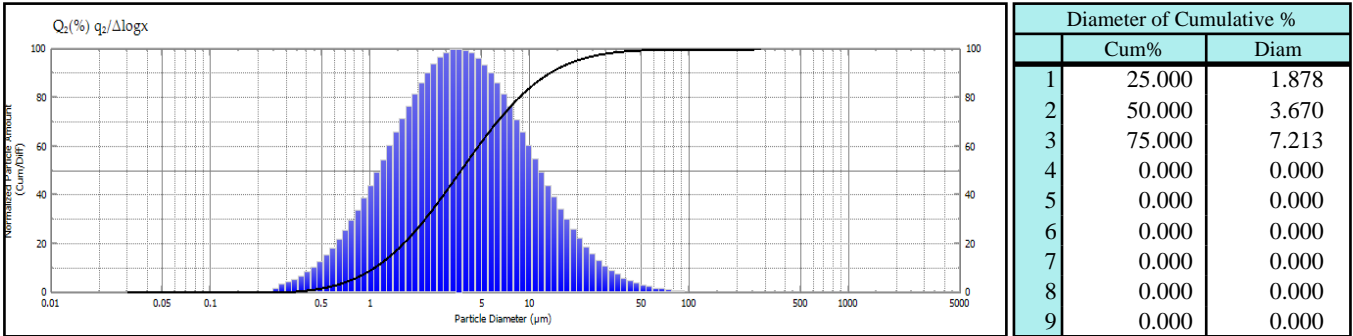
File Name	MXENE-EG 20-1-20220616T150303		Meas Date	2022/06/16 15:03:03(+0700)
Sample ID	----	Sample No.	----	
Comment	----			
Median D	2.041	Mean V	2.057	
Modal D	2.239	Std Dev	0.398	
Absorbance	0.000	A Mean V	79.877	



	Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%
	x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x
1	280.000	100.000	0.000	27	25.999	99.693	2.680	53	2.414	57.194	99.130	79	0.224	0.524	4.881
2	255.539	100.000	0.000	28	23.727	99.588	3.482	54	2.203	53.290	100.000	80	0.205	0.332	3.951
3	233.215	100.000	0.000	29	21.654	99.451	4.500	55	2.011	49.353	99.939	81	0.187	0.176	2.944
4	212.842	100.000	0.000	30	19.763	99.273	5.664	56	1.835	45.418	98.960	82	0.170	0.060	1.533
5	194.248	100.000	0.000	31	18.036	99.050	7.180	57	1.675	41.521	96.993	83	0.155	0.000	0.000
6	177.279	100.000	0.000	32	16.461	98.768	8.930	58	1.528	37.702	94.139	84	0.142	0.000	0.000
7	161.792	100.000	0.000	33	15.023	98.416	11.022	59	1.395	33.995	90.627	85	0.130	0.000	0.000
8	147.657	100.000	0.000	34	13.710	97.982	13.507	60	1.273	30.427	86.131	86	0.118	0.000	0.000
9	134.758	100.000	0.000	35	12.513	97.450	16.319	61	1.162	27.035	81.313	87	0.108	0.000	0.000
10	122.986	100.000	0.000	36	11.419	96.808	19.587	62	1.060	23.834	75.933	88	0.098	0.000	0.000
11	112.242	100.000	0.000	37	10.422	96.036	23.276	63	0.968	20.844	70.105	89	0.090	0.000	0.000
12	102.436	100.000	0.040	38	9.511	95.120	27.371	64	0.883	18.083	64.319	90	0.082	0.000	0.000
13	93.488	99.998	0.024	39	8.680	94.042	31.866	65	0.806	15.551	58.146	91	0.075	0.000	0.000
14	85.320	99.997	0.037	40	7.922	92.788	36.848	66	0.736	13.261	52.232	92	0.068	0.000	0.000
15	77.867	99.996	0.052	41	7.230	91.337	42.040	67	0.671	11.205	46.425	93	0.062	0.000	0.000
16	71.064	99.994	0.081	42	6.598	89.681	47.638	68	0.613	9.377	40.741	94	0.057	0.000	0.000
17	64.856	99.991	0.112	43	6.022	87.806	53.429	69	0.559	7.773	35.519	95	0.052	0.000	0.000
18	59.190	99.986	0.164	44	5.496	85.702	59.215	70	0.510	6.374	30.550	96	0.047	0.000	0.000
19	54.020	99.980	0.237	45	5.016	83.370	65.350	71	0.466	5.171	26.039	97	0.043	0.000	0.000
20	49.300	99.971	0.322	46	4.578	80.797	71.050	72	0.425	4.146	21.971	98	0.039	0.000	0.000
21	44.994	99.958	0.464	47	4.178	77.999	76.711	73	0.388	3.281	18.326	99	0.036	0.000	0.000
22	41.063	99.940	0.625	48	3.813	74.979	82.051	74	0.354	2.559	15.108	100	0.033	0.000	0.000
23	37.476	99.915	0.859	49	3.480	71.748	86.721	75	0.323	1.964	12.361	101	0.030	0.000	0.000
24	34.202	99.881	1.173	50	3.176	68.333	91.121	76	0.295	1.477	9.965				
25	31.214	99.835	1.535	51	2.898	64.745	94.542	77	0.269	1.085	7.943				
26	28.487	99.775	2.066	52	2.645	61.023	97.247	78	0.246	0.772	6.305				

Condition File Name	----			
Ref Index	1.70-0.20i		Calc Mode	Normal mode
Averaging Count	64	Accumu	1	Interval 2
D Range for Analysis	0.030-280.000		Small Angle Light Scattering	Sensor Filter
Cell Type	----		Light Filter	----
----	----		----	----
----	----		----	----
Sample Preparation	----			
Dim of Particle Amount	Area	Cum Distribution	Undersize	Diff Distribution
Distribution Function	Logarithmic Gaussian		Smoothing Level	10
Emulation Table	None		Data Shift	-9
Sequence File Name	----			

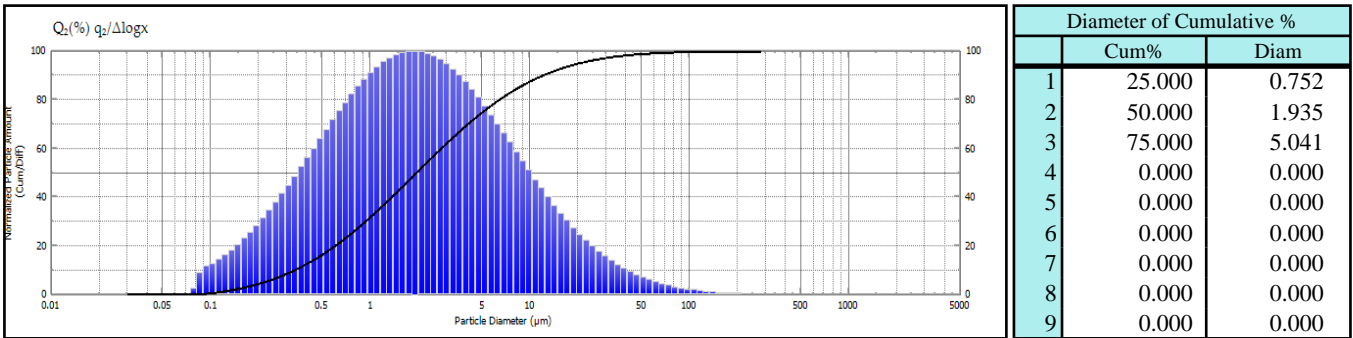
File Name	MXENE-EG 10-1-20220616T150740		Meas Date	2022/06/16 15:07:40(+0700)
Sample ID	----	Sample No.	----	
Comment	----			
Median D	3.670	Mean V	3.702	
Modal D	3.548	Std Dev	0.427	
Absorbance	0.126	A Mean V	164.417	



	Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%
	x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x
1	280.000	100.000	0.000	27	25.999	97.518	15.846	53	2.414	33.612	90.111	79	0.224	0.000	0.000
2	255.539	100.000	0.036	28	23.727	96.936	18.797	54	2.203	30.303	86.164	80	0.205	0.000	0.000
3	233.215	99.999	0.020	29	21.654	96.245	22.125	55	2.011	27.138	81.442	81	0.187	0.000	0.000
4	212.842	99.998	0.029	30	19.763	95.433	25.822	56	1.835	24.147	76.562	82	0.170	0.000	0.000
5	194.248	99.997	0.041	31	18.036	94.484	29.859	57	1.675	21.335	71.277	83	0.155	0.000	0.000
6	177.279	99.995	0.062	32	16.461	93.388	34.293	58	1.528	18.717	65.722	84	0.142	0.000	0.000
7	161.792	99.993	0.085	33	15.023	92.128	39.017	59	1.395	16.303	60.256	85	0.130	0.000	0.000
8	147.657	99.990	0.122	34	13.710	90.695	43.986	60	1.273	14.090	54.546	86	0.118	0.000	0.000
9	134.758	99.985	0.172	35	12.513	89.080	49.337	61	1.162	12.086	49.113	87	0.108	0.000	0.000
10	122.986	99.979	0.233	36	11.419	87.268	54.665	62	1.060	10.283	43.805	88	0.098	0.000	0.000
11	112.242	99.971	0.329	37	10.422	85.260	60.227	63	0.968	8.674	38.665	89	0.090	0.000	0.000
12	102.436	99.958	0.436	38	9.511	83.048	65.758	64	0.883	7.254	33.919	90	0.082	0.000	0.000
13	93.488	99.942	0.595	39	8.680	80.633	71.081	65	0.806	6.008	29.419	91	0.075	0.000	0.000
14	85.320	99.921	0.801	40	7.922	78.022	76.499	66	0.736	4.927	25.321	92	0.068	0.000	0.000
15	77.867	99.891	1.044	41	7.230	75.212	81.327	67	0.671	3.997	21.603	93	0.062	0.000	0.000
16	71.064	99.853	1.394	42	6.598	72.225	85.910	68	0.613	3.204	18.254	94	0.057	0.000	0.000
17	64.856	99.802	1.794	43	6.022	69.070	90.001	69	0.559	2.533	15.273	95	0.052	0.000	0.000
18	59.190	99.736	2.327	44	5.496	65.764	93.370	70	0.510	1.972	12.697	96	0.047	0.000	0.000
19	54.020	99.650	2.993	45	5.016	62.335	96.281	71	0.466	1.506	10.423	97	0.043	0.000	0.000
20	49.300	99.540	3.764	46	4.578	58.799	98.281	72	0.425	1.123	8.482	98	0.039	0.000	0.000
21	44.994	99.402	4.775	47	4.178	55.189	99.536	73	0.388	0.812	6.868	99	0.036	0.000	0.000
22	41.063	99.227	5.932	48	3.813	51.533	100.000	74	0.354	0.559	5.456	100	0.033	0.000	0.000
23	37.476	99.009	7.348	49	3.480	47.860	99.614	75	0.323	0.359	4.555	101	0.030	0.000	0.000
24	34.202	98.739	9.038	50	3.176	44.202	98.344	76	0.295	0.192	3.459				
25	31.214	98.407	10.958	51	2.898	40.590	96.381	77	0.269	0.065	1.762				
26	28.487	98.005	13.252	52	2.645	37.050	93.592	78	0.246	0.000	0.000				

Condition File Name	----						
Ref Index	1.70-0.20i		Calc Mode	Normal mode			
Averaging Count	64	Accumu	1	Interval	2	Sensor Starting Point	2
D Range for Analysis	0.030-280.000		Small Angle Light Scattering Sensor Filter		Enable		
Cell Type	----		Light Filter	----			
----	----		----	----			
----	----		----	----			
Sample Preparation	----						
Dim of Particle Amount	Area	Cum Distribution	Undersize		Diff Distribution	q/Δlogx	
Distribution Function	Logarithmic Gaussian				Smoothing Level	10	
Emulation Table	None				Data Shift	-9	
Sequence File Name	----						

File Name	MXENE-20220616T151052		Meas Date	2022/06/16 15:10:52(+0700)	
Sample ID	----	Sample No.	----		
Comment	----				
Median D	1.935		Mean V	1.988	
Modal D	1.778		Std Dev	0.597	
Absorbance	0.470		A Mean V	202.868	



	Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%		Diam	Cum%	Diff%
	x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x		x(μm)	Q2(%)	q2/Δlog x
1	280.000	99.975	0.256	27	25.999	96.592	19.836	53	2.414	56.207	99.026	79	0.224	5.522	31.384
2	255.539	99.969	0.315	28	23.727	96.079	22.199	54	2.203	53.650	99.707	80	0.205	4.712	28.398
3	233.215	99.961	0.393	29	21.654	95.506	24.744	55	2.011	51.075	100.000	81	0.187	3.979	25.593
4	212.842	99.951	0.485	30	19.763	94.867	27.473	56	1.835	48.492	99.884	82	0.170	3.318	22.973
5	194.248	99.938	0.593	31	18.036	94.158	30.367	57	1.675	45.913	99.356	83	0.155	2.724	20.532
6	177.279	99.923	0.731	32	16.461	93.373	33.447	58	1.528	43.347	98.429	84	0.142	2.194	18.272
7	161.792	99.904	0.886	33	15.023	92.509	36.679	59	1.395	40.805	97.134	85	0.130	1.722	16.201
8	147.657	99.881	1.079	34	13.710	91.562	40.048	60	1.273	38.296	95.418	86	0.118	1.304	14.298
9	134.758	99.853	1.306	35	12.513	90.528	43.595	61	1.162	35.832	93.401	87	0.108	0.934	12.764
10	122.986	99.819	1.567	36	11.419	89.402	47.204	62	1.060	33.420	91.033	88	0.098	0.605	11.892
11	112.242	99.779	1.888	37	10.422	88.183	50.950	63	0.968	31.069	88.342	89	0.090	0.298	9.158
12	102.436	99.730	2.246	38	9.511	86.867	54.755	64	0.883	28.788	85.438	90	0.082	0.061	2.369
13	93.488	99.672	2.676	39	8.680	85.453	58.573	65	0.806	26.581	82.210	91	0.075	0.000	0.000
14	85.320	99.603	3.175	40	7.922	83.940	62.492	66	0.736	24.458	78.848	92	0.068	0.000	0.000
15	77.867	99.521	3.735	41	7.230	82.327	66.302	67	0.671	22.422	75.299	93	0.062	0.000	0.000
16	71.064	99.425	4.402	42	6.598	80.614	70.119	68	0.613	20.477	71.576	94	0.057	0.000	0.000
17	64.856	99.311	5.142	43	6.022	78.803	73.849	69	0.559	18.629	67.830	95	0.052	0.000	0.000
18	59.190	99.178	5.997	44	5.496	76.896	77.409	70	0.510	16.877	63.936	96	0.047	0.000	0.000
19	54.020	99.023	6.968	45	5.016	74.897	80.920	71	0.466	15.226	60.074	97	0.043	0.000	0.000
20	49.300	98.843	8.042	46	4.578	72.807	84.140	72	0.425	13.674	56.208	98	0.039	0.000	0.000
21	44.994	98.636	9.273	47	4.178	70.634	87.183	73	0.388	12.223	52.335	99	0.036	0.000	0.000
22	41.063	98.396	10.627	48	3.813	68.383	89.977	74	0.354	10.871	48.585	100	0.033	0.000	0.000
23	37.476	98.122	12.138	49	3.480	66.059	92.434	75	0.323	9.616	44.868	101	0.030	0.000	0.000
24	34.202	97.808	13.814	50	3.176	63.672	94.650	76	0.295	8.458	41.291				
25	31.214	97.451	15.640	51	2.898	61.228	96.461	77	0.269	7.391	37.846				
26	28.487	97.048	17.653	52	2.645	58.736	97.928	78	0.246	6.414	34.521				

Condition File Name	----				
Ref Index	1.70-0.20i		Calc Mode	Normal mode	
Averaging Count	64	Accumu	1	Interval	2
D Range for Analysis	0.030-280.000		Small Angle Light Scattering Sensor Filter	Enable	
Cell Type	----		Light Filter	----	
----	----		----	----	
----	----		----	----	
Sample Preparation	----				
Dim of Particle Amount	Area	Cum Distribution	Undersize	Diff Distribution	q/Δlogx
Distribution Function	Logarithmic Gaussian			Smoothing Level	10
Emulation Table	None			Data Shift	-9
Sequence File Name	----				

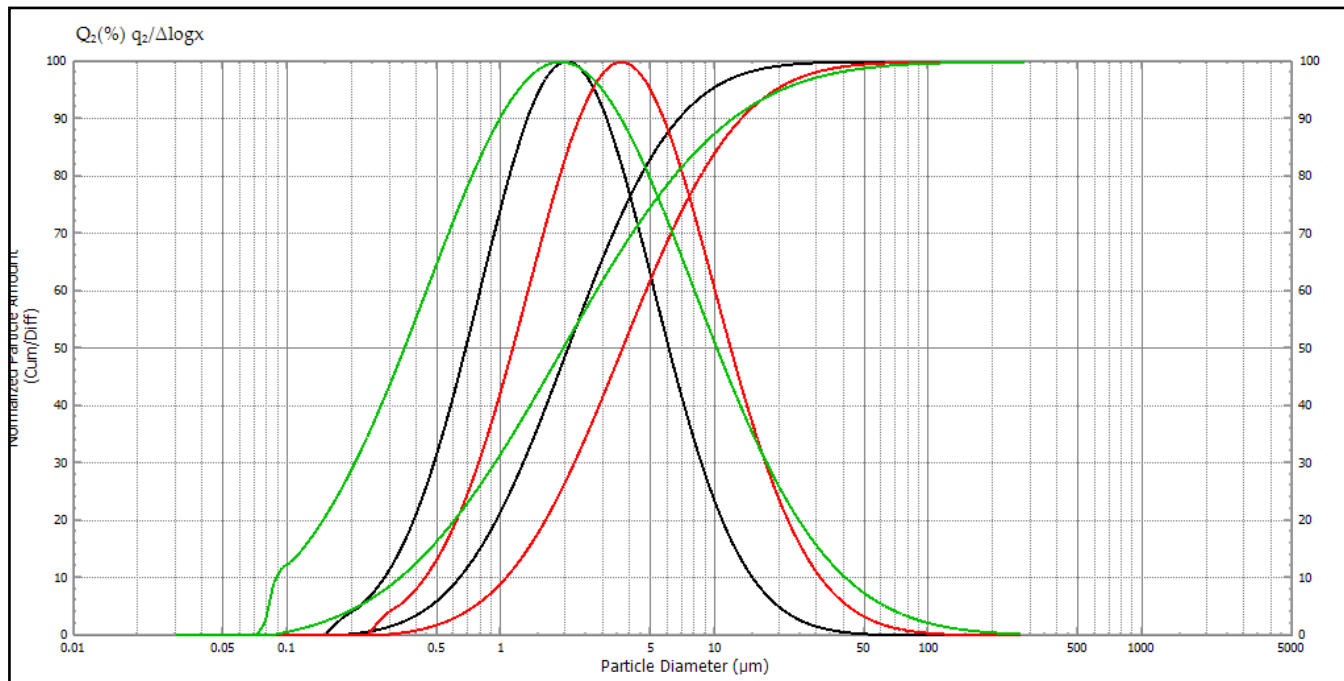
Overlay Graph

S Level :10

D Func :LG

D Shift :-9

- 1 — MXENE-EG 20-1-20
 2 — MXENE-EG 10-1-20
 3 — MXENE-20220616T



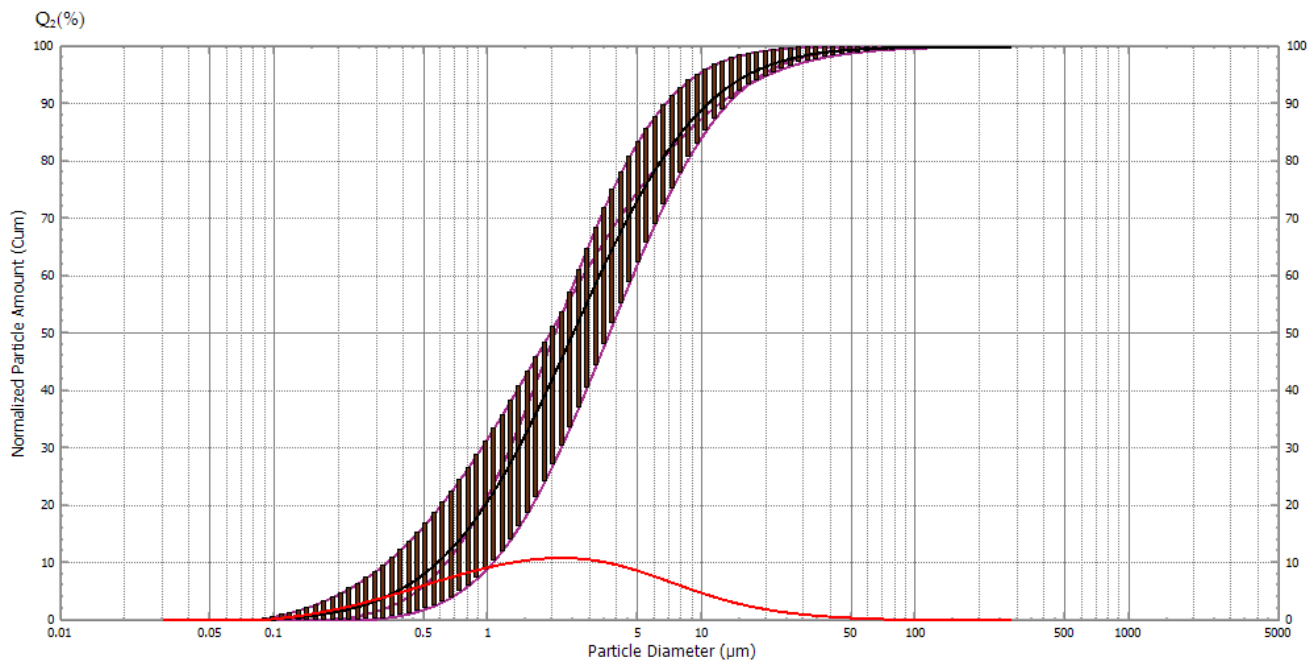
	File Name	Sample ID	Sample No.	Ref Index		
1	MXENE-EG 20-1-20220616T150303	----	----	1.70-0.20i		
2	MXENE-EG 10-1-20220616T150740	----	----	1.70-0.20i		
3	MXENE-20220616T151052	----	----	1.70-0.20i		
	Calc Mode	Meas Date	Median D (µm)	Modal D (µm)	Mean V (µm)	Std Dev
1	Normal mode	2022/06/16 15:03:03(+0700)	2.041	2.239	2.057	0.398
2	Normal mode	2022/06/16 15:07:40(+0700)	3.670	3.548	3.702	0.427
3	Normal mode	2022/06/16 15:10:52(+0700)	1.935	1.778	1.988	0.597

Statistical

S Level :10

D Func :LG

D Shift :-9



	Diam (µm)	Cum%		Diff%	
		Mean Value	Std Dev	Mean Value	Std Dev
1	280.000	99.992	0.012	0.085	0.085
2	255.539	99.990	0.015	0.117	0.117
3	233.215	99.986	0.018	0.138	0.138
4	212.842	99.983	0.023	0.172	0.172
5	194.248	99.978	0.028	0.212	0.212
6	177.279	99.973	0.035	0.265	0.265
7	161.792	99.966	0.044	0.323	0.323
8	147.657	99.957	0.054	0.400	0.400
9	134.758	99.946	0.066	0.493	0.493
10	122.986	99.933	0.081	0.600	0.600
11	112.242	99.916	0.098	0.739	0.739
12	102.436	99.896	0.119	0.908	0.908
13	93.488	99.871	0.142	1.099	1.099
14	85.320	99.840	0.171	1.337	1.337
15	77.867	99.803	0.204	1.610	1.610
16	71.064	99.757	0.242	1.959	1.959
17	64.856	99.701	0.287	2.349	2.349
18	59.190	99.633	0.338	2.829	2.829
19	54.020	99.551	0.397	3.399	3.399
20	49.300	99.451	0.465	4.043	4.043
21	44.994	99.332	0.542	4.837	4.837
22	41.063	99.187	0.631	5.728	5.728
23	37.476	99.015	0.732	6.782	6.782
24	34.202	98.809	0.848	8.008	8.008
25	31.214	98.564	0.979	9.377	9.377
26	28.487	98.276	1.130	10.990	10.990

	Diam (μm)	Cum%		Diff%	
		Mean Value	Std Dev	Mean Value	Std Dev
27	25.999	97.934	1.300	12.788	12.788
28	23.727	97.534	1.494	14.826	14.826
29	21.654	97.067	1.712	17.123	17.123
30	19.763	96.524	1.958	19.653	19.653
31	18.036	95.897	2.233	22.469	22.469
32	16.461	95.176	2.540	25.557	25.557
33	15.023	94.351	2.878	28.906	28.906
34	13.710	93.413	3.250	32.514	32.514
35	12.513	92.353	3.653	36.417	36.417
36	11.419	91.159	4.088	40.486	40.486
37	10.422	89.826	4.550	44.817	44.817
38	9.511	88.345	5.038	49.295	49.295
39	8.680	86.709	5.546	53.840	53.840
40	7.922	84.917	6.067	58.613	58.613
41	7.230	82.958	6.598	63.223	63.223
42	6.598	80.840	7.128	67.889	67.889
43	6.022	78.560	7.651	72.426	72.426
44	5.496	76.121	8.158	76.665	76.665
45	5.016	73.534	8.642	80.851	80.851
46	4.578	70.801	9.092	84.490	84.490
47	4.178	67.941	9.505	87.810	87.810
48	3.813	64.965	9.872	90.676	90.676
49	3.480	61.889	10.188	92.923	92.923
50	3.176	58.736	10.452	94.705	94.705
51	2.898	55.521	10.655	95.795	95.795
52	2.645	52.270	10.803	96.256	96.256
53	2.414	49.004	10.891	96.089	96.089
54	2.203	45.748	10.922	95.290	95.290
55	2.011	42.522	10.901	93.794	93.794
56	1.835	39.352	10.825	91.802	91.802
57	1.675	36.256	10.702	89.209	89.209
58	1.528	33.255	10.535	86.097	86.097
59	1.395	30.368	10.327	82.672	82.672
60	1.273	27.604	10.082	78.699	78.699
61	1.162	24.985	9.802	74.609	74.609
62	1.060	22.512	9.492	70.257	70.257
63	0.968	20.196	9.154	65.704	65.704
64	0.883	18.042	8.791	61.225	61.225
65	0.806	16.047	8.406	56.592	56.592
66	0.736	14.216	8.002	52.134	52.134
67	0.671	12.541	7.581	47.775	47.775
68	0.613	11.019	7.147	43.524	43.524
69	0.559	9.645	6.703	39.541	39.541
70	0.510	8.408	6.252	35.728	35.728
71	0.466	7.301	5.800	32.179	32.179
72	0.425	6.314	5.349	28.887	28.887
73	0.388	5.438	4.902	25.843	25.843
74	0.354	4.663	4.465	23.050	23.050
75	0.323	3.980	4.039	20.595	20.595

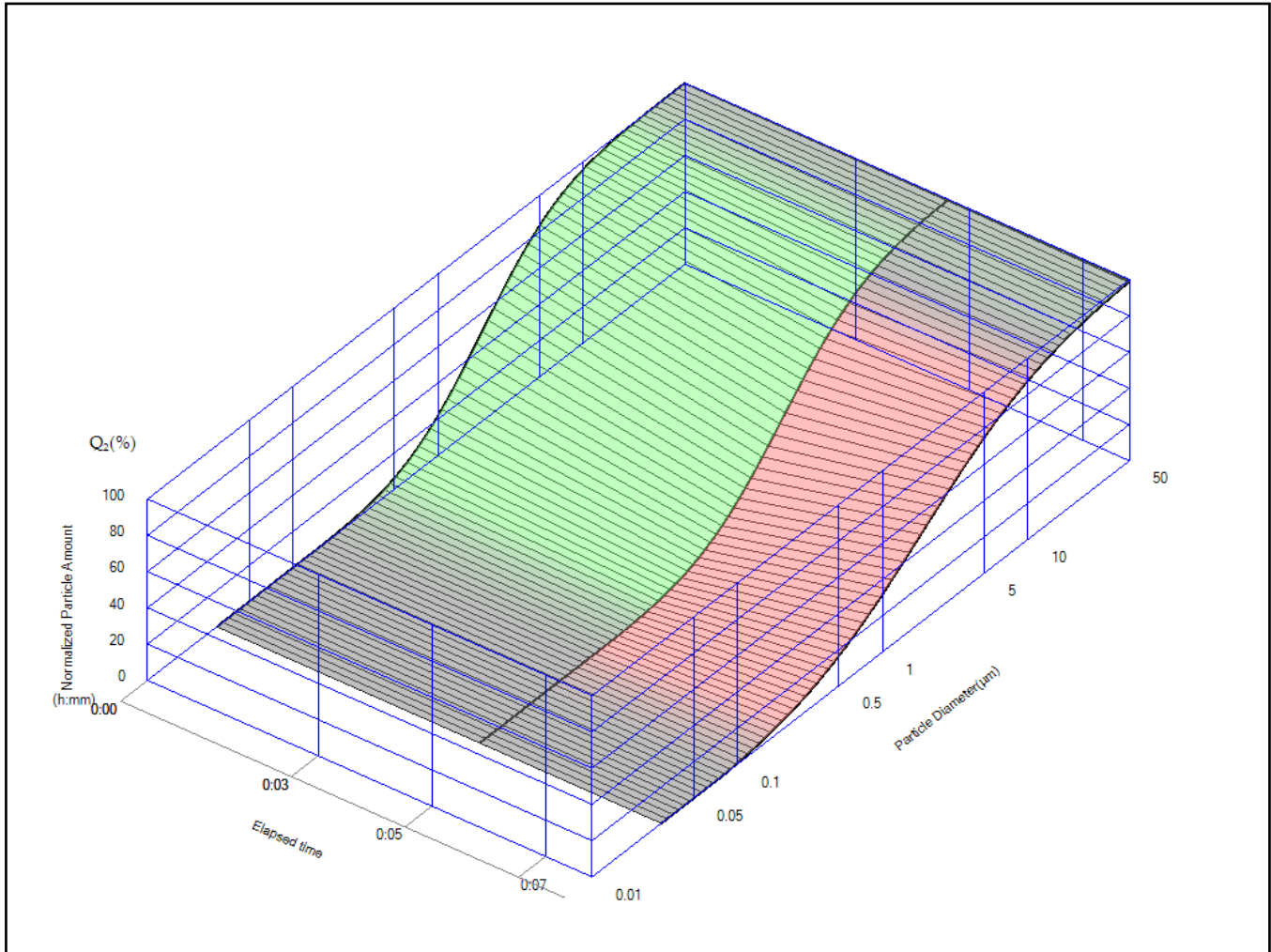
	Diam (μm)	Cum%		Diff%	
		Mean Value	Std Dev	Mean Value	Std Dev
76	0.295	3.376	3.632	18.239	18.239
77	0.269	2.847	3.240	15.850	15.850
78	0.246	2.395	2.859	13.609	13.609
79	0.224	2.015	2.489	12.088	12.088
80	0.205	1.681	2.147	10.783	10.783
81	0.187	1.385	1.835	9.512	9.512
82	0.170	1.126	1.550	8.169	8.169
83	0.155	0.908	1.284	6.844	6.844
84	0.142	0.731	1.034	6.091	6.091
85	0.130	0.574	0.812	5.400	5.400
86	0.118	0.435	0.615	4.766	4.766
87	0.108	0.311	0.441	4.255	4.255
88	0.098	0.202	0.285	3.964	3.964
89	0.090	0.099	0.140	3.053	3.053
90	0.082	0.020	0.029	0.790	0.790
91	0.075	0.000	0.000	0.000	0.000
92	0.068	0.000	0.000	0.000	0.000
93	0.062	0.000	0.000	0.000	0.000
94	0.057	0.000	0.000	0.000	0.000
95	0.052	0.000	0.000	0.000	0.000
96	0.047	0.000	0.000	0.000	0.000
97	0.043	0.000	0.000	0.000	0.000
98	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000
99	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000
100	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000
101	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000

3D

S Level :10

D Func :LG

D Shift :-9



LAMPIRAN E
(DATA PENENTUAN
ISOTHERM ADSORPSI)

Penentuan Persamaan Isoterm

Berikut adalah nilai konsentrasi akhir yang dimasukkan ke dalam persamaan isoterm dan data yang digunakan yaitu data variasi konsentrasi awal adsorbat dan variasi dosis adsorben yang selanjutnya digunakan untuk menguji kesesuaian isoterm. Data hasil konsentrasi yang dimasukkan ke dalam persamaan Isoterm dapat dilihat pada **Tabel E.1**. Parameter yang diperoleh dari isoterm dapat dilihat pada **Tabel E.2** dan **Tabel E.3**.

Tabel E. 2 Hasil Konsentrasi Akhir MXene/Eceng Gondok

VARIASI KONSENTRASI DOSIS ADSORBEN		
Sampel	Absorban	C _e (mg/L)
0,1 g/L 30 menit	0,175604	8,778
0,3 g/l 30 menit	0,158632	7,880
0,5 g/L 30 menit	0,154304	7,651
0,7 g/l 30 menit	0,133986	6,576
1 g/l 30 menit	0,122313	5,958
VARIASI KONSENTRASI AWAL ADSORBAT		
Sampel	Absorban	C _e (mg/L)
5 mg/L 30 menit	0,06117	2,305
15 mg/L 30 menit	0,13542	6,906
25 mg/L 30 menit	0,07466	3,141
35 mg/L 30 menit	0,15248	7,963

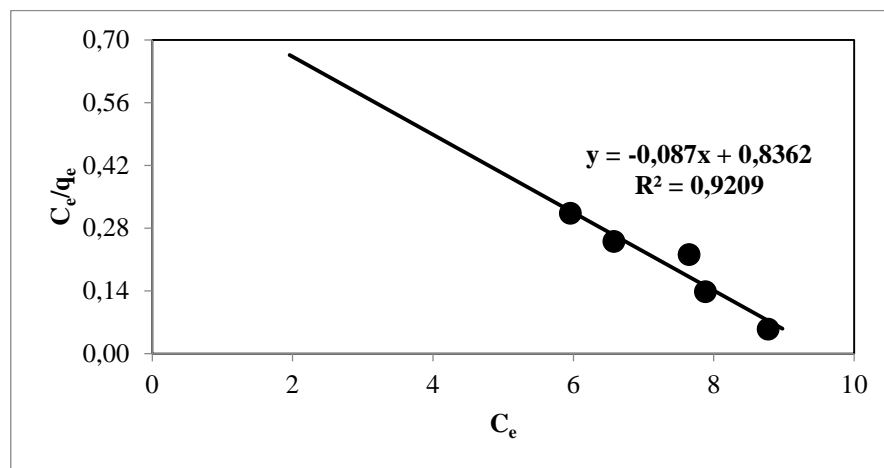
Berdasarkan data diperoleh persamaan isoterm yang dapat dilihat pada **Tabel E.4** dan **Tabel E.5** dan grafik persamaan isoterm yang dapat dilihat pada **Gambar E.1**, **Gambar E.2**, **Gambar E.3**, dan **Gambar E.4**

Tabel E.4 Rekapitulasi Nilai Konstanta Isoterm Langmuir dan Freundlich dari proses Adsorpsi Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Variasi Dosis Adsorben

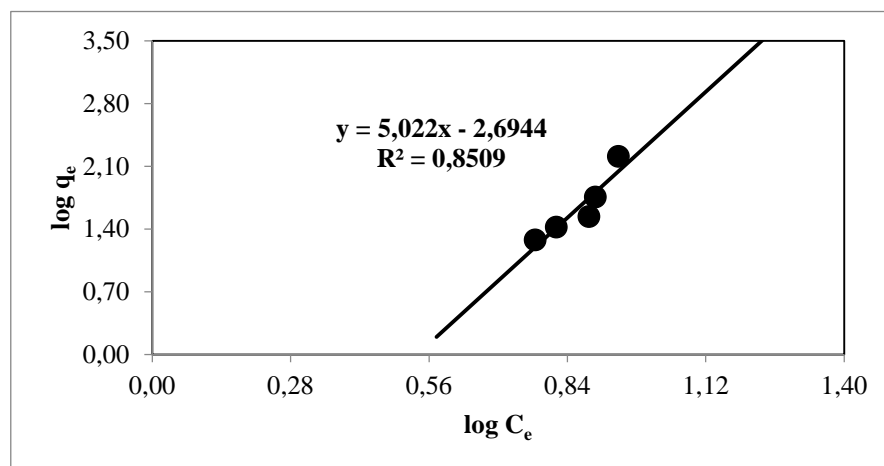
Model Isoterm	Plot	Persamaan Garis	R ²	q _m	K _L
Langmuir					
Tipe 1	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C _e	y = - 0,087x + 0,8362	0,9209	-11,494	-0,104
Tipe 2	$\frac{1}{q_e}$ vs $\frac{1}{C_e}$	y = 0,8175x - 0,0844	0,9578	-11,848	-0,103
Tipe 3	q _e vs $\frac{q_e}{C_e}$	y = 9,316x - 9,9181	0,9995	-9,918	-0,107
Tipe 4	$\frac{q_e}{C_e}$ vs q _e	y = 0,1073x + 1,0681	0,9995	-9,954	-0,107
Freundlich	Plot	Persamaan Garis	R ²	1/n	K _F
	Log q _e vs Log C _e	y = 5,022x - 2,6944	0,8509	5,022	0,002

Tabel E.5 Rekapitulasi Nilai Konstanta Isoterm Langmuir dan Freundlich dari proses Adsorpsi Logam Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat

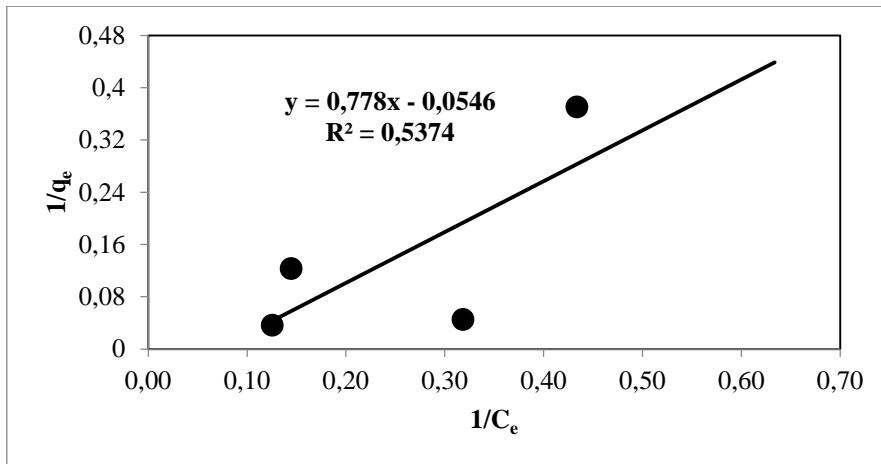
Model Isoterm		Parameter			
Langmuir	Plot	Persamaan Garis	R ²	q _m	K _L
Tipe 1	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e	$y = -0,0105x + 0,5899$	0,0061	-95,238	-0,018
Tipe 2	$\frac{1}{q_e}$ vs $\frac{1}{C_e}$	$y = 0,778x - 0,0546$	0,5374	-18,315	-0,070
Tipe 3	q_e vs $\frac{q_e}{C_e}$	$y = 2,9959x + 5,4123$	0,5143	5,412	-0,334
Tipe 4	$\frac{q_e}{C_e}$ vs q_e	$y = 0,1717x + 0,6126$	0,5143	-3,568	-0,172
Freundlich	Plot	Persamaan Garis	R ²	1/n	K _F
	Log q _e vs Log C _e	$y = 0,99x + 0,384$	0,3178	0,99	2,421



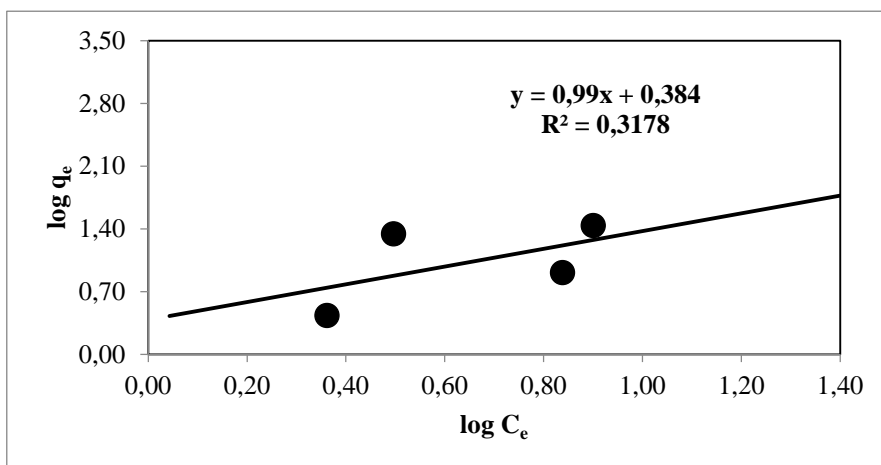
Gambar E. 1 Grafik Isoterm Langmuir Pada Percobaan Adsorpsi Air Limbah Artifiisial Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Variasi Dosis Adsorben



Gambar E. 2 Grafik Isoterm Freundlich pada Percobaan Adsorpsi Air Limbah Artifiisial Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Variasi Dosis Adsorben



Gambar E. 3 Grafik Isoterm Langmuir pada Percobaan Adsorpsi Air Limbah Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat



Gambar E. 4 Grafik Isoterm Freundlich pada Percobaan Adsorpsi Air Limbah Artifisial Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Variasi Konsentrasi Adsorbat

Contoh perhitungan konstanta isoterm dengan adsorben pada variasi dosis adsorben

a. Isoterm Freundlich

Contoh perhitungan konsntanta isoterm Freundlich dengan variasi dosis adsorben:

$$\text{Log } q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e$$

1) Perhitungan tetapan empiris (n)

$$y = 5,022x - 2,6944$$

$$\frac{1}{n} = 5,022$$

$$n = 0,1991$$

2) Perhitungan tetapan Freundlich (K_f)

$$y = 5,022x - 2,6944$$

$$K_f = 10^{-2,6944}$$

$$K_f = 0,002021$$

b. Isoterm Langmuir

Contoh perhitungan konstanta isoterm Langmuir dengan variasi dosis adsorben:

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

- 1) Perhitungan kapasitas adsorpsi maksimum

$$y = -0,087x + 0,8362$$

Kapasitas adsorpsi maksimum (q_m)

$$q_m = \frac{1}{-0,087}$$

$$q_m = -11,494$$

- 2) Perhitungan konstanta Langmuir (K_L)

$$y = -0,087x + 0,8362$$

Konstanta Langmuir (K_L)

$$K_L = \frac{1}{q_m \times (0,8362)}$$

$$K_L = \frac{1}{-11,494 \times (0,8362)}$$

$$K_L = -0,104$$

LAMPIRAN F
(DATA PENENTUAN
KINETIKA ADSORPSI)

Penentuan Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi dilakukan untuk melihat bagaimana tingkat laju penyerapan yang terjadi pada adsorben terhadap adsorbat. Kinetika adsorpsi yang diuji adalah orde nol, orde satu, orde dua, *pseudo first-order*, dan *pseudo second-order*. Berikut adalah data yang dimasukkan ke dalam persamaan kinetika adsorpsi. Data yang dimasukkan ke dalam persamaan kinetika dapat dilihat pada **Tabel F.1**

Tabel F. 1 Persamaan Kinetika Adsorpsi

Variasi	t	Konsentrasi Awal (C_0)	Konsentrasi Akhir (C)	Ln C	1/C	q_t	q_e	$\log(q_t - q_e)$	t/q_t
Rasio 20:1, Konsentrasi 25 mg/L	10	25	17,615	2,869	0,057	7,385	21,859	1,161	1,354
	20	25	11,396	2,433	0,088	13,604		0,917	1,470
	30	25	3,141	1,145	0,318	21,859		1,000	1,372
	40	25	3,798	1,335	0,263	21,202		-0,182	1,887
	50	25	4,356	1,472	0,230	20,644		0,084	2,422

1) Perhitungan Kinetika Orde Nol

$$C = C_0 - kt$$

$$y = -0,3412x + 18,296$$

$$k = -0,3412$$

Berdasarkan grafik diperoleh nilai R^2 yaitu:

$$R^2 = 0,7343$$

2) Perhitungan Kinetika Orde Satu

$$\ln C = -kt + \ln C_0$$

$$y = -0,0389x + 3,0185$$

$$k = -0,0389$$

Berdasarkan grafik diperoleh nilai R^2 yaitu:

$$R^2 = 0,6635$$

3) Perhitungan Kinetika Orde Dua

$$\frac{1}{C} = kt + \frac{1}{C_0}$$

$$y = 0,0052x + 0,0348$$

$$k = 0,0052$$

Berdasarkan grafik diperoleh nilai R^2 yaitu:

$$R^2 = 0,5263$$

4) Perhitungan Kinetika *Pseudo First-order*

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{k}{2,303}\right) t$$

$$y = -0,0325x + 1,5173$$

$$q_e = 10^{1,5173}$$

$$q_e = 37,2649$$

$$k = 0,0325 \times 2,303$$

$$k = 0,0748$$

Berdasarkan grafik diperoleh nilai R^2 yaitu:

$$R^2 = 0,7278$$

5) Perhitungan Kinetika *Pseudo Second-order*

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

$$y = 0,0255x + 0,9354$$

$$q_e = \frac{1}{0,0255}$$

$$q_e = 39,2157$$

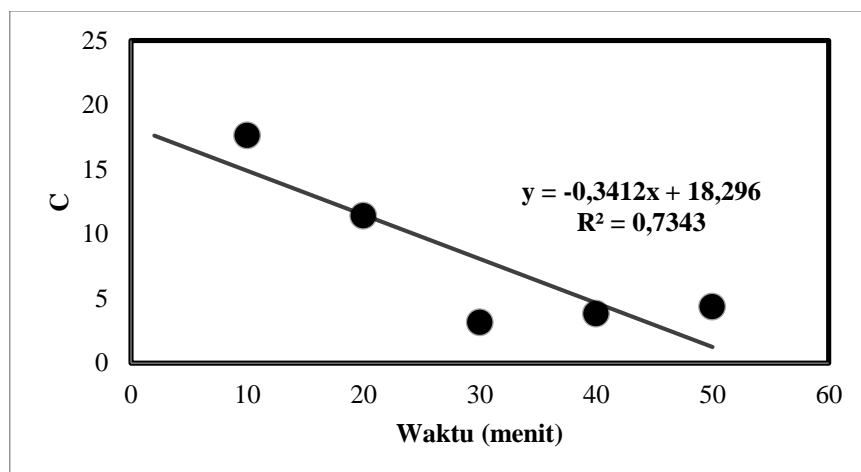
$$k = \frac{1}{0,9354 \times 39,2157^2}$$

$$k = 0,0007$$

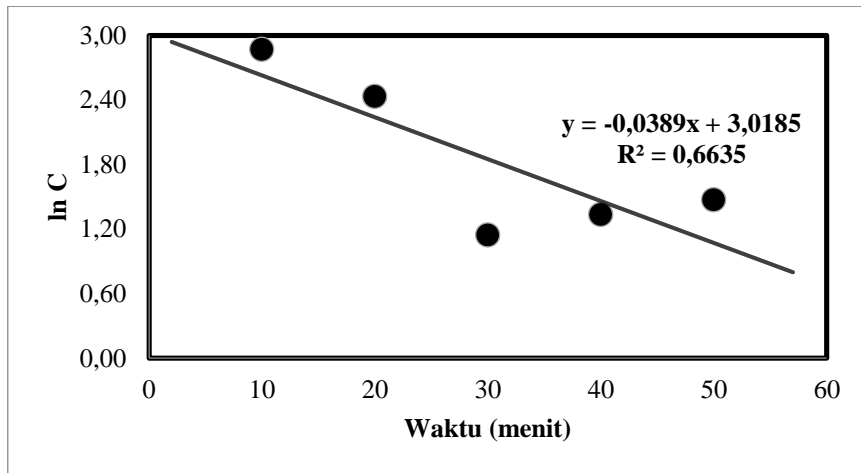
Berdasarkan grafik diperoleh nilai R^2 yaitu:

$$R^2 = 0,7793$$

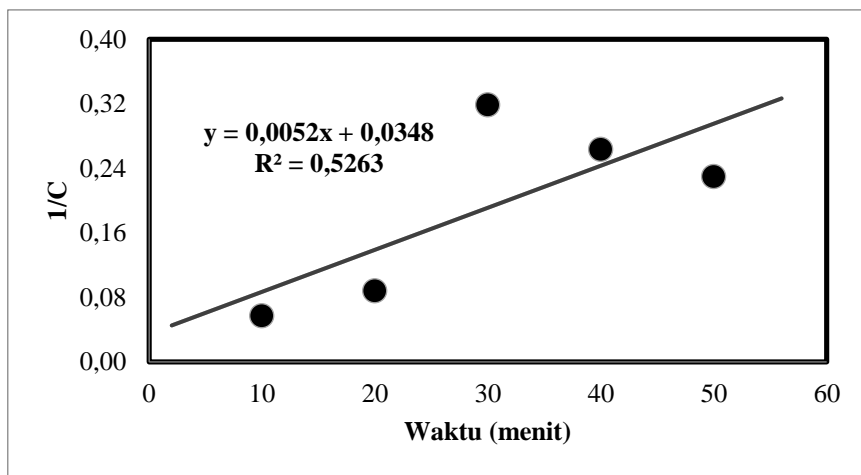
Berdasarkan perhitungan kinetika adsorpsi maka diperoleh grafik kinetika adsorpsi seperti pada **Gambar F.1, Gambar F.2, Gambar F.3, Gambar F.4** dan **Gambar F.5**



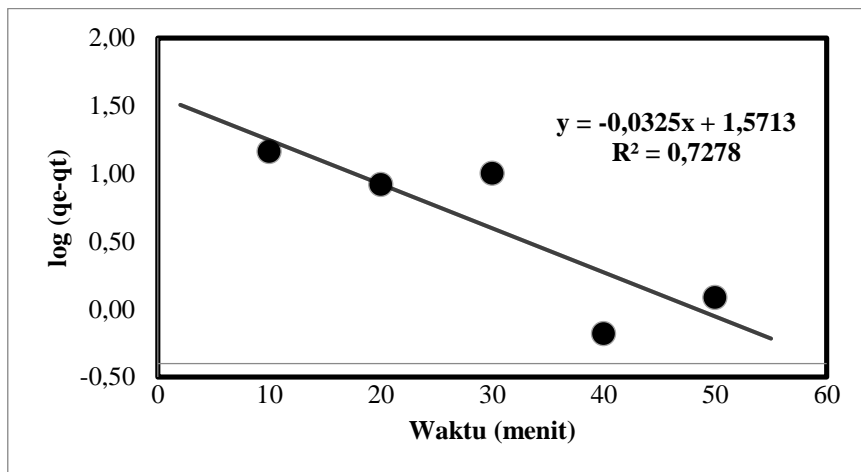
Gambar F. 1 Grafik Orde Nol Adsorpsi Tembaga (Cu) dari Larutan Artifisial Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Terbaik



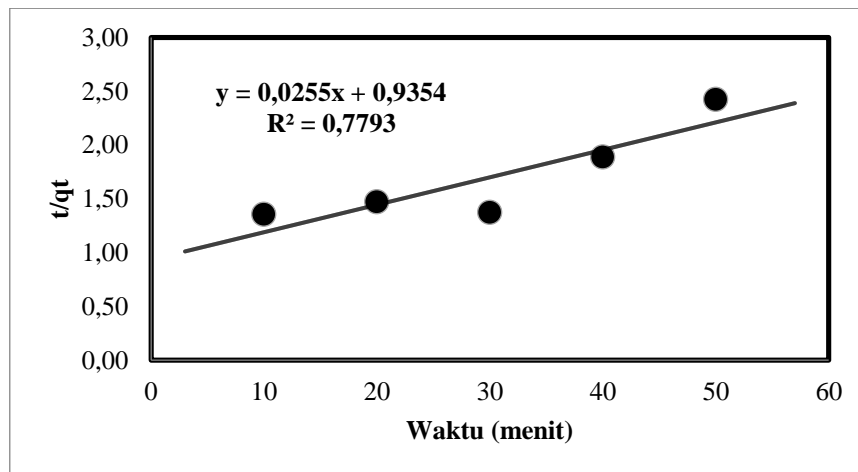
Gambar F. 2 Grafik Orde Satu Adsorpsi Tembaga (Cu) dari Larutan Artifisial Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Terbaik



Gambar F. 3 Grafik Orde Dua Adsorpsi Tembaga (Cu) dari Larutan Artifisial Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Terbaik



Gambar F. 4 Grafik Pseudo First-order Adsorpsi Tembaga (Cu) dari Larutan Artifisial Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Terbaik



Gambar F. 5 Grafik *Pseudo Second-order* Adsorpsi Tembaga (Cu) dari Larutan Artifisial Cu Menggunakan Adsorben MXene/Eceng Gondok dengan Kondisi Penyisihan Terbaik

Berdasarkan grafik kinetika adsorpsi diatas, dapat dilihat bahwa Nilai R^2 (koefisien korelasi) dan k (konstanta laju adsorpsi) pada kinetika adsorpsi Orde 0, 1, dan 2 pada logam Cu yang dihasilkan dari persamaan regresi linier dapat dilihat pada **Tabel E.2**

Tabel F. 2 Nilai R^2 dan k Kinetika Adsorpsi Logam Cu Menggunakan MXene Didelaminasi (Rasio 20:1, Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L)

Variasi Terbaik	Model Kinetika		Parameter	
	Orde	R^2	k	
Rasio 20:1, Konsentrasi Adsorbat 25 mg/L	Orde Nol	0,7343	-0,3412	
	Orde Satu	0,6635	0,0389	
	Orde Dua	0,5263	0,0052	
	<i>Pseudo Order</i>	R^2	q_e	k
	<i>Pseudo First- Order</i>	0,7278	37,2649	0,0748
	<i>Pseudo Second- Order</i>	0,7793	39,2157	0,0007

LAMPIRAN G
(UJI STATISTIK)

LAMPIRAN G.1

(UJI ANOVA)

Uji ANOVA

Analisis statistik yang dilakukan dengan uji ANOVA ditentukan menggunakan *Microsoft Excel*. Data yang dimasukkan untuk mendapatkan hasil ANOVA dapat dilihat pada **Tabel G.1** dan **Tabel G.2**. Hasil uji ANOVA dapat dilihat pada **Tabel G.3**. Berikut adalah data yang dimasukkan untuk uji ANOVA. Variasi yang digunakan dalam uji ANOVA adalah variasi konsentrasi adsorbat yaitu 5, 15, 25, dan 35 mg/L

Tabel G. 1 Tabel Data Efisiensi Penyisihan Triplo Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L dengan Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok 10:1 dan 20:1

Efisiensi Penyisihan (%)			
MXene/Eceng Gondok 10:1			
Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 15 mg/L	Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 35 mg/L
45,90	51,01	80,47	79,01
48,62	51,32	80,59	79,00
51,07	51,95	79,86	78,53
MXene/Eceng Gondok 20:1			
Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 15 mg/L	Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 35 mg/L
55,01	55,06	86,98	77,26
53,46	53,62	86,43	77,22
53,21	53,20	88,90	77,26

Tabel G. 2 Tabel Data Kapasitas Adsorpsi Triplo Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L dengan Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok 10:1 dan 20:1

Kapasitas Adsorpsi (mg/g)			
MXene/Eceng Gondok 10:1			
Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 15 mg/L	Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 35 mg/L
2,29	7,65	20,12	27,65
2,43	7,70	20,15	27,65
2,55	7,79	19,96	27,48
MXene/Eceng Gondok 20:1			
Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 15 mg/L	Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 35 mg/L
2,75	8,26	21,74	27,04
2,67	8,04	21,61	27,03
2,66	7,98	22,22	27,04

Tabel G. 3 Hasil Uji ANOVA Variasi *Power* Variasi Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L dengan Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok 10:1 dan 20:1

		<i>p-value</i>	F	F _{crit}
MXene/ Eceng Gondok Rasio 10:1	Efisiensi penyisihan	$2,047 \times 10^{-9}$	493,6229	4,066181
	Kapasitas Adsorpsi	$5,547 \times 10^{-17}$	38.697,34	4,066181
MXene/ Eceng Gondok Rasio 20:1	Efisiensi penyisihan	$0,146 \times 10^{-9}$	958,5496	4,066181
	Kapasitas Adsorpsi	$5,747 \times 10^{-15}$	12.127,56	4,066181

LAMPIRAN G.2
(UJI t)

Analisis statistik yang dilakukan dengan uji *t-test* ditentukan menggunakan *Microsoft Excel*. Data yang dimasukkan untuk mendapatkan hasil *t-test* dapat dilihat pada **Tabel G.4** dan **Tabel G.5**. Hasil uji *t-test* dapat dilihat pada **Tabel G.6**. Berikut adalah data yang dimasukkan untuk uji *t-test* yaitu data efisiensi dan kapasitas adsorpsi MXene pada dua variasi rasio nanokomposit MXene/Eceng Gondok yaitu 10:1 dan 20:1

Tabel G. 4 Tabel Data Efisiensi Penyisihan Triplo Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok yaitu 10:1 dan 20:1 dengan Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

Efisiensi Penyisihan (%)	
MXene/Eceng Gondok 10:1	MXene/Eceng Gondok 20:1
Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 5 mg/L
45,90	55,01
48,62	53,46
51,07	53,21
Konsentrasi 15 mg/L	Konsentrasi 15 mg/L
51,01	55,06
51,32	53,62
51,95	53,20
Konsentrasi 25 mg/L	Konsentrasi 25 mg/L
80,47	86,98
80,59	86,43
79,86	88,90
Konsentrasi 35 mg/L	Konsentrasi 35 mg/L
79,01	77,26
79,00	77,22
78,53	77,26

Tabel G. 5 Tabel Data Kapasitas Adsorpsi Triplo Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok yaitu 10:1 dan 20:1 dengan Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	
MXene/Eceng Gondok 10:1	MXene/Eceng Gondok 20:1
Konsentrasi 5 mg/L	Konsentrasi 5 mg/L
2,29	2,75
2,43	2,67
2,55	2,66
Konsentrasi 15 mg/L	Konsentrasi 15 mg/L
7,65	8,26
7,70	8,04
7,79	7,98
Konsentrasi 25 mg/L	Konsentrasi 25 mg/L
20,12	21,74
20,15	21,61
19,96	22,22
Konsentrasi 35 mg/L	Konsentrasi 35 mg/L

Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	
MXene/Eceng Gondok 10:1	MXene/Eceng Gondok 20:1
27,65	27,04
27,65	27,03
27,48	27,04

Tabel G. 6 Hasil Uji *T-Test* Variasi Rasio Nanokomposit MXene/Eceng Gondok yaitu 10:1 dan 20:1 dengan Konsentrasi Adsorbat 5, 15, 25, dan 35 mg/L

		<i>p-value</i>	t-hitung	t-tabel
Konsentrasi	Efisiensi Penyisihan	0,02184	3,36168	2,35336
Adsorbat 5 mg/L	Kapasitas Adsorpsi	0,02184	3,36168	2,35336
Konsentrasi	Efisiensi Penyisihan	0,01365	4,03973	2,35336
Adsorbat 15 mg/L	Kapasitas Adsorpsi	0,01365	4,03973	2,35336
Konsentrasi	Efisiensi Penyisihan	0,00592	9,11036	2,91999
Adsorbat 25 mg/L	Kapasitas Adsorpsi	0,00592	9,11036	2,91999
Konsentrasi	Efisiensi Penyisihan	0,00490	10,02486	2,91999
Adsorbat 35 mg/L	Kapasitas Adsorpsi	0,00490	10,02486	2,91999

LAMPIRAN H
(DOKUMENTASI)

DOKUMENTASI

Alat – alat Penelitian

1. Neraca Analitik



2. Erlenmeyer



3. Ultrasonic Probe



4. Beaker glass



5. Spatula



6. Cawan



7. Beaker Plastik



8. Pompa Vakum



9. Botol Sampel



10. Shaker



11. Kertas Saring Whatman No.42



12. AAS



13. pH meter



14. Oven



15. Labu Ukur



16. Tube centrifuge



17. Saringan *mesh*



18. *Centrifuge*



19. *Hotplate*



20. Kertas Lakmus



21. SEM-EDX



Adsorben MXene/Eceng gondok

1. MAX



2. MXene tanpa Modifikasi



3. MXene/Eceng gondok 10:1



4. MXene/Eceng gondok 20:1



5. MXene setelah US



6. Eceng gondok setelah US



7. MXene/Eceng gondok 10:1 cair



8. MXene/Eceng gondok 20:1 cair



Bahan – Bahan Penelitian

1. HF



2. NaOH 0,5 M



3. HCL 1 M



4. Larutan Artifisial Cu



5. Larutan standar Pb



6. Larutan standar Cd



7. Larutan standar Cr



Proses Adsorpsi

1. Percobaan Adsorpsi Batch



2. Ultrasonikasi



Tugas Akhir

by M. Zaki Farhan

Submission date: 01-Oct-2022 04:38PM (UTC+0800)

Submission ID: 1913672346

File name: ugas_Akhir_M._Zaki_Farhan_1810943020_-_Muhammad_Zaki_Farhan.docx (2.63M)

Word count: 29319

Character count: 182412

Tugas Akhir

ORIGINALITY REPORT

19%

SIMILARITY INDEX

19%

INTERNET SOURCES

8%

PUBLICATIONS

0%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	scholar.unand.ac.id Internet Source	6%
2	123dok.com Internet Source	1%
3	repository.its.ac.id Internet Source	1%
4	repository.ub.ac.id Internet Source	1%
5	adoc.pub Internet Source	1%
6	media.neliti.com Internet Source	1%
7	digilib.uinsby.ac.id Internet Source	1%
8	jurnaldampak.ft.unand.ac.id Internet Source	<1%
9	docplayer.info Internet Source	<1%

10	www.scribd.com Internet Source	<1 %
11	id.scribd.com Internet Source	<1 %
12	Nai-Hao YE. "Effect of Heavy Metals (Cd, Cu) on the Gametophytes of Laminaria japonica Aresch", Journal of Integrative Plant Biology, 8/2005 Publication	<1 %
13	dspace.uui.ac.id Internet Source	<1 %
14	text-id.123dok.com Internet Source	<1 %
15	jrk.fmipa.unand.ac.id Internet Source	<1 %
16	e-journal.unair.ac.id Internet Source	<1 %
17	id.123dok.com Internet Source	<1 %
18	jt.unbari.ac.id Internet Source	<1 %
19	repository.ppns.ac.id Internet Source	<1 %
20	eprints.uns.ac.id Internet Source	<1 %

21	eprints.undip.ac.id Internet Source	<1 %
22	e-journals.unmul.ac.id Internet Source	<1 %
23	repository.unhas.ac.id Internet Source	<1 %
24	repository.uma.ac.id Internet Source	<1 %
25	rezkysy.blogspot.com Internet Source	<1 %
26	Sri Mariani, Nurdin Rahman, Supriadi Supriadi. "Uji Aktivitas Antioksidan Ekstrak Buah Semangka (Citrullus lanatus)", Jurnal Akademika Kimia, 2018 Publication	<1 %
27	edoc.pub Internet Source	<1 %
28	lib.unnes.ac.id Internet Source	<1 %
29	journal.ipb.ac.id Internet Source	<1 %
30	e-journal.uajy.ac.id Internet Source	<1 %
31	jurnalnasional.ump.ac.id Internet Source	<1 %

32	pure.port.ac.uk Internet Source	<1 %
33	Rizki Karimullah, Rina Elvia, Hermansyah Amir. "PENENTUAN PARAMETER ADSORPSI SILIKA SINTETIK DARI CANGKANG KELAPA SAWIT TERHADAP KANDUNGAN AMMONIUM PADA LIMBAH CAIR TAHU", Alotrop, 2018 Publication	<1 %
34	flipbooks.fleepit.com Internet Source	<1 %
35	www.ijeast.com Internet Source	<1 %
36	vinaserevinafisika-unj.blogspot.com Internet Source	<1 %
37	bibdigital.epn.edu.ec Internet Source	<1 %
38	ouci.dntb.gov.ua Internet Source	<1 %
39	Andi Badli Rompegading, Nur Fadhillah Muhlis, Rizky Arfadilla, Nur Indah Sari et al. "Deteksi Awal Kandungan Logam Tembaga (Cu) pada Tanaman Kangkung Darat (Ipomoea reptans)", BIOEDUSAINS:Jurnal Pendidikan Biologi dan Sains, 2021 Publication	<1 %

40	repositori.uin-alauddin.ac.id Internet Source	<1 %
41	link.springer.com Internet Source	<1 %
42	etheses.uin-malang.ac.id Internet Source	<1 %
43	repository.radenintan.ac.id Internet Source	<1 %
44	tel.archives-ouvertes.fr Internet Source	<1 %
45	repository.uinjkt.ac.id Internet Source	<1 %
46	doku.pub Internet Source	<1 %
47	repository.stieykpn.ac.id Internet Source	<1 %
48	repository.uinsu.ac.id Internet Source	<1 %
49	Jacopo Foschi, Giulio Bianchi, Andrea Turolla, Manuela Antonelli. "Disinfection efficiency prediction under dynamic conditions: application to peracetic acid disinfection of wastewater", <i>Water Research</i> , 2022 Publication	<1 %

50	jurnal.uimedan.ac.id Internet Source	<1 %
51	repo.itera.ac.id Internet Source	<1 %
52	repositori.usu.ac.id Internet Source	<1 %
53	repository.uph.edu Internet Source	<1 %
54	abstrak.uns.ac.id Internet Source	<1 %
55	digilib.uns.ac.id Internet Source	<1 %
56	repository.uin-suska.ac.id Internet Source	<1 %
57	Byung-Moon Jun, Jiyong Heo, Nader Taheri-Qazvini, Chang Min Park, Yeomin Yoon. "Adsorption of selected dyes on Ti3C2Tx MXene and Al-based metal-organic framework", <i>Ceramics International</i> , 2020 Publication	<1 %
58	ejurnal2.bppt.go.id Internet Source	<1 %
59	lanquuw.blogspot.com Internet Source	<1 %

60

hdl.handle.net

Internet Source

<1 %

61

www.researchgate.net

Internet Source

<1 %

Exclude quotes On

Exclude matches < 20 words

Exclude bibliography Off