



TUGAS AKHIR - CL234801

ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH DAN HCl

ANGELA ANUGRAH PAREA SARI

NRP. 5014211003

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEng

NIP. 19820119 200501 1 001

Arry Febrianto, S.Si., M.T

NIP. 2022199211017

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



TUGAS AKHIR - CL234801

**ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI
LUMPUR IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH DAN HCl**

ANGELA ANUGRAH PAREA SARI

NRP. 5014211003

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

NIP. 19820119 200501 1 001

Arry Febrianto, S.Si., M.T

NIP. 2022199211017

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025



FINAL PROJECT - CL234801

ANALYSIS OF CO₂ ADSORPTION BY *BIOCHAR* FROM IPLT SLUDGE WITH NaOH AND HCl

ANGELA ANUGRAH PAREA SARI

NRP. 5014211003

Advisor

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

NIP. 19820119 200501 1 001

Arry Febrianto, S.Si., M.T

NIP. 2022199211017

Study Program Bachelor's Degree

Department of Environmental Engineering

Faculty of Civil Engineering, Planning, and Geo Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH DAN HCl

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : ANGELA ANUGRAH PAREA SARI

NRP. 5014211003

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM
2. Arry Febrianto, S.Si., M.T.
3. Prof. Ir. Joni Hermana, MscES., Ph.D
4. Dr. Abdu Fadli Assomadi S.Si., M.T
5. Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D

Pembimbing

Ko-pembimbing

Penguji

Penguji

Penguji



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Angela Anugrah Parea Sari / 5014211003
Program studi : S-1 Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPN /
198201192005011001
Dosen Ko-Pembimbing/ NIP : Arry Febrianto, S.Si., M.T. / 2022199211017

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Serapan CO₂ oleh Biochar dari Lumpur IPLT yang Dimodifikasi NaOH dan HCl” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, Juli 2025

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPN
NIP. 198201192005011001

Mahasiswa



Angela Anugrah Parea Sari
NRP. 5014211003

Dosen Ko-Pembimbing



Arry Febrianto, S.Si., M.T.
NIP. 2022199211017

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRAK

ANALISIS SERAPAN CO_2 OLEH *BIOCHAR* DARI LUMPUR IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH DAN HCl

Nama Mahasiswa / NRP
Departemen
Dosen Pembimbing
Dosen Co-Pembimbing

: Angela Anugrah Parea Sari / 5014211003
: Teknik Lingkungan FT – SPK ITS
: Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM
: Arry Febrianto, S.Si., M.T

Abstrak

Biochar dapat digunakan sebagai adsorben CO_2 yang lebih ekonomis karena dapat dibuat dari berbagai jenis biomassa melalui proses pirolisis atau karbonisasi. *Biochar* memiliki karakteristik yang unggul, seperti luas permukaan yang besar, struktur berpori yang kompleks, dan banyaknya gugus fungsi pada permukaan sehingga memiliki potensi besar untuk menangkap CO_2 . Lumpur yang berasal dari pengolahan lumpur tinja IPLT dapat menjadi biomassa untuk bahan pembuatan *biochar*. Permasalahannya adalah *biochar* yang berbahan baku dasar lumpur limbah tunggal menujukkan kapasitas adsorpsi CO_2 yang rendah. Oleh karena itu, modifikasi secara fisik dan kimia dibutuhkan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi CO_2 .

Peningkatan adsorpsi polutan asam pada karbon aktif dapat dicapai dengan meningkatkan sifat kebasaan material yaitu dengan menggunakan impregnasi bahan kimia dengan NaOH. Pencucian dengan HCl juga dapat menurunkan kadar abu yang berpengaruh dengan efisiensi penyerapan CO_2 . Pada penelitian ini, dilakukan penelitian pendahuluan dengan pembuatan *biochar* awal kemudian divariasikan dengan impregnasi NaOH dengan konsentrasi 0,1 M; 1 M; dan 2 M. Serta *biochar* yang dicuci dengan HCl dengan konsentrasi 0,1 M; 1 M; dan 2 M. *Biochar* dilakukan uji serapan CO_2 menggunakan alat *fixed bed modified biochar* sebagai alat *capture gas CO₂*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan NaOH sebagai aktivator dan pencucian *biochar* dengan HCl meningkatkan efisiensi penyerapan CO_2 sebesar 5,35 kali lipat. Hasil adsorpsi CO_2 tertinggi yaitu 4,92 mmol/g didapat dari *biochar* yang diimpregnasi dengan NaOH 0,1 M dan pencucian HCl 1 M dengan kapasitas adsorpsi CO_2 sebesar 216,5 mg/g. Luas permukaan spesifik (SSA) *biochar* yang dimodifikasi juga lebih meningkat sebanyak 1,34 kali lipat atau 33,96% dari 188,852 m²/g menjadi 252.989 m²/g dengan variasi mesopori yang dapat meningkatkan adsorpsi CO_2 . Aktivasi *biochar* dengan NaOH dan pencucian HCl juga meningkatkan pembentukan gugus -OH, C=C aromatik, serta gugus eter dan ester (C–O), yang ditunjukkan oleh peningkatan intensitas pita serapan pada 3280 cm⁻¹, 1595,3 cm⁻¹, 1736,9 cm⁻¹, 1513,3 cm⁻¹, dan 1364 cm⁻¹. Hal ini membuktikan bahwa proses aktivasi memperkuat struktur aromatik dan gugus fungsi *biochar*. Identifikasi morfologi permukaan *biochar*, menunjukkan *biochar* yang diimpregnasi dengan NaOH dan pencucian HCl memiliki struktur yang lebih teratur dengan permukaan yang lebih halus dan terbentuk banyak pori dengan variasi lebar pori yang lebih beragam. Aktivasi *biochar* dengan NaOH dan pencucian HCl juga meningkatkan kandungan karbon sebesar 1,54 kali lipat, serta kestabilan mineral aktif seperti Fe, Al, dan Ni, yang meningkatkan kemampuan adsorpsi CO_2 .

Kata kunci: *biochar*, lumpur IPLT, NaOH, HCl, adsorpsi CO_2

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ABSTRACT

ANALYSIS OF CO₂ ADSORPTION BY *BIOCHAR* FROM IPLT SLUDGE WITH NaOH AND HCl

Student Name / NRP	: Angela Anugrah Parea Sari / 5014211003
Departement	: Teknik Lingkungan FT – SPK ITS
Advisor	: Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., MEPM
	: Arry Febrianto, S.Si., M.T

Abstract

Biochar can be used as a more economical CO₂ adsorbent because it can be produced from various types of biomass through pyrolysis or carbonization processes. *Biochar* has superior characteristics, such as a large surface area, complex porous structure, and abundant functional groups on its surface, making it highly potential for CO₂ capture. Sludge derived from fecal sludge treatment at IPLT facilities can serve as biomass for *biochar* production. However, *biochar* made from single-sludge waste biomass exhibits low CO₂ adsorption capacity. Therefore, physical and chemical modifications are necessary to enhance its CO₂ adsorption capacity.

Improvement of acidic pollutant adsorption on activated carbon can be achieved by increasing the basicity of the material, namely through chemical impregnation with NaOH. Washing with HCl can also reduce ash content, which affects CO₂ adsorption efficiency. In this study, a preliminary investigation was conducted by producing initial *biochar*, which was the varied by impregnating with NaOH at concentrations of 0,1 M; 1 M; and 2 M. Additionally, *biochar* was washed with HCl at concentrations of 0,1 M; 1 M; and 2 M. The CO₂ adsorption test was performed using a fixed-bed modified *biochar* device as a CO₂ gas capture tool.

The results showed that the addition of NaOH as an activator and HCl washing increased CO₂ adsorption efficiency by 5,35 times. The highest CO₂ adsorption result, 4,92 mmol/g, was obtained from *biochar* impregnated with 0,1 M NaOH and washed with 1 M HCl, with a CO₂ adsorption capacity of 216,5 mg/g. The spesific surface area (SSA) of the modified *biochar* also increased by 1,34 times or 33,96% from 188,852 m²/g to 252,989 m²/g, with mesopore variations that can enhance CO₂ adsorption. Activation of *biochar* with NaOH and washing with HCl also enhanced the formation of -OH groups, aromatic C=C bonds, as well as ether and ester (C–O) groups, as indicated by the increased absorption peak intensities at 3280 cm⁻¹, 1595,3 cm⁻¹, 1736,9 cm⁻¹, 1513,3 cm⁻¹, and 1364 cm⁻¹. This confirms that the activation process strengthens the aromatic structure and functional groups of the *biochar*. Surface morphology identification of *biochar* indicates that *biochar* impregnated with NaOH and HCl washing has a more regular structure with a smoother surface and developed numerous pores with more diverse pore width variations. *Biochar* activation with NaOH and HCl washing also increased carbon content by 1,54 times, as well as the stability of active minerals such as Fe, Al, and Ni, which enhanced CO₂ adsorption capacity.

Keywords: *biochar*, IPLT sludge, NaOH, HCl, CO₂ adsorption

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkah, rahmat, dan karunia-Nya yang tak pernah henti mengalir, hingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini. Setiap kalimat yang tertulis, setiap data yang terhimpun, adalah hasil dari perjalanan panjang yang penuh pembelajaran, keraguan, harapan, dan doa. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Lingkungan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penelitian ini mengangkat topik tentang pengembangan *biochar* dari lumpur domestik sebagai adsorben karbon dioksida (CO_2), sebuah langkah kecil yang penulis harap dapat memberi makna besar bagi keberlanjutan lingkungan.

Dalam prosesnya, penulis tidak berjalan sendiri. Banyak tangan yang menggenggam, bahu yang menopang, dan kata-kata yang menguatkan. Untuk itu, izinkan penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei, ST., M.PM dan Arry Febrianto, S.Si., M.T selaku dosen pembimbing tugas akhir yang senantiasa membimbing dan memberikan waktu, ilmu serta saran kepada penulis.
2. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana, MscES., Ph.D, Bapak Dr. Abdu Fadli Assomadi S.Si., M.T, dan Ibu Ervin Nurhayati, ST., MT., Ph.D selaku dosen pengarah penulis.
3. Bapak Agus Siswanto, Ibu Sri Sulastri, dan Avisa Yasmine serta seluruh keluarga yang senantiasa hadir dalam doa, dalam diam, dan dalam peluk hangat yang menjadi akar dari segala semangat penulis untuk terus melangkah.
4. Sahabat penulis, Ismi Dian Savitri dan Annisa Shafa Damayanti yang tetap memilih hadir di setiap suka dan duka tidak hanya selama penyusunan Tugas Akhir ini melainkan sejak di bangku SMA hingga bisa *survive* sampai di ambang kelulusan perkuliahan ini.
5. Rekan begadang dan diskusi penulis selama proses penyelesaian Tugas Akhir yang selalu hadir di saat yang dibutuhkan, baik lewat candaan maupun pelukan hangat: Hilda, Tika, Fasha, Bela, Jasmine, Laila, Regy, Andra, Brian, Dilla, Ira, Amoi, Anin, dan Teguh.
6. PLH SIKLUS ITS, rumah kedua tempat penulis pulang untuk sejenak bernafas dan belajar bahwa rasa cinta terhadap lingkungan tidak hanya hidup dalam teori, tapi nyata dalam aksi dan komunitas yang hangat walau tak sedarah.
7. Kemasyarakatan BEM ITS dan keluarga FAMS, yang menjadi saksi perjuangan penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan tetap aktif berorganisasi, dan selalu memberi semangat, dukungan, dan nasihat untuk penulis.
8. Teman-teman angkatan 2021 dan seluruh kakak tingkat yang selalu membantu, baik secara langsung ataupun dalam doa.
9. Untuk bangtan, film, anime, drama korea, dan manhwa yang telah menjadi ruang rehat di tengah kelelahan. Di saat dunia nyata terlalu bising, kalian menjadi pelarian yang menyenangkan dan menenangkan, pengingat bahwa jeda juga bagian dari perjuangan.
10. Dan yang terakhir, untuk diri penulis yang meski berkali-kali ragu, jatuh, bahkan ingin menyerah, namun tetap memilih untuk bangkit, berjalan lagi, dan menyelesaikan apa yang telah dimulai.

Tugas akhir ini disusun semaksimal mungkin, namun penulis menyadari bahwa dalam laporan ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis menerima segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Akhir kata, semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca, khususnya bagi mahasiswa Departemen Teknik Lingkungan ITS.

Surabaya, 22 Juni 2025

Penulis

"Halaman Ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Ruang Lingkup.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Emisi Karbon dan Carbon Sequestracion	3
2.2 Biochar.....	3
2.3 Pirolisis	5
2.4 Lumpur IPLT	6
2.5 Adsorpsi.....	7
2.6 Isoterm Adsorpsi.....	8
2.7 Faktor yang mempengaruhi adsorpsi biochar.....	10
2.8 Penelitian Dahulu.....	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Kerangka Penelitian.....	15
3.2 Tahapan Penelitian.....	17
3.2.1 Pendahuluan.....	17
3.2.2 Penentuan Variabel Penelitian.....	17
3.2.3 Pengambilan Sampel Awal.....	17
3.2.4 Persiapan Penelitian.....	18
3.2.5 Penelitian Pendahuluan.....	19
3.2.6 Penelitian Utama.....	20
3.2.7 Analisis dan Pembahasan	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Karakteristik Lumpur IPLT	29
4.2 Karakteristik Biochar.....	30
4.3 Analisis Hasil Pengujian Kapasitas Serapan CO ₂	35
4.4 Mekanisme Adsorpsi CO ₂ oleh Biochar	37
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	41
5.1. Kesimpulan.....	41

5.2. Saran	41
DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN	47
BIODATA PENULIS.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gambar SEM <i>Biochar</i> dengan Impregnasi NaOH (a,b) dan <i>Biochar</i> Tanpa Impregnasi (c,d).....	4
Gambar 2. 2 Pirolisis menggunakan Metode Manual	5
Gambar 2. 3 Pirolisis menggunakan Metode Kiln	6
Gambar 2. 4 Pirolisis menggunakan Metode <i>Retort Drum</i>	6
Gambar 2. 5 Bentuk Isoterm.....	9
Gambar 2. 6 Adsorpsi satu lapis (<i>monolayer</i>)	10
Gambar 3. 1 Diagram Alir Kerangka Penelitian	15
Gambar 3. 2 Lokasi Pengambilan Lumpur IPLT Keputih	18
Gambar 3. 3 (a) Pirolisisis Kedua (b) Hasil <i>Biochar</i> Setelah Pirolisis.....	21
Gambar 3. 4 (a) <i>Biochar</i> sebelum dikeringkan (b) <i>Biochar</i> setelah dikeringkan.....	22
Gambar 3. 5 Rancangan Alat <i>Fixed-bed Modified Biochar</i>	23
Gambar 3. 6 (a) Titrasi Asam Basa (b) Sampel Sebelum dan Sesudah Proses Titrasi.....	24
Gambar 4. 1 Spektrum IR <i>Biochar</i> Tanpa Aktivasi (a), <i>Biochar</i> Pencucian HCl 0,1 M (b), <i>Biochar</i> Aktivasi NaOH 0,1 M (c) <i>Biochar</i> Aktivasi NaOH + HCl (d).....	31
Gambar 4. 2 Struktur Morfologi <i>Biochar</i> Tanpa Aktivasi (a), <i>Biochar</i> Aktivasi NaOH (b), dan <i>Biochar</i> Aktivasi NaOH + HCl (c)	33
Gambar 4. 3 Kandungan Unsur Organik dan Anorganik pada <i>Biochar</i> Tanpa Aktivasi (a), <i>Biochar</i> Aktivasi NaOH (b), dan <i>Biochar</i> Aktivasi NaOH + HCl (c).....	34
Gambar 4. 4 Grafik Hubungan Adsorpsi Berdasarkan Perlakuan Modifikasi	36
Gambar 4. 5 Hasil Grafik Isoterm <i>Langmuir</i> Aktivasi (a) dan Hasil Grafik Isoterm <i>Freundlich</i> (b).	38

"Halaman Ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Teknologi pembuatan <i>biochar</i> dan karakteristiknya	11
Tabel 2. 2 Komposisi produk yang dihasilkan pada berbagai kondisi pirolisis	11
Tabel 2.3 Ringkasan Kajian Literatur.....	12
Tabel 3. 1 Variasi dan Label untuk <i>Biochar</i>	17
Tabel 3. 2 Standar Pengujian Parameter.....	20
Tabel 4. 1 Hasil Uji Lumpur Kering IPLT	29
Tabel 4. 2 Hasil Uji <i>Biochar</i>	29
Tabel 4. 3 Hasil uji metode BET <i>Surface Area</i>	31
Tabel 4. 4 Tabel Hasil Penyerapan CO ₂ dari <i>Biochar</i>	35

"Halaman Ini sengaja dikosongkan"

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan konsentrasi karbon dioksida memiliki dampak signifikan terhadap pemanasan global, karena gas ini merupakan salah satu komponen utama dari gas rumah kaca, yang mampu menyerap panas dari radiasi matahari dan mempertahankan panas di atmosfer bumi. Menurut laporan *State of the Global Climate 2022* yang diterbitkan oleh *World Meteorological Organization*, suhu rata-rata laut dan daratan bumi telah meningkat sebesar 1,15°C sejak periode pra-industri (1850-1900). Pada tahun 2022, suhu global mencatatkan kenaikan tertinggi keenam sejak tahun 1900. Dampaknya meliputi cuaca ekstrem, tingginya frekuensi terjadi bencana alam, kelangkaan pangan dan air, kenaikan permukaan air laut, pencairan es di kutub, dan kebakaran hutan. Peningkatan konsentrasi CO₂ sebagian besar disebabkan oleh konsumsi energi fosil yang meningkat, dari 11 miliar ton per tahun pada 1960 menjadi 36,6 miliar ton per tahun pada tahun 2022. Situasi ini telah menghasilkan ketidakseimbangan antara jumlah produksi CO₂ dan jumlah penyerap karbon atau "carbon sinks" di Bumi. Jika tren ini terus berlanjut, konsentrasi CO₂ akan terus meningkat sebesar 450 ppm di tahun 2035, yang menyebabkan peningkatan suhu global sebesar 2°C. Oleh karena itu *International Energy Agency* (IEA) menyatakan bahwa CO₂ emisi per unit PDB harus terus berkurang sekitar 60% untuk mencapai tujuan pengendalian iklim yang sudah ditetapkan.

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengurangi emisi CO₂, salah satunya adalah penangkapan dan penyimpanan karbon, yang dianggap sebagai metode yang layak dan ekonomis untuk menurunkan emisi gas rumah kaca dalam waktu dekat (Li *et al.*, 2022). *Carbon sequestration* adalah proses menangkap CO₂ dari atmosfer dan menyimpannya dalam waktu lama untuk mencegah peningkatan konsentrasi gas ini. Salah satu metode penyimpanan karbon jangka panjang yang potensial adalah penggunaan *biochar*, yaitu arang yang dihasilkan dari pirolisis biomassa organik tanpa oksigen. *Biochar* tidak hanya dapat menangkap CO₂ secara efisien berkat luas permukaan yang besar, struktur berpori yang kompleks, dan gugus fungsi yang melimpah, tetapi juga berperan sebagai bahan untuk memperbaiki kualitas tanah. Lumpur limbah merupakan hasil sampingan dari proses pengolahan air limbah. Lumpur limbah dianggap sebagai pilihan yang menarik untuk dijadikan sumber energi terbarukan, karena berpotensi menyediakan sekitar 10% pasokan energi global (Raheem *et al.*, 2016). Permasalahannya adalah *biochar* yang berbahan baku dasar lumpur limbah tunggal menujukkan kapasitas adsorpsi CO₂ yang rendah. Xu, *et al.*, (2016) menyatakan bahwa *biochar* yang diproduksi dari lumpur limbah pada suhu 500°C hanya mampu mencapai adsorpsi CO₂ maksimal sebesar 23,5 mg/g pada suhu 25°C. Oleh karena itu, modifikasi secara fisik dan kimia dibutuhkan untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi CO₂. Peningkatan adsorpsi polutan asam pada karbon aktif dapat dicapai dengan meningkatkan sifat kebasaan material yaitu dengan menggunakan impregnasi bahan kimia dengan NaOH. Pencucian dengan HCl juga dapat menurunkan kadar abu yang berpengaruh dengan efisiensi penyerapan CO₂. Maka dari itu, penelitian ini disusun bertujuan untuk menganalisis kinerja adsorpsi CO₂ menggunakan *biochar* dari lumpur limbah IPLT yang dimodifikasi NaOH dan dilakukan pencucian dengan HCl.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian ini.

1. Bagaimana pengaruh penambahan NaOH pada pembuatan *biochar* dari lumpur IPLT terhadap kapasitas serapan CO₂ pada *biochar*?

2. Bagaimana pengaruh pencucian sampel *biochar* dengan HCl terhadap kapasitas serapan CO₂ pada *biochar*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilaksanakannya penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh penambahan NaOH dan pencucian sampel *biochar* dengan HCl pada pembuatan *biochar* dari lumpur IPLT terhadap kapasitas serapan CO₂ pada *biochar*.

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dilaksanakannya penelitian ini meliputi

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Udara Teknik Lingkungan ITS.
2. Penelitian ini dilakukan pada bulan Agustus – Januari 2025.
3. Sampel lumpur IPLT diambil dari IPLT Keputih, Surabaya.
4. Pembuatan *biochar* menggunakan metode pirolisis menggunakan *furnace* dengan suhu awal 300°C dan untuk *biochar modified* di pirolisis kembali dengan suhu 700°C.
5. Variabel yang akan diteliti pada penelitian ini adalah penambahan dan tanpa penambahan NaOH serta perbedaan perlakuan dengan pencucian sampel *biochar* menggunakan HCl.
6. Parameter utama yang diuji pada penelitian ini adalah kandungan organik (C, H, N, O) dan kadar abu.
7. Parameter pendukung yang diuji pada penelitian ini karakteristik *biochar*.
8. Perhitungan serapan karbon awal menggunakan alat penghitung serapan karbon yaitu *fixed-bed modified biochar*.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Memberikan informasi mengenai pertimbangan penggunaan sampel dari lumpur IPLT sebagai bahan dasar pembuatan *biochar*.
2. Memberikan wawasan kepada masyarakat mengenai manfaat *biochar* bagi lingkungan. Serta mendorong pertisipasi aktif dalam praktik berkelanjutan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Emisi Karbon dan *Carbon Sequestracion*

Berdasarkan pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 21 Tahun 2008, emisi merupakan zat, energi, dan/atau komponen lain yang dihasilkan dalam suatu kegiatan yang masuk dan/atau dimasukkan ke dalam udara ambien yang mempunyai atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar. Emisi karbon dapat didefinisikan sebagai gas yang dikeluarkan dari hasil pembakaran segala senyawa yang mengandung karbon seperti CO₂, solar, bensin, LPG, serta bahan bakar lainnya yang ditandai dengan pelepasan karbon ke lapisan atmosfer bumi, yang biasanya dianggap berbahaya bagi lingkungan.

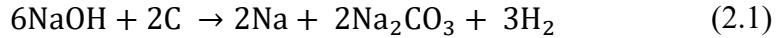
Emisi karbon dikategorikan dalam emisi gas rumah kaca yang berperan penting dalam terjadinya perubahan iklim akibat pemanasan global. Perubahan iklim adalah suatu kondisi di mana pola cuaca dan suhu telah berubah dalam jangka waktu yang cukup lama. Perubahan iklim memiliki dampak nyata terhadap makhluk hidup dan lingkungan, termasuk kondisi air, habitat, hutan, kesehatan, pertanian, dan pesisir. Efek gas rumah kaca di atmosfer dapat meningkatkan pemanasan global. Emisi GRK ini menjadi faktor utama terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim sehingga mendapat perhatian dari kancan global karena pengaruhnya terhadap bumi. Gas rumah kaca yang paling banyak berada di atmosfer diantaranya adalah CO₂ sebanyak 45 GtCO₂-eq, CH₄ sebanyak 11 GtCO₂-eq, dan N₂O sebesar 2,7 GtCO₂-eq. Emisi gas rumah kaca setiap tahunnya selalu mengalami peningkatan sejak pertengahan abad ke-20. Mulai dari 11 miliar ton karbon dioksida per tahun pada tahun 1960 hingga 36,6 miliar ton per tahun di tahun 2022. Hal ini menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan antara jumlah produksi karbon dioksida dengan jumlah *carbon sinks* yang ada di bumi, sehingga karbon dioksida yang dihasilkan bumi tidak dapat terserap kembali dan terus mengalami peningkatan (Friedlingstein *et al.*, 2022).

Dilansir dari laman United Nations, untuk menjaga kenaikan suhu tetap di bawah 1,5°C, harus dilakukan penurunan bahan bakar fosil sekitar 6% per tahun sejak tahun 2020 hingga 2030. Cara untuk menghentikan pemanasan global dan perubahan iklim adalah dengan upaya pengurangan CO₂, yang tidak hanya menyeimbangkan angka produksi CO₂, tetapi harus melebihi dari produksi CO₂. Netral karbon dapat menjadi solusi efektif dengan menciptakan kondisi ketika angka emisi karbon yang dihasilkan manusia bisa terserap sepenuhnya sehingga tidak sampai ke atmosfer. Netral karbon akan menurunkan pemanasan global dan mengatasi permasalahan krisis energi, disamping itu juga dapat memperbaiki kualitas udara dan *ecological recovery*. *Carbon sequestracion* dapat menjadi opsi untuk mejaga agar konsentrasi gas CO₂ di atmosfer tetap stabil atau menurun dengan sistem penyimpanan karbon jangka panjang. *Carbon sequestracion* adalah proses menangkap gas CO₂ dari atmosfer dan kemudian menyimpannya dalam jangka waktu yang lama di dalam bumi untuk mencegah peningkatan cepat konsentrasi gas CO₂ di atmosfer. Metode penyerapan karbon dengan tanah dinilai lebih menjanjikan karena memiliki manfaat ganda, selain untuk menangkap karbon juga dapat meningkatkan kualitas tanah (Sarwono R., 2016).

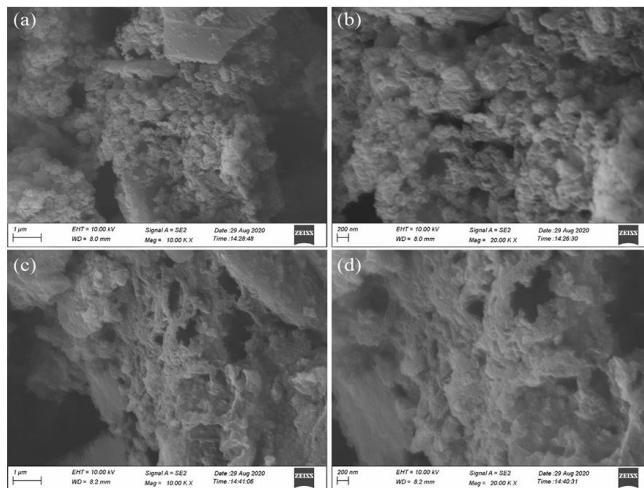
2.2 Biochar

Biocharcoal, atau yang juga dikenal sebagai arang, merupakan produk yang terbentuk ketika limbah biomassa dipanaskan dengan sedikit atau tanpa adanya udara. Proses ini dikenal sebagai pirolisis (Widiastuti M & Lantang B., 2017). Berbagai jenis limbah biomassa yang tidak dimanfaatkan, seperti sekam padi, bongkol jagung, kulit buah, limbah gergaji kayu, tempurung kelapa, dan bahan serupanya dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan *biochar*. *Biochar* adalah senyawa yang sangat stabil dan sulit terdegradasi

oleh oksidasi mikroba di dalam tanah (Sarwono R., 2016). *Biochar* memiliki karakteristik yang unggul, seperti luas permukaan yang besar, struktur berpori yang kompleks, dan banyaknya gugus fungsi pada permukaan sehingga memiliki potensi besar untuk menangkap CO₂ (Dissanaayake., 2020; Singh., 2021; Li *et al.*, 2022). Saat ini bahan baku pembuatan *biochar* banyak menjadi topik penelitian untuk memodifikasi *biochar* agar lebih efektif dan ekonomis dengan tujuan meningkatkan kapasitas adsorpsi karbonnya menggunakan proses fisik maupun kimia. *Biochar* yang berasal dari lumpur farmasi dan diaktivasi dengan NaOH menunjukkan luas permukaan spesifik yang besar dan kapasitas adsorpsi *tetracycline* yang sangat baik dengan stabilitas tinggi (Liu *et all.*, 2021). Sodium hidroksida (NaOH) bereaksi dengan karbon pada suhu tinggi, menghasilkan pelepasan gas. Reaksi ini dijelaskan dalam persamaan berikut ini.



Terbentuknya struktur berpori disebabkan oleh pelepasan gas-gas seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), dan hidrogen (H₂). Gas-gas ini dihasilkan melalui dua proses yaitu dekomposisi natrium karbonat (Na₂CO₃) pada suhu tinggi dan reduksi gugus hidroksil (Liu *et all.*, 2021). *Biochar* yang diimpregnasi dengan NaOH memiliki jumlah mikropori yang jauh lebih banyak. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kontak yang lebih efektif antara NaOH dalam bentuk larutan dengan PS (*polistirena*) dalam bentuk molekul. Proses ini menggambarkan bagaimana interaksi antara bahan-bahan kimia dan kondisi suhu tinggi dapat mempengaruhi struktur mikro material yang dihasilkan, khususnya dalam pembentukan pori-pori pada skala mikro. Pada uji SEM juga ditunjukkan bahwasannya *biochar* yang diaktivasi menggunakan NaOH dapat mendorong pengembangan pori-pori menjadi lebih teratur dan stabil.



Gambar 2.1 Gambar SEM *Biochar* dengan Impregnasi NaOH (a,b) dan *Biochar* Tanpa Impregnasi (c,d)

(Sumber: Liu *et al.*, 2021)

Pada uji FTIR menunjukkan bahwa aktivasi NaOH mendorong pembentukan gugus hidroksil, sementara protein dalam PS menghasilkan gugus fungsional yang mengandung nitrogen. Pita pada 1570 cm⁻¹ yang sesuai dengan getaran regang asimetris C=C aromatik menunjukkan bahwa aktivasi NaOH menghasilkan struktur aromatik yang relatif stabil. Puncak serapan terjadi pada gelombang 1100 cm⁻¹ mewakili puncak karakteristik eter, ester, dan karbonat (C-O). Dehidrasi NaOH selama proses pirolisis menyebabkan aromatisasi kerangka karbon, menghasilkan konjugasi π-π antara struktur aromatik dalam adsorben (Liu *et al.*, 2021).

Dibandingkan dengan *biochar* asli, *biochar* yang telah dicuci dengan asam menunjukkan penurunan kadar abu yang signifikan. Hal ini disebabkan oleh hilangnya fraksi anorganik seperti oksida mineral dan garam terlarut (Sun *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2013). Proses pencucian asam dapat menghasilkan beberapa perubahan pada sifat *biochar* seperti

penurunan kandungan oksigen dan berkurangnya rasio (O+N)/C dan H/C. Perubahan ini mengakibatkan *biochar* yang telah dicuci asam menjadi lebih hidrofobik (tidak suka air) dan memiliki tingkat aromatisitas yang lebih tinggi (Peng *et al.*, 2016). Selain itu, luas permukaan *biochar* yang telah dicuci asam meningkat (Klasson *et al.*, 2014). Peningkatan ini terjadi karena hilangnya massa yang bersifat inert (tidak reaktif) selama proses pencucian. Perubahan-perubahan ini menunjukkan bahwa proses pencucian asam dapat memodifikasi sifat-sifat *biochar*, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kemampuan adsorpsinya terhadap senyawa-senyawa tertentu.

2.3 Pirolisis

Pirolisis merupakan proses kompleks dimana senyawa organik dalam biomassa dikonversi melalui pemanasan dengan sedikit atau tanpa oksigen. Dalam proses ini, yang terlepas hanyalah materi volatil, sementara karbon tetap terperangkap di dalamnya. Variasi dalam teknik pirolisis yang digunakan dapat mempengaruhi karakteristik *biochar* yang dihasilkan. Teknik pirolisis yang dapat dilakukan antara lain (Y Prasetyo, Hidayat B., Sitorus B., 2020).

1. Metode Manual

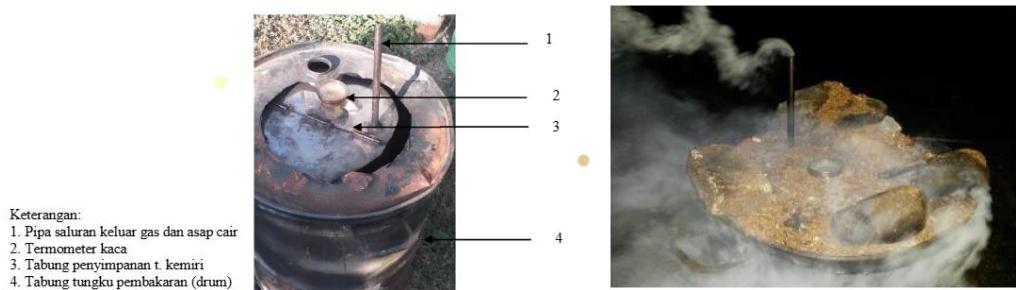
Metode ini dibuat pada lahan yang memiliki lebar lebih dari 1 meter dengan kedalaman 0,5 meter, kemudian permukaan tanah dibasahi dengan air. Dibagian tengah, dipasang lempengan besi untuk memungkinkan sirkulasi udara masuk ke dalam lubang tersebut. Sehingga apabila *biochar* dibakar, prosesnya tidak mengubah biomassa menjad abu. Setelah biomassa berubah menjadi bara, disiram dengan air secukupnya, yang kemudian menghasilkan *biochar*.



Gambar 2. 2 Pirolisis menggunakan Metode Manual
(Sumber: Syahrinudin, *et al.*, 2018)

2. Metode Klin

Metode ini menggunakan alat yang terbuat dari lempengan plat besi yang telah dimodifikasi. Alat ini bisa digunakan untuk membakar berbagai jenis biomassa. Biomassa yang telah dikeringkan dimasukkan ke dalam alat kiln, kemudian dibakar dari bagian atas. Berikut merupakan gambar rancangan alat klin.



Gambar 2.3 Pirolisis menggunakan Metode Kiln
 (Sumber: Efendi & Sungkono., 2021)

Struktur klin terdiri dari empat komponen utama: tabung penyimpanan tempurung kemiri, tabung tungku pembakaran, termometer kaca, dan pipa saluran keluar untuk gas dan asap cair. Peralatan yang digunakan dalam pembuatan kiln meliputi mesin las listrik, mesin gerinda tangan, dan meter rol. Untuk pengukuran suhu, digunakan termometer kaca. Proses pirolisis dilaksanakan dalam sistem tertutup dengan suhu dijaga konstan pada 370°C. Durasi proses berkisar antara 4 hingga 5 jam (Efendi & Sungkono., 2021).

3. Metode Retort

Metode ini menggunakan alat yang terbuat dari tabung besar berbahan tembaga yang dimofifikasi secara spesifik dengan tambahan fitur untuk produksi asap cair yang berasal dari pemanasan biomassa di dalam alat termolisis. Pemanasan tambahan dilakukan menggunakan kompor gas, yang mempercepat peningkatan suhu dalam tabung pirolisis untuk memanaskan biomassa hingga menjadi *biochar*. Biomassa yang sudah kering dimasukkan sebanyak 5 kg ke dalam tabung termolisis dan dipanaskan dengan kompor bersuhu tinggi dari bawah, yang ditempatkan di atas penyangga tabung.



Gambar 2.4 Pirolisis menggunakan Metode Retort Drum
 (Sumber: Syahrinudin, et al., 2018)

4. Metode Tertutup

Metode ini juga bisa disebut pirolisis dalam kondisi kontrol atmosfer. Dalam metode ini, biomassa dimasukan ke dalam tungku *furnace* yang dipanaskan secara bertahap hingga mencapai suhu yang diinginkan (biasanya antara 300-700°C) dalam lingkungan yang biasanya berisi gas inert, seperti nitrogen untuk mencegah oksidasi. Proses ini memastikan bahwa biomassa terdekomposisi secara termal tanpa terbakar menjadi abu. Pada suhu tinggi komponen organik biomassa, terutama volatil *matter* akan menguap meninggalkan residu karbon padat, yang disebut dengan *biochar*.

2.4 Lumpur IPLT

Secara khusus, lumpur IPLT merupakan produk sampingan dari proses pengolahan air limbah. Lumpur tinja biasanya diperoleh dari kotoran yang ditampung pada penampungan setempat kemudian disedot dan diangkut ke instalasi pengolahan lumpur tinja secara berkala. Lumpur tinja kemudian mengalami proses pengolahan dan dikeringkan pada unit *Sludge*

Drying Bed (SDB), lumpur tinja yang telah kering sepenuhnya digunakan sebagai pupuk organik. Pemanfaatan pupuk dari lumpur tinja masih tergolong rendah karena rendahnya minat dan juga pupuk dari lumpur tinja cenderung memiliki konsentrasi zat organik dan patogen yang tinggi. Lumpur tinja yang dikelola dengan baik, memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan dengan kandungan energi yang cukup tinggi, yakni berkisar antara 1.910,77 hingga 4.538,07 kal/g berat kering (Andriessen *et al.*, 2019; Muspratt *et al.*, 2014). Lumpur tinja kering dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar, akan tetapi kelemahannya adalah tingginya kadar abu, yang mana bisa mencapai 58,5% (Gold *et al.*, 2017). Kadar abu yang tinggi menunjukkan rendahnya kadar volatil dan energi kalor, sehingga dibutuhkan lebih banyak biomassa untuk menghasilkan energi atau panas yang setara. Oleh karena itu digunakan strategi impregnasi bahan kimia untuk menurunkan kadar abu dan meningkatkan nilai kalor.

2.5 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses akumulasi atau penyerapan molekul-molekul suatu zat (adsorbat) pada permukaan zat padat atau cair lain (adsorben) yang terjadi karena adanya gaya tarik antar molekul atau akibat medan gaya pada permukaan adsorben. Proses ini menyebabkan molekul dari gas, cairan, atau larutan menempel pada permukaan adsorben, bukan masuk ke dalam struktur internalnya seperti pada absorpsi. Suatu molekul dapat mengalami proses adsorpsi apabila gaya adhesi antara molekul adsorbat dan adsorben lebih kuat dibandingkan gaya kohesi anggar molekul sejenis. Adsorpsi umumnya dimanfaatkan untuk menurunkan kandungan senyawa organik dalam limbah cair, sehingga limbah tersebut dapat dimurnikan. Proses adsorpsi terjadi di permukaan adsorben, sehingga luas permukaan dan sifat pori-prosi adsorben sangat mempengaruhi efektivitas proses ini. Semakin luas permukaan adsorben yang disediakan maka semakin banyak molekul yang diserap. Faktor yang mempengaruhi adsorpsi antara lain yaitu luas permukaan dan ukuran partikel adsorben, konsentrasi dan kelarutan adsorbat, temperatur, dan agitasi atau pengadukan sistem.

Adsorpsi dikategorikan sebagai metode yang efisien dalam menghadapi masalah kontaminasi limbah cair domestik maupun industri, karena kemampuannya dalam menghilangkan bau dan mampu menurunkan kadar zat warna dari suatu larutan tanpa mengubah menjadi senyawa yang lebih berbahaya. Penggunaan adsorben pada proses adsorpsi memiliki beberapa keuntungan diantaranya memiliki pori yang luas, hidrofobik, stabil dalam temperatur tinggi, tidak memiliki aktivitas katalitik dan mudah di regenerasi. Jika fenomena adsorpsi disebabkan dari gaya Van der Waals dan gaya hidrostatik antara molekul adsorbat dan atom yang membentuk permukaan adsorben tanpa adanya ikatan kimia maka disebut adsorpsi fisika. Dan jika terjadi interaksi secara kimia antara adsorbat dan adsorben maka fenomenanya disebut adsorpsi kimia. Adsorpsi ialah proses eksotermis yang diikuti oleh adanya pelepasan panas. Luas permukaan pada adsorpsi menjadi sangat penting dan merupakan parameter kualitas utama dari adsorben. Secara umum, adsorben alami memiliki luas permukaan yang jauh lebih kecil daripada adsorben rekayasa berpori tinggi. Dimana syarat untuk area permukaan yang tinggi adalah porositas material yang tinggi sehingga memungkinkan permukaan internal yang besar dibentuk oleh dinding pori. Permukaan internal adsorben rekayasa jauh lebih besar dari permukaan partikel eksternal. Sehingga semakin besar pori-pori maka semakin tinggi permukaan internal. Disisi lain, fraksi tertentu dari pori-pori yang lebih besar diperlukan untuk memungkinkan pengangkutan yang cepat menyerap ke situs adsorpsi, oleh karena itu, distribusi ukuran pori merupakan aspek kualitas penting selanjutnya. Selain tekstur, kimia permukaan juga menarik, khususnya untuk proses kemisorpsi. Adsorben yang dapat digunakan untuk pengolahan air dapat berasal dari alam atau hasil dari produksi industri ataupun melalui proses aktivasi. Karbon aktif yang dihasilkan dari bahan berkarbon melalui aktivasi kimia atau aktivasi gas adalah adsorben yang paling banyak digunakan dalam pengolahan air. Adsorpsi merupakan salah satu metode yang sangat efektif dalam penangg

limbah cair, baik dari sumber domestik maupun industri. Efektivitas ini disebabkan oleh kemampuannya dalam menghilangkan bau serta menurunkan konsentrasi zat warna tanpa menghasilkan senyawa lain yang berpotensi lebih berbahaya (Putri et al., 2022). Penggunaan adsorben pada proses adsorpsi menawarkan beberapa keunggulan, seperti memiliki luas permukaan dan porositas yang tinggi bersifat hidrofobik, stabil pada suhu tinggi, tidak bersifat katakitik, serta mudah diregenerasi (Wibowo et al., 2021). Proses adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu adsorpsi fisika dan kimia. Adsorpsi fisika terjadi akibat adanya interaksi gaya Van der Waals dan gaya elektrostatik antara molekul adsorbat dengan permukaan adsorben tanpa pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan adsorben (Rahmawati dan & Prasetya, 2020). Adsorpsi fisika bersifat reversibel, energi yang terlibat kecil (sekitar <20 kJ/mol), dan biasanya terjadi pada temperatur rendah. Contohnya adalah penyerapan gas oleh arang aktif. Adsorpsi kimia melibatkan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan adsorben, bersifat irreversibel, energi yang terlibat lebih besar (40-400 kJ/mol), dan dapat terjadi pada temperatur tinggi. Proses adsorpsi sendiri bersifat eksotermis, yang ditandai dengan pelepasan panas.

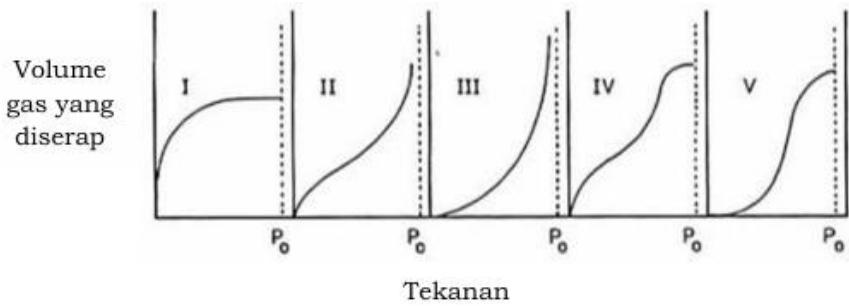
Luas permukaan adsorben menjadi salah satu parameter utama yang menentukan kualitas adsorpsi. Umumnya, adsorben alami memiliki luas permukaan yang lebih rendah dibandingkan adsorben hasil rekayasa yang berpori tinggi. Hal ini karena porositas yang tinggi memungkinkan terbentuknya permukaan internal yang luas, sehingga meningkatkan kapasitas adsorpsi. Selain itu, distribusi ukuran pori juga berperan penting untuk mempercepat transportasi adsorbat ke adsorbsi (Sari et al., 2023). Selain aspek tekstur, karakteristik kimia permukaan adsorben juga sangat berpengaruh, terutama dalam proses kemisorpsi. Adsorben yang digunakan dalam pengolahan air dapat berasal dari bahan alami, hasil industri, maupun melalui proses aktivasi. Di antara berbagai jenis adsorben, karbon aktif yang dihasilkan melalui aktivasi kimia atau fisika dari bahan berkarbon merupakan adsorben yang paling banyak digunakan dalam pengolahan air (Hidayat et al., 2022)

2.6 Isoterm Adsorpsi

Isoterm adsorpsi adalah hubungan matematis yang menggambarkan distribusi adsorbat antara dan teradsoprsi di permukaan adsorben dan fase larutan atau gas pada kondisi kesetimbangan dan temperatur tetap. Isoterm ini digunakan untuk memahami mekanisme, kapasitas dan karakter permukaan adsorben terhadap adsorbat. Dalam isoterm adsorpsi proses tersebut digambarkan dengan sebuah persamaan atau rumus. Isoterm adsorpsi yang umum digunakan ialah isoterm *Freundlich* dan isoterm *Langmuir*. Mekanisme adsorpsi melibatkan beberapa tahap:

1. Transfer molekul adsorbat ke permukaan adsorben
2. Difusi melalui film di sekitar partikel adsorben
3. Difusi ke dalam pori-pori adsorben
4. Penempelan (adsorpsi) pada permukaan atau dinding pori adsorben

Isoterm adsorpsi memiliki 5 bentuk yang digunakan untuk menjelaskan teori isoterm *Langmuir*, *Freundlich*, dan BET (*Brunauer, Emeet, dan Teller*) yang terlihat seperti pada **Gambar 2.5** berikut.



Gambar 2. 5 Bentuk Isoterm

(Sumber : Amarullah & Lestari., 2023)

Isoterm adsorpsi tipe I menunjukkan bahwa adsorben memiliki pori-pori yang sangat kecil atau termasuk dalam kategori mikroposi dan interaksi yang terjadi bersifat monolayer. Sementara itu, isoterm tipe II dan IV mengindikasikan bahwa adsorben memiliki pori-pori yang sangat besar atau tergolong makropori, dengan pola adsorpsi yang berlangsung dari pembentukan satu lapisan (monolayer) hingga banyak lapisan (multilayer) tanpa batas. Isoterm tipe III menggambarkan bahwa adsorben memiliki ukuran pori yang bervariasi, mencakup mikroposi hingga mesopori. Selanjutnya, isoterm tipe IV dan V dicirikan oleh interaksi gas-padat yang relatif lemah. Tipe IV menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara multilayer dan terjadi pada adsorben dengan pori berukuran sedang atau mesopori. Sementara itu, isoterm tipe V menunjukkan bahwa adsorben memiliki pori-pori campuran yang terdiri dari mikroposi dan mesopori (Botahala, 2019).

Isoterm Adsorpsi *Freundlich*

Isoterm *Freundlich* adalah model empiris (kurva) yang menggambarkan hubungan antara konsentrasi zat terlarut di permukaan adsorben dan dalam larutan. Model ini didasarkan pada asumsi bahwa permukaan adsorben bersifat heterogen, dengan kemampuan adsorpsi yang berbeda pada setiap titik. Isoterm ini umum digunakan, terutama untuk bahan alam, karena dapat merepresentasikan sebagian besar proses adsorpsi fisik, termasuk pembentukan lebih dari satu lapisan (multilayer). Isoterm ini juga dianggap sebagai bentuk terbatas dari isoterm *Langmuir* dan hanya berlaku pada tekanan uap sedang. Model ini cocok untuk proses adsorpsi cairan ke permukaan padatan, seperti adsorpsi senyawa organik oleh karbon aktif. Meskipun tidak mempertimbangkan gangguan antar situs adsorpsi saat kesetimbangan tercapai, isoterm ini tetap sering digunakan untuk mempermudah analisis data kesetimbangan adsorpsi secara praktis. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi meliputi jenis dan luas permukaan adsorben, jenis zat yang diadsorbsi, konsentrasi, serta suhu. Isoterm *Freundlich* dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$Qe = Kf \times Ce^{1/n} \dots \dots \dots (2.2)$$

Konstanta *Kf* dan $1/n$ didapatkan dengan melakukan linearisasi terhadap persamaan berikut :

$$\log qr = \log Kf + (1/n) \log Ce \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

- Qe = Jumlah ion adsorbat yang terserap apada saat *equilibrium* (mg/gr)
- Ce = Konsentrasi ion atau molekul asorbat pada saat setimbang (mg/L)
- Kf = Konstanta *Freundlich* yang berkaitan dengan kapasitas (L/mg)
- N = konstanta *Freundlich* yang berkaitan dengan afinitas (L/mg)

pembakaran semakin tinggi pH yang dihasilkan (Yuan and Zhang., 2011). Tingginya pH disebabkan karena banyak abu yang diperoleh dari proses pembakaran, yang mana sifatnya memberikan basa yang tinggi (Ippolito *et al.*, 2012).

b. Kadar abu

Kadar abu dalam *biochar* memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas dan karakteristiknya. *Biochar* dengan kadar abu rendah cenderung memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi. Variasi kadar abu sangat dipengaruhi oleh suhu pembakaran dan jenis bahan baku yang digunakan dalam proses pembuatan *biochar*. Menurut Lehmann *et al.* (2011), kandungan abu juga berperan penting dalam menentukan pH, konduktivitas listrik, dan komposisi mineral *biochar*. Tingginya kadar abu dapat berdampak negatif pada kandungan karbon dalam *biochar*, serta berpotensi menurunkan kualitasnya karena dapat menyebabkan penyumbatan pori-pori, yang pada gilirannya mengurangi luas permukaan efektif. Setyawan *et al.* (2018) menjelaskan bahwa abu dalam *biochar* terdiri dari oksida-oksida logam yang tidak mudah menguap dan memiliki sifat tahan api. Peningkatan suhu dan durasi pembakaran cenderung meningkatkan kadar abu dalam *biochar*, hal ini menunjukkan kompleksitas hubungan antara parameter produksi dan karakteristik akhir *biochar*.

c. Suhu pirolisis

Pirolisis merupakan metode fisik kimia yang digunakan dalam pembuatan *biochar*. Dalam menghasilkan *biochar* menggunakan proses termo-kimia yang dilakukan pada rentang suhu dari 250°-700°C. Meta-analisis dari dua puluh tujuh artikel menunjukkan bahwa suhu pirolisis adalah faktor yang sangat berpengaruh terhadap tujuan penggunaan *biochar* (Baidoo *et al.*, 2016). Metode yang digunakan dalam proses ini mempengaruhi sifat utama *biochar*, termasuk komposisi unsur dan abu, luas permukaan spesifik, serta pH. Tabel berikut menunjukkan beberapa metode yang digunakan dalam pembuatan *biochar* beserta sifat-sifat yang dihasilkan.

Tabel 2. 1 Teknologi pembuatan *biochar* dan karakteristiknya

<i>Technology</i>	<i>Temperature</i> (°C)	<i>Biochar</i> <i>Products (%)</i>	<i>Carbon in</i> <i>Biochar (%)</i>
<i>Slow pyrolysis</i>	100-1000	35	~50-95
<i>Intermediate pyrolysis</i>	~500	25	66-74
<i>Fast pyrolysis</i>	300-1000	~12-25	~64-90
<i>Gasification</i>	~900	10	65

(Sumber : Kumarathilaka *et al.*, 2016)

Tabel 2. 2 Komposisi produk yang dihasilkan pada berbagai kondisi pirolisis

Proses	Temperatur (°C)	Laju (°C/min)	Waktu	Bio-oil	Syngas	<i>Biochar</i>
Pirolisis cepat	450-500	>100	Beberapa detik	75	13	12
Pirolisis lambat	350-750	< 80	Jam-sehari	30	35	35

(Sumber :Van *et al.*, 2011)

Penggunaan suhu dalam metode pirolisis berdasarkan hasil yang diinginkan. Proses pirolisis lambat merupakan metode yang umumnya dipilih untuk produksi bahan bakar padat seperti lumpur, karena memiliki laju pemanasan yang relatif rendah, berkisar antara 1 hingga 10°C per menit, dengan durasi proses yang cukup panjang, mencapai beberapa jam (Andriessen *et al.*, 2019). Keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya menghasilkan arang dalam jumlah yang lebih besar dibandingkan dengan metode pirolisis yang menggunakan laju

pemanasan lebih tinggi. Pirolisis pada suhu yang lebih tinggi dapat menurunkan nilai kalor arang, hasil pirolisis lumpur tinja dengan suhu 450°C-700°C memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan pirolisis lambat dengan suhu 300°C (Ward *et al.*, 2014).

2.8 Penelitian Dahulu

Tabel 2.3 Ringkasan Kajian Literatur

Nama Peneliti (Tahun Penelitian)	Judul Penelitian	Isi Penelitian
Li et al., (2022)	Renewable <i>biochar</i> derived from mixed sewage sludge and pine sawdust for carbon dioxide capture	Dalam penelitian ini mengkaji kemampuan adsorpsi CO ₂ dari <i>biochar</i> yang dibuat dari campuran yaitu, 70% serbuk gergaji pinus + 30% lumpur limbah (S3W7), dan 50% serbuk gergaji pinus + 50% lumpur limbah (S5W5), dengan fokus pada modifikasi menggunakan KOH. Pada penelitian ini menggunakan variasi suhu untuk pirlolisis yaitu 600°C, 700°C, dan 800°C. Hasil penelitian ini menunjukkan kandungan lumpur limbah dalam biomassa awal secara signifikan mempengaruhi struktur tekstur <i>biochar</i> yang iaktivasi KOH. <i>Biochar</i> S3W7 menunjukkan kapasitas adsorpsi CO ₂ nya lebih tinggi yaitu (132,0-177,1 mg/g), dibandingkan <i>biochar</i> S5W5 sebesar (111,1-130,8 mg/g). Faktor lain yang berpengaruh pada peningkatan adsorpsi CO ₂ pada <i>biochar</i> modifikasi yaitu porositas, struktur berpori, hidrofobisitas, dan kehadiran atom N. Penelitian ini menunjukkan pentingnya optimasi komposisi bahan baku dalam produksi <i>biochar</i> untuk aplikasi adsorpsi CO ₂ yang efisien.
Li et al., (2021)	Insights into CO ₂ adsorption on KOH-activated <i>biochars</i> derived from the mixed sewage sludge and pine sawdust	Dalam penelitian ini mengkaji kemampuan adsorpsi CO ₂ dari <i>biochar</i> yang dibuat dari campuran 70% serbuk gergaji pinus dan 30% lumpur limbah, dengan fokus pada modifikasi menggunakan KOH. Dan dilakukan pencucian dengan HCl untuk menurunkan kadar abu dan zat penfotor lainnya. Hasil penelitian ini menunjukkan aktivasi KOH secara signifikan meningkatkan karakteristik <i>biochar</i> murni. Luas permukaan spesifik (SSA) <i>biochar</i> yang dimodifikasi KOH meningkat 3,9-14,4 kali lipat dibandingkan dengan <i>biochar</i> murni. Kapasitas adsorpsi CO ₂ juga mengalami peningkatan, dengan <i>biochar</i> murni didapatkan sebesar 35,5-42,9 mg/g sedangkan <i>biochar</i> yang dimodifikasi sebesar 16,7-182,0 mg/g. Faktor lain yang berpengaruh pada peningkatan adsorpsi CO ₂ pada <i>biochar</i> modifikasi yaitu pengembangan mikropori melalui aktivasi KOH dan adanya atom hetero (O dan K) sebagai gugus fungsional yang

		menguntungkan. Penelitian ini menunjukkan potensi <i>biochar</i> yang dimodifikasi sebagai adsorben CO ₂ yang efisien.
Donda, D, Silalahi, M, & Francisco, Y (2019)	Pemanfaatan Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Arang Aktif Dalam Adsorpsi Minyak Goreng Bekas	Pada penelitian ini mengkaji proses aktivasi karbon aktif dan pengaruhnya terhadap kemampuan adsorpsi. Selama aktivasi, terjadi perubahan fisik yang signifikan pada karbon aktif, di mana luas permukaannya meningkat tajam akibat penghilangan senyawa dan sisa penggaraman. Konsentrasi aktivator memainkan peran penting dalam meningkatkan daya serap karbon. Semakin tinggi konsentrasi aktivator, semakin kuat pengaruhnya terhadap pengikatan dan pelepasan senyawa dari mikropori, menghasilkan permukaan karbon aktif yang lebih kuat dan luas. Suhu karbonisasi juga memiliki dampak signifikan; suhu yang lebih tinggi mengurangi jumlah arang yang dihasilkan, namun meningkatkan produksi cairan dan gas karena lebih banyak zat terurai dan menguap. Konsentrasi aktivator yang lebih tinggi tidak hanya meningkatkan efektivitas proses, tetapi juga menghasilkan permukaan yang lebih berpori, sehingga meningkatkan daya adsorpsi karbon aktif. Pemahaman tentang faktor-faktor ini sangat penting dalam optimalisasi produksi karbon aktif untuk berbagai aplikasi, termasuk adsorpsi CO ₂ , dengan tujuan menghasilkan material dengan luas permukaan yang lebih besar dan daya adsorpsi yang lebih tinggi.
Liu, H, Xu, G, & Li, G (2021).	Preparation of porous <i>biochar</i> based on pharmaceutical sludge activated by NaOH and its application in the adsorption of tetracycline.	Penelitian ini mengkaji <i>biochar</i> yang dihasilkan melalui dua metode aktivasi NaOH berbeda untuk adsorpsi tetrasiplin (TC). <i>Biochar</i> yang dihasilkan dengan metode impregnasi menunjukkan luas permukaan spesifik yang lebih besar dan jumlah pori mikro yang lebih banyak dibandingkan dengan metode pencampuran kering. Kedua jenis adsorben menunjukkan efektivitas pada rentang pH yang luas, dengan kapasitas adsorpsi terbaik mencapai 379,78 mg/L untuk <i>biochar</i> dengan pencampuran kering dan 361,84 mg/L untuk BC dengan impregnasi pada suhu 25°C. Proses adsorpsi TC oleh adsorben ini melibatkan mekanisme fisik dan kimia, dengan karakteristik adsorpsi multilayer. Faktor yang berperan adalah ikatan hidrogen, konjugasi π-π, dan efek pengisian pori. Peningkatan suhu terbukti meningkatkan efisiensi proses adsorpsi. <i>Biochar</i> yang berasal dari lumpur farmasi dan diaktivasi

	dengan NaOH menunjukkan luas permukaan spesifik yang besar dan kapasitas adsorpsi TC yang sangat baik dengan stabilitas tinggi.
Huang, H, Tang, J, Gao, K, He, R, Zhao, H, & Werner, D (2017).	Characterization of KOH modified <i>biochars</i> from different pyrolysis temperatures and enhanced adsorption of antibiotics
Mu, Y, & Ma, H (2021)	NaOH-modified mesoporous <i>biochar</i> derived from tea residue for methylene Blue and Orange II removal.

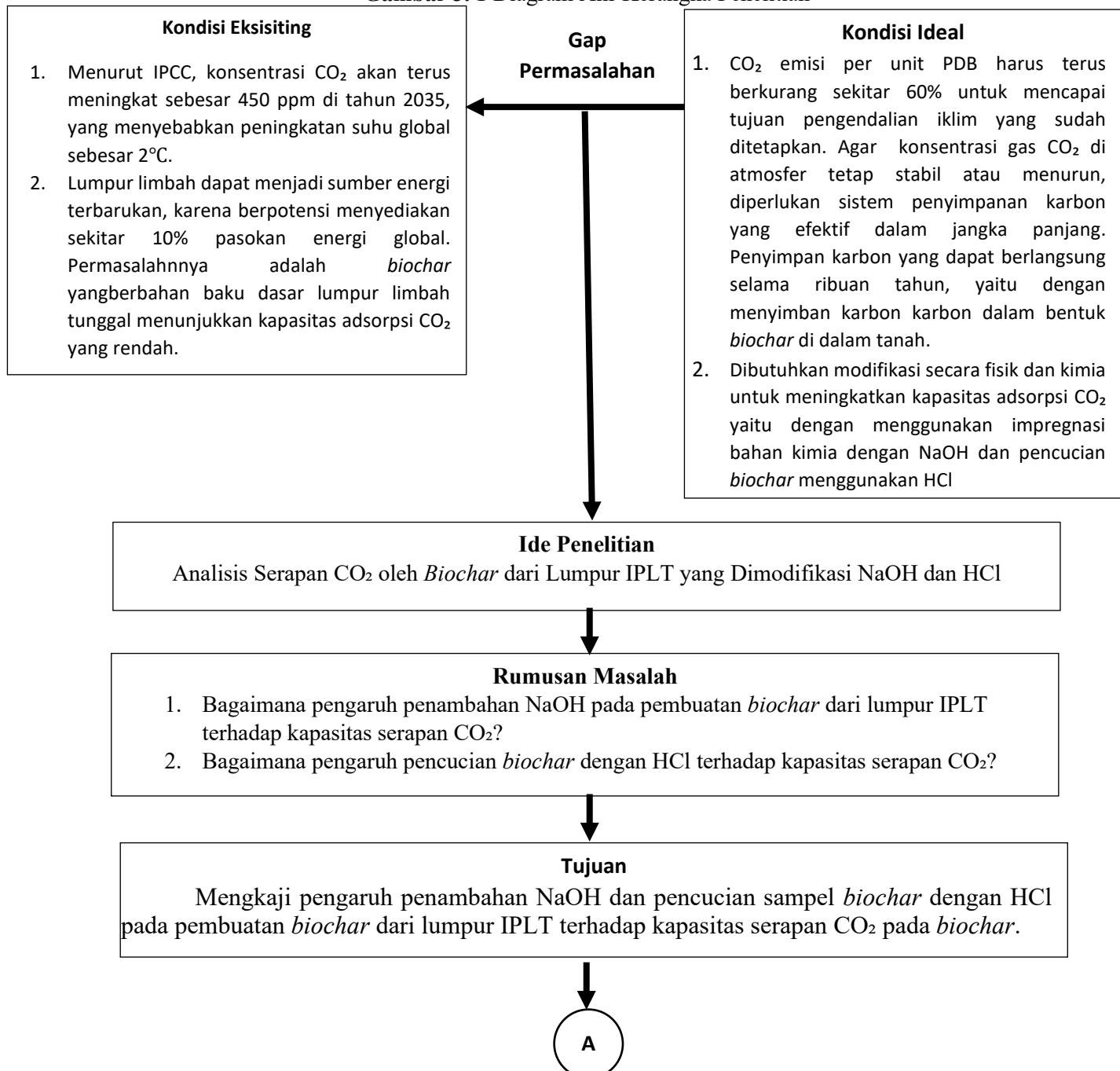
BAB III

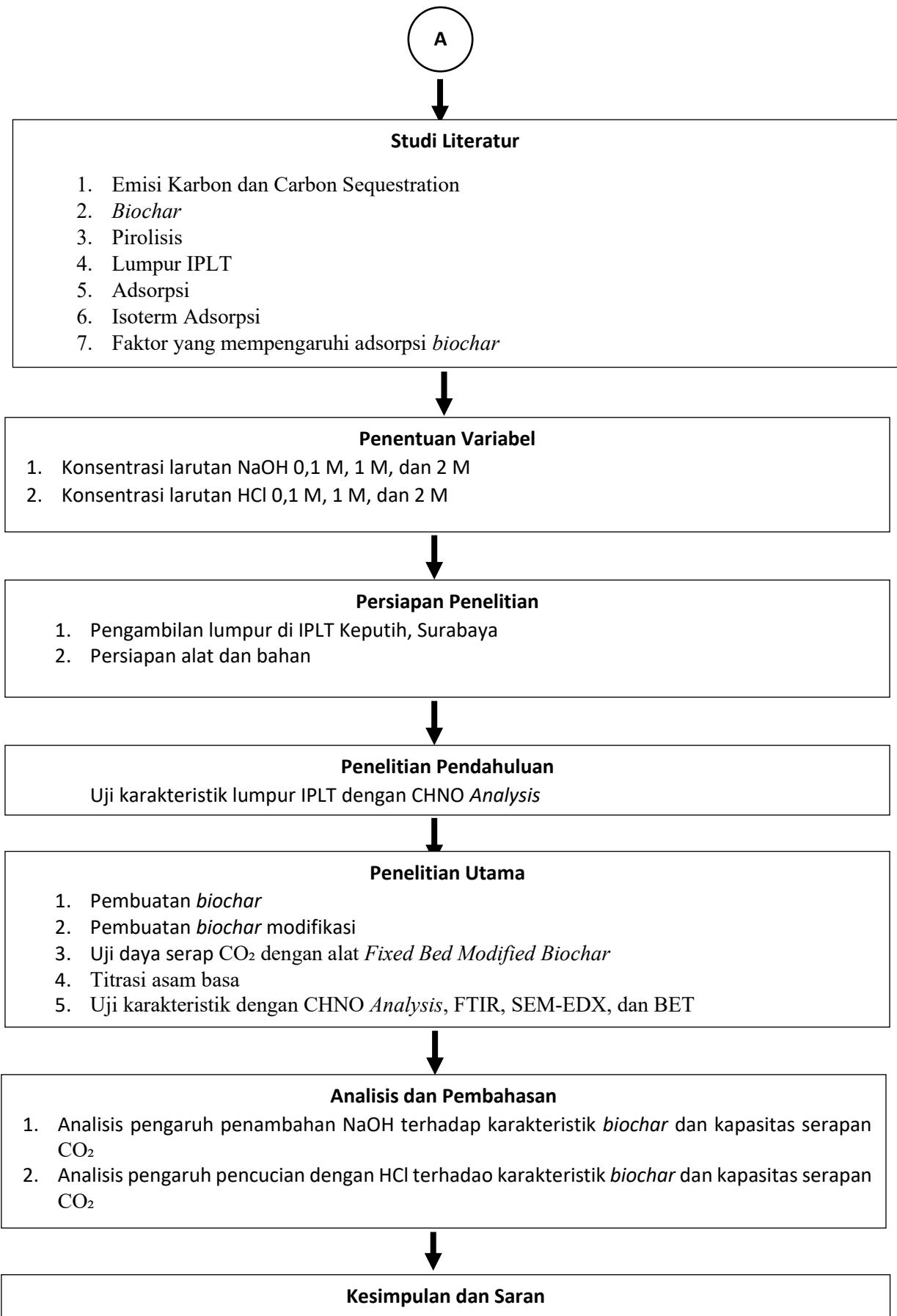
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Pada penelitian yang berjudul “Analisis Serapan CO₂ oleh *Biochar* dari Lumpur IPLT yang Dimodifikasi NaOH dan HCl” ini merupakan penelitian eksperimental skala laboratorium yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh penambahan NaOH dan pencucian sampel *biochar* dengan HCl pada pembuatan *biochar* dari lumpur IPLT terhadap kapasitas serapan CO₂ pada *biochar*. Lumpur IPLT yang digunakan berasal dari Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) Keputih, Surabaya. Berikut merupakan diagram alir yang menggambarkan pelaksanaan penelitian.

Gambar 3.1 Diagram Alir Kerangka Penelitian





3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian meliputi berbagai langkah yang diambil selama proses penelitian. Berikut adalah penjelasan lebih rinci tentang tahapan-tahapan tersebut.

3.2.1 Pendahuluan

Studi literatur perlu dilakukan untuk memperkuat ide penelitian yang diperoleh dari berbagai sumber informasi tertulis seperti jurnal penelitian baik nasional maupun internasional, *paper*, *text book*, *article review*, maupun jenis literatur lainnya yang berkaitan dengan ide penelitian. Studi literatur yang dilakukan untuk mendukung penelitian ini mencakup emisi karbon, carbon sequestration, *biochar*, pirolisis, lumpur IPLT, dan faktor yang mempengaruhi *biochar*. Studi literatur juga bermanfaat dalam membantu peneliti untuk mempersiapkan penelitian yang akan dilakukan secara teknis. Setelah studi literatur dilakukan, dilanjutkan dengan mengurus perizinan untuk pengambilan lumpur di IPLT Keputih, Surabaya dan perizinan pelaksanaan analisis di Laboratorium Pengendalian Pencemaran Udara dan Perubahan Iklim Departemen Teknik Lingkungan ITS.

3.2.2 Penentuan Variabel Penelitian

Variabel merupakan sesuatu yang dapat diberikan nilai. Pada penelitian ini, digunakan variabel bebas yang menjadi perlakuan terhadap penelitian yang meliputi sebagai berikut.

- Dengan penambahan larutan NaOH

Pada penelitian ini, menggunakan variasi konsentrasi penambahan NaOH. Peningkatan adsorpsi polutan asam pada karbon aktif dapat dicapai dengan meningkatkan sifat kebiasaan material. Salah satu metode yang sering digunakan yaitu impregnasi dengan bahan kimia yang sesuai, NaOH contohnya, impregnasi adalah proses memasukkan zat aktif atau bahan tertentu ke dalam substrat untuk meningkatkan sifat atau fungsi material tersebut. Oleh karena itu digunakan konsentrasi NaOH sebagai variabel yaitu 0,1 M; 1 M; dan 2 M.

- Variasi pencucian sampel dengan HCl

Pada penelitian ini, menggunakan variasi perbedaan perlakuan dengan pencucian sampel menggunakan asam kuat yaitu HCl. Pencucian *biochar* dengan HCl berfungsi untuk menghilangkan sisa bahan pengotornya. Pencucian dengan HCl dapat menurunkan kadar abu yang berpengaruh dengan efisiensi penyerapan CO₂. Oleh karena itu digunakan konsentrasi HCl sebagai variabel yaitu 0,1 M; 1 M; dan 2 M.

Proses pembuatan modifikasi *biochar* terdiri dari variasi NaOH, HCl, dan campuran keduanya sehingga terdapat 16 sampel yang akan dianalisis. Variasi pada *biochar* dapat dilihat pada **Tabel 3.1** berikut.

Tabel 3.1 Variasi dan Label untuk *Biochar*

		Penambahan NaOH			
		Tanpa penambahan	0,1 M	1 M	2 M
Pencucian dengan HCl	Tanpa penambahan	HXNX	HXN0	HXN1	HXN2
	0,1 M	H0NX	H0N0	H0N1	H0N2
	1 M	H1NX	H1N0	H1N1	H1N2
	2 M	H2NX	H2N0	H2N1	H2N2

3.2.3 Pengambilan Sampel Awal

Sampel bahan baku dalam pembuatan *biochar* yang digunakan dalam penelitian ini adalah lumpur dari IPLT (Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja) Keputih, Surabaya. Sedimen

lumpur IPLT dalam bentuk lumpur kering yang berada di unit *Sludge Drying Bed* (SDB) diambil dengan menggunakan cangkul dan dimasukkan ke dalam karung. Berat lumpur yang diambil sebesar 20-40 kg. Berikut merupakan **Gambar 3.** yang merupakan lokasi *sampling* di unit SDB IPLT Keputih.



Gambar 3. 2 Lokasi Pengambilan Lumpur IPLT Keputih
(*Sumber: Dokumentasi Pribadi*)

3.2.4 Persiapan Penelitian

Sebelum penelitian dilaksanakan, adapun hal yang harus diperlukan yaitu mempersiapkan peralatan dan bahan sesuai dengan uji yang dilakukan. Alat yang digunakan pada penelitian ini meliputi:

1. Cawan Crus 100 mL
Cawan crus digunakan sebagai wadah lumpur selama dipanaskan di dalam *furnace*.
2. Cawan Porselen 100 mL
Cawan proselen digunakan sebagai wadah kertas saring dan *biochar* selama dipanaskan di dalam oven.
3. pH Meter
pH meter merupakan alat ukur tingkat asam basa *biochar*.
4. Neraca Analitik
Neraca analitik merupakan alat untuk menimbang massa padatan secara gravitasi.
5. Oven
Oven digunakan dalam proses pemanasan untuk menghilangkan kadar air yang terkandung dalam lumpur dan *biochar*.
6. Furnace
Furnace digunakan dalam proses pirolisis (pemanasan tanpa oksigen) lumpur menjadi *biochar*.
7. Desikator
Desikator digunakan untuk menurunkan suhu dan menyerap kadar air *biochar* setelah keluar dari oven dan *furnace*.
8. Magnetic Stirrer
Magnetic Stirrer merupakan alat untuk mengaduk lumpur, NaOH, dan HCl agar bercampur secara homogen.
9. Piper Ukur dan Bulb
Pipet ukur dan bulb digunakan untuk mengambil sampel dalam jumlah tertentu agar lebih teliti.
10. Labu Ukur
Labu ukur digunakan untuk membuat larutan NaOH dan HCl sesuai konsentrasi 0,1 M, 1 M, dan 2 M.

11. *Erlenmeyer*

Erlenmeyer digunakan sebagai wadah untuk mencampur *biochar* dengan larutan NaOH dan larutan HCl.

12. *Gelas Beaker*

Gelas beaker digunakan untuk sebagai wada akuades dalam proses filtrasi.

13. *Vacuum Filter*

Vacuum filter merupakan alat filtrasi dalam proses impregnasi NaOH dan pencucian HCl.

14. *Buret*

Buret digunakan untuk titrasi asam basa agar hasil titran yang didapat lebih akurat.

15. *Mortal dan Alu*

Mortal dan *alu* digunakan untuk menumbuk lumpur yang telah menjadi *biochar* agar ukurannya lebih kecil dan halus.

16. *Spatula*

Spatula digunakan untuk mengambil *biochar* saat pengukuran atau uji pH

17. *Ayakan*

Ayakan berukuran 40 mesh digunakan untuk mengayak *biochar* yang telah ditumbuk agar lebih halus sehingga *biochar* yang tidak lolos ayakan bisa ditumbuk kembali.

18. *Penjepit*

Penjepit kecil digunakan untuk mengambil kertas saring saat proses filtrasi dan penjepit besar digunakan untuk mengambil cawan porselen di oven dan cawa crus di *furnace*.

19. *Fixed-Bed Modified*

Fixed-Bed Modified merupakan alat uji yang digunakan untuk mengetahui efisiensi adsorpsi dan kapasitas penyerapan *biochar*.

20. *Scanning Electron Microscopy and Energy Difraction X-Ray* (SEM-EDX), *Brunauer-Emmert-Teller* (BET), dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

SEM-EDX digunakan untuk menganalisis morfologi pori *biochar* dan kandungan yang terdapat di dalamnya. BET digunakan untuk mengatahui luas area spesific dan volume pori *biochar*, sedangkan FTIR untuk mengetahui gugus fungsi yang terkandung dalam *biochar*.

Adapun bahan-bahan yang digunakan antara lain:

1. *Lumpur IPLT*

Lumpur IPLT sebagai biomassa yang digunakan dalam membuat *biochar* dan diuji efisiensi adsorpsi dan kapasitas penyerapan CO₂.

2. *Natrium Hidroksida* (NaOH)

NaOH digunakan sebagai bahan kimia yang diimpregnasi ke dalam *biochar* dan sebagai adsorben dalam proses uji *fixed-bed modified*.

3. *Asam Klorida* (HCl)

HCl digunakan sebagai bahan kimia untuk mencuci *biochar* serta digunakan dalam proses titrasi asam basa.

4. *Indikator Fenolftalein* (PP)

Indikator pp digunakan untuk menentukan titik ekuivalen pada titrasi asam basa.

5. *Kertas Saring*

Kertas saring digunakan untuk menyaring *biochar* dari larutan NaOH dan larutan HCl dalam proses filtrasi.

3.2.5 Penelitian Pendahuluan

Sebelum menuju penelitian utama, perlu dilakukan penelitian pendahuluan terlebih dahulu. Penelitian pendahuluan yang dilaksanakan sebagai berikut:

1. Uji Kualitas Lumpur IPLT

Pengujian terhadap kualitas lumpur dilakukan sebelum difungsikan sebagai bahan baku pembuatan *biochar* yang akan diteliti lebih lanjut dalam penelitian ini. Parameter utama yang diuji yaitu kandungan karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), oksigen (O), dan kadar abu serta parameter pendukung seperti pH. Uraian terkait pengujian dan standar acuan parameter dapat dilihat pada **Tabel 3.2** berikut.

Tabel 3.2 Standar Pengujian Parameter

Parameter	Metode Analisis	Standar Acuan
Kadar Air		
Abu (db)	Gravimetri	ASTM D3171-12
Karbon C (db)		
Nitrogren N (db)	Kjeldahl	SNI 2354.3:2011
Hidrogen H (db)	Gravimetri	ASTM D3171-12
Oksigen O (db)	Balance	SNI ISO 12039:2018
pH	pH meter Indikator Universal	SNI 6989.11:2019

db: berat kering

2. Pembuatan Larutan NaOH

Pembuatan larutan NaOH terbagi menjadi 3 sesuai dengan besar konsentrasinya. NaOH dalam bentuk kristal padatan diambil sebanyak 0,4 gr untuk 0,1 M; 4 gr untuk 1 M; dan 8 gr untuk 2 M. NaOH dimasukkan masing-masing ke dalam labu ukur 100 mL dan ditambahkan akuades hingga 100 mL. Larutan diaduk hingga larut dan homogen menggunakan magnetic stirrer selama 15 menit dan dimasukkan ke dalam botol HDPE serta diberi kode NaOH 0,1 M; 1 M; dan 2 M.

3. Pembuatan Larutan HCl

HCl yang digunakan yaitu HCl 37%, pembuatan larutan HCl terbagi menjadi 3 sesuai dengan besar konsentrasinya. HCl diambil sebanyak 0,83 mL untuk 0,1 M; 8,3 mL untuk 1 M; dan 16 mL untuk 2 M. NaOH dimasukkan masing-masing ke dalam labu ukur 100 mL dan ditambahkan akuades hingga 100 mL. Larutan diaduk hingga larut dan homogen menggunakan magnetic stirrer selama 15 menit dan dimasukkan ke dalam botol HDPE serta diberi kode NaOH 0,1 M; 1 M; dan 2 M.

3.2.6 Penelitian Utama

1. Pembuatan *Biochar*

Pembuatan *biochar* dilakukan setelah lumpur IPLT di uji kualitasnya untuk pembanding hasil analisis. Preparasi *biochar* dilakukan dengan menggunakan lumpur IPLT sebanyak 100 gram di letakkan pada cawan porselen dan kemudian dihilangkan kadar airnya pada suhu 105°C dengan oven selama 1 jam. Lumpur yang telah dikeringkan di oven, kemudian dikeluarkan hingga suhu nya menjadi suhu ruang. Lumpur selanjutnya diletakkan ke dalam cawan porselen yang diatasnya diberi penutup tambahan dengan *alumunium foil* agar semakin rapat sehingga tidak ada udara yang masuk dan dilakukan pirolisis menggunakan alat *furnace* dengan suhu 300°C selama 2 jam. Pirolisis merupakan proses dekomposisi kimia bahan organik melalui pemanasan tanpa atau sedikit oksigen. Selama proses pirolisis, terjadi aktivasi yang melibatkan pemutusan rantai karbon dan senyawa organik dengan bantuan panas, uap, CO₂, O₂, dan N₂. Hasil dari proses pirolisis dapat berupa padatan, gas, cairan, serta *biochar*. *Biochar* yang dihasilkan dari pirolisis pada suhu tinggi akan memiliki luas permukaan yang lebih besar dan gugus aromatik karbon, sehingga dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi yang dibutuhkan untuk penyerapan gas CO₂ di udara. Setelah proses pirolisis dilakukan, *biochar* digerus menggunakan mortal dan alu serta diayak dengan saringan 40 mesh. Penggerusan *biochar* hingga ukuran 40 mesh bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan *biochar* secara signifikan. Semakin halus ukuran partikel *biochar*, maka luas permukaan total *biochar* akan semakin besar. Hal ini karena dengan menghaluskan *biochar* hingga ukuran partikel yang sangat kecil,

jumlah total partikel dalam volume yang sama akan menjadi jauh lebih banyak. Akibatnya, luas permukaan yang tersedia untuk proses adsorpsi, katalis, atau reaksi lainnya akan meningkat secara drastis. Ukuran partikel yang halus memungkinkan *biochar* untuk memiliki kemampuan penyerapan atau reaktivitas yang lebih tinggi, sehingga dapat dimanfaatkan secara optimal dalam berbagai aplikasi. Lumpur IPLT yang telah menjadi *biochar* kemudian dilakukan uji CHNO analysis untuk mengetahui kandungan organik serta kadar airnya. *Biochar* yang telah jadi dimasukkan ke dalam wadah plastik berlabel dan disimpan di dalam ruang yang tidak terkena matahari secara langsung.

2. Pembuatan *Biochar* Modifikasi dengan NaOH

Sebanyak 0,4 gram, 4 gram dan 8 gram NaOH dilarutkan dengan 100 mL akuades untuk mendapatkan NaOH dengan konsentrasi 0,1 M, 1 M dan 2 M. Sampel *biochar* yang akan dimodifikasi dengan NaOH diambil sebanyak 10 gram dan dicampurkan dengan larutan NaOH perbandingan 1:10 (*biochar* : NaOH). Campuran *biochar* dengan NaOH, kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 4 jam agar homogen. Campuran yang telah diaduk, kemudian didiamkan 24 jam agar terjadi pengendapan dan meningkatkan porositas maupun pori *biochar* tersebut. Proses pengadukan bertujuan untuk meghomogenkan larutan dan meningkatkan kontak antara *biochar* dengan NaOH untuk memperluas bidang permukaan. *Biochar modified* kemudian difiltrasi menggunakan alat *vacuum filter*. Filtrasi merupakan proses pemisahan padatan dari cairan dengan cara melewatkannya melalui media berpori (kertas saring) untuk menghilangkan partikel padat tersuspensi. Setelah itu, *biochar* dikeringkan pada suhu 105°C 24 jam. Proses pengeringan pada suhu 105°C bertujuan untuk menghilangkan sisa kandungan air yang masih ada dalam *biochar*. Setelah pengeringan, *biochar* yang diperoleh kemudian didiamkan hingga suhunya menjadi suhu ruang. *Biochar* yang telah diaktivasi dengan NaOH kemudian dipirolysis kembali menggunakan *furnace* dengan suhu 700°C selama 4 jam. *Biochar* yang diperoleh diberi kode HXNO; HXN1; dan HXN2. Menurut Liu et al (2021), *biochar* yang dihasilkan dengan metode impregnasi menunjukkan luas permukaan spesifik yang lebih besar dan jumlah pori mikro yang lebih banyak dibandingkan dengan metode pencampuran kering. NaOH bereaksi dengan karbon (C) pada suhu tinggi dan menghasilkan gas. Reaksinya ditunjukkan pada Persamaan berikut :



Pembentukan struktur berpori terjadi karena pelepasan gas seperti CO, CO₂, dan H₂ yang dihasilkan dari dekomposisi Na₂CO₃ pada suhu tinggi serta reduksi gugus hidrosil. *Biochar* yang diaktivasi dengan metode impregnasi memiliki lebih banyak mikropori dibandingkan, disebabkan oleh kontak yang lebih merata antara larutan NaOH dengan *biochar* dalam bentuk molekul (Liu, et al., 2021).



Gambar 3. 3 (a) Pirolisis Kedua (b) Hasil *Biochar* Setelah Pirolisis
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Terlihat pada gambar bahwasannya setelah pirolisis kedua terbentuk abu yang ditandai pada sampel *biochar* terdapat warna yang berbeda. Pembentukan kadar abu dapat terjadi karena pembentukan senyawa anorganik baru seperti Na₂CO₃ yang tidak terurai dengan sempurna. Selain itu, Na₂CO₃ dapat terdekomposisi lebih lanjut pada suhu tinggi menjadi Na₂O dan CO₂. Na₂O yang dihasilkan akan tetap

berada dalam *biochar* dan berkontribusi pada peningkatan abu. Kadar abu yang tinggi dapat mempengaruhi efektivitas penyerapan *biochar*, hal ini dikarenakan pori-pori *biochar* tertutup oleh abu.

3. Pembuatan *Biochar* Modifikasi dengan Pencucian HCl

Sebanyak 0,83 mL, 8,3 mL, dan 16,7 mL HCl dilarutkan dengan 100 mL akuades untuk mendapatkan HCl dengan konsentrasi 0,1 M, 1 M dan 2 M. Pada sampel *biochar* yang akan di variasikan dengan pencucian HCl, sampel *biochar* dicampurkan dengan larutan HCl dengan perbandingan 1:10 (*biochar* : HCl). Campuran kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 1-2 jam. Campuran yang telah diaduk, kemudian didiamkan 24 jam agar terjadi pengendapan dan meningkatkan porositas maupun pori *biochar* tersebut. Proses pengadukan bertujuan untuk meghomogenkan larutan dan meningkatkan kontak antara *biochar* dengan HCl untuk memperluas bidang permukaan. *Biochar modified* kemudian difiltrasi menggunakan alat *vacuum filter*. Filtrasi merupakan proses pemisahan padatan dari cairan dengan cara melewatkannya melalui media berpori (kertas saring) untuk menghilangkan partikel padat tersuspensi. Dalam proses ini, *biochar* ditambahkan dengan akuades yang berfungsi sebagai pencuci. Pencucian dilakukan berulang hingga larutan sampel mencapai pH netral (pH 7). Pencucian menggunakan akuades bertujuan untuk menghilangkan ion-ion sisa berupa kation dan anion terlarut. Setelah itu, *biochar* dipisahkan lagi melalui proses filtrasi dan dikeringkan pada suhu 105°C 24 jam. Proses pengeringan pada suhu 105°C bertujuan untuk menghilangkan sisa kandungan air yang masih ada dalam *biochar*. Setelah pengeringan, *biochar* yang diperoleh kemudian didiamkan hingga suhunya menjadi suhu ruang sebelum digunakan lebih lanjut.



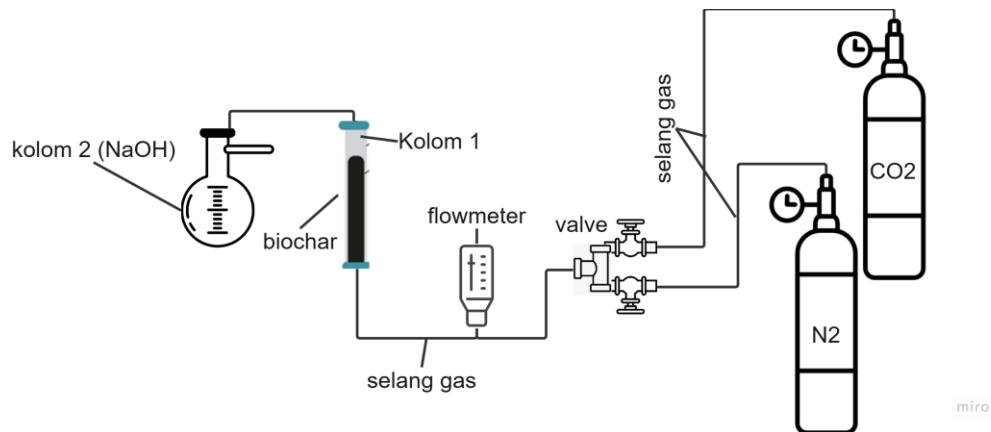
Gambar 3.4 (a) *Biochar* sebelum dikeringkan (b) *Biochar* setelah dikeringkan
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Pada gambar dapat dilihat bahwasannya saat setelah proses filtrasi *biochar* masih mengandung cukup banyak kadar air, sehingga setelah dikeringkan dengan oven kadar air di *biochar* bisa berkurang agar tidak mengganggu tahap selanjutnya. Pencucian *biochar* dengan HCl bertujuan untuk menghilangkan sebagian besar abu pada *biochar* yang bersifat basa (*alkalin*) seperti karbonat (CaCO_3 , MgCO_3) dan oksida logam. Apabila mineral ini tidak dihilangkan, mereka dapat berinteraksi dengan CO_2 , menghasilkan reaksi kimia yang tidak efisien seperti pembentukan karbonat logam kembali dan dapat mengurangi luas permukaan yang tersedia untuk adsorpsi fisik CO_2 . CO_2 merupakan senyawa yang bersifat asam ketika terlarut dalam air karena akan membentuk asam karbonat (H_2CO_3), tetapi interaksi *biochar* dengan CO_2 lebih bergantung pada struktur pori dan sifat kimia permukaan *biochar* daripada sekadar sifat asam atau basa. Setelah pencucian HCl, permukaan *biochar* memang cenderung sedikit lebih asam karena gugus fungsional asam (seperti -COOH dan -OH) lebih terpapar. Namun, hal ini justru mendukung adsorpsi CO_2 , karena gugus fungsional asam menciptakan ikatan lemah (interaksi fisik) dengan molekul CO_2 , yang ideal untuk aplikasi adsorpsi. CO_2 juga tidak hanya teradsorpsi melalui mekanisme kimia asam-basa, tetapi juga dapat melalui proses fisik interaksi van der Waals di pori-pori mikro (Amarullah & Lestari., 2023).

4. Fixed-bed Modified *Biochar*

Pada percobaan adsorpsi CO_2 pada *biochar* digunakan alat *fixed-bed modified biochar* dari Amarullah, M, & Lestari, I (2023). Alat *fixed-bed modified biochar* menggunakan dua kolom yang terdiri dari kolom pertama untuk *capture* CO_2 dengan *biochar* dan kolom kedua untuk *capture* CO_2 dengan larutan NaOH. Kedua kolom dihubungkan dengan pipa, sehingga

gas CO₂ yang tidak terserap atau lolos dari kolom pertama dapat diserap oleh NaOH melalui kolom dua. Pada alat *fixed-bed modified biochar* digunakan dua tabung gas yang berisi gas CO₂ dan gas N₂. Tabung gas nitrogen (N₂) berperan sebagai gas pembawa untuk membersihkan *biochar* di kolom pertama dan memastikan bahwa udara atau gas lain tidak ada di dalam aliran gas. Selain itu, gas nitrogen membantu memperlancar proses transfer massa antara gas CO₂, larutan NaOH, dan media penyerap *biochar*, sehingga meningkatkan kontak dan interaksi antar komponen serta memperbesar efisiensi penyerapan CO₂. Nitrogen merupakan gas inert dalam kondisi normal, hal ini berarti nitrogen tidak mudah bereaksi secara kimia dengan senyawa lain termasuk NaOH atau CO₂. Tabung gas karbon dioksida (CO₂) berfungsi sebagai adsorbat dalam proses adsorpsi, di mana CO₂ akan diserap atau diikat oleh permukaan material adsorben yaitu *biochar* dan larutan NaOH. Penggunaan gas ini memerlukan regulator untuk mengatur tekanan. Terdapat dua regulator, yaitu untuk gas CO₂ dan gas N₂, yang berfungsi mengurangi tekanan tinggi dari tabung gas ke tekanan yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Pengaturan ini penting untuk menghindari bahaya akibat tekanan tinggi, seperti kebocoran, ledakan, atau kerusakan alat. Dalam alat ini memiliki 2 *valve* untuk masing-masing tabung gas CO₂ dan tabung gas N₂ untuk membuka dan menutup aliran gas serta dilengkapi *flowmeter* yang diletakan tegak lurus agar hasil pengukuran laju alir gas tetap stabil dan akurat. *Flowmeter* ini berfungsi untuk memantau dan mengontrol laju aliran gas yang masuk ke dalam proses penyerapan CO₂ agar berjalan sesuai kebutuhan. *Flowmeter* dihubungkan dengan selang benang yang berfungsi sebagai saluran untuk mengalirkan gas CO₂ dari tabung menuju kolom. Rangkaian alat ini juga dilengkapi dengan tiga selang benang yang berfungsi sebagai jalur aliran gas nitrogen dan karbon dioksida menuju kolom. Kolom kedua menggunakan tabung *impinger* 200 mL sedangkan kolom pertama berupa pipa lab dengan panjang 110 cm dan diameter 1 cm. *Fiberglass* juga digunakan pada bagian bawah kolom pertama untuk menahan adsorben agar tidak masuk dan tercampur di pipa gas. Laju aliran yang digunakan yaitu 1L/Menit dan *biochar* yang digunakan sebesar 5,0 gram untuk menguji kapasitas *capture* CO₂ pada setiap percobaan dengan waktu selama 1 menit. Gas CO₂ yang tidak terserap pada kolom pertama akan dialikan ke kolom kedua yang berisi larutan NaOH 2 M sebanyak 140 mL. Berikut merupakan rangkaian alat *fixed bed modified biochar* pada penelitian ini yang disajikan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3. 5 Rancangan Alat *Fixed-bed Modified Biochar*
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

5. Titrasi Asam Basa

Titrasi merupakan metode analisis kimia yang bertujuan untuk menentukan konsentrasi suatu larutan dengan cara mereaksikannya dengan larutan standar yang telah diketahui konsentrasiannya. Dalam eksperimen ini, dilakukan titrasi asam-basa jenis asidimetri, menggunakan HCl sebagai larutan standar untuk menitrasi NaOH pasca penyerapan CO₂. NaOH yang digunakan memiliki konsentrasi 2 M.

Setelah penyerapan CO₂ menggunakan *biochar* termodifikasi, gas CO₂ yang tidak teradsorpsi diukur dengan titrasi. Indikator *fenolftalein* (PP) digunakan untuk mengidentifikasi titik akhir titrasi, yaitu ketika warna larutan menjadi bening. Pengulangan titrasi dilakukan dua kali untuk meningkatkan presisi hasil. Titik ekuivalen dan titik akhir menjadi acuan dalam analisis ini, dengan titik ekuivalen menunjukkan reaksi sempurna antara titran dan analit, sedangkan titik akhir diamati secara visual melalui perubahan warna.

Hal pertama yang dilakukan yaitu menyiapkan alat titrasi (*buret*) yang telah diisi dengan HCl 1 M, dan posisi buret diatur supaya lurus agar pembacaan skalanya tepat. Kemudian sampel yang telah dilakukan proses penyerapan CO₂ diambil dan dimasukkan ke dalam *erlenmeyer* 250 mL, kemudian ditambahkan 5-10 tetes indikator PP hingga berwarna merah muda. Setelah itu dilakukan titrasi sambil digoyangkan perlahan *erlenmeyer* agar pencampuran merata. Apabila sampel sudah berwarna bening maka proses titrasi HCl dihentikan dan dicatat volume titran yang diperoleh. Pada percobaan ini titrasi dilakukan dengan pengulangan sebanyak dua kali pada setiap pengujian *biochar* dengan alat *fixed-bed modified biochar*. Pengulangan ini bertujuan untuk mendapatkan hasil yang lebih akur dan presisi dengan membandingkan volume titran yang dibutuhkan.



Gambar 3.6 (a) Titrasi Asam Basa (b) Sampel Sebelum dan Sesudah Proses Titrasi
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Volume titran yang didapatkan dalam proses titrasi dicatat untuk dilakukan perhitungan % efisiensi capture CO₂ dan kapasitas adsorpsi *biochar*.

6. Karakterisasi

A. Penentuan Komposisi Unsur Kimia dan Dasar Bahan

Komposisi unsur yang terkandung dalam *biochar* dapat mempengaruhi kinerjanya dalam adsorpsi gas CO₂. Dalam menentukan kandungan unsur-unsur utama dalam *biochar* dilakukan uji CHNO Analysis untuk mengetahui komposisi unsur utama seperti (C,H,N,O) dan komponen dasar (*moisture and ash content*) menggunakan *dry based*. Uji CHNO Analysis dilakukan dengan mengirimkan sampel ke Laboratorium Manajemen Kualitas Lingkungan Teknik Lingkungan ITS.

B. Penentuan Luas Permukaan Spesifik dan Volume Pori

Dalam menentukan luas permukaan spesifik dan volume pori pada *biochar* dapat dilakukan uji Brunauer Emmett Teller (BET). Luas permukaan dan struktur pori yang besar pada *biochar* sangat berpengaruh terhadap kemampuannya dalam proses adsorpsi, seperti penyerapan gas CO₂. Pengujian dilakukan dengan mengirim sampel ke Laboratorium Elektrokimia dan Korosi Teknik Kimia ITS.

C. Penentuan Gugus Fungsi

n = jumlah mol gas CO₂

P = tekanan gas (atm)

R = konstanta gas (8,314 J/mol.K atau 0,0821 L . atm . K⁻¹ . mol⁻¹)

T = suhu gas (K)

- b. Menentukan fraksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_a = \frac{\text{mol gas A}}{\text{mol gas A} + \text{mol gas B}} \quad \dots \dots \dots \quad (3.2)$$

- c. Menentukan mol CO₂ pada saat penyerapan

$$P \times V = n \times R \times T \quad \dots \dots \dots \quad (3.3)$$

- d. Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

$$\text{gr CO}_2 = n \times M_r \quad \dots \dots \dots \quad (3.4)$$

- e. Hasil titrasi asam-basa

$$M_a \times V_a \times a = M_b \times V_b \times b \quad \dots \dots \dots \quad (3.5)$$

$$\text{Mol CO}_2 = M \times V (\text{dirubah jadi mg/L}) \quad \dots \dots \dots \quad (3.6)$$

- f. % Efisiensi *capture* CO₂

$$\% E = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad \dots \dots \dots \quad (3.7)$$

Keterangan :

$$\% E = \text{Efisiensi serapan gas CO}_2 (\%) \times 100\%$$

C₀ = Konsentrasi gas CO₂ yang dihasilkan secara teoritis (ppm)

C_e = Konsentrasi gas CO₂ yang terserap oleh larutan NaOH (ppm)

- g. Penentuan kapasitas adsorpsi

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} \times V \quad \dots \dots \dots \quad (3.8)$$

Keterangan :

Q_e = kapasitas adsorpsi (mg/g)

m = massa adsorben (gr)

V = Laju alir gas (L/menit)

C₀ = konsentrasi sebelum teradsorpsi (mg/L)

C_e = konsentrasi setelah adsorpsi (mg/L)

- h. Isoterm *Freundlich*

Isoterm *Freundlich* dinyatakan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Q_e = K_f \times C_e^{1/n} \quad \dots \dots \dots \quad (3.9)$$

Konstanta K_f dan 1/n didapatkan dengan melakukan linearisasi terhadap persamaan berikut:

$$\log q_e = \log K_f + (1/n) \log C_e \quad \dots \dots \dots \quad (3.10)$$

Keterangan :

q_e = Jumlah ion adsorbat yang terserap pada saat *equilibrium* (mg/g)

C_e = Konsentrasi ion atau molekul adsorbat pada saat setimbang (mg/L)

"Halaman Ini sengaja dikosongkan"

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Lumpur IPLT

Pada penelitian ini lumpur IPLT yang digunakan berasal dari IPLT Keputih, Surabaya yang diambil dari hasil pengolahan lumpur tinja yang ada di unit *sludge drying bed*. Lumpur IPLT yang diambil dilakukan *pre-treatment* dengan dipanaskan ke dalam oven kemudian dilakukan uji CHNO *analysis* untuk mengetahui kandungan organik serta kadar airnya. Berikut ini merupakan hasil dari uji CHNO *analysis* yang dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Uji Lumpur Kering IPLT

Parameter	Satuan	Hasil Analisa	Metode Analisis
Kadar Air	%	0,00	Gravimetri
Abu (db)	%	27,53	Gravimetri
Karbon C (db)	% C	42,03	Gravimetri
Nitrogen N (db)	% N	7,50	Kjeldahl
Hidrogen H (db)	% H	4,83	Gravimetri
Oksigen O (db)	% O	18,11	Balance
pH	-	6,93	pH meter

- db = berat kering

Berdasarkan hasil uji lumpur kering IPLT kadar air yang terkandung sebesar 0,00% hal ini menandakan kadar air dalam lumpur sudah tidak tersisa setelah lumpur di oven. Hasil analisis kimia lumpur IPLT menunjukkan kadar karbon (C) sebesar 42,03%, hidrogen (H) sebesar 4,83%, nitrogen (N) sebesar 7,50%, dan oksigen (O) sebesar 18,11%. Nilai ini secara signifikan lebih tinggi dibandingkan hasil analisis lumpur IPLT dalam penelitian Mizkolczi *et al* (2024) dan Liu *et al* (2024) yang menganalisis reduksi CO₂ menggunakan *biochar* dari *agriculture sludge* dan *sewage sludge*, yang memiliki kadar karbon sebesar 24,9–26,03%, hidrogen 3,0–4,296%, dan nitrogen 2,9–4,4%. Perbedaan ini menandakan lumpur IPLT dari unit *sludge drying bed* memiliki kandungan bahan organik lebih tinggi dan dengan melalui proses pengeringan tambahan menggunakan oven juga membantu mengurangi kontaminasi anorganik atau senyawa volatil, sehingga komponen organik lebih dominan terdeteksi. Kandungan organik yang tinggi, terutama kandungan karbon (%C) mendukung potensi lumpur IPLT sebagai bahan baku *biochar* dalam menyimpan karbon.

Dalam pembuatan *biochar* menggunakan lumpur IPLT juga dilakukan uji CHNO *analysis* untuk mengetahui kandungan organik serta kadar airnya pada *biochar* yang telah dibuat. Berikut ini merupakan hasil dari uji CHNO *analysis* yang dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Uji Biochar

Parameter	Satuan	Hasil Analisa	Metode Analisis
Kadar Air	%	27,00	Gravimetri
Abu (db)	%	38,00	Gravimetri
Karbon C (db)	% C	35,96	Gravimetri
Nitrogen N (db)	% N	1,43	Kjeldahl
Hidrogen H (db)	% H	4,13	Gravimetri
Oksigen O (db)	% O	20,48	Balance
pH	-	7,10	pH meter

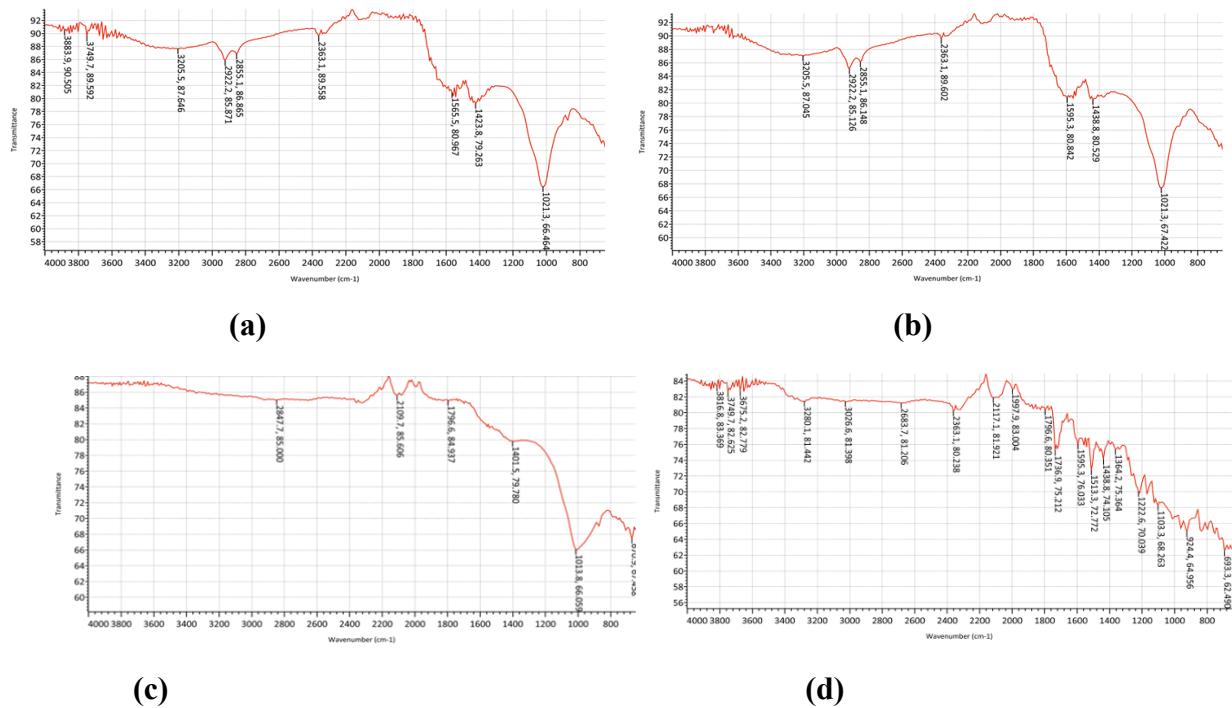
- db = berat kering

Berdasarkan hasil uji kandungan *biochar*, kadar karbon menurun dari 42,03% (lumpur) menjadi 35,96% (*biochar*). Penurunan ini disebabkan oleh hilangnya sebagian besar

senyawa organik volatil selama proses pirolisis, terutama karbon yang terikat dalam bentuk senyawa volatil (seperti CO_2 atau CH_4). Pada suhu 300°C, pirolisis belum sepenuhnya mencapai tahap karbonisasi maksimal, sehingga sebagian karbon masih hilang bersama senyawa volatil. Penurunan kadar nitrogen dari 7,50% menjadi 1,43% terjadi karena senyawa nitrogen cenderung terdekomposisi menjadi gas (seperti NH_3 atau NOx) pada suhu pirolisis. Oleh karena itu, *biochar* yang dihasilkan memiliki kandungan nitrogen lebih rendah. Kadar hidrogen juga menurun dari 4,83% menjadi 4,13%. Penurunan ini disebabkan oleh dekomposisi senyawa organik yang mengandung hidrogen menjadi gas volatil (seperti H_2 atau hidrokarbon ringan). Kadar oksigen meningkat dari 18,11% menjadi 20,48%, hal ini menunjukkan adanya perubahan komposisi organik lumpur yang menghasilkan sisa oksigen dalam struktur *biochar*, yang biasanya terikat pada senyawa karbon. Kadar abu meningkat dari 27,53% menjadi 38,00% sebab abu merupakan bagian dari senyawa anorganik yang tidak terdegradasi selama pirolisis. Peningkatan kadar abu menunjukkan bahwa *biochar* lebih terkonsentrasi pada komponen anorganik dibandingkan lumpur awal. Kadar air *biochar* lebih tinggi dari lumpur awal dikarenakan penyerapan kelembapan udara setelah pirolisis atau proses pendinginan *biochar* yang tidak sepenuhnya kering. Hal ini juga bisa terjadi karena *biochar* memiliki struktur berpori yang mampu menyerap air dari lingkungan.

4.2 Karakteristik *Biochar*

Biochar sebagai adsorben dilakukan uji karakterisasi untuk mengetahui sifat fisis dan kimianya yang berkaitan dengan performa adsorbsinya. Karakteristik yang dilakukan berkaitan dengan struktur permukaan, luas permukaan spesifik, volume pori, serta keberadaan gugus fungsi aktif pada permukaan *biochar*. Karakterisasi dilakukan terhadap *biochar* yang tidak dimodifikasi dan *biochar* yang telah diimpregnasi NaOH dan dicuci dengan HCl, untuk mengetahui pengaruh modifikasi *biochar* dengan kinerjanya sebagai adsorben CO_2 . Kemampuan adsorpsi *biochar* dapat ditingkatkan secara kimiawi yang ditandai dengan adanya gugus polar yang akan berinteraksi kimia dengan gas CO_2 . Berikut merupakan hasil uji FTIR pada *biochar*. Berdasarkan analisis, diperoleh spektrum IR transmitansi dari sampel yang diperlihatkan pada **Gambar 4.4** berikut.



Gambar 4. 1 Spektrum IR *Biochar* Tanpa Aktivasi (a), *Biochar* Pencucian HCl 0,1 M (b), *Biochar* Aktivasi NaOH 0,1 M (c) *Biochar* Aktivasi NaOH + HCl (d)

Hasil spektrum FTIR menunjukkan perbedaan signifikan pada gugus fungsi *biochar* dalam setiap perlakuan ditunjukkan pada **Gambar 4.1**. Pada *biochar* asli tanpa aktivasi **Gambar 4.1 (a)**, terlihat adanya puncak khas pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya gugus hidroksil (-OH), serta puncak di sekitar 1600 cm^{-1} yang mengindikasikan keberadaan gugus C=C aromatik. Gugus ini mencerminkan struktur karbon dasar *biochar* yang belum dimodifikasi. Setelah impregnasi dengan NaOH **Gambar 4.1 (b)**, intensitas puncak hidroksil meningkat, menunjukkan pembentukan lebih banyak gugus -OH yang bersifat hidrofilik (Liu *et al.*, 2021). Puncak baru di sekitar $1400\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan keberadaan gugus karbonat (CO_3^{2-}) yang terbentuk akibat reaksi antara NaOH dan *biochar*. Modifikasi ini meningkatkan potensi adsorpsi CO_2 dengan interaksi kimia yang terjadi. Pada *biochar* yang dicuci dengan HCl **Gambar 4.1 (c)**, beberapa puncak pada daerah hidroksil dan karbonat berkurang, menunjukkan penghilangan residu mineral dari proses pencucian asam. Spektrum ini juga menunjukkan peningkatan gugus karbon aromatik, yang dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui interaksi fisik. Terakhir, pada *biochar* yang diimpregnasi NaOH dan dicuci dengan HCl **Gambar 4.1 (d)**, spektrum FTIR menunjukkan kombinasi efek dari kedua perlakuan. Gugus hidroksil tetap terlihat dominan, namun intensitas gugus karbonat sedikit berkurang, menandakan penghilangan sebagian residu dari perlakuan NaOH. Selain itu, puncak serapan pada $1736,9\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan adanya gugus eter, dan ester (C=O). Dibandingkan dengan **Gambar 4.1 (a)**, intensitas pita pada $1513,3\text{ cm}^{-1}$ dan 1364 cm^{-1} pada **Gambar 4.1 (d)** meningkat, yang menunjukkan bahwa aktivasi dengan NaOH meningkatkan pembentukan struktur aromatik dan gugus fungsi pada *biochar*. Struktur ini memberikan keseimbangan antara gugus aktif kimiawi dan permukaan pori, yang mendukung interaksi fisik dan kimia dalam adsorpsi CO_2 . Perlakuan aktivasi dan pencucian secara signifikan memodifikasi gugus fungsi *biochar*, sehingga meningkatkan efisiensi adsorpsi CO_2 melalui kombinasi interaksi fisik dan kimia

Adsorpsi gas CO_2 bergantung pada luas permukaan dan struktur pori *biochar*. *Biochar* dengan pori mikropori atau mesopori yang luas dapat menyediakan lebih banyak area untuk interaksi dengan CO_2 . Berdasarkan hasil uji BET, struktur pori hasil uji *biochar* yang telah dimodifikasi lebih meningkat dibandingkan dengan hasil *biochar* asli. Berikut merupakan hasil uji dengan metode BET *Surface Area* pada *biochar* yang disajikan pada **Tabel 4.3**.

Tabel 4. 3 Hasil uji metode BET *Surface Area*

<i>Biochar</i>	Luas Permukaan (m^2/g)	Total Volume Pori (cm^3/g)	Diameter pori rata-rata (nm)	Volume Pori (cm^3/g)
HXNX	188,852	0,172	3,65	0,157
HXNO	252,989	0,263	4,157	0,247

Kapasitas adsorpsi CO_2 dari *biochar* terutama dipengaruhi oleh sifat fisikokimia *biochar* itu sendiri, seperti luas permukaan, ukuran pori, dan keberadaan gugus fungsi (Dissanayake *et al.*, 2020). Berdasarkan hasil uji BET pada **Tabel 4.3**, struktur pori *biochar* termodifikasi menunjukkan peningkatan yang signifikan setelah dimodifikasi dengan NaOH. Dengan berkembangnya mikroporisitas secara intensif, luas permukaan spesifik (SSA) *biochar* yang dimodifikasi NaOH meningkat sebesar 1,34 kali lipat atau 33,96%.

SSA dari *biochar* tanpa modifikasi HXNX adalah $188,852\text{ m}^2/\text{g}$, sedangkan SS dari *biochar* dari *biochar* dengan impregnasi NaOH 0,1 M HXNO meningkat menjadi $252,989\text{ m}^2/\text{g}$. Peningkatan signifikan pada luas permukaan ini dapat disebabkan oleh dekomposisi lebih

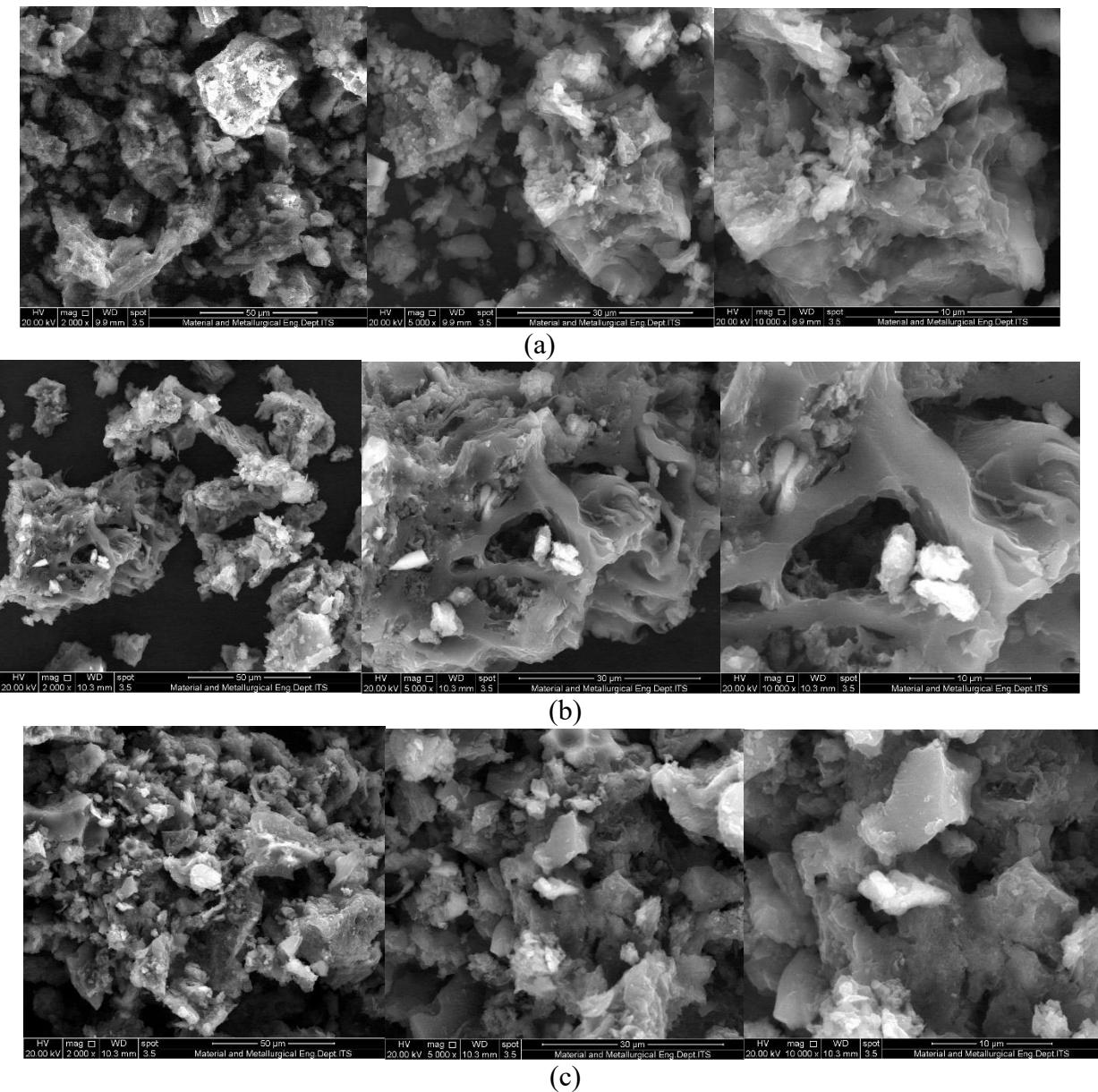
lanjut dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada proses pirolisis kedua untuk aktivasi NaOH dengan suhu yang lebih tinggi (Li et al., 2021). Selain itu, *biochar* yang dimodifikasi NaOH juga menunjukkan volume total pori yang lebih besar $0,263 \text{ cm}^3/\text{g}$ dibandingkan dengan *biochar* tanpa modifikasi yaitu $0,172 \text{ cm}^3/\text{g}$. Tren serupa juga diamati pada diameter pori rata-rata dan volume pori. Persentase volume pori yang lebih tinggi juga ditemukan pada *biochar* yang dimodifikasi NaOH ($0,247 \text{ nm}$) dibandingkan *biochar* tanpa modifikasi ($0,157 \text{ nm}$), yang menunjukkan bahwa *biochar* termodifikasi memiliki kapasitas adsorpsi CO_2 yang lebih tinggi, karena volume pori yang besar berperan penting dalam performa penangkapan CO_2 semakin besar volume pori, semakin banyak molekul gas yang dapat ditampung dalam struktur pori sehingga kapasitas adsorpsi meningkat. Diameter pori rata-rata *biochar* juga menunjukkan peningkatan dimana diameter pori *biochar* tanpa modifikasi sebesar $3,65 \text{ nm}$, sedangkan diameter pori *biochar* dengan modifikasi NaOH sebesar $4,157 \text{ nm}$. Hasil BET menunjukkan baik *biochar* tanpa modifikasi (HXNX) maupun *biochar* termodifikasi NaOH (HXNO) menunjukkan diameter pori rata-rata berada di rentang mesopori, yaitu masing-masing sebesar $3,65 \text{ nm}$ dan $4,157 \text{ nm}$. Ukuran tersebut berada pada kategori mesopori sempit, yang secara teori memiliki karakteristik ideal untuk adsorpsi gas, karena mampu memberikan jalur difusi yang cukup lebar bagi molekul CO_2 , namun masih cukup kecil untuk memungkinkan interaksi kuat antara gas dan dinding pori. Selain itu, Liu et al (2021) yang melakukan penelitian *biochar* yang diaktifkan NaOH dari pada suhu 700°C , menyatakan bahwa karbon aktif yang dihasilkan memiliki SSA sebesar $147,83 \text{ m}^2/\text{g}$ dan volume pori total sebesar $0,401$, jauh lebih tinggi dibandingkan dengan *biochar* tanpa NaOH ($106,13 \text{ m}^2/\text{g}$ dan volume pori $0,354$). Menurut Liu et al (2021), *biochar* yang dihasilkan dengan metode impregnasi menunjukkan luas permukaan spesifik yang lebih besar dan jumlah pori mikro yang lebih banyak dibandingkan dengan metode pencampuran kering. NaOH bereaksi dengan karbon (C) pada suhu tinggi dan menghasilkan gas. Reaksinya ditunjukkan pada Persamaan berikut :



Pembentukan struktur berpori terjadi karena pelepasan gas seperti CO , CO_2 , dan H_2 yang dihasilkan dari dekomposisi Na_2CO_3 pada suhu tinggi serta reduksi gugus hidroksil. *Biochar* yang diaktivasi dengan metode impregnasi memiliki lebih banyak mikropori dibandingkan, disebabkan oleh kontak yang lebih merata antara larutan NaOH dengan *biochar* dalam bentuk molekul (Liu, et al., 2021). *Biochar* tanpa modifikasi (HXNX) memiliki nilai SSA dan volume pori yang lebih rendah dibandingkan *biochar* hasil modifikasi (HXNO), kemungkinan disebabkan oleh struktur internal *biochar* yang belum terbuka sempurna. Pada *biochar* tanpa perlakuan kimia, sebagian pori masih tertutup oleh senyawa karbon tak terurai yang terbentuk saat pirolisis pada suhu tinggi, seperti tar atau senyawa volatil. Hal ini menyebabkan terbatasnya perkembangan struktur mikropori dan area permukaan aktif, sehingga luas permukaan HNXN hanya mencapai $188,852 \text{ m}^2/\text{g}$ dengan total volume pori $0,172 \text{ cm}^3/\text{g}$. Pada *biochar* yang telah dimodifikasi menggunakan NaOH (HXNO) menunjukkan peningkatan signifikan dalam struktur porinya. Aktivasi kimia dengan NaOH berperan dalam melerutkan senyawa abu, silika serta zat non-karbon lainnya dari permukaan *biochar*, sekaligus membuka akses ke pori-pori tertutup. Peningkatan ini menunjukkan bahwa struktur pori HXNO lebih teratur dan terbuka, yang memberikan keuntungan dalam hal jalur difusi gas dan ketersediaan situs aktif. Karakter ini penting dalam mendukung efisiensi adsorpsi CO_2 , karena *biochar* tidak hanya membutuhkan pori sempit untuk menjebak gas, tetapi juga membutuhkan jalur terbuka agar molekul CO_2 dapat berdifusi masuk ke dalam pori dengan mudah.

Pengaruh modifikasi *biochar* dapat ditunjukkan dengan melihat morfologi permukaan *biochar* (struktur permukaan) dan menganalisis komposisi unsur yang terkandung di dalamnya. *Biochar* diidentifikasi morfologi permukaannya dengan pembesaran sebesar

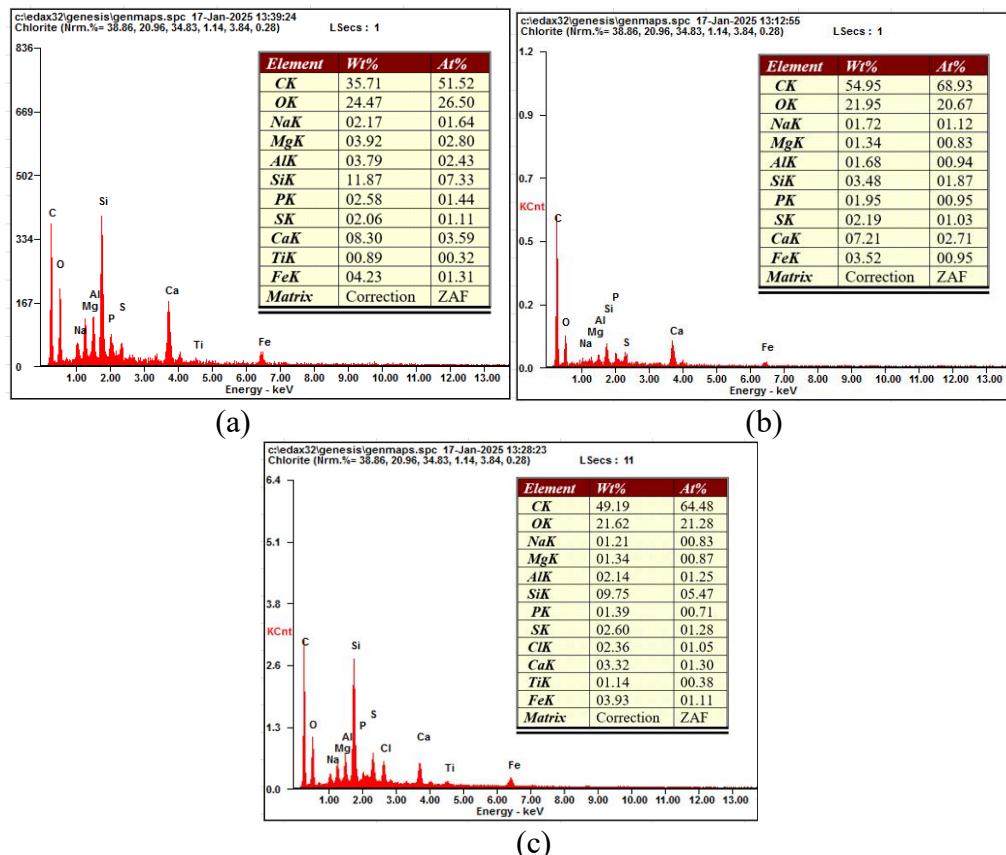
2000x, 5.000x dan 10.000x. Perubahan morfologi permukaan ditunjukkan pada **Gambar 4.7** berikut.



Gambar 4.2 Struktur Morfologi *Biochar* Tanpa Aktivasi (a), *Biochar* Aktivasi NaOH (b), dan *Biochar* Aktivasi NaOH + HCl (c)

Kapasitas penyerapan CO₂ sangat dipengaruhi oleh struktur permukaan *biochar*. **Gambar 4.2** memperlihatkan perbedaan struktur pori *biochar* tanpa impregnasi NaOH dan HCl dengan *biochar* yang diimpregnasi NaOH dan HCl. Pada **Gambar 4.2(a)**, *biochar* menunjukkan struktur agregat yang tidak teratur dengan permukaan kasar dan padat. Tidak terlihat banyak rongga atau bukaan pori yang jelas, menandakan sebagian besar pori masih tertutup atau belum berkembang secara sempurna akibat tidak ada perlakuan kimia tambahan. Hal ini terjadi karena bahan belum mengalami karbonisasi sehingga strukturnya masih didominasi oleh senyawa organik kompleks (Sharma *et al.*, 2024). Permukaan yang relatif tertutup ini menyebabkan interaksi *biochar* dengan molekul CO₂ menjadi terbatas, sehingga kapasitas adsorpsinya menjadi rendah. Hasil ini sesuai dengan data BET yang menunjukkan laju permukaan dan volume pori paling kecil pada sampel tanpa aktivasi. Pada **Gambar 4.2(b)**,

biochar mulai menunjukkan struktur yang lebih teratur dan terbuka dengan permukaan yang lebih halus dibandingkan limbah lumpur yang belum diproses, retakan dan rongga pori yang mulai terbentuk secara merata. Terlihat adanya struktur berongga seperti kanal atau terowongan mikro, yang memberikan ruang bagi difusi dan penjeratan molekul CO₂. Ini terjadi karena pada suhu tersebut mulai terbentuk pori-pori kecil akibat proses devolatilisasi dan aktivasi NaOH berhasil melarutkan senyawa anorganik atau abu dari permukaan *biochar*, membuka pori-pori mikro dan meso yang sebelumnya tertutup (Dissanayake *et al.*, 2020). Morfologi *biochar* ini meningkatkan luas permukaan (BET) dan volume pori, serta berkontribusi pada kapasitas adsorpsi CO₂ yang lebih tinggi. Pada **Gambar 4.2(c)**, struktur *biochar* terlihat lebih berlapis dan menggumpal dengan porositas yang lebih jelas dan rongga yang terlihat. Selain itu terdapat endapan kristal kecil di beberapa bagian, hal ini dapat disebabkan karena adanya kombinasi perlakuan asam dan basa yang menyebabkan *overtreatment*, dimana struktur pori mengalami peluruhan atau kolaps, sehingga mengurangi keteraturan pori. Pada **Gambar 4.2(c)**, *biochar* memiliki kandungan karbon yang tinggi dan luas permukaan yang besar, sehingga sangat potensial untuk aplikasi adsorpsi gas seperti CO₂ (Fang *et al.*, 2023). Pada **Gambar 4.2(c)**, terlihat bahwa aktivasi *biochar* dengan impregnasi NaOH dan pencucian HCl menunjukkan banyak pori yang terbentuk dengan variasi lebar pori yang lebih beragam. Selain itu, volume pori yang lebih dalam juga terbentuk, sehingga meningkatkan kemampuan *biochar* dalam menyerap CO₂ (Chen *et al.*, 2024).



Gambar 4.3 Kandungan Unsur Organik dan Anorganik pada *Biochar* Tanpa Aktivasi (a), *Biochar* Aktivasi NaOH (b), dan *Biochar* Aktivasi NaOH + HCl (c).

Berdasarkan hasil uji EDX pada **Gambar 4.3**, terlihat bahwa aktivasi *biochar* berpengaruh signifikan terhadap kandungan unsur organik dan anorganik yang memengaruhi kemampuan adsorpsi CO₂. *Biochar* tanpa aktivasi **Gambar 4.3(a)**, memiliki kandungan karbon sebesar 35,71% dan oksigen 24,47%, menunjukkan struktur yang belum optimal untuk adsorpsi

CO_2 karena masih banyaknya gugus oksigen aktif dan pori-pori yang kurang berkembang. Setelah diaktivasi dengan NaOH **Gambar 4.3(b)**, kandungan karbon meningkat tajam menjadi 54,95%, sementara oksigen menurun menjadi 21,95%. Peningkatan karbon (C) dan penurunan oksigen (O) terjadi karena proses karbonisasi yang lebih intensif (Li *et al.*, 2021). Aktivasi lebih lanjut dengan NaOH yang diikuti pencucian HCl **Gambar 4.3(c)**, menghasilkan *biochar* dengan kandungan karbon sebesar 49,19% dan oksigen 21,60%. Kehadiran unsur Fe, Al, dan Ni di permukaan *biochar* meningkatkan sifat alkalis dan kapasitas penangkapan CO_2 (Liu *et al.*, 2022). Unsur logam seperti Na, Ca, Mg, Al, Ni, dan Fe meningkatkan sifat basa permukaan *biochar*, sehingga memperbesar kapasitas adsorpsi CO_2 (Dissanayake *et al.*, 2020). Secara keseluruhan, kombinasi impregnasi NaOH dan pencucian HCl berpengaruh efektif dalam meningkatkan struktur pori, kestabilan karbon, dan kandungan mineral aktif, yang berkontribusi besar terhadap peningkatan kapasitas adsorpsi CO_2 .

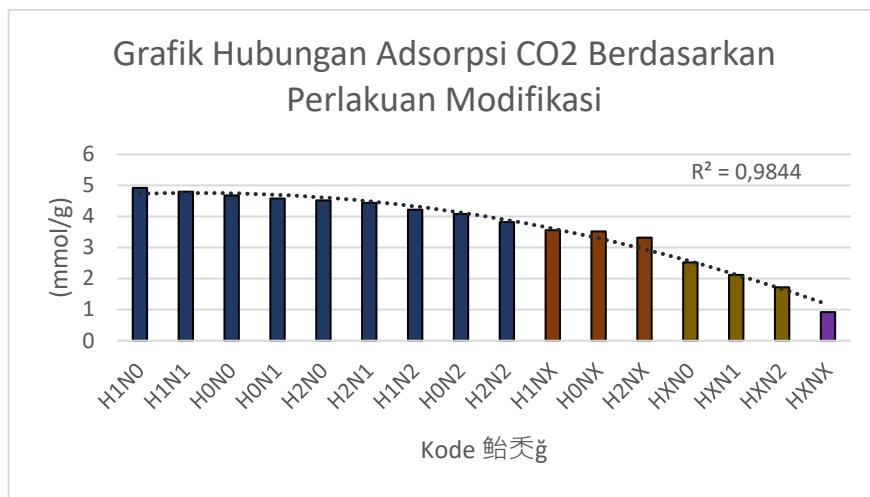
4.3 Analisis Hasil Pengujian Kapasitas Serapan CO_2

Penambahan NaOH dan pencucian HCl sangat mempengaruhi karakteristik *biochar*. *Biochar* yang dimodifikasi menunjukkan struktur yang lebih teratur, banyak rongga yang terlihat, dan volume pori yang lebih dalam juga terbentuk, sehingga meningkatkan kemampuan *biochar* dalam menyerap CO_2 . Seperti ditunjukkan pada **Tabel 4.4**, *biochar* yang dimodifikasi menunjukkan kapasitas adsorpsi tertinggi tercatat sebesar 4,92 mmol/g yaitu pada penambahan NaOH 0,1 M dan pencucian HCl 1 M. Sedangkan kapasitas adsorpsi yang sangat rendah ditunjukkan pada *biochar* tanpa modifikasi yaitu sebesar 0,92 mmol/g.

Tabel 4.4 Tabel Hasil Penyerapan CO_2 dari *Biochar*

<i>Biochar</i>	CO_2 yang terserap (ppm)	Mmol/g	Efisiensi Adsorpsi (%)	Kapasitas Adsorpsi
HIN0	1082,4	4,92	55,16	216,5
HIN1	1056	4,80	53,81	211,2
H0N0	1029,6	4,68	52,47	205,9
H0N1	1007,6	4,58	51,35	201,5
H2N0	994,4	4,52	50,67	198,9
H2N1	976,8	4,44	49,78	195,4
H1N2	928,4	4,22	47,31	185,7
H0N2	897,6	4,08	45,74	179,5
H2N2	840,4	3,82	42,83	168,1
H1NX	783,2	3,56	39,91	156,6
H0NX	774,4	3,52	39,46	154,9
H2NX	730,4	3,32	37,22	146,1
HXN0	554,4	2,52	28,25	110,9
HXN1	466,4	2,12	23,77	93,3
HXN2	378,4	1,72	19,28	75,7
HNX	202,4	0,92	10,31	40,5

Berdasarkan **Tabel 4.3** tersebut dibuat grafik untuk menunjukkan hubungan antara jenis perlakuan modifikasi *biochar* dengan kapasitas adsorpsinya terhadap gas CO_2 yang ditampilkan pada **Gambar 4.4** berikut.



Gambar 4. 4 Grafik Hubungan Adsorpsi Berdasarkan Perlakuan Modifikasi

Gambar menunjukkan hubungan antara jenis perlakuan modifikasi *biochar* dengan kapasitas adsorpsinya terhadap gas CO₂. Batang berwarna biru menunjukkan *biochar* yang dimodifikasi oleh dua perlakuan, yaitu dengan impregnasi NaOH dan pencucian HCl. Batang berwarna coklat menunjukkan *biochar* yang dimodifikasi hanya dengan pencucian HCl. Batang berwarna kuning menunjukkan *biochar* yang dimodifikasi hanya dengan impregnasi NaOH. Batang berwarna ungu menunjukkan *biochar* tanpa modifikasi. Berdasarkan gambar, terdapat tren peningkatan kapasitas adsorpsi seiring dengan penerapan perlakuan kimia, khususnya kombinasi modifikasi menggunakan larutan NaOH dan HCl. *Biochar* H1N0, yang dimodifikasi dengan NaOH 0,1 M dan HCl 1 M, menunjukkan nilai kapasitas adsorpsi tertinggi sebesar 4,92 mmol/g. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan dengan konsentrasi sedang mampu memberikan kondisi optimal dalam membentuk permukaan aktif dan struktur pori *biochar* yang sesuai untuk adsorpsi CO₂. Hasil ini sejalan dengan penelitian serupa yang menyebutkan bahwa aktivasi kimia pada konsentrasi rendah hingga sedang mampu meningkatkan sifat kebasaan, luas permukaan, dan volume pori *biochar* tanpa merusak strukturnya (Dissanayake et al., 2020). Aktivasi dengan NaOH pada konsentrasi optimum memperbanyak gugus basa aktif di permukaan *biochar*, sedangkan pencucian HCl efektif menghilangkan abu dan mineral yang menutupi pori, sehingga lebih banyak situs aktif terbuka untuk interaksi dengan CO₂ (Wang et al., 2022). Pembentukan kadar abu dapat terjadi karena pembentukan senyawa anorganik baru seperti Na₂CO₃ yang tidak terurai dengan sempurna. Selain itu, Na₂CO₃ dapat terdekomposisi lebih lanjut pada suhu tinggi menjadi Na₂O dan CO₂. Na₂O yang dihasilkan akan tetap berada dalam *biochar* dan berkontribusi pada peningkatan abu. Kadar abu yang tinggi dapat mempengaruhi efektivitas penyerapan *biochar*, hal ini dikarenakan pori-pori *biochar* tertutup oleh abu. CO₂ merupakan senyawa yang bersifat asam ketika terlarut dalam air karena akan membentuk asam karbonat (H₂CO₃), tetapi interaksi *biochar* dengan CO₂ lebih bergantung pada struktur pori dan sifat kimia permukaan *biochar* daripada sekadar sifat asam/basa. Setelah pencucian HCl, permukaan *biochar* memang cenderung sedikit lebih asam karena gugus fungsional asam (seperti -COOH dan -OH) lebih terpapar. Namun, hal ini justru mendukung adsorpsi CO₂, karena gugus fungsional asam menciptakan ikatan lemah (interaksi fisik) dengan molekul CO₂, yang ideal untuk aplikasi adsorpsi. CO₂ juga tidak hanya teradsorpsi melalui mekanisme kimia asam-basa, tetapi juga dapat melalui proses fisik interaksi van der Waals di pori-pori mikro (Amarullah & Lestari., 2023).

Kapasitas adsorpsi CO₂ yang diperoleh pada kondisi optimal dalam penelitian ini berada pada kisaran yang konsisten. Dissanayake et al (2020) menyatakan bahwa kapasitas adsorpsi CO₂ *sludge biochar* yang dimodifikasi dapat meningkat dari sekitar 35-43 mg/g pada

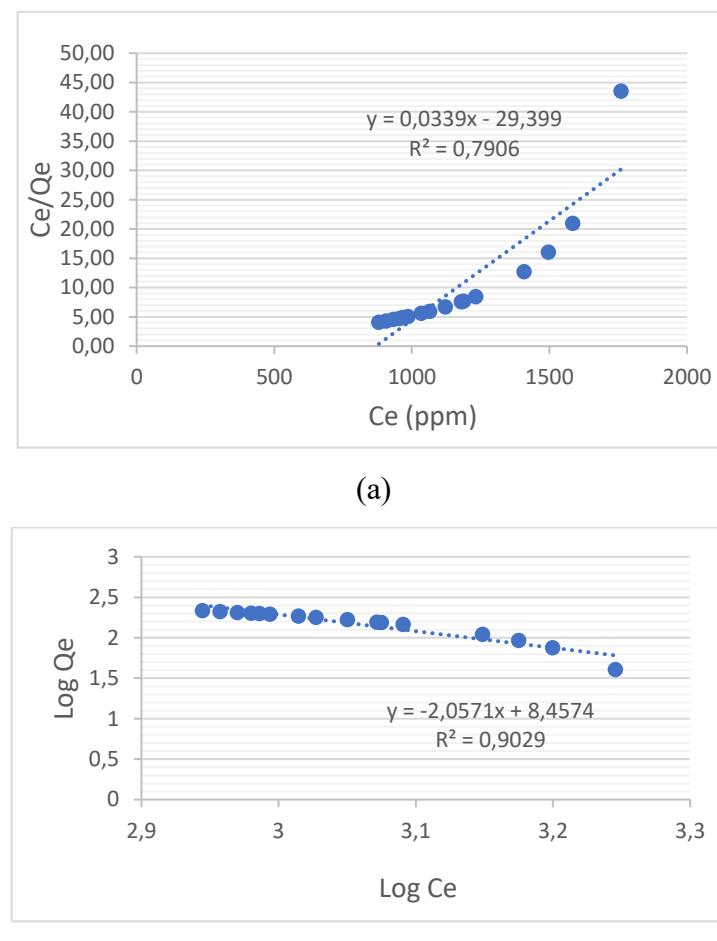
biochar tanpa perlakuan menjadi 137-182 mg/g setelah aktivitas alkali. Sementara itu, Wang et al. (2022) dan Xu et al. (2016) juga menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi CO₂ *sludge biochar* termodifikasi umumnya berada pada rentang 1-5 mmol/g, dengan nilai tertinggi dicapai pada kombinasi konsentrasi aktivator yang tidak berlebihan dan suhu pirolisis yang optimal. Sebaliknya, *biochar* HNX yang tidak dimodifikasi menunjukkan nilai kapasitas adsorpsi paling rendah, yaitu 0,92 mmol/g, menjelaskan bahwa modifikasi kimia berperan penting dalam meningkatkan efektivitas adsorben. *Biochar* dengan perlakuan tunggal, baik hanya dengan impregnasi NaOH maupun pencucian HCl, cenderung menunjukkan nilai kapasitas yang lebih rendah dibandingkan perlakuan kombinasi. Misalnya, HXNO (HCl 0,1 M saja) hanya mencapai 3,52 mmol/g. Hal ini mengindikasikan bahwa perlakuan NaOH memiliki pengaruh yang sedikit lebih besar terhadap peningkatan kapasitas adsorpsi dibandingkan perlakuan HCl ataupun NaOH tunggal. Garis *trendline* yang ditambahkan pada grafik memperkuat pola penurunan kapasitas adsorpsi dari *biochar* dengan perlakuan kombinasi menuju *biochar* tanpa modifikasi, dengan titik optimum yaitu pada impregnasi 0,1 M NaOH dan pencucian 1 M HCl. Pada grafik menunjukkan bahwasannya semakin tinggi konsentrasi NaOH dan HCl yang digunakan untuk perlakukan *biochar*, efisiensi penyerapan dan kapasitas adsorpsinya jadi lebih rendah. Hal ini dapat terjadi disebabkan oleh (*over treatment*), yaitu perlakuan kimia yang berlebihan yang berpotensi merusak struktur permukaan *biochar*. Perlakuan kimia yang berlebihan dapat melarutkan atau menghilangkan pori-pori yang seharusnya berperan penting dalam proses adsorpsi. Akibatnya, luas permukaan spesifik dan volume pori menurun, sehingga kemampuan *biochar* untuk menyerap CO₂ juga berkurang. NaOH diketahui menambahkan gugus fungsional basa seperti -OH dan C-O, sementara HCl dapat menambah sifat asam pada permukaan *biochar*. Namun, jika konsentrasi kedua bahan terlalu tinggi, maka keseimbangan kimia permukaan *biochar* dapat terganggu yang menyebabkan penurunan kompatibilitas terhadap molekul CO₂ yang akan diadsorpsi.

Meskipun aktivasi NaOH pada dasarnya bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan dan volume pori, dalam dosis berlebih justru dapat merusak struktur internal *biochar*. Gugus basa hasil aktivasi serta gugus asam dari pencucian HCl sebenarnya mampu meningkatkan interaksi kimia maupun fisika dengan CO₂, sehingga memperkuat proses adsorpsi. Oleh karena itu, perlakuan kimia harus dilakukan pada konsentrasi optimum dan disesuaikan dengan suhu pirolisis yang ideal. Suhu pirolisis yang terlalu rendah tidak mampu membentuk pori yang memadai, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menghilangkan gugus aktif fungsional yang penting bagi adsorpsi (Xu et al., 2016). Sebuah penelitian *biochar* berbahan dasar lumpur IPLT menyatakan bahwa pirolisis lumpur IPLT pada suhu 600°C menghasilkan *biochar* dengan kapasitas adsorpsi CO₂ tertinggi sebesar 0,98 mmol/g. Dalam penelitian ini, pirolisis dilakukan pada suhu lebih tinggi, yaitu 700°C yang berpotensi menyebabkan sebagian gugus aktif hilang akibat dekomposisi termal, sehingga kapasitas adsorpsi menurun pada beberapa perlakuan. Metode pengujian yang digunakan juga dapat memengaruhi hasil perhitungan kapasitas adsorpsi. Metode titrasi asam-basa seperti yang digunakan dalam penelitian ini cenderung memberikan estimasi yang lebih tinggi karena turut menghitung CO₂ yang larut atau bereaksi dalam larutan NaOH, bukan hanya yang teradsorpsi secara langsung di permukaan *biochar*. Faktor-faktor seperti waktu kontak, laju alir gas CO₂, serta akurasi pengukuran turut memengaruhi ketepatan hasil. Hal ini bisa terjadi dikarenakan adanya CO₂ yang tidak tertangkap sempurna oleh NaOH, CO₂ bereaksi berlebihan atau terlalu lama dengan larutan, dan titrasi dilakukan kurang tepat atau terlalu sensitif.

4.4 Mekanisme Adsorpsi CO₂ oleh *Biochar*

Adsorpsi CO₂ pada *biochar* lumpur tinja yang telah dimodifikasi membutuhkan pemilihan model isoterm yang tepat untuk menggambarkan mekanisme interaksi antara adsorben dan adsorbat. Dua model isoterm yang umum digunakan adalah *Langmuir* dan

Freundlich. Model *Langmuir* mengasumsikan permukaan adsorben homogen dan terjadinya adsorpsi monolayer, sedangkan model *Freundlich* cocok untuk permukaan heterogen dan adsorpsi multilayer. Setelah memperoleh data kapasitas CO₂ adsorpsi pada berbagai variasi modifikasi *biochar*, dilakukan pemodelan isoterm menggunakan pendekatan *Langmuir* dan *Frendlich*. Grafik hasil linearitas kedua model dibuat, dimana sumbu x dan y masing-masing menyesuaikan transformasi sesuai persamaan model. Nilai koefisien determinasi (R^2) dari masing-masing model digunakan untuk menilai kecocokan data adsorpsi terhadap model yang diuji.



Gambar 4. 5 Hasil Grafik Isoterm *Langmuir* Aktivasi (a) dan Hasil Grafik Isoterm *Freundlich* (b).

Berdasarkan grafik diatas, model *Freundlich* menunjukkan nilai R^2 yang lebih tinggi dibandingkan *Langmuir*. Hal ini mengindikasikan bahwa data adsorpsi CO₂ oleh *biochar* lumpur tinja termodifikasi lebih sesuai dengan model *Freundlich*. Model ini merepresentasikan permukaan adsorben yang heterogen dan kemungkinan terjadinya adsorpsi multilayer, sesuai dengan karakteristik *biochar* hasil modifikasi kimia. Model *Langmuir* yang memiliki R^2 lebih rendah menunjukkan bahwa asumsi permukaan homogen dan adsorpsi monolayer kurang mewakili sistem adsorpsi pada *biochar* lumpur tinja. Hasil ini dapat terjadi karena *biochar* hasil pirolisis lumpur tinja umumnya memiliki distribusi ukuran pori dan gugus fungsi permukaan yang sangat beragam, sehingga perilaku adsorpsinya lebih kompleks.

Model isoterm *Freundlich* menggambarkan adsorpsi tidak hanya terjadi pada satu lapisan (monolayer) tetapi bertingkat (multilayer) dengan permukaan adsorben yang tidak seragam (heterogen). Permukaan adsorben heterogen mengindikasikan struktur *biochar* cukup kompleks yang membuat energi adsorpsi berbeda-beda pada tiap situsnya dan molekul CO₂

dapat menempel di mana saja, termasuk di atas molekul yang sudah menempel sebelumnya. Berdasarkan hasil FTIR dan EDX, permukaan *biochar* mengandung berbagai gugus fungsional seperti -OH, -COOH, dan gugus karbonil serta elemen-elemen seperti Na, Fe, dan Si yang menunjukkan bahwa permukaan *biochar* tidak seragam secara kimia maupun mineralogi. Gugus-gugus ini tersebar tidak merata pada permukaan, sehingga variasi gugus fungsi aktif dapat menciptakan situs adsorpsi dengan energi dan afinitas berbeda-beda terhadap CO₂. Keberagaman gugus fungsi ini menyebabkan adsorpsi CO₂ tidak hanya terjadi pada satu jenis situs, melainkan pada banyak situs dengan karakteristik berbeda. Hal ini menunjukkan mekanisme penyerapan C dipengaruhi oleh ikatan hidrogen interaksi elektrostatik yang terjadi ketika permukaan *biochar* memiliki muatan negatif (akibat keberadaan gugus -OH, -COOH, C=O, dan C-O atau hasil aktivasi basa), dan berinteraksi dengan molekul CO₂ yang bersifat polarizable. Berdasarkan hasil analisis BET juga menunjukkan *biochar* yang dimodifikasi memiliki luas permukaan sebesar 252,99 m²/g dan pori berukuran 4,157 nm yang berada dalam kategori mesopori. *Biochar* dengan ukuran pori ini memberikan ruang bagi molekul CO₂ dalam berdifusi dan menempel secara berlapis-lapis di dinding-dinding pori, memungkinkan terbentuknya lapisan adsorpsi yang lebih dari satu atau multilayer. Meskipun tidak menjerat CO₂ secara ketat seperti mikropori, namun dengan volume pori yang besar memungkinkan banyak molekul CO₂ yang bisa masuk dan menyebabkan adsorpsi bisa bertingkat. Proses menempelnya molekul CO₂ dengan permukaan *biochar* berkaitan dengan adanya gaya Van der Waals yang bersifat aromatik dan tidak bermuatan. Gaya ini memungkinkan molekul CO₂ untuk menempel secara sementara (reversibel) di permukaan dan dalam pori-pori *biochar*, sehingga mendukung proses adsorpsi multilayer secara fisik. *Biochar* dengan pori mesopori menyediakan ruang sempit yang dapat memperkuat efek Van der Waals dikarenakan gaya tarik antar dinding pori dan molekul CO₂ menjadi lebih bear ketika jaraknya sangat dekat. Mekanisme adsorpsi CO₂ pada *biochar* secara multilayer juga diperkuat oleh morfologi permukaan *biochar* hasil SEM yang menunjukkan struktur berpori, terbuka, dengan saluran dan rongga berlapis, yang mendukung mekanisme penyerapan C secara fisikokimia di berbagai kedalaman pori. Dengan begitu karakteristik *biochar* yang bersifat heterogen dan memiliki struktur pori yang luas dan terbuka secara lansung mendukung proses adsorpsi multilayer sesuai dengan model isoterm *Freundlich*.

"Halaman Ini sengaja dikosongkan"

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan dan analisis data yang telah disampaikan, maka didapatkan kesimpulan yang menjawab tujuan yaitu modifikasi *biochar* dari lumpur IPLT dengan penambahan NaOH dan pencucian HCl secara signifikan mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi *biochar*. Penambahan dengan NaOH memperbanyak gugus basa aktif di permukaan *biochar* dengan luas permukaan spesifik yang lebih besar dan jumlah pori mikro yang lebih banyak. Pembentukan struktur berpori terjadi karena pelepasan gas seperti CO, CO₂, dan H₂ yang dihasilkan dari dekomposisi Na₂CO₃ pada suhu tinggi serta reduksi gugus hidroksil. Pencucian HCl efektif menghilangkan abu dan mineral yang menutupi pori, sehingga lebih banyak situs aktif terbuka untuk interaksi dengan CO₂. Modifikasi dengan konsentrasi optimal yaitu pada kombinasi impregnasi 0,1 M NaOH dan pencucian HCl 1 M dengan kapasitas adsorpsi sebesar 4,92 mmol/g atau 216,5 mg/g, yang berarti meningkat hingga 5,35 kali lipat dibandingkan *biochar* tanpa modifikasi. Hal ini didukung oleh hasil analisis karakteristik *biochar* yang menunjukkan adanya kenaikan luas permukaan spesifik dari 188,85 m²/g menjadi 252,99 m²/g, serta pembentukan pori-pori aktif berukuran rata-rata 4,157 nm yang terolong mesopori. Modifikasi *biochar* juga memperkaya jumlah dan tipe gugus fungsional seperti -OH dan C=O, sebagaimana dibuktikan dari hasil FTIR dan EDX, serta membentuk struktur morfologi permukaan yang lebih terbuka dan berpori berdasarkan analisis SEM. Hasil ini sejalan dengan pola kurva adsorpsi terhadap model isoterm *Freundlich*, yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara multilayer pada permukaan heterogen, dipengaruhi oleh interaksi fisikokimia antara permukaan *biochar* dan molekul CO₂.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan dan kesimpulan yang didapatkan, adapun evaluasi dan saran yang dapat diberikan untuk penelitian kedepannya yaitu:

1. Perlu dilakukan pengujian lanjutan menggunakan metode instrumen seperti *Gas Chromatography* (GC) untuk validasi hasil perhitungan adsorpsi CO₂ dari metode titrasi asam-basa untuk menghindari estimasi berlebih akibat CO₂ yang larut di larutan dan bukan benar-benar teradsorpsi di *biochar*.
2. Pada proses pirolisis *biochar* sebaiknya menggunakan alat pirolisis khusus atau *furnace* yang dialiri gas N₂ untuk meminimalisir terbentuknya abu pada *biochar* yang dapat menyumbat pori-pori *biochar* sehingga mengurangi kapasitas adsorpsi *biochar*.
3. Perlu dilakukan kajian terkait variasi suhu pirolisis untuk menentukan suhu terbaik dalam menghasilkan karakteristik dan kapasitas adsorpsi C yang maksimal pada *biochar* berbahan dasar lumpur IPLT.

"Halaman Ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR PUSTAKA

- 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories — IPCC, n.d. URL <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (accessed 1.19.24).
- A. K. Sharma, P. K. Ghodke, and W. H. Chen, “Progress in green adsorbent technologies from sewage sludge for wastewater remediation and carbon capture: A sustainable approach towards clean environment,” *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 46, p. 100883, 2024, doi: 10.1016/j.cogsc.2024.100883.
- Amarullah, M, & Lestari, I (2023). *Pengaruh Laju Alir Gas Terhadap Capture CO₂ Oleh Biochar Cangkang Kelapa Sawit Termodifikasi Koh Dan Melamin Sianurat Pada*, repository.unja.ac.id, <https://repository.unja.ac.id/57435/>
- Andriessen, N, Ward, BJ, & Strande, L (2019). To char or not to char? Review of technologies to produce solid fuels for resource recovery from faecal sludge. *Journal of Water, Sanitation*, iwaponline.com, <https://iwaponline.com/washdev/article-abstract/9/2/210/66755>
- Ardhiandy, S. (2018). “Proses Absorbsi Gas CO₂ Dalam Biogas Menggunakan Alat Absorber Tipe Packing Dengan Analisa Pengaruh Laju Alir Absorben NaOH” : Jurnal Teknik Patra Akademika. Vol. 9(1):55-65.
- Baidoo, I, Sarpong, DB, & Bolwig, S (2016). *Biochar amended soils and crop productivity: A critical and meta-analysis of literature*. *International Journal of Development*, orbit.dtu.dk, <https://orbit.dtu.dk/en/publications/biochar-amended-soils-and-crop-productivity-a-critical-and-meta-a>
- Botahala, L. 2019. Perbandingan Efektivitas Daya Adsorpsi Sekam Padi Dan Cangkang Kemiri Terhadap Logam besi (Fe) pada Air Sumur Gali. Yogyakarta: DEEPUBLISH.
- Brieflands, (2016). Application of Different Isotherm Models for Humic Acid Adsorption. Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide | NOAA Climate.gov [WWW Document], n.d. URL <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide> (accessed 11.29.23).
- Dissanayake PD, You S, Igalavithana AD, Xia Y, Bhatnagar A, Gupta S, Kua HW, Kim S, Kwon JH, Tsang DCW dan Ok YS (2020) *Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews xxx (xxxx) xxx.
- Efendi, R, & Sungkono, S (2021). Rancang Bangun dan Uji Kinerja Kiln untuk Tempurung Kemiri. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan*, jurnal.utu.ac.id, <http://jurnal.utu.ac.id/jmekanova/article/view/4258>
- Fang et al., “Converting coastal silt into subgrade soil with *biochar* as reinforcing agent, CO₂ adsorbent, and carbon sequestering material,” *J. Environ. Manage.*, vol. 344, p. 118394, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118394>
- Friedlingstein, P, O'Sullivan, M, Jones, MW, Andrew, RM, & ... (2022). *Global Carbon Budget 2022, Earth System Science Data*.
- Gold, M, Ddiba, DIW, Seck, A, Sekigongo, P, & ... (2017). Faecal sludge as a solid industrial fuel: a pilot-scale study. *Journal of Water*, iwaponline.com, <https://iwaponline.com/washdev/article-abstract/7/2/243/30234>
- Hidayat, T., et al. (2022). "Pemanfaatan Karbon Aktif sebagai Adsorben dalam Pengolahan Air." *Jurnal Pengelolaan Lingkungan*, 18(1), 67-75.
- Huang, H, Tang, J, Gao, K, He, R, Zhao, H, & Werner, D (2017). Characterization of KOH modified *biochars* from different pyrolysis temperatures and enhanced adsorption of antibiotics. *RSC advances*, publs.rsc.org, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/ra/c6ra27881g>

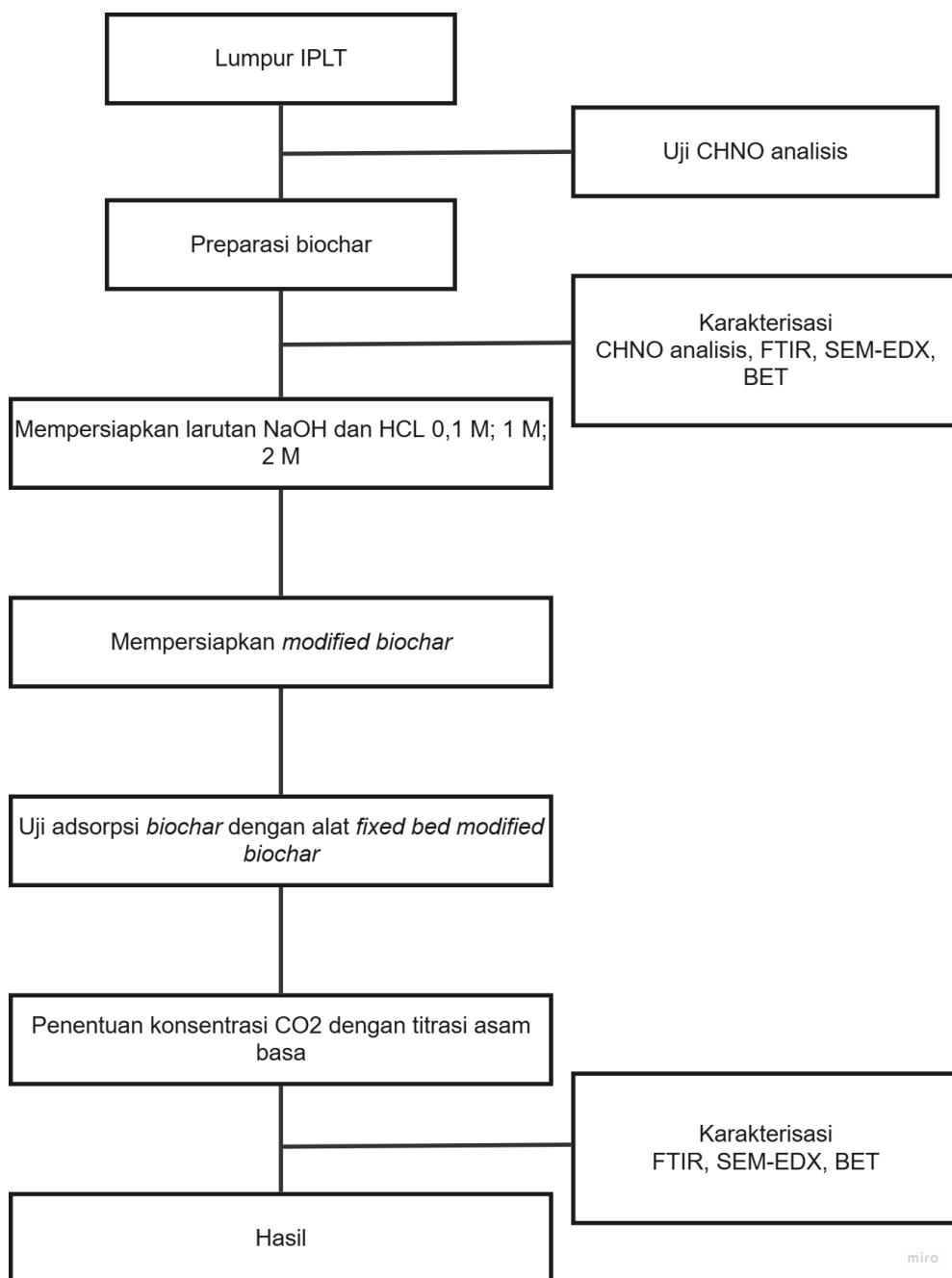
- IEA (2020), World Energy Outlook 2020, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>, Licence: CC BY 4.0
- Ippolito, JA, Laird, DA, & ... (2012). Environmental benefits of *biochar*. *Journal of environmental ...*, Wiley Online Library, <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0151>
- Klasson, KT, Uchimiya, M, & Lima, IM (2014). Uncovering surface area and micropores in almond shell *biochars* by rainwater wash. *Chemosphere*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653514004147>
- Kumarathilaka, P, Mayakaduwa, S, Herath, I, & ... (2016). *Biochar*: state of the art. *Biochar production ...*
- Lehmann, J, Rillig, MC, Thies, J, Masiello, CA, & ... (2011). *Biochar effects on soil biota—a review*. *Soil 359 Biol. Biochem.* 43: 1812–1836.
- Li B, Gong J, Fang W, Zheng Z dan Fun W (2020) Cysteine chemical modification for surface regulation of *biochar* and its application for polymetallic adsorption from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10558-w>.
- Li, K, Niu, X, Zhang, D, Guo, H, Zhu, X, Yin, H, Lin, Z, & ... (2022). Renewable *biochar* derived from mixed sewage sludge and pine sawdust for carbon dioxide capture. *Environmental ...*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749122006133>
- Li, K, Zhang, D, Niu, X, Guo, H, Yu, Y, Tang, Z, Lin, Z, & ... (2022). Insights into CO₂ adsorption on KOH-activated *biochars* derived from the mixed sewage sludge and pine sawdust. *Science of The Total ...*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722012256>
- Liu, H, Xu, G, & Li, G (2021). Preparation of porous *biochar* based on pharmaceutical sludge activated by NaOH and its application in the adsorption of tetracycline. *Journal of Colloid and Interface Science*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979720316684>
- Muspratt, AM, Nakato, T, Niwagaba, C, & ... (2014). Fuel potential of faecal sludge: calorific value results from Uganda, Ghana and Senegal. *Journal of Water ...*, iwaponline.com, <https://iwaponline.com/washdev/article-abstract/4/2/223/30366>
- Mu, Y, & Ma, H (2021). NaOH-modified mesoporous *biochar* derived from tea residue for methylene Blue and Orange II removal. *Chemical Engineering Research and Design*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876221000083>
- Peng, P, Lang, YH, & Wang, XM (2016). Adsorption behavior and mechanism of pentachlorophenol on reed *biochars*: pH effect, pyrolysis temperature, hydrochloric acid treatment and isotherms. *Ecological Engineering*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416300398>
- Prasetyo, Y, Hidayat, B, & Sitorus, B (2020). Karakteristik Kimia *Biochar* dari Beberapa Biomassa dan Metode Pirolisis. *AGRIUM: Jurnal Ilmu Pertanian*, jurnal.umsu.ac.id, <https://jurnal.umsu.ac.id/index.php/agrium/article/view/5653>
- Promraksa, A, & Rakmak, N (2020). *Biochar* production from palm oil mill residues and application of the *biochar* to adsorb carbon dioxide. *Heliyon*, cell.com, [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(20\)30863-X](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(20)30863-X)
- Publications - IPCC-TFI [WWW Document], n.d. URL <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (accessed 1.19.24).
- Puspita, V, Syakur, S, & Darusman, D (2021). Karakteristik *Biochar* Sekam Padi Pada Dua Temperatur Pirolisis. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa ...*, jim.usk.ac.id, <https://jim.usk.ac.id/JFP/article/view/18404>

- Putri, D. A., et al. (2022). Aplikasi Adsorpsi untuk Pengolahan Limbah Cair Industri. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 23(1), 45-52
- Rahmawati, N., & Prasetya, A. (2020). "Mekanisme Adsorpsi dalam Pengolahan Air Limbah." *Jurnal Sains Lingkungan*, 12(3), 210-218.
- Sari, M. P., et al. (2023). Pengaruh Luas Permukaan dan Distribusi Ukuran Pori pada Proses Adsorpsi. *Jurnal Kimia Terapan*, 19(2), 134-142.
- Sarwono, R (2016). *Biochar sebagai penyimpan karbon, perbaikan sifat tanah, dan mencegah pemanasan global: tinjauan*. *Jurnal Kimia Terapan Indonesia*, download.garuda.kemdikbud.go.id, <http://download.garuda.kemdikbud.go.id/article.php?article=738331&val=11645&title=Biochar%20Sebagai%20Penyimpan%20Karbon%20Perbaikan%20Sifat%20Tanah%20dan%20Mencegah%20Pemanasan%20Global%20%20Tinjauan>
- Setyawan, MN, Wardani, S, & ... (2018). Arang kulit kacang tanah teraktivasi H₃PO₄ sebagai adsorben ion logam Cu (II) dan diimobilisasi dalam bata beton. *Indonesian Journal of ...*, journal.unnes.ac.id, <https://journal.unnes.ac.id/sju/ijcs/article/view/25879>
- Shams Kalam et al., (2021). "Surfactant Adsorption Isotherms: A Review", ACS Omega.
- Singh, G, Bahadur, R, Lee, JM, Kim, IY, Ruban, AM, & ... (2021). Nanoporous activated biocarbons with high surface areas from alligator weed and their excellent performance for CO₂ capture at both low and high pressures. *Chemical Engineering ...*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894720329156>
- Stelt, MJC Van der, Gerhauser, H, Kiel, JHA, & ... (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and ...*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411003473>
- Suharyatun, S, Warji, W, & ... (2021). Similirity: Pengaruh Kombinasi Biochar Sekam Padi dan Pupuk Organik Berbasis Mikroba Terhadap Pertumbuhan dan Produksi Sayuran. *Jurnal Industri ...*, repository.lppm.unila.ac.id, <http://repository.lppm.unila.ac.id/49849/1/33690-122965-1-PB.pdf.pdf>
- Sun, K, Kang, M, Zhang, Z, Jin, J, Wang, Z, & ... (2013). Impact of deashing treatment on biochar structural properties and potential sorption mechanisms of phenanthrene. *Environmental ...*, ACS Publications, <https://doi.org/10.1021/es4026744>
- Syahrinudin, S, Wijaya, A, Butarbutar, T, & ... (2018). BIOCHAR YANG DIPRODUKSI DENGAN TUNGKU DRUM TERTUTUP RETORT MEMBERIKAN PERTUMBUHAN TANAMAN YANG LEBIH TINGGI (BIOCHAR ULIN: *Jurnal ...*, garuda.kemdikbud.go.id, <https://garuda.kemdikbud.go.id/documents/detail/1103997>
- Wang & Guo, (2020). "Adsorption isotherm models: Classification, physical meaning, application and solving method", ScienceDirect.
- Wang, Z, Oudenhoven, SRG, Swaaij, WPM Van, & ... (2011). Fractional condensation of biomass pyrolysis vapors. *Energy & ...*, ACS Publications, <https://doi.org/10.1021/ef2000322>
- Wang, X, Yuan, B, Zhou, X, Xia, Q, Li, Y, An, D, & ... (2017). Novel glucose-based adsorbents (Glc-Cs) with high CO₂ capacity and excellent CO₂/CH₄/N₂ adsorption selectivity. *Chemical Engineering ...*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717310252>
- Ward, BJ, Yacob, TW, & Montoya, LD (2014). Evaluation of solid fuel char briquettes from human waste. *Environmental science & ...*, ACS Publications, <https://doi.org/10.1021/es500197h>
- Wibowo, D., et al. (2021). "Karakteristik dan Aplikasi Adsorben Berbasis Karbon Aktif." *Jurnal Rekayasa Kimia*, 15(2), 101-110.

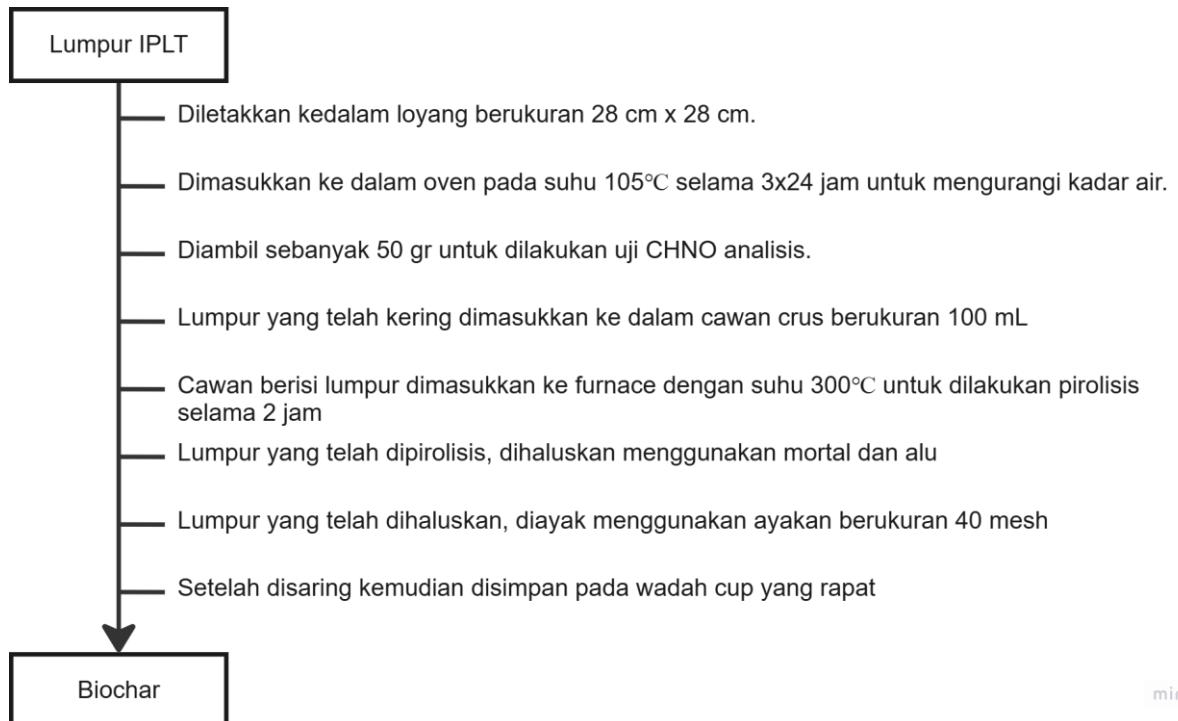
- Widiastuti, MMD, & Lantang, B (2017). Pelatihan pembuatan *biochar* dari limbah sekam padi menggunakan metode retort kiln. *Agrokreatif: Jurnal Ilmiah Pengabdian kepada ...*
- Xu, X, Kan, Y, Zhao, L, & Cao, X (2016). Chemical transformation of CO₂ during its capture by waste biomass derived *biochars*. *Environmental pollution*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749116301944>
- Chen et al., "Accelerated carbonation curing of *biochar*-cement mortar: Effects of *biochar* pyrolysis temperatures on carbon sequestration, mechanical properties and microstructure," Constr. Build. 10.1016/j.conbuildmat.2024.138446.
- Yuan, JH, Xu, RK, & Zhang, H (2011). The forms of alkalis in the *biochar* produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource technology*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410018201>
- Zhang, P, Sun, H, Yu, L, & Sun, T (2013). Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and atrazine on pig manure-derived *biochars*: impact of structural properties of *biochars*. *Journal of hazardous materials*, Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030438941201148X>

LAMPIRAN

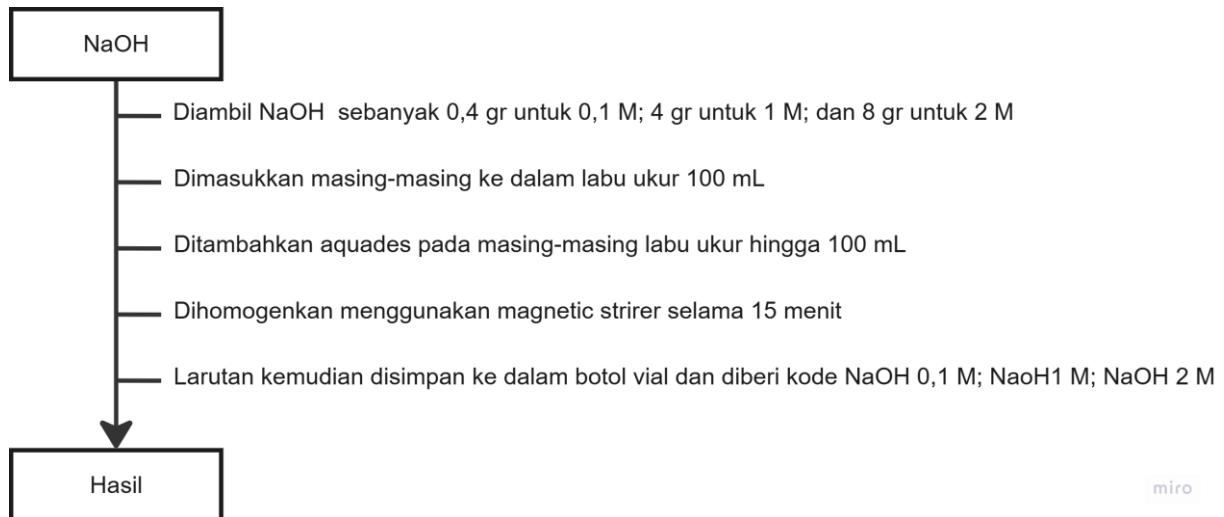
Lampiran 1. Skema Umum Penelitian



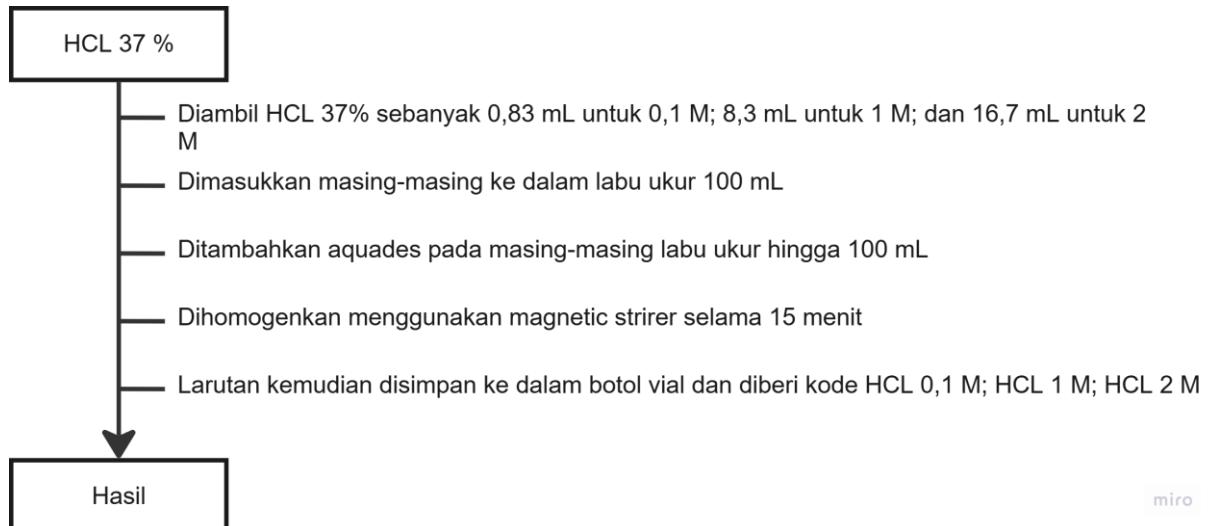
Lampiran 2. Preparasi Lumpur dan Pembuatan *Biochar*



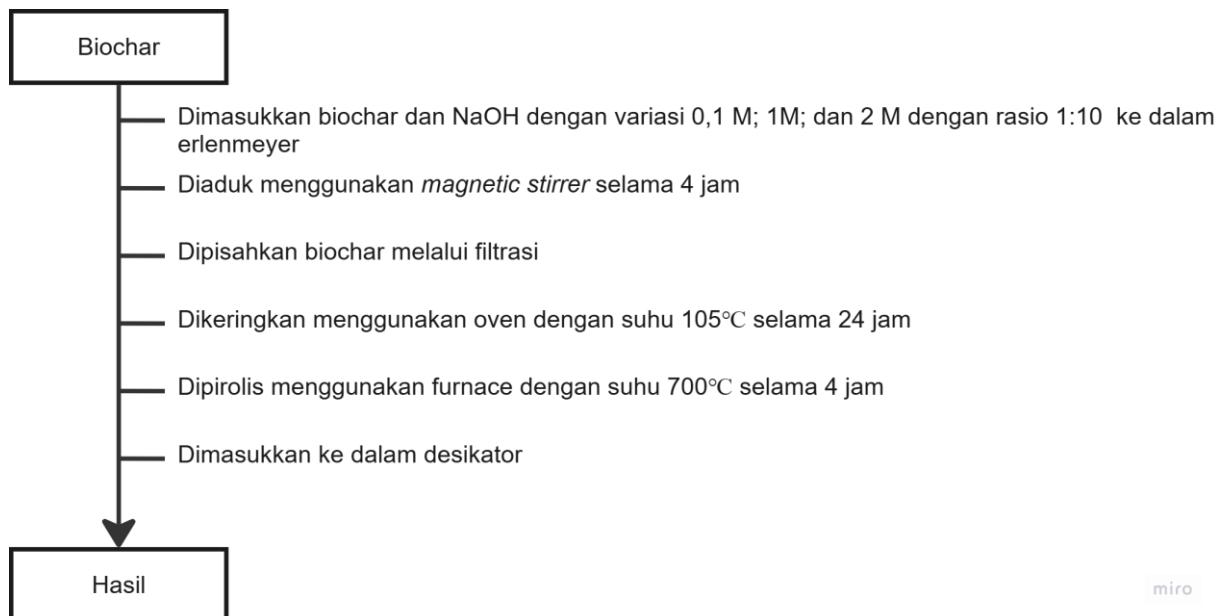
Lampiran 3. Pembuatan Larutan NaOH



Lampiran 4. Pembuatan Larutan HCl

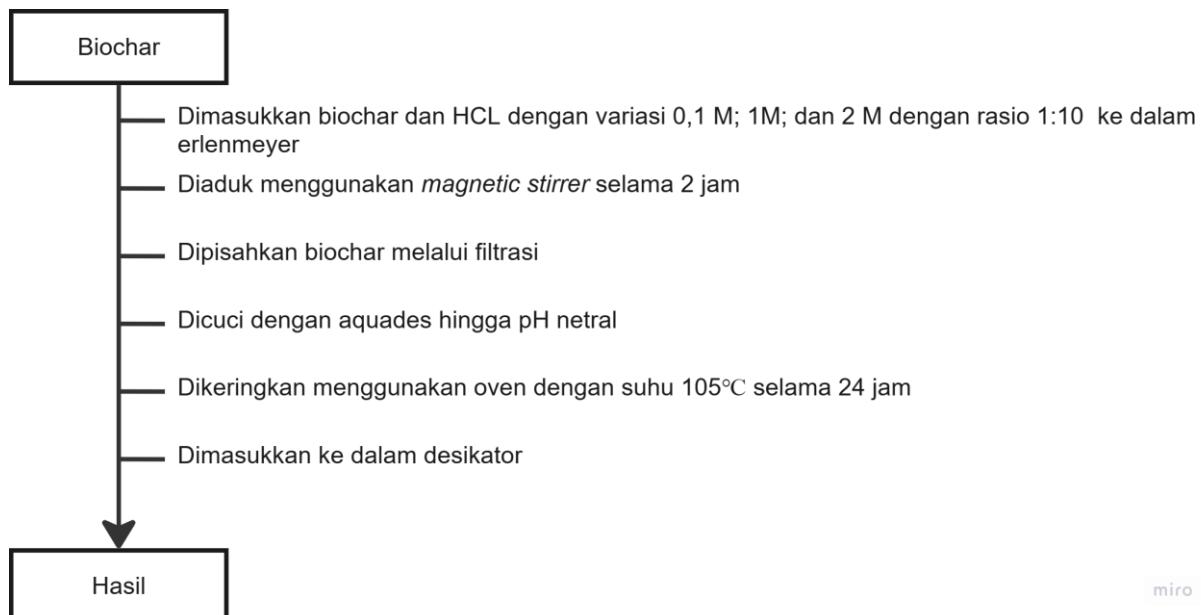


Lampiran 5. Pembuatan NaOH Modified Biochar



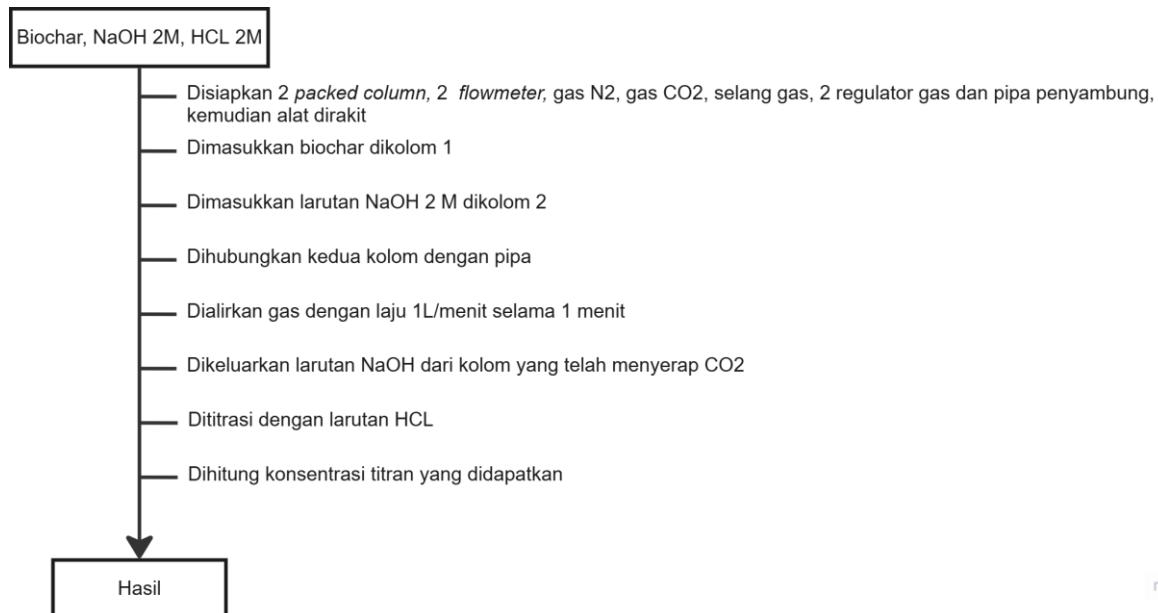
miro

Lampiran 6. Pembuatan HCl Modified Biochar

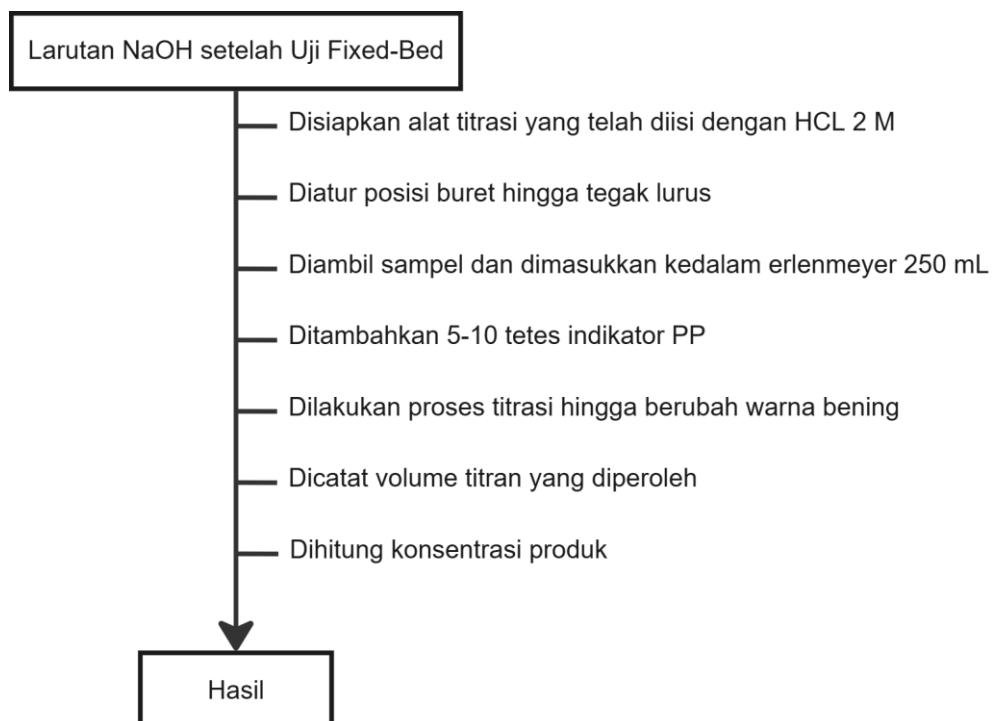


miro

Lampiran 7. Uji Adsorpsi Biochar dengan Alat Fixed-Bed Modified Biochar



Lampiran 8. Titrasi Asam Basa



Lampiran 9. Perhitungan

1. Perhitungan estimasi kebutuhan NaOH untuk menyerap CO₂ yang tidak terserap *biochar*

A. Jumlah CO₂ dalam aliran gas

$$\text{Jumlah CO}_2 \text{ dalam aliran gas} = \text{Mr CO}_2 = 44 \text{ g/mol}$$

B. Jumlah mol gas dalam 1 liter aliran gas

$$P = 50 \text{ lb/in}^2 = 3,4 \text{ atm}$$

$$V = 1 \text{ L/menit}$$

$$R = 0,0825 \text{ L.atm/mol.K}$$

$$T = 25^\circ\text{C} = 273, 15 \text{ K}$$

$$n = \frac{P \times V}{R \times T} = \frac{3,4 \times 1}{0,0825 \times 273,15} = 0,1517 \text{ mol}$$

C. Massa CO₂

$$\begin{aligned} \text{Massa CO}_2 &= n \times \text{Mr CO}_2 \\ &= 0,1517 \text{ mol} \times 44 \text{ g/mol} \\ &= 6,675 \text{ gr} \end{aligned}$$

D. Konsentrasi gas CO₂ 98%

$$\begin{aligned} \text{Massa CO}_2 &= 6,675 \text{ gr} \times 98\% \\ &= 6,54 \text{ gr} = 6540 \text{ mg} \end{aligned}$$

E. Kapasitas serapan CO₂

Kapasitas serapan oleh *biochar* sebesar 99 mg CO₂/ gr , apabila dalam kolom digunakan sebanyak 5 gr *biochar* sehingga kapasitas serapan = 5 gr x 99 mg CO₂/ gr = 495 m

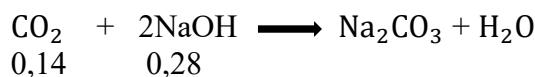
F. CO₂ yang tidak terserap

$$\begin{aligned} &= \text{Total massa CO}_2 - \text{kapasitas serapan} \\ &= 6540 \text{ mg} - 495 \text{ mg} \\ &= 6045 \text{ mg} \end{aligned}$$

G. Mol CO₂ yang tidak terserap

$$n = \frac{\text{CO}_2 \text{ yang tidak terserap (gr)}}{\text{Mr}} = \frac{6,045 \text{ gr}}{44 \text{ gr/mol}} = 0,14 \text{ mol}$$

Kebutuhan larutan NaOH



H. Volume NaOH yang dibutuhkan

$$n \text{ NaOH} = \frac{\text{mol NaOH}}{\text{Konsentrasi NaOH}} = \frac{0,28}{2} = 0,14 \text{ L} = 140 \text{ mL}$$

2. Perhitungan Penyerapan Gas CO₂ Oleh NaOH dan Biochar

Sampel	Volume Titran (mL)	NaOH (mol/L)	CO ₂ (mol/L)	Mol CO ₂	Berat CO ₂ (gr)	Berat CO ₂ (mg/L)	Efisiensi Capture CO ₂ (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Kapasitas Adsorpsi (mmol/g)
H1N0	40	0,286	0,143	0,020	0,880	880	55,16	216,5	4,92
H1N1	18	0,294	0,147	0,021	0,906	906	53,81	211,2	4,8
H0N0	23	0,303	0,151	0,021	0,933	933	52,47	205,9	4,68
H0N1	25	0,310	0,155	0,022	0,955	955	51,35	201,5	4,58
H2N0	16	0,314	0,157	0,022	0,968	968	50,67	198,9	4,52
H2N1	15	0,320	0,160	0,022	0,986	986	49,78	195,4	4,44
H1N2	18,5	0,336	0,168	0,024	1,034	1034	47,31	185,7	4,22
H0N2	21	0,346	0,173	0,024	1,065	1065	45,74	179,5	4,08
H2N2	16,8	0,364	0,182	0,026	1,122	1122	42,83	168,1	3,82
H1NX	19	0,383	0,191	0,027	1,179	1179	39,91	156,6	3,56
H0NX	23	0,386	0,193	0,027	1,188	1188	39,46	154,9	3,52
H2NX	19	0,400	0,200	0,028	1,232	1232	37,22	146,1	3,32
HXN0	20,7	0,457	0,229	0,032	1,408	1408	28,25	110,9	2,52
HXN1	22	0,486	0,243	0,034	1,496	1496	23,77	93,3	2,12
HXN2	25	0,514	0,257	0,036	1,584	1584	19,28	75,7	1,72
HXNX	25	0,571	0,286	0,040	1,760	1760	10,31	40,5	0,92

A. Sampel Biochar Non Aktivasi (HXNX)

Diketahui :

$$R = 0,0821 \text{ L.Atm/mol.K}$$

$$V_{CO_2} = 1 \text{ L}$$

$$\text{Lama penyerapan} = 1 \text{ menit}$$

Penyelesaian :

$$\text{Mol gas N}_2 = \frac{P \times V_{N_2}}{R \times T} = \frac{1 \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 273,15 \text{ K}} = 0,0446 \text{ mol}$$

$$\text{Mol gas CO}_2 = \frac{P \times V_{CO_2}}{R \times T} = \frac{1 \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 273,15 \text{ K}} = 0,0446 \text{ mol}$$

Fraksi mol gas N₂ dan CO₂ :

$$X_{N_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,0446}{0,0446 + 0,0446} = 0,50 \text{ mol}$$

$$X_{CO_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,0446}{0,0446 + 0,0446} = 0,50 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan :

$$P \times V = n \times R \times T$$

$$n = \frac{P_{CO_2} \times V_{CO_2}}{R \times T}$$

$$n = \frac{1 \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 273,15 \text{ K}} = 0,0446 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan :

$$\text{gr CO}_2 = n \times \text{Mr}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,0446 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 1,96 \text{ gr}$$

$$= 1962,4 \text{ mg}$$

$$\text{Ppm CO}_2 = \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{1962,4}{1} = 1962,4 \text{ mg/L}$$

Hasil titrasi asam-basa :

$$V \text{ HCl} = 40 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = 140 \text{ mL}$$

$$M_a \times V_a \times a = M_b \times V_b \times b$$

$$2 \times 40 \times 1 = M_b \times 140 \times 1$$

$$M_b = \frac{2 \times 40}{140} = 0,571 \text{ M}$$



$$0,571 \text{ M} \quad 0,2855 \text{ M}$$

Berdasarkan persamaan tersebut didapatkan molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,746 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,373 M

$$\text{Mol CO}_2 = M \times V$$

$$\text{Mol CO}_2 = 0,2855 \text{ M} \times 0,14 \text{ L}$$

$$= 0,040 \text{ mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = n \times \text{Mr}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,040 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 1,76 \text{ gr} = 1760 \text{ mg}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{1760}{1} = 1760 \text{ mg/L}$$

3. % Efisiensi Capture CO₂ dan Kapasitas Adsorpsi (mg/g)

A. Sampel Biochar Non Aktivasi (HXNX)

Diketahui :

$$C_0 = 1962,4 \text{ mg/L}$$

$$C_e = 1760 \text{ mg/L}$$

Jawab :

$$\% E = \frac{Co-Ce}{Co} \times 100 \%$$

$$\% E = \frac{1962,4 - 1760}{1760} \times 100 \%$$

$$\% E = 10,31\%$$

$$Qe = \frac{Co-Ce}{m} \times V$$

$$Qe = \frac{1962,4 - 1760}{5} \times 1 L$$

$$Qe = 40,5 \text{ mg/g}$$

$$= \frac{40,5}{44} = 0,92 \text{ mmol/g}$$

4. Penentuan Model Grafik Isoterm Adsorpsi

Sampel	Ce (mg/L)	Qe (mg/g)	CE/QE	LOG CE	LOG QE
H1N0	880	216,5	4,07	2,94	2,34
H1N1	906,4	211,2	4,29	2,96	2,32
H0N0	932,8	205,9	4,53	2,97	2,31
H0N1	954,8	201,5	4,74	2,98	2,30
H2N0	968	198,9	4,87	2,99	2,30
H2N1	985,6	195,4	5,05	2,99	2,29
H1N2	1034	185,7	5,57	3,01	2,27
H0N2	1064,8	179,5	5,93	3,03	2,25
H2N2	1122	168,1	6,68	3,05	2,23
H1NX	1179,2	156,6	7,53	3,07	2,19
H0NX	1188	154,9	7,67	3,07	2,19
H2NX	1232	146,1	8,43	3,09	2,16
HXN0	1408	110,9	12,70	3,15	2,04
HXN1	1496	93,3	16,04	3,17	1,97
HXN2	1584	75,7	20,93	3,20	1,88
HXNX	1760	40,5	43,48	3,25	1,61

Lampiran 10. Form FTA-03 Kegiatan Asistensi Tugas Akhir



DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : Angela Anugrah Parea Sari
NRP : 5014211003
Judul : ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR
IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	8/11/2024	Membahas terkait pemakaian NaOH, pemilihan fosfor-trasi untuk menyelesaikan variabel. Serta penuboran bahan – yaitu CH ₃ COOH menjadi HCl	
2.	15/11/2024	Membahas perbedaan prosedur impregnasi NaOH sebelum dipirolitis kedua.	R.
3.	20/11/2024	alternatif penggunaan furnace	R.
4.	20/11/2024	prosedur pemakaian furnace hasil di workshop.	R.
5.	3/12/2024	referensi karakterisasi lumpur dan hasil uji elementanya	R.
6.	1/12/2024	Titrasi asam basa	R.
7.	7/12/2024	revisi surat sidang seminar progres (formatting dan prosedur titrasi).	R.
8.	30/11/2024	Membahas laporan sidang semprog	R.

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., M.EPM

Surabaya, 27 Desember 2024

Dosen Co-Pembimbing

Arry Febrianto, S.Si., M.T.

Lampiran 11. Form PTA-03 Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Proposal Tugas Akhir



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
 FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
 INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
 Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387
 PTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
 Periode: Gasal 2024/2025 No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR PTA-03

**Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
 Seminar Proposal Tugas Akhir**

Hari, tanggal	: Selasa, 20 Agustus 2024	Nilai TOEFL	507
Pukul	: 08.00-09.00 WIB		
Ruang	: TL-101		
Judul	: Analisis Serapan CO ₂ oleh Biochar dari Lumpur IPLT yang Dimodifikasi NaOH		
Nama	: Angela Anugrah Parea Sari		
NRP.	: 5014211003		
Topik	: Penelitian Laboratorium atau Penelitian Lapangan		

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Proposal Tugas Akhir
1.	<u>Tujuan dipertahui utk menulis bentuk</u>
2.	Pyrolysis dibutuhkan dibuat dengan detail Kelentahan? berapa lama alat u/ menyalakan? Sudah? teknis?
3.	Metode Manuel → dihapus saja
4.	G Alkitirasi → HCl vs CH ₃ CO ₂ H <u>G Untukmu</u>

Dosen Pembimbing menyerahkan formulir PTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
 Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
 Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing, dinyatakan :

1. Proposal Tugas Akhir diterima
2. Seminar Tugas Akhir harus diulang
3. Proposal Tugas Akhir ditolak/ganti judul

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., M.PM

Lampiran 12. Form PTA-03 Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Proposal Tugas Akhir



PTA-S1-TL-03

Periode: Gasal 2024/2025

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387
TUGAS AKHIR
Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR PTA-03

**Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Seminar Proposal Tugas Akhir**

Hari, tanggal : Selasa, 20 Agustus 2024 Nilai TOEFL 507
Pukul : 08.00-09.00 WIB
Ruang : TL-101
Judul : Analisis Serapan CO₂ oleh Biochar dari Lumpur IPLT yang Dimodifikasi NaOH
Nama : Angela Anugrah Parea Sari Tanda Tangan
NRP. : 5014211003
Topik : Penelitian Laboratorium atau Penelitian Lapangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Proposal Tugas Akhir
1.	Ribatli saran Saran dosen pengarah.

Dosen Pembimbing menyerahkan formulir PTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing, dinyatakan :

1. Proposal Tugas Akhir diterima
2. Seminar Tugas Akhir harus diulang
3. Proposal Tugas Akhir ditolak/ganti judul

Dosen Co-Pembimbing

Arry Febrianto, S.Si., M.T

Lampiran 13. Form PTA-03A Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pengarah Seminar Proposal Tugas Akhir



**PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387
PTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
Periode: Gasal 2024/2025 No. Revisi: 01

**FORMULIR TUGAS AKHIR PTA-03A
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pengarah
Seminar Proposal Tugas Akhir**

Hari, tanggal : Selasa, 20 Agustus 2024
 Pukul : 08.00-09.00 WIB
 Ruang : TL-101
 Judul : Analisis SerapanCO₂ oleh Biochar dari Lumpur IPLT yang Dimodifikasi NaOH
 Nama : Angela Anugrah Parea Sari
 NRP. : 5014211003
 Topik : Penelitian Laboratorium atau Penelitian Lapangan

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah Seminar Proposal Tugas Akhir
1.	Pengaruh antara tiga unsur 1 & 2 sebagai bahan dari metode proses pelaksanaan penelitian → digunakan / dipilih ?
2.	Pemilihan permasaran pada makroklus diberi nomor

Dosen Pembimbing menyerahkan formulir PTA-03A1 ke Sekretariat Program Sarjana
 Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing
 Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengarah

Dosen Pengarah

Prof. Ir. Joni Hermana, MScES, PhD

(JH)

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

(AS)

Dosen Co-Pembimbing

Arry Febrianto, S.Si., M.T

(AF)

Lampiran 14. Form PTA-03B Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pengarah Seminar Proposal Tugas Akhir



PTA-S1-TL-03
TUGAS AKHIR
Periode: Gasal 2024/2025

PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-6948886, Fax: 031-5928387
TUGAS AKHIR
Kode/SKS : CL234801 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR PTA-03B
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pengarah
Seminar Proposal Tugas Akhir

Hari, tanggal : Selasa, 20 Agustus 2024
 Pukul : 08.00-09.00 WIB
 Ruang : TL-101
 Judul : Analisis Serapan CO₂ oleh Biochar dari Lumpur IPLT yang Dimodifikasi NaOH
 Nama : Angela Anugrah Parea Sari
 NRP. : 5014211003
 Topik : Penelitian Laboratorium atau Penelitian Lapangan

Arie Abt
12/9/24

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengarah Seminar Proposal Tugas Akhir
①	Penjelasan biochar dijelaskan dgn rinci → metode, alat dsb
②	Penggunaan H₂O C ₂ H ₅ COOH di tambah ken dosen teorinya dan penggunaan ADONs
③	Uji daya serap O ₂ → FDMB di hitung O ₂ ambu → yg yg diperlukan
④	Bagaimana menyaturn hadar abu di biochar! → teori yg hasil riset

Dosen Pembimbing menyerahkan formulir PTA-03B ke Sekretariat Program Sarjana
 Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing
 Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengarah

Dosen Pengarah
Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT

Abdu Fadli Assomadi

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

()
Arie Dipareza Syafe'i

Dosen Co-Pembimbing
Arry Febrianto, S.Si., M.T

()
Arry Febrianto

Lampiran 15. Form UTA-02 Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2023/2024

Kode/SKS : CL234801(0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 20 Januari 2025
Pukul : 09.15-10.30
Lokasi : Ruang Sidang
Judul : ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR
IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH DAN HCl
Nama : Angela Anugrah Parea Sari
NRP. : 5014211003
Topik : Penelitian

Nilai TOEFL 507

Tanda Tangan

ARIE DIPAREZA S.YAFE'I

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengujian dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. Harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., M.P.M.

Lampiran 16. Form UTA-02 Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2023/2024

Kode/SKS : CL234801(0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02

**Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Co-Pembimbing
Ujian Tugas Akhir**

Hari, tanggal : Senin, 20 Januari 2025

Nilai TOEFL 507

Pukul : 09.15-10.30

Lokasi : Ruang Sidang

Judul : ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR
IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH DAN HCl

Nama : Angela Anugrah Parea Sari

Tanda Tangan

NRP. : 5014211003

Topik : Penelitian

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Co-Pembimbing Ujian Tugas Akhir
1.	Hasil terhadap rambat prefreatment
2.	Hasil rambat terhadap metode aktivasi
3.	Hasil terhadap sora & lempolan

ut-7

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengujian dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Lulus Ujian Tugas Akhir
2. Harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
3. Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Co-Pembimbing

Arry Febrianto, S.Si., MT

()

Lampiran 17. Form UTA-03 Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pengaji Ujian Tugas Akhir



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2023/2024

Kode/SKS : CL234801(0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengaji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 20 Januari 2025
Pukul : 09.15-10.30
Lokasi : Ruang Sidang
Judul : ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR
IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH
Nama : Angela Anugrah Parea Sari
NRP. : 5014211003
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengaji Ujian Tugas Akhir
1.	Perbaiki penulisan <u>HCL</u> pada TA seluruhnya.
2.	Dalam daftar pustaka, contohkan rumus adi soal yg digunakan dalam perhitungan berilah dasar teorinya.

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Ujian Tugas Akhir selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pengaji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengaji dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengaji Prof. Ir. Joni Hermana, MScES, PhD

Dosen Pembimbing Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

Dosen Co-Pembimbing Arry Febrianto, S.Si., MT

Lampiran 18. Form UTA-03 Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pengaji Ujian Tugas Akhir



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2023/2024

Kode/SKS : CL234801(0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengaji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 20 Januari 2025
Pukul : 09.15-10.30
Lokasi : Ruang Sidang
Judul : ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR
IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH
Nama : Angela Anugrah Parea Sari
NRP. : 5014211003
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengaji Ujian Tugas Akhir
①	Berapa kapasitas serapan CO ₂ biochar yg diperlukan dan penelitian ini. (gr CO ₂ /gr biochar)
②	Perkiraan Serapan & Kapasitas serapan di atas kembal.
③	Jawab di dasarkan pada analisis & penelitian. <i>Ace 24/01/2025</i>

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Ujian Tugas Akhir selesai.
Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pengaji
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengaji dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengaji

Dr. Abdu Fadli Assomadi, S.Si, MT

Dosen Pembimbing

Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

Dosen Co-Pembimbing

Arry Febrianto, S.Si, MT

Lampiran 19. Form UTA-03 Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pengaji Ujian Tugas Akhir



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL, PERENCANAAN DAN KEBUMIAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2023/2024

Kode/SKS : CL234801(0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-03
Formulir Pertanyaan dan Saran Dosen Pengaji
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 20 Januari 2025
Pukul : 09.15-10.30
Lokasi : Ruang Sidang
Judul : ANALISIS SERAPAN CO₂ OLEH BIOCHAR DARI LUMPUR
IPLT YANG DIMODIFIKASI NaOH
Nama : Angela Anugrah Parea Sari
NRP. : 5014211003
Topik : Penelitian

No./Hal.	Pertanyaan dan Saran Dosen Pengaji Ujian Tugas Akhir
-	<p>Revisi penulisan!</p> <p>Adsorption Isotherm</p> <p>Hubungan antara topia. Serapan dengan karakteristik biochar.</p> <p>Revisi pembahasan tentang Surface analisis</p> <p style="text-align: right;">(4/07) F.</p>

Formulir UTA-03 diserahkan kepada Dosen Pembimbing setelah sesi Ujian Tugas Akhir selesai.

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-03 ke Sekretariat Program Sarjana

Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistensi kepada Dosen Pengaji

Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pengaji dan Dosen Pembimbing

Dosen Pengaji Ervin Nurhayati, S.T., M.T., Ph.D.

()

Dosen Pembimbing Dr. Eng. Arie Dipareza Syafe'i, S.T., MEPM

()

Dosen Co-Pembimbing Arry Febrianto, S.Si., MT

()

"Halaman Ini sengaja dikosongkan"

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Angela Anugrah Parea Sari. Penulis dilahirkan di Kediri pada tanggal 5 Maret 2004, merupakan anak pertama dari 2 (dua) bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di Paud TK Mutiara Surabaya, SDN Jimbaran Wetan (2010-2016), SMP Negeri 1 Wonoayu (2016-2019), SMA Negeri 3 Sidoarjo (2019-2021). Setelah lulus dari jenjang pendidikan SMA Negeri pada tahun 2021, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan, dan Kebumian (FT-SPK) ITS pada tahun 2021 dan terdaftar dengan NRP 5014211003.

Selama menempuh pendidikan perkuliahan di ITS Surabaya, penulis aktif mengikuti berbagai organisasi, kepanitiaan, dan kegiatan lainnya. Penulis pernah menjabat sebagai Menteri dan Wakil Menteri di Kementerian Lingkungan dan Kebencanaan BEM ITS pada periode 2023-2025. Selain itu, penulis juga menjabat sebagai Kepala Divisi serta Staf di Divisi Bakti Alam dan Bakti Masyarakat UKM PLH SIKLUS ITS. Di tingkat fakultas, penulis aktif sebagai Pemandu dalam Bakor Kepemanduan BEM FT-SPK ITS periode 2022-2024 serta berpartisipasi dalam pelatihan seperti LKMM dan Pelatihan K3 Teknik Lingkungan ITS.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktik di tiga perusahaan. Pertama, sebagai Environment Intern di PT Pertamina Hulu Energi WMO pada tahun 2024, dengan fokus pada analisis pengelolaan air limbah di fasilitas eksplorasi dan produksi migas. Kedua, sebagai HSSE Intern di PT PLN UIP JBTB pada tahun 2025 dengan tugas terkait pemantauan lingkungan, pengelolaan limbah B3, dan keterlibatan dalam audit internal ISO 14001. Ketiga, sebagai *Sustainability Analyst* di perusahaan konsultan lingkungan PT. Properindo Envirotech (PET) yang berfokus pada analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) perusahaan. Selain itu, penulis juga pernah menjadi surveyor limbah elektronik di Kecamatan Genteng dan menjadi surveyor pendataan persil bersama PDAM Surya Sembada Surabaya.

Penulis memiliki ketertarikan dalam bidang pengelolaan kualitas lingkungan, konservasi, serta edukasi lingkungan masyarakat. Tugas akhir yang sedang dikerjakan oleh penulis berfokus pada pengembangan material *biochar* dari lumpur domestik sebagai adsorben karbon dioksida (CO_2) yang ramah lingkungan. Apabila terdapat pertanyaan lebih lanjut mengenai penelitian ini, dapat menghubungi penulis melalui alamat surel angelaps5304@gmail.com atau melalui media sosial instagram @angreyn dan LinkedIn <https://www.linkedin.com/in/angela-anugrah/>.