



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

**Pemanfaatan Ampas Tebu Sebagai Adsorben untuk
Mereduksi Kadar Logam Berat Timbal (Pb) Dalam Air
dengan Metode Kontinu**

**Nur Yafta Hilna Ali
21513060**

**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

Utilization of Sugarcane Bagasse as an Adsorbent for Reducing Lead (Pb) Concentration in Water Using a Continuous Method

Nur Yafta Hilna Ali

21513060

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**

**Pemanfaatan Ampas Tebu sebagai Adsorben untuk Mereduksi Kadar Logam
Berat Timbal (Pb) dalam Air dengan Metode 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.

**Nur Yafra Hilna Ali
21513060**

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

 18/9/2025
Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., MSc.ES., Ph.D., IPU

(Pembimbing 1)


Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D

(Penguji 1)

 - 18-09-2025
Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T.

(Penguji 2)


Mengetahui
Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana

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,

A pink rectangular official stamp from Universitas Islam Indonesia (UII) is visible. It contains the text "UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA" at the top, "METRIK TEMPEL" in the middle, and a unique ID "09ANX011378414" at the bottom. A handwritten signature in black ink is written over the stamp.

Nur Yafra Hina Ali
21513060

PRAKATA

Segala puji bagi Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Pemanfaatan Ampas Tebu sebagai Adsorben untuk Mereduksi Kadar Logam Berat Timbal (Pb) dalam Air dengan Metode Kontinu". Penelitian ini disusun sebagai salah satu syarat untuk lulus jenjang Strata-1 dan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Daerah Istimewa Yogyakarta

Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, saya ingin menyampaikan rasa syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT, atas segala rahmat, hidayah, dan petunjuk-Nya yang senantiasa memberikan kekuatan kepada saya dalam menjalani setiap proses untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua saya, Bapak Sumarlin dan Ibu Hasniah serta saudara saya Nina, Ima, dan Jumatia yang senantiasa memberikan doa, *support*, dan kasih sayang yang tiada henti.
3. Bapak Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU. selaku Dosen Pembimbing atas saran, masukan, dan bimbingan yang sangat berarti bagi penelitian ini.
4. Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. dan Ibu Diah Ayu Prawitasari, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah membimbing, memberi saran dan arahan dalam pelaksanaan tugas akhir ini
5. Seluruh dosen, karyawan, dan para asisten laboratorium di Laboratorium Kualitas Air Program Studi Teknik Lingkungan UII atas ilmu yang diberikan, arahan, dan bantuannya dalam segala proses selama masa perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir ini.
6. Nida Fitria Alifah selaku teman dari awal masa perkuliahan, partner kerja praktik, dan partner tugas akhir yang selalu ada, membantu,

dan kompak dalam menjalani perkuliahan hingga mengerjakan tugas akhir.

7. Arkan, Attar, Nida, dan Tsabita selaku teman penulis dari masa awal perkuliahan yang selalu menjadi tempat berbagi cerita, suka-duka, serta melewati berbagai momen kebersamaan.
8. Teman-teman ‘Camping Ceria’ yang kedekatannya terjalin sejak momen berkemah bersama. Terima kasih atas kebersamaan yang hangat, canda tawa, dan waktu-waktu menyenangkan yang dilalui bersama, baik saat jalan-jalan, *healing*, maupun sekadar menghabiskan waktu di tengah kesibukan perkuliahan. Kehadiran kalian menjadi bagian berharga dalam perjalanan ini.
9. Teman-teman Teknik Lingkungan 21 yang tidak bisa disebutkan satu per satu. Terima kasih atas kebersamaan dan pengalaman yang ikut mewarnai perjalanan kuliah ini.
10. Semua orang yang penulis kenal baik secara langsung maupun tidak langsung yang telah berkontribusi dalam tugas akhir ini
11. Nur Yafta Hilna Ali, diri saya sendiri yang telah berproses, belajar, dan terus melangkah sejauh ini. Terima kasih telah memilih untuk tetap bertahan.

Sleman, 11 September 2025

Nur Yafta Hilna Ali



Pemanfaatan Ampas Tebu sebagai Adsorben untuk Mereduksi Kadar Logam Berat Timbal (Pb) dalam Air dengan Metode Kontinu

Mahasiswa : Nur Yafta Hilna Ali
NIM : 21513060
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU

Abstrak

Pencemaran air akibat logam berat seperti Timbal (Pb) merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang serius karena sifatnya yang toksik, sulit terdegradasi, dan dapat membahayakan kesehatan makhluk hidup. Upaya pengolahan limbah yang mengandung Pb perlu dilakukan secara efektif, ramah lingkungan, dan berbiaya rendah. Salah satu metode yang potensial adalah adsorpsi dengan memanfaatkan limbah biomassa seperti ampas tebu, yang memiliki kandungan lignoselulosa dan gugus fungsi aktif yang mampu mengikat ion logam. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik ampas tebu sebelum dan sesudah aktivasi asam sitrat ($C_6H_8O_7$), menganalisis efektivitas ampas tebu dalam mereduksi kadar Pb dengan variasi ketinggian adsorben dan debit alir, serta menentukan kapasitas adsorpsi logam Pb menggunakan pemodelan kinetika. Penelitian dilakukan menggunakan metode kontinu (kolom) dengan variasi debit 5 dan 7,5 mL/menit serta ketinggian adsorben 10 dan 15 cm. Karakterisasi adsorben dilakukan dengan FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsi dan SEM untuk mengamati morfologi permukaan, sedangkan kadar Pb dianalisis menggunakan AAS. Hasil penelitian menunjukkan kondisi optimum diperoleh pada debit 5 mL/menit dan ketinggian adsorben 15 cm. Kapasitas adsorpsi tertinggi diperoleh pada model Thomas sebesar 0,933 mg/g, kapasitas adsorpsi volumetrik dari model Adams–Bohart sebesar 239,79 mg/L, dan kapasitas adsorpsi dari model Yoon–Nelson sebesar 0,05596 mg/g. Nilai koefisien determinasi (R^2) tertinggi terdapat pada model Adams–Bohart (0,9601) yang paling sesuai merepresentasikan proses adsorpsi khususnya pada fase awal.

Kata kunci: Adsorpsi, Ampas Tebu, Metode Kontinu, Model Kinetika, Timbal (Pb)

Utilization of Sugarcane Bagasse as a Adsorbent for Reducing Lead (Pb) Concentration in Water Using a Continuous Method

Student : Nur Yafta Hilna Ali
Student Number : 21513060
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Prof. Ir. Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D., IPU

Abstract

Water pollution caused by heavy metals such as Lead (Pb) is one of the most serious environmental problems due to its toxic nature, persistence, and potential threat to living organisms. The treatment of wastewater containing Pb needs to be carried out effectively, environmentally friendly, and at low cost. One potential method is adsorption utilizing biomass waste such as sugarcane bagasse, which contains lignocellulose and active functional groups capable of binding metal ions. This study aims to identify the characteristics of sugarcane bagasse before and after citric acid ($C_6H_8O_7$) activation, analyze the effectiveness of sugarcane bagasse in reducing Pb levels with variations in adsorbent height and flow rate, and determine the Pb adsorption capacity using kinetic modeling. The study was conducted using a continuous column method with flow rates of 5 and 7.5 mL/min and adsorbent heights of 10 and 15 cm. Adsorbent characterization was performed using FTIR to identify functional groups and SEM to observe surface morphology, while Pb concentrations were analyzed using AAS. The results showed that the optimum condition was achieved at a flow rate of 5 mL/min and an adsorbent height of 15 cm. The highest adsorption capacity was obtained using the Thomas model at 0.933 mg/g, the volumetric adsorption capacity from the Adams–Bohart model was 239.79 mg/L, and the adsorption capacity from the Yoon–Nelson model was 0.05596 mg/g. The highest coefficient of determination (R^2) was found in the Adams–Bohart model (0.9601), which best represents the adsorption process, particularly in the initial phase.

Key words: Adsorption, Sugarcane Baggase, Lead (Pb), Continuous Method, Kinetic Model

DAFTAR ISI

PRAKATA	i
Abstrak	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Logam Berat Timbal (Pb)	6
2.2 Adsorpsi	7
2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi	8
2.4 Metode Adsorpsi	9
2.5 Ampas Tebu	11
2.6 <i>Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS)</i>	12
2.7 <i>Fourier Transform Spectroscopy</i>	13
2.8 <i>Scanning Electron Microscope</i>	13
2.9 Kurva Terobosan (<i>Breakthrough Curve</i>)	14
2.10 Model Kinetika Sistem Adsorpsi	15
2.11 Penelitian Terdahulu	16
BAB III METODE PENELITIAN	20
3.1 Waktu dan Lokasi	20
3.2 Alat dan Bahan	20
3.3 Parameter dan Metode Uji	20
3.4 Variabel Penelitian	21

3.5 Prosedur Penelitian	22
3.5.1 Preparasi Adsorben Ampas Tebu	23
3.5.2 Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi	24
3.5.3. Preparasi Rangkaian Sistem Kontinu (Kolom)	25
3.5.4 Preparasi Larutan Induk Pb	26
3.5.5 Karakteristik Adsorben	26
3.5.6 Penentuan dan Pengaturan Debit atau Laju Alir	27
3.5.7 Penentuan Debit atau Laju Alir Optimum	27
3.5.8 Penentuan Ketinggian Adsorben Optimum	28
3.5.9 Penentuan Kurva Trobosan (<i>Breakthrough Curve</i>)	29
3.5.10 Model Kinetika Sistem Adsorpsi	29
3.5.11 Analisis Efisiensi Kemampuan Adsorben	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Karakteristik Adsorben	32
4.1.1 FTIR (<i>Fourier Transform InfraRed</i>)	32
4.1.2 SEM (Scanning Electron Microscopes)	36
4.2 Uji Adsorpsi	38
4.2.1 Uji Variasi Debit atau Laju Alir Optimum	38
4.2.2 Uji Variasi Ketinggian Adsorben	41
4.3 Kurva Terobosan (<i>Breakthrough Curve</i>)	45
4.4 Model Kinetika Sistem Adsorpsi	48
4.4.1 Model Thomas	48
4.4.2 Model Yoon-Nelson	51
4.4.3 Model Adam-Bohart	54
4.4.4 Perbandingan Model	57
BAB V PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	66
RIWAYAT HIDUP	75

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Ampas Tebu	12
Tabel 2.2 Peneitian Terdahulu	16
Tabel 3.1 Alat dan Bahan	20
Tabel 4.1 Rincian Klasifikasi Gugus Fungsi	33
Tabel 4.2 Data Variasi Debit atau Laju Alir Adsorben Tanpa Aktivasi	39
Tabel 4.3 Data Variasi Debit atau Laju Alir Adsorben Teraktivasi	39
Tabel 4.4 Data Variasi Ketinggian Adsorben Tanpa Aktivasi	42
Tabel 4.5 Data Variasi Ketinggian Adsorben Teraktivasi	42
Tabel 4.6 Data Kurva Terobosan	46
Tabel 4.7 Data Model Thomas	49
Tabel 4.8 Data Model Yoon-Nelson	51
Tabel 4.9 Model Adam-Bohart.....	54
Tabel 4.10 Data Perbandingan Model.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Adsorpsi secara Batch	10
Gambar 2.2 Adsorpsi secara Kontinu	11
Gambar 2.3 Ampas Tebu	12
Gambar 2.4 Kurva Terobosan	14
Gambar 3.1 Alur Penelitian	22
Gambar 3.2 Diagram Alir Preparasi Adsorben Ampas Tebu	23
Gambar 3.3 Diagram Alir Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi	24
Gambar 3.4 Rangkaian Adsorpsi Sistem Kontinu	25
Gambar 3.5 Preparasi Larutan Induk Pb	26
Gambar 3.6 Diagram Alir Penentuan Debit Optimum	28
Gambar 3.7 Diagram Alir Penentuan Ketinggian Adsorben Optimum	29
Gambar 4.1 Hasil Uji FTIR Adsorben Ampas Tebu Non Aktivasi dan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi.....	33
Gambar 4.2 (a) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaraan 1500x (b) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaran 5000x (c) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Perbesaran 1500x (d) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Perbesaran 5000x.....	36
Gambar 4.3 Grafik Hubungan Variasi Debit atau Laju Alir Terhadap Adsorpsi Pb	40
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Variasi Ketinggian Terhadap Adsorpsi Pb	43
Gambar 4.5 Kurva Terobosan	46
Gambar 4.6 Kurva Terobosan Melalui Pergerakan Mass Transfer Zone	47
Gambar 4.7 Kurva Linier Model Thomas	49
Gambar 4.8 Kurva Linier Model Yoon-Nelson	52
Gambar 4.9 Kurva Linier Model Adam-Bohart	55

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan.....	66
Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian	67
Lampiran 3 Data Pengujian Adsorpsi	70
Lampiran 4 Data Karakteristik	74

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan zaman yang semakin pesat tentunya berbanding lurus dengan meningkatnya jumlah industri pada berbagai sektor dan juga aktivitas manusia. Aktivitas dari industri dan kegiatan manusia tersebut akan selalu menghasilkan limbah sebagai produk samping. Salah satu limbah yang dihasilkan yaitu limbah cair yang mana limbah cair tersebut tidak boleh langsung dibuang begitu saja ke lingkungan, tetapi wajib diolah terlebih dahulu sesuai baku mutu air limbah yang ditetapkan oleh pemerintah (Suwazan, & Nurhidayanti, 2022). Namun, pada kenyataannya masih banyak industri ataupun sekelompok individu yang membuang air limbahnya ke lingkungan melalui sungai, danau, waduk, atau langsung ke laut. Pembuangan air limbah secara langsung ke lingkungan inilah yang menjadi salah satu penyebab terjadinya pencemaran air. Air limbah industri memiliki kandungan logam berat yang bersifat tidak terurai dan persisten. Oleh karena itu, kontaminasi logam berat di lingkungan pada konsentrasi rendah sekalipun tetap memiliki dampak merugikan terhadap kesehatan makhluk hidup (Fajar, 2019). Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh logam berat menjadi masalah yang cukup serius, salah satu jenis logam berat berbahaya tersebar luas dalam dosis tinggi adalah Timbal (Pb).

Timbal (Pb) merupakan salah satu jenis logam berat non-esensial yang keberadaannya dalam tubuh belum diketahui manfaatnya, sehingga Pb digolongkan ke dalam bahan pencemar yang berbahaya karena bersifat akumulatif dan mudah terakumulasi dalam jaringan makhluk hidup (Kharisma, et al., 2023). Timbal (Pb) banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku maupun bahan penunjang dalam berbagai sektor industri. Penggunaan Timbal di antaranya yaitu sebagai bahan aditif pada pestisida, pemurnian logam, pengkilap keramik, juga dalam pembuatan baterai. Ketika limbah yang mengandung Timbal (Pb) dari aktivitas industri tersebut dibuang ke badan air, akan terjadi akumulasi yang pada akhirnya masuk ke dalam tubuh hewan dan manusia. Jika terserap ke dalam tubuh manusia, timbal (Pb) dapat menyebabkan penurunan kecerdasan pada anak, pertumbuhan

badan terhambat, serta kerusakan otak dan ginjal (Putra, et al., 2023). Menurut PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, baku mutu timbal (Pb) dalam badan air ditetapkan sebesar 0,03 mg/L. Meninjau dampak yang disebabkan karena logam berat Timbal, maka perlu dilakukan pengurangan kadar timbal (Pb) dalam air tersebut. Terdapat berbagai macam metode penurunan logam berat Timbal diantaranya, presipitasi, pertukaran ion, elektrokoagulasi, elektrolisis, dan juga adsorpsi. Menurut Maharani & Sa'diyah (2021), metode adsorpsi memiliki keunggulan berupa kebutuhan energi yang rendah, biaya operasional yang relatif murah, kemudahan dalam penerapan, serta efektivitas dan efisiensi yang tinggi. Pengaruh efektivitas dari proses adsorpsi bergantung pada adsorben yang digunakan untuk menyerap logam berat. Dalam pemilihan adsorben yang ramah lingkungan dan hemat biaya, dapat menggunakan limbah organik salah satunya limbah hasil pabrik gula ataupun dari penjual es tebu pinggir jalan yang belum dimanfaatkan secara optimal oleh masyarakat yaitu ampas tebu.

Ampas tebu merupakan limbah yang dihasilkan dari hasil samping proses ekstraksi cairan tebu. Pada proses produksi dari pabrik gula menghasilkan ampas tebu sebesar 90%, sedangkan gula yang dimanfaatkan hanya 5%, dan sisanya berupa tetes tebu dan air (Robiah, et al., 2019). Menurut Rina et al (2018), pemanfaatan dari limbah ampas tebu biasanya dimanfaatkan sebagai pakan ternak, bahan baku pembuatan pupuk, bahan bakar boiler di pabrik gula, pulp, dan bahan baku di industri kanvas. Ampas tebu itu sendiri mengandung komponen yang terdiri dari 45% selulosa, 25% lignin, 25% hemiselulosa, air 48-52% dan gula 3,3%. Kandungan serat selulosa yang tinggi pada ampas tebu menyebabkan ampas tebu berpotensi menjadi sumber karbon yang efektif untuk proses adsorpsi. Sifat hidrofilik dari selulosa, yang disebabkan oleh adanya gugus hidroksil pada setiap unit polimernya, memungkinkan gugus fungsional pada permukaan selulosa baik dalam bentuk alami maupun turunannya untuk berinteraksi secara fisik maupun kimia dengan logam berat. Adsorben dari ampas tebu memiliki beberapa keunggulan yaitu keberadaan yang melimpah sehingga mudah didapatkan, proses preparasi yang sederhana, dan biaya yang terjangkau (Tasanif, R., et al. 2020).

Penelitian terdahulu yang telah memanfaatkan ampas tebu menjadi adsorben dilakukan oleh Ezeonuegbu, et al., (2021) untuk mengevaluasi penghilangan Pb (II) dan Ni (II) dari air limbah yang tidak diolah dengan menggunakan sistem batch yang diaktivasi menggunakan HNO₃, HCl dan NaOH. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa kondisi optimum penurunan kadar Pb dan Ni adalah pH 6,0; suhu 30°C; waktu kontak 90 menit; dan dosis adsorben 0,5 g juga efisiensi penurunan kadar Pb dan Ni sebesar 89,31% dan 96,33% dengan kapasitas adsorpsi masing-masing adalah 1,61 mg/g dan 123,46 mg/g. Penelitian lainnya dilakukan oleh Genet., et al., (2022) dengan ampas tebu arang aktif untuk penghilangan Zinc (II) dari air limbah dengan menggunakan sistem batch yang diaktivasi menggunakan H₂SO₄. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa kondisi optimum terjadi pada waktu kontak 40 menit, massa adsorben 6 gram, dan suhu 60°C dengan efisiensi penurunan sebesar 82,4% serta kapasitas maksimum adsorpsi sebesar 426,64 mg/g.

Efektivitas ampas tebu dalam mereduksi konsentrasi logam berat menunjukkan bahwa material ini tidak hanya berfungsi sebagai adsorben yang baik, tetapi juga berpotensi dimanfaatkan untuk mengurangi timbulan limbah ampas tebu. Maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai identifikasi kemampuan ampas tebu sebagai adsorben yang telah diaktivasi menggunakan Asam Sitrat (C₆H₈O₇) dengan sistem kontinu atau kolom menggunakan variasi debit serta ketinggian *bed* adsorben, kemudian dilakukan analisa karakteristik ampas tebu, penentuan nilai optimum dan efisiensi removal adsorpsi dengan variasi debit atau laju alir dan ketinggian adsorben. Aktivasi secara kimiawi menggunakan asam sitrat bertujuan untuk menambahkan gugus fungsional –OH dan –COOH yang memungkinkan ion sitrat berinteraksi dengan ion logam melalui pembentukan garam sitrat. Interaksi ini membuat ion sitrat mengikat logam dan membentuk kompleks, sehingga logam dapat terikat stabil dan tereliminasi dari sistem (Hidayati, et al. 2022). Metode adsorpsi dapat dilakukan dengan sistem batch maupun kontinu. Sistem batch relatif sederhana karena adsorben dicampurkan langsung dengan larutan, namun kurang sesuai untuk pengolahan dalam skala besar. Metode adsorpsi kontinu dengan kolom tetap (*fixed-bed column*) memberikan gambaran yang lebih realistis karena

mempertimbangkan aliran larutan, fenomena perpindahan massa, serta kejenuhan adsorben, yang selanjutnya divisualisasikan dalam kurva terobosan untuk analisis kapasitas, kinetika, dan umur pemakaian adsorben. Mekanisme dasarnya tetap sama, yaitu interaksi ion terlarut dengan gugus fungsi aktif pada permukaan adsorben. Namun, tingkat efisiensi yang diperoleh dapat bervariasi, tergantung pada karakteristik logam, kesesuaian interaksi dengan gugus fungsi adsorben, serta kondisi operasi seperti pH, konsentrasi, laju alir, dan dosis adsorben.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik ampas tebu sebagai adsorben sebelum diaktivasi dan sesudah diaktivasi dengan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$)
2. Bagaimana efektivitas ampas tebu sebagai adsorben dalam mereduksi kadar timbal (Pb) dengan pengaruh variasi ketinggian adsorben dan debit atau laju alir pada adsorpsi logam timbal (Pb)?
3. Berapa kapasitas adsorpsi logam berat timbal (Pb) oleh adsorben ampas tebu?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi karakteristik ampas tebu sebelum diaktivasi, sesudah diaktivasi dengan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$) dan sebagai adsorben.
2. Menganalisis efektivitas ampas tebu sebagai adsorben dalam mereduksi kadar Timbal (Pb) dengan pengaruh variasi ketinggian adsorben dan debit atau laju alir pada adsorpsi logam timbal (Pb).
3. Menganalisis seberapa besar kapasitas adsorpsi logam berat Timbal (Pb) oleh adsorben ampas tebu.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang kemampuan ampas tebu sebagai adsorben dalam mereduksi kadar logam berat (Pb) dalam air.

2. Memberikan opsi teknologi alternatif penyerapan logam berat dengan adsorben alami, salah satunya ampas tebu.
3. Meningkatkan nilai guna ampas tebu.
4. Hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi dalam memanfaatkan limbah alami khususnya ampas tebu sebagai bahan baku adsorben dengan metode kontinu.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP kampus terpadu UII.
2. Pengujian adsorpsi logam berat Timbal (Pb) dilakukan dengan memperhatikan aspek ketinggian adsorben, debit atau laju alir, dan waktu kontak.
3. Metode aktivasi dilakukan menggunakan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$)
4. Air limbah yang digunakan yaitu larutan buatan yang mengandung ion logam timbal (Pb) dengan metode uji mengacu pada SNI Nomor 06-6989-84 tahun 2019 tentang Cara Uji kadar logam terlarut dan logam total secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala.
5. Pengujian karakteristik gugus fungsi adsorben pada penelitian ini menggunakan *Fourier Transform Infrared* (FTIR).
6. Analisa tampak permukaan adsorben menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Logam Berat Timbal (Pb)

Timbal adalah logam berat dengan nomor atom 82, berat atom 207,19 dan densitas $11,34 \text{ g/cm}^3$ sedangkan titik leleh timbal adalah $327,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($621,5 \text{ }^{\circ}\text{F}$) sangat rendah dibandingkan dengan kebanyakan logam serta memiliki titik didih sebesar $1749 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($3180 \text{ }^{\circ}\text{F}$) merupakan yang terendah di antara unsur-unsur golongan karbon. Timbal merupakan logam dengan tampilan cerah berwarna keperakan sedikit kebiruan. Logam ini bersifat lunak dan berwarna biru keabuan dengan kilau metalik khas yang tampak jelas setelah dipotong. Namun, bila terpapar udara lembap, timbal akan mengalami perubahan warna menjadi kusam dengan rona yang bervariasi tergantung kondisi lingkungan. Timbal mampu membentuk paduan dengan logam lain, menghasilkan sifat yang berbeda dibandingkan timbal murni (Boldyrev, M., 2018).

Timbal merupakan bahan lingkungan yang terdistribusi secara melimpah karena secara umum sifat-sifat khas timbal meliputi kepadatan tinggi, kelenturan, isolator dan ketahanan tinggi terhadap korosi sehingga sulit untuk meminimalisir penggunaannya (Putra, et al., 2023). Timbal (Pb) dikategorikan sebagai salah satu substansi toksik yang keberadaannya cukup masif di lingkungan. Timbal itu sendiri banyak digunakan pada industri sebagai bahan baku maupun bahan penunjang. Penggunaan Timbal diantaranya yaitu sebagai bahan adiktif pada pestisida, pemurnian logam, pengkilap keramik, juga dalam pembuatan baterai. Sifatnya yang sulit terdegradasi secara biologi dan penggunaannya yang terus menerus mengakibatkan konsentrasi Pb semakin meningkat terakumulasi di lingkungan terutama pada sistem perairan. Akumulasi logam berat (Pb) pada sedimen dan biota dapat terjadi melalui proses biokonsentrasi, bioakumulasi, dan biomagnifikasi (Sinaga. P, 2019).

Ditinjau dari sifat Pb yang sangat berbahaya yang mempunyai afinitas paling tinggi terhadap belerang dan menyerang ikatannya di dalam enzim, tentunya memiliki dampak negatif terhadap kesehatan. Efek Pb terhadap kesehatan yaitu menghambat sintesis hemoglobin dan memperpendek umur sel darah merah

sehingga akan menyebabkan anemia, pada anak-anak akan mengalami penurunan kecerdasan, serta pada orang dewasa dapat mengurangi kesuburan, bahkan menyebabkan kemandulan atau keguguran pada wanita hamil (Darmiah, 2015). Merujuk pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, ambang batas atau baku mutu timbal (Pb) yang diperbolehkan dalam badan air adalah 0,03 mg/L.

2.2 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses pengikatan atau penyerapan molekul dalam fluida yang akan terakumulasi ke permukaan adsorben. Pada proses adsorpsi, interaksi antara adsorben dengan adsorbat hanya terjadi pada permukaan adsorben. Adsorbat adalah molekul yang berikatan pada permukaan, sementara permukaan yang memiliki kemampuan untuk menyerap molekul tersebut dinamakan adsorben, misalnya karbon aktif, silika, atau zeolit. Adsorpsi dapat terjadi apabila terdapat padatan dan molekul yang saling tarik-menarik sehingga konsentrasi pada padatan terjadi peningkatan (Yustinah, et al., 2019). Berdasarkan kuat interaksinya, mekanisme pengikatan tersebut dapat dibedakan menjadi dua yaitu secara fisika dan kimia.

Adsorpsi fisika (fisisorpsi) adalah proses di mana interaksi antara adsorben dan adsorbat berlangsung melalui gaya antarmolekul yang relatif lemah, yaitu gaya Van der Waals. Interaksi ini memungkinkan molekul adsorbat bergerak bebas di permukaan adsorben. Energi yang dilepaskan pada proses adsorpsi fisika umumnya rendah, yaitu sekitar 10 kJ/mol (Zulfania et al., 2022). Adsorpsi fisika juga terjadi pada suhu yang cenderung rendah dan zat yang teradsorpsi akan terus berkurang seiring dengan kenaikan suhu. Molekul yang teradsorpsi secara fisika tidak terikat kuat pada permukaan adsorben, sehingga proses desorpsi berlangsung relatif cepat dan memungkinkan molekul tersebut mudah digantikan oleh molekul lain (Masruhin et al., 2018). Adsorpsi kimia (*chemisorption*) terjadi ketika molekul yang diadsorpsi bereaksi secara kimia dengan permukaan adsorben. Proses ini bersifat tidak dapat dibalik (*irreversibel*) karena interaksi potensial yang kuat. Adsorpsi kimia melibatkan pembentukan dan pemutusan ikatan kimia, sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan mirip dengan panas reaksi kimia, yaitu

sekitar 20 hingga 100 kKal/mol. Adsorpsi jenis ini memerlukan lokasi spesifik pada permukaan adsorben, dan molekul hanya dapat diadsorpsi di tempat tersebut (Yustinah, et al., 2019).

2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Secara umum menurut Syauqiah (2011), terdapat faktor-faktor yang dapat mempengaruhi proses adsorpsi adalah sebagai berikut:

1. Luas Permukaan

Semakin besar luas permukaan adsorben berbanding lurus dengan semakin banyak pula zat yang dapat diadsorpsi. Luas permukaan adsorben ditentukan oleh ukuran partikel dan jumlah adsorben yang ada.

2. Jenis Adsorbat

Polaritas molekul adsorbat, peningkatan polarisabilitas adsorbat dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi molekul yang mempunyai polarisabilitas yang tinggi (polar). Secara sederhananya, molekul yang lebih polar akan mudah diadsorpsi jika memiliki diameter yang sama sehingga dapat menggantikan molekul kurang polar yang telah diserap.

3. Porositas Adsorben

Porositas berperan sebagai tempat melekatnya molekul adsorbat yang terserap oleh adsorben. Adsorben dengan porositas yang tinggi memiliki kemampuan penyerapan yang lebih besar dibandingkan dengan adsorben berporositas rendah. Untuk meningkatkan porositas, dapat dilakukan aktivasi secara fisik, seperti mengalirkan uap panas ke dalam pori-pori adsorben, atau dengan aktivasi kimia.

4. Temperature

Pemanasan atau pengaktifan adsorben akan meningkatkan daya serap adsorben terhadap adsorbat menyebabkan pori-pori adsorben lebih terbuka. Keberlangsungan proses adsorpsi untuk menurunkan kadar logam perlu memperhatikan suhu optimum. Suhu yang terlalu tinggi menyebabkan rusaknya adsorben yaitu kerusakan protein sehingga kemampuan penyerapan pada logam menurun.

5. pH

pH larutan dapat mempengaruhi kelarutan ion logam. Pada $\text{pH} > 10$ umumnya logam akan mengendap dalam larutan. Pada kondisi pH yang tinggi ini, pertukaran kation tidak akan berlangsung secara efektif karena sebagian besar logam akan membentuk ion kompleks netral atau dalam bentuk hidroksida anionik. Pertukaran ion akan berlangsung lebih efektif pada kondisi pH yang asam atau netral.

6. Waktu Kontak

Penentuan waktu kontak yang menghasilkan kapasitas adsorpsi maksimum dan efektif terjadi pada waktu kesetimbangan. Waktu kesetimbangan itu sendiri dipengaruhi oleh tipe biomassa (kuantitas dan jenis ruang pengikatan), ukuran dan fisiologi biomassa (aktif atau tidak aktif), ion yang terlibat dalam sistem adsorpsi, dan konsentrasi ion logam.

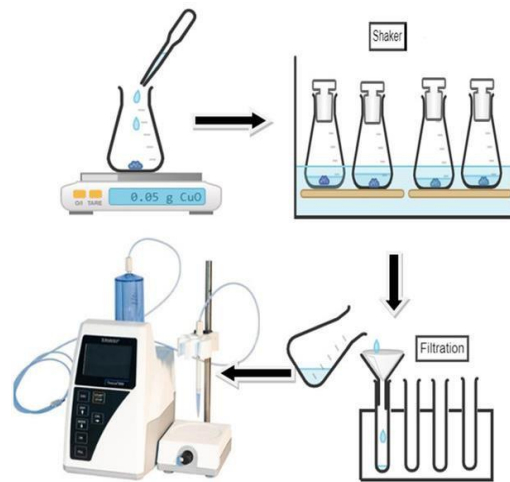
2.4 Metode Adsorpsi

Adsorpsi dapat dilakukan dengan dua metode yaitu metode statis (batch) dan metode dinamis (kontinu atau kolom) sebagai berikut:

1. Metode Statis (*Batch*)

Adsorpsi metode batch merupakan adsorpsi yang dilakukan dengan cara mencampurkan adsorben dan adsorbat dengan jumlah yang tetap. Metode ini dilakukan dengan memasukkan larutan yang mengandung komponen yang diinginkan kedalam wadah yang berisi air yang akan dianalisis dan dikontakkan dengan adsorben pada kecepatan dan waktu tertentu. Adsorben dan air tersebut kemudian dipisahkan dengan cara penyaringan. Komponen yang telah terikat oleh adsorben dilepaskan kembali dengan melarutkan adsorben dalam pelarut tertentu (Subuhan, et al., 2022). Metode batch banyak digunakan dalam penelitian skala laboratorium karena memerlukan bahan dalam jumlah kecil dan waktu yang lebih singkat. Meskipun metode ini ideal untuk studi skala kecil, namun implementasinya kurang efektif untuk aplikasi dalam skala besar. Sistem batch memiliki kelebihan seperti efektif untuk volume air kecil, operasinya

sederhana, dan biaya operasional yang rendah. Namun, metode ini tidak cocok untuk volume air yang besar dan waktu kontak mungkin lebih lama dibandingkan metode lainnya. Sehingga studi adsorpsi dengan pendekatan kesetimbangan dalam sistem batch memungkinkan evaluasi kinerja adsorben sebelum diimplementasikan pada skala yang lebih besar (Sazali, et al., 2020). Gambaran metode adsorpsi secara batch dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut.

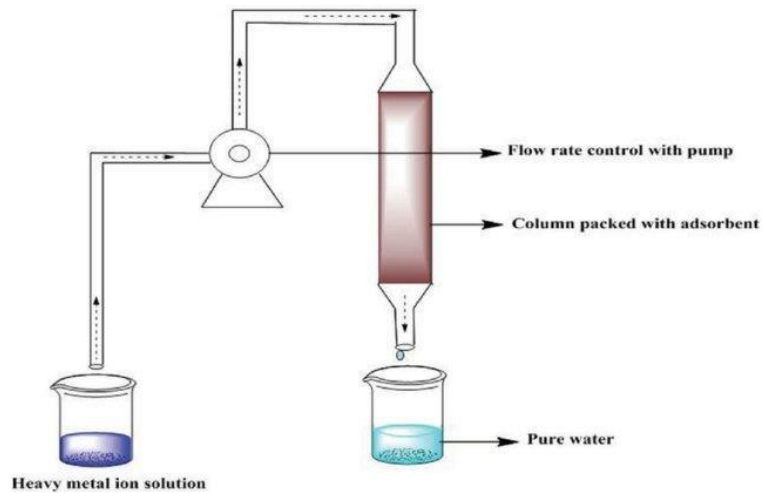


Gambar 2.1 Adsorpsi secara Batch (Baylan, N., İlalan, İ., & İnci, İ.

2. Metode Dinamis (Kontinu atau Kolom)

Adsorpsi metode kontinu atau kolom berbeda dengan metode batch, yaitu melewati larutan limbah ke dalam kolom yang berisi adsorben secara kontinu dengan laju aliran tertentu dan diamati perubahan penurunan konsentrasinya pada selang waktu tertentu. Adsorpsi metode kontinu dapat digunakan secara terus menerus (kontinu) pada laju aliran effluen yang tinggi sehingga dapat diaplikasikan dalam skala besar. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi keberhasilan dari metode ini yaitu laju aliran, konsentrasi larutan, dan ketinggian media (Faisal, et al., 2022). Metode kontinu memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode batch karena mudah dioperasikan, sederhana untuk diaplikasikan dalam skala besar dan proses adsorpsi lebih cepat sehingga pada adsorpsi metode kolom, waktu kontak tidak sepanjang pada metode

batch. Saat ini metode ini sedang banyak dikaji dan dikembangkan untuk menurunkan kadar logam berat pada efluen dalam skala besar (Sazali, et al., 2020). Gambaran metode adsorpsi secara kontinu dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Adsorpsi secara Kontinu (Chakraborty, R.,et al 2022)

2.5 Ampas Tebu

Tebu atau *Saccharum Officinarum* merupakan tumbuhan jenis rumput-rumputan yang mayoritas tumbuh di daerah tropis dan dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan gula. Pabrik gula dalam mengolah tebu menjadi gula menghasilkan empat jenis limbah, yaitu limbah cair, padat, gas, dan juga limbah berbahaya. Akan tetapi limbah yang paling banyak dihasilkan yaitu limbah padat yaitu ampas tebu (bagasse) yang mengandung serat sebanyak 35%-40% dari berat tebu (Hamriani, et al., 2016). Berikut bentuk dari ampas tebu dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ampas Tebu

Ampas tebu memiliki kandungan 45% selulosa, 25% lignin, 25% hemiselulosa, air 48-52% dan gula 3,3%. Ampas ini memiliki nilai ekonomis yang cukup tinggi, mudah didapat, mempunyai sifat mekanik yang cukup baik, tidak korosif, *low density*, dan tidak membahayakan kesehatan dan dapat terdegradasi secara alami sehingga lebih ramah lingkungan. Selulosa merupakan polisakarida yang memiliki sifat biokompatibilitas, *biodegradable*, dan relatif ekonomis dalam penggunaannya (Novia et al., 2021). Adapun menurut penelitian Yosephine (2012), komposisi kimia ampas tebu dapat dilihat pada tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Komposisi Ampas Tebu

Kandungan	Kadar (%)
Abu	3
Lignin	22
Selulosa	37
Sari	1
Pentosan	27
SiO ₂	3

Sumber: Yosephine, A., Gala, V., Ayucitra, A., & Retnoningtyas, E. S. (2012)

2.6 Atomic Adsorption Spectrophotometer (AAS)

Atomic Adsorption Spectrophotometer atau Spektrofotometer Serapan Atom merupakan suatu perangkat yang digunakan dalam metode analisis untuk mendeteksi unsur-unsur logam dan metaloid. Pengukurannya didasarkan pada penyerapan cahaya pada panjang gelombang tertentu oleh atom logam dalam kondisi bebas. Prinsip dari metode AAS yaitu absorpsi cahaya oleh atom, atom-atom menyerap cahaya tersebut pada panjang gelombang tertentu tergantung pada sifat unsurnya. Cahaya pada gelombang ini mempunyai energi yang cukup untuk mengubah tingkat energi elektronik suatu atom. Penggunaan AAS dalam analisis kadar logam sangatlah efektif karena mempunyai sensitivitas tinggi, cepat, dan spesifik untuk unsur yang ditentukan, dan dapat digunakan untuk penentuan kadar unsur yang konsentrasinya sangat kecil tanpa harus dipisahkan terlebih dahulu (Lolo, A., et al., 2020).

Hasil analisis sampel dari AAS berupa nilai pengukuran kemampuan penyerapan suatu adsorben. Dalam pengujian ini, AAS menggunakan monokromator untuk mendapatkan kurva kalibrasi dari adsorben yang diuji.

Setiap elemen yang diuji dengan AAS memiliki tingkat energi yang berbeda, menghasilkan garis serapan yang sangat sempit. Monokromator dalam AAS berfungsi untuk memisahkan ribuan garis yang dihasilkan oleh semua sampel. Oleh karena itu, pemilihan monokromator sangat penting untuk mendeteksi kemampuan penyerapan atom.

2.7 Fourier Transform Spectroscopy

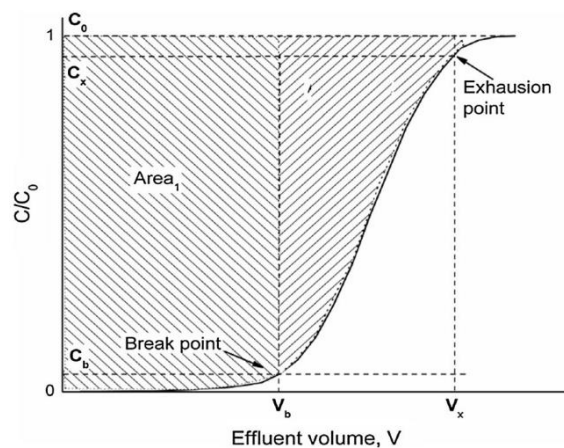
Fourier Transformed Infrared (FTIR) merupakan salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi, mengidentifikasi senyawa khususnya senyawa organik baik secara kualitatif maupun kuantitatif serta menganalisis campuran dari sampel yang dianalisis tanpa merusak sampel tersebut. Prinsip kerja FTIR melibatkan interaksi antara energi dan materi. Sinar inframerah melewati celah menuju sampel, dengan celah tersebut berfungsi mengatur jumlah energi yang diteruskan ke sampel. Sebagian sinar inframerah diserap oleh sampel, sementara sisanya diteruskan melalui permukaan sampel menuju detektor. Sinyal yang terukur kemudian dikirim ke komputer dan dicatat dalam bentuk puncak-puncak serta hasilnya dinyatakan dalam satuan bilangan gelombang (cm^{-1}) (Sari, et al., 2018).

2.8 Scanning Electron Microscope

Scanning Electron Microscope (SEM) merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang mampu menghasilkan gambaran permukaan sampel dengan resolusi tinggi untuk mengetahui karakteristik bahan yang memberikan informasi tentang struktur, komposisi, dan kerusakan pada bahan material. Prinsip kerja SEM adalah dengan memanfaatkan hamburan balik elektron (*electron beam*) pada permukaan objek dan mengambil gambar dengan mendeteksi elektron yang muncul pada permukaan objek (Septiano., et al., 2021). SEM harus dioperasikan dengan pengaturan parameter elektron seperti *high voltage*, *spot size*, bias dan *beam current* juga parameter optik seperti kontras, fokus dan astigmatisma yang tepat sehingga diperoleh hasil gambar yang optimal secara ilmiah dan tidak memberikan interpretasi ganda. Selain itu, proses pengambilan gambar dan analisis kimia dengan SEM sangatlah dipengaruhi oleh jenis sampel yang akan diuji (Sujanto, et al 2015).

2.9 Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*)

Kurva terobosan (*breakthrough curve*) merupakan perbandingan antara konsentrasi gas yang keluar dari kolom dengan konsentrasi gas yang masuk ke dalam kolom terhadap waktu. Bentuk karakteristik dari kurva ini bergantung pada kesetimbangan antara fase padat dan fase cair, yang didasarkan pada proses kinetika adsorpsi (Al Kindi et al., 2023). Fungsi dari kurva terobosan ini untuk mengidentifikasi dua titik penting dalam proses adsorpsi, yaitu titik breakthrough (*break point*) dan titik jenuh (*exhaust point*). Titik breakthrough merupakan awal terbentuknya zona perpindahan massa (*mass-transfer zone*), yang ditandai dengan mulai terdeteksinya adsorbat dalam efluen. Titik ini ditandai dengan naiknya rasio konsentrasi effluent dengan umpan secara signifikan. Sedangkan titik exhaust (*exhaust point*) adalah titik berakhirnya *mass-transfer zone*, dimana pada titik ini ditandai dengan rasio antara effluent dan umpan hampir sama. Berikut gambaran ideal untuk kurva terobosan .



Gambar 2.4 Kurva Terobosan (Patel, H. 2019)

2.10 Model Kinetika Sistem Adsorpsi

Model kinetika adsorpsi digunakan untuk mengolah data sebagai penentu variabel yang terlibat dalam proses adsorpsi serta mekanisme adsorpsi yang terjadi sehingga dapat diimplementasikan untuk mengontrol pencemaran. Selain digunakan untuk memahami kemungkinan mekanisme reaksi adsorpsi yang terlibat, data ini juga digunakan untuk pendekatan atau prediksi dalam pengaplikasiannya pada adsorpsi sistem kolom (Basuki et al., 2022). Adapun model yang dapat digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi pada metode *fixed-bed column* yakni model Thomas, Yoon-Nelson, dan Adam & Bohart. Model Thomas yang merupakan model umum pada proses kontinyu dengan didasarkan pada data konsentrasi influen dan effluent, laju aliran pada flow process, serta waktu kontak larutan yang dilewatkan pada kolom adsorben (Harnowo, A., et al, 2019). Model Yoon–Nelson berfokus pada aliran keluar (*outlet*), dengan asumsi bahwa laju pengurangan penyerapan untuk setiap molekul adsorbat sebanding dengan probabilitas adsorpsi dan breakthrough dari adsorbat ke adsorben (Myers et al, 2022). Sedangkan menurut Nwabanne (2022), model Adams-Bohart mengasumsikan bahwa laju adosorpsi sebanding dengan kapasitas residu dari adsorben dan konsentrasi yang teradsorpsi.

2.11 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan untuk referensi selama penelitian, teori penelitian pada peneliti sebelumnya dapat dijadikan bahan acuan dan perbandingan. Beberapa penelitian terdahulu yang pernah melakukan penelitian pada adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

Referensi	Jenis Adsorben	Ringkasan Penelitian
<i>Penyerapan logam dan kesadaran pada air sumur</i> Annisa, M. et al. , (2023).	Arang aktif ampas tebu	a) variasi massa 2,5 g, 3 g, 3,5 g, dan 4 g b) variasi waktu (menit) 30, 60, dan 90 c) Metode sistem batch Hasil: Adanya pengaruh variasi massa penyerapan logam Fe^{2+} terjadi pada konsentrasi massa sebesar 4 gram dengan penyisihan 99,81% pada waktu kontak 120 menit. Dalam kapasitas penyerapan logam Fe^{2+} dimana kapasitas penyerapan maksimum diperoleh sebesar 0,042 mg/gr pada waktu kontak maksimum yaitu 120 menit dan jumlah adsorben minimum yaitu 2,5 gram. Sedangkan pada penyerapan ion Ca^{2+} terlihat pada penyisihan tertinggi terjadi pada konsentrasi massa sebesar 4 gram dengan penyisihan 53,84% pada waktu kontak 90 menit.

<p><i>Karbon aktif ampas tebu sebagai adsorben penurun kadar besi dan mangan limbah air asam tambang</i> Imandi, A. et al.,(2020)</p>	<p>Karbon aktif ampas tebu</p>	<p>a) Variasi bobot karbon aktif 1 gram, 2 gram, dan 3 gram. b) Variasi waktu kontak adsorben selama 30, 60, dan 90 menit. c) Metode sistem batch</p> <p>Hasil: Efektivitas penurunan kadar besi pada sampel limbah air asam tambang berkisar 21,72% hingga 79,65% dengan bobot optimum 3 gram tetapi waktu kontaknya lebih singkat yaitu 60 menit dengan % removal terbesar 60% dan kadar mangan sebesar 4,12 mg/L</p>
<p><i>Agricultural waste of sugarcane bagasse as efficient adsorbent for lead and nickel removal from untreated wastewater: Biosorption, equilibrium isotherms, kinetics and desorption studies.</i> Ezeonuegbu, Blessing Amaka, et al (2021)</p>	<p>Ampas tebu</p>	<p>a) Variasi pH yakni 4, 5, dan 6 b) Suhu antara 30-70°C c) Waktu kontak 30 – 150 menit d) Massa adsorben 0,3 – 0,7 gram e) Metode sistem batch</p> <p>Hasil: Kondisi optimum untuk efisiensi removal untuk Pb (II) dan Ni (II) terjadi pada pH 6, suhu 30°C, waktu kontak 90 menit, dan dosis adsorben 0,5 gram. Efisiensi removal ampas tebu sekitar 89,31% - 96,33% untuk Pb (II) dan Ni (II). Untuk kapasitas adsorpsi maksimum monolayer Pb (II) dan Ni (II) adalah 1,61 mg/g dan 123,46 mg/g</p>
<p><i>The application of eggshells and sugarcane bagasse as potential biomaterials in the removal of heavy metals from aqueous solutions</i> Isa, Y. M., Harripersadth, C., Musonge, P., Sayago, A., & Morales, M. G. (2020)</p>	<p>Cangkang telur dan ampas tebu</p>	<p>a) Waktu kontak: 0 – 120 menit b) Variasi pH yakni 2, 3, 4, 5, 6, dan 7 c) Ukuran partikel: 75-250 µm d) Metode sistem batch</p> <p>Hasil: Penyerapan Pb memiliki rentang waktu 25 menit untuk cangkang telur dan untuk ampas tebu memerlukan 30 menit. Kapasitas adsorpsi monolayer maksimum untuk penghilangan Pb dan Cd menggunakan kulit telur masing-masing sebesar 277,78 dan 13,62</p>

		mg/g. Untuk ampas tebu, kapasitas maksimum adalah 31,45 mg/g
<p><i>Aplikasi sistem kontinyu menggunakan karbon aktif untuk penurunan kadar logam Cu dan Zn dalam air limbah</i></p> <p>Kristianingrum, S., Sulistyani, S., Fillaeli, A., Siswani, E. D., & Nafiisah, N. H. (2020)</p>	Karbon aktif dari daun pandan laut	<p>a) Variasi massa karbon aktif sebesar 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; dan 1 gram.</p> <p>b) Metode sistem kontinu</p> <p>c) Variasi laju alir cepat (keran terbuka penuh) dan variasi laju alir lambat (keran terbuka sebagian)</p> <p>Hasil: massa adsorben dan laju alir yang optimum terhadap efisiensi adsorpsi logam Cu dan Zn oleh karbon aktif dari daun pandan laut teraktivasi ZnCl_2 dalam sistem kontinyu berturut-turut adalah 0,7 gram dan 0,9 gram. Sementara untuk laju alir optimum untuk logam Cu adalah 0,3 mL/menit dan untuk logam Zn adalah 0,2 mL/menit. Efisiensi adsorpsi yang paling tinggi dari adsorben daun pandan laut teraktivasi ZnCl_2 terhadap adsorpsi logam Cu dan Zn dalam sistem kontinyu berturut-turut sebesar 96,6854% dan 38,6576%. Kapasitas adsorpsi tertinggi dari adsorben daun pandan laut teraktivasi ZnCl_2 terhadap adsorpsi logam Cu dan Zn dalam sistem kontinyu berturut-turut adalah 36,2083 mg/g dan 9,6701 mg/g.</p>

<i>Adsorption of Cd (II) in a semi-continuous process by residual charcoal from the pyrolyzed oil palm shells</i> Faisal, et al. (2022)	Cangkang sawit	a) Variasi konsentrasi sampel 30, 60, 90, 120, dan 150 mg/liter b) Variasi pH yakni 1, 3, dan 5 c) Variasi ketinggian adsorben sebesar 20, 35, dan 50 cm d) Variasi Debit 5,10, dan 20 mL/min e) Metode sistem kontinu Hasil: Hasil penelitian menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi terbaik diperoleh pada konsentrasi awal 120 mg/L, pH 5, diameter dalam 26 mm, tinggi kolom 50 cm, dan laju alir 10 mL/menit.
--	----------------	--

Berbeda dari penelitian sebelumnya, penelitian ini menerapkan metode kontinu, yang masih jarang digunakan dalam penelitian sejenis. Selain itu, penelitian ini juga memodifikasi ampas tebu yang diaktivasi menggunakan Asam Sitrat ($C_6H_8O_7$). Dalam metode kontinu ini ukuran kolom yang digunakan yaitu 22 x 21mm dengan variasi laju alir alir cepat (5 mL/menit) dan laju alir lambat (7,5 mL/menit) serta variasi ketinggian adsorben yaitu 10 dan 15 cm.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi

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

3.2 Alat dan Bahan

Berikut alat dan bahan yang digunakan selama penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Alat dan Bahan

Alat	Bahan
AAS	Ampas Tebu
SEM	Asam Sitrat
FTIR	Aquades
Neraca Analitik	Larutan logam artificial Pb
Pipet Volume (1, 10, dan 25 mL)	
Loyang	
Karet hisap	
Oven	
Gelas beaker (100, 250, dan 1000 mL)	
Spatula	
pH universal	
Pipa Akrilik	
Dosing Pump	

3.3 Parameter dan Metode Uji

Pada penelitian ini parameter yang akan diuji adalah timbal (Pb) dengan menggunakan larutan logam artificial. Prosedur kerja penelitian ini mengacu pada SNI Nomor 06-6989-84 tahun 2019 Cara Uji kadar logam terlarut dan logam total secara Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)-nyala.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan pada penelitian ini menggunakan variabel terikat dan variabel bebas sebagai berikut:

1. Variabel Terikat:

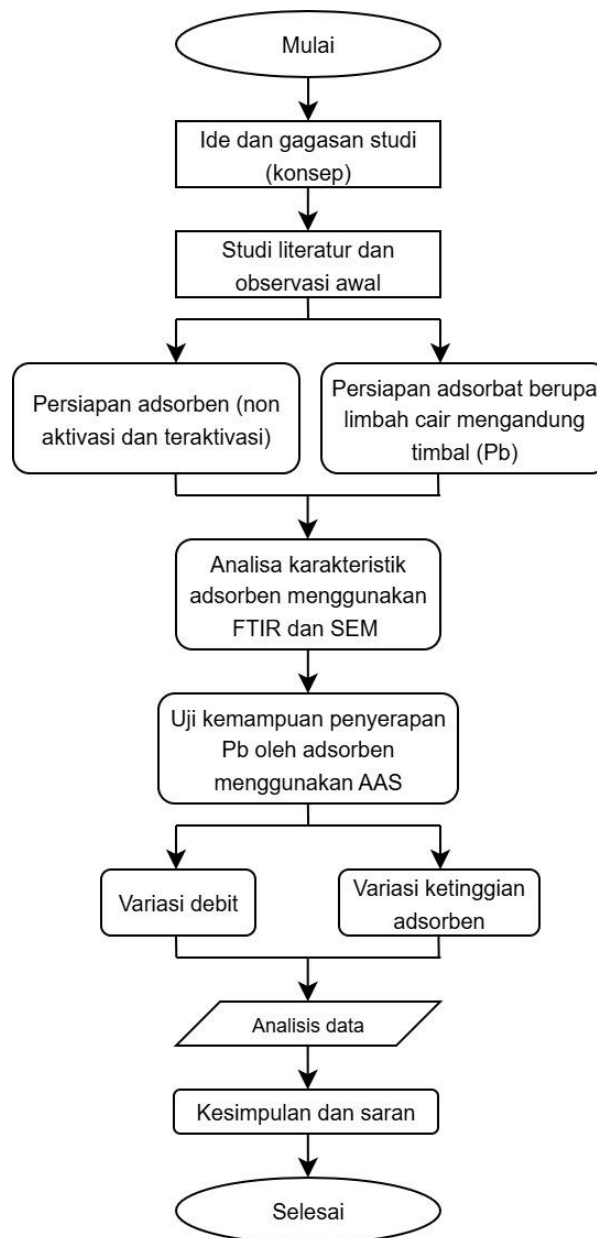
- a. Adsorben dari ampas tebu
- b. Aktivasi adsorben dengan $C_6H_8O_7$ (asam sitrat) 0,4M
- c. Larutan induk (Pb) timbal 1000 mL dengan konsentrasi 1000 mg/L
- d. Larutan uji dengan konsentrasi 15 – 25 mg/L
- e. pH larutan timbal (Pb) adalah 5,5 - 6
- f. Waktu kontak 120 menit

2. Variabel Bebas:

- a. Variasi debit atau laju alir lambat 5 mL/menit dan cepat 7,5 mL/menit
- b. Variasi ketinggian adsorben 15 cm dan 10 cm

3.5 Prosedur Penelitian

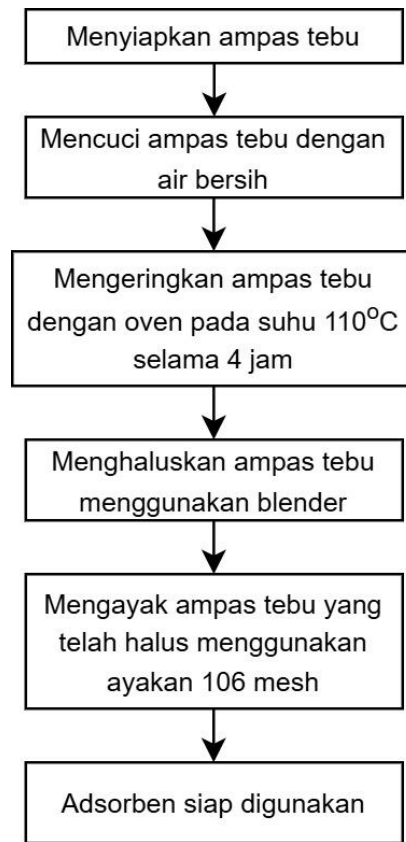
Tahapan pada penelitian efektivitas adsorpsi logam Pb menggunakan media adsorben ampas tebu secara garis besar terdiri dari preparasi adsorben, aktivasi adsorben secara kimiawi serta proses adsorpsi. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut



Gambar 3.1 Alur Penelitian

3.5.1 Preparasi Adsorben Ampas Tebu

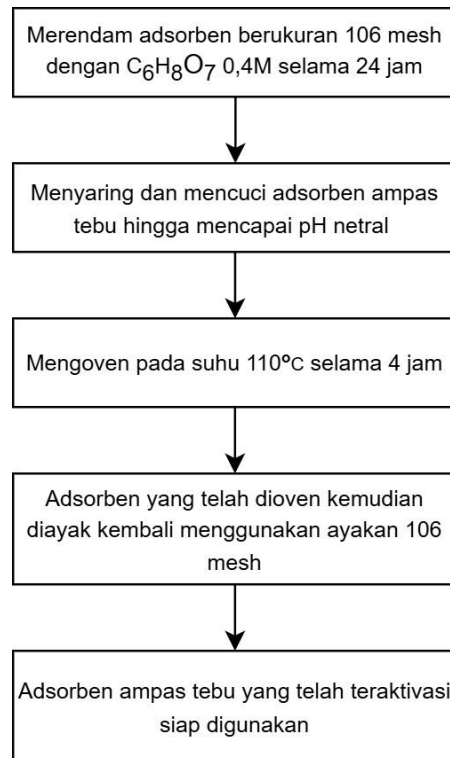
Pembuatan adsorben yang berasal dari ampas tebu diperoleh dari penjual es tebu yang berada di Jl. Kinanti, Manukan, Condong Catur, Depok, Kabupaten Sleman. Preparasi adsorben ampas tebu ini mengacu pada penelitian Zahra (2022) yang diawali dengan memotong ampas tebu menjadi ukuran kecil kemudian diayak menggunakan ayakan 106 mesh. Alur pembuatan adsorben ampas tebu dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Diagram Alir Preparasi Adsorben Ampas Tebu

3.5.2 Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi

Pembuatan ampas tebu teraktivasi mengacu pada penelitian Rielsa (2023) dengan penggunaan asam sitrat ($C_6H_8O_7$) yaitu sebesar 0,4 M. Metode aktivasi dilakukan dengan merendam limbah ampas tebu pada larutan $C_6H_8O_7$ 0,4 M (Asam Sitrat) selama 24 jam dengan perbandingan 1 : 16 antara 1 gram adsorben ampas tebu dengan 16 mL larutan $C_6H_8O_7$ 0,4 M (Asam Sitrat). Pada penelitian ini dalam sekali proses aktivasi menggunakan 50 gram adsorben dan 800 mL larutan asam sitrat 0,4 M. Pembuatan ampas tebu teraktivasi ini bertujuan untuk memperluas permukaan ampas tebu sehingga dapat mengikat adsorbat lebih banyak. Berikut diagram alir pengaktifasian ampas tebu menggunakan larutan $C_6H_8O_7$ 0,4 M dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Diagram Alir Preparasi Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi

3.5.3. Preparasi Rangkaian Sistem Kontinu (Kolom)

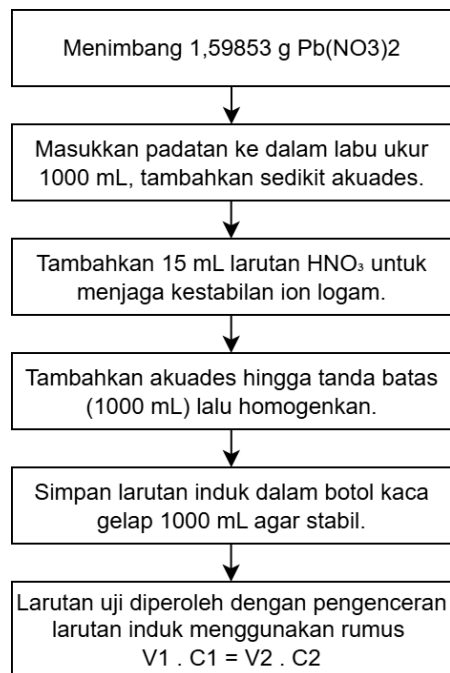
Preparasi rangkaian sistem kontinu atau reaktor sistem kontinu (kolom) mengacu pada penelitian (Rielsa, 2023) yang diawali dengan menyiapkan alat dan bahan untuk rangkaian sistem. Alat dan bahan yang digunakan seperti pipa akrilik (21 x 22 mm), selang, pompa peristaltic (kapasitas *flow rate* 2 – 17 mL/min), kran, penggaris, gunting, dan wadah penampung hasil uji serta spons. Setelah kolom dirangkai kemudian kolom dilapisi dengan spons pada bagian dasar kolom dan bagian atas kolom. Kolom terdiri atas selang dan kran yang telah diatur pada posisi tetap. Selang yang telah dihubungkan dengan pompa peristaltic kemudian dihubungkan juga dengan kolom. Selanjutnya efluen yang keluar ditampung dengan menggunakan gelas beaker. Proses sistem kontinu yang dilakukan dalam percobaan adalah tipe *fixed bed column* dengan media adsorben dalam keadaan terendam. Kolom yang digunakan dalam proses kontinu ini sebanyak 1 buah kolom yang disusun seri dan limbah dialirkan secara gravitasi. Skema rangkaian sistem kontinu dibuat sendiri dengan beberapa alat dan bahan yang mana sistemnya sendiri dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4 Rangkaian Adsorpsi Sistem Kontinu

3.5.4 Preparasi Larutan Induk Pb

Larutan induk Pb digunakan dalam beberapa prosedur dalam penelitian ini. Pembuatan larutan Pb 100 mg/L diawali dengan menimbang 0,16 gram $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Senyawa tersebut kemudian dilarutkan dalam sedikit akuades hingga larut sempurna. Setelah itu, larutan dimasukkan ke dalam labu ukur 1000 mL, kemudian ditambahkan akuades hingga mencapai tanda batas tetapi sebelum itu tambahkan 15 mL HNO_3 . Larutan dikocok hingga homogen sehingga menghasilkan larutan induk Pb dengan konsentrasi 100 mg/L. Tahapan pembuatan larutan induk Pb disajikan pada Gambar 3.5



Gambar 3.5 Pembuatan Larutan Induk Pb 1000 mg/L

3.5.5 Karakteristik Adsorben

Setelah dilakukannya aktivasi pada adsorben ampas tebu, kemudian dapat dilakukan karakterisasi dari adsorben ampas tebu. Uji karakteristik adsorben ampas tebu tersebut dilakukan menggunakan 2 instrumen yaitu *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Karakterisasi dengan instrumen FTIR digunakan untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada adsorben. Analisis gugus fungsi menggunakan FTIR bertujuan untuk mengetahui proses fisika atau kimia yang terjadi selama pencampuran (MB &

Illing, 2017). Sedangkan karakterisasi dengan instrumen SEM digunakan untuk mengetahui tampak permukaan dan pori-pori adsorben.

3.5.6 Penentuan dan Pengaturan Debit atau Laju Alir

Untuk menentukan dan mengatur debit aliran atau *flow rate* limbah yang akan diolah dalam penelitian ini, dilakukan percobaan dengan metode pengukuran tertentu. Pengukuran debit dilakukan dengan mengalirkan air melalui sistem percobaan dan mencatat volume yang terkumpul dalam selang waktu tertentu. Proses ini diawali dengan menentukan volume wadah yang digunakan, lalu air dialirkan hingga wadah mencapai batas ketinggian yang telah ditentukan. Waktu yang dibutuhkan untuk memenuhi wadah ini dicatat menggunakan stopwatch, sehingga debit dapat dihitung menggunakan persamaan yang sesuai. Dalam penelitian ini, debit aliran ditentukan berdasarkan variasi laju alir yang telah ditetapkan, yaitu 5 mL/menit untuk aliran lambat dan 7,5 mL/menit untuk aliran cepat. Oleh karena itu, dalam beberapa kondisi, waktu dapat diperlakukan sebagai variabel tetap, sementara volume air menjadi variabel yang berubah sesuai dengan debit yang digunakan. Persamaan untuk menghitung debit atau laju alir dapat dilihat pada persamaan 3.1 dibawah ini.

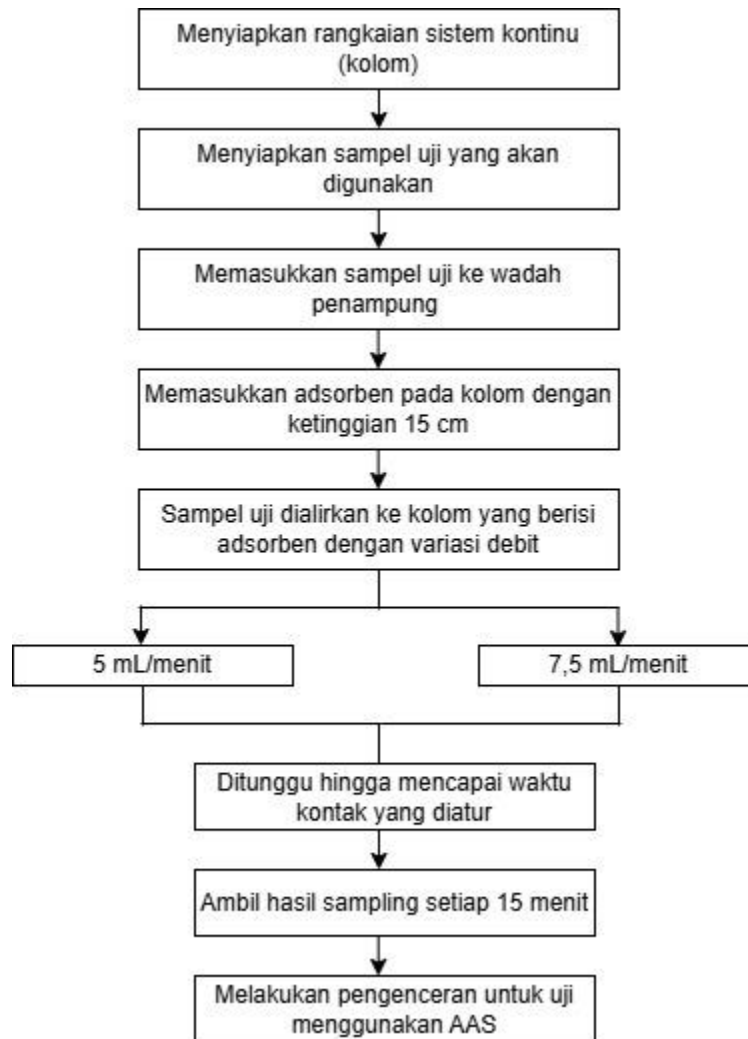
$$\text{Debit (Q)} = \frac{\text{Volume (V)}}{\text{Waktu (t)}} \quad (3.1)$$

Dimana:

- Q = Debit (mL/menit)
- V = Volume (mL)
- t = Waktu (menit)

3.5.7 Penentuan Debit atau Laju Alir Optimum

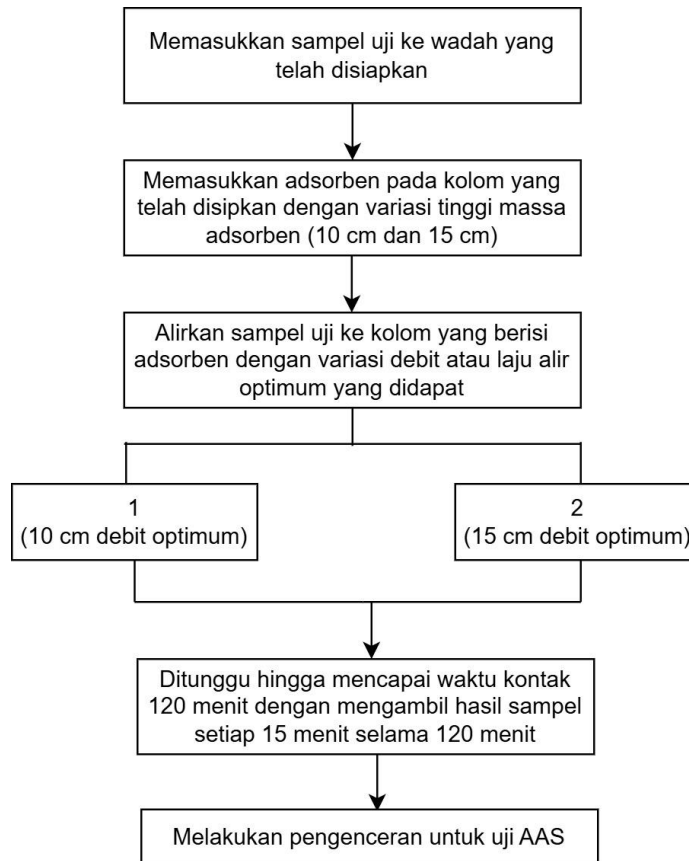
Adapun dalam penentuan debit atau laju alir dilakukan dengan mengalirkan air limbah yang mengandung timbal (Pb) dalam kondisi setimbang dengan konsentrasi 15-25 mg/L. Varasi laju alir diantaranya 5 mL/menit (lambat) dan 7,5 mL/menit (cepat). Tahapan pelaksanaan penentuan tinggi adsorben optimum dan debit optimum dapat dilihat pada gambar 3.5 berikut.



Gambar 3.6 Diagram Alir Penentuan Debit Optimum

3.5.8 Penentuan Ketinggian Adsorben Optimum

Variasi tinggi massa adsorben yang digunakan yakni 10 cm (4,1 gram) dan 15 cm (6,1 gram) dengan debit atau laju alir optimum yang didapat dari penentuan debit optimum. Tahapan pelaksanaan penentuan tinggi massa adsorben optimum dan debit optimum dapat dilihat pada Gambar 3.6 dibawah ini.



Gambar 3.6 Diagram Alir Penentuan Ketinggian Adsorben Optimum

3.5.9 Penentuan Kurva Trobosan (*Breakthrough Curve*)

Fungsi dari kurva terobosan ini untuk mengidentifikasi dua titik penting dalam proses adsorpsi, yaitu titik breakthrough (*break point*) dan titik jenuh (*exhaust point*). Setelah mengetahui kapasitas adsorben yang paling optimal, selanjutnya dilakukan pembuatan breakthrough curve atau kurva terobosan yang mana dibuat dengan mengalirkan limbah Timbal (Pb) pada ketinggian adsorben optimum dan debit optimum dengan waktu tertentu sampai adsorben jenuh. pembuatan breakthrough curve atau kurva terobosan digunakan untuk melihat seberapa cepat adsorben dari sumpit bekas dapat jenuh dan tidak dapat dipakai lagi atau untuk menunjukkan profil kejenuhan adsorben tersebut.

3.5.10 Model Kinetika Sistem Adsorpsi

Memperkirakan konsentrasi zat yang keluar dari kolom adsorpsi tidaklah mudah. Oleh karena itu, diperlukan informasi tentang kapasitas maksimum adsorben dalam kolom saat proses perancangan. Model Thomas digunakan untuk membantu memperkirakan hal tersebut. Model ini merupakan salah satu metode

yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi kinerja kolom adsorpsi. Modelnya dapat dilihat pada Persamaan 3.2 dibawah ini.

$$\ln \left[\frac{C_o}{C_t} - 1 \right] = \frac{K_{Th} q_o x}{Q} - K_{Th} C_o t \quad (3.2)$$

Dimana:

- K_{Th} : Konstanta Thomas (L/mg/menit)
- q_o : Kapasitas adsorpsi (mg/g)
- X : Massa adsorben (g)
- Q : Laju alir (L/menit)
- C_o : Konsentrasi awal (mg/L)
- t : Waktu (menit)
- C_t : Konsentrasi akhir (mg/L)

Model Yoon-Nelson adalah model yang relatif sederhana yang mengasumsikan bahwa laju pengurangan penyerapan untuk setiap molekul adsorbat sebanding dengan probabilitas adsorpsi dan breakthrough adsorbat ke adsorben. Modelnya dapat dilihat pada Persamaan 3.3 dibawah ini.

$$\ln \left[\frac{C_t}{C_o - C_t} \right] = K_{YN} \cdot t - K_{YN} \tau \quad (3.3)$$

Dimana:

- K_{YN} : Konstanta kinetik Yoon-Nelson (menit)
- τ : Waktu yang diperlukan untuk mencapai 50% breakthrough adsorbat (menit)
- t : Waktu pengambilan sampel (menit)

Plot nilai $\ln (C_t/(C_o - C_t))$ terhadap t membentuk garis lurus dengan slope menunjukkan nilai k_{YN} dan intercept menunjukkan nilai $-\tau k_{YN}$. Berdasarkan nilai τ yang dihasilkan, maka kapasitas adsorpsi kolom pada model Yoon-Nelson (q_{YN} , mg/g) dapat ditentukan dengan Persamaan 3.4 berikut.

$$q_{YN} = \frac{q_{total}}{m} = \frac{C_o v \tau}{1000m} \quad (3.4)$$

Model Adams-Bohart berfungsi untuk menjelaskan keterkaitan antara waktu dan tinggi lapisan adsorben dalam sistem kolom. Melalui model ini, dapat diprediksi adanya hubungan linier antara ketinggian media adsorpsi dan waktu yang diperlukan hingga tercapainya titik breakthrough. Bentuk

linier persamaan Model Adam and Bohart dapat dilihat pada Persamaan 3.5 berikut.

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_o}\right) = K_{AB} C_o t - \frac{K_{AB} N_0 Z}{U} \quad (3.5)$$

Dimana:

- K_{AB} : Konstanta Adams and Bohart (L/mg/menit)
- N_0 : Kapasitas adsorpsi maksimum volumetrik (mg/L)
- Z : Tebal adsorben (cm)
- F : Laju alir (mL/menit)
- C_o : Konsentrasi awal (mg/L)
- t : Waktu (menit)
- C_t : Konsentrasi akhir (mg/L)
- U : Kecepatan aliran limbah melewati kolom (cm/menit)

Konstanta kinetik (K_{AB}) dan kapasitas adsorpsi kolom ditentukan dari memasukkan $\ln C_t/C_o$ terhadap t , dengan sebagai slope dan intersep. Berdasarkan nilai K_{AB} yang dihasilkan, maka kapasitas adsorpsi kolom pada model Adam and Bohart (N_0 mg/L) dapat ditentukan dengan Persamaan 3.6 berikut.

$$N_0 = \frac{\text{intersep} \cdot U}{K_{AB} \cdot Z} \quad (3.6)$$

3.5.11 Analisis Efisiensi Kemampuan Adsorben

Analisis efisiensi kemampuan adsorben dilakukan setelah semua rangkaian pengujian adsorpsi telah melakukan uji hasil menggunakan AAS. Setelah diketahui konsentrasi awal dan akhir dari logam timbal (Pb) yang diadsorpsi menggunakan adsorben ampas tebu dengan variasi debit atau laju alir dan waktu kontak optimum, maka dilanjutkan dengan melakukan analisis efisiensi kemampuan adsorben untuk menyerap logam Pb dalam konsentrasi yang telah ditentukan. Efisiensi penyisihan Pb dihitung dengan menggunakan persamaan 3.7 sebagai berikut:

$$\% \text{ pensyisihan } = \frac{C_o - C_a}{C_o} \quad (3.7)$$

Dimana:

- C_o = Konsentrasi awal logam (mg/L)
- C_a = Konsentrasi akhir logam (mg/L)

BAB IV

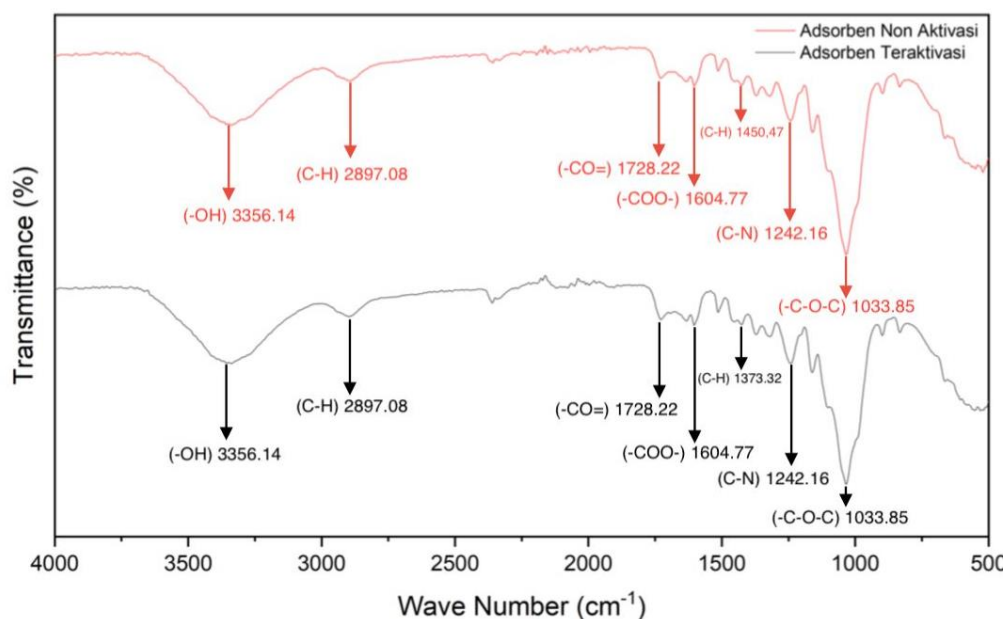
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Adsorben

4.1.1 FTIR (*Fourier Transform InfraRed*)

Fourier Transformed Infrared (FTIR) merupakan salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk mendeteksi gugus fungsi, mengidentifikasi senyawa khususnya senyawa organik baik secara kualitatif maupun kuantitatif serta menganalisis campuran dari sampel yang dianalisis tanpa merusak sampel tersebut. Pada penelitian ini FTIR digunakan untuk mengetahui gugus fungsi yang ada pada material adsorben ampas tebu khususnya pada keberadaan selulosa yang berperan dalam menyerap logam berat Timbal (Pb). Selulosa umumnya mengandung gugus fungsi karbonil (C=O) dan gugus hidroksil (–OH) dimana interaksi logam dengan gugus fungsional yang ada di permukaan adsorben dapat digunakan sebagai media penyerap logam berat. Menurut Ezeonuegbu et al., (2021) komponen kimiawi yang terdapat pada ampas tebu yaitu 42% selulosa, 25% hemiselulosa, dan 20% lignin. Gugus (–OH) pada selulosa memberikan sifat polar pada adsorben, sehingga meningkatkan afinitasnya terhadap zat polar. Adsorpsi ion logam bermuatan positif berlangsung melalui mekanisme pertukaran ion, di mana kation menggantikan ion H^+ pada gugus –OH permukaan (Susilawati, N., & Andryanie, F., 2019).

Pengujian menggunakan panjang gelombang $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$. Luaran dari pengujian FTIR berupa grafik yang menghubungkan antara bilangan gelombang (cm^{-1}) pada sumbu x dan transmittan (%) pada sumbu y. Area pada grafik spektrum IR dibagi menjadi empat area. Area pertama yang merupakan *single bond stretch* terdapat pada gelombang $4000\text{--}2500\text{ cm}^{-1}$, area kedua adalah area *triple bonds* pada area gelombang $2500\text{--}2000\text{ cm}^{-1}$, sedangkan area ketiga dan keempat pada rentang $2000\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ merupakan area *double bonds* dan *fingerprint region skeletal vibration*. Berikut hasil analisis dengan FTIR mengacu pada hasil data Alifah (2025) pada adsorben berbasis ampas tebu dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut



Gambar 4.1 Hasil Uji FTIR Adsorben Ampas Tebu Non Aktivasi dan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi

Dari grafik yang ada pada Gambar 4.1, dapat diidentifikasi titik puncak serapan (*peak*) dengan rincian klasifikasi pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rincian Klasifikasi Gugus Fungsi

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

(Sumber: Data Primer, 2025)

Klasifikasi gugus fungsi berdasarkan Tabel 4.1 diatas dapat diklasifikasikan sebagai berikut. Sebagaimana telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya bahwa ampas tebu memiliki gugus fungsi (-OH) dan (C=O) yang berasal dari kandungan selulosa pada ampas tebu. Pada adsorben ampas tebu non-aktivasi dan adsorben ampas tebu teraktivasi

memiliki gugus fungsi hidroksil (-OH) yang terlihat pada bilangan gelombang 3356,14 cm^{-1} dan gugus fungsi alkana (C-H *stretching*) pada bilangan 2897,08 cm^{-1} . Adapun rentang bilangan gelombang untuk gugus fungsi (-OH) adalah sekitar 3200 – 3600 cm^{-1} yang mana pada gugus fungsi pada bilangan gelombang tersebut menandakan adanya senyawa alkohol, fenol, maupun air. gugus fungsi tersebut berasal dari komponen penyusun biomassa seperti hemiselulosa, selulosa, serta lignin (Andrianto et al., 2024). Sedangkan bilangan gelombang (C-H) berada pada rentan antara 2800 - 2900 cm^{-1} yang berasal dari hemiselulosa dan selulosa. Pada adsorben ampas tebu non aktivasi dan adsorben ampas tebu teraktivasi memiliki gugus fungsi karbonil (C-O=) yang terlihat pada bilangan gelombang 17288.22 cm^{-1} . Gugus fungsi (C-O=) terdapat pada rentang bilangan gelombang 1680 – 17800 cm^{-1} . Menurut Pratama et al., (2018), adanya ikatan (C-O=) merepresentasikan gugus karboksilat atau karbonil yang terdapat pada cincin aromatic.

Adsorben ampas tebu non aktivasi dan adsorben ampas tebu non aktivasi memiliki gugus fungsi karboksil (-COO-) yang berasal dari selulosa yang terlihat pada bilangan gelombang 1604,77 cm^{-1} . Gugus fungsi (-COO-) terdapat pada rentan bilangan 1560 – 1610 cm^{-1} . Kemudian bilangan gelombang pada 1242,16 cm^{-1} dalam spektrum FTIR menunjukkan adanya gugus amina alifatik khususnya getaran regangan (*stretching*) (C-N). Gugus ini terdeteksi baik pada adsorben non-aktivasi maupun teraktivasi. Gugus ini merupakan bagian dari senyawa nitrogen yang secara alami terdapat dalam biomassa ampas tebu. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Ahmad et al., (2020) yang menjelaskan bahwa bilangan gelombang sekitar 1,244 cm^{-1} pada spektrum FTIR khususnya pada adsorben ampas tebu tanpa perlakuan yang merepresentasikan C-N *stretching* dari aliphatic amines, dan secara langsung menunjukkan keberadaan gugus amina dalam bahan biomassa sebelum aktivasi.

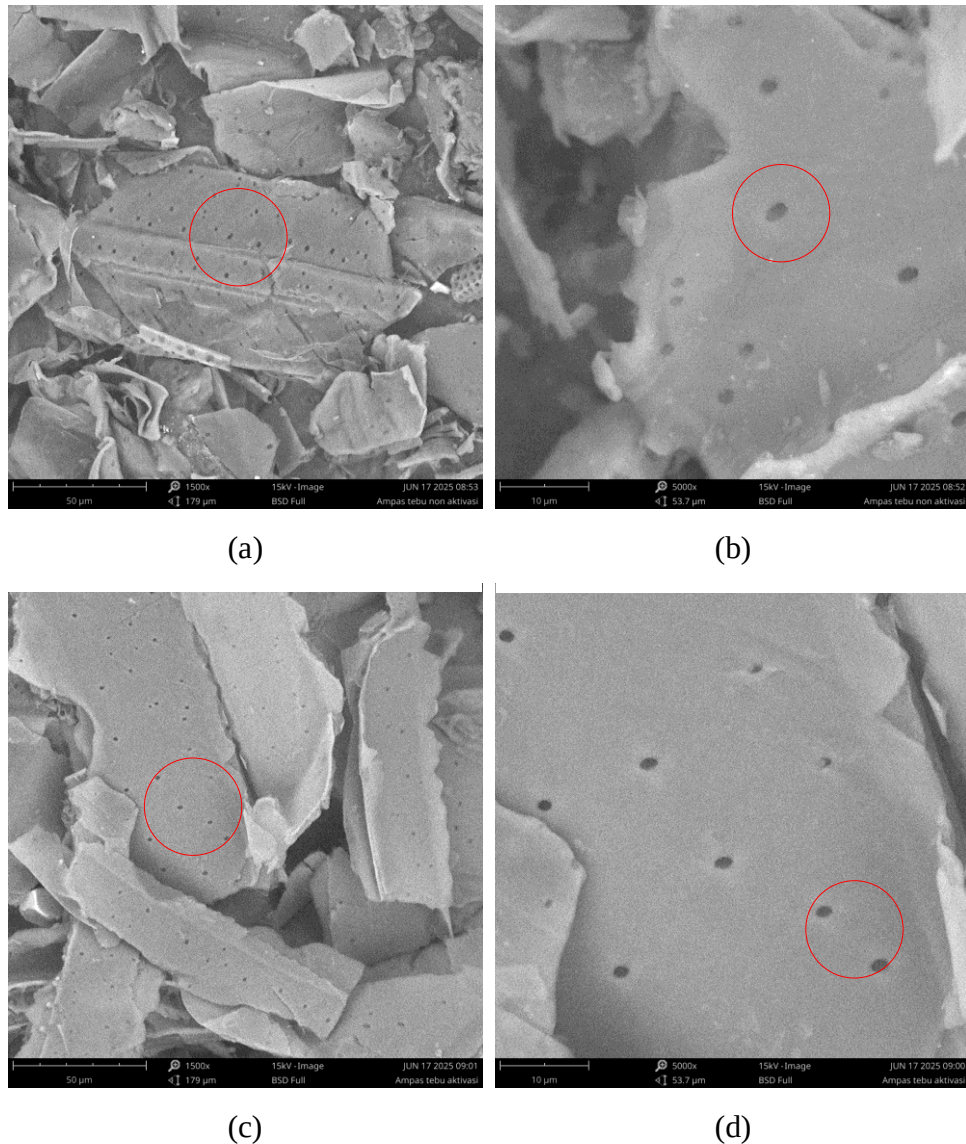
Pada adsorben ampas tebu non aktivasi dan adsorben ampas tebu memiliki gugus fungsi alkana (C-H) (*bending*) yang berasal dari selulosa,

hemiselulosa, dan lignin. Untuk adsorben ampas tebu non aktivasi gugus fungsi ini terlihat pada bilangan $1450,74\text{ cm}^{-1}$ dan kemudian Setelah dilakukan aktivasi menggunakan asam sitrat, puncak ini mengalami pergeseran ke $137,32\text{ cm}^{-1}$, yang masih menunjukkan karakteristik C–H bending namun telah mengalami perubahan akibat modifikasi struktur permukaan adsorben. Hal ini sejalan dengan hasil analisis FTIR pada biomassa modifikasi lain oleh Tejada et al., (2015), di mana disebutkan bahwa puncak gelombang di sekitar 1450 cm^{-1} berasal dari gugus alkana (C-H bending) khususnya yang bersifat alifatik seperti metil dan metilen dan gugus tersebut dapat berubah perubahan posisi puncaknya ataupun intensitasnya setelah proses aktivasi. Adapun hasil FTIR selanjutnya pada kedua adsorben menunjukkan bilangan gelombang yang cukup tajam yang merepresentasikan gugus eter (-C-O-C) yang keduanya terlihat pada bilangan gelombang $1033,85\text{ cm}^{-1}$. Dalam bahan lignoselulosa seperti ampas tebu, gugus eter berasal dari struktur selulosa dan hemiselulosa, dan dapat menjadi situs adsorpsi pasif atau pendukung dalam pembentukan kompleks logam.

Meninjau dari penjelasan diatas, pada dasarnya hasil FTIR dari adsorben non-aktivasi dan adsorben teraktivasi berada pada rentang gelombang yang sama dan memiliki nilai puncak yang hampir sama. Akan tetapi, memiliki nilai persen transmitansi yang berbeda. Hasil FTIR menunjukkan bahwa adsorben teraktivasi memiliki nilai transmitansi yang lebih rendah dibandingkan adsorben non-aktivasi. Rendahnya transmitansi menandakan bahwa gugus fungsi pada adsorben teraktivasi menyerap radiasi inframerah lebih kuat, kondisi ini mengindikasikan bahwa proses aktivasi dapat meningkatkan kemampuan gugus fungsi tertentu untuk berinteraksi dengan radiasi inframerah. Hal ini sejalan dengan pernyataan Subamia et al., 2023) bahwa intensitas puncak FTIR berkorelasi dengan jumlah maupun konsentrasi gugus fungsi yang terdapat dalam sampel.

4.1.2 SEM (Scanning Electron Microscopes)

Dalam penelitian ini *Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengetahui gambaran struktur permukaan adsorben ampas tebu. Adsorben ampas tebu dibaca pada perbesaran 1500x sampai 5000x. Permukaan adsorben ampas tebu 106 mesh tanpa aktivasi dan teraktivasi dapat dilihat pada Gambar 4.2 dibawah ini



Gambar 4.2 (a) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaran 1500x (b) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Tanpa Aktivasi Perbesaran 5000x (c) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Perbesaran 1500x (d) Permukaan Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi Perbesaran 5000x

Jika dilihat dari Gambar 4.2 pada kedua adsorben tersebut menunjukkan adanya pori yang ditunjukkan pada lingkaran merah. Dari kedua adsorben diayak menggunakan ayakan 106 mesh sehingga dapat memperluas permukaan adsorben. Dari kedua adsorben tersebut sebenarnya dapat dilihat perbedaan antara permukaan adsorben yang belum diaktivasi dengan permukaan adsorben yang teraktivasi, akan tetapi perbedaannya tidak terlalu signifikan. Namun terdapat beberapa perbedaan yang mana dari segi jumlah dan bentuk dari pori yang terbentuk pada adsorben yang belum diaktivasi memiliki bentuk pori yang lebih besar dan jumlah porinya tidak terlalu banyak serta terlihat bahwa permukaan adsorben yang belum diaktivasi tidak terlalu bersih. Sedangkan jika dibandingkan dengan permukaan adsorben yang teraktivasi, pada adsorben yang telah diaktivasi menggunakan asam sitrat, tampak bahwa permukaannya lebih bersih, jumlah pori meningkat, dan pori-pori tersebut memiliki ukuran yang lebih kecil serta terdistribusi secara merata.

Temuan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Golor et al., (2020), di mana aktivasi selulosa dari ampas tebu dengan asam sitrat hingga konsentrasi 40% menghasilkan hidrogel dengan struktur berpori yang lebih stabil dan teratur. Dalam hasil SEM yang dilaporkan, permukaan adsorben tanpa aktivasi (HCIT-0) hanya menunjukkan gumpalan serat selulosa tanpa jaringan pori yang jelas, sedangkan sampel teraktivasi (HCIT-4) menunjukkan pembentukan pori yang merata dan jaringan selulosa yang saling terikat. Dengan demikian, baik dalam penelitian ini maupun referensi tersebut, dapat disimpulkan bahwa aktivasi kimia menggunakan asam sitrat berperan penting dalam meningkatkan struktur pori dan kebersihan permukaan adsorben, yang pada akhirnya dapat memperbaiki kemampuan adsorpsi terhadap polutan.

4.2 Uji Adsorpsi

4.2.1 Uji Variasi Debit atau Laju Alir Optimum

Pengujian adsorpsi pada penelitian ini menggunakan adsorben dari ampas tebu tanpa aktivasi dan yang telah diaktivasi. Uji variasi debit dilakukan untuk mengetahui laju alir optimum dalam proses penyerapan logam Timbal (Pb), menggunakan dua variasi debit yaitu 5 mL/menit (debit lambat) dan 7,5 mL/menit (debit cepat) dengan ketinggian kolom adsorben 15 cm dengan massa adsorben sebanyak 6,1 gram. Pemilihan debit aliran 5 mL/menit dan 7,5 mL/menit pada penelitian ini disesuaikan dengan ukuran kolom yang digunakan, yaitu berdiameter 22 mm. Diameter kolom tersebut lebih besar dibandingkan penelitian Rielsa (2023) yang menggunakan buret berdiameter kecil dengan debit 1,3 dan 3,6 mL/menit. Perbedaan ukuran kolom berpengaruh terhadap luas penampang aliran, sehingga diperlukan debit yang lebih tinggi agar kecepatan alir tetap seimbang. Dengan pengaturan ini, aliran dalam kolom dapat lebih merata dan kontak antara larutan uji dengan adsorben berlangsung optimal, sehingga proses adsorpsi dapat berjalan dengan baik.. Oleh karena itu, debit 5 mL/menit dipilih untuk mewakili kondisi alir lambat dengan waktu kontak lebih lama, sedangkan 7,5 mL/menit digunakan sebagai variasi alir lebih cepat untuk melihat pengaruh waktu kontak yang lebih singkat pada kinerja adsorpsi.

Larutan uji Pb dengan konsentrasi 15 – 20 mg/L dialirkan secara kontinu selama 120 menit pada pH 5-6 dengan menggunakan NaOH untuk pengkondisian pH. Proses adsorpsi dimulai ketika larutan artificial Pb melewati kolom yang berisi adsorben. Pengambilan sampel dilakukan setiap 15 menit, kemudian dianalisis menggunakan AAS untuk mengetahui konsentrasi sisa Pb dan menghitung efisiensi penyerapan (% removal). Hasil pengujian efisiensi tertinggi pada waktu 120 menit untuk masing-masing adsorben dapat dilihat pada tabel 4.2 dan tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.2 Data Variasi Debit atau Laju Alir Adsorben Tanpa Aktivasi

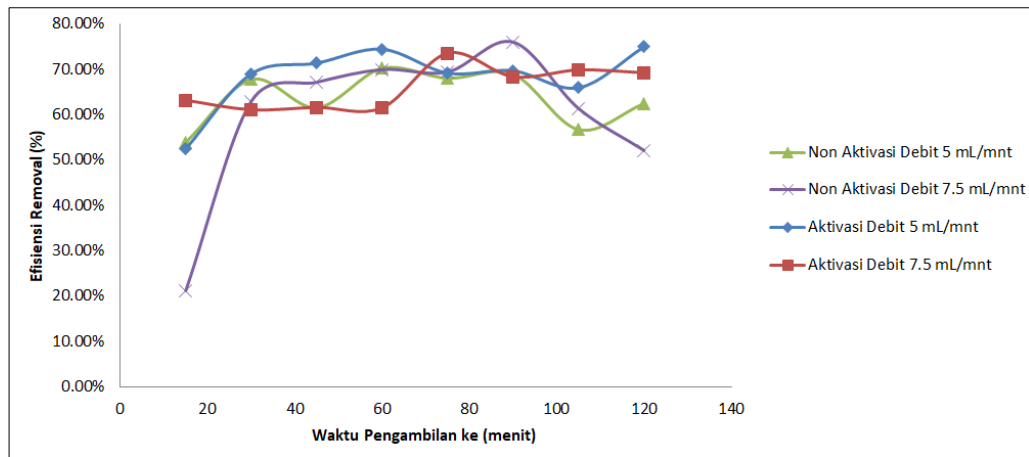
Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.227	8.473	53.97%
30	5	15	15,7	5.049	10.651	67.84%
45	5	15	15,7	6.028	9.672	61.61%
60	5	15	15,7	4.663	11.037	70.30%
75	5	15	15,7	5.008	10.692	68.10%
90	5	15	15,7	4.87	10.83	68.98%
105	5	15	15,7	6.786	8.914	56.78%
120	5	15	15,7	5.876	9.824	62.57%
15	7.5	15	15,7	12.354	3.346	21.31%
30	7.5	15	15,7	5.807	9.893	63.01%
45	7.5	15	15,7	5.145	10.555	67.23%
60	7.5	15	15,7	4.704	10.996	70.04%
75	7.5	15	15,7	4.787	10.913	69.51%
90	7.5	15	15,7	3.753	11.947	76.10%
105	7.5	15	15,7	6.055	9.645	61.43%
120	7.5	15	15,7	7.503	8.197	52.21%

(Sumber: Data Primer, 2025)

Tabel 4.3 Data Variasi Debit atau Laju Alir Adsorben Teraktivasi

Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.447	8.253	52.57%
30	5	15	15,7	4.856	10.844	69.07%
45	5	15	15,7	4.484	11.216	71.44%
60	5	15	15,7	4.001	11.699	74.52%
75	5	15	15,7	4.828	10.872	69.25%
90	5	15	15,7	4.746	10.954	69.77%
105	5	15	15,7	5.338	10.362	66.00%
120	5	15	15,7	3.919	11.781	75.04%
15	7.5	15	15,7	5.766	9.934	63.27%
30	7.5	15	15,7	6.097	9.603	61.17%
45	7.5	15	15,7	6.014	9.686	61.69%
60	7.5	15	15,7	6.028	9.672	61.61%
75	7.5	15	15,7	4.139	11.561	73.64%
90	7.5	15	15,7	4.952	10.748	68.46%
105	7.5	15	15,7	4.718	10.982	69.95%
120	7.5	15	15,7	4.815	10.885	69.33%

(Sumber: Data Primer, 2025)



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Variasi Debit atau Laju Alir Terhadap Adsorpsi Pb

Dari grafik tersebut dapat dilihat dan diketahui bahwa variasi debit menunjukkan persentase penyisihan Pb dengan waktu kontak 120 menit. Pada adsorben tanpa aktivasi dengan debit 7,5 mL/menit (cepat) hanya dapat mereduksi ion Pb sebesar 52,21% sedangkan dengan debit 5 mL/menit (lambat) dapat mereduksi ion Pb sebesar 62,57%. Adapun kemampuan removal untuk adsorben teraktivasi memiliki kemampuan penyerapan yang lebih baik yang mana debit 5 mL/menit (lambat) kemampuan dalam mereduksi ion Pb sebesar 75,04% sedangkan pada debit 7,5 mL/menit (cepat) kemampuan dalam mereduksi ion Pb sebesar 69,33%. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa variasi debit serta jenis adsorben mempengaruhi kemampuan penyerapan ion Pb.

Menurut Ling et al., (2016), Kinerja kolom sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran larutan, karena laju alir menentukan seberapa lama ion logam dapat berinteraksi dengan permukaan adsorben. Pada laju alir yang lebih rendah, ion pada logam memiliki waktu lebih lama untuk masuk ke dalam pori-pori adsorben, sehingga proses penyerapan menjadi lebih maksimal. Sebaliknya, pada laju alir yang lebih tinggi, lapisan cair di sekitar partikel adsorben menjadi lebih tipis, sehingga mengurangi hambatan transfer massa dan mempercepat kejenuhan kolom. Lebih lajut jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu oleh Chowdhury et al., (2012), Studi Adsorpsi Batch dan Kolom Tetap larutan Ion Timbal (II) pada Karbon Aktif Granular yang Berasal dari Kulit Manggis, bahwa pengaruh laju alir umpan terhadap adsorpsi Pb^{2+} diteliti dengan variasi laju

alir (1 dan 3 mL/menit) pada ketinggian adsorben tetap 4,5 cm dan konsentrasi awal 100 mg/L, menjelaskan pada laju alir yang lebih tinggi, zona adsorpsi lebih cepat mencapai bagian atas kolom, sehingga kolom lebih cepat jenuh. Sebaliknya, pada laju alir rendah, waktu kontak lebih lama dan zona adsorpsi lebih merata. Oleh karena itu, laju aliran yang lambat memungkinkan adsorbat lebih lama bersentuhan dengan adsorben, sehingga proses penyerapan lebih efektif dan zona adsorpsinya dangkal. Sebaliknya, jika alirannya terlalu cepat, waktu kontak menjadi singkat, sehingga penyerapan menurun dan titik jenuh tercapai lebih cepat. Sehingga debit yang optimal dalam proses adsorpsi ion Pb ini adalah debit 5 mL/menit dengan adsorben teraktivasi.

4.2.2 Uji Variasi Ketinggian Adsorben

Pengujian proses adsorpsi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua jenis adsorben, yaitu ampas tebu tanpa aktivasi dan yang telah mengalami proses aktivasi. Variabel yang diuji adalah variasi ketinggian kolom adsorben, dengan tujuan untuk menentukan tinggi kolom yang paling efektif dalam menyerap logam Timbal (Pb) sekaligus mengetahui massa optimum adsorben. Pengujian ini dilakukan dengan dua variasi tinggi kolom, yaitu 10 cm dan 15 cm, menggunakan debit alir optimum sebesar 5 mL/menit yang diperoleh dari hasil uji variasi debit sebelumnya. Variasi tinggi bed 10 cm dan 15 cm dipilih dengan mempertimbangkan dimensi kolom yang digunakan, yaitu berdiameter 22 mm. Pada ketinggian 10 cm, jumlah adsorben lebih sedikit sehingga luas permukaan kontak dan kapasitas penyerapan lebih terbatas, sedangkan ketinggian 15 cm memberikan jumlah adsorben yang lebih besar dengan situs aktif lebih banyak, sehingga waktu kontak lebih lama dan kapasitas adsorpsi lebih tinggi. Rentang ini dinilai sesuai untuk mengamati pengaruh variasi tinggi unggun terhadap kinerja kolom tanpa membuat waktu operasi terlalu singkat ataupun terlalu lama, sekaligus tetap relevan dengan keterbatasan operasional laboratorium.

Larutan Pb yang digunakan memiliki konsentrasi berkisar antara 15 hingga 20 mg/L dan dialirkan secara kontinu selama 120 menit. pH larutan

dijaga pada kisaran 5,5 dengan penyesuaian menggunakan larutan NaOH. Proses adsorpsi berlangsung saat larutan Pb buatan mengalir melalui kolom berisi adsorben. Sampel diambil setiap 15 menit selama proses berlangsung dan dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan konsentrasi residu Pb. Selanjutnya, efisiensi penyerapan logam dihitung dalam bentuk persen penurunan konsentrasi (% removal). Hasil efisiensi tertinggi pada waktu 120 menit untuk masing-masing jenis adsorben disajikan pada Tabel 4.4 dan Tabel 4.5.

Tabel 4.4 Data Variasi Ketinggian Adsorben Tanpa Aktivasi

Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.227	8.473	53.97%
30	5	15	15,7	5.049	10.651	67.84%
45	5	15	15,7	6.028	9.672	61.61%
60	5	15	15,7	4.663	11.037	70.30%
75	5	15	15,7	5.008	10.692	68.10%
90	5	15	15,7	4.87	10.83	68.98%
105	5	15	15,7	6.786	8.914	56.78%
120	5	15	15,7	5.876	9.824	62.57%
15	5	10	15,7	7.172	8.528	54.32%
30	5	10	15,7	6.634	9.066	57.75%
45	5	10	15,7	6.827	8.873	56.52%
60	5	10	15,7	6.8	8.9	56.69%
75	5	10	15,7	6.786	8.914	56.78%
90	5	10	15,7	8.454	7.246	46.15%
105	5	10	15,7	5.242	10.458	66.61%
120	5	10	15,7	6	9.7	61.78%

(Sumber: Data Primer, 2025)

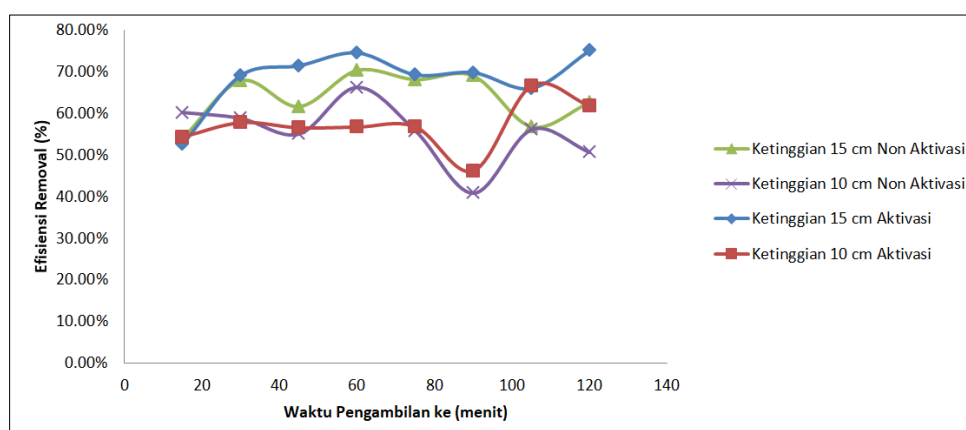
Tabel 4.5 Data Variasi Ketinggian Adsorben Teraktivasi

Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.447	8.253	52.57%
30	5	15	15,7	4.856	10.844	69.07%
45	5	15	15,7	6.289	9.411	59.94%
60	5	15	15,7	4.001	11.699	74.52%
75	5	15	15,7	4.828	10.872	69.25%

90	5	15	15,7	4.746	10.954	69.77%
105	5	15	15,7	5.338	10.362	66.00%
120	5	15	15,7	3.919	11.781	75.04%
15	5	10	15,7	6.248	9.452	60.20%
30	5	10	15,7	6.469	9.231	59%
45	5	10	15,7	7.061	8.639	55.03%
60	5	10	15,7	5.297	10.403	66.26%
75	5	10	15,7	6.937	8.763	55.82%
90	5	10	15,7	9.294	6.406	40.80%
105	5	10	15,7	6.896	8.804	56.08%
120	5	10	15,7	7.751	7.949	50.63%

(Sumber: Data Primer, 2025)

Data hasil uji yang diperoleh kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk menggambarkan hubungan antara persentase removal logam Timbal (Pb) dengan variasi ketinggian yang digunakan, baik pada adsorben tanpa aktivasi maupun yang telah diaktivasi. Grafik variasi debit optimum yang telah diplot ditampilkan pada Gambar 4.4



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Variasi Ketinggian Adsorben terhadap Adsorpsi Pb

Dari data pengujian yang telah diperoleh diatas menunjukkan bahwa efisiensi penyerapan logam Pb meningkat seiring dengan bertambahnya ketinggian kolom adsorben, baik pada adsorben tanpa aktivasi maupun teraktivasi. Pada ketinggian 15 cm, adsorben teraktivasi menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 75,04%, sedangkan adsorben tanpa aktivasi sebesar 62,57%. Efisiensi ini menurun pada ketinggian 10 cm, yakni sebesar 50,63% untuk adsorben teraktivasi dan 61,78% pada

adsorben tanpa aktivasi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ketinggian kolom adsorben meningkatkan waktu kontak antara larutan dan adsorben serta jumlah situs aktif yang tersedia, sehingga proses adsorpsi berlangsung lebih optimal. Aktivasi pada adsorben memperbaiki sifat fisik dan kimia seperti luas permukaan, struktur pori, dan gugus fungsional aktif, namun pada ketinggian kolom yang rendah, efek aktivasi menjadi kurang efektif karena situs aktif cepat jenuh.

Hal ini konsisten dengan penelitian oleh Ling et al., (2016), yang menyatakan bahwa peningkatan tinggi kolom dapat memperlambat waktu jenuh dan meningkatkan efisiensi penyerapan logam berat. Maka dari itu, aktivasi adsorben akan lebih efektif jika digunakan bersamaan dengan massa atau tinggi kolom yang mencukupi agar seluruh potensi adsorpsi dapat dimanfaatkan secara optimal. Sebaliknya, semakin rendah tinggi adsorben dalam kolom, jumlah adsorben yang dapat berinteraksi dengan larutan adsorbat menjadi lebih sedikit dibandingkan dengan unggun yang lebih tinggi. Hal ini menyebabkan waktu kontak antara adsorbat dan adsorben menjadi lebih singkat, sehingga kondisi jenuh tercapai lebih cepat. Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu oleh Sylvia, N. et al., (2012), Kinerja Kolom Adsorpsi pada Penjerapan Timbal (Pb^{2+}) dalam Limbah Artifisial Menggunakan Cangkang Kernel Sawit, bahwa tinggi unggun yang divariasikan 3, 6, dan 9 cm menunjukkan bahwa peningkatan tinggi unggun adsorben berbanding lurus dengan persentase penyerapan, sedangkan unggun yang lebih rendah menghasilkan penyerapan yang lebih kecil. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya luas permukaan kontak pada unggun yang lebih tinggi, sehingga jumlah situs aktif yang tersedia untuk berinteraksi dengan ion logam semakin banyak. Kondisi tersebut mendukung proses penyerapan berlangsung lebih efektif dan meningkatkan efisiensi keseluruhan.

Pada penelitian ini didapatkan keadaan optimum dari variasi debit atau laju alir dan variasi ketinggian adsorben yang selanjutnya digunakan untuk kurva terobosan (*Breakthrough Curve*). Hasil optimum yang didapat untuk debit optimum yaitu 5 mL/menit serta ketinggian adsorben optimum

didapat sebesar 15 cm dengan jenis adsorben teraktivasi asam sitrat ($C_6H_8O_7$). Jika dibandingkan dengan penelitian terdahulu Imandi, A. et al.,(2020) metode aktivasi secara fisik (karbonisasi) Efektivitas penurunan kadar Fe pada sampel limbah air asam tambang berkisar 21,72% hingga 79,65% sedangkan persentase removal terbesar Mn adalah 60% dengan kadar penyerapan sebesar 4,12 mg/L. Oleh karena itu, aktivasi dengan asam sitrat terbukti meningkatkan kinerja adsorben. Proses ini tidak hanya memperluas permukaan aktif, tetapi juga menambahkan gugus $-OH$ dan $-COOH$ yang dapat berinteraksi dengan ion logam. Kehadiran gugus fungsional tersebut membuat kapasitas dan efisiensi adsorpsi lebih baik dibandingkan aktivasi fisik.

4.3 Kurva Terobosan (*Breakthrough Curve*)

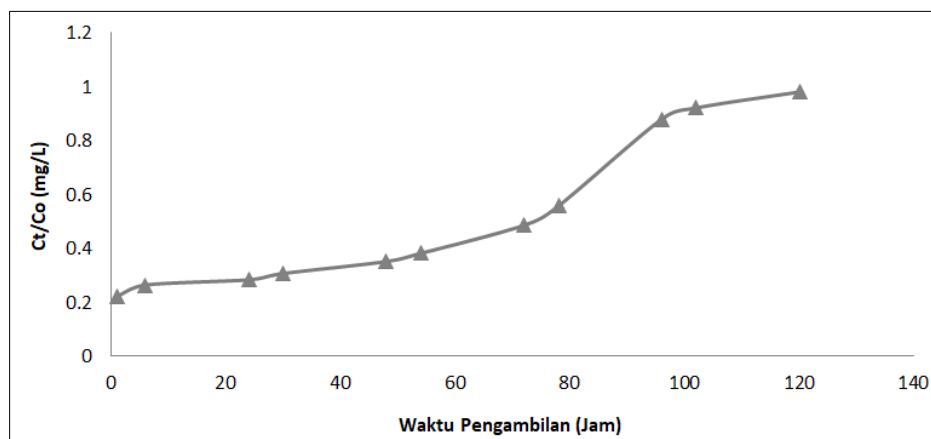
Kurva terobosan (*breakthrough curve*) merupakan perbandingan antara konsentrasi limbah yang keluar dari kolom dengan konsentrasi limbah yang masuk ke dalam kolom terhadap waktu. Kurva breakthrough disajikan dalam bentuk rasio C_t/C_0 yang diplot terhadap waktu atau volume efluen (Widiyanti et al., 2021). Kurva terobosan diperoleh dengan menerapkan kondisi optimum, yaitu dengan laju alir 5 mL/menit dan tinggi kolom adsorben 15 cm menggunakan adsorben ampas tebu yang telah diaktivasi menggunakan asam sitrat ($C_6H_8O_7$). Larutan uji Pb dengan konsentrasi 15 – 25 mg/L dialirkan secara kontinu selama 120 menit pada pH 5-6 dengan menggunakan NaOH untuk pengondisian pH. Proses adsorpsi dimulai ketika larutan artificial Pb melewati kolom yang berisi adsorben. Proses dijalankan selama 120 jam (5 hari), dengan pengambilan sampel efluen dilakukan secara berkala setiap 6–18 jam dengan total 11 sampel menyesuaikan waktu kerja laboratorium. Sampel kemudian dianalisis menggunakan AAS untuk menentukan kadar Pb dalam efluen. Data konsentrasi yang diperoleh digunakan untuk mengamati waktu jenuh adsorben, yang ditandai dengan peningkatan nilai C_t/C_0 mendekati 1, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Data Kurva Terobosan

Waktu Pengambilan (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal	Ct/Co (mg/L)
1	5	15	23,037	5,108	17,929	77,83%	0,22173026
6	5	15	23,037	6,1	16,937	73,52%	0,264791422
24	5	15	23,037	6,548	16,489	71,58%	0,284238399
30	5	15	23,037	7,084	15,953	69,25%	0,307505318
48	5	15	23,037	8,114	14,923	64,78%	0,352216
54	5	15	23,037	8,802	14,235	61,79%	0,382081
72	5	15	23,037	11,2	11,837	51,38%	0,486174415
78	5	15	23,037	12,854	10,183	44,20%	0,557971958
96	5	15	23,037	20,266	2,771	12,03%	0,879715241
102	5	15	23,037	21,231	1,806	7,84%	0,921604376
120	5	15	23,037	22,596	0,441	1,91%	0,980856882

(Sumber: Data Primer, 2025)

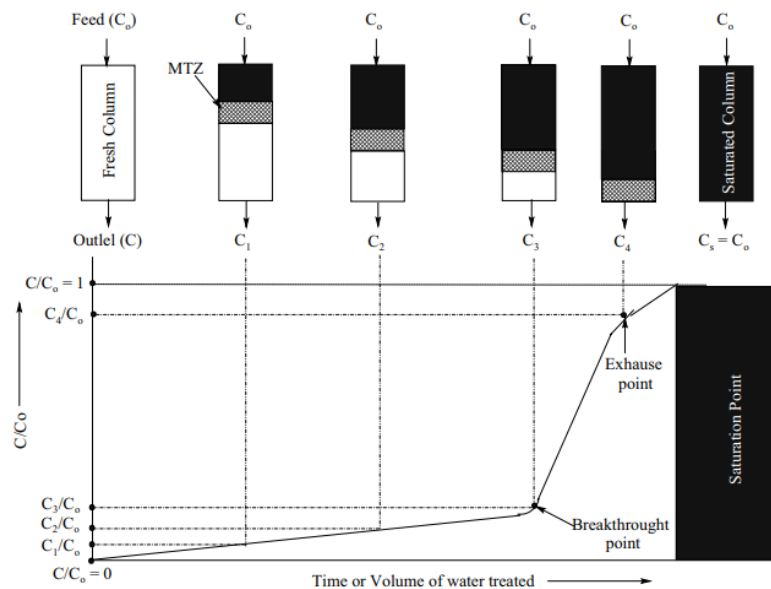
Dari data hasil uji yang diperoleh kemudian disajikan dalam bentuk grafik untuk menghasilkan kurva terobosan yang menggambarkan hubungan antara rasio Ct/Co terhadap waktu (t). Dalam hal ini, Ct merupakan konsentrasi ion Pb dalam efluen, Co adalah konsentrasi ion Pb dalam influen, dan t menunjukkan waktu proses adsorpsi. Grafik pada Gambar 4.6 memperlihatkan titik breakthrough serta titik jenuh dari kolom yang telah dianalisis melalui hasil plottingan tersebut.



Gambar 4.5 Kurva Terobosan

Efektivitas kolom adsorpsi dalam menyerap logam Timbal (Pb) dapat dievaluasi melalui kurva terobosan. Titik *breakthrough* merupakan awal terbentuknya zona perpindahan massa (*mass-transfer zone*), yang ditandai dengan mulai terdeteksinya adsorbat dalam efluen. Titik ini ditandai dengan naiknya

rasio konsentrasi effluent dengan umpan secara signifikan. Berdasarkan Tabel 4.6 dan Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa titik breakthrough pada waktu ke 54 jam dan titik exhaust point ke 120 jam. Kurva breakthrough pada Gambar 4.5 memperlihatkan bahwa rasio C_t/C_o meningkat secara bertahap hingga mendekati nilai 1, yang menandakan bahwa konsentrasi efluen pada akhirnya setara dengan konsentrasi influennya. Grafik juga menunjukkan bahwa pada kondisi $0 < C_t/C_o < 1$ proses transfer massa masih berlangsung, sedangkan saat C_t/C_o mencapai 1 berarti adsorben telah jenuh sepenuhnya. Berdasarkan hasil uji tersebut dapat disimpulkan bahwa kejenuhan adsorben sumpit bekas pada variasi optimum dicapai pada waktu kontak lebih dari 120 jam, di mana konsentrasi efluen mendekati konsentrasi influen C_d atau $C_t/C_o = 1$.



Gambar 4.6 Kurva Terobosan Melalui Pergerakan Mass Transfer Zone (Patel, H. (2019).

Gambar berikut merupakan ilustrasi kurva terobosan dari literatur yang menunjukkan mekanisme terbentuknya *breakthrough curve* pada sistem adsorpsi kolom. Gambar tersebut menunjukkan pergerakan *mass transfer zone* (MTZ) di sepanjang kolom hingga tercapai kondisi jenuh, yang ditandai dengan nilai $C_t/C_o = 1$. Pola kenaikan rasio C_t/C_o yang membentuk kurva berbentuk huruf 'S' ini juga terlihat pada hasil penelitian (Gambar 4.5), di mana titik breakthrough terjadi sekitar jam ke-54 dan titik jenuh (exhaust point) pada jam ke-120. Hal ini sesuai

dengan Patel, H. (2019). yang menyebutkan bahwa pada sebagian besar kasus adsorpsi dengan metode kolom untuk pengolahan air dan air limbah, kurva breakthrough umumnya membentuk pola karakteristik berbentuk huruf 'S' dengan tingkat kelandaian yang berbeda-beda.

4.4 Model Kinetika Sistem Adsorpsi

Untuk memahami perilaku dan efisiensi proses adsorpsi dalam sistem kolom tetap (*fixed-bed column*), diperlukan pendekatan matematis melalui model kinetika. Model-model ini digunakan untuk memprediksi karakteristik kurva breakthrough serta mengevaluasi kapasitas adsorpsi dan laju reaksi antara adsorbat dan adsorben selama proses berlangsung. Dalam penelitian ini, analisis kinetika dilakukan menggunakan tiga model utama, yaitu model Thomas, Yoon–Nelson, dan Adam–Bohart. Ketiga model ini digunakan untuk memodelkan mekanisme perpindahan massa dan kinerja sistem adsorpsi secara lebih akurat. Berikut ini merupakan uraian dari masing-masing model kinetika yang diterapkan.

4.4.1 Model Thomas

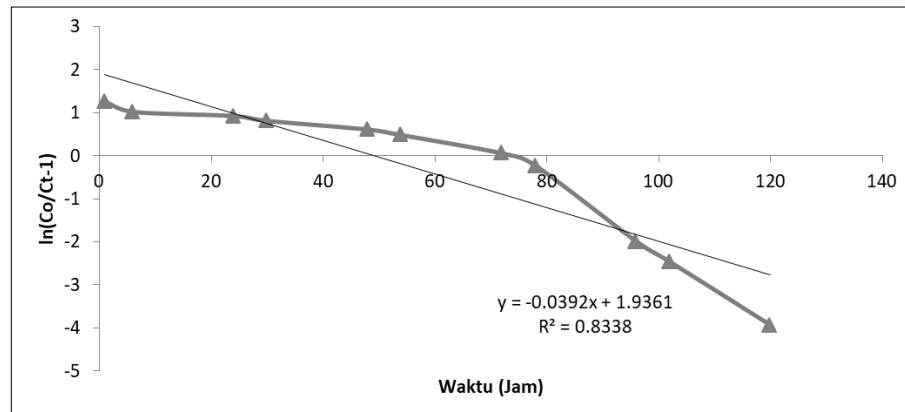
Model Thomas digunakan untuk menganalisis karakteristik kinetika adsorpsi dalam sistem kolom berdasarkan data kurva terobosan. Model ini mengasumsikan bahwa adsorpsi mengikuti mekanisme reaksi orde pertama terhadap konsentrasi adsorbat yang belum teradsorpsi, dengan aliran plug flow pada kolom yang terisi secara seragam. Berikut data yang dihasilkan dari Model Thomas disajikan pada Tabel 4.7 Berikut

Tabel 4.7 Data Model Thomas

Waktu Pengambilan (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal	(Ct/Co)	ln (Co/Ct-1)
1	5	15	23.037	5.108	17.929	77.83%	0.22173026	1.25561158
6	5	15	23.037	6.1	16.937	73.52%	0.264791422	1.02121181
24	5	15	23.037	6.548	16.489	71.58%	0.284238399	0.92353383
30	5	15	23.037	7.084	15.953	69.25%	0.307505318	0.81180818
48	5	15	23.037	8.114	14.923	64.78%	0.352216	0.60931268
54	5	15	23.037	8.802	14.235	61.79%	0.382081	0.48072475
72	5	15	23.037	11.2	11.837	51.38%	0.486174415	0.05531644
78	5	15	23.037	12.854	10.183	44.20%	0.557971958	-0.2329354
96	5	15	23.037	20.266	2.771	12.03%	0.879715241	-1.9897363
102	5	15	23.037	21.231	1.806	7.84%	0.921604376	-2.4643479
120	5	15	23.037	22.596	0.441	1.91%	0.980856882	-3.9364833

(Sumber: Data Primer, 2025)

Evaluasi performa model dilakukan dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2) dari grafik linear antara $\ln\left[\frac{C_o}{C_t} - 1\right]$ terhadap waktu. Modelnya dapat dilihat pada Persamaan 3.2. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai koefisien determinasi yang dapat dilihat pada perhitungan di Tabel 4.7 dan Gambar 4.6 dibawah ini.



Gambar 4.6 Kurva Linier Model Thomas

Pada penelitian ini, uji adsorpsi dilakukan menggunakan debit optimum sebesar 5 mL/menit dan tinggi kolom adsorben 15 cm atau sebanyak 6,1 gram. Berdasarkan data hasil pengujian, diperoleh persamaan regresi linier model Thomas sebagai berikut:

$$\ln \left[\frac{C_o}{C_t} - 1 \right] = -0,0392 \cdot t + 1,9361$$

Dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,8338$, menunjukkan bahwa model Thomas mampu menggambarkan hubungan antara waktu dan perubahan konsentrasi larutan dengan tingkat kesesuaian yang cukup baik terhadap data yang dihasilkan meskipun tidak mencapai nilai mendekati 1 secara sempurna. Temuan ini juga didukung oleh hasil penelitian Omitola et al. (2022), yang menggunakan model Thomas untuk menganalisis sistem kolom adsorpsi berbasis nanopartikel daun jagung. Dalam studi tersebut, nilai R^2 yang diperoleh untuk model Thomas bervariasi cukup luas, mulai dari 0,6528 hingga 0,9971, tergantung pada parameter operasional seperti tinggi kolom dan laju aliran. Hal ini menunjukkan bahwa nilai R^2 di $> 0,8$ tetap tergolong representatif, serta dapat dijadikan dasar dalam mengevaluasi performa adsorpsi pada sistem kolom. Oleh karena itu, nilai R^2 sebesar 0,8338 dalam penelitian ini dapat dianggap valid dan sesuai untuk menggambarkan kecocokan model Thomas terhadap data eksperimen yang diperoleh. Adapun Berikut perhitungan konstanta Thomas (k_{Th}) dan kapasitas adsorpsi (q_0)

$$k_{Th} = \left[\frac{slope}{C_o} \right] = \frac{0,0392}{23,037} = 0,001701 \text{ (L/mg.mnt)}$$

$$q_0 = \frac{intersep \cdot Q}{k_{Th} \cdot m} = \frac{1,9361 \cdot 0,005}{0,001701 \cdot 6,1} = 0,933 \text{ (mg/g)}$$

Nilai kapasitas adsorpsi teoritis (q_0) sebesar 0,933 mg/g menunjukkan bahwa per gram adsorben mampu menyerap sekitar 0,933 mg logam Pb sebelum mencapai titik jenuh. Nilai ini merepresentasikan kapasitas teoritis maksimum yang dapat dicapai pada kondisi operasional dan debit optimum yang digunakan selama uji adsorpsi berlangsung. Sementara itu, nilai k_{Th} sebesar 0,001701 L/(mg·menit) merepresentasikan laju perpindahan massa selama proses adsorpsi dalam kolom berlangsung. Nilai R^2 yang cukup tinggi juga mendukung bahwa model Thomas sesuai

digunakan untuk merepresentasikan data kinetika adsorpsi dalam kondisi operasi yang telah diterapkan.

4.4.2 Model Yoon-Nelson

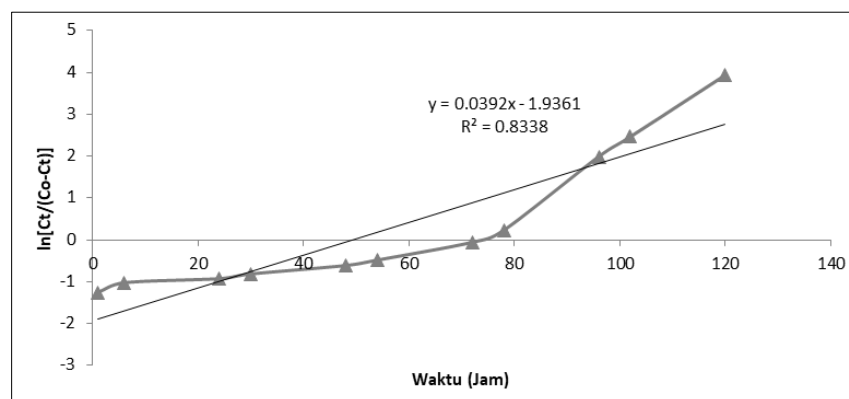
Model Yoon-Nelson adalah model yang relatif sederhana yang mengasumsikan bahwa laju adsorpsi untuk setiap adsorbat sebanding dengan laju pengurangan adsorpsi. Model ini memprediksi 50% waktu breakthrough atau waktu setengah jenuh dari adsorben (τ) serta mampu mengetahui konstanta (k_{YN}) dan kapasitas adsorpsi (q_{YN}). Berikut data yang dihasilkan dari Model Thomas disajikan pada Tabel 4.8 Berikut.

Tabel 4.8 Model Yoon-Nelson

Waktu Pengambilan (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal	(Ct/(Co-Ct))	ln (Ct/(Co-Ct))
1	5	15	23.037	5.108	17.929	77.83%	0.284901556	-1.255611575
6	5	15	23.037	6.1	16.937	73.52%	0.360158233	-1.021211807
24	5	15	23.037	6.548	16.489	71.58%	0.397113227	-0.923533832
30	5	15	23.037	7.084	15.953	69.25%	0.44405441	-0.811808179
48	5	15	23.037	8.114	14.923	64.78%	0.543724452	-0.609312682
54	5	15	23.037	8.802	14.235	61.79%	0.61833509	-0.480724752
72	5	15	23.037	11.2	11.837	51.38%	0.946185689	-0.055316441
78	5	15	23.037	12.854	10.183	44.20%	1.262299912	0.232935384
96	5	15	23.037	20.266	2.771	12.03%	7.313605197	1.989736339
102	5	15	23.037	21.231	1.806	7.84%	11.75581395	2.464347923
120	5	15	23.037	22.596	0.441	1.91%	51.23809524	3.936483303

(Sumber: Data Primer, 2025)

Evaluasi performa model dilakukan dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2) dari grafik linear antara $\left(\ln \left[\frac{C_t}{C_o - C_t} \right] \right)$ terhadap waktu. Modelnya dapat dilihat pada Persamaan 3.3. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai koefisien determinasi yang dapat dilihat pada perhitungan di Tabel 4.8 dan Gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.7 Kurva Linier Model Yoon-Nelson

Pada penelitian ini, uji adsorpsi dilakukan menggunakan debit optimum sebesar 5 mL/menit dan tinggi kolom adsorben 15 cm atau sebanyak 6,1 gram. Berdasarkan data hasil pengujian, diperoleh persamaan regresi linier model Yoon-Nelson sebagai berikut:

$$\ln \left[\frac{C_t}{C_o - C_t} \right] = 0,0392 \cdot t - 1,9361$$

Nilai koefisien determinasi pada model Yoon-Nelson sama dengan nilai koefisien determinasi pada model Thomas yaitu $R^2 = 0,8338$, menunjukkan bahwa model Yoon-Nelson mampu menggambarkan hubungan antara waktu dan perubahan konsentrasi larutan dengan tingkat kesesuaian yang cukup baik terhadap data yang dihasilkan meskipun tidak mencapai nilai mendekati 1 secara sempurna. Kesamaan nilai R^2 ini mengindikasikan bahwa kedua model mampu menjelaskan hubungan antara waktu dan perubahan rasio konsentrasi (C_t/C_o) secara sebanding, terutama karena keduanya berbasis pada transformasi logaritmik dari data yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan model Thomas maupun Yoon–Nelson dalam sistem adsorpsi kolom tidak hanya dapat saling melengkapi, tetapi juga menunjukkan konsistensi apabila pendekatan statistik dan rentang data yang digunakan seragam. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Omitola et al. (2022) yang melakukan studi pemodelan terhadap adsorpsi amoksisilin menggunakan komposit daun jagung dan nanopartikel perak dalam kolom kontinu. Dalam studi tersebut, dilaporkan bahwa nilai R^2 dari model Thomas dan Yoon–Nelson identik pada beberapa kondisi kolom, misalnya pada tinggi bed 6 cm dan 7 cm, dengan nilai R^2 sebesar 0,836 dan 0,652 secara berurutan untuk kedua

model. Hal ini memperkuat bahwa kesamaan nilai R^2 antara model Thomas dan Yoon–Nelson merupakan hal yang dapat terjadi.

Adapun Berikut perhitungan dari konstanta (K_{YN}), waktu setengah jenuh adsorben (τ), dan kapasitas adsorpsi (q_{YN}).

$$K_{YN} = 0,0392 \text{ jam}^{-1} = \frac{0,0392}{60} = 0,000653 \text{ menit}^{-1}$$

$$\tau = \frac{\text{Intersep}}{K_{YN}} = \frac{1,9361}{0,0392} = 49,3903 \text{ jam}^{-1} \text{ atau } 2963,42 \text{ menit}^{-1}$$

$$q_{YN} = \frac{C_0 \cdot Q \cdot \tau}{1000 \cdot m} = \frac{23,037 \cdot 0,005 \cdot 2963,42}{1000 \cdot 6,1} = 0,0596 \text{ mg/g}$$

Nilai K_{YN} yang didapat yaitu sebesar 0,00392 jam atau 0,000653 menit merepresentasikan laju perpindahan massa selama proses adsorpsi. Hal ini berhubungan dengan nilai waktu 50% breakthrough (τ) yang didapatkan sebesar 49,39 jam atau 2963 menit. Nilai ini jika dilihat pada Tabel 4.7 dapat dikatakan valid bahwa pada waktu 48 (jam) memiliki nilai ($C_t/(C_0-C_t)$) sebesar 0,5437 yang menandakan waktu setengah jenuh. Waktu setengah jenuh ini berkaitan dengan konstanta laju Yoon–Nelson yang diperoleh sebesar 0,000653 menit⁻¹, di mana nilainya yang relatif kecil menandakan bahwa proses perpindahan adsorbat ke permukaan adsorben terjadi secara lambat dan bertahap. Dengan kata lain, semakin kecil nilai K_{YN} maka semakin besar nilai τ yang dihasilkan, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik jenuh parsial semakin lama. Korelasi ini mengindikasikan bahwa adsorben masih mampu dalam menyerap logam Pb dalam waktu yang cukup lama sebelum jenuh secara signifikan. Nilai kapasitas adsorpsi teoritis (q_{YN}) sebesar 0,0596 mg/g menunjukkan bahwa per gram adsorben mampu menyerap sekitar 0,0596 mg logam Pb sebelum mencapai titik jenuh. Nilai ini merepresentasikan kapasitas teoritis maksimum yang dapat dicapai pada kondisi dan debit optimum yang digunakan selama uji adsorpsi berlangsung.

4.4.3 Model Adam-Bohart

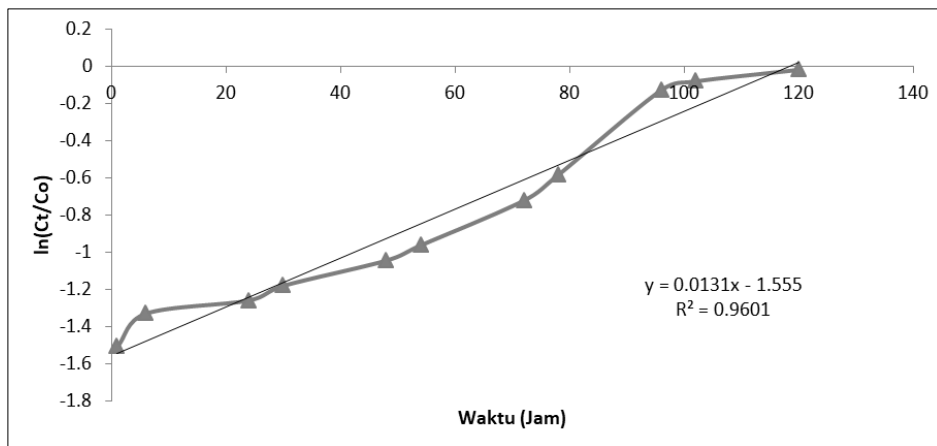
Model Adam-Bohart laju adsorpsi dianggap sebanding dengan kapasitas adsorpsi yang masih tersedia di permukaan adsorben. Model ini umum digunakan untuk menggambarkan bagian awal dari kurva breakthrough. Model ini juga dapat menentukan konstanta Adam-Bohart (K_{AB}) dan kapasitas adsorpsi (N_0). Berikut data yang dihasilkan dari Model Adam-Bohart disajikan pada Tabel 4.9 Berikut.

Tabel 4.9 Model Adam-Bohart

Waktu Pengambilan (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal	Ct/Co	ln(Ct/Co)
1	5	15	23.037	5.108	17.929	77.83%	0.22173	-1.50629
6	5	15	23.037	6.1	16.937	73.52%	0.264791	-1.32881
24	5	15	23.037	6.548	16.489	71.58%	0.284238	-1.25794
30	5	15	23.037	7.084	15.953	69.25%	0.307505	-1.17926
48	5	15	23.037	8.114	14.923	64.78%	0.352216	-1.04351
54	5	15	23.037	8.802	14.235	61.79%	0.382081	-0.96212
72	5	15	23.037	11.2	11.837	51.38%	0.486174	-0.72119
78	5	15	23.037	12.854	10.183	44.20%	0.557972	-0.58345
96	5	15	23.037	20.266	2.771	12.03%	0.879715	-0.12816
102	5	15	23.037	21.231	1.806	7.84%	0.921604	-0.08164
120	5	15	23.037	22.596	0.441	1.91%	0.980857	-0.01933

(Sumber: Data Primer, 2025)

Evaluasi performa model dilakukan dengan melihat nilai koefisien determinasi (R^2) dari grafik linear antara $\ln(\frac{C_t}{C_0})$ terhadap waktu. Modelnya dapat dilihat pada Persamaan 3.5. Dari persamaan tersebut didapatkan nilai koefisien determinasi yang dapat dilihat pada perhitungan di Tabel 4.9 dan Gambar 4.8 dibawah ini.



Gambar 4.8 Kurva Linier Model Adam-Bohart

Pada penelitian ini, uji adsorpsi dilakukan menggunakan debit optimum sebesar 5 mL/menit dan tinggi kolom adsorben 15 cm atau sebanyak 6,1 gram. Berdasarkan data hasil pengujian, diperoleh persamaan regresi linier model Adam-Bohart sebagai berikut:

$$\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = 0,0131 t - 1,555$$

Dalam penelitian ini, model Adams–Bohart menunjukkan hasil yang sangat baik dalam merepresentasikan proses adsorpsi logam berat Pb pada sistem kolom, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9601. Nilai ini menunjukkan tingkat kecocokan yang tinggi antara data pengujian dan hasil prediksi model, terutama pada fase awal hingga pertengahan proses adsorpsi, di mana permukaan adsorben masih aktif dan belum jenuh. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Mekonnen et al. (2021), yang menggunakan *leftover coal* sebagai adsorben dalam kolom tetap untuk menghilangkan fosfat. Dalam studi tersebut, model Adams–Bohart juga memberikan nilai R^2 yang tinggi, yaitu dalam rentang 0,92–0,98, dan dinyatakan sebagai model paling sesuai dalam menggambarkan data breakthrough dibandingkan dengan model Thomas dan Yoon–Nelson. Kesamaan tren ini memperkuat bahwa penggunaan model Adams–Bohart pada penelitian ini sangat relevan, terutama mengingat kondisi sistem yang serupa, yakni debit aliran yang rendah, tinggi kolom sedang, serta penggunaan adsorben berbasis biomassa. Adapun Berikut perhitungan dari konstanta (k_{AB}) dan kapasitas adsorpsi (N_0).

$$k_{AB} = \left[\frac{slope}{C_0} \right] = \frac{0,0131}{23,037} = 0,000569 \text{ (L/mg.mnt)}$$

$$N_0 = \left[\frac{intersep \cdot U}{K_{AB} \cdot Z} \right] = \frac{1,555 \cdot 1,3158}{0,000569 \cdot 15} = 239,79 \text{ (mg/L)}$$

Dari hasil regresi linier, diperoleh konstanta laju adsorpsi K_{AB} sebesar 0,000569 L/mg.menit dan kapasitas adsorpsi teoritis N_0 sebesar 239,7 mg/L yang dimana setiap 1 liter volume kolom adsorben memiliki kapasitas maksimal untuk mengadsorpsi sekitar 239,79 mg logam Pb dari larutan sebelum media adsorben mencapai titik jenuh. Kemudian Nilai K_{AB} yang relatif kecil menunjukkan bahwa laju perpindahan adsorbat (Pb) ke permukaan adsorben berlangsung secara lambat dan bertahap. Hal ini sejalan dengan penjelasan Babu & Gupta (2005), nilai K_{AB} yang rendah menunjukkan bahwa laju perpindahan massa berlangsung lambat dan bertahap, serta mengindikasikan bahwa proses adsorpsi lebih didominasi oleh resistansi internal (difusi dalam partikel) dibanding laju reaksi cepat. Dengan demikian, nilai K_{AB} kecil yang diperoleh menunjukkan bahwa adsorpsi ion logam tidak langsung tertahan seluruhnya di awal kolom, melainkan diserap perlahan sepanjang kolom. Hal ini menunjukkan bahwa laju perpindahan massa ke permukaan adsorben relatif lambat sehingga proses mencapai kejenuhan membutuhkan waktu yang lebih lama. Selain itu hal ini konsisten dengan karakteristik model Adams–Bohart yang digunakan, di mana laju adsorpsi pada fase awal sangat dipengaruhi oleh kapasitas sisa adsorben dan konsentrasi awal larutan. Seperti dijelaskan Mesfer, et al.,(2020) model ini lebih merepresentasikan bagian awal kurva breakthrough yang dipengaruhi kuat oleh resistensi difusi dan laju perpindahan massa.

4.4.4 Perbandingan Model

Untuk mengetahui model kinetika yang paling sesuai dalam menggambarkan proses adsorpsi logam Pb dalam sistem kolom, dilakukan analisis terhadap ketiga model kinetik tersebut. Parameter kinetika yang diperoleh dari masing-masing model disajikan pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10 Data Perbandingan Model

No	Model	Variabel	Nilai
1	Model Thomas	K_{TH} (L/mg.menit)	0,001701
		q_0 (mg/g)	0,933
		R^2	0,8338
2	Model Yoon-Nelson	K_{YN} (menit)	0,000653
		τ (menit)	2963
		q_{YN} (mg/g)	0,05596
		R^2	0,8338
3	Model Adam-Bohart	K_{AB} (L/mg.menit)	0,00057
		N_0 (mg/L)	239,79
		R^2	0,9601

Hasil uji adsorpsi Pb^{2+} pada sistem kolom menunjukkan adanya pengaruh nyata dari variasi debit dan tinggi unggun terhadap kinerja adsorben. Pada debit rendah (5 mL/menit) dan tinggi unggun lebih besar (15 cm), waktu breakthrough tercapai lebih lama, zona adsorpsi lebih merata, serta efisiensi rata-rata penyerapan lebih tinggi dibandingkan debit yang lebih tinggi atau unggun yang lebih rendah. Hal ini dapat dijelaskan karena laju alir rendah memberi kesempatan lebih panjang bagi ion logam untuk berinteraksi dengan gugus aktif pada permukaan adsorben, sementara unggun yang lebih tebal menyediakan lebih banyak situs aktif sehingga meningkatkan kapasitas penyerapan total (Chowdhury et al., 2012).

Pada Model Thomas menghasilkan kapasitas teoritis (q_0) sebesar 0,933 mg/g dengan $R^2 = 0,8338$. Nilai kapasitas yang relatif rendah ini sejalan dengan fakta bahwa breakthrough awal teramati lebih cepat, menandakan keterbatasan kapasitas adsorpsi pada kondisi debit dan konsentrasi yang digunakan. Namun, karena nilai R^2 hanya sedang, model Thomas lebih cocok digunakan sebagai pendekatan umum dalam memperkirakan kapasitas, bukan untuk menggambarkan dinamika fase awal adsorpsi.

Model Yoon–Nelson memberikan prediksi waktu breakthrough 50% (τ) sebesar 2963 menit (sekitar 49 jam), yang mengindikasikan bahwa meskipun breakthrough awal berlangsung cepat, kolom tetap mampu mempertahankan penyerapan dalam jangka waktu lama. Hal ini konsisten dengan hasil eksperimen, di mana meski titik breakthrough teoritis terlewat, kolom tetap menunjukkan kinerja adsorpsi hingga mendekati 120 jam. Model Adams–Bohart, dengan kapasitas teoritis (N_0) sebesar 239,79 mg/L dan $R^2 = 0,9601$, menunjukkan kecocokan tertinggi. Model ini secara khusus menggambarkan fase awal adsorpsi. Tingginya nilai R^2 membuktikan bahwa model Adams–Bohart paling representatif serta memiliki kecocokan tertinggi untuk menggambarkan dinamika awal adsorpsi dari pengaruh debit dan tinggi unggun. Kesesuaian hasil penelitian ini dengan model Adams–Bohart dapat dijelaskan melalui sifat dasar model tersebut. Model ini dikembangkan berdasarkan *quasi-chemical rate law*, yang berasumsi bahwa kesetimbangan adsorpsi di dalam kolom tidak terjadi secara langsung, melainkan dipengaruhi oleh kapasitas adsorben yang masih tersedia. Oleh karena itu, laju adsorpsi sebanding dengan fraksi kapasitas adsorben yang belum terpakai (Patel, H. 2019). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian, di mana perubahan tinggi unggun dan konsentrasi awal secara langsung memengaruhi konstanta laju adsorpsi (K_{AB}) maupun kapasitas adsorpsi (N_0) yang mencerminkan sisa kapasitas adsorben dalam kolom.

Secara keseluruhan, hasil eksperimen dan model kinetika saling melengkapi. Breakthrough operasional yang lebih cepat dari teori dapat dipahami melalui kapasitas terbatas yang ditunjukkan model Thomas, kestabilan jangka panjang yang ditunjukkan model Yoon–Nelson, serta kesesuaian fase awal yang diperlihatkan model Adams–Bohart. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa penerapan debit alir rendah serta peningkatan tinggi unggun adsorben merupakan pendekatan yang efektif untuk memperpanjang durasi kerja kolom sekaligus meningkatkan kinerja proses adsorpsi dalam sistem kontinu.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Hasil karakterisasi FTIR dan SEM menunjukkan bahwa aktivasi ampas tebu dengan asam sitrat menyebabkan perubahan struktur kimia dan morfologi adsorben. FTIR mengindikasikan adanya pergeseran bilangan gelombang dan peningkatan intensitas beberapa gugus fungsi aktif seperti -OH, C=O, dan -COO⁻, yang menunjukkan peningkatan keberadaan gugus aktif. Sementara itu, hasil SEM menunjukkan permukaan adsorben teraktivasi menjadi lebih bersih, memiliki jumlah pori lebih banyak, ukuran pori lebih kecil, dan tersebar merata.
2. Ampas tebu teraktivasi menunjukkan efektivitas tertinggi dalam mereduksi logam Pb pada debit 5 mL/menit dan tinggi massa adsorben 15 cm, dengan efisiensi sebesar 75,04% dalam 2 jam waktu kontak. Kondisi ini menunjukkan bahwa laju alir lambat dan tinggi bed yang optimal mendukung peningkatan efisiensi adsorpsi.
3. Model Thomas dan Yoon-Nelson menghasilkan kapasitas adsorpsi teoritis sebesar 0,933 mg/g dan 0,00596 mg/g dengan nilai R^2 yang sama, yaitu 0,8338, menunjukkan kecocokan yang cukup baik antara data eksperimen dan model. Model Yoon-Nelson juga menunjukkan waktu 50% breakthrough (τ) yaitu 2963 menit, menandakan proses adsorpsi berlangsung lambat namun stabil. Sementara itu, model Adam-Bohart memberikan kapasitas adsorpsi (N_0) sebesar 239,79 mg/L dan R^2 tertinggi sebesar 0,9601, menunjukkan kecocokan model yang lebih baik dalam merepresentasikan model khususnya menggambarkan fase awal adsorpsi. Hal ini memperkuat efektivitas ampas tebu sebagai adsorben dalam mereduksi logam berat Timbal (Pb)

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi potensi regenerasi adsorben ampas tebu setelah digunakan, guna menilai efektivitas penggunaan

ulangnya. Serta, uji adsorpsi perlu dilakukan menggunakan sampel limbah asli agar dapat mencerminkan kondisi nyata serta memastikan kinerja adsorben dalam menangani kompleksitas kontaminan pada air limbah sesungguhnya. Selain itu, mengingat pada penelitian ini adsorben yang telah diaktivasi mengalami perubahan sifat seperti munculnya bau dan gas, maka dilakukan penggantian air cuci secara berkala dan memperhatikan pH adsorben untuk mencegah perubahan sifat kimia adsorben sebelum digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, K. S., Amjad, I., & Ali, D. (2020). Adsorption and sugarcane-bagasse-derived activated carbon-based mitigation of 1-[2-(2-chloroethoxy) phenyl] sulfonyl-3-(4-methoxy-6-methyl-1, 3, 5-triazin-2-yl) urea-contaminated soils. *Open Chemistry*, 18(1), 1433-1443.
- Al Kindi, H., Tambunan, A. H., Hartulistiyoso, E., Salundik, E. S., & Sutisna, S. P. (2023). Simulation on the Breakthrough Curve During CO₂ Adsorption from Biogas in a Fixed Bed Column. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 23(3), 318-328.
- Andrianto, S. N. K., Fitri, F. G. M., & Wijayanti, W. (2024). KARAKTERISASI SIFAT FISIK, KIMIA, DAN MEKANIK SERAT SELULOSA ALAMI DARI AMPAS TEBU. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 15(2), 849-861.
- Annisa, N., Muhammad, M., Masrullita, M., Zulfazri, 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.
- Babu, B. V., & Gupta, S. (2005). Modeling and simulation of fixed bed adsorption column: effect of velocity variation. *J. Eng. Technol*, 1(60), 30923-4748.
- Basuki, K. T., Fatuzzahroh, M., Ariyanti, D., & Saputra, A. (2022). Studi Kinetika Adsorpsi Ion Stronsium Menggunakan Zeolit Terpilar Titanium Dioksida. *Jurnal Teknologi Kimia Mineral*, 1(1), 22-26.
- Boldyrev, M. (2018). Lead: properties, history, and applications. *WikiJournal of Science*, 1(2), 1-23.
- Chowdhury, Z. Z., Zain, S. M., Khan, R. A., Rafique, R. F., & Khalid, K. (2012). BATCH AND FIXED BED ADSORPTION STUDIES OF LEAD (II) CATIONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS ONTO GRANULAR ACTIVATED CARBON DERIVED FROM MANGOSTANA GARCINIA SHELL. *BioResources*, 7(3).
- Ezeonuegbu, B. A., Machido, D. A., Whong, C. M., Japhet, W. S., Alexiou, A., Elazab, S. T., ... & Batiha, G. E. S. (2021). Agricultural waste of sugarcane bagasse as efficient adsorbent for lead and nickel removal from untreated wastewater: Biosorption, equilibrium isotherms, kinetics and desorption studies. *Biotechnology Reports*, 30, e00614.
- Faisal, M., Kana, S., Muslim, A., Gani, A., & Nabila, H. (2022). Adsorption of Cd (II) in a semi-continuous process by residual charcoal from the pyrolyzed oil palm shells. *RJC*, 15(03), 1792-1798.
- Fajar, M. (2019). Adsorpsi Ion Logam Berat Cd, Cu, dan Bb Menggunakan Kulit Kacang Tanah *Arachis Hypogaea*. L. UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, 1(1), 63. <https://repository.uinjkt.ac.id/dspace/handle/123456789/55696>
- Genet, M. B., Jembere, A. L., & Tafete, G. A. (2022). Economical adsorbent developed from sugarcane bagasse for zinc (II) removal from wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(8), 295.
- Golor, M. M., Rosma, D., Santoso, S. P., Soetaredjo, F. E., Yuliana, M., Ismadji, S., & Ayucitra, A. (2020). Citric acid-crosslinked cellulosic hydrogel from sugarcane bagasse: Preparation, characterization, and adsorption study.

- Citric Acid-crosslinked Cellulosic Hydrogel from Sugarcane Bagasse: Preparation, Characterization, and Adsorption Study, 3(27), 59-67.
- Hamriani, H. (2016). Aplikasi Metode Scanning Electron Microscopy (Sem) dan X-ray Diffraction (Xrd) dalam Menganalisis Limbah Pabrik Gula X. Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika, 12(1), 74-82.
- Harnowo, A., Hidayah, E. N., & Janah, M. (2019). Kapasitas adsorbansi arang aktif kulit kacang tanah pada penyisihan logam Fe. Jurnal Mineral, Energi, Dan Lingkungan, 3(1), 53-59.
- 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.
- Hidayati, N., Mardiyono, M., & Wimpy, W. (2022). Pemanfaatan Larutan Asam Sitrat sebagai Upaya Penurunan Kadar Logam Berat Krom pada Sayuran Kubis. Jurnal Farmasetis, 11(3), 237-246.
- Hoang, M. T., Pham, T. D., Pham, T. T., Nguyen, M. K., Nu, D. T. T., Nguyen, T. H., & Van der Bruggen, B. (2021). Esterification of sugarcane bagasse by citric acid for Pb²⁺ adsorption: effect of different chemical pretreatment methods. Environmental Science and Pollution Research, 28(10), 11869-11881.
- Imani, A., Sukwika, T., & Febrina, L. (2021). Karbon aktif ampas tebu sebagai adsorben penurunan kadar besi dan mangan limbah air asam tambang. Jurnal Teknologi, 13(1), 33-42.
- Isa, Y. M., Harripersadth, C., Musonge, P., Sayago, A., & Morales, M. G. (2020). The application of eggshells and sugarcane bagasse as potential biomaterials in the removal of heavy metals from aqueous solutions. South African Journal of Chemical Engineering, 34(1), 142-150.
- Kharisma, R. N., Yulianto, B., & Nuraini, R. (2023). Logam Berat Timbal (Pb) Pada Air, Sedimen, dan Kerang Darah (Anadara Granosa) di Muara Sungai Loji dan Perairan Pantai Sekitarnya, Kota Pekalongan. Journal of Marine Research, 12(2), 330 - 335. DOI : 10.14710/jmr.v12i2.36375
- Kristianingrum, S., Sulistyani, S., Fillaeli, A., Siswani, E. D., & Nafiisah, N. H. (2020). Aplikasi sistem kontinyu menggunakan karbon aktif untuk penurunan kadar logam Cu dan Zn dalam air limbah. Jurnal Sains Dasar, 9(2), 54-59.
- Ling, C. P., Tan, I. A. W., & Lim, L. L. P. (2016). Fixed-bed Column Study for Adsorption of Cadmium on Oil Palm. Journal of Applied Science & Process Engineering, 3(2), 60-71.
- Lolo, A., Patanden, C. F., & Ruslan, E. (2020). Karakterisasi Air Daerah Panas Bumi Pencong dengan Metode AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer) di Kecamatan Biringbulu, Kabupaten Gowa Provinsi Sulawesi Selatan. Jurnal Geoelebes, 4(2), 102-110. 10.20956/geoelebes.v4i2.8928
- Maharani, D., & Sa'diyah, K. (2021). Adsorpsi Logam Nikel Menggunakan Adsorben Serbuk Gergaji Kayu. Jurnal Teknologi Separasi, 7(2), 170 - 178. 10.33795/distilat.v7i2.216

- Masruhin, Rasyid, R., & Yani, S. (2018). Penjerapan Logam Berat Timbal (Pb) Dengan Menggunakan Lignin Hasil Isolasi Jerami Padi. *Journal Of Chemical Process Engineering*, 3(1), 11-20. <http://dx.doi.org/10.33536/jcpe.v3i1.188>
- 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.
- Mesfer, M. K. A., Danish, M., Khan, M. I., Ali, I. H., Hasan, M., & Jerry, A. E. (2020). Continuous fixed bed CO₂ adsorption: breakthrough, column efficiency, mass transfer zone. *Processes*, 8(10), 1233.
- Myers, Timothy G., Alba Cabrera-Codony, and Abel Valverde. "On the development of a consistent mathematical model for adsorption in a packed column (and why standard models fail)." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 202 (2023): 123660.
- Novia, M., Makki, A. I., & Arafah, N. (2022). Karakterisasi Serat Ampas Tebu (Bagasse) Sebagai Alternatif Bahan Baku Tekstil Dan Produk Tekstil (Tpt) Terbaru.
- 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.
- Patel, H. (2019). Fixed-bed column adsorption study: a comprehensive review. *Applied Water Science*, 9(3), 45.
- Pratama, B. S. (2018). Konversi ampas tebu menjadi biochar dan karbon aktif untuk penyisihan Cr (VI). *Jurnal Rekayasa Bahan Alam Dan Energi Berkelanjutan*, 2(1), 7-12.
- Purba, E. S., Irwan, & Nurmaidah. (2017). Pemanfaatan Limbah SerbukGergaji Kayu Sebagai Substitusi Campuran Bata Ringan Kedap Suara. *Journal of Civil Engineering, Building and Transportation*, 1(2), 87-95.<http://dx.doi.org/10.31289/jcebt.v1i2.1679>
- Putra, A., Fitri, W. E., & Febria, F. A. (2023). Toksisitas Logam Timbal Terhadap Kesehatan dan Lingkungan: Literature Review. *Jurnal Kesehatan Medika Saintika*, 14(1), 158 - 174. <http://dx.doi.org/10.30633/jkms.v14i1.1890>
- Putri, S. A., Asnawati, & Indarti, D. (2019). Optimalisasi Adsorpsi Zat Warna Rhodamin B Pada Hemiselulosa Dalam Sistem Dinamis. *Jurnal Berkala Sainstek*, 7(1), 1-6. <http://dx.doi.org/10.19184/bst.v7i1.9681>
- Rielsa. (2023). Pemanfaatan Limbah Sumpit Sebagai Adsorben untuk Menurunkan Kadar Kadmium (Cd) Pada Limbah Cair Dengan Metode Kontinu
- Rina, R., Alimuddin, A., & Panggabean, A. S. (2019). Pemanfaatan Ampas Tebu Sebagai Material Adsorben Besi, Mangan, pH, COD, BOD dan TSS Pada Air Sumur. *Jurnal Kimia Mulawarman*, 16(2), 66-72. <https://doi.org/10.30872/jkm.v16i2.424>

- Robiah, R. (2019). Regenerasi minyak goreng bekas sebagai bahan baku biodiesel menggunakan ampas tebu sebagai adsorben. *Jurnal Distilasi*, 3(1), 41-46.
- Sari, N. W., Fajri, M. Y., & W, A. (2018). Analisis Fitokimia Dan Gugus Fungsi Dari Ekstrak Etanol Pisang Goroho Merah (*Musa Acuminata* (L)). *Indonesian Journal of Biotechnology and Biodiversity*, 2(1), 30-34. <https://doi.org/10.47007/ijobb.v2i1.26>
- Satriawan, M. B., & Illing, I. (2018). Uji ftir bioplastik dari limbah ampas sagu dengan penambahan variasi konsentrasi gelatin. *Dinamika*, 8(2), 1-13.
- Sazali, N., Harun, Z., & Sazali, N. (2020). A review on batch and column adsorption of various adsorbent towards the removal of heavy metal. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 67(2), 66-88.
- Septiano, A., Susilo, & 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. <http://dx.doi.org/10.15294/ijmns.v44i2.33143>
- Sinaga, A. H., Simatupang, U. C., & Girsang, R. (2022). Analisa Kelayakan Logam Berat Timbal (Pb) Pada POC Dari Dekomposisi Limbah Air Tahu Dan Ikan Teri (Feasibility Analysis of Lead Heavy Metal in POC from Decomposition of Tofu Water and Anchovy Waste. *Junal Darma Agung*, 30(1), 125-130. <http://dx.doi.org/10.46930/ojsuda.v30i1.1432>
- Subhan, R., & Shidiqi, M. F. (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), 1-6. <http://dx.doi.org/10.21776/ub.rbaet.2022.006.02.01>
- Subamia, I. D. P., Widiasih, N. N., Wahyuni, I. G. A. N. S., & Kristiyanti, P. L. P. (2023). Optimasi Kinerja Alat Fourier Transform Infrared (FTIR) Melalui Studi Perbandingan Komposisi dan Ketebalan Sampel-KBr. *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 5(2), 58-69
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, B., & Dimyati, A. (2017, June). Studi scanning electron microscopy (SEM) untuk karakterisasi proses oksidasi paduan zirkonium. In *Jurnal Forum Nuklir* (Vol. 9, No. 1, pp. 44-50).
- Susilawati, N., & Andryanie, F. (2019). Pengaruh waktu kontak dan aktivasi ampas tebu terhadap kapasitas adsorpsi logam Cr Dan Mn. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 2(2), 277-284.
- Suwazan, D., & Nurhidayanti, N. (2022). Efektivitas Kombinasi Kitosan dan Ampas Teh Sebagai Adsorben Alami dalam Menurunkan Konsentrasi Timbal Pada Limbah Cair PT PXI. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 37 - 44. <https://doi.org/10.14710/jil.20.1.37-44>
- Syauqiah, I., Amalia, M., & Kartini, H. A. (2011). Analisis Variasi Waktu dan Kecepatan Pengaduk Pada Proses Adsorpsi Limbah Logam Berat Dengan Arang Aktif. *Jurnal Info Teknik*, 12(1), 11-20. <https://media.neliti.com/media/publications/70401-ID-analisis-variasi-waktu-dan-kecepatan-pen.pdf>
- Sylvia, N., Meriatna, M., Hakim, L., Fitriani, F., & Fahmi, A. (2017). Kinerja Kolom Adsorpsi pada Penjerapan Timbal (Pb²⁺) dalam Limbah Artifisial

- Menggunakan Cangkang Kernel Sawit. *Jurnal Integrasi Proses*, 6(4), 185-190.
- 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. <https://doi.org/10.34312/jambchem.v2i1.2608>
- 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.
- Tejada-Tovar, C., Villabona-Ortíz, A., & González-Delgado, Á. (2022). Adsorption study of continuous heavy metal ions (Pb²⁺, Cd²⁺, Ni²⁺) removal using cocoa (*Theobroma cacao* L.) pod husks. *Materials*, 15(19), 6937.
- Widiyanti, S. E., Ridhawati, R., Damayanti, J. D., Khotimah, K., & Irsal, M. (2021). ADSORPSI FE²⁺ MENGGUNAKAN ARANG AKTIF CAMPURAN LIMBAH TEH DAN TONGKOL JAGUNG. In *Seminar Nasional Hasil Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat (SNP2M)* (Vol. 6, pp. 23-28).
- Winoto, E., & Hatina, S. (2020). PEMANFAATAN KARBON AKTIF DARI SERBUK KAYU MERBAU DAN TONGKOL JAGUNG SEBAGAI ADSORBEN UNTUK PENGOLAHAN LIMBAH CAIR AAS. *Jurnal Redoks*, 5(1), 32 - 46. <https://doi.org/10.31851/redoks.v5i1.4027>
- Yosephine, A., Gala, V., Ayucitra, A., dan Retnoningtyas, E.S. 2012 Pemanfaatan Ampas Tebu dan kulit pisang Dalam Pembuatan Kertas Serat Campuran. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*. Vol 11 No.2 Hal 95- 96. <http://citation.itb.ac.id>
- Yustinah, Y., Hudzaifah, H., Aprilia, M., & Ab, S. (2020). Keseimbangan adsorpsi logam berat (Pb) dengan adsorben tanah diatomit secara batch. *Jurnal Konversi*, 9(1), 12-12.
- ZAHRA, P. S. (2022). Efektivitas Ampas Teh Sebagai Fiber Adsorbent Pada Penyerapan Logam Kadmium (Cd) Dalam Air.
- Zulfania, F., Aribadin, Fathoni, R., & Nur, A. M. (2022). Kemampuan Adsorpsi Logam Berat Zn Dengan Menggunakan Adsorben Kulit Jagung (*Zea Mays*). *Jurnal Chemurgy*, 6(2), 65-69. <http://dx.doi.org/10.30872/cmg.v3i2.357>
- Alifah, N.A (2025, 12 Januari). Komunikasi pribadi.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan

1. Preparasi $C_6H_8O_7$ 0,4 M

$$Ar\ C = 12\ g/mol$$

$$Ar\ H = 1\ g/mol$$

$$Ar\ O = 16\ g/mol$$

$$\begin{aligned} Mr\ C_6H_8O_7 &= (Ar\ C \cdot Ar\ H \cdot Ar\ O) \\ &= (12 \cdot 6) + (1 \cdot 8) + (16 \cdot 7) \\ &= 192,059\ g/mol \end{aligned}$$

$$0,4\ M = \frac{Massa}{Mr\ C_6H_8O_7 \cdot V}$$

$$0,4\ M = \frac{Massa}{192,059\ g/mol \cdot 1L}$$

$$Massa = 0,4 \cdot 192,059\ g/mol$$

$$Massa = 76,8236\ g$$

Sehingga, 76,8236 g $C_6H_8O_7$ dilarutkan dengan 1000mL aquades hingga homogen

2. Preparasi 1L larutan induk $Pb(NO_3)_2 \pm 1000\ mg/L$

$$Ar\ Pb = 207,19\ g/mol$$

$$Ar\ N = 14,01\ g/mol$$

$$Ar\ O = 16\ g/mol$$

$$\begin{aligned} Mr\ NO_3 &= Ar\ N + 3 \cdot Ar\ O \\ &= 14,01 + (3 \cdot 16) \\ &= 62,01\ g/mol \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mr\ Pb(NO_3)_2 &= Ar\ Pb + 2 \cdot Ar\ NO_3 \\ &= 207,19 + (2 \cdot 62,01) \\ &= 331,2\ g/mol \end{aligned}$$

$$Massa = \frac{Mr}{Ar} \cdot 1000\ mg$$

$$Massa = \frac{331,2}{207,19} \cdot 1000\ mg$$

$$Massa = 1598,53\ mg$$

$$Massa = 1,59853\ g$$

Sehingga, 1,59853 g $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ dilarutkan dengan 1000mL aquades hingga homogen.

3. Larutan Uji 15 mg/L

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

$$1000 \text{ mg/L} \cdot V_1 = 15 \text{ mg/L} \cdot 1000 \text{ mL}$$

$$V_1 = \frac{C_2 \cdot V_2}{C_1} = \frac{15 \cdot 1000}{1000} = 15 \text{ mL}$$

Larutan Uji 25 mg/L

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2$$

$$1000 \text{ mg/L} \cdot V_1 = 25 \text{ mg/L} \cdot 1000 \text{ mL}$$

$$V_1 = \frac{C_2 \cdot V_2}{C_1} = \frac{25 \cdot 1000}{1000} = 25 \text{ mL}$$

Lampiran 2 Dokumentasi Penelitian

1. Preparasi Adsorben Ampas Tebu



Pengambilan Ampas Tebu



Pengeringan Ampas Tebu



Ampas Tebu di haluskan



Mengayak Ampas Tebu

2. Preparasi Adsorben Teraktivasi



Menimbang Asam Sitrat



Aktivasi Adsorben Ampas Tebu



Pengeringan Adsorben Setelah Aktivasi dan Pencucian



Mengayak Adsorben Teraktivasi

3. Proses Adsorpsi



Proses Adsorpsi Kolom



Pengenceran Sampel



Pembacaan Sampel dengan AAS

Lampiran 3 Data Pengujian Adsorpsi

1. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Debit Adsorben Non Aktivasi

Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.227	8.473	53.97%
30	5	15	15,7	5.049	10.651	67.84%
45	5	15	15,7	6.028	9.672	61.61%
60	5	15	15,7	4.663	11.037	70.30%
75	5	15	15,7	5.008	10.692	68.10%
90	5	15	15,7	4.87	10.83	68.98%
105	5	15	15,7	6.786	8.914	56.78%
120	5	15	15,7	5.876	9.824	62.57%
15	7.5	15	15,7	12.354	3.346	21.31%
30	7.5	15	15,7	5.807	9.893	63.01%
45	7.5	15	15,7	5.145	10.555	67.23%
60	7.5	15	15,7	4.704	10.996	70.04%
75	7.5	15	15,7	4.787	10.913	69.51%
90	7.5	15	15,7	3.753	11.947	76.10%
105	7.5	15	15,7	6.055	9.645	61.43%
120	7.5	15	15,7	7.503	8.197	52.21%

2. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Debit Adsorben Teraktivasi

Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.447	8.253	52.57%
30	5	15	15,7	4.856	10.844	69.07%
45	5	15	15,7	4.484	11.216	71.44%
60	5	15	15,7	4.001	11.699	74.52%
75	5	15	15,7	4.828	10.872	69.25%
90	5	15	15,7	4.746	10.954	69.77%
105	5	15	15,7	5.338	10.362	66.00%
120	5	15	15,7	3.919	11.781	75.04%
15	7.5	15	15,7	5.766	9.934	63.27%
30	7.5	15	15,7	6.097	9.603	61.17%
45	7.5	15	15,7	6.014	9.686	61.69%
60	7.5	15	15,7	6.028	9.672	61.61%
75	7.5	15	15,7	4.139	11.561	73.64%
90	7.5	15	15,7	4.952	10.748	68.46%
105	7.5	15	15,7	4.718	10.982	69.95%
120	7.5	15	15,7	4.815	10.885	69.33%

3. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Ketinggian Adsorben Non Aktivasi

Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.227	8.473	53.97%
30	5	15	15,7	5.049	10.651	67.84%
45	5	15	15,7	6.028	9.672	61.61%
60	5	15	15,7	4.663	11.037	70.30%
75	5	15	15,7	5.008	10.692	68.10%
90	5	15	15,7	4.87	10.83	68.98%
105	5	15	15,7	6.786	8.914	56.78%
120	5	15	15,7	5.876	9.824	62.57%
15	5	10	15,7	7.172	8.528	54.32%
30	5	10	15,7	6.634	9.066	57.75%
45	5	10	15,7	6.827	8.873	56.52%
60	5	10	15,7	6.8	8.9	56.69%
75	5	10	15,7	6.786	8.914	56.78%
90	5	10	15,7	8.454	7.246	46.15%
105	5	10	15,7	5.242	10.458	66.61%
120	5	10	15,7	6	9.7	61.78%

4. Data Hasil Uji Adsorpsi Variasi Ketinggian Adsorben Teraktivasi

Waktu Pengambilan (menit)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	C in (mg/L)	C ef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal
15	5	15	15,7	7.447	8.253	52.57%
30	5	15	15,7	4.856	10.844	69.07%
45	5	15	15,7	6.289	9.411	59.94%
60	5	15	15,7	4.001	11.699	74.52%
75	5	15	15,7	4.828	10.872	69.25%
90	5	15	15,7	4.746	10.954	69.77%
105	5	15	15,7	5.338	10.362	66.00%
120	5	15	15,7	3.919	11.781	75.04%
15	5	10	15,7	6.248	9.452	60.20%
30	5	10	15,7	6.469	9.231	59%
45	5	10	15,7	7.061	8.639	55.03%
60	5	10	15,7	5.297	10.403	66.26%
75	5	10	15,7	6.937	8.763	55.82%
90	5	10	15,7	9.294	6.406	40.80%
105	5	10	15,7	6.896	8.804	56.08%
120	5	10	15,7	7.751	7.949	50.63%

4. Model Thomas

Waktu Pengambilan (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal	Ct/Co	ln(Co/Ct-1)
1	5	15	23.037	5.108	17.929	77.83%	0.22173026	1.25561158
6	5	15	23.037	6.1	16.937	73.52%	0.264791422	1.02121181
24	5	15	23.037	6.548	16.489	71.58%	0.284238399	0.92353383
30	5	15	23.037	7.084	15.953	69.25%	0.307505318	0.81180818
48	5	15	23.037	8.114	14.923	64.78%	0.352216	0.60931268
54	5	15	23.037	8.802	14.235	61.79%	0.382081	0.48072475
72	5	15	23.037	11.2	11.837	51.38%	0.486174415	0.05531644
78	5	15	23.037	12.854	10.183	44.20%	0.557971958	-0.2329354
96	5	15	23.037	20.266	2.771	12.03%	0.879715241	-1.9897363
102	5	15	23.037	21.231	1.806	7.84%	0.921604376	-2.4643479
120	5	15	23.037	22.596	0.441	1.91%	0.980856882	-3.9364833

5. Model Yoon-Nelson

Waktu Pengambilan (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal	(Ct/(Co-Ct))	ln (Ct/(Co-Ct))
1	5	15	23.037	5.108	17.929	77.83%	0.284901556	-1.255611575
6	5	15	23.037	6.1	16.937	73.52%	0.360158233	-1.021211807
24	5	15	23.037	6.548	16.489	71.58%	0.397113227	-0.923533832
30	5	15	23.037	7.084	15.953	69.25%	0.44405441	-0.811808179
48	5	15	23.037	8.114	14.923	64.78%	0.543724452	-0.609312682
54	5	15	23.037	8.802	14.235	61.79%	0.61833509	-0.480724752
72	5	15	23.037	11.2	11.837	51.38%	0.946185689	-0.055316441
78	5	15	23.037	12.854	10.183	44.20%	1.262299912	0.232935384
96	5	15	23.037	20.266	2.771	12.03%	7.313605197	1.989736339
102	5	15	23.037	21.231	1.806	7.84%	11.75581395	2.464347923
120	5	15	23.037	22.596	0.441	1.91%	51.23809524	3.936483303

6. Model Adam-Bohart

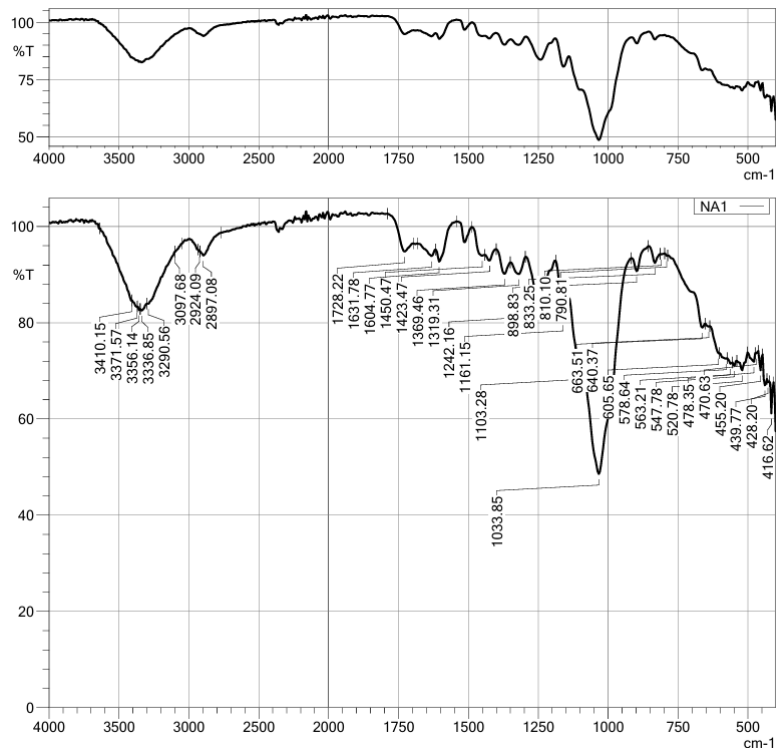
Waktu Pengambilan (jam)	Debit (mL/menit)	Tinggi Adsorben (cm)	Cin (mg/L)	Cef (mg/L)	C terserap (mg/L)	Efisiensi Removal	Ct/Co	ln(Ct/Co)
1	5	15	23.037	5.108	17.929	77.83%	0.22173	-1.50629
6	5	15	23.037	6.1	16.937	73.52%	0.264791	-1.32881
24	5	15	23.037	6.548	16.489	71.58%	0.284238	-1.25794
30	5	15	23.037	7.084	15.953	69.25%	0.307505	-1.17926
48	5	15	23.037	8.114	14.923	64.78%	0.352216	-1.04351
54	5	15	23.037	8.802	14.235	61.79%	0.382081	-0.96212
72	5	15	23.037	11.2	11.837	51.38%	0.486174	-0.72119
78	5	15	23.037	12.854	10.183	44.20%	0.557972	-0.58345
96	5	15	23.037	20.266	2.771	12.03%	0.879715	-0.12816
102	5	15	23.037	21.231	1.806	7.84%	0.921604	-0.08164
120	5	15	23.037	22.596	0.441	1.91%	0.980857	-0.01933

4. Perbandingan Model

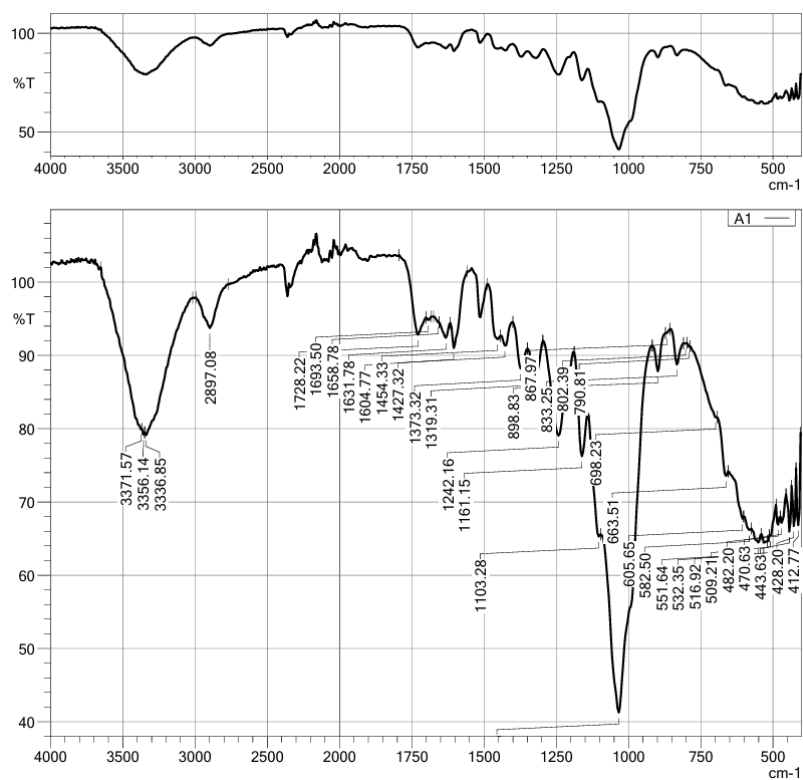
No	Model	Variabel	Nilai
1	Model Thomas	K_{TH} (L/mg.menit)	0,001701
		q_0 (mg/g)	0,933
		R^2	0,8338
2	Model Yoon-Nelson	K_{YN} (menit)	0,000653
		τ (menit)	2963
		q_{YN} (mg/g)	0,05596
		R^2	0,8338
3	Model Adam-Bohart	K_{AB} (mL/mg.menit)	0,00057
		N_0 (mg/L)	239,79
		R^2	0,9601

Lampiran 4 Data Karakteristik FTIR

1. Adsorben Ampas Tebu Non Aktivasi



2. Adsorben Ampas Tebu Teraktivasi



RIWAYAT HIDUP



Penulis, Nur Yafta Hilna Ali, lahir di Timika, 11 Juli 2003. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara putri dari pasangan Bapak Sumarlin dan Ibu Hasniah. Pendidikan dasar ditempuh di SDIT Al-Falah Timika, kemudian melanjutkan jenjang SMP dan SMA di Thursina International Islamic Boarding School, Malang. Kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia (UII).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam kegiatan organisasi. Pada tahun pertama, penulis bergabung dalam Lembaga Dakwah Fakultas Al-Mustanir FTSP UII pada Departemen Kewirausahaan. Kemudian pada tahun kedua, mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL FTSP UII) sebagai Sekretaris Departemen Hubungan Luar. Penulis juga memiliki pengalaman kerja praktik di PT Pindo Deli Pulp and Paper Mills 2 Karawang, serta pernah menjalani magang mandiri di PT Triatra Sinergia Pratama. Selain itu, penulis berkesempatan mengikuti program student exchange ke Universiti Kuala Lumpur (UniKL), Malaysia, yang diselenggarakan oleh program studi Teknik Lingkungan UII.