TA/TL/2025/2033

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Adsorben Berbasis Ampas Tebu untuk Menurunkan Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) Pada Air Limbah Menggunakan Metode Adsorpsi Kontinu

Nida Fitria Alifah
21513087

Dosen Pembimbing:
Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2025

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Sugarcane Bagasse-Based Adsorbent for Reducing Cadmium (Cd) Heavy Metal Levels in Wastewater Using Continuous Adsorption Method

Nida Fitria Alifah
21513087

Supervisor:
Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU.

Environmental Engineering Bachelor Program
Faculty of Civil Engineering and Planning
Universitas Islam Indonesia
2025

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Adsorben Berbasis Ampas Tebu untuk Menurunkan Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) Pada Air Limbah Menggunakan Metode Adsorpsi Kontinu

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Nida Fitria Alifah

21513087

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 11 September 2025 dan disetujui oleh:

18/2025

Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU (Pembimbing)

18/9 '25

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. (Penguji 1)

Any Juliani, S.T., M.Si. (Res.Eng.), Ph.D (Penguji 2)

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL
DAN PERENCANAAN
YOGYAKARTA

Any Juliani, S.T., M.Sc.(Res.Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia, maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini merupakan gagasan, rumusan, dan studi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan *(artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
   a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
   b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

   Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.
6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 11 September 2025

Yang membuat pernyataan,



Nida Fitria Alifah

21513087

PRAKATA

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul *"Adsorben Berbasis Ampas Tebu untuk Menurunkan Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) pada Air Limbah Menggunakan Metode Adsorpsi Kontinu."* Penelitian ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada jenjang Strata-1 dan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Daerah Istimewa Yogyakarta.

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT, atas segala rahmat, dan petunjuk-Nya yang senantiasa memberikan kekuatan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua penulis, Bapak Suranto dan Ibu Ema Saridewi, yang dengan penuh kasih sayang dan kesabaran selalu mendoakan, memberikan semangat, dan menjadi sumber kekuatan utama dalam setiap langkah penulis.
3. Adik penulis, Muhammad Rizqi Bayu Aji, yang senantiasa memberikan semangat, dan memberikan hiburan dikala jenuh dengan caranya tersendiri.
4. Bapak Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU., selaku Dosen Pembimbing yang telah membimbing, meberikan arahan, serta masukan yang sangat berarti bagi kelancaran penelitian ini.
5. Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D., selaku dosen penguji yang telah memberikan arahan dan saran dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
6. Ibu Any Juliani, S.T., M.Si. (Res.Eng.), Ph.D., selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan UII sekaligus dosen penguji, atas arahan dan saran yang diberikan selama proses tugas akhir ini.

7. Seluruh jajaran dosen, staff, dan asisten Laboratorium Kualitas Air, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan yang telah membantu selama proses pelaksanaan penelitian.
8. Nur Yafta Hilna Ali, partner yang sudah penulis anggap sebagai keluarga sendiri. Terima kasih selalu dapat diajak kerja sama dalam setiap hal mulai dari kerja praktik hingga tugas akhir ini, serta selalu ada dalam kondisi apapun selama penulis berada di perantauan ini.
9. Yafta, Tsabita, Arkan, Attar, teman seperjuangan sejak awal perkuliahan, yang telah berbagi banyak momen berarti selama masa perkuliahan.
10. Teman- teman "Camping Ceria" atas kebersamaan hangat yang terjalin sejak kegiatan camping bersama hingga masa akhir perkuliahan.
11. Teman- teman KKN unit 183 atas kebersamaan yang terus terjalin hingga saat ini.
12. Henisa, Anin, Adia, Liska, Marsha, April, teman lama yang masih terus membersamai dan selalu memberikan semangat hingga saat ini.
13. Teman-teman Teknik Lingkungan angkatan 2021, yang telah membersamai selama masa-masa perkuliahan.
14. Dan terakhir, untuk diri saya sendiri, terima kasih telah terus berusaha bertahan, dan tidak menyerah dalam menghadapi segala proses yang panjang ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis dengan senang hati menerima segala bentuk kritik dan saran yang membangun. Semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat, baik bagi penulis sendiri maupun bagi para pembaca.

Sleman, 11 September 2025



Nida Fitria Alifah

Adsorben Berbasis Ampas Tebu untuk Menurunkan Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) Pada Air Limbah Menggunakan Metode Adsorpsi Kontinu

Mahasiswa	: Nida Fitria Alifah
NIM	: 21513087
Program Studi	: Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing	: Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU.

Abstrak

Kadmium (Cd) merupakan logam berat yang bersifat toksik, dan mudah terakumulasi dalam ekosistem perairan, sehingga dapat menjadi salah satu penyebab utama pencemaran air dan masalah lingkungan yang serius. Penanganan pencemaran logam berat dalam air dapat dilakukan melalui metode adsorpsi yang sederhana, murah, dan mudah diterapkan. Penelitian ini mengkaji efektivitas adsorben berbasis ampas tebu yang diaktivasi dengan asam sitrat dalam menurunkan kadar Cd dengan menggunakan sistem kolom. Pengujian dilakukan dengan variasi laju alir 5 dan 7,5 mL/menit serta tinggi adsorben 10 dan 15 cm. Karakteristik adsorben dianalisis menggunakan FTIR dan SEM, sedangkan konsentrasi Cd dianalisis menggunakan AAS. Hasil menunjukkan bahwa kondisi optimum diperoleh pada debit atau laju alir 5 mL/menit dengan ketinggian massa adsorben 15 cm. Pemodelan proses adsorpsi dilakukan menggunakan pendekatan Thomas, Yoon–Nelson, dan Adam–Bohart. Kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh dari model Thomas sebesar 1,190 mg/g, diikuti oleh model Yoon–Nelson sebesar 0,071 mg/g, dan model Adam–Bohart menunjukkan kapasitas volumetrik sebesar 188,662 mg/L. Nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi ditunjukkan oleh model Thomas dan Yoon–Nelson yang sama-sama sebesar 0,890, sedangkan model Adam–Bohart memiliki R^2 sebesar 0,723. Hal ini menunjukkan bahwa model Thomas dan Yoon–Nelson lebih sesuai untuk mempresentasikan data eksperimental terhadap proses adsropsi yang terjadi.

Kata kunci: adsorpsi, ampas tebu, kadmium, model kinetika adsorpsi, sistem kontinu

Sugarcane Bagasse-Based Adsorbent for Reducing Cadmium (Cd) Heavy Metal Levels in Wastewater Using Continuous Adsorption Method

Student : Nida Fitria Alifah
Student Number : 21513087
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU.

Abstract

Cadmium (Cd) is a toxic heavy metal that can easily accumulate in aquatic ecosystems, making it one of the main causes of water pollution and serious environmental problems. The treatment of heavy metal pollution in water can be done using an adsorption method that is simple, low-cost, and easy to apply. This study examines the effectiveness of sugarcane bagasse activated with citric acid as an adsorbent to reduce Cd levels using a column system. The experiments were carried out with flow rates of 5 and 7.5 mL/min and adsorbent heights of 10 and 15 cm. The adsorbent was analyzed using FTIR and SEM, while Cd concentration was measured using AAS. The results showed that the best condition was at a flow rate of 5 mL/min and an adsorbent height of 15 cm. The adsorption process was modeled using the Thomas, Yoon–Nelson, and Adam–Bohart approaches. The highest adsorption capacity was obtained from the Thomas model at 1.190 mg/g, followed by the Yoon–Nelson model at 0.071 mg/g. The Adam–Bohart model showed a volumetric capacity of 188.662 mg/L. The highest determination coefficient (R^2) was 0.890 for both the Thomas and Yoon–Nelson models, while the Adam–Bohart model had an R^2 value of 0.723. This shows that the Thomas and Yoon–Nelson models better represent the experimental data of the adsorption process.

Key words: adsorption, , sugarcane bagasse, cadmium, adsorption kinetic models, continuous system.

DAFTAR ISI

PRAKATA i
Abstrak iii
DAFTAR ISI v
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR LAMPIRAN x
BAB I PENDAHULUAN 11
1.1 Latar Belakang 11
1.2 Perumusan Masalah 15
1.3 Tujuan Penelitian 15
1.4 Manfaat Penelitian 15
1.5 Ruang Lingkup 16
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 17
2.1 Kadmium (Cd) 17
2.2 Tebu 18
2.3 Adsorpsi 19
2.3.1 Jenis -jenis Adsorpsi 20
2.3.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi Adsorpsi 21
2.3.3 Metode Adsorpsi 24
2.4 *Fourier Transform Infrared* (FTIR) 26
2.5 *Scanning Electron Microscope* (SEM) 27
2.6 *Atomic Adsorption Spectrofotometer* (AAS) 28
2.7 Penelitian Terdahulu 28
BAB III METODE PENELITIAN 33
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian 33
3.2 Alat, Bahan, dan Instrumen 33
3.3 Variabel Penelitian 34

3.4 Prosedur Penelitian 35
3.4.1 Preparasi Adsorben Ampas Tebu 36
3.4.2 Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi $C_6H_8O_7$ 36
3.4.3 Preparasi Rangkaian Sistem Kontinu 37
3.4.4 Pembuatan Larutan Induk Logam Kadmium (Cd) 38
3.4.5 Karakterisasi Adsorben 40
3.4.6 Penentuan Debit atau Laju Alir 40
3.4.7 Uji Variasi Debit atau Laju Alir 41
3.4.8 Uji Variasi Ketinggian Adsorben 42
3.4.9 Penentuan Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve)* 43
3.4.10 Model Kinetika Adsorpsi Kolom 43
3.4.11 Analisis Efektivitas Adsorben 46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 47
4.1 Karakteristik Adsorben 47
4.1.1 *Fourtier Transform Infra Red* (FTIR) 47
4.1.2 *Scanning Electron Microscopes* (SEM) 50
4.2 Uji Adsorpsi 52
4.2.1 Uji Variasi Debit atau Laju Alir 53
4.2.2 Uji Variasi Ketinggian Adsorben 57
4.2.3 Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*) 61
4.3 Model Kinetika Sistem Adsorpsi Kolom 63
4.3.1 Model Thomas 63
4.3.2 Model Yoon-Nelson 66
4.3.3 Model Adam-Bohart 69
4.3.4 Perbandingan Model Kinetika Adsorpsi 72
BAB V PENUTUP 75
5.1 Kesimpulan 75
5.2 Saran 76
DAFTAR PUSTAKA 77
LAMPIRAN 82
Lampiran 1 Perhitungan 82

Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian 86
Lampiran 3 Data Karakterisasi FTIR 88
RIWAYAT HIDUP 90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu 29
Tabel 4.1 Interpretasi Gugus Fungsi Adsorben 48
Tabel 4.2 Data Debit atau Laju Alir Lambat Adsorben Tanpa Aktivasi 53
Tabel 4.3 Data Debit atau Laju Alir Cepat Adsorben Tanpa Aktivasi 54
Tabel 4.4 Data Debit atau Laju Alir Lambat Adsorben Teraktivasi 54
Tabel 4.5 Data Debit atau Laju Alir Cepat Adsorben Teraktivasi 54
Tabel 4.6 Data Ketinggian Massa Adsorben 10 cm Tanpa Aktivasi 57
Tabel 4.7 Data Ketinggian Massa Adsorben 15 cm Tanpa Aktivasi 58
Tabel 4.8 Data Ketinggian Massa Adsorben 10 cm Teraktivasi 58
Tabel 4.9 Data Ketinggian Massa Adsorben 15 cm Teraktivasi 58
Tabel 4.10 Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*) 61
Tabel 4.11 Data Perhitungan Model Thomas 63
Tabel 4.12 Data Konstanta Laju, dan Kapasitas Adsorpsi Model Thomas 64
Tabel 4.13 Data Perhitungan Model Yoon-Nelson 66
Tabel 4.14 Data Konstanta Laju, dan Kapasitas Adsorpsi Model Yoon-Nelson 67
Tabel 4.15 Data Perhitungan Model Adam-Bohart 70
Tabel 4.16 Data Konstanta Laju, dan Kapasitas Adsorpsi Model Adam-Bohart 71
Tabel 4.17 Perbandingan Hasil Pemodelan Kinetika Adsorpsi 73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ampas Tebu 19
Gambar 3.1 Prosedur Penelitian 35
Gambar 3.2 Preparasi Adsorben Ampas Tebu 36
Gambar 3.3 Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi 37
Gambar 3.4 Rangkaian Sistem Kontinu 38
Gambar 3.5 Pembuatan Larutan Induk Kadmium (Cd) 1000 mg/L 39
Gambar 3.6 Uji Variasi Debit atau Laju Alir 41
Gambar 3.7 Uji Variasi Ketinggian Adsorben 42
Gambar 4.1 Hasil Pengujian FTIR Adsorben Ampas Tebu Non Aktivasi, dan Teraktivasi Asam Sitrat 48
Gambar 4.2 (a) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaran 1500 kali (b) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaran 5000 kali 51
Gambar 4.3 (a) Permukaan Adsorben Ampas Teraktivasi Perbesaran 1500 kali (b) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Perbesaran 5000 kali 51
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Variasi Debit atau Laju Alir Terhadap Adsorpsi Cd 55
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Variasi Ketinggian Massa Adsorben Terhadap Adsorpsi Cd 59
Gambar 4.6 Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*) 62
Gambar 4.7 Kurva Linier Model Thomas 64
Gambar 4.8 Kurva Linier Model Yoon-Nelson 67
Gambar 4.9 Kurva Linier Model Adam-Bohart 70

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan 82
Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian 86
Lampiran 3 Data Hasil Karakterisasi FTIR 88

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan industri telah berkontribusi terhadap peningkatan pembuangan limbah cair ke lingkungan. Limbah cair yang dibuang ke lingkungan dapat menjadi salah satu faktor utama penyebab tingginya pencemaran lingkungan. Hal tersebut dapat terjadi apabila limbah cair yang dibuang ke badan air seperti sungai, danau, atau laut tidak dilakukan pengolahan dengan baik. Penanganan limbah yang masih belum efektif dan optimal tersebut dapat mencemari air dan merusak jaringan biologis karena pada air limbah terdapat polutan yang beracun seperti berbagai macam senyawa kimia berbahaya salah satunya yaitu logam berat (Wijaya et al., 2020). Logam berat dengan kadar yang tinggi dapat menurunkan kualitas air, dan mengganggu keberlangsungan ekosistem perairan yang dapat mengakibatkan kematian berbagai jenis biota perairan karena bersifat toksik bagi organisme. Akumulasi logam berat pada organisme terjadi melalui proses biokonsentrasi, bioakumulasi, dan biomagnifikasi. Selain itu, logam berat juga dapat memberikan dampak yang negatif terhadap kesehatan manusia seperti kerusakan organ respirasi, dan kanker apabila terakumulasi pada tubuh manusia (Lukmanulhakim et al., 2023).

Kadmium (Cd) merupakan salah satu logam berat yang terkandung dalam limbah cair dan paling dominan di kawasan industri. Hal tersebut dikarenakan Kadmium sering digunakan untuk elektroplating, elektrolisis, bahan pigmen pada industri cat, enamel, dan plastik, serta untuk memproduksi baterai NiCd pada industri baterai (Suhartono et al., 2021). Kadmium termasuk logam berat yang memiliki tingkat toksisitas paling tinggi. Sehingga logam Kadmium termasuk kedalam salah satu bahan pencemar logam berat yang sering mencemari lingkungan apabila melebihi batas ambang yang seharusnya. Selain itu, Kadmium yang terakumulasi dalam tubuh manusia dapat berpengaruh terhadap gangguan kesehatan seperti penyakit jantung, kegagalan fungsi ginjal, dan pembentukkan artritis atau radang sendi. Selain itu, Kadmium juga

termasuk bahan kimia yang tidak dibutuhkan sama sekali pada tubuh (Fitrianah et al., 2021).

Dilihat dari dampak yang dapat ditimbulkan dari logam Kadmium terhadap lingkungan dan manusia maka diperlukannya suatu cara untuk menguranginya. Terdapat beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mengurangi logam berat Kadmium pada air limbah yaitu dengan penukaran ion, oksidasi kimia, elektrokoagulasi, reverse osmosis, presipitasi dan adsorpsi. Menurut Hendrasarie dan Prihantini (2020), adsorpsi termasuk salah satu teknik pengolahan air yang efisien dan umum digunakan dalam proses penurunan kadar logam berat. Hal tersebut dikarenakan metode adsorpsi ini dapat menyerap logam pada limbah cair dan memiliki selektivitas yang tinggi. Sehingga, Kadmium yang terdapat pada air limbah akan melekat pada permukaan adsorben dan terserap sehingga air limbah yang telah diolah dapat dilepaskan. Menurut Angraini et al. (2022), terdapat beragam jenis adsorben yang dapat digunakan pada metode adsorpsi, seperti zeolit, abu batu bara, tanah liat, dan karbon aktif. Variasi adsorben ini menentukan tingkat efektivitas proses adsorpsi, dan jenis adsorben yang dipakai juga dapat mempengaruhi efektivitas dari suatu proses adsorpsi. Oleh karena itu, salah satu material yang dapat digunakan untuk dijadikan sebagai adsorben yang berasal dari bahan alami yaitu ampas tebu.

Ampas tebu merupakan limbah padat yang dihasilkan dari proses ekstraksi sari tebu, baik pada industri gula maupun pada penjualan minuman es tebu. Limbah yang dihasilkan dapat mengakibatkan terjadinya pencemaran lingkungan apabila tidak dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, untuk meminimalisir terjadinya pencemaran lingkungan maka ampas tebu dapat dimanfaatkan sebagai adsorben. Sebagian besar ampas tebu terdiri dari lignoselulosa dan dikenal memiliki kandungan serat selulosa yang tinggi. Hal tersebut mengakibatkan ampas tebu memiliki kapasitas yang baik dalam mengikat ion logam berat sehingga dapat menyerap logam berat yang terdapat pada air limbah. Selain itu, ampas tebu memiliki sejumlah keunggulan sebagai adsorben, antara lain ketersediaannya yang melimpah dan mudah diperoleh,

proses persiapan yang sederhana, serta biaya yang relatif rendah (Tasanif et al., 2020).

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Afifah (2023), ampas tebu yang diaktivasi menggunakan HCl 1% terbukti efektif dalam mengadsorpsi ion logam tembaga (Cu^{2+}) baik pada larutan artifisial maupun pada limbah cair batik. Proses adsorpsi menggunakan sistem batch dengan terdapatnya variasi massa adsorben (20, 35, 50, dan 70 mg), pH larutan (2, 3, dan 4), waktu kontak (5, 10, 20, 30, 60, dan 120 menit), dan konsentrasi larutan sintetis Cu^{2+} (10, 30, 40, dan 50 mg/L). Kondisi optimum yang diperoleh yaitu pada massa adsorben 50 mg, pH 4, waktu kontak 10 menit, dan konsentrasi larutan 30 mg/L, dengan efisiensi penyisihan sebesar 12,23% serta kapasitas adsorpsi maksimum mencapai 0,847 mg/g. Sedangkan, efisiensi penyisihan pada limbah cair batik sebesar 2,22% dengan kapasitas adsorpsi 0,008 mg/g. Selain itu, hasil karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) menunjukkan bahwa gugus fungsi C–O berperan penting dalam proses penjerapan ion Cu^{2+}. Selain itu, pada penelitian yang dilakukan oleh Imani et al. (2021), ampas tebu diubah menjadi arang aktif melalui proses dehidrasi, karbonisasi, dan aktivasi dengan larutan HCl 0,1 N yang terbukti mampu dalam mengadsorpsi logam besi (Fe), dan Mangan (Mn) dalam limbah air asam tambang. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan sistem batch dengan terdapatnya variasi massa adsorben (1, 2, dan 3 gram), dan waktu kontak (30, 60, dan 90 menit). Kondisi optimum yang diperoleh pada penelitian tersebut yaitu pada massa adsorben 3 gram, dan waktu kontak 60 menit dengan efisiensi removal yang dihasilkan untuk logam Fe sebesar 79,65%, dan Mn sebesar 60,00%.

Melihat permasalahan mengenai pencemaran lingkungan perairan yang disebabkan oleh limbah cair industri yang tidak dilakukan pengolahan secara benar dan langsung dibuang ke badan air telah menjadi perhatian khusus dikarenakan dampak yang ditimbulkan dapat mengganggu ekosistem perairan dan dapat memberikan dampak negatif terhadap kesehatan manusia. Selain itu, ampas tebu yang merupakan limbah hasil dari kegiatan industri gula dan pedagang minuman es yang apabila tidak dimanfaatkan dengan baik dapat menimbulkan pencemaran lingkungan baru. Berdasarkan keefektivitasan

ampas tebu berpotensi besar jika dimanfaatkan sebagai adsorben karena kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin di dalamnya mampu berinteraksi dengan ion logam berat, sehingga efektif menyerap logam berat pada air limbah. Maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai kemampuan adsorben ampas tebu yang akan diaktivasi dengan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$) untuk menambah gugus fungsi -COOH pada permukaan adsorben, sehingga meningkatkan jumlah situs aktif yang dapat berikatan dengan ion logam agar kapasitas adsorpsi menjadi bertambah. Proses adsorpsi dilakukan dengan metode kontinu agar kapasitas pengolahan yang diperoleh lebih besar dibandingkan metode batch. Sehingga, berpotensi apabila diaplikasikan pada skala besar untuk melakukan *removal* logam berat seperti logam kadmium (Cd) pada air limbah. Selain itu, apabila dibandingkan dengan metode batch pada dasarnya mekanisme antara metode batch dan kontinu sama, yaitu keduanya melibatkan kontak antara ion logam dengan gugus fungsi aktif yang terdapat pada permukaan adsorben hingga membentuk suatu ikatan. Perbedaaan efisiensi yang dihasilkan dipengaruhi oleh faktor-faktor lain seperti karakteristik logam berat, karakteristik adsorben, serta kondisi proses seperti kondisi pH, konsentrasi awal logam, laju alir pada sistem kontinu, dan jumlah massa adsorben yang digunakan. Akan tetapi, dengan menggunakan metode kontinu dapat mengetahui kondisi jenuh adsorben dari satu kali proses aliran sehingga dapat menentukan waktu efektif penggunaan adsorben, dan kebutuhan proses regenerasi adsorben agar aktivitas adsorpsi tetap efisien dalam proses adsorpsi. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode adsorpsi menggunakan bahan alami, murah, dan berkelanjutan untuk pengolahan air limbah yang mengandung logam berat kadmium.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik adsorben ampas tebu tanpa aktivasi, dan diaktivasi dengan asam sitrat ($C_6H_8O_7$)?
2. Bagaimana pengaruh variasi debit atau laju alir, dan ketinggian adsorben pada proses adsorpsi logam berat kadmium (Cd) menggunakan adsorben ampas tebu tanpa aktivasi, dan yang diaktivasi dengan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) dalam metode adsorpsi kontinu?
3. Berapa kapasitas adsorpsi logam berat kadmium (Cd) menggunakan adsorben ampas tebu tanpa aktivasi, dan yang diaktivasi dengan asam sitrat ($C_6H_8O_7$)?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Menganalisis karakteristik adsorben ampas tebu tanpa aktivasi, dan yang diaktivasi dengan asam sitrat ($C_6H_8O_7$).

2. Menganalisis pengaruh variasi debit atau laju alir, dan ketinggian adsorben terhadap proses adsorpsi logam berat kadmium (Cd) menggunakan adsorben ampas tebu tanpa aktivasi, dan yang diaktivasi dengan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) dalam metode adsorpsi kontinu.

3. Menganalisis kapasitas adsorpsi logam berat kadmium (Cd) menggunakan adsorben ampas tebu tanpa aktivasi, dan yang diaktivasi dengan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) .

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu:

1. Memberikan informasi mengenai potensi ampas tebu sebagai adsorben yang tidak diaktivasi, dan yang diaktivasi dengan menggunakan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) dalam menurunkan kadar logam berat Kadmium (Cd) dari air limbah.

2. Memberikan alternatif teknologi adsorpsi logam berat Kadmium (Cd) berbasis bahan alami dari limbah ampas tebu.

3. Memberikan referensi untuk menangani kasus pencemaran air akibat air limbah yang mengandung logam berat Kadmium (Cd) dengan memanfaatkan bahan alami sebagai bahan baku adsorben.

1.5 Ruang Lingkup

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
2. Air limbah yang digunakan sebagai sampel merupakan air limbah buatan (sintetis) dari padatan kadmium dengan metode uji mengacu pada SNI 6989-84:2019 tentang cara uji Kadmium (Cd) secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) pada air dan air limbah.
3. Pengujian kemampuan adsorpsi logam kadmium (Cd) dilakukan dengan memperhatikan aspek debit atau laju alir, tinggi adsorben, pH, dan konsentrasi air limbah.
4. Adsorben diaktivasi dengan menggunakan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$).
5. Pengujian karakteristik gugus fungsi adsorben menggunakan *Fourier-Transform Infra-Red* (FTIR).
6. Pengujian untuk menganalisa tampak permukaan adsorben menggunakan *Scanning Electron Miscroscope* (SEM).

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kadmium (Cd)

Kadmium (Cd) merupakan logam berat yang termasuk dalam kategori non-esensial. Pada sistem periodik, kadmium memiliki nomor atom 48, terletak pada golongan 12, periode 5, dan memiliki berat atom 112,4. Karakteristik yang dimiliki kadmium yaitu memiliki titik didih 767˚C, titik leleh 312 ˚C, massa jenis 8,65 g/cm^3, logam berwarna putih perak mirip dengan logam aluminium, lunak, mengkilap, mudah bereaksi, tidak berasa, tahan terhadap panas dan korosi, tidak memiliki aroma spesifik, bersifat tidak larut dalam air dan tidak mudah terbakar apabila dalam bentuk logam, akan tetapi apabila dalam bentuk serbuk dapat larut dalam air dan dapat terbakar (Fadhila & Purwanti, 2022). Selain itu, kadmium termasuk dalam mineral yang berikatan dengan unsur- unsur lain seperti oksigen, sulfur, dan klorin.

Kadmium yang ada di lingkungan dapat berasal dari sumber alami dan antropogenik. Sumber alami berasal dari erosi, abrasi tanah, letusan gunung berapi, pelapukan batuan dan kebakaran hutan. Sedangkan, sumber antropogenik berasal dari buangan berbagai macam industri seperti industri baterai, industri pelapisan logam, industri tekstil, pigmen, cat, stabilisator untuk plastik atau pvc. Selain itu, sumber pencemar juga dapat berasal dari aktivitas pertambangan, produksi dan penggunaan pupuk fosfat, pembakaran bahan bakar fosil, limbah domestik, serta korosi pada pipa distribusi air (Lukmanulhakim et al., 2023).

Menurut PerMen LH No. 05 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Limbah Cair bahwa batas maksimum kadmium dalam air bagi usaha dan/atau kegiatan industri keramik yaitu 0,1 mg/L, pada industri cat yaitu 0,08 mg/L, dan pada fasilitas pelayanan kesehatan yang melakukan Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun yaitu 0,05 mg/L. Sehingga, apabila kadar kadmium melebihi batas seharusnya maka dapat memberikan efek negatif terhadap kesehatan manusia jika terakumulasi ke dalam tubuh seperti kerusakan ginjal, kerusakan tulang, pembentukan artritis, emfisema, hipertensi, atrofi, penyakit

jantung, kanker payudara, kerusakan paru-paru, dan hati serta bersifat karsinogenik (Fadhila & Purwanti, 2022). Sedangkan, dampak negatif terhadap lingkungan perairan yaitu menurunnya kualitas air dikarenakan pencemaran yang terjadi, terganggunya ekosistem perairan terutama dalam rantai makanan, mengganggu pertumbuhan, reproduksi, sistem kekebalan, dan endokrin organisme akuatik dikarenakan kadmium dapat mengalami penumpukan pada jaringan otot hewan (Khairuddin et al., 2024).

2.2 Tebu

Tebu (*Saccharum officinarum* L.) merupakan tanaman yang tumbuh di daerah beriklim tropis dan termasuk dalam famili Poaceae (rumput-rumputan). Secara morfologi, tebu memiliki akar serabut serta batang beruas-ruas yang dapat mencapai tinggi sekitar 5 meter dengan diameter 3–5 cm. Daun yang dimiliki tanaman tebu merupakan daun tidak lengkap dikarenakan tidak memiliki tangkai daun sehingga hanya terdiri dari pelepah daun yang terdapat bulu-bulu pada permukaannya dengan tulang daun sejajar. Lalu, bunga pada tebu yaitu berupa malau dengan panjang antara 50-80 cm (Diana, 2023). Tebu merupakan salah satu tanaman yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku utama dalam industri gula. Tebu yang dipanen akan diolah pada pabrik gula untuk memproduksi gula. Pada proses pembuatan gula hanya mampu memanfaatkan sekitar 5% dari tebu yang diolah. Sekitar 35–40% di antaranya menjadi ampas tebu sebagai hasil samping pemerasan batang, sedangkan sisanya berupa produk samping lain seperti tetes, blotong, dan air. (Nugroho et al., 2021). Ampas tebu yang dihasilkan merupakan salah satu limbah biomassa yang dapat memberikan dampak buruk terhadap lingkungan apabila tidak dimanfaatkan secara optimal.

Ampas tebu memiliki kandungan utama yang terdiri dari 50% selulosa, 25% hemiselulosa, dan 25% lignin (Annisa et al., 2023). Selulosa yang terdapat pada ampas tebu berbentuk seperti serabut dan tidak larut di dalam air. Hal tersebut dikarenakan pada ampas tebu memiliki dinding sel yang berfungsi sebagai pelindung jaringan tumbuhan terutama pada bagian tangkai, dahan, dan lain sebagainya (Kustiyah et al., 2023). Selain itu,

keberadaan lignin yang melapisi selulosa pada ampas tebu menyebabkan struktur selulosa menjadi lebih kuat. Dari kandungan yang dimiliki oleh ampas tebu maka dapat dimanfaatkan untuk berbagai macam hal salah satunya yaitu dimanfaatkan sebagai adsorben. Ampas tebu yang akan dimanfaatkan sebagai adsorben perlu didelignifikasi untuk menghilangkan kandungan lignin yang dapat mengganggu selulosa dalam berikatan dengan ion logam. Pada proses delignifikasi dapat dilakukan secara kimiawi dengan menggunakan berbagai macam larutan yang dapat merusak struktur lignin, bagian kristalin, amorf, dan penggembungan selulosa (Kusumawardani et al., 2018). Selain memiliki kandungan selulosa yang tinggi, keunggulan ampas tebu untuk dijadikan adsorben yaitu mudah ditemukan, keberadaannya melimpah, serta biaya relatif murah.



Gambar 2.1 Ampas Tebu

2.3 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses penyerapan suatu atom, ion, atau molekul dalam larutan pada permukaan zat penyerap. Secara umum, proses adsorpsi terjadi ketika suatu molekul baik cair atau gas dalam fluida terikat pada suatu padatan atau cairan dan membentuk lapisan tipis atau film pada permukaan zat penyerap tersebut. Sehingga, terjadinya suatu ikatan kimia fisika antara substansi dengan zat penyerapnya (Purwitassari et al., 2022). Dalam proses adsorpsi, ion, atom, dan molekul yang diserap disebut sebagai adsorbat, sedangkan zat yang menyerap disebut dengan adsorben.

Adsorben merupakan material padat yang mampu mengikat atau menyerap komponen tertentu dari suatu fluida.. Bahan-bahan yang digunakan untuk dijadikan sebagai adsorben yaitu bahan yang memiliki pori-pori. Hal tersebut dikarenakan proses adsropsi berlangsung pada pori-pori atau bagian tertentu di dalam partikel tersebut. Pori-pori yang dimiliki oleh adsorben biasanya sangat kecil sehingga luas permukaan dalam menjadi lebih besar jika dibandingkan dengan permukaan luar. Sehingga, pada proses adsorpsi pemisahan dapat terjadi akibat terdapatnya perbedaan bobot antar molekul, dan perbedaan polaritas yang menyebabkan sebagian molekul dapat melekat pada permukaan adsorben lebih erat dibandingkan dengan molekul lainnya. Selain itu, adsorben dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu adsorben polar atau hidrofilik dan adsorben non-polar atau hidrofobik. Adsorben polar merupakan adsorben yang mengikat molekul polar seperti air dengan jenis dari adsorben polar ini yaitu silica gel, dan zeolites. Sementara itu, adsorben non-polar lebih efektif mengikat minyak dan gas dibandingkan air. Jenis dari adsorben non-polar ini yaitu karbon aktif, dan adsorben polimer (Setiorini et al., 2018).

2.3.1 Jenis -jenis Adsorpsi

Adsorpsi terbagi menjadi dua jenis berdasarkan kekuatan interaksinya, yaitu adsorpsi fisik dan adsorpsi kimia sebagai berikut.

a. Adsorpsi Fisika

Adsorpsi fisika merupakan adsorpsi yang melibatkan gaya tarik-menarik antara adsorbat dengan permukaan adsorben yang disebabkan oleh gaya intermolekul atau gaya van der walls dan ikatan hidrogen antar adsorbat dan substrat atau adsorben (Zaqiyatul et al., 2021). Adsorpsi ini bersifat dapat dibalikkan (*reversible)* sehingga adsorbat mudah dilepaskan dari adsorben. Selain itu, pada proses adsorpsi ini tidak melibatkan pembentukan dan pemutusan ikatan kimia antara adsorbat dan adsorben sehingga laju adsorpsi cepat dan panas yang dihasilkan dari proses adsorpsi ini relatif rendah (Yustinah et al., 2020).

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia merupakan adsorpsi yang melibatkan pembentukan ikatan kimia. Ikatan kimia yang terbentuk seperti ikatan ionik atau ikatan kovalen akibat molekul yang melekat pada permukaan. Ikatan tersebut terjadi sebagai hasil dari pemakaian elektron secara bersamaan antara adsorben dan adsorbat. Adsorpsi ini bersifat tidak dapat balik (*irreversible*) akibat dari pembentukan ikatan kimia yang kuat. Selain itu, membentuk lapisan monolayaer (Zaqiyatul et al., 2021). Laju adsorpsi pada proses ini lebih lambat dibandingkan dengan adsorpsi fisika karena terdapatnya pembentukan ikatan kimia. Selain itu, panas yang dihasilkan dari proses adsorpsi ini juga cukup tinggi akibat dari adanya ikatan kimia yang terputus dan terbentuk selama proses (Yustinah et al., 2020).

2.3.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi Adsorpsi

Proses adsorpsi dapat dipengaruhi oleh banyak faktor baik dari sifat adsorben maupun jenis adsorbat. Berikut merupakan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi dalam proses adsorpsi.

a. Jenis adsorben

Pada proses adsorpsi, jenis adsorben yang digunakan dapat mempengaruhi efektivitas dari proses adsorpsi. Hal tersebut disebabkan karena pada masing-masing jenis adsorben memiliki karakteristik yang berbeda-beda, sehingga pemilihan jenis adsoben harus disesuaikan dengan sifat dan keadaan zat yang akan di adsorpsi. Terdapat jenis-jenis adsorben yang dapat digunakan dalam proses adsorpsi diantaranya yaitu karbon aktif, zeolit, silika gel, adsorben polimer serta bahan-bahan alami yang mudah didegradasi (Setiorini et al., 2018).

b. Luas permukaan adsorben

Luas permukaan yang dimiliki adsorben akan mempengaruhi tersedianya tempat untuk molekul dengan adsorbat dapat berinteraksi. Sehingga, semakin besar luas permukaan adsorben, maka semakin besar juga kapasitas proses adsorpsi yang terjadi (Irawan, 2018). Luas permukaan pada adsorben menunjukkan seberapa luas bidang yang dapat terjangkau oleh adsorben pada proses adsorpsi, sehingga pada proses penyerapan dapat maksimal (Setiorini et al., 2018).

c. Suhu

Perubahan suhu memiliki dampak yang siginikan terhadap proses adsorpsi. Hal tersebut dikarenakan dapat mempengaruhi efektivitas dalam proses penyerapan. Dimana, kecepatan dari proses adsorpsi akan meningkat apabila terjadi pada suhu rendah. Sedangkan, kecepatan adsorpsi akan menurun apabila terjadi pada suhu yang tinggi (Irawan, 2018).

d. Derajat Keasaman (pH)

Pada proses adsorpsi, pH larutan dapat mempengaruhi nilai adsorpsi. Hal tersebut dikarenakan pH pada larutan akan menentukan derajat dissosiasi adsorbat atau seberapa banyak suatu senyawa dapat terurai. Selain itu, pH juga dapat mempengaruhi muatan permukaan adsorben sehingga mengubah kemampuannya terdapat proses penyerapan senyawa organik dan anorganik dalam bentuk ion (Irawan, 2018).

e. Kemurnian adsorben

Dalam proses adsorpsi, kemurnian adsorben sangat menentukan efektivitas proses adsorpsi. Hal tersebut dikarenakan apabila adsorben terkontaminasi maka dapat menurunkan efisiensi proses adsorpsi. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kemurniannya dapat melalui proses perlakuan fisik seperti pengeringan, dan dapat juga dengan proses aktivasi adsorben (Irawan, 2018).

f. Jenis Sifat adsorbat

Dalam proses adsorpsi, ukuran molekul adsorbat harus sesuai dengan ukuran pori adsorben, karena hanya molekul yang diameternya sama atau lebih kecil dari pori adsorben yang bisa teradsorpsi. Selain itu, kepolaran juga berpengaruh dimana molekul polar lebih mudah teradsorpsi dibandingkan dengan molekul non-polar pada ukuran yang sama. Bahkan, molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul yang kurang polar yang sudah lebih dulu teradsorpsi (Setiorini et al., 2018).

g. Konsentrasi adsorbat

Proses adsorpsi akan mengalami peningkatan apabila konsentrasi adsorbat juga mengalami kenaikan. Pada kondisi tersebut, sistem akan mencapai kesetimbangan antara jumlah adsorbat yang terserap dengan konsentrasi adsorbat yang masih berada dalam larutan (Irawan, 2018).

h. Waktu Kontak

Waktu kontak memiliki peran penting dalam keberhasilan proses adsorpsi. Hal tersebut dikarenakan dibutuhkannya waktu untuk adsorben menyerap adsorbat. Semakin meningkatnya waktu kontak maka akan lebih banyak adsorben menyerap adsorbat karena terdapatnya waktu yang lebih banyak untuk adsorben dapat berinteraksi dengan adsorbat. Akan tetapi, waktu kontak yang terlalu lama juga dapat menyebabkan kemampuan adsorben dalam menyerap adsorbat menurun. Hal tersebut dapat terjadi karena sisi aktif pada adsorben telah menurun dan menimbulkan penurunan laju adsorpsi yang pada akhirnya mendekati keadaan kesetimbangan (Sitinjak & Husin, 2021).

i. Laju Alir

Laju alir mempengaruhi waktu kontak antara adsorben dan adsorbat. Semakin cepat laju alir maka akan semakin cepat waktu kontak yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat. Hal tersebut dapat menyebabkan kapasitas adsorpsi akan semakin menurun.

Begitupun sebaliknya, semakin lambat laju alur maka waktu kontak yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat akan semakin lama yang dapat menyebabkan kapasitas adsorpsi akan semakin meningkat (Palupi, 2021).

2.3.3 Metode Adsorpsi

Dalam proses adsorpsi terdapat dua metode yang dapat digunakan, yaitu sebagai berikut.

a. Metode Batch

Proses adsorpsi pada metode ini dilakukan dengan cara mencampurkan adsorben dengan adsorbat dalam jumlah yang tetap dan untuk perubahan kualitasnya diamati dalam selang waktu tertentu. Terdapat faktor-faktor yang dapat mempengaruhi adsorpsi dengan metode batch diantaranya yaitu ukuran adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi (Maryudi et al., 2021). Metode batch ini merupakan metode yang paling umum digunakan dalam proses adsorpsi dengan keunggulan yang dimiliki yaitu proses pemisahan yang sangat baik. Akan tetapi, dalam prosesnya diperlukannya jumlah adsorben yang sangat banyak dan tidak dapat melakukan adsorpsi larutan dengan konsentrasi besar sehingga metode batch hanya dapat diaplikasikan pada skala kecil (Aisyah, 2012).

b. Metode Kontinu

Proses adsorpsi pada metode ini dilakukan dengan cara adsorben akan selalu dikontakkan dengan adsorbat dapat memberikan adsorpsi secara optimal hingga kondisi jenuh. Terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi dengan metode kontinu diantaranya yaitu laju alir, ketinggian bed adsorben, serta konsentrasi adsorbat. Kelebihan menggunakan metode ini yaitu proses adsorpsi dapat dilakukan dengan kapasitas yang lebih besar dibandingkan dengan metode batch sehingga berpotensi dapat diaplikasikan pada skala besar (Maryudi et al., 2021). Pendekatan yang digunakan pada proses adsorpsi dengan menggunakan metode

kontinu yaitu pendekatan matematis yang terdiri dari beberapa model pendekatan seperti model Thomas, model Adam-Bohart, dan model Yoon Nelson. Pendekatan tersebut digunakan untuk melakukan evaluasi kinerja adsorpsi dan mengetahui kapasitas adsorpsi yaitu (Subhan et al., 2022). Dalam metode adsorpsi kontinu, terdapat dua macam jenis metode adsorpsi berdasarkan cara operasionalnya yaitu adsorpsi kolom (*fixed bed adsorpstion*), dan adsorpsi moving bed (*moving bed adsorption*).

Adsorpsi kolom (*fixed bed adsorpstion*) merupakan adsorpsi yang dilakukan pada sebuah kolom silinder yang memiliki rasio panjang dan diameter cukup besar dengan penempatan adsorben secara tetap. Proses adsorpsi akan dilakukan dengan mengalirkan larutan adsorbat melalui unggun adsorben. Bagian atas unggun yang melakukan kontak pertama kali dengan campuran adsorbat yang memiliki konsentrasi tinggi akan sangat efektif dalam menyerap zat terlarut yang terdapat pada fluida. Fluida yang terus bergerak dalam kolom dapat menimbulkan kondisi jenuh pada kolom adsorben dan menyebabkan konsentrasi adsorbat pada effluen akan meningkat mendekati konsentrasi influen (*exhaution point*). Kondisi meningkatnya konsentrasi effluen dapat terjadi karena akibat dari menurunnya kemampuan adsorben pada kolom (*breakthrough point*). Pada Adsorpsi kolom (*fixed bed adsorpstion*) diperlukannya data kesetimbangan adsorpsi, kinetika, dan pemodelan matematis yang sesuai dengan kurva breakthrough (Costa, 2019).

Adsorpsi moving bed (*moving bed adsorption*) merupakan adsorpsi yang dilakukan dengan terdapatnya bagian yang bergerak dari kolom yang mampu untuk dapat memberikan gerakan dari adsorben dalam larutan. Hal tersebut dikarenakan agar terdapatnya kontak antara adsorben dengan adsorbat sehingga proses adsorpsi dapat berjalan. Proses adsorpsi menggunakan metode ini tidak memerlukan jumlah adsorben yang banyak seperti pada metode

batch, akan tetapi metode ini diperlukannya desain alat yang rumit dan biaya yang mahal (Aisyah, 2012).

2.4 *Fourier Transform Infrared* (FTIR)

Fourier Transformed Infrared (FTIR) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi senyawa, dan mendeteksi gugus fungsi berdasarkan interaksi antara molekul dengan radiasi inframerah. Instrumen ini mengukur penyerapan radiasi inframerah yang dibentuk oleh setiap ikatan molekul. Hasil yang diperoleh dari proses penyerapan dinyatakan dalam satuan bilangan gelombang yaitu cm^{-1} (Zahra, 2022). Daerah inframerah pada spektrum gelombang elektromagnetik memiliki rentang panjang gelombang antara 14000 cm^{-1} hingga 10 cm^{-1}. Berdasarkan panjang gelombang tersebut daerah inframerah terbagi menjadi tiga bagian yaitu inframerah dekat yang peka terhadap vibrasi overtone berada pada rentang 14000-4000 cm^{-1}, inframerah sedang yang berhubungan dengan transisi energi vibrasi dari molekul yang memberikan informasi mengenai berbagai macam gugus fungsi dalam molekul berada pada rentang 4000-400 cm^{-1}, dan inframerah jauh yang biasanya diperlukan teknik khusus dalam menganalisis molekul dengan atom berat seperti senyawa anorganik berada pada rentang 400-10 cm^{-1} (Sari et al., 2018).

Prinsip kerja dari *Fourier Transformed Infrared* (FTIR) dalam memperoleh data absorbansi yaitu dari radiasi inframerah yang diarahkan ke sampel sehingga terdapatnya interaksi antara radiasi inframerah dengan ikatan kovalen dalam molekul organik. Interaksi tersebut memungkinkan untuk dapat menyimpulkan struktur dan komposisi dari sampel yang dianalisis. Radiasi inframerah yang mengenai sampel dapat diserap dengan berbagai bagian spektrum, sehingga akan menghasilkan getaran molekuler. Getaran tersebut berhubungan dengan berbagai jenis ikatan yang terdapat dalam molekul sampel. Sehingga, akan menghasilkan pola spektrum yang khas untuk setiap jenis sampel. Dari pola spektrum yang khas tersebut dapat membantu dalam mengenali struktur dan komposisi pada sampel. FTIR ini didasarkan pada kemampuan molekul untuk menyerap radiasi inframerah pada frekuensi

berbeda yang berkaitan dengan getaran molekuler dan rotasi. Penyerapan radiasi inframerah pada setiap jenis ikatan kimia dan gugus fungsi dalam suatu molekul bersifat unik. Hal tersebut memungkinkan untuk dapat mengidentifikasi komponen sampel dan menganalisis komposisinya (Giraldo & Marin, 2025).

2.5 *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengetahui karakteristik dari suatu bahan seperti citra morfologi, konsentrasi dari campuran bahan, struktur dan kerusakan pada bahan material. Instrumen ini dapat memperbesar objek hingga 1.000.000 kali sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengamati material-material pada tingkat sub mikron dan nano. Selain itu, SEM mampu dalam menghasilkan gambar permukaan suatu sampel dengan resolusi tinggi karena termasuk ke salah satu jenis mikroskop elektron (Septiano et al., 2021). Elektron memiliki resolusi yang lebih tinggi dibandingkan dengan cahaya dikarenakan resolusi cahaya hanya dapat mencapai 200 nm, sedangkan elektron dapat mencapai resolusi hingga 0,1-0,2 nm (Rielsa, 2023).

Prinsip kerja dari *Scanning Electron Microscope* (SEM) yaitu menggunakan scan sinar elektron berenergi tinggi dalam pola pemindaian raster pada permukaan sampel, dan informasi yang didapatkan diubah menjadi dalam bentuk gambar. Dalam prosesnya, sinar elektron akan dipancarkan pada permukaan sampel lalu sinar elektron tersebut akan dipantulkan kembali ke segala arah. Elektron yang dipantulkan atau muncul dari permukaan sampel akan dideteksi sebagai elektron baru atau elektron sekunder yang dapat menghasilkan suatu gambar. Elektron baru atau elektron sekunder yang terdeteksi akan diperkuat sinyalnya dan besar amplitudo akan ditampilkan dalam bentuk gradasi gelap-terang pada layar monitor *cathode ray tube* (CRT), lalu gambar struktur objek yang telah diperbesar juga akan muncul pada layar tersebut (Rahmawati, 2023).

2.6 *Atomic Adsorption Spectrofotometer* (AAS)

Atomic Adsorption Spectrofotometer (AAS) merupakan instrumen yang digunakan untuk menganalisa kandungan atom logam dengan proses penyerapan energi radiasi gelombang elektromagnetik yang diserap oleh populasi atom yang memiliki tingkat energi berbeda. Pada instrumen ini cahaya radiasi akan diadsorpsi oleh atom-atom pada panjang gelombang tertentu dalam keadaan tereksitasi ke energi dasar. Jumlah energi yang diserap akan menentukan konsentrasi atom yang diuji dalam sampel (Ahdiyati, 2020). Instrumen ini memiliki kelebihan diantaranya yaitu dalam melakukan analisis prosesnya relatif sederhana, dan tidak perlu memisahkan unsur logam dalam pelaksanaannya. Selain itu, instrumen ini sangat sensitif, teliti, dan cepat dalam menganalisis kadar suatu logam dengan jumlah yang kecil (Amalia et al., 2023).

Prinsip kerja dari *Atomic Adsorption Spectrofotometer* (AAS) yaitu larutan sampel akan diuapkan di dalam alat dan membentuk atom bebas. Atom-atom bebas ini kemudian mengadsorpsi radiasi yang dipancarkan oleh lampu katoda (*hollow cathode lamp*) yang mengandung unsur yang akan dianalisis. Penyerapan radiasi diukur pada panjang gelombang tertentu yang sesuai dengan jenis logam yang dianalisis. Panjang gelombang radiasi yang dipancarkan oleh sumber cahaya sama dengan panjang gelombang yang diadsorpsi oleh atom dalam nyala (Ahdiyati, 2020). Atom bebas yang terbentuk merupakan unsur yang akan dianalisis. Pembentukan atom-atom bebas tersebut dikenal dengan proses atomisasi. Akan tetapi, terdapat beberapa unsur yang tetap tinggal sebagai atom netral, dan terdapat juga unsur yang akan tereksitasi oleh nyala secara termal dan membentuk ion (Nugraha et al., 2021).

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu terkait adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 2.1. Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dalam menjalankan penelitian, dan teori pada penelitian sebelumnya dapat dijadikan sebagai bahan acuan dan perbandingan dengan penelitian yang akan dilakukan.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No.	Referensi	Jenis Adsorben	Ringkasan Penelitian
1	Arang Aktif Ampas Tebu Termodifikasi Kitosan sebagai Adsorben Tetrasiklin : Pemanfaatan Metode Kolom (Wardani et al., 2022)	Arang aktif ampas tebu dimodifikasi kitosan	a. Menggunakan metode kolom b. Variasi lajur alir yaitu 0,5, 1, dan 2 mL/menit c. Variasi tinggi adsorben yaitu 7, 10, dan 14 cm d. Variasi pH yaitu 4, 7, dan 10 e. Pembuatan adsorben melalui proses karbonisasi lalu arang yang dihasilkan dilakukannya proses aktivasi kimia dengan asam fosfat (H_3PO_4) 2 M. Lalu, arang aktif ampas tebu dimodifikasi dengan kitosan. f. Hasil penelitian - Hasil FTIR menunjukkan terdapatnya gugus fungsi yang mendukung dalam proses adsorpsi seperti -OH, C=O, C-O, dan setelah dimodifikasi dengan kitosan muncul puncak serapan yang menunjukkan terdapatnya gugus -NH_2 - Hasil SEM menunjukkan adsorben arang aktif termodifikasi itosan memiliki permukaan lebih rata dengan distribusi lapisan polimer kitosan yang menyelimuti pori. sebelum adsorpsi, dan setelah adsorpsi permukaan tertutup akibat pengikatan tetrasiklin pada permukaan adsorben - Kondisi optimum arang aktif ampas tebu termodifikasi kitosan dalam mengadsorpsi senyawa tetrasiklin terdapat pada laju alir 0,5 mL/menit dengan persentase penyerapan 92,5 %, tinggi adsorben 14 cm dengan persentase penyerapan 99%, dan pH 4 dengan persentase penyerapan sebesar 93%
2	*Facile synthesis of polyethylenimine-modified sugarcane bagasse adsorbent for*	Ampas tebu yang dimodifikasi	a. Menggunakan metode batch b. Variasi massa adsorben yaitu 0,05 - 0,015 gram

	removal of anionic dye in aqueous solution (Mohamed et al., 2022)	dengan Poli(etilenimin)	c. Variasi waktu kontak 60 - 300 menit d. Konsentrasi awal pewarna Reactive *Black* 5 (RB5) 0,01 - 0,1 g/L e. Variasi pH 5 - 9 f. Variasi suhu 30 - 70 derajat celcius g. Ampas tebu dimodifikasi menggunakan poli(etilenimin) h. Hasil Penelitian - Hasil FTIR menunjukkan terdapatnya gugus fungsi yang mendukung dalam proses adsorpsi seperti -OH, C-H *stretching,* C-H *bending,* C=O, C=C aromatik, dan gugus N-H. - Hasil SEM menunjukkan adsorben yang kurang berpori, tidak rata untuk adsorben ampas tebu. Sedangkan, adsorben yang dimodifikasi dengan poli(etilenimin) lebih halus dan berpori. - Kondisi optimum dalam menghilangkan pewarna Reactive *Black* 5 (RB5) dengan menggunakan adsorben poli(etilenimin) ampas tebu yaitu pada waktu kontak 60 menit, konsentrasi larutan 0,01 g/L, massa adsorben 0,1, pH 7, dan suhu 30^{o}C dengan efisiensi removal mencapai 99% - Proses adsorpsi dengan adsorben poli(etilenimin) ampas tebu menunjukkan kesesuaian dengan model isoterm Langmuir dengan kapasitas adsoprsi maksimum yaitu 24,39 mg/g - Adsorben poli(etilenimin) ampas tebu dapat digunakan kembali sebanyak 4 siklus dengan persentase penghilangan RB5 diatas 80%.
3	Pemanfaatan Limbah Ampas Tebu sebagai Adsorben Penyerapan	Ampas tebu teraktivasi H_2SO_4 10%	a.Menggunakan metode *batch* b. Variasi massa adsorben teraktivasi yaitu 2,5; 3; 3,5 dan 4 gram.

	Logam dan Kesadahan pada Air Sumur (Annisa et al., 2023)		c. Variasi waktu kontak yaitu 30, 60, 90, dan 120 menit. d. Pembuatan adsorben melalui proses karbonisasi lalu arang yang dihasilkan dilakukannya proses aktivasi kimia dengan asam sulfat (H_2SO_4) 10% e. Hasil penelitian - Penyerapan logam Fe^{2+} maksimum sebesar 99,81% dengan menggunakan massa adsorben 4 gram, dan waktu kontak 120 menit. - Penyerapan ion Ca^{2+} maksimum sebesar 53,84% dengan menggunakan massa adsorben 4 gram, dan waktu kontak 90 menit. - Kapasitas adsorpsi maksimum logam Fe^{2+} sebesar 0,042 mg/g pada waktu kontak 120 menit - Kapasitas adsorpsi ion Ca^{2+} sebesar 0,07 mg/g pada waktu kontak 90 menit
4	*Composite adsorbent from sugarcane (Saccharum officinarum) bagasse biochar generated from atmospheric pressure microwave plasma pyrolysis process and nano zero valent iron (nZVI) for rapid and highly efficient Cr (VI) adsorpti*on (Dermawan et al., 2025)	Komposit dari biochar ampas tebu dan besi nano-zero valent (nZVI)	a. Menggunakan metode batch b. Variasi massa adsorben yaitu 0,2; 0,6; dan 1 g/L c. Variasi pH yaitu 2, 4, 6, 8, 10, dan 12 d. Variasi konsentrasi larutan Cr(VI) yaitu 25, 50, 75, 100, 125, 150, dan 175 ppm e. Variasi waktu kontak 30, 60, 90, 120, 150, dan 180 menit f. Biochar dari ampas tebu dikompositkan dengan besi nano-zero valent (nZVI) dengan rasio 1:1, 2:1, dan 3:1 g. Hasil penelitian - Hasil FTIR menunjukkan terdapatnya gugus fungsi yang mendukung dalam proses adsorpsi seperti -OH, C=O, C-O, dan C=C, dan puncak Fe-O akibat komposit nano zero-valent iron (nZVI) pada biochar. - Hasil SEM menunjukkan adsorben biochar berpori, dan distribusi nZVI

			merata pada permukaan adsorben sebelum adsorpsi, dan setelah adsorpsi permukaan tertutup endapan Cr(VI) dan partikel nZVI berkurang. - Efisiensi removal logam Cr(VI) pada pH optimum 2 yaitu 44,45% dengan biochar, 49,39% dengan adsorben komposit (1:1), 54,33% dengan adsorben komposit (2:1), dan 64,21% dengan adsorben komposit (3:1). - Kapasitas adsorpsi dalam mengadsorpsi Cr(VI) yaitu dan 77,82 mg/g untuk biochar sendiri, dan dari adsorben komposit yaitu 86,47 mg/g (1:1), 95,12 mg/g (2:1), dan 112,41 mg/g (3:1). - Kondisi optimum diperoleh pada adsorben komposit 3:1 dengan konsentrasi Cr(VI) sebesar 175 mg/L, waktu kontak 180 menit, dan pH 2. - Proses adsorpsi menunjukkan kesesuaian dengan model isoterm freundlich.

Berdasarkan penelitian terdahulu, ampas tebu terbukti efektif digunakan sebagai adsorben untuk menghilangkan berbagai polutan seperti logam berat maupun senyawa organik. Dengan terdapatnya berbagai jenis modifikasi dan proses aktivasi pada adsorben terbukti dapat meningkatkan kapasitas adsropsi. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih menggunakan sistem batch yang kurang merepresentasikan kondisi pengolahan air secara kontinu. Oleh karena itu, dalam penelitian ini ampas tebu yang digunakan akan diaktivasi dengan asam sitrat, dan proses adsropsi dilakukan dengan sistem adsorpsi kolom untuk menguji efektivitas penurunan logam berat terutama logam berat Kadmium (Cd) dengan variasi parameter debit atau laju alir, dan ketinggian massa adsorben. Sehingga, diharapkan penelitian ini dapat memperkuat potensi ampas tebu sebagai solusi pengolahan air limbah yang berkelanjutan.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan selama 4 bulan dari bulan Maret 2025 sampai dengan bulan Juli 2025 dengan lokasi penelitian di Laboratorium Kualitas Air Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

3.2 Alat, Bahan, dan Instrumen

1. Alat
    a. Kolom
    b. Glasswool
    c. Oven
    d. Blender
    e. Neraca Analitik
    f. Kaca Arloji
    g. Ayakan 106 mesh
    h. Stopwatch
    i. Gelas beker 1000 mL
    j. Labu Ukur
    k. Corong Kaca
    l. Pipet Ukur
    m. Pipet Volume
    n. Karet Hisap
    o. Sendok
    p. Pompa Peristaltik
    q. Selang
    r. Penggaris
    s. Alat pendukung lainnya untuk rangkaian sistem

2. Bahan
    a. Ampas tebu
    b. Larutan Induk Kadmium ($Cd(NO_3)_2$) 1000 mL
    c. Larutan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,4 M
    d. Larutan Asam Nitrat (HNO_3) pekat
    e. Larutan NaOH 0,1 N
    f. Aquades
3. Instrumen
    a. *Fourier Transform InfraRed* (FTIR)
    b. *Scanning Electron Microscopy* (SEM)
    c. *Atomic Adsorption Spectrophotometry* (AAS)

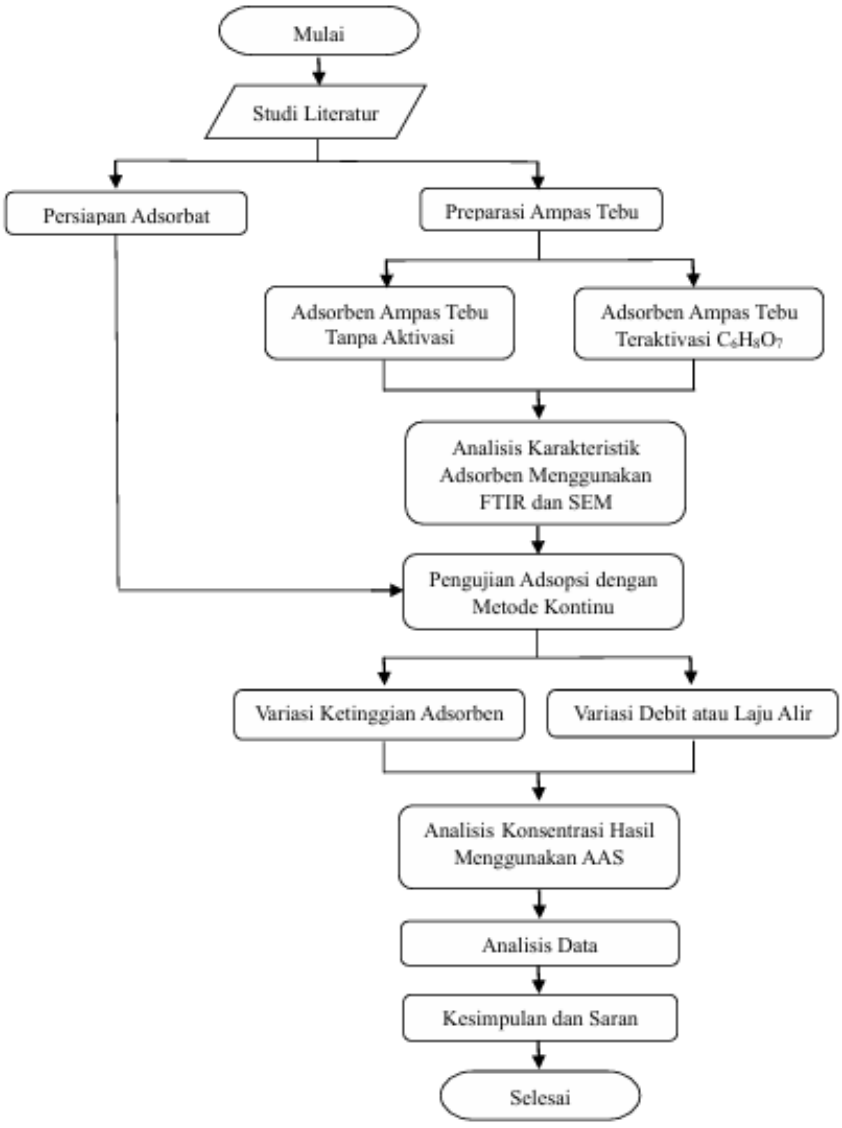
3.3 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan dua jenis variabel untuk mengetahui efektivitas adsorpsi logam berat kadmium (Cd) menggunakan adsorben ampas tebu yaitu sebagai berikut:

1. Variabel terikat terdiri dari
    a. Adsorben dari ampas tebu
    b. Aktivasi menggunakan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,4 M
    c. Konsentrasi Larutan Kadmium ($Cd(NO_3)_2$) 22 mg/L
    d. pH larutan kadmium ($Cd(NO_3)_2$) yaitu 7
2. Variabel bebas terdiri dari
    a. Variasi debit atau laju alir 5 ml/menit, dan 7,5 ml/menit untuk dapat diketahui debit optimum.
    b. Variasi ketinggian adsorben 10 cm dan 15 cm dengan massa yang ditentukan berdasarkan diameter kolom sistem kontinu.

3.4 Prosedur Penelitian

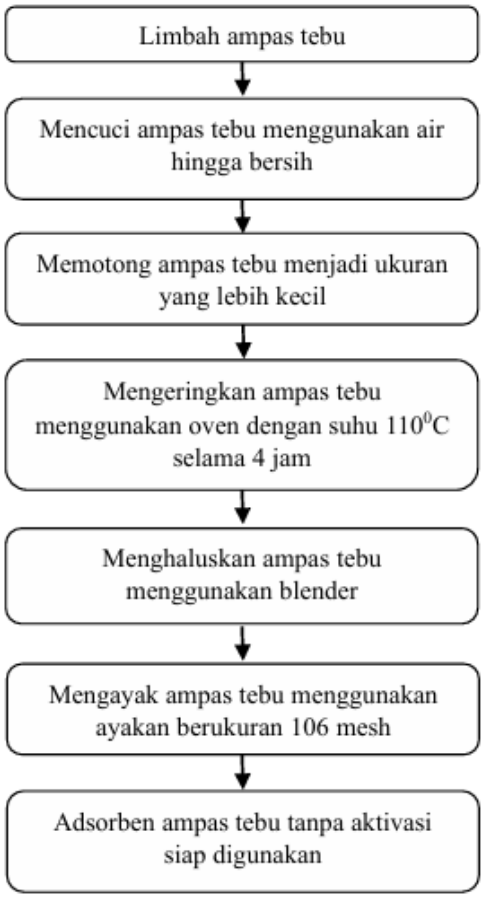
Alur penelitian "Pemanfaatan Ampas Tebu sebagai Adsorben untuk Menurunkan Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) pada Air Limbah dengan Metode Kontinu" dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Prosedur Penelitian

3.4.1 Preparasi Adsorben Ampas Tebu

Pada penelitian ini ampas tebu diperoleh dari penjual es tebu yang berlokasi di Jl. Kinanti, Manukan, Condong Catur, Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Preparasi adsorben ampas tebu mengacu pada penelitian Zahra (2022). Diagram alir mengenai pembuatan adsorben ampas tebu dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut ini.

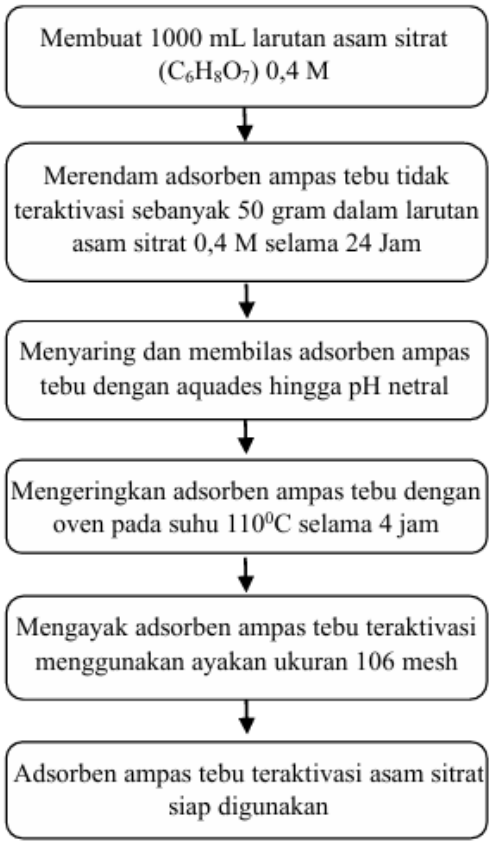


Gambar 3.2 Preparasi Adsorben Ampas Tebu

3.4.2 Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi $C_6H_8O_7$

Preparasi aktivasi adsorben ampas tebu mengacu pada penelitian Rielsa (2023). Aktivasi adsorben dilakukan dengan tujuan untuk memperluas permukaan ampas tebu agar mampu dalam mengikat adsorbat lebih banyak. Aktivasi adsorben ampas tebu dilakukan dengan menggunakan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,4 M. Dalam proses aktivasi, perbandingan yang digunakan

yaitu 1:16 dengan 1 gram adsorben ampas tebu dengan 16 mL larutan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,4 M. Diagram alir mengenai proses aktivasi adsorben ampas tebu menggunakan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini.



Gambar 3.3 Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi

3.4.3 Preparasi Rangkaian Sistem Kontinu

Preparasi rangkaian sistem kontinu atau kolom mengacu pada penelitian Rielsa (2023). Pada proses preparasi ini diawali dengan menyiapkan seluruh alat yang dibutuhkan untuk rangkaian sistem kontinu. Rangkaian sistem ini akan terdiri dari bak influen, kolom adsorpsi, dan wadah penampung efluen. Kolom yang digunakan berjumlah satu buah, terbuat dari pipa akrilik dengan panjang 71 cm dan diameter pipa sebesar 22 mm. Air limbah akan dialirkan dari bak influen menuju kolom menggunakan pompa peristaltik dengan debit atau laju alir yang telah

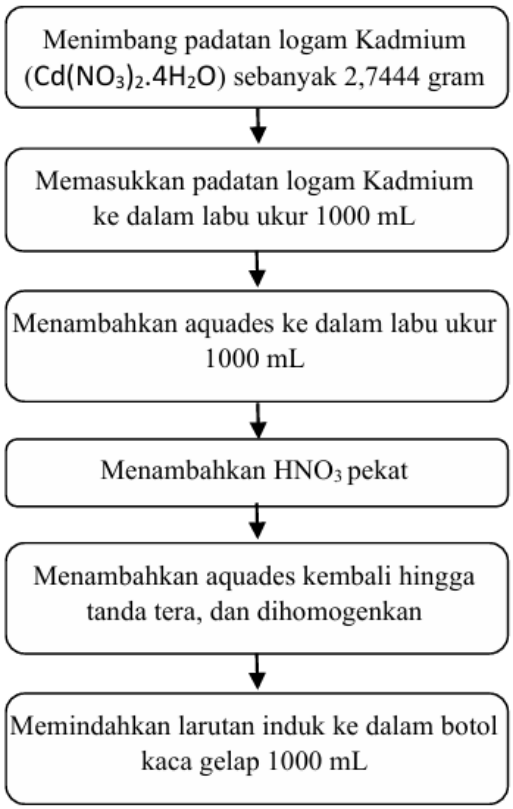
ditentukan. Di dalam kolom, diberi glasswool pada bagian tengah kolom untuk menahan adsorben dengan ketinggian yang telah ditentukan. Proses adsorpsi dalam sistem kontinu ini menggunakan *fixed bed column* dengan kondisi media adsorben dalam keadaan terendam. Gambaran mengenai rangkaian sistem kontinu dapat dilihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.



Gambar 3.4 Rangkaian Sistem Kontinu

3.4.4 Pembuatan Larutan Induk Logam Kadmium (Cd)

Pembuatan larutan induk dengan konsentrasi 1000 mg/L pada penelitian ini mengacu pada prosedur yang terdapat penelitian yang dilakukan oleh Rosmiati, et al (2022). Diagram alir mengenai pembuatan larutan induk logam Kadmium (Cd) dapat dilihat pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3.5 Pembuatan Larutan Induk Kadmium (Cd) 1000 mg/L

Sedangkan, untuk larutan uji yang akan digunakan selama pengujian diperoleh melalui proses pengenceran dari larutan induk. Proses pengenceran ini dilakukan dengan menggunakan persamaan pengenceran yang dapat dilihat pada Persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2 \quad (3.1)$$

Dimana,

V_1 = Volume larutan induk (mL)

C_1 = Konsentrasi larutan induk (mg/L)

V_2 = Volume larutan uji (mL)

C_2 = Konsentrasi yang diinginkan untuk larutan uji (mg/L)

3.4.5 Karakterisasi Adsorben

Karakterisasi adsorben ampas tebu tanpa aktivasi, dan yang diaktivasi dengan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) dilakukan dengan menggunakan dua instrumen meliputi *Fourier Transform InfraRed* (FTIR), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Karakterisasi adsorben menggunakan instrumen FTIR digunakan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada adsorben. Sedangkan, karakterisasi adsorben menggunakan instrumen SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan, dan pori-pori pada adsorben.

3.4.6 Penentuan Debit atau Laju Alir

Pada penelitian ini, penentuan debit atau laju alir air limbah dilakukan dengan melakukan percobaan terlebih dahulu. Air akan dialirkan menggunakan pompa peristaltik kedalam wadah penampung yang telah diketahui volumenya, lalu mencatat volume air yang terkumpul hingga batas ketinggian tertentu dan dalam waktu tertentu. Dalam menghitung waktu yang dibutuhkan digunakannya alat bantu seperti stopwatch untuk membantu dalam menghitung, sehingga waktu yang tercatat dapat digunakan untuk menghitung debit dengan rumus yang sesuai. Pada penelitian ini, debit aliran ditentukan berdasarkan dua variasi debit atau laju alir yaitu 5 mL/menit, dan 7,5 mL/menit. Sehingga, dalam kondisi tertentu waktu dapat dijadikan sebagai variabel tetap, dan volume menjadi variabel bebas yang dapat berubah-ubah tergantung pada debit yang digunakan. Persamaan yang digunakan dalam menentukan debit atau laju alir dapat dilihat pada Persamaan 3.2 sebagai berikut.

$$\text{Debit (Q)} = \frac{\text{Volume (V)}}{\text{Waktu (t)}} \tag{3.2}$$

Dimana,

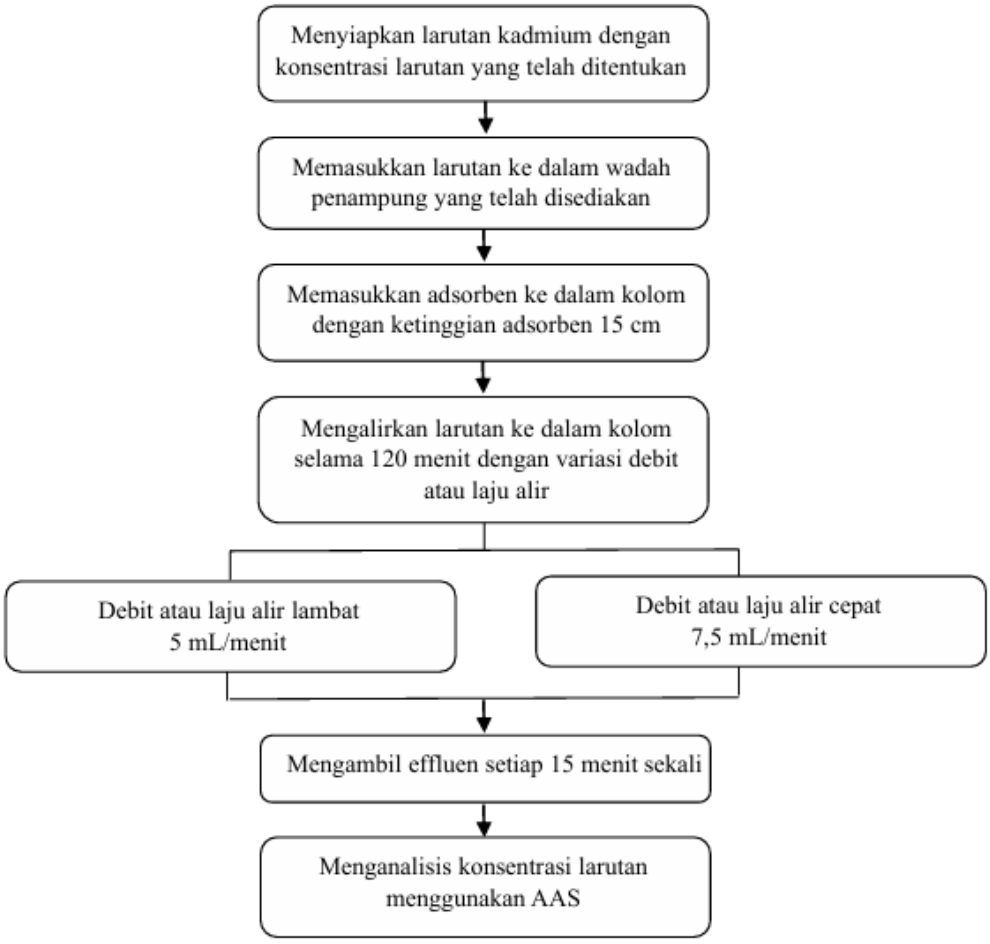
Q = Debit (ml/menit)

V = Volume (ml)

t = Waktu (menit)

3.4.7 Uji Variasi Debit atau Laju Alir

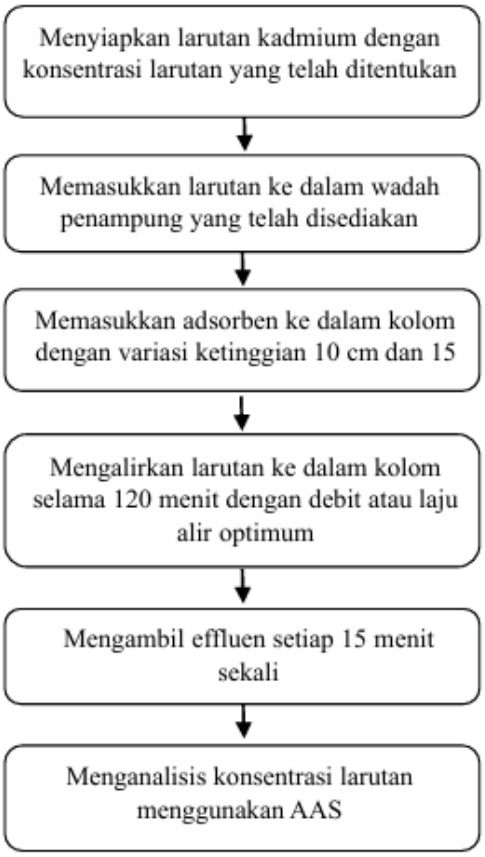
Pengujian variasi debit atau laju alir pada penelitian ini mengacu pada penelitian Rielsa (2023). Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk dapat mengetahui pengaruh dari debit atau laju alir terhadap proses adsorpsi kolom, dan menemukan debit atau laju alir optimum untuk adsorben dapat kontak dengan air limbah yang mengandung logam berat kadmium (Cd) yang memiliki konsentrasi larutan 22 mg/L. Diagram alir mengenai proses pengujian variasi debit atau laju alir dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut ini.



Gambar 3.6 Uji Variasi Debit atau Laju Alir

3.4.8 Uji Variasi Ketinggian Adsorben

Pengujian variasi ketinggian adsorben pada penelitian ini mengacu pada Rielsa (2023). Pengujian variasi ketinggian adsorben bertujuan untuk mengetahui pengaruh tinggi adsorben terhadap proses adsorpsi kolom, dan menemukan ketinggian adsorben optimum pada saat adsorben kontak dengan air limbah yang mengandung logam berat kadmium (Cd). Diagram alir mengenai proses pengujian variasi ketinggian adsorben yang dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3.7 Uji Variasi Ketinggian Adsorben

3.4.9 Penentuan Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve)*

Penentuan kurva terobosan (*Breakthrough Curve)* bertujuan untuk mengetahui kinerja dari kolom adsorpsi yang menunjukkan kondisi terjadinya peningkatan drastis dari jumlah adsorbat yang dapat teradsorpsi oleh adsorben, sebelum proses adsorpsi mendekati kesetimbangan adsorpsi (Indah et al., 2021). Selain itu, dengan kurva ini juga digunakan untuk melihat kondisi jenuh pada kolom. Pada kondisi jenuh, laju adsorpsi pada kolom akan mengalami penurunan yang dapat menyebabkan terjadinya proses desorpsi. Proses desorpsi sendiri merupakan proses pelepasan adsorbat pada adsorben kembali ke dalam adsorbat setelah memenuhi capaian nilai maksimum dari kapasitas adsorpsi, sehingga dari proses tersebut menyebabkan penurunan kapasitas adsorpsi (Handy et al., 2024).

Pada *Breakthrough Curve* dapat diketahui titik breakthrough, dan titik exhaust. Titik breakthrough merupakan titik dimulainya mass-transfer zone yang ditandai dengan adsorbat akan keluar dari kolom adsorpsi bersama dengan effluen. Titik breakthrough ini terjadi dengan ditandai dengan naiknya rasio konsentrasi effluen dengan konsentrasi influen secara signifikan. Sedangkan, titik exhaust merupakan titik berakhirnya mass-transfer zone yang ditandai dengan rasio antara effluen dan influen hampir sama yang menunjukkan bahwa kolom sudah jenuh dan adsorben tidak dapat lagi untuk menyerap adsorbat. Sehingga hampir seluruh adsorbat akan keluar dari kolom bersama dengan effluen (Subhan et al., 2022).

3.4.10 Model Kinetika Adsorpsi Kolom

Model kinetika pada sistem adsorpsi kolom digunakan untuk mengevaluasi kinerja adsorpsi kolom, dan mengetahui kapasitas adsorpsi dalam suatu sistem aliran kontinu. Hal tersebut dikarenakan dalam pengoperasian kolom adsorpsi terdapat beberapa hal penting yang harus diperhatikan seperti kapasitas adsorben, waktu regenerasi, dan waktu operasi. Model kinetika ini memiliki pendekatan yang berbeda-beda untuk kondisi operasi yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukannya model

kinetika yang tepat untuk suatu kondisi operasi. Berikut merupakan model kinetika yang digunakan pada adsorpsi kolom **(**Subhan et al., 2022).

a. Model Thomas

Model Thomas digunakan untuk menentukan konstanta laju adsorpsi (K_{th}), dan kapasitas penyerapan maksimum adsorben atau kapasitas adsorpsi (q_{Th}). Sehingga, model ini secara umum digunakan untuk memodelkan kesetimbangan teori kinerja kolom. Persamaan dari model Thomas dapat dilihat pada Persamaan 3.3 sebagai berikut.

$$ln\left[\frac{C_0}{C_t} - 1\right] = \frac{K_{Th}q_0x}{Q} - K_{Th}C_0t \quad (3.3)$$

Dimana,

K_{Th} = Konstanta laju adsorpsi Thomas (L/mg.menit)
C_0 = Konsentrasi awal (mg/L)
C_t = Konsentrasi akhir (mg/L)
q_{Th} = Kapasitas Adsorpsi Thomas (mg/g)
x = Massa adsorben (gram)
Q = Debit atau laju alir (L/menit)
t = Waktu pengujian (menit)

Dari persamaan tersebut, nilai K_{th} dan q_{Th} dapat diketahui melalui nilai slope dan intersep yang dihasilkan dari pembentukan grafik antara ln (C_0/C_t)-1 dengan waktu (t).

b. Model Yoon-Nelson

Model Yoon-Nelson memiliki asumsi bahwa laju adsorpsi sebanding dengan laju penurunan adsorpsi pada setiap adsorbat. Pada model ini dapat menentukan konstanta laju adsorpsi (K_{YN}), dan kapasitas penyerapan maksimum adsorben atau kapasitas adsorpsi (q_{YN}). Akan tertapi, model ini juga memiliki prediksi terkait 50% waktu breakthough dalam kolom. Persamaan dari model Yoon-Nelson dapat dilihat pada Persamaan 3.4 sebagai berikut.

$$\ln\left[\frac{C_t}{C_0 - C_t}\right] = K_{YN}t - K_{YN}\tau \quad (3.4)$$

Dimana,

K_{YN} = Konstanta laju adsorpsi Yoon-Nelson ($menit^{-1}$)

C_0 = Konsentrasi awal (mg/L)

C_t = Konsentrasi akhir (mg/L)

τ = Waktu 50% breakthrough (menit)

Dari persamaan tersebut, nilai K_{YN} dapat diketahui melalui nilai slope yang dihasilkan dari pembentukan grafik antara ln $(C_t/(C_0 - C_t))$ dengan waktu (t). Sedangkan, nilai intersep yang dihasilkan akan menunjukkan nilai $-\tau K_{YN}$ yang digunakan untuk mengetahui waktu 50% breakthorugh pada sistem kolom. Setelah diketahui nilai τ maka dapat mengetahui kapasitas adsorpsi (q_{YN}) dengan menggunakan Persamaan 3.5 sebagai berikut.

$$q_{YN} = \frac{(C_0 \tau Q)}{1000x} \quad (3.5)$$

Dimana,

q_{YN} = Kapasitas adsorpsi Yoon-Nelson

Q = Debit atau laju alir (L/menit)

x = Massa adsorben (gram)

c. Model Adam-Bohart

Model Adam-Bohart dapat memprediksi hubungan linear antara tinggi adsorben dan waktu yang diperlukan untuk mencapai waktu breakthrough. Model ini juga dapat menentukan konstanta Adam Bohart (K_{AB})dan kapasitas adsorpsi (N_0). Persamaan dari model Adam-Bohart dapat dilihat pada Persamaan 3.6 sebagai berikut.

$$\ln\left[\frac{C_t}{C_0}\right] = K_{AB} C_0 t - \frac{K_{AB} N_0 Z}{Q} \quad (3.6)$$

Dimana,

K_{AB} = Konstanta laju adsorpsi Adam-Bohart (L/mg.menit)

C_0 = Konsentrasi awal (mg/L)

C_t = Konsentrasi akhir (mg/L)

t = Waktu pengujian (menit)

N_0 = Kapasitas adsorpsi Adam-Bohart (mg/L)

Q = Debit atau laju alir (mL/menit)

Z = Ketinggian massa adsorben (cm)

Dari persamaan tersebut, K_{AB} dan kapasitas adsorpsi N_0 dapat diketahui melalui nilai slope dan intersep yang dihasilkan dari pembentukan grafik antara $\ln(C_t/C_0)$ dengan waktu (t).

3.4.11 Analisis Efektivitas Adsorben

Analisis efektivitas adsorben dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kemampuan adsorben dalam mengurangi kadar logam berat kadmium (Cd) pada air limbah. Analisis ini dilakukan setelah seluruh rangkaian pengujian adsorpsi dengan metode kontinu telah dilakukan, sehingga dapat diketahui konsentrasi awal logam berat kadmium (Cd) sebelum proses adsorpsi, serta konsentrasi akhir logam berat kadmium (Cd) setelah melalui proses adsorpsi adsorben berbasis ampas tebu dengan variasi debit atau laju alir, dan waktu kontak pada air limbah. Rumus yang digunakan untuk menghitung efektivitas adsorben dapat dilihat pada Persamaan 3.7 sebagai berikut.

$$\text{Efisiensi Removal (\%)} = \frac{C_0 - C_{eff}}{C_0} \times 100\% \quad (3.7)$$

Dimana,

C_0 = Konsentrasi awal larutan

C_{eff} = Konsentrasi akhir larutan

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

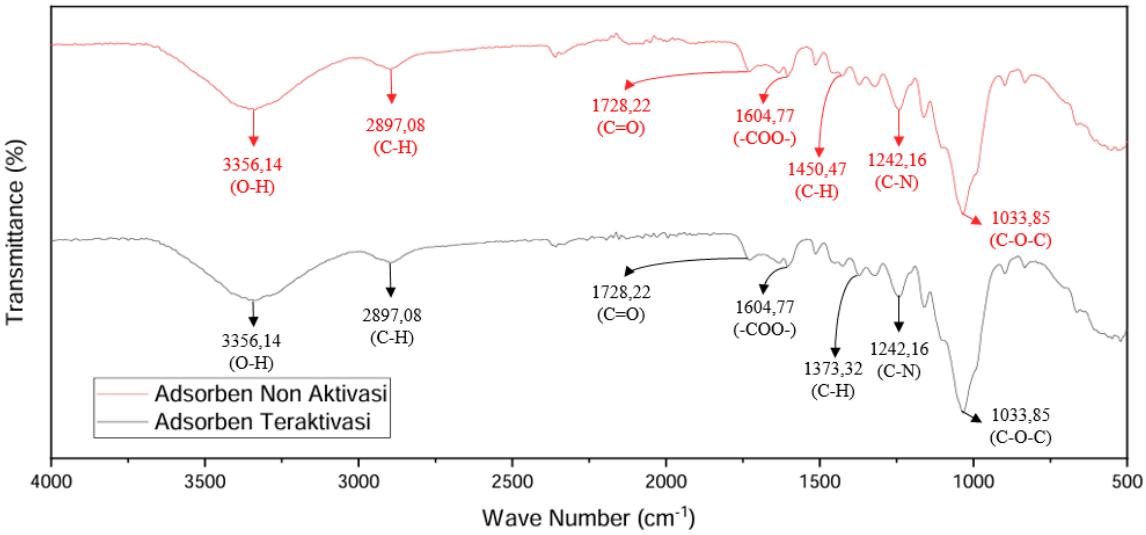
4.1 Karakteristik Adsorben

Pada penelitian ini dilakukannya analisis karakteristik adsorben yang akan digunakan sebelum kontak dengan adsorbat. Dalam menganalisis karakteristik adsorben digunakannya instrumen seperti *Fourtier Transform Infra Red* (FTIR), dan *Scanning Electron Microscopes* (SEM).

4.1.1 *Fourtier Transform Infra Red* (FTIR)

Fourier Transformed Infra Red (FTIR) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi senyawa, dan mendeteksi gugus fungsi berdasarkan interaksi antara molekul dengan radiasi inframerah. Dalam pengujian ini digunakannya panjang gelombang 400-4000 cm^{-1} · Panjang gelombang yang digunakan tersebut akam digunakan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada adsorben ampas tebu yang memiliki kandungan utama seperti 50% selulosa, 25% hemiselulosa, dan 25% lignin. Gugus fungsi yang terdapat pada permukaan adsorben akan berinteraksi dengan logam berat Kadmium (Cd) sebagai media penyerap logam berat atau mengikat ion logam.

Hasil yang didapatkan dari analisis menggunakan FTIR yaitu berupa grafik yang menunjukkan panjang gelombang (cm^{-1}) pada sumbu x dan persentase (%) transmittan pada sumbu y yang menunjukkan persentase cahaya inframerah yang lolos melewati sampel. Dari grafik tersebut dapat mengetahui gugus fungsi yang ada pada adsorben melalui puncak gelombang (*peak*) pada rentang tertentu. Hasil dari pengujian FTIR pada adsorben ampas tebu, dan adsorben ampas tebu teraktivasi sebelum dilakukannya proses adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut.



Gambar 4.1 Hasil Pengujian FTIR Adsorben Ampas Tebu Non Aktivasi, dan Adsorben Teraktivasi Asam Sitrat

Dari grafik yang terdapat pada Gambar 4.1 dapat diidentifikasikan titik puncak dengan rincian klasifikasi pada Tabel 4.1 sebagai berikut.

Tabel 4.1 Interpretasi Gugus Fungsi Adsorben

Gugus Fungsi	Rentang Frekuensi (cm^{-1})	Kelompok Senyawa	Adsorben Non Aktivasi		Adsorben Teraktivasi	
			Frekuensi (cm^{-1})	Intensitas (%)	Frekuensi (cm^{-1})	Intensitas (%)
O-H	3600 - 3200	Hidroksil	3356,14	82,64	3356,14	79,24
-COO-	1610 - 1560	Karboksil	1604,77	92,69	1604,77	91,00
C=O	1740 - 1680	Karbonil	1728,22	94,80	1728,22	92,83
C – O - C	1120 - 1030	Eter	1033,85	48,56	1033,85	41,26
C-H	2900 - 2800	Alkana (*stretching*)	2897,08	93,95	2897,08	93,73
C-H	1470 - 1340	Alkana (*bending*)	1450,47	93,91	1373,32	88,19
C – N	1280 - 1180	Amina	1242,16	83,64	1242,16	79,06

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil klasifikasi gugus fungsi yang telah dilakukan pada Tabel 4.1 dapat diketahui bahwa adsorben ampas tebu sebelum aktivasi dan setelah aktivasi memiliki gugus-gugus fungsi aktif yang dapat mendukung untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi. Gugus fungsi senyawa hidroksil (O-H) yang terdapat pada frekuensi 3356.14 cm^{-1}, dan gugus fungsi senyawa karboksil (-COO-) yang terdapat pada frekuensi 1604.77 cm^{-1} merupakan gugus penyususun dari selulosa yang terkandung dalam ampas tebu dan

menentukan kapasitas adsorpsi (Sari et al., 2017). Menurut Mangesti et al. (2019), Keberadaan gugus -OH pada selulosa dapat menyebabkan adsorben bersifat polar. Sehingga, selulosa yang terdapat pada adsorben dapat menjerap zat yang memiliki sifat lebih polar dibandingkan dengan zat yang kurang polar. Selain itu, terdapat juga gugus fungsi senyawa karbonil (C=O) yang terdapat pada frekuensi 1728.22 cm^{-1} yang merupakan gugus penyusun dari hemiselulosa. Gugus fungsi senyawa eter (C-O-C) pada frekuensi 1033.85 cm^{-1} yang merupakan gugus penyusun dari lignin (Bhernama et al., 2023).

Gugus fungsi senyawa alkana (C-H) *stretching* yang terdapat pada frekuensi 2897.08 cm^{-1} merupakan gugus fungsi yang menyusun struktur selulosa (Apaydın & Mutlu, 2023). Selain itu, pada gugus fungsi senyawa alkana (C-H) *bending* terdapatnya perbedaan frekuensi antara adsorben sebelum diaktivasi dengan adsorben yang telah diaktivasi dengan asam sitrat. Pada adsorben yang belum diaktivasi menunjukkan frekuensi 1450.47 cm^{-1} sedangkan setelah dilakukannya aktivasi dengan asam sitrat terdapatnya pergeseran frekuensi menjadi 1373.32 cm^{-1}. Pergeseran frekuensi tersebut dapat disebabkan oleh perubahan lingkungan kimia yang dimana sebelum dilakukannya aktivasi gugus alifatik masih berada dalam kondisi kimia alami dari struktur lignoselulosa pada ampas tebu yang pada umumnya memiliki ikatan yang bersifat relatif non-polar. Akan tetapi, setelah dilakukannya proses aktivasi terdapatnya perubahan kondisi kimia yang dimana ikatan-ikatan non polar tersebut dapat berinteraksi dengan gugus-gugus polar baru seperti gugus karboksil (-COOH) dan hidroksil (OH). Interaksi yang terjadi selama proses aktivasi dapat menjadikan gugus C-H menjadi lebih polar. Sehingga, dari imteraksi kimia yang terjadi selama proses aktivasi dapat menyebabkan gaya ikatan menjadi lemah dan frekuensi vibrasi mengalami penurunan karena terdapatnya perubahan struktur ikatan kimia (Tejada et al., 2015). Menurut Zhuang et al. (2020), frekuensi gugus fungsi senyawa alkana (C-H) *bending* yang terdapat pada frekuensi 1450.47 dan 1373.32 merupakan gugus fungsi yang menyusun struktur selulosa, hemiselulosa, dan lignin.

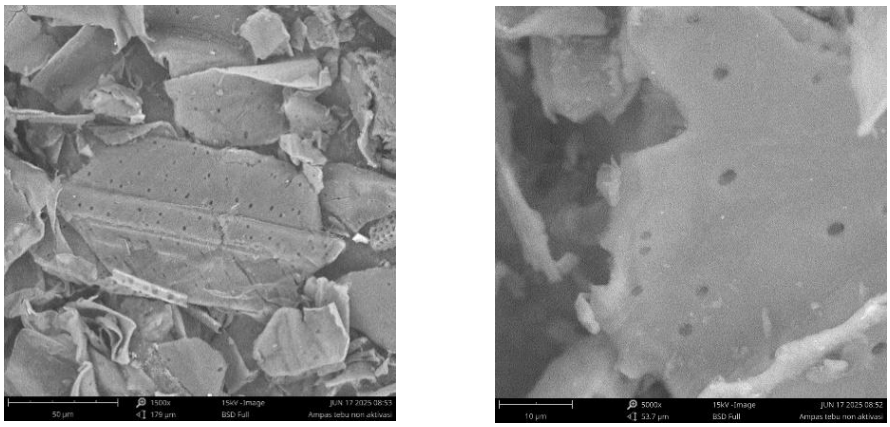
Gugus fungsi (C-N) yang terdapat pada frekuensi 1242.16 cm^{-1} untuk kedua jenis adsorben menunjukkan keberadaan gugus amina ini. Keberadaan gugus amina pada adsorben dapat memperbesar potensi daya serap adsorben untuk mengikat ion logam melalui ikatan koordinasi dan interaksi elektrostatik. Menurut Irawan et al. (2021), gugus amina pada adsorben ampas tebu memiliki peran penting dalam proses adsorpsi logam berat. Gugus amina memiliki atom nitrogen dengan pasangan elektron bebas yang dapat membentuk ikatan koordinasi dengan ion logam. Selain itu, gugus amina (-NH_2) pada kondisi asam dapat terprotonasi menjadi -NH_3^+ sehingga permukaan adsorben akan bermuatan positif. Muatan positif tersebut dapat menarik ion logam melalui interaksi elektrotastik dan menyebabkan kemampuasn adsorpsi logam berat pada permukaan adsorben jadi meningkat.

Gugus-gugus fungsi yang dimiliki oleh adsorben sebelum diaktivasi dan adsorben yang telah teraktivasi dengan asam sitrat rata-rata memiliki gugus fungsi yang terletak di frekuensi yang sama. Akan tetapi, terdapat perbedaan persentase transmitan setelah dilakukannya proses aktivasi dengan asam sitrat. Dimana, hasil persentase transmittan yang telah didapatkan mengalami penurunan yang menunjukkan bahwa semakin menurun nilai persentase transmittan maka menunjukkan bahwa akan semakin banyak gugus fungsi aktif yang terdapat dalam adsorben (Hartanto et al., 2024) yang dapat berinteraksi dengan radiasi inframerah dan membuat serapan cahaya semakin kuat.

4.1.2 *Scanning Electron Microscopes* (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengetahui karakteristik dari suatu bahan seperti citra morfologi, konsentrasi dari campuran bahan, struktur dan kerusakan pada bahan material. Instrumen ini dapat memperbesar objek hingga 1.000.000 kali sehingga dapat dimanfaatkan untuk mengamati material-material pada tingkat sub mikron dan nano (Septiano et al., 2021). Pada penelitian ini pengujian SEM dilakukan untuk menganalisis morfologi permukaan adsorben ampas tebu yang telah diayak menggunakan 106 mesh, dan akan

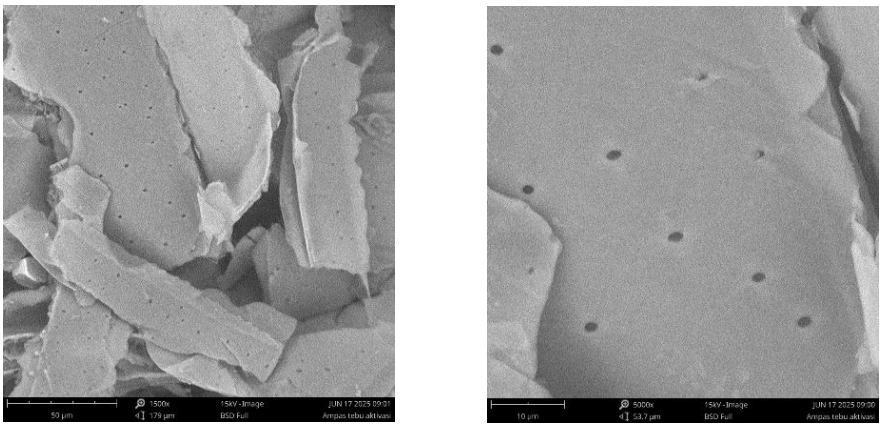
digunakan selama proses adsorpsi, serta menunjukkan perbedaan strutur permukaan antara adsorben ampas tebu tanpa aktivasi dengan adsorben ampas tebu yang teraktivasi dengan asal sitrat. Perbesaran yang digunakan pada penelitian ini yaitu perbesaran 1500x dan 5000x. Hasil dari analisis SEM dengan perbesaran 1500x dan 5000x pada jenis adsorben tanpa aktivasi dan teraktivasi asam sitrat dapat dilihat pada Gambar 4.2, dan Gambar 4.3 sebagai berikut.



(a) (b)

Gambar 4.2 (a) Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaran 1500 kali (b) Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaran 5000 kali

Sumber: Data Ali, 2025



(a) (b)

Gambar 4.3 (a) Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Perbesaran 1500 kali (b) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Perbesaran 5000 kali

Sumber: Data Ali, 2025

Berdasarkan Gambar 4.2 (a) dan Gambar 4.3 (a) dapat dilihat bahwa adsorben ampas tebu tanpa aktivasi menunjukkan struktur permukaan yang relatif kasar dengan terdapatnya sedikit retakan pada permukaan adsorben. Selain itu, jumlah pori-pori juga terlihat relatif lebih sedikit dengan ukuran pori yang relatif tidak seragam. Hal tersebut menunjukkan bahwa porositas yang dimiliki oleh adsorben ampas tebu tanpa aktivasi masi relatif rendah yang dimana memungkinkan kemampuan untuk menyerap ion logam pada proses adsorpsi juga terbatas. Sedangkan, pada permukaan adsorben ampas tebu setelah dilakukannya proses aktivasi, tekstur permukaan adsorben terlihat lebih halus, dan bersih. Selain itu, jumlah pori terlihat lebih banyak dengan ukuran pori terlihat lebih seragam. Sehingga, adsorben yang telah diaktivasi dapat lebih ideal dalam menangkap ion logam dalam suatu larutan. Hal tersebut didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Futalan et al. (2023) yang melakukan proses aktivasi adsorben dengan asam organik yaitu lemon juice yang kaya akan asam sitrat sebagai bahan aktivasi. Dimana, pada saat dilakukannya aktivasi dengan asam organik permukaan adsorben menjadi lebih halus, bersih, dan pori-pori menjadi terbuka. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan asam sitrat yang berasal dari lemon juice melarutkan kontaminan anorganik pada permukaan adsorben, dan membantu dalam membuka pori-pori yang sebelumnya tertutup, serta meningkatkan luas permukaan dan volume pori.

4.2 Uji Adsorpsi

Pada penelitian ini pengujian adsorpsi logam berat Kadmium (Cd) dengan adsorben ampas tebu dilakukan dengan menvariasikan debit atau laju alir, dan tinggi adsorben. Variasi tersebut dilakukan dengan tujuan untuk menentukan kondisi optimum adsorben dalam mengadsorpsi logam berat Kadmium (Cd) dengan waktu kontak yang telah ditentukan.

4.2.1 Uji Variasi Debit atau Laju Alir

Pengujian variasi debit atau laju alir bertujuan untuk mengetahui pengaruh debit terhadap efisiensi penyisihan kadar logam berat Kadmium (Cd) pada air limbah, dan mengetahui debit optimum. Pada penelitian ini, terdapat dua variasi debit yang digunakan yaitu debit 5 ml/menit dan debit 7,5 ml/menit. Konsentrasi awal (C_{in}) larutan Kadmium (Cd) yang digunakan selama proses adsorpsi yaitu 22 mg/L dengan kondisi pH netral. Larutan kadmium dialirkan ke dalam kolom yang telah terdapat adsorben dengan ketinggian massa adsorben yaitu 15 cm menggunakan pompa peristaltik dengan waktu kontak 120 menit. Effluen yang keluar ditampung menggunakan gelas beaker, dan diambil setiap 15 menit sekali dengan total pengambilan yaitu 8 kali pengambilan untuk diuji konsentrasi akhir (C_{ef}) dengan menggunakan instrumen AAS. Hasil pengujian terhadap variasi debit dengan adsorben ampas tebu sebelum diaktivasi dan teraktivasi dapat dilihat pada Tabel 4.2, Tabel 4.3, Tabel 4.4, dan Tabel 4.5 sebagai berikut.

Tabel 4.2 Data Debit atau Laju Alir Lambat Adsorben Tanpa Aktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	5	15	7	22,26	0,2	22,05	99,1
30	5	15	7	22,26	0,2	22,05	99,1
45	5	15	7	22,26	0,6	21,65	97,3
60	5	15	7	22,26	0,3	21,95	98,7
75	5	15	7	22,26	0,15	22,10	99,3
90	5	15	7	22,26	0,18	22,07	99,2
105	5	15	7	22,26	0,25	22,00	98,9
120	5	15	7	22,26	0,49	21,76	97,8

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4.3 Data Debit atau Laju Alir Cepat Adsorben Tanpa Aktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	7.5	15	7	22,26	0,2	22,05	99,1
30	7.5	15	7	22,26	0,29	21,96	98,7
45	7.5	15	7	22,26	0,94	21,31	95,8
60	7.5	15	7	22,26	2,42	19,83	89,1
75	7.5	15	7	22,26	3,07	19,18	86,2
90	7.5	15	7	22,26	3,04	19,21	86,3
105	7.5	15	7	22,26	3,35	18,90	84,9
120	7.5	15	7	22,26	3,18	19,07	85,7

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4.4 Data Debit atau Laju Alir Lambat Adsorben Teraktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	5	15	7	22,26	0,01	22,24	100
30	5	15	7	22,26	<0,05	22,26	100
45	5	15	7	22,26	<0,05	22,27	100
60	5	15	7	22,26	<0,05	22,23	100
75	5	15	7	22,26	0,008	22,24	100
90	5	15	7	22,26	<0,05	22,25	100
105	5	15	7	22,26	0,22	22,03	99,0
120	5	15	7	22,26	0,1	22,15	99,6

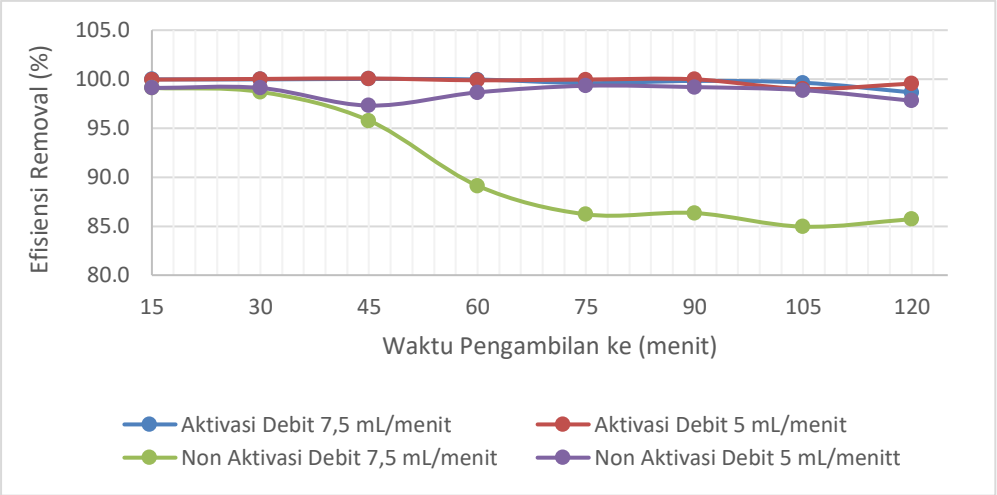
Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4.5 Data Debit atau Laju Alir Cepat Adsorben Teraktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	7.5	15	7	22,26	<0,05	22,25	100
30	7.5	15	7	22,26	<0,05	22,25	100
45	7.5	15	7	22,26	<0,05	22,26	100
60	7.5	15	7	22,26	<0,05	22,25	100
75	7.5	15	7	22,26	0,08	22,16	99,6
90	7.5	15	7	22,26	<0,05	22,21	99,8
105	7.5	15	7	22,26	0,08	22,17	99,6
120	7.5	15	7	22,26	0,3	21,95	98,7

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan instrumen *Atomic Adsorption Spectrofotometer* (AAS), pada variasi debit atau laju alir diperoleh beberapa data konsentrasi effluen dari proses adsorpsi yang menunjukkan bahwa konsentrasi effluen berada di bawah *Limit of Detection* (LOD) dari instrumen AAS di Laboratorium Kualitas Air, Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Nilai LOD pada alat tersebut adalah 0,05 mg/L, sehingga konsentrasi effluen yang dibawah nilai LOD tidak dapat terdeteksi. Selanjutnya, data yang telah diolah dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik untuk melihat hubungan antara persentase *removal* dari variasi debit yang telah dilakukan menggunakan adsorben tanpa aktivasi, dan teraktivasi asam sitrat dengan waktu. Grafik hubungan variasi debit terhadap adsorpsi Kadmium (Cd) dapat dilihat pada Gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Variasi Debit atau Laju Alir Terhadap Adsorpsi Cd

Berdasarkan data yang telah diperoleh, variasi debit atau laju alir terbukti berpengaruh terhadap penyerapan ion Cd, baik pada adsorben tanpa aktivasi maupun yang teraktivasi. Pada adsorben ampas tebu tanpa aktivasi dengan debit 5 mL/menit memiliki efisiensi removal sebesar 97,8%, sedangkan pada debit 7,5 mL/menit mengalami penurunan efisiensi menjadi 85,7%. Selain itu, pada adsorben teraktivasi dengan debit 5 mL/menit menunjukkan hasil yang sangat baik dengan efisiensi removal sebesar 99,6%, dan pada debit 7,5

mL/menit sebesar 98,7%. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa debit atau laju alir paling optimum untuk menyerap ion Cd dalam larutan terdapat pada adsorben ampas tebu yang telah diaktivasi dengan debit atau laju alir 5 mL/menit.

Dari hasil yang diperoleh, apabila dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Wardani et al., (2022) mengenai adsorpsi tetrasiklin menggunakan adsorben arang aktif ampas tebu termodifikasi kitosan dengan variasi debit atau laju alir 0,5; 1; dan 2 mL/menit, diperoleh debit atau laju alir optimum pada laju alir 0,5 mL/menit dengan efisiensi removal sebesar 92%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa debit atau laju alir menjadi salah satu faktor penting dalam proses adsorpsi dalam kolom dan mempengaruhi proses adsorpsi. Hal tersebut dikarenakan semakin lambat debit atau laju alir maka waktu kontak dan proses difusi intrapartikel yang terjadi antara adsorben dengan adsorbat akan semakin lama yang dapat menyebabkan kapasitas adsorpsi akan semakin meningkat (Palupi, 2021). Sedangkan, apabila debit atau laju alir cepat maka waktu kontak antara adsorben dengan adsorbat akan semakin pendek sehingga adsorbat tidak punya waktu yang cukup untuk berinteraksi dengan gugus aktif adsorben maka menyebabkan efisiensi removal dan kapasitas adsopsi mengalami penurunan (Chintokoma et al., 2024). Sehingga, dari data yang diperoleh efisiensi removal yang diperoleh pada debit atau laju alir cepat relatif lebih rendah dibandingkan dengan debit atau lajur alir lambat dari kedua adsorben yang digunakan.

Selain itu, dari data yang telah diperoleh menujukkan bahwa nilai efisiensi removal pada adsorben tanpa aktivasi memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan adsorben yang diaktivasi dengan asam sitrat dikarenakan pada adsorben tanpa aktivasi luas permukaan dan jumlah gugus fungsi yang aktif yang dimiliki lebih rendah dibandingkan dengan adsorben yang diaktivasi sehingga sehingga kemampuan dalam mengikat ion Cd menjadi menurun (Reda et al., 2025). Sebaliknya, pada adsorben ampas tebu yang telah diaktivasi memiliki efisiensi removal yang lebih tinggi dibandingkan dengan adsorben tanpa diaktivasi. Hal tersebut karena proses

aktivasi dengan asam sitrat pada adsorben dapat menambahkan gugus fungsi aktif pada permukaan adosorben dan meningkatkan polaritas adsorben yang menyebabkan daya tarik terhadap ion Cd menjadi lebih kuat (Liu et al., 2022) sehingga efisiensi removal dan kapasitas adsorpsi mengalami peningkatan.

.

4.2.2 Uji Variasi Ketinggian Adsorben

Pengujian variasi ketinggian adsorben bertujuan untuk mengetahui pengaruh tinggi adsorben pada kolom terhadap efisiensi penyisihan kadar logam berat Kadmium (Cd) pada air limbah, dan mengetahui ketinggian adsorben optimum dengan debit optimum yang telah didapat sebelumnya yaitu debit 5 ml/menit. Pada penelitian ini, terdapat dua variasi ketinggian yang digunakan yaitu ketinggian 10 cm dan 15 cm. Konsentrasi awal (C_{in}) larutan Kadmium (Cd) yang digunakan selama proses adsorpsi yaitu 22 mg/L dengan kondisi pH netral. Larutan kadmium dialirkan ke dalam kolom dengan debit optimum menggunakan pompa peristaltik dengan waktu kontak 120 menit. Effluen yang keluar ditampung menggunakan gelas beaker, dan diambil setiap 15 menit sekali dengan total pengambilan yaitu 8 kali pengambilan untuk diuji konsentrasi akhir (C_{ef}) dengan menggunakan instrumen AAS. Hasil pengujian terhadap variasi ketinggian dengan adsorben ampas tebu sebelum diaktivasi dan teraktivasi dapat dilihat pada Tabel 4.6, Tabel 4.7, Tabel. 4.8, dan Tabel 4.9 sebagai berikut.

Tabel 4.6 Data Ketinggian Massa Adsorben 10 cm Tanpa Aktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	5	10	7	22,26	0,73	21,52	96,7
30	5	10	7	22,26	0,68	21,57	96,9
45	5	10	7	22,26	0,69	21,56	96,9
60	5	10	7	22,26	1,03	21,22	95,4
75	5	10	7	22,26	4,1	18,15	81,6
90	5	10	7	22,26	3,18	19,07	85,7
105	5	10	7	22,26	2,78	19,47	87,5
120	5	10	7	22,26	3,4	18,86	84,7

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4.7 Data Ketinggian Massa Adsorben 15 cm Tanpa Aktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	5	15	7	22,26	0,2	22,05	99,1
30	5	15	7	22,26	0,2	22,05	99,1
45	5	15	7	22,26	0,6	21,65	97,3
60	5	15	7	22,26	0,3	21,95	98,7
75	5	15	7	22,26	0,15	22,10	99,3
90	5	15	7	22,26	0,18	22,07	99,2
105	5	15	7	22,26	0,25	22,00	98,9
120	5	15	7	22,26	0,49	21,76	97,8

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4.8 Data Ketinggian Massa Adsorben 10 cm Teraktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	5	10	7	22,26	0,12	22,13	99,5
30	5	10	7	22,26	0,34	21,91	98,5
45	5	10	7	22,26	0,59	21,66	97,3
60	5	10	7	22,26	0,47	21,78	97,9
75	5	10	7	22,26	0,34	21,91	98,5
90	5	10	7	22,26	0,57	21,68	97,0
105	5	10	7	22,26	0,74	21,51	96,7
120	5	10	7	22,26	0,62	21,63	97,2

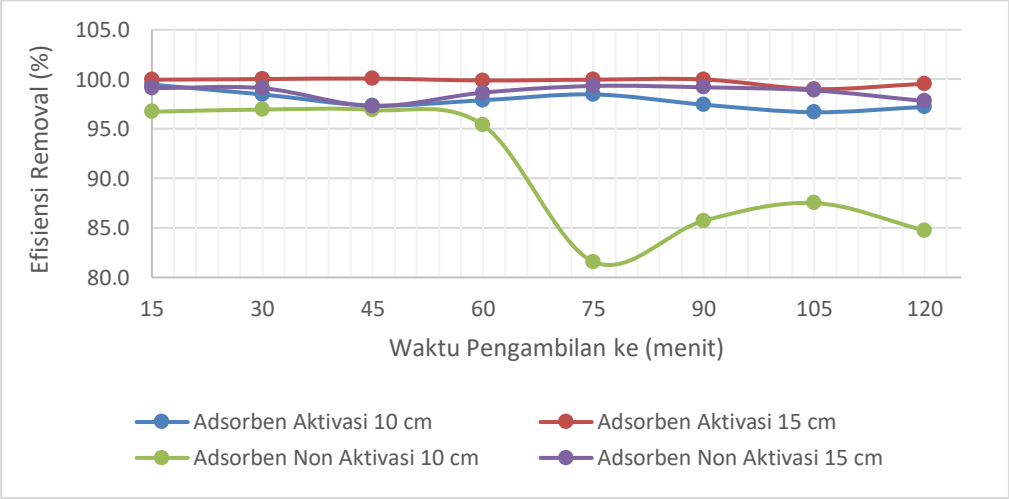
Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 4.9 Data Ketinggian Massa Adsorben 15 cm Teraktivasi

Waktu Pengambilan ke (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)
15	5	15	7	22,26	<0,05	22,24	100
30	5	15	7	22,26	<0,05	22,26	100
45	5	15	7	22,26	<0,05	22,26	100
60	5	15	7	22,26	<0,05	22,23	100
75	5	15	7	22,26	<0,05	22,24	100
90	5	15	7	22,26	<0,05	22,25	100
105	5	15	7	22,26	0,22	22,03	99,0
120	5	15	7	22,26	0,1	22,15	99,6

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan instrumen *Atomic Adsorption Spectrofotometer* (AAS), pada variasi ketinggian juga diperoleh beberapa data konsentrasi effluen dari proses adsorpsi yang menunjukkan bahwa konsentrasi effluen berada di bawah *Limit of Detection* (LOD) dari instrumen AAS di Laboratorium Kualitas Air, Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Nilai LOD pada alat tersebut adalah 0,05 mg/L, sehingga konsentrasi effluen yang dibawah nilai LOD tidak dapat terdeteksi. Selanjutnya, data yang telah diolah dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik untuk melihat hubungan antara persentase *removal* dari variasi ketinggian massa adsorben yang telah dilakukan menggunakan adsorben tanpa aktivasi, dan teraktivasi asam sitrat dengan waktu. Grafik hubungan variasi ketinggian adsorben terhadap adsorpsi Kadmium (Cd) dapat dilihat pada Gambar 4.5 sebagai berikut.



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Variasi Ketinggian Massa Adsorben Terhadap Adsorpsi Cd

Berdasarkan data yang telah diperoleh, variasi ketinggian massa adsorben terbukti berpengaruh terhadap pemyerapan ion Cd, baik pada adsorben tanpa aktivasi maupun yang teraktivasi. Pada adsorben ampas tebu tanpa aktivasi dengan ketinggian adsorben 10 cm memiliki efisiensi removal sebesar 84,7%, dan mengalami peningkatan efisiensi removal pada saat menggunakan ketinggian adsorben 15 cm menjadi 97,8%. Selain itu, pada adsorben teraktivasi dengan ketinggian adsorben 10 cm memiliki efisiensi

removal sebesar 97,2%, dan mengalami peningkatan efisiensi removal juga pada saat menggunakan ketinggian adsorben 15 cm menjadi 99,6%. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa ketinggian adsorben paling optimum dalam menyerap ion Cd di dalam larutan terdapat pada ketinggian adsorben 15 cm dengan adsorben yang telah diaktivasi.

Dari hasil yang diperoleh, apabila dibandingkan dengan penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Wardani et al. (2022) mengenai adsorpsi tetrasiklin menggunakan adsorben arang aktif ampas tebu termodifikasi kitosan dengan variasi ketinggian adsorben pada kolom yaitu 7 cm, 10 cm, dan 14 cm, diperoleh ketinggian adsorben optimum pada ketinggian 14 cm dengan efisiensi removal sebesar 99%. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa ketinggian adsorben juga menjadi salah satu faktor penting dalam proses adsorpsi dalam kolom dan mempengaruhi proses adsorpsi. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi adsorben maka jumlah adsorben yang digunakan akan lebih banyak. Sehingga luas permukaan yang tersedia dan gugus fungsi aktif untuk berinteraksi dengan ion Cd juga lebih besar. Selain itu, semakin tinggi adsorben pada kolom maka akan menyebabkan waktu kontak larutan di dalam kolom menjadi lebih lama dengan adsorben sehingga terdapatnya kesempatan besar bagi ion Cd untuk terdifusi atau terikat pada permukaan adsorben (Purwaningrum et al., 2021).

Selain itu, pada variasi ketinggian dengan adsorben teraktivasi baik pada ketinggian 10 cm dan 15 cm persentase efisiensi removal terlihat berada diatas 96% hingga waktu kontak 120 menit yang menunjukkan bahwa proses aktivasi dengan asam sitrat pada adsorben dapat menambahkan gugus fungsi aktif pada permukaan adosorben dan meningkatkan polaritas adsorben yang menyebabkan daya tarik terhadap ion Cd menjadi lebih kuat (Liu et al., 2022). Sedangkan, pada adsorben non aktivasi dengan tinggi 10 cm, efisiensi removal menurun cukup signifikan setelah 45 menit yang dimana menandakan bahwa kapasitas adsorpsi pada adsorben telah menurun dikarenakan jumlah adsorben lebih sedikit. Hal tersebut menunjukkan bahwa selain faktor aktivasi, ketinggian adsorben pada kolom juga berperan penting

pada proses adsorpsi dikarenakan ketinggian adsorben berbanding lurus dengan jumlah adsorben dan waktu kontak antara adsorben dengan adsorbat.

4.2.3 Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*)

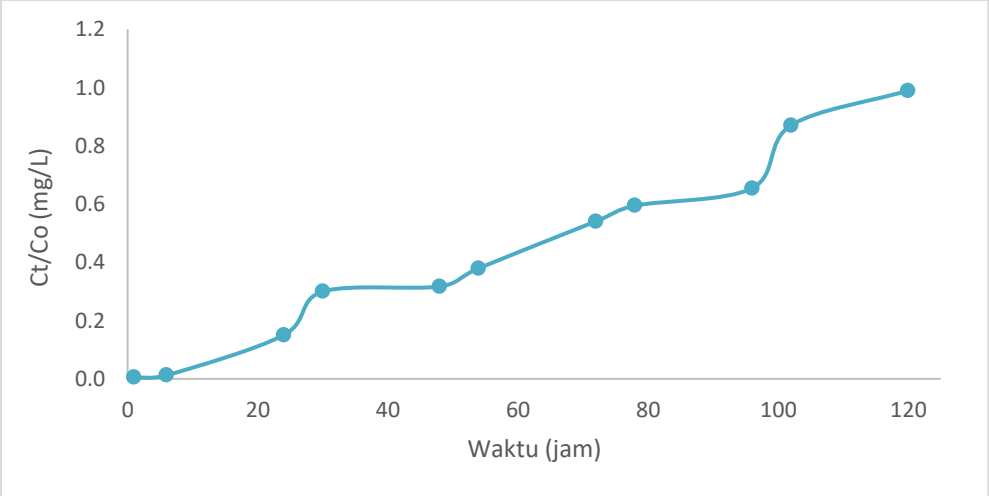
Kurva terobosan (*Breakthrough Curve*) merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara rasio konsentrasi akhir (Ct) dan konsentrasi awal (Co) dengan waktu sehingga dapat diketahui kinerja dari kolom adsospi yang digunakan. Pada penelitian ini, pengujian kurva terobosan menggunakan kondisi optimum yang telah didapatkan sebelumnya pada pengujian variasi debit dan variasi ketinggian adsorben, yaitu debit atau laju alir 5 ml/menit menggunakan adsoben teraktivasi asam sitrat dengan ketinggian adsorben 15 cm. Larutan kadmium dialirkan ke dalam kolom menggunakan pompa peristaltik selama 120 jam (5 hari), dan sampel diambil setiao 6-18 jam sekali dengan total pengambilan sebanyak 11 kali sesuai jam kerja laboratorium. Sampel yang terlah terkumpul akan dianalisis konsentrasinya menggunakan instrumen *Atomic Adsorption Spectrofotometer* (AAS), dan hasil pembacaan AAS akan diolah datanya untuk mengetahui waktu adsorben mencapai kondisi jenuh. Hasil perhitungan untuk kurva terobosan (*Breakthrough Curve*) dapat dilihat pada tabel 4.10 sebagai berikut.

Tabel 4.10 Data Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*)

Waktu Pengambilan ke (jam)	Debit (mL/ menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)	Ct/Co
1	5	15	7	22,26	0,1	21,9	100	0,004
6	5	15	7	22,26	0,27	21,73	98,8	0,012
24	5	15	7	22,26	3,3	18,7	85,0	0,150
30	5	15	7	22,26	6,58	15,42	70,1	0,299
48	5	15	7	22,26	6,97	15,03	68,3	0,316
54	5	15	7	22,26	8,35	13,65	62,0	0,379
72	5	15	7	22,26	11,88	10,12	46,0	0,54
78	5	15	7	22,26	13,07	8,93	40,6	0,594
96	5	15	7	22,26	14,38	7,62	34,6	0,653
102	5	15	7	22,26	19,13	2,87	13,0	0,869
120	5	15	7	22,26	21,75	0,25	1,1	0,988

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil data pengujian yang telah didapatkan maka kemudian dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik untuk melihat hubungan antara Ct/Co dengan waktu adsorpsi yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 sebagai berikut.



Gambar 4.6 Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*)

Berdasarkan breakthorugh curve, diketahui bahwa titik *breakthrough* pada penelitian ini yaitu terjadi pada waktu ke-54 jam. Dimana, ditandai dengan naiknya rasio konsentrasi effluent dengan konsentrasi influent secara signifikan. Sedangkan, titik *exhaust* terjadi pada waktu ke-120 jam yang menunjukkan bahwa rasio antara effluent dan influent hampir sama yang menunjukkan bahwa kolom sudah jenuh dan adsorben tidak dapat lagi untuk menyerap adsorbat. Selain itu, apabila dilihat dari Gambar 4.4 kurva breakthrough menunjukkan bahwa nilai C_t/C_o terus mengalami kenaikan hingga mendekati 1. Hal tersebut berbanding lurus dengan semakin lama waktu kontak kemampuan adaorben dalam menangkap ion Cd semakin menurun, dan tidak terdapat lagi penurunan yang signifikan pada konentrasi effluen. Sehingga dari data yang telah didapatkan dapat disimpulkan bahwa kinerja kolom yang optimal terjadi sebelum waktu breakhthrough, sedangkan pada ssat titik jenuh tercapai kolom sudah tidak efektif lagi untuk digunakan lebih lanjut dalam proses adsorpsi ion Cd, dan diperlukannya penggantian adsorben untuk proses selanjutnya.

4.3 Model Kinetika Sistem Adsorpsi Kolom

Model kinetika pada sistem adsorpsi kolom digunakan untuk mengetahui kinerja sistem adsorpsi, kapasitas adsorpsi, dan konstanta laju adsorpsi dalam suatu sistem aliran kontinu (*fixed-bed column*). Sehingga, pada penelitian ini terdapat tiga model kinetika yang digunakan untuk menganalisis kinetika sistem adsorpsi yang terjadi yaitu Model Thomas, Yoon-Nelson, dan Adam-Bohart. Berikut merupakan uraian dari masing-masing model kinetika yang digunakan.

4.3.1 Model Thomas

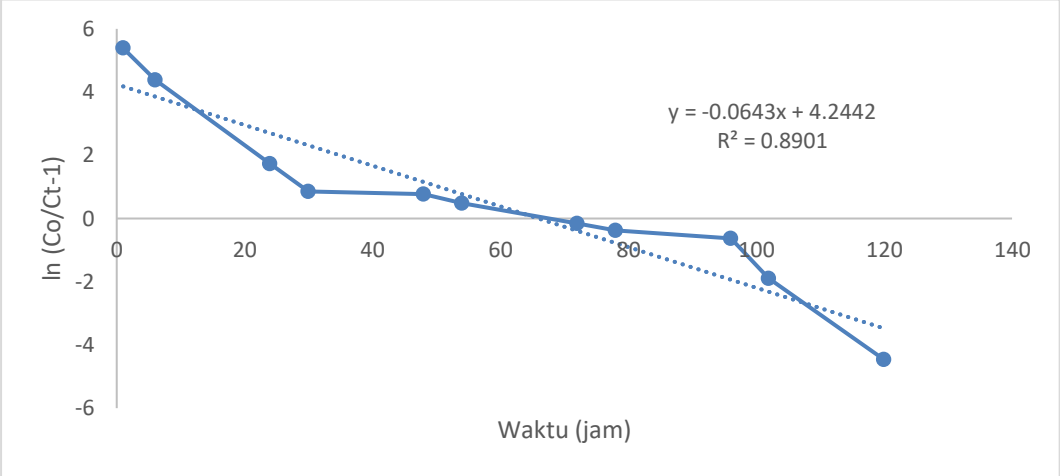
Model Thomas merupakan model kinetik yang didasarkan pada asumsi bahwa proses adsorpsi mengikuti kinetika adsorpsi orde satu terhadap konsentrerasi adsorbat yang belum teradosorpsi dan aliran plug flow (tidak terjadi dispersi aksial) dalam kolom. Selain itu, model ini juga mengamsusikan bahwa laju perpindahan massa ditentukan oleh kinetika reaksi (Harripersadth & Musonge, 2022). Hasil perhitungan dari Model Thomas dapat dilihat pada Tabel 4.11 sebagai berikut.

Tabel 4.11 Data Perhitungan Model Thomas

Waktu Pengambilan ke (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)	Ct/Co	ln (Co/Ct-1)
1	5	15	7	22,26	0,1	21,9	100	0,005	5,389
6	5	15	7	22,26	0,27	21,73	98,8	0,012	4,388
24	5	15	7	22,26	3,3	18,7	85	0,150	1,735
30	5	15	7	22,26	6,58	15,42	70,1	0,299	0,851
48	5	15	7	22,26	6,97	15,03	68,3	0,317	0,768
54	5	15	7	22,26	8,35	13,65	62,0	0,380	0,491
72	5	15	7	22,26	11,88	10,12	46,0	0,54	-0,160
78	5	15	7	22,26	13,07	8,93	40,6	0,594	-0,381
96	5	15	7	22,26	14,38	7,62	34,6	0,654	-0,635
102	5	15	7	22,26	19,13	2,87	13,0	0,870	-1,897
120	5	15	7	22,26	21,75	0,25	1,1	0,989	-4,466

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil data perhitungan yang telah didapatkan, maka kemudian dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik untuk melihat hubungan antara ln (Co/Ct-1) dengan waktu (t) adsorpsi yang dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai berikut.



Gambar 4.7 Kurva Linier Model Thomas

Berdasarkan grafik tersebut, diperoleh hasil regresi berupa persamaan linear (y = -0,0643x + 4,2442) yang digunakan untuk membantu dalam menentukan kapasitas adsorpsi (q_0) dan konstanta laju adsorpsi Thomas (K_{Th}). Dimana, Slope (y = -0,0643x) digunakan untuk menentukan nilai K_{Th} , dan intersep (4,2442) digunakan untuk menentukan q_0 . Untuk mengetahui Konstanta laju adsorpsi, dan kapasitas adsorpsi dalam model Thomas digunakannya rumus yang terdapat pada Persamaan 3.3 dengan hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.13 sebagai berikut.

Tabel 4.12 Data Konstanta Laju, dan Kapasitas Adsorpsi Model Thomas

C_0 (mg/L)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Jumlah Adsorben (gr)	Konstanta Laju Adsorpsi (K_{Th}) (L/mg.menit)	Kapasitas Adsorpsi (q_0) (mg/g)	R2
22.26	5	15	6,1	0,002	1,190	0,890

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh konstanta laju adsorpsi Thomas (K_{Th}) yang diperoleh pada penelitian ini sebesar 0,002 L/mg.menit. Nilai ini menggambarkan kecepatan perpindahan ion Cd menuju permukaan adsorben yang memiliki ketinggian 15 cm relatif lambat selama proses adsorpsi. Nilai K_{Th} yang relatif kecil dipengaruhi oleh ketinggian massa adsorben yang menyebabkan jalur difusi menjadi lebih panjang, dan menyebabkan peningkatan resistansi difusi internal (intrapartikel) selama proses adsorpsi (Marrane et al., 2023). Sedangkan, kapasitas adsorpsi (q_0) yang diperoleh yaitu sebesar 1,190 mg/g, yang menunjukkan bahwa satu gram adsorben mampu mengadsorpsi sekitar 1,19 mg ion Cd dari larutan. Nilai tersebut mempresentasikan daya tampung maksimum adsorben terhadap zat terlarut pada kondisi yang diuji yaitu dengan debit optimum 5 mL/menit. Selain itu, untuk nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh pada penelitian ini yaitu sebesar 0,890. Nilai ini menunjukkan bahwa model Thomas memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mempresentasikan hubungan antara waktu dan perubahan konsentrasi larutan, meskipun nilai yang didapat masih berada sedikit dibawah batas standar umum ($R^2 > 0,9$) yang sering digunakan sebagai indikator kecocokan model. Namun, hasil ini masih dapat dijadikan sebagai dasar untuk mengevalausi kinerja sistem adsorpsi dalam kolom. Hal ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2024), yang menggunakan model Thomas untuk menganalisis kinetika adsorpsi Pb(II) dalam sistem kolom berisi adsorben berupa hidrogel komposit. Dalam penelitian tersebut nilai koefisien determinasi (R^2) dari model Thomas berada dalam rentang 0,800 hingga 0,924. Variasi nilai R^2tersebut diperngaruhi oleh perbedaan kondisi dalam pengoperasian, seperti laju alir, arah aliran, konsenterasi awal larutan, dan ketinggian adsorben dalam kolom. Oleh karena itu, nilai (R^2) sebesar 0,8901 yang diperoleh pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang sesuai dan dapat diterima untuk menunjukkan kecocokan dengan model Thomas, dan menggambarkan kinetika adsorpsi yang terjadi pada kolom.

4.3.2 Model Yoon-Nelson

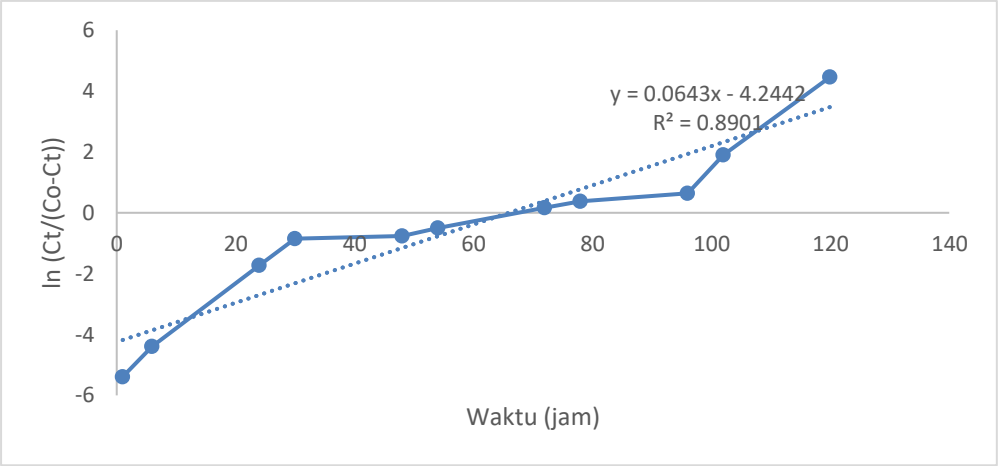
Model Yoon-Nelson merupakan model yang didasarkan pada asumsi bahwa semakin lama proses berlangsung, maka kemungkinan suatu molekul adsorbat yang tejerap oleh adsorben akan semakin kecil, hal ini sebanding dengan kemungkinan molekul adsorbat tersebut akan keluar dari kolom dan mengalami kondisi breakthorugh (Harripersadth & Musonge, 2022). Hasil perhitungan dari Model Yoon-Nelson dapat dilihat pada Tabel 4.13 sebagai berikut.

Tabel 4.13 Data Perhitungan Model Yoon-Nelson

Waktu Pengambilan ke (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)	Ct/Co	ln (Ct/(Co-Ct))
1	5	15	7	22,26	0,1	21,9	100	0,005	-5,389
6	5	15	7	22,26	0,27	21,73	98,8	0,012	-4,388
24	5	15	7	22,26	3,3	18,7	85	0,150	-1,735
30	5	15	7	22,26	6,58	15,41	70,1	0,299	-0,851
48	5	15	7	22,26	6,97	15,03	68,3	0,317	-0,768
54	5	15	7	22,26	8,35	13,65	62,0	0,380	-0,491
72	5	15	7	22,26	11,88	10,12	46,0	0,540	0,160
78	5	15	7	22,26	13,07	8,93	40,6	0,594	0,381
96	5	15	7	22,26	14,38	7,62	34,6	0,654	0,635
102	5	15	7	22,26	19,13	2,87	13,0	0,870	1,897
120	5	15	7	22,26	21,75	0,25	1,1	0,989	4,466

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil data perhitungan yang telah didapatkan, maka kemudian dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik untuk melihat hubungan antara ln (Ct/(Co-Ct)) dengan waktu (t) adsorpsi yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.8 Kurva Linier Model Yoon-Nelson

Berdasarkan grafik tersebut, diperoleh hasil regresi berupa persamaan linear (y = 0,0643x - 4,2442) yang digunakan untuk membantu dalam menentukan kapasitas adsorpsi (q_0) dan konstanta laju adsorpsi Thomas (K_{YN}). Dimana, Slope (y = 0,0643x) digunakan untuk menentukan nilai K_{Th}, dan mengetahui waktu mencapai 50% breakthorugh (τ), serta intersep (-4,2442) digunakan untuk menentukan q_0. Untuk mengetahui Konstanta laju adsorpsi, waktu 50% breakthorugh, dan kapasitas adsorpsi dalam model Yoon-Nelson digunakannya rumus yang terdapat pada Persamaan 3.4, dan Persamaan 3.5, dengan hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.14 sebagai berikut.

Tabel 4.14 Data Konstanta Laju, dan Kapasitas Adsorpsi Model Yoon-Nelson

Co (mg/L)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Jumlah Adsorben (gr)	Konstanta Laju Adsorpsi (K_{YN}) ($menit^{-1}$)	Waktu 50% Breakthorugh (τ) (menit)	Kapasitas Adsorpsi (q_0) (mg/g)	R2
22	5	15	6,1	0,001	3960,37	0,071	0,890

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh konstanta laju adsorpsi Yoon-Nelson (K_{YN}) yang diperoleh pada penelitian ini sebesar 0,001 $menit^{-1}$. Nilai ini menggambarkan kecepatan perpindahan ion Cd menuju permukaan adsorben yang memiliki ketinggian 15 cm relatif lambat selama proses adsorpsi untuk mencapai titik 50% breakthorugh (τ). Hasil ini

didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Gizaw et al. (2022), yang menunjukkan nilai K_{YN} semakin rendah seiring meningkatnya ketinggian adsorben yang digunakan. Dimana, semakin tinggi ketinggian adsorben maka akan semakin banyak situf aktif yang tersedia dan adsorbat harus menempuh jalur difusi yang lebih panjang untuk mencapai situs aktif tersebut dalam pori-pori adsorben, dan waktu untuk memcapai 50% breakthorugh semakin panjang dikarenakan proses adsorpsi berjalan lambat akibat meningkatnya difusi intrapartikel. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 50% breakthorugh (τ) yang diperoleh yaitu sebesar 3960,37 menit atau setara dengan 66 jam setelah proses adsorpsi berlangsung. Hasil perhitungan ini mendekati hasil yang diperoleh dari kurva breakthrough dimana kondisi setengah jenuh tercapai pada waktu sekitar 72 jam setelah proses adsorpsi berlangsung. Pada model Yoon-Nelson, hasil perhitungan τ tidak selalu sama dengan kondisi setengah jenuh pada kurva breakthrough hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya. Hal ini disebabkan karena model ini bersifat empiris dan tidak mempertimbangkan faktor-faktor penting seperti panjang kolom, karakteristik adsorben, dan laju alir. Sehingga mengakibatkan kemungkinan waktu 50% jenuh pada model ini dapat lebih cepat atau lebih lambat dibandingkan dengan kurva breakthrough hasil pengujian yang telah dilakukan (Hu et al., 2025). Sedangkan, kapasitas adsorpsi (q_0) sebesar 0,071 mg/g, yang menunjukkan bahwa satu gram adsorben mampu mengadsorpsi sekitar 0,071 mg ion Cd dari larutan. Nilai tersebut mempresentasikan daya tampung maksimum adsorben terhadap zat terlarut pada kondisi yang diuji yaitu dengan debit optimum 5 mL/menit. Selain itu, nilai koefisien determinasi (R^2) yang didapatkan pada penelitian ini yaitu sebesar 0,890. Nilai ini menunjukkan bahwa model Yoon-Nelson memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mempresentasikan hubungan antara waktu dan perubahan konsentrasi larutan. Nilai R^2 yang dihasilkan pada model ini memiliki kesamaan dengan model Thomas. Dimana, kesamaan ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Wang et al. (2024), yang menggunakan model Yoon Nelson untuk menganalisis kinetika adsorpsi Pb(II) dalam sistem kolom berisi adsorben berupa hidrogel komposit. Dalam

penelitian tersebut nilai koefisien determinasi (R^2) dari model Yoon-Nelson memiliki kesamaan dengan model Thomas yaitu berada dalam rentang 0,800 hingga 0,924 yang terjadi pada berbagai variasi kondisi operasi seperti laju alir, arah aliran, konsenterasi awal larutan, dan ketinggian adsorben dalam kolom. Kesamaan nilai R^2 ini dapat terjadi dikarenakan data yang digunakan untuk kedua model cenderung identik yaitu berupa hubungan antara waktu dan konsenterasi effluen (Ct) sehingga hasil regresi yang dihasilkan dari kedua model ini sering kali memberikan nilai R^2 yang mendekati atau bahkan identik, dan kedua model tersebut berbasis kinetika adsorpsi orde satu (Fernandez et al., 2023). Dengan demikian, model Yoon-Nelson juga menunjukkan kecocokan untuk menggambarkan kinetika kolom adsorpsi yang terjadi.

4.3.3 Model Adam-Bohart

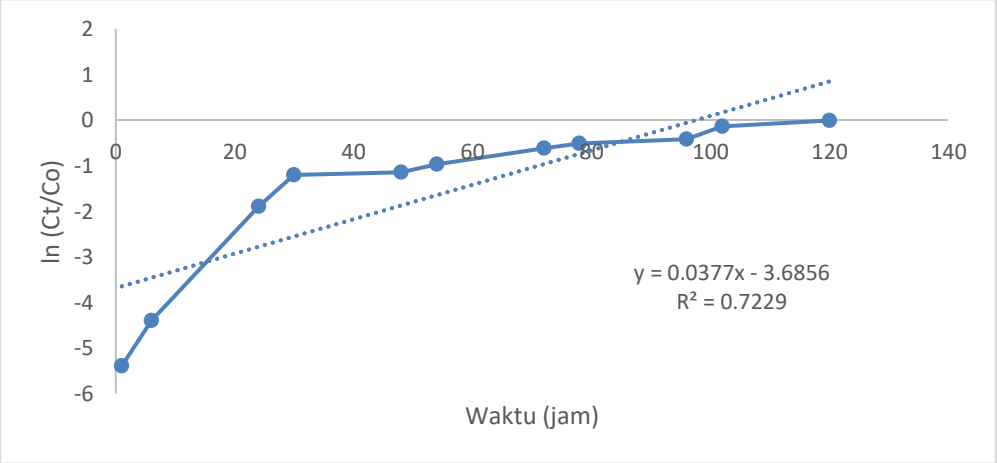
Model Adam-Bohart merupakan model yang didasarkan pada asumsi bahwa laju adsorpsi pada awal proses dipengaruhi oleh konsentrasi awal adsorbat dan jumlah situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben (Nwabanne et al., 2022). Dimana, dengan berjalannya waktu kontak maka situs aktif yang tersedia pada permukaan adsorben tersebut akan mengalami kejenuhan dan membuat efektivitas model ini juga mengalami penurunan. Oleh karena itu model Adam-Bohart cocok digunakan untuk memperkirakan dinamika adsorpsi sebelum sistem mencapai titik jenuh dalam kolom adsorpsi. Selain itu, model ini dapat memprediksi hubungan liniar antara tinggi adsorben dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai waktu breakthorugh (Mekonnen et al., 2021). Hasil perhitungan dari Model Adam-Bohart dapat dilihat pada Tabel 4.15 sebagai berikut.

Tabel 4.15 Data Perhitungan Model Adam-Bohart

Waktu Pengambilan ke (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	pH	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal (%)	Ct/Co	ln (Ct/Co)
1	5	15	7	22,26	0,1	21,9	100	0,005	-5,394
6	5	15	7	22,26	0,27	21,73	98,8	0,012	-4,400
24	5	15	7	22,26	3,3	18,7	85	0,150	-1,897
30	5	15	7	22,26	6,58	15,41	70,1	0,299	-1,206
48	5	15	7	22,26	6,97	15,03	68,3	0,317	-1,149
54	5	15	7	22,26	8,35	13,65	62,0	0,380	-0,969
72	5	15	7	22,26	11,88	10,12	46,0	0,540	-0,616
78	5	15	7	22,26	13,07	8,93	40,6	0,594	-0,521
96	5	15	7	22,26	14,38	7,62	34,6	0,654	-0,425
102	5	15	7	22,26	19,13	2,87	13,0	0,870	-0,140
120	5	15	7	2226	21,75	0,25	1,1	0,989	-0,011

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil data perhitungan yang telah didapatkan, maka kemudian dilakukan *plotting* data dalam bentuk grafik untuk melihat hubungan antara ln (Ct/Co) dengan waktu (t) adsorpsi yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 sebagai berikut.



Gambar 4.9 Kurva Linier Model Adam-Bohart

Berdasarkan grafik tersebut, diperoleh hasil regresi berupa persamaan linear (y = 0,0377x – 3,6856) yang digunakan untuk membantu dalam menentukan kapasitas adsorpsi (N_0) dan konstanta laju adsorpsi Adam-

Bohart (K_{AB}). Dimana, Slope (y = 0,0377x) digunakan untuk menentukan nilai K_{AB}, serta intersep (-3,6856) digunakan untuk menentukan N_0. Untuk mengetahui Konstanta laju adsorpsi, dan kapasitas adsorpsi dalam model Adam-Bohart digunakannya rumus yang terdapat pada Persamaan 3.6, dengan hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.16 sebagai berikut.

Tabel 4.16 Data Konstanta Laju, dan Kapasitas Adsorpsi Model Adam-Bohart

Co (mg/L)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Jumlah Adsorben (gr)	Konstanta Laju Adsorpsi (K_{AB}) (L/mg.menit))	Kapasitas Adsorpsi (N_0) (mg/L)	R2
22	5	15	6,1	0,001	188,662	0,723

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai konstanta laju adsorpsi Adam-Bohart (K_{AB}) yang diperoleh pada penelitian ini sebesar 0,001 L/mg.menit. Nilai ini menggambarkan bahwa kecepatan perpindahan ion Cd menuju permukaan adsorben yang memiliki ketinggian 15 cm relatif lambat selama proses adsorpsi. Hasil ini didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Omitola et al. (2022) , yang menghasilkan nilai K_{AB} semakin menurun ketika ketinggian adsorben yang digunakan semakin meningkat. Selain itu, dalam penelitian tersebut juga menjelaskan bahwa dalam model ini laju awal proses adsorpsi sangat bergantung pada seberapa banyak kapasitas yang masih tersedia pada adsorben dan seberapa tinggi konsentrasi adsrobat. Sehingga, model ini mengasumsikan apabila nilai K_{AB} kecil maka hal tersebut dapat disebabkan karena ketinggian adsroben yang digunakan, dan kapasitas adsorben sudah mulai terbatas sejak awal proses adsorpsi. Sedangkan, kapasitas adsorpsi (N_0) yang diperoleh yaitu sebesar 188,662 mg/L, yang menunjukkan bahwa setiap liter volume kolom yang diisi dengan adsorben ampas tebu teraktivasi dengan ketinggian 15 cm dapat menyerap 188,662 mg ion Cd dari larutan sebelum mencapai titik jenuh, dan efisiensi adsorpsi dalam sistem kontinu yang diuji dengan debit optimum 5 mL/menit. Selain itu, untuk nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh pada penelitian ini yaitu sebesar 0,723. Jika dibandingkan dengan nilai R^2 pada

model Thomas dan Yoon-Nelson, nilai R^2 pada model Adam-Bohart ini memiliki nilai yang lebih rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa model Adam-Bohart memiliki tingkat kesesuaian yang tergolong rendah untuk mempresentasikan kinetika adsorpsi pada kolom secara menyeluruh. Hal ini didukung dengan penelitian yang dilakukan oleh Fernandez et al. (2023), yang menggunakan model Adam-Bohart untuk menganalisis kinetika adsrospi logam berat timbal (Pb^{2+}) menggunakan adsorben komposit berbasis karbon aktif dari tempurung kelapa dan poliuretan. Dalam penelitian tersebut nilai koefisien determinasi (R^2) dari model Adam-Bohart memiliki nilai paling rendah dibandingkan model Thomas dan Yoon-Nelson yaitu berada di rentang 0,562 hingga 0,816 tergantung kondisi operasional seperti laju alir, ketinggian massa adsorben, pH, dan kosentrasi larutan. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan meskipun pada model ini mempresentasikan hubungan antara waktu dan perubahan konsentrasi larutan dalam proses adsorpsi yang berlangsung secara kontinu, akan tetapi model ini dikembangkan hanya untuk mempresentasikan awal proses adsorpsi, sehingga tidak dapat mempresentasikan kurva breakthrough secara keseluruhan. Selain itu, model ini juga mengasumsikan bahwa proses adsrospi belum mencapai kesetimbangan sehingga model ini tidak mempertimbangkan fase jenuh dan laju perpindahan massa secara menyeluruh. Oleh karena itu, nilai (R^2) sebesar 0,723 yang diperoleh pada penelitian ini dapat dikatakan kurang akurat apabila digunakan untuk menggambarkan keseluruhan proses adsorpsi yang terjadi pada kolom.

4.3.4 Perbandingan Model Kinetika Adsorpsi

Untuk menentukan model kinetika yang paling tepat dalam mempresentasikan proses adsorpsi logam Cd pada kolom. Maka, dilakukan evaluasi terhadap tiga model kinetika meliputi Model Thomas, Yoon-Nelson, dan Adam-Bohart. Parameter kinetika yang dihasilkan dari masing-masing model meliputi nilai konstanta laju adsorpsi, kapasitas adsorpsi, waktu jenuh 50% untuk model Yoon-Nelson, serta nilai koefisien determinasi (R^2) yang digunakan sebagai indikator tingkat kesesuaian model dengan hasil data

pengujian. Hasil dari tiga model yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.17 sebagai berikut.

Tabel 4.17 Perbandingan Hasil Pemodelan Kinetika Adsorpsi

No	Model	Parameter	Nilai	Satuan
1	Model Thomas	Konstanta Laju Adsorpsi (K_{TH})	0,002	L/mg.menit
		Kapasitas Adsorpsi (q_0)	1,190	mg/g
		R^2	0,890	-
2	Model Yoon-Nelson	Konstanta Laju Adsorpsi (K_{YN})	0,001	$menit^{-1}$
		Waktu 50% Breakthorugh (τ)	3960,37	menit
		Kapasitas Adsorpsi (q_{YN})	0,071	mg/g
		R^2	0,890	-
3	Model Adam-Bohart	Konstanta Laju Adsorpsi (K_{AB})	0,001	L/mg.menit
		Kapasitas Adsorpsi (N_0)	188,662	mg/L
		R^2	0,723	-

Sumber: Data Primer, 2025

Berdasarkan data pada Tabel 4.17, diketahui bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi diperoleh pada model Thomas, dan Yoon-Nelson yaitu sebesar 0,890. Nilai ini menunjukkan bahwa kedua model tersebut memiliki kesesuaian yang cukup baik terhadap data pengujian, dan mampu mempresentasikan perilaku adsropsi ion logam Cd dalam sistem kolom secara umum. Nilai kapasitas adsorpsi pada model Thomas yaitu sebesar 1,190 mg/g dengan nilai laju konstanta adsorpsi sebesar 0,002 mL/mg·menit, sedangkan nilai kapasitas adsorpsi pada model Yoon-Nelson yaitu sebesar 0,071 mg/g dengan nilai laju konstanta adsorpsi sebesar 0,001 $menit^{-1}$. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan massa berlangsung secara lambat. Sehingga, nilai waktu setengah jenuh (τ) yang dihasilkan pada model Yoon-Nelson yaitu sebesar 3960,37 menit atau 66 jam yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara bertahap dan perlahan.

Sementara itu, model Adam-Bohart menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang lebih rendah yaitu sebesar 0,723. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model ini kurang mampu dalam mempresentasikan keseluruhan proses adsorpsi dalam penelitian ini secara akurat. Nilai konstanta laju adsorpsi yang diperoleh pada model ini sebesar 0,001 mL/mg.menit menunjukkan bahwa perpindahan massa berlangsung secara lambat,

sedangkan kapasitas adsorpsi sebsar 188,662 mg/L yang menunjukkan bahwa adsorben masih mampu menangkap ion Cd sebelum kondisi jenuh. Sehingga, model ini tetap memberikan gambaran mengenai kemampuan awal adsorben dalam menangkap ion Cd dalam larutan terutama pada fase awal kontak antara larutan dengan adsorben atau tahap awal proses adsorpsi.

Berdasarkan pada Tabel 4.17 dapat dilihat bahwa nilai konstanta laju adsorpsi yang diperoleh pada ketiga model tersebut relatif rendah, hal tersebut menunjukkan bahwa ion Cd tidak secara langsung tertahan seluruhnya dibagian awal kolom melainkan diserap perlahan sepanjang media adsroben. Dalam sistem adsorpsi kolom, perpindahan zat ke dalam pori-pori adsroben memang cenderung berlangsung secara lambat yang disebabkan karena terdapatnya peningkatan difusi intrapartikel yang terjadi akibat pengaruh dari ketinggian adsorben yang digunakan selama proses adsrospi pada kolom. Sehingga dapat disimpulkan bahwa model Thomas dan Yoon-Nelson lebih unggul dalam menggambarkan karakteristik awal adsorpsi dan menunjukkan hubungan yang kuat antara waktu kontak dan efisiensi adsorpsi, terutama pada kondisi debit rendah dan ketinggian adsroben yang digunakan. Hal ini menjadikan model Thomas, dan Yoon-Nelson sebagai pendekatan yang paling representatif untuk sistem adsorpsi logam Cd dalam penelitian ini.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang terlah dilakukan mengenai adsorben berbasis ampas tebu untuk menurunkan kadar logam berat kadmium (Cd) pada air limbah menggunakan metode adsorpsi kontinu, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakterisasi adsorben ampas tebu menggunakan FTIR dan SEM menunjukkan bahwa proses aktivasi menggunakan asam sitrat berhasil memodifikasi struktur kimia dan morfologi adsorben. Pada hasil FTIR menunjukkan gugus fungsi aktif seperti -OH, -COO-, C=O, C-H, C-N, dan C-O-C yang berperan dalam proses adsorpsi. Proses aktivasi menyebabkan pergeseran frekuensi gelombang, dan penurunan persen transmittan yang menunjukkan peningkatan jumlah gugus aktif pada permukaan adsorben. Sementara itu, hasil SEM menunjukkan bahwa aktivasi menghasilkan permukaan adsorben yang lebih halus, bersih, dan memiliki jumlah pori yang lebih banyak dan seragam dibandingkan adsorben tanpa aktivasi. Perubahan struktur permukaan ini meningkatkan porositas dan luas permukaan spesifik adsorben, sehingga memperbesar kemampuan adsorpsi terhadap ion logam.
2. Variasi debit atau laju alir, dan ketinggian massa adsorben mempengaruhi efisiensi adsropsi, dengan kondisi optimum terjadi pada debit atau laju alir 5 ml/menit, dan ketinggian massa adsorben 15 cm dalam waktu kontak selama 2 jam. Hal ini menunjukkan bahwa debit atau laju alir lambat dengan ketinggian massa adsroben memberikan pengaruh terhadap efisiensi adsropsi pada kolom kontinu dikarenakan dapat memeprpanjang waktu interaksi antara adsorben dengan adsorbat.
3. Adsorben ampas tebu teraktivasi asam sitrat menunjukkan efisiensi adsorpsi paling tinggi terhadap logam berat Kadmium (Cd) dalam air limbah dengan efisiensi sebesar 99,6% dengan penurunan konsentrasi Cd dari 22,26 mg/L menjadi 0,1 mg/L setelah proses adsropsi. Kapasitas

adsorpsi pada kolom sebesar 1,190 mg/g berdasarkan model Thomas, 0,071 mg/g berdasarkan model Yoon-Nelson, dan 188,66 mg/L berdasarkan model Adam-Bohart. Akan tetapi, proses adsorpsi kolom lebih sesuai dengan model kinetika adsorpsi dari model Thomas, dan Yoon-Nelson karena menghasilkan nilai R^2 sebesar 0,890 yang mampu mempresentasikan perilaku adsropsi ion logam Cd dalam sistem kolom secara keseluruhan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yaitu sebagai berikut:

1. Diperlukannya pengujian adsorpsi menggunakan air limbah asli dengan kapasitas pengolahan yang lebih besar untuk dapat mengetahui efektivitas adsorben terhadap polutan yang lebih kompleks, dan hasil yang diperoleh dapat menunjukkan kondisi yang sebenarnya sehingga teknologi ini dapat diterapkan secara nyata dalam pengolahan limbah.
2. Diperlukannya kajian lebih lanjut mengenai strategi regenerasi dan penggunaan ulang adsorben setelah proses adsorpsi, agar adsorben dapat digunakan kembali tanpa kehilangan efisiensi. Dengan demikian, metode ini dapat menjadi lebih ekonomis dan berkelanjutan dalam pengolahan limbah cair yang mengandung kadmium.
3. Pada saat melakukan proses aktivasi diperlukannya pemeriksaan secara berkala terkait kondisi adsorben, dan pergantian air bilas yang digunakan agar tidak menimbulkan kerusakan adsorben seperti munculnya jamur dan bau.

DAFTAR PUSTAKA

Afifah, A. Z. (2023). *Efektivitas Penurunan Kandungan Logam Cu dalam Larutan menggunakan Adsorben Ampas Tebu (Saccharum Officinarum)* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).

Ahdiyati, W. N. (2020). Modifikasi Eceng Gondok Menggunakan Asam Sitrat Sebagai Adsorben Limbah Logam Cr dan Cd Pada Limbah Cair Laboratorium Kimia (Vol. 21, Issue 1).

Aisyah, N. (2012). Pembuatan dan Karakterisasi Kitosan-Urea dengan Penambahan Asam Kloroasetat dan Glutaraldehid sebagai Adsorben Ion Logam Cu2+ melalui Teknik Adsorpsi Fluidisasi. Universitas Airlangga.

Amalia, R., Pindona, Z., Rusdiana, N., & Pratiwi, D. (2023). Analysis of Calcium, Iron, Ash, Fat, and Water Content in Fresh and Processed Cow's Milk Using Atomic Absorption Spectrophotometry Methods. *Journal of Fundamental and Applied Pharmaceutical Science*, *4*(1), 8-14.

Angraini, N., Tuty, E. A., Fitri, H. (2022). Pengaruh Ph dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium dengan Metode Adsorpsi untuk Penuruanan Kadar Logam Beray Pb, Cu, dan Cd. *Jurnal Ilmu Lingkungan.*

Annisa, N., Muhammad, M., Masrullita, M., Zulnazri, Z., & Dewi, R. (2023). Pemanfaatan Limbah Ampas Tebu sebagai Adsorben Penyerapan Logam dan Kesadahan pada Air Sumur. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, *3*(1), 139-150.

Apaydın Varol, E., & Mutlu, Ü. (2023). TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behavior of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies*, *16*(9), 3674.

Bhernama, B. G., Saputra, S. A., & Amalia, J. (2023). Karakterisasi Selulosa dan Selulosa Asetat dari Limbah Cangkang Biji Pala (Myristica Fragransi) Aceh Selatan. *Jurnal Riset Kimia*, *14*(1), 81-93.

Chintokoma, G. C., Chebude, Y., Kassahun, S. K., Demesa, A. G., & Koiranen, T. (2024). Enhanced cadmium (Cd2+) removal from wastewater using integrated inclined plate settler and composite adsorbent coating. *Applied Water Science*, *14*(10), 225.

Costa, M. D. (2019). Studi Penurunan Kadar Logam Kromium (Cr) dalam Limbah Buatan Elektroplating Menggunakan Metode Presipitasi dan Adsorpsi. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Diana. (2023). Identifikasi Jumlah Rumpun Tebu dan Jumlah Pohon Sawit melalui Citra Udara Menggunakan Metode Adaptive Thresholding dan Ekstraksi Kontur. Universitas Lampung.

Dermawan, D., Satriavi, A. D., Nurhidayati, D. I., Firnandi, R., Mayangsari, N. E., Ramadani, T. A., Widiana, D. R., Juniani, A. I., mujiyanti, D. R., Wang, Y. F. (2025). *Composite adsorbent from sugarcane (Saccharum officinarum) bagasse biochar generated from atmospheric pressure microwave plasma pyrolysis process and nano zero valent iron (nZVI) for rapid and highly efficient Cr (VI) adsorpti*on. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Volume 11.

Fadhila, D., & Purwanti, I. F. (2022). Kajian Fitoremediasi pada Air Tanah Tercemar Timbal dan Kadmium di Sekitar TPA Wukirsari,

Gunungkidul. *Jurnal Teknik ITS*, *11*(2), D34-D40.
Fitrianah, L., & Purnama, A. R. (2021). Pola sebaran spasial logam berat kadmium di sungai kawasan industri Berbek Kabupaten Sidoarjo. *Journal of Research and Technology*, *7*(1), 41-50.
Futalan, C. C., Diana, E., Edang, M. F. A., Padilla, J. M., Cenia, M. C., & Alfeche, D. M. (2023). Adsorption of lead from aqueous solution using activated carbon derived from rice husk modified with lemon juice. *Sustainability*, *15*(22), 15955.
Fernandez, R. M. D., Estrada, R. J. R., Tomon, T. R. B., Dingcong Jr, R. G., Amparado Jr, R. F., Capangpangan, R. Y., ... & Lubguban, A. A. (2023). Experimental design and breakthrough curve modeling of fixed-bed columns utilizing a novel 3D coconut-based polyurethane-activated carbon composite adsorbent for lead sequestration. *Sustainability*, *15*(19), 14344.
Giraldo, J. F. R., Marin, J. E. G. (2025). Application of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) for protozoan analysis: A systematic review. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy, Vol. 51.
Gizaw, A., Zewge, F., Chebude, Y., Tesfaye, M., & Mekonnen, A. (2022). A fixed-bed column study of solid waste-based calcium silicate hydrate for the phosphate removal. *AQUA—Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, *71*(7), 849-861.
Handy, F. W., Juwana, K. R., & Puspitawati, I. N. (2024). Penurunan Kadar COD dan BOD Pada Limbah Cair PT Candi Jaya Amerta Menggunakan Adsorben dari Abu Layang (Fly Ash) dengan Proses Adsorpsi Secara Kolom. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, *10*(1), 24-30.
Harripersadth, C., & Musonge, P. (2022). The dynamic behaviour of a binary adsorbent in a fixed bed column for the removal of Pb2+ ions from contaminated water bodies. *Sustainability*, *14*(13), 7662.
Hartanto, D. A., Yuwita, P. E., & Faila, R. N. (2024). KARAKTERISASI GUGUS FUNGSI PADA KARBON AKTIF KULIT JAGUNG MENGGUNAKAN UJI FOURIER TRANSFORM INFRARED SEBAGAI BAHAN PEMBUATAN ADSORBEN. *Inventor: Journal Of Science And Technology*, *4*(1), 1-9.
Hu, Q., Zhang, Y., Pei, Q., & Li, S. (2025). Determination of Equilibrium Loading by Empirical Models for the Modeling of Breakthrough Curves in a Fixed-Bed Column: From Experience to Practice. *Water*, *17*(3), 329.
Hendrasarie, N., & Prihantini, R. (2020). Pemanfaatan Karbon Aktif Sampah Plastik Untuk Menurunkan Besi Dan Mangan Terlarut Pada Air Sumur. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, *6*(2).
Imani, A., Sukwika, T., & Febrina, L. (2021). Karbon aktif ampas tebu sebagai adsorben penurun kadar besi dan mangan limbah air asam tambang. *Jurnal Teknologi*, *13*(1), 33-42.
Indah, S., Helard, D., & Ramadhan, D. (2021). Penerapan kolom adsorpsi seri dengan adsorben sekam padi pada penyisihan logam seng (Zn) dari air tanah. *Jurnal Riset Kimia*, *12*(1), 19-26.
Indah, S., Helard, D., & Herdiani, F. (2024). PEMANFAATAN BATU APUNG SEBAGAI ADSORBEN DALAM APLIKASI KOLOM ADSORPSI UNTUK PENYISIHAN LOGAM KROMIUM DARI AIR TANAH. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, *20*(1), 33-40.
Irawan, C. (2018). Pengaruh Konsentrasi Adsorbat Terhadap Efektivitas Penurunan

Logam Fe dengan Menggunakan Fly Ash sebagai Adsorben. *Seminastika. Published online*, 291-293.

Irawan, C., Putra, M. D., Wijayanti, H., Juwita, R., Meliana, Y., & Nata, I. F. (2021). The amine functionalized sugarcane bagasse biocomposites as magnetically adsorbent for contaminants removal in aqueous solution. *Molecules*, *26*(19), 5867.

Khairuddin, K., Yamin, M., & Kusmiyati, K. (2024). Heavy Metal of Cd Content in Tilapia Fish from Rawa Taliwang Lake, West Sumbawa Regency. *Jurnal Biologi Tropis*, *24*(3), 1035-1043.

Kustiyah, E., Novitasari, D., Wardani, L. A., Hasaya, H., & Widiantoro, M. (2023). Pemanfaatan Limbah Ampas Tebu untuk Pembuatan Plastik Biodegradable dengan Metode Melt Intercalation: Utilization of Sugarcane Bagasses for Making Biodegradable Plastics with the Melt Intercalation Method. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *24*(2), 300-306.

Kusumawardani, R., Zaharah, T. A., & Destiarti, L. (2018). Adsorpsi kadmium (II) menggunakan adsorben selulosa ampas tebu teraktivasi asam nitrat. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, *7*(3).

Liu, G., Dai, Z., Liu, X., Dahlgren, R. A., & Xu, J. (2022). Modification of agricultural wastes to improve sorption capacities for pollutant removal from water–a review. *Carbon Research*, *1*(1), 24.

Lukmanulhakim, R. C., Hidayati, N. V., & Baedowi, M. (2023). Analisis Kandungan Logam Berat Kadmium (Cd) dan Kromium (Cr) pada Matriks Air di Sungai Pelus Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah. *MAIYAH*, *2*(1), 41-50.

Mangesti, F. L., & Sosidi, H. (2019). Adsorpsi logam Pb dan Cu dari pelumas bekas menggunakan blending selulosa asetat-kitosan. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, *5*(2), 222-232.

Marrane, S. E., Dânoun, K., Essamlali, Y., Aboulhrouz, S., Sair, S., Amadine, O., ... & Zahouily, M. (2023). Fixed-bed adsorption of Pb (ii) and Cu (ii) from multi-metal aqueous systems onto cellulose-g-hydroxyapatite granules: optimization using response surface methodology. *RSC advances*, *13*(45), 31935-31947.

Maryudi., Rahayu, A., Syauqi, R., & Islami, M. K. (2021). Teknologi Pengolahan Kandungan Kromium dalam Limbah Penyamakan Kulit Menggunakan Proses Adsorpsi. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, *5*(1), 90-99.

Mekonnen, D. T., Alemayehu, E., & Lennartz, B. (2021). Fixed-bed column technique for the removal of phosphate from water using leftover coal. *Materials*, *14*(19), 5466.

Mohamed, N. B., Ngadi, N., Wong, S., Yahya, N. Y., Hassan, O., Inuwa, I. M., Opotu, L. A., Ali, N. (2022). *Facile synthesis of polyethylenimine-modified sugarcane bagasse adsorbent for removal of anionic dye in aqueous solution.* Scientific African, Volume 16.

Nugraha, F., Apridamayanti, P., Kurniawan, H., Fajriaty, I., Nurbaeti, S. N., Pratiwi, L., & Anggraeni, S. (2021). Analisis kadar kalium ekstrak kombinasi kulit pisang (Musa paradisiaca L.) dan kulit nanas (Ananas comosus (L.) Merr) secara spektrofotometri serapan atom. *Jurnal Sains Dan Kesehatan*, *3*(6), 846-852.

Nurgoho, G., Fuchoiroh, I., Mashuri, H. S., & Wardhani, R. (2021). Analisa Ampas Tebu sebagai Bahan Bakar Boiler pada Produksi Gula Tahun 2018 di PG Krebet Baru II Malang. *Jurnal AMORI*, *2*, 1.

Nwabanne, J. T., Iheanacho, O. C., Obi, C. C., & Onu, C. E. (2022). Linear and nonlinear kinetics analysis and adsorption characteristics of packed bed column for phenol removal using rice husk-activated carbon. *Applied Water Science*, *12*(5), 91.

Omitola, O. B., Abonyi, M. N., Akpomie, K. G., & Dawodu, F. A. (2022). Adams-Bohart, Yoon-Nelson, and Thomas modeling of the fix-bed continuous column adsorption of amoxicillin onto silver nanoparticle-maize leaf composite. *Applied Water Science*, *12*(5), 94.

Palupi, F. I. (2021). Penentuan Laju Alir Optimum Pada Adsorpsi Ion Logam Zn2+ dengan Zeolit-Poliakrilamida-Karboksimetil Selulosa dalam Sistem Dinamis. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah, Jakarta.

Purwaningrum, W., Riyanti, F., Said, M., Hariani, P. L., & Handayani, A. S. (2021). Fixed-Bed Column for the Removal of Cd (II) from Aqueous by Hydroxyapatite from Red Snapper (Lutjanus campechanus) Fish Bone. *IJFAC (Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry)*, *6*(2), 46-52.

Purwitassari, D. G., Rahma, T., Rif'an, F. (2022). Adsorpsi Logam Kadmium (Cd) pada Kadmium Sulfat (CdSO4) Menggunakan Batang Pohon Pisang sebagai Adsorben. Jurnal Chemurgy, Vol. 06, No. 1.

Rahmawati, E. (2023). Sintesis NiFe2O4 dan NiFe2O4/Bentonit untuk Oksidasi Katalitik Metil Violet. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Rielsa. (2023). Pemanfaatan Limbah Sumpit Sebagai Adsorben Untuk Menurunkan Kadar Kadmium (Cd) pada Limbah Cair dengan Metode Kontinu. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Reda, A., El-Demerdash, A. G., Sadik, W., El-Rafey, E., & Shoeib, T. (2025). Effectively eliminating lead and cadmium from industrial wastewater using a biowaste-based sorbent. *Applied Water Science*, *15*(2), 25.

Rosmiati, K., Lasmini, T., Adha, S. K. H., Purba, Y., & Rahmawati, R. (2022). PERBANDINGAN KADAR LOGAM KADMIUM (Cd) PADA URIN PEROKOK AKTIF DAN PEROKOK PASIF DI DESA AIR EMAS. *Prosiding Asosiasi Institusi Pendidikan Tinggi Teknologi Laboratorium Medik Indonesia*, *1*, 171-180.

Sari, N. W., Fajri, M. Y., & Wilapangga, A. (2018). Analisis fitokimia dan gugus fungsi dari ekstrak etanol pisang goroho merah (MUSA ACUMINATE (L)). *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*, *2*(1).

Sari, M. F. P., Loekitowati, P., & Moehadi, R. (2017). Penggunaan karbon aktif dari ampas tebu sebagai adsorben zat warna procion merah dari industri songket. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, *7*(1), 37-40.

Sitinjak, P. D. R., & Husin, A. (2021). Studi Adsorpsi Furfural Menggunakan Karbon Aktif dari Kulit Durian Termodifikasi. *Jurnal Teknik Kimia USU*, *10*(1), 19-24.

Subhan, R., Shidiqi, M. F., NH, A. D. S., & Ismuyanto, B. (2022). Studi Model Adsorpsi Cr (VI) Menggunakan Karbon Aktif Dari Tempurung Kelapa Pada Sistem Kolom Dengan Variasi Laju Alir. *Jurnal Rekayasa Bahan Alam dan Energi Berkelanjutan*, *6*(2).

Suhartono, E., Komari, N., & Siahaan, S. C. (2021). Interaksi merkuri dan kadmium terhadap enzim kunci pada glikolisis in siliko. *Jurnal Ilmiah Kedokteran Wijaya Kusuma*, *10*(2), 253-60.

Septiano, A. F., Susilo, S., & Setyaningsih, N. E. (2021). Analisis Citra Hasil Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray (SEM EDX) Komposit Resin Timbal dengan Metode Contrast to Noise Ratio (CNR). *Indonesian Journal of Mathematics and Natural Sciences*, *44*(2), 81-85.

Setiorini, I. A., & Agusdin, A. (2018). P Pengaruh Massa Adsorben Karbon Aktif Batubara Terhadap Penyerapan Kandungan Nilai Cod Dan Toc Dalam Limbah Kain Jumputan Pada Rancang Bangun Alat Adsorber. *Jurnal Teknik Patra Akademika*, *9*(01), 14-27.

Tasanif, R., Isa, I., & Kunusa, W. R. (2020). Potensi ampas tebu sebagai adsorben logam berat Cd, Cu dan Cr. *Ambura Journal of Chemistry*, *2*(1), 34-44.

Tejada, C., Herrera, A., & Ruiz, E. (2016). Kinetic and isotherms of biosorption of Hg (II) using citric acid treated residual materials. *Ingeniería y competitividad*, *18*(1), 117-127.

Wang, Q., Liang, D., Yang, Y., Zhang, Y., Wang, Y., Zhang, L., ... & Niu, Z. (2024). A study on a fixed-bed for Pb (II) removal by modified alkaline lignin-sodium alginate composite hydrogel. *RSC advances*, *14*(32), 23483-23494.

Wardani, G. A., Octavia, A. N., Fathurohman, M., Hidayat, T., & Nofiyanti, E. (2022). Arang aktif ampas tebu termodifikasi kitosan sebagai adsorben tetrasiklin: pemanfaatan metode kolom. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, *8*(3), 280-291.

Wijaya, I. K., Yusti, F. Y., Kartika, U. (2020). Pemanfaatan Daun Teh Sebagai Biosorben Logam Berat Dalam Air Limbah (Review). *Jurnal Envirotek Vol. 12. No 2.*

Yustinah., Hudzaifah., Maya, A., Syamsudin, AB. (2020). Kesetimbangan Adsorpsi Logam Berat (Pb) dengan Adsorben Tanah Diatomit secara Batch. Jurnal Konversi, Vol. 9, No. 12.

Zahra, P. S. (2022). Efektivitas Ampas Teh sebagai Fiber Adsorbent pada Penyerapan Logam Kadmium (Cd) dalam Air. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Zaqiyatul, E., Malis, E., & Ridho, R. (2021). Pemanfaatan Biomasa Kangkung Air (Ipomoea Aquatica Forsk) untuk Adsorpsi Pewarna Tekstil. *Jurnal Crystal: Publikasi Penelitian Kimia dan Terapannya*, *3*(1), 40-51.

Zhuang, J., Li, M., Pu, Y., Ragauskas, A. J., & Yoo, C. G. (2020). Observation of potential contaminants in processed biomass using fourier transform infrared spectroscopy. *Applied Sciences*, *10*(12), 4345.

Ali, N. Y. H. (2025). Komunikasi Personal

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan

1. Pembuatan 1000 mL larutan induk logam Kadmium (Cd) 1000mg/L dari $Cd(NO_3)_2.4H_2O$.

Diketahui:

Ar Cd = 112,41

Ar N = 14,007

Ar O = 15,999

Ar H = 1,008

Maka,

- Mr $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ = 112,41 + (14,007 × 2) + (15,999 × 6) + (1,008 × 2 × 4) + (15,999 × 4)

  = 308,478 g/mol

- Massa $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ = $\text{Konsentrasi} \times \text{volume} \times \frac{\text{Mr Cd(NO3)2.4H2O}}{\text{Ar Cd}}$

  = 1000 mg/L × 1000 mL × $\frac{308,478}{112,4}$

  = 2.744,39 mg

  = 2,7444 g

Jadi, untuk membuat 1000 mL larutan induk kadmium 1000 mg/L, dibutuhkan padatan $Cd(NO_3)_2.4H_2O$ sebanyak 2,7444 gram yang dilarutkan dengan 1000 mL aquades.

2. Pembuatan larutan 1000 mL asam sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,4 M untuk aktivasi adsorben

Diketahui:

Ar C = 12,001

Ar O = 15,999

Ar H = 1,008

Maka,

- Mr $C_6H_8O_7$ = (12,001 × 6) + (1,008 × 8) + (15,999 × 7)

  = 192,063 g/mol

- Massa $C_6H_8O_7$ $= M = \frac{massa}{Mr} \times \frac{1000}{V}$

$= 0{,}4\ M = \frac{massa}{192{,}063} \times \frac{1000}{1000}$

$= 76{,}8252$ g

Jadi, untuk membuat 1000 mL larutan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) 0,4 M diperlukan padatan $C_6H_8O_7$ sebanyak 76,8252 gram yang dilarutkan dengan 1000 mL aquades.

3. Pembuatan larutan uji logam Kadmium (Cd) 25 mg/L

$V_1 \times C_1 = V_2 \times C_2$

$V_1 = \frac{V_2 \times C_2}{C_1}$

$= \frac{1000\ mL \times 25\ mg/L}{1700\ mg/L}$

$= 15$ mL

Jadi, untuk membuat larutan uji logam kadmium dengan konsentrasi 25 mg/l dibutuhkan larutan induk sebanyak 15 mL yang diencerkan dengan aquades sebanyak 1000 mL.

4. Perhitungan Model Kinetika Adsorpsi

a. Model Thomas

$\ln\left[\frac{C_o}{C_t} - 1\right] = \frac{K_{Th} q_o\ x}{Q} - K_{Th} C_o t\ b$

$\ln\left[\frac{C_o}{C_t} - 1\right]$ menghasilkan regresi persamaan linear y = -0,0643x + 4,2442, dan $R^2 = 0{,}8901$

- Konstanta Laju Adsorpsi Thomas (K_{Th})$= \left|\frac{Slope}{Konsentrasi\ Awal\ (C_0)}\right|$

$= \left|\frac{-0{,}0643}{22\ mg/L}\right|$

$= 0{,}002923$ L/mg.menit

- Kapasitas Adsorpsi ($q_{0)}$

$= \frac{Intersep \times laju\ alir}{Konstanta\ Laju\ Thomas\ (K_{Th}) \times Berat\ Adsorben\ (W)}$

$= \frac{4{,}2442 \times 0{,}005\ L/menit}{0{,}002923\ L/mg.menit \times 6{,}1\ gram}$

$= 1{,}19028$ mg/g

b. Model Yoon-Nelson

$$\ln\left[\frac{C_t}{C_o - C_t}\right] = K_{YN}.t - \tau.K_{YN}$$

$\ln\left[\frac{C_t}{C_o - C_t}\right]$ menghasilkan regresi persamaan linear y = 0,0643x - 4,2442, dan R^2 = 0,8901

- Konstanta Laju Adsorpsi Yoon-Nelson (K_{YN})= $\frac{\text{Slope}}{60 \text{ menit}}$

  $= \frac{0,0643}{60 \text{ menit}}$

  = 0,00107 menit^{-1}

- Waktu 50% Breakthrough (τ)= $\left|\frac{\text{Intersep}}{\text{Konstanta Laju Yoon-Nelson } (K_{YN})}\right|$

  $= \left|\frac{-4,2442}{0,00107 \text{ menit}^{-1}}\right| \times 60 \text{ menit}$

  = 3960,37 menit

  = 66 jam

- Kapasitas Adsorpsi (q_0)

  $= \frac{\left(\frac{1}{2}\right) \times C_o \times \left(\frac{\text{Laju Alir (Q)}}{1000}\right) \times 2 \times \text{Waktu 50\% Breakthrough } (\tau)}{\text{Berat Adsorben (W)}}$

  $= \frac{\left(\frac{1}{2}\right) \times 22 \text{ mg/L} \times \left(\frac{0,005 \text{ L/menit}}{1000}\right) \times 2 \times 3960,37 \text{menit}}{6,1 \text{ gram}}$

  =0,07142 mg/g

c. Model Adam-Bohart

$$\ln\left[\frac{C_o}{C_t} - 1\right] = K_{AB}N_0\frac{z}{F} - K_{AB}C_o t$$

$\ln\left[\frac{C_o}{C_t} - 1\right]$ menghasilkan regresi persamaan linear y = 0,0377x – 3,6856, dan R^2 = 0,7229

- Konstanta Laju Adsorpsi Adam Bohart (K_{AB})= $\frac{\text{Slope}}{\text{Konsentrasi Awal } (C_0)}$

  $= \frac{0,0377}{22 \text{ mg/L}}$

  = 0,001713 L/mg.menit

- Kapasitas Adsorpsi (N_0)

$$= \frac{\text{Intersep} \times \text{Kecepatan Aliran (U)}}{\text{Konstanta Laju Adam Bohart } (K_{AB}) \times \text{Ketinggian Massa Adsorben (Z)}}$$

$$= \frac{3{,}6856 \times 1{,}3157 \text{ cm/menit}}{0{,}001713 \text{ L/mg.menit} \times 15\text{cm}}$$

$$= 188{,}66 \text{ mg/L}$$

Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian

1. Preparasi Adsorben Ampas Tebu



Pengambilan ampas tebu



Pengeringan ampas tebu



Proses menghaluskan ampas tebu



Proses pengayakan ampas tebu



Hasil ayakan dsorben ampas tebu Tanpa Aktivasi

2. Aktivasi Adsorben Ampas Tebu



Menimbang padatan asam sitrat



Pembuatan larutan asam sitrat



Proses aktivasi adsorben ampas tebu



Pengeringan adsorben ampas tebu teraktivasi



Adsorben teraktivasi yang telah kering

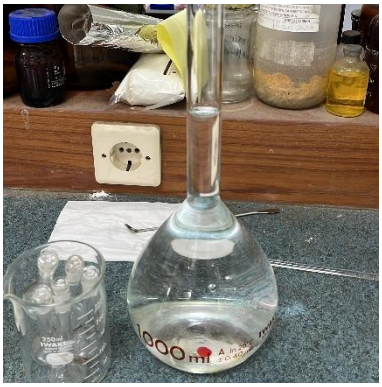


Hasil ayakan adsorben ampas tebu teraktivasi

3. Pembuatan Larutan Induk Kadmium (Cd) 1000 mg/L

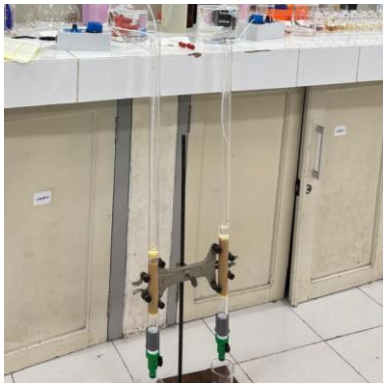


Menimbang padatan logam kadmium



Pembuatan larutan induk kadmium

4. Pengujian Adsorpsi



Proses adsropsi kolom



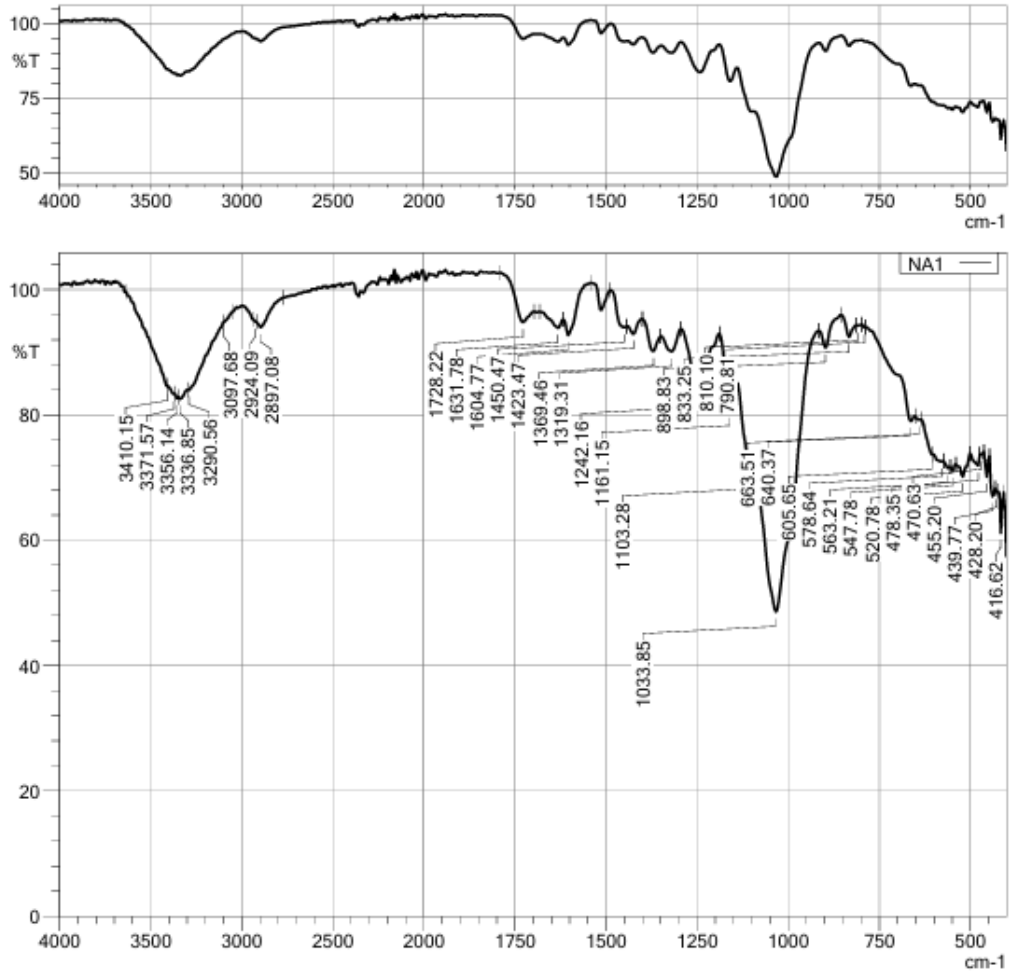
Proses pengenceran sampel



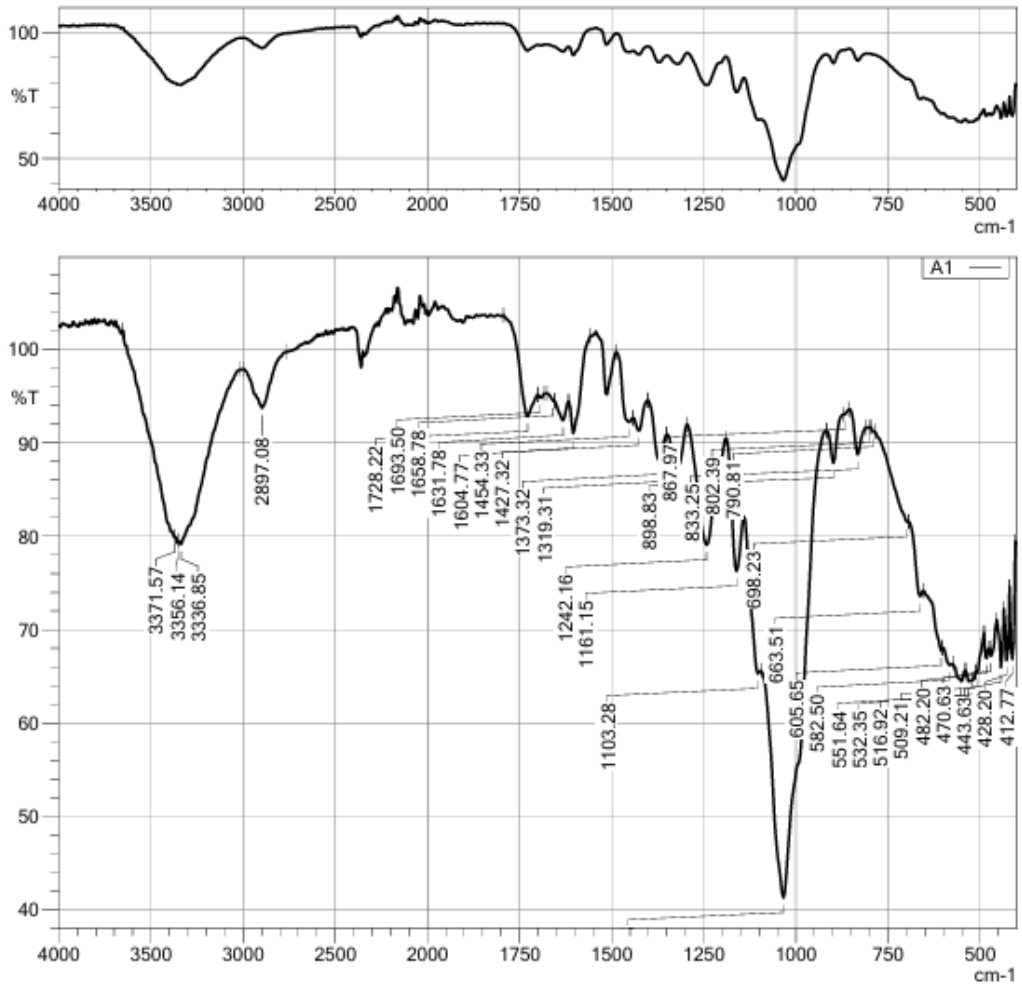
Proses pembacaan sampel dengan AAS

Lampiran 3 Data Karakterisasi FTIR

1. Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi



2. Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Asam Sitrat



RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Nida Fitria Alifah. Penulis lahir di Kota Karawang pada tanggal 15 Desember 2002 dan merupakan anak pertama dari kedua pasangan Bapak Suranto dan Ibu Ema Saridewi. Penulis menempuh pendidikan menengah pertama di SMP Islam Terpadu Mentari Ilmu, Karawang pada tahun 2015 hingga 2018. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Karawang pada tahun 2018 hingga 2021. Setelah itu, pada tahun 2021 penulis melanjutkan pendidikan jenjang Strata Satu (S1) di Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, dengan Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan.

Selama masa perkuliahan, penulis turut aktif mengikuti berbagai macam kegiatan di dalam maupun di luar kampus. Penulis bergabung dalam Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan sebagai staf Divisi Keilmuan. Penulis juga menjadi bagian dari *organizing committee* acara "Lintas Lingkungan 2022" sebagai staf Divisi Wali Jamaah, lalu bergabung dalam Tim Kerja Pelatihan Dasar Kepempimpinan 2022, dan Bersih Pantai sebagai staf Divisi Hubungan Masyarakat. Melalui berbagai pengalaman organisasi dan kegiatan tersebut, penulis memperoleh banyak pembelajaran serta pengembangan keterampilan dalam bidang komunikasi, kerja tim, dan pengabdian masyarakat, yang turut mendukung proses akademik dan pengembangan diri penulis selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi. Selain itu, penulis menyelesaikan kerja praktik di PT. Pindo Deli Pulp and Paper Mills 2, pada unit Wastewater Treatment Plant (WWTP).