

**PENGARUH LAJU ALIR GAS TERHADAP *CAPTURE CO₂*
OLEH *BIOCHAR* CANGKANG KELAPA SAWIT
TERMODIFIKASI KOH DAN MELAMIN
SIANURAT PADA *PACKED COLUMN***

SKRIPSI



**M. AMARULLAH
F1C119016**

**PROGRAM STUDI KIMIA
JURUSAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JAMBI**

2023

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan atau kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim.

Tanda tangan yang tertera dalam halaman pengesahan adalah asli. Jika tidak asli saya siap menerima sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Jambi,
Yang Menyatakan

M. Amarullah
F1C119016

RINGKASAN

Pengaruh laju alir gas terhadap *capture* CO₂ oleh biochar dari cangkang kelapa sawit yang dimodifikasi KOH dan Melamin Sianurat pada *packed column* telah berhasil dilakukan dengan menggunakan rangkaian alat *capture* CO₂ pada *fixed-bed N-Doped Modified Biochar* dan NaOH *absorber purging bubble column*. Adapun tujuan dilakukan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh laju alir gas N₂ terhadap *capture* CO₂ dengan campuran *biochar* yang diaktivasi dan di-*doping* nitrogen pada *packed column* dalam larutan NaOH, menentukan kapasitas adsorpsi *biochar* dari cangkang kelapa sawit dan menentukan karakteristik *modified biochar* menggunakan FTIR dan SEM-EDX.

Penyerapan gas CO₂ oleh adsorben *biochar* non aktivasi dan *N-Doped Modified Biochar* sama-sama meningkat seiring bertambahnya laju alir gas CO₂. Variasi laju alir gas CO₂ yang digunakan pada adsorben *biochar* non aktivasi dan *N-Doped Modified Biochar* adalah 1;3;5;7 dan 10 L/Menit dan pada penggunaan adsorben *biochar* non aktivasi didapatkan bobot penyerapan gas CO₂ berturut-turut sebesar 2.733 mg/L; 3.117,418 mg/L; 3.818,991 mg/L; 4.864,518 mg/L dan 5.910,635 mg/L, sedangkan penyerapan gas CO₂ oleh adsorben *n-doped modified biochar* berturut-turut yaitu sebesar 2.740,155 mg/L; 3.119,233 mg/L; 3.819,86 mg/L; 4.865,017 mg/L dan 5.910,85 mg/L. Kapasitas adsorpsi *biochar* non aktivasi terendah didapatkan sebesar 911,166 mg/g pada laju alir gas 1 L/menit dan kapasitas adsorpsi tertinggi yaitu 19.702,12 mg/g pada laju alir gas CO₂ 10 L/Menit. Sedangkan kapasitas adsorpsi *N-Doped Modified Biochar* terendah yaitu 913,385 mg/g pada laju alir gas CO₂ 1 L/Menit dan kapasitas adsorpsi tertinggi yaitu 19.702,833 mg/g.

Hasil analisis FTIR pada sampel *N-Doped Modified Biochar* didapatkan gugus OH, serapan vibrasi C=O (gugus karbonil), serapan vibrasi C=N, serapan vibrasi C=C yang menandakan adanya gugus aromatic, serapan vibrasi C-H yang menandakan adanya gugus alkana, serapan vibrasi C-H yang menandakan adanya gugus alken, serapan vibrasi C-N (terdeteksi gugus amina), serapan vibrasi C-O (terdeteksi gugus karbonil), serapan vibrasi N-H yang menandakan adanya gugus amina. Hasil SEM *N-Doped Modified Biochar* pada perbesaran 5000 dan 10.000 kali terlihat pori yang lebih besar dikarenakan telah melalui proses aktivasi. Tetapi pada pori *biochar* mengalami penyumbatan pori-pori karena proses pendopingan. Penyumbatan pori tersebut karena interaksi molekul atau atom yang masuk ke dalam struktur *biochar* saat di-*doping* dapat mengubah ikatan atau berinteraksi dengan komponen *biochar*, sehingga mempengaruhi permukaan dan struktur material.

Kata Kunci : *Capture* CO₂, *Biochar* Non Aktivasi, *N-Doped Modified Biochar* dan Laju Alir Gas

SUMMARY

The effect of gas flow rate on CO₂ capture by biochar from palm kernel shells modified with KOH and Melamine Cyanurate on a packed column has been successfully carried out using a series of CO₂ capture devices on a fixed-bed N-Doped Modified Biochar and NaOH absorber purging bubble column. The aim of this research is to analyze the effect of N₂ gas flow rate on CO₂ capture with a mixture of activated and nitrogen-doped biochar in a packed column in NaOH solution, determine the adsorption capacity of biochar from palm oil shells and determine the characteristics of modified biochar using FTIR and SEM- EDX.

The absorption of CO₂ gas by non-activated biochar adsorbent and N-Doped Modified Biochar both increased as the CO₂ gas flow rate increased. Variations in the flow rate of CO₂ gas used in non-activated biochar adsorbents and N-Doped Modified Biochar were 1;3;5;7 and 10 L/Minute and when using non-activated biochar adsorbents the weight of CO₂ gas absorption was 2,733 mg/minute respectively. L; 3,117.418 mg/L; 3,818.991 mg/L; 4,864.518 mg/L and 5,910.635 mg/L, while the absorption of CO₂ gas by the n-doped modified biochar adsorbent respectively was 2,740.155 mg/L; 3,119.233 mg/L; 3,819.86 mg/L; 4,865.017 mg/L and 5,910.85 mg/L. The lowest adsorption capacity of non-activated biochar was found to be 911.166 mg/g at a gas flow rate of 1 L/minute and the highest adsorption capacity was 19,702.12 mg/g at a CO₂ gas flow rate of 10 L/minute. Meanwhile, the lowest adsorption capacity of N-Doped Modified Biochar was 913.385 mg/g at a CO₂ gas flow rate of 1 L/Minute and the highest adsorption capacity was 19,702.833 mg/g.

The results of FTIR analysis on the N-Doped Modified Biochar sample showed OH groups, C=O vibration absorption (carbonyl group), C=N vibration absorption, C=C vibration absorption which indicates the presence of aromatic groups, C-H vibration absorption which indicates the presence of alkane groups, C-H vibrational absorption which indicates the presence of an alkene group, C-N vibrational absorption (amine group detected), C-O vibrational absorption (carbonyl group detected), N-H vibrational absorption which indicates the presence of an amine group. SEM results of N-Doped Modified Biochar at 5000 and 10,000 times magnification show larger pores because it has gone through an activation process. However, the pores in biochar experience blockage due to the doping process. This pore blockage is due to the interaction of molecules or atoms that enter the biochar structure when it is doped, which can change the bonds or interact with the biochar components, thus affecting the surface and structure of the material.

Keywords: CO₂ Capture, Non-Activated Biochar, N-Doped Modified Biochar and Gas Flow Rate

**PENGARUH LAJU ALIR GAS TERHADAP *CAPTURE CO₂*
OLEH *BIOCHAR* CANGKANG KELAPA SAWIT
TERMODIFIKASI KOH DAN MELAMIN
SIANURAT PADA *PACKED COLUMN***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat dalam melakukan penelitian dalam rangka
penulisan Skripsi pada Program Studi Kimia



**M. AMARULLAH
F1C119016**

**PROGRAM STUDI KIMIA
JURUSAN MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JAMBI**

2023

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul **“PENGARUH LAJU ALIR GAS TERHADAP CAPTURE CO₂ OLEH BIOCHAR CANGKANG KELAPA SAWIT TERMODIFIKASI KOH DAN MELAMIN SIANURAT PADA PACKED COLUMN”** yang disusun oleh M. Amarullah, NIM : F1C119016 telah dipertahankan didepan tim penguji tanggal 3 Oktober 2023 dan dinyatakan lulus

Susunan Tim Penguji :

Ketua	: Prof. Drs. Damris M, M. Sc, Ph. D
Sekretaris	: Dr. Intan Lestari, S.Si., M.Si.
Anggota :	1. Dr. Yusnaidar S.Si., M.Si.
	2. Dr. Lenny Marlinda, S.T., M.T.
	3. Rahmi, S.Pd., M.Si

Disetujui :

Pembimbing 1

Pembimbing II

Prof. Drs. Damris M, M. Sc, Ph. D
NIP. 196605191991121001

Dr. Intan Lestari. S.Si.,M.Si.
NIP. 197409221999032002

Diketahui :

Dekan
Fakultas Sains dan Teknologi

Ketua Jurusan
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Drs. Jefri Marzal, M.Sc., D,I,T
NIP. 196806021993031004

Dr. Yusnaidar S.Si., M.Si.
NIP. 196809241999032001

RIWAYAT HIDUP



M. Amarullah, lahir pada tanggal 11 Mei 2001. Di Kampung Laut, Jambi. Kabupaten Tanjung Jabung Timur, Kecamatan Kuala Jambi. Penulis merupakan anak ke 3 dari 6 bersaudara dari pasangan Abdullah dan Suryati. Penulis pertama kali masuk pendidikan formal di SDN 89/VI Sungai Manau pada tahun 2007 dan lulus pada tahun 2013. Pada tahun 2013 penulis melanjutkan pendidikan ke SMPN 5 Merangin dan tamat pada tahun 2016. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan sekolah ke SMAN 4 Merangin dan tamat pada tahun 2019. Pada tahun yang sama, penulis menempuh pendidikan tinggi di Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi melalui jalur SNMPTN. Penulis juga pernah menjadi asisten laboratorium program studi Teknik Pertambangan pada praktikum Kimia Dasar I pada tahun 2022. Selain itu, penulis juga aktif di Organisasi kemahasiswaan yaitu Himpunan Mahasiswa Kimia (HIMKI) dalam divisi Kewirausahaan dan mengikuti kepanitiaan sebagai anggota Divisi Transportasi dan Logistik dalam kegiatan CARBON 4.0. Penulis melaksanakan kegiatan praktik magang selama 2 bulan di Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Kota Jambi pada tahun 2022. Pada masa akhir pendidikan di Universitas Jambi, penulis menyelesaikan penelitian Tugas Akhir yang berjudul **“Pengaruh Laju Alir Gas Terhadap Capture CO₂ Oleh Biochar Cangkang Kelapa Sawit Termodifikasi KOH dan Melamin Sianurat Pada Packed Column”** dibawah bimbingan serta arahan Bapak Prof. Drs. Damris M, M.Sc, Ph. D selaku pembimbing I, Ibu Dr. Intan Lestari, S.Si., selaku pembimbing II.

PRAKATA

Puji dan syukur Kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi dengan judul **“PENGARUH LAJU ALIR GAS TERHADAP CAPTURE CO₂ OLEH BIOCHAR CANGKANG KELAPA SAWIT TERMODIFIKASI KOH DAN MELAMIN SIANURAT PADA PACKED COLUMN”**. Skripsi ini penulis buat sebagai syarat untuk memperoleh Gelar Sarjana pada Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis banyak dibantu dan didukung oleh berbagai pihak sehingga penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Drs. Jefri Marzal, M.Sc., D.I.T. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi yang telah mengizinkan saya untuk menyelesaikan tugas akhir.
2. Ir. Bambang Hariyadi, M.Si., Ph. D. selaku Wakil Dekan Bidang Akademik, Kerjasama dan Sistem Informasi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi yang telah memberikan izin dalam melakukan penelitian tugas akhir.
3. Indra Lasmana Tarigan, S.Pd., M.Sc. selaku Koordinator Program Studi Kimia Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi
4. Drs. Nelson, M.Si selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing penulis selama perkuliahan serta memberikan saran kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir.
5. Prof. Drs. Damris M, M. Sc, Ph. D. selaku pembimbing I yang telah memberikan bantuan material, saran, arahan serta semangat selama penulis menyelesaikan tugas akhir.
6. Dr. Intan Lestari. S.Si.,M.Si. selaku pembimbing II yang telah banyak meluangkan waktunya dan dengan sabar dalam membimbing serta mengarahkan penulis selama menyelesaikan tugas akhir.
7. Dr. Yusnaidar, S.Si., M.Si., Dr. Lenny Marlinda, S.T., M.T. dan Rahmi S.Pd., M.Si. selaku tim penguji yang telah meluangkan banyak waktunya dalam penyusunan tugas akhir ini agar menjadi skripsi yang baik.
8. Seluruh dosen Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi yang telah memberikan banyak ilmu kepada penulis selama masa perkuliahan.
9. Segenap Staf Laboratorium Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Jambi yang telah membantu penulis selama perkuliahan dan penelitian.
10. Teristimewa kepada orang tua Abdullah dan Suryati yang selalu mendukung penulisan dan memberikan kasih sayang serta do'a yang membuat penulis bersemangat untuk menyelesaikan pendidikan hingga terselesainya penulisan skripsi ini.

11. Nur Azimah, Abinas Al Farabi selaku kakak dan abang yang menyemangati dan memberikan motivasi kepada penulis.
12. Syarif Hidayatul Umam selaku sahabat terbaik yang memberikan saran dan *support* kepada penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
13. Manda ,Ai dan Tia selaku teman satu loker dalam penelitian sekaligus teman diskusi dalam mengerjakan skripsi hingga terselesaikannya skripsi ini
14. Segenap Keluarga Chemist Duar (kimia 19) yang menemani dari awal masuk kuliah hingga sekarang. Terimakasih atas pertemanan dan kebersamaan yang akan selalu dikenang dan semoga silaturahmi kita tetap terjaga.
15. Semua pihak yang turut membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini, semoga kebaikan kalian dibalas oleh Allah SWT. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, maka dari itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan khususnya di bidang kimia.

Jambi, November 2023

DAFTAR ISI

	Halaman
SURAT PERNYATAAN	ii
RINGKASAN.....	iii
SUMMARY	iv
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RIWAYAT HIDUP.....	vii
PRAKATA	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi dan Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 <i>Biochar</i>	6
2.2 Cangkang Kelapa Sawit	8
2.3 Karbon Dioksida (CO ₂).....	9
2.4 Adsorpsi	10
2.5 Isoterm Adsorpsi	12
2.6 <i>Modified biochar</i> as strategi <i>capture</i> CO ₂ di udara	16
2.7 Pengaruh <i>N-doping</i> untuk <i>capture</i> CO ₂	17
2.8 <i>Metylene Blue (MB)</i>	18
2.9 <i>Packed Column</i> sebagai Media Adsorpsi CO ₂	19
2.10 Karakterisasi	20
2.11 Penelitian Terdahulu	23
III. METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Lokasi dan waktu penelitian.....	29
3.2 Bahan dan Alat penelitian	29
3.3 Persiapan bahan baku dan pembuatan <i>biochar</i>	29
3.4 Mempersiapkan <i>alkaline</i> KOH- <i>modified biochar</i>	29
3.5 Mempersiapkan <i>N-doped Modified Biochar</i>	30
3.6 <i>Fixed-bed N-doped Modified Biochar</i>	30
3.7 Penentuan Konsentrasi CO ₂ dengan Titrasi Asam-basa	31
3.8 Karakterisasi	31
3.9 Analisis Data	32
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Preparasi Cangkang Kelapa Sawit.....	35
4.2 Pirolisis Cangkang Kelapa Sawit Menjadi <i>Biochar</i>	35
4.3 <i>Alkaline</i> KOH- <i>Modifed Biochar</i>	35
4.4 <i>N-Doped Modified Biochar</i>	37
4.5 Luas Permukaan Spesifik (<i>Specific Surface Area/SSA</i>) <i>Biochar</i> Cangkang Kelapa Sawit	39
4.6 Rangkaian Alat <i>Capture</i> Gas CO ₂	43
4.7 Titrasi Asam Basa	46
4.8 Hasil Penyerapan Gas CO ₂ Pasca Penyerapan <i>Biochar</i> dan Titrasi	52
4.9 Karakterisasi	59
V. KESIMPULAN DAN SARAN	70
5.1 Kesimpulan	70
5.2 Saran	70
DAFTAR PUSTAKA.....	71
LAMPIRAN	78

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Daerah Serapan Gugus Fungsi pada IR (Takeuchi, 2009)	22
2. Penelitian Terdahulu.....	23
3. Jumlah tetesan metilen biru yang diserap	41
4. Tabel hasil titrasi asam basa.....	46
5. Hasil molaritas NaOH dan CO ₂ pasca titrasi	49
6. Tabel hasil penyerapan gas CO ₂ oleh <i>biochar</i> dan NaOH	52
7. Perbandingan spektrum FTIR sampel dengan literatur	62
8. Kandungan Unsur dalam <i>Biochar</i> Non Aktivasi	65
9. Kandungan Unsur Sampel <i>Biochar</i> Aktivasi KOH 2N	67
10. Kandungan Unsur Sampel <i>N-Doped Modified Biochar</i>	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Mekanisme <i>Biochar</i> (Wang <i>et al.</i> , 2019)	7
2. Cangkang Kelapa Sawit	8
3. Bentuk Isoterm Adsorpsi.....	12
4. Adsorpsi satu lapis (<i>monolayer</i>).....	14
5. Struktur kimia <i>Methylene Blue</i> (Endang, 2006)	19
6. Prinsip Kerja SEM (Schweitzer, 2014)	20
7. Prinsip Kerja FTIR (Suseno dan Firdausi, 2008)	21
8. Desain eksperimen <i>capture CO₂</i> pada <i>fixed-bed N-doped modified biochar</i> dan <i>NaOH absorber purging bubble</i>	30
9. Proses Filtrasi	36
10. <i>Alkaline KOH-Modified Biochar</i> (a) sebelum dikeringkan (b) setelah proses pengeringan	36
11. (a) Melamin sianurat (b) <i>Alkaline KOH-Modified Biochar</i> (c) Proses filtrasi <i>N-Doped Modified Biochar</i>	37
12. <i>N-Doped Modified Biochar</i> yang telah kering	38
13. Struktur <i>N-Doped Modified Biochar</i> (Kasera <i>et al.</i> , 2022).....	39
14. (a) <i>Biochar</i> 1 gr diletakkan diatas kertas <i>whatmann F4</i> (b) penetesan metilen biru diatas sampel <i>biochar</i> (c) Terbentuk lingkaran biru pada <i>biochar</i>	40
15. (a) Ditimbang 6 gr <i>biochar</i> (b) <i>biochar</i> dimasukkan kedalam <i>packed column</i> (c) <i>fixed-bed adsorption column</i> yang telah dirakit.....	43
16. 15 mL larutan <i>NaOH</i> 1 M (b) 15 mL larutan <i>NaOH</i> dimasukkan ke dalam <i>packed column</i> (c) <i>absorber purging bubble column</i> yang telah dirakit	44
17. Flowmeter gas <i>CO₂</i> dan <i>N₂</i> yang telah dirakit	44
18. Tabung gas <i>CO₂</i> dan <i>N₂</i> yang masing-masing telah dipasangkan regulator gas	45
19. Rangkaian Alat <i>Capture CO₂</i> pada <i>fixed-bed N-doped modified biochar</i> dan <i>NaOH absorber purging bubble</i>	46
20. Gelembung gas <i>CO₂</i> dalam larutan <i>NaOH</i> pada <i>packed column</i>	50
21. Larutan <i>NaOH</i> pasca penyerapan gas <i>CO₂</i> yang telah dimasukkan indikator PP (b) Titrasi dengan <i>HCl</i> (c) Terjadi perubahan warna (titik akhir).....	50
22. Struktur molekul fenofltalein	51
23. Struktur Molekul Fenolftalein Dalam Suasana Basa	51
24. Grafik Hubungan Laju Alir Gas <i>CO₂</i> Oleh Penyerapan Gas <i>CO₂</i> Oleh <i>Biochar</i> Non Aktivasi dan <i>NaOH</i>	52
25. Grafik Hubungan Laju Alir Gas <i>CO₂</i> Terhadap Penyerapan Gas <i>CO₂</i> Oleh <i>N-Doped Modified Biochar</i> dan <i>NaOH</i>	53
26. Grafik Hubungan Laju Alir Gas <i>CO₂</i> Terhadap Penyerapan <i>CO₂</i> Oleh <i>N-Doped Modified Biochar</i> dan <i>Biochar</i> Non Aktivasi.....	53
27. Laju alir gas <i>CO₂</i> 1 L/Menit (b) Laju Alir Gas <i>CO₂</i> 3 L/Menit (c) Laju Alir Gas <i>CO₂</i> 5 L/Menit (d) Laju Alir Gas <i>CO₂</i> 7 L/Menit (e) Laju Alir Gas <i>CO₂</i> 10 L/Menit (f) Laju Alir Gas <i>N₂</i> 0,5 L/Menit.....	56
28. Kurva Isoterm Langmuir <i>Biochar</i> Non Aktivasi	57
29. Kurva Isoterm Freundlich <i>Biochar</i> Non Aktivasi	57
30. Kurva Isoterm Langmuir <i>N-Doped Modified Biochar</i>	58
31. Kurva Isoterm Freundlich <i>N-Doped Modified Biochar</i>	58
32. Split Grafik Tiga Sampel <i>Biochar</i>	60
33. Hasil Analisis SEM <i>Biochar</i> Tanpa Modifikasi (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran 10000x	63
34. Hasil analisis SEM <i>Biochar</i> Aktivasi <i>KOH</i> 2N (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran 10000x	63
35. Hasil analisis SEM <i>N-Doped Modified Biochar</i> (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran 10000x	64
36. Hasil EDX Sampel <i>Biochar</i> Non Aktivasi	65

37. Hasil EDX Sampel <i>Biochar</i> Aktivasi KOH 2N	66
38. Hasil EDX Sampel <i>N-Doped Modified Biochar</i>	67

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Skema Umum Penelitian.....	78
2. Persiapan bahan baku dan pembuatan <i>biochar</i>	79
3. Mempersiapkan <i>alkaline</i> KOH- <i>modified biochar</i>	80
4. Mempersiapkan <i>N-doped odified Biochar</i>	81
5. <i>Fixed-bed N-doped Modified Biochar</i>	82
6. Penentuan Konsentrasi CO ₂ dengan Titrasi Asam-basa.....	83
7. Karakterisasi	84
8. Perhitungan	86
9. Dokumentasi Penelitian	114
10. Hasil Karakterisasi.....	119
11. Data Lapangan Pada Rangkaian Alat <i>Capture</i> CO ₂	122

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) telah meningkat sejak awal Revolusi Industri, asap dari hasil pembakaran oleh mesin-mesin industri menyebabkan polusi di udara sehingga meningkatkan gas CO₂ di atmosfer. Konsentrasi gas CO₂ di era pra-industri adalah sebesar 278 ppm, sedangkan pada tahun 2005 sebesar 379 ppm. Tingginya pola konsumsi dan pertumbuhan ekonomi di era saat ini akan menyebabkan konsentrasi CO₂ di atmosfer meningkat dua kali lipat dalam kurun waktu 100 tahun mendatang jika dibandingkan pada awal zaman industri yaitu sekitar 580 ppm. Jumlah gas CO₂ yang tertimbun di atmosfer diperkirakan telah mencapai 50%. Banyaknya konsentrasi gas CO₂ inilah yang menyebabkan perubahan iklim secara global (Pambudi *et al.*, 2017).

Oleh karena itu, banyak upaya telah dilakukan untuk mereduksi konsentrasi gas CO₂ di atmosfer seperti dengan menggunakan material berbasis karbon seperti biochar (Damris *et al.*, 2023; Damris, 2019; Sethupathi *et al.*, 2017). *Biochar* merupakan arang hayati yang dihasilkan dari dekomposisi termokimia suhu tinggi bahan organik (karbonisasi melalui proses pirolisis). *Biochar* (BC) adalah adsorben yang banyak digunakan yang dibuat melalui pirolisis berbagai limbah biomassa pada suhu di bawah 700°C di bawah kondisi oksigen terbatas, dan yang diterapkan untuk menghilangkan polutan termasuk logam berat dan organik dengan manfaat dan sangat ekonomis, tersedia secara luas, dan ramah lingkungan. Padahal, situs aktif permukaan yang terbatas dan luas permukaan spesifik sangat membatasi kapasitas adsorpsi *biochar*. *Doping heteroatom* dalam kerangka karbon (C) *biochar*, terutama heteroatom nitrogen (N), dapat meningkatkan porositas BC dan memperkaya jumlah dan jenis gugus fungsi aktif di permukaannya, sehingga mendorong penghilangan polutan oleh *biochar*. *Biochar* merupakan salah satu adsorben padat yang banyak dipelajari untuk *capture* CO₂ (Sethupathi *et al.*, 2017) karena pembuatan *biochar* yang sederhana dari bahan baku limbah organik (Creamer *et al.*, 2016) yang tersedia melimpah. Produksi *biochar* pada lingkungan oksigen yang terbatas dan suhu yang relatif rendah tidak memerlukan tahapan aktivasi kimia seperti yang dilakukan pada arang aktif (Sethupathi *et al.*, 2017). Tidak seperti arang biasa yang dihasilkan dari karbonisasi konvensional, *biochar* mempunyai sifat stabil dan kaya karbon (>50%), serta dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperlambat perubahan iklim global karena menyimpan karbon dalam tanah (Aisyah, 2019).

Biochar telah menerima banyak perhatian selama beberapa tahun terakhir. Karena *biochar* dianggap sebagai sarana yang menjanjikan untuk mengelola limbah biomassa. Perubahan rasio H/C dan O/C terjadi selama proses pirolisis mengubah struktur molekul, susunan atom dan menghasilkan stabilitas tinggi. Oleh karena itu, *biochar* dapat menyimpan karbon selama 100-1000 tahun dalam tanah yang sangat penting untuk kesuburan tanah. Karakteristik *biochar* tersebut bermanfaat untuk mengurangi emisi CO₂ dengan meningkatkan penyerapan karbon jangka panjang afinitas penyerapan yang kuat dan meningkatkan kualitas tanah dan air (Damris, 2019).

Biochar telah diaplikasikan untuk mengatasi berbagai isu lingkungan seperti pencemaran logam berat (Damris *et al.*, 2018), bahan organik (Li *et al.*, 2020), pemulihan lahan (Mayer *et al.*, 2014), reduksi emisi gas rumah kaca dari lahan pertanian (Damris *et al.*, 2018) dan *capture* CO₂ di udara (Nguyen dan Lee, 2016; Promraksa dan Rakmak, 2020; Dissanayake *et al.*, 2020; Chatterjee *et al.*, 2020). Penggunaan *biochar* untuk *capture* CO₂ di udara didorong dari kenyataan bahwa konsentrasi CO₂ di atmosfer telah meningkat tajam seperti yang diukur di Observatorium Mauna Loa di Hawaii mencapai 415,26 ppm dan diestimasi pada tahun 2050 akan mencapai 550 ppm (Qiao dan Wu, 2022). Hal ini akan menjadi sangat berbahaya bagi manusia dan kehidupan karena akan terjadi kenaikan suhu permukaan bumi dan perubahan iklim yang ekstrim. Oleh karena itu, adalah sangat urgensi untuk mengurangi konsentrasi CO₂ di atmosfer melalui pemanfaatan kemajuan sains dan teknologi yang ada saat ini.

Di sisi lain, bahan berpori untuk *capture* CO₂ adalah metode yang sangat menjanjikan yang dapat digunakan dibandingkan dengan teknologi berbasis adsorpsi cair seperti *monoethanolamine* (MEA), *diethanolamine* (DEA) dan *potassium carbonate* dan penangkapan gas CO₂. *Capture* CO₂ merupakan metode yang hemat biaya, mudah dirancang, fungsional, hidrofobisitas, hemat energi, operasi sederhana dan regenerasi adsorben yang mudah (Creamer *et al.*, 2016; Nguyen dan Lee, 2016; Dissanayake *et al.*, 2019; Chatterjee *et al.*, 2020).

Cangkang sawit merupakan limbah industri organik yang dapat diuraikan namun karena tektur dari bahan tersebut yang cukup membutuhkan waktu yang cukup lama untuk penguraian secara alami. Arang aktif adalah karbon yang sudah diaktifkan sehingga pori-porinya terbuka yang mengakibatkan daya serapnya lebih besar dari arang biasa. Arang aktif merupakan karbon amorf yang sebahagian terdiri dari karbon bebas yang mempunyai permukaan dalam (*internal surface*) sehingga mempunyai kemampuan daya serap (*adsorption*) yang baik. Produksi arang aktif di Indonesia masih belum mencukupi keperluan dalam negeri, untuk arang aktif

dengan kualitas tertentu Indonesia masih mengimport sebanyak 2.000 ton/tahun. Arang aktif adalah karbon yang tak berbentuk dan diolah secara khusus untuk menghasilkan luas permukaan yang sangat luas, permukaan sangat besar berkisar antara 300-2000 m³/gram. Luas permukaan yang besar dari struktur karbon aktif dari suatu karbon aktif yang membuat struktur karbon aktif memberikan kemampuan aktif untuk menyerap (*adsorp*) berupa gas-gas maupun uap-uap dan juga dapat mengurangi zat-zat yang terdapat dalam suatu *liquid* (Chatterjee *et al.*, 2020)

Prinsip utama dari adsorpsi adalah berkontakannya gas dengan cairan, gas tersebut mempunyai kelarutan terhadap cairan sehingga gas akan berdifusi ke dalam cairan. Peristiwa ini dipengaruhi oleh laju alir, tekanan gas dan luas antar fase antara gas dan cairan. Adsorpsi dalam industri salah satunya diaplikasikan dalam bentuk *packed column*. Alat ini berupa kolom yang berisi isian tempat berkontakannya gas dan cairan serta dilengkapi distributor cairan. Analisis terhadap laju alir gas dan cairan pada adsorpsi di dalam *packed column* dilakukan untuk mengetahui pengaruh laju alir gas dan cairan terhadap laju penyerapan dalam *packed column* disamping itu juga untuk mendapatkan korelasi empiris antara laju adsorpsi terhadap laju alir massa cairan (L) dan gas (G). *Packed column* merupakan peralatan yang sederhana yang terdiri dari *shell silinder* sebagai kolom berisi isian (*packing*) yang ditopang oleh *packing support* serta dilengkapi distributor untuk mendistribusikan cairan (Mc Cabe, 2013).

Aktivator KOH berperan membentuk pori pada arang, semakin besar konsentrasi aktifier maka larutan akan semakin pekat sehingga larutan aktivator akan lebih mudah untuk mengikat dan volatil hasil proses karbonisasi. Akibatnya arang aktif akan semakin kekurangan tar dan volatil yang ikut terbuang saat pencucian dilakukan, sehingga arang aktif akan semakin bebas dan memiliki luas permukaan aktif yang semakin besar. (Yuningsih *et al.*, 2016). Biochar yang diaktivasi dengan KOH 4 M, terjadi penurunan kadar abu pada karbon. Hal ini dikarenakan aktivasi karbon menggunakan KOH dapat mengekstraksi kandungan silikat pada biochar, yang berakibat turunnya presentase kadar abu setelah karbon diaktivasi. *Biochar* yang telah diaktivasi KOH akan memperluas permukaan pada karbon disebabkan karena semakin banyaknya penguapan senyawa mudah menguap pada *biochar*, sehingga dapat membentuk ruang kosong dan pori pada struktur karbon (Jeong *et al.*, 2015).

Setelah dimodifikasi dengan menggunakan basa, selanjutnya dimodifikasi adsorben atau *biochar* lebih lanjut dengan senyawa kaya Nitrogen (N) yang memiliki daya adsorpsi yang sangat selektif dan laju difusi CO₂ yang

tinggi didalam mesopori (Bali *et al*; 2013). Hal ini perlu dilakukan karena dengan bantuan senyawa heteroatom dalam kerangka karbon (C) dari *biochar* (BC), terutama Nitrogen (N) heteroatom, dapat meningkatkan porositas BC dan memperkaya jumlah dan jenis gugus fungsi aktif diatas permukaannya, sehingga meningkatkan kemampuan menghapus polutan oleh BC seperti penyerapan CO₂ (Chen *et al.*, 2017). Dalam hal memperkaya N, Sumber N yang umum digunakan tidak hanya diperoleh dari zat organik seperti urea, anilin dan melamin, tetapi juga sumber anorganik seperti NH₃, NH₄⁺, dan NO₃⁻. Selanjutnya penelitian Kasera *et al.* (2022), menunjukkan *biochar* yang dibentuk dari kulit kayu pinus dimodifikasi dengan melamin, urea, amonium klorida, dan amonium nitrat untuk mensintesis *biochar* tersebut agar kaya unsur nitrogen mendapatkan hasil berupa sampel dengan modifikasi melamin bernilai 4,75% lebih tinggi dibandingkan sampel *biochar* termodifikasi lainnya.

Dalam penelitian ini *modified biochar* digunakan sebagai *precursor* untuk menghasilkan *N-doped modified biochar* yang kaya gugus fungsi yang mengandung nitrogen (N) melalui strategi *N-doped biochar* untuk *capture* CO₂ di udara secara langsung. Berdasarkan uraian di atas, penulis mengajukan penelitian yang berjudul **“PENGARUH LAJU ALIR GAS TERHADAP CAPTURE CO₂ OLEH BIOCHAR CANGKANG KELAPA SAWIT TERMODIFIKASI KOH DAN MELAMIN SIANURAT PADA PACKED COLUMN”**.

1.2 Identifikasi dan Rumusan Masalah

Peningkatan konsentrasi gas CO₂ di atmosfer sudah mencapai tingkatan tertinggi yaitu melebihi 400 ppm dan merupakan gas rumah kaca utama yang bertanggung jawab terhadap isu pemanasan global, perubahan iklim dan cuaca ekstrim. *Capture* CO₂ di udara dengan bahan kimia tertentu mahal untuk diaplikasi dan kemungkinan berdampak negatif terhadap manusia dan lingkungan. Oleh karena itu pengembangan material baru yang memiliki daya *capture* yang tinggi terhadap CO₂, mudah dan murah aplikasinya adalah *urgent* untuk dilakukan. Dalam hal ini *biochar* modifikasi KOH digunakan sebagai *precursor* untuk sintesis *N-doped modified biochar* untuk *capture* CO₂. Gas-gas CO₂ yang tidak di-*capture* dan melewati *fixed-bed absorption column* akan di-*capture* oleh *absorber purging bubble* sehingga CO₂ dapat dikuantifikasi dengan titrasi asam-basa.

Berdasarkan uraian di atas, adapun rumusan masalah pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh laju alir gas CO₂ terhadap *capture* CO₂ oleh *biochar* non aktivasi dan *N-Doped Modified Biochar* pada *packed column* dalam larutan NaOH ?

2. Bagaimana kapasitas adsorpsi *biochar* cangkang kelapa sawit non aktivasi dan *N-Doped Modified Biochar* ?
3. Bagaimana karakterisasi *biochar* dari cangkang kelapa sawit sebelum dimodifikasi KOH, setelah modifikasi KOH dan setelah *N-Doping* menggunakan instrumen SEM-EDX dan FTIR ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis pengaruh laju alir gas CO₂ terhadap *capture* CO₂ oleh *biochar* yang diaktivasi KOH dan di-doping nitrogen pada *packed column*.
2. Menentukan kapasitas adsorpsi *biochar* dari cangkang kelapa sawit
3. Menentukan karakteristik *N-Doped Modified Biochar* menggunakan FTIR dan SEM-EDX.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Mengembangkan material baru yang memiliki daya *capture* yang tinggi terhadap CO₂.
2. Memberikan informasi kepada pembaca mengenai kapasitas adsorpsi dan karakteristik *biochar* dari cangkang kelapa sawit sebelum dimodifikasi, setelah aktivasi KOH dan *N-Doped Modified Biochar*

II. TINJAUAN PUSTAKA

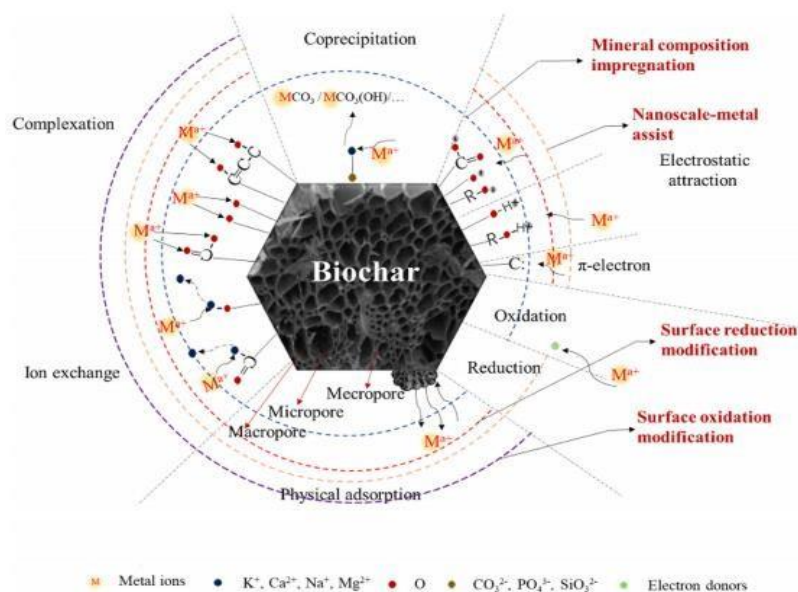
2.1 *Biochar*

Biochar adalah bahan padat berkarbon berpori yang dihasilkan dari dekomposisi termal biomassa termasuk sisa tanaman, biosolid, kotoran hewan dan pupuk kandang. Saat ini, *biochar* yang direkayasa ditemukan telah meningkatkan keberlanjutan dibidang pertanian, lingkungan dan energi. Metode rekayasa yang meliputi bidang fisika seperti *microwave*, *ball milling*, uap/gas), pada bidang kimia seperti asam dan alkali, oksidator, nanopartikel dll) pada bidang biologis seperti pencernaan anaerobik, imobilisasi mikroorganisme, bioakumulasi logam target dalam biomassa. *Biochar* telah banyak digunakan untuk mengurangi kadar logam berat dari larutan berair karena murah, melimpah serta mudah didapat. *Biochar* merupakan bahan kaya karbon yang berasal dari dekomposisi termal biomassa dalam sistem tertutup dengan sedikit atau tanpa oksigen. Beberapa penelitian menyebutkan *biochar* merupakan adsorben yang efektif untuk menghilangkan logam berat termasuk timbal, tembaga, nikel serta kadmium pada larutan berair. *Biochar* ialah arang hitam hasil proses pemanasan biomassa pada keadaan oksigen yang terbatas atau tanpa adanya oksigen. *Biochar* bahan basa yang dapat meningkatkan pH tanah dan dapat berkontribusi terhadap stabilitas logam berat (Wang dan Wang, 2019).

Biochar merupakan arang hayati yang dihasilkan dari dekomposisi termokimia suhu tinggi bahan organik (karbonisasi melalui proses pirolisis). Tidak seperti arang biasa yang dihasilkan dari karbonisasi konvensional, *biochar* mempunyai sifat stabil dan kaya karbon (>50%), dalam tanah pertanian untuk meningkatkan fungsi tanah dan mencegah pencucian nutrisi-nutrisi yang ada pada tanah, meningkatkan kesuburan tanah, memberikan pengaruh positif pada kelimpahan, komposisi, dan aktivitas mikroorganisme dalam tanah, serta dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperlambat perubahan iklim global karena menyimpan karbon dalam tanah. *Biochar* juga meningkatkan kualitas dan kuantitas air dengan meningkatnya penyimpanan tanah bagi unsur hara dan agrokimia yang digunakan oleh tumbuhan dan tanaman (Aisyah, 2019).

Biochar merupakan bahan pembenah tanah yang telah lama dikenal dalam bidang pertanian yang berguna untuk meningkatkan produktivitas tanah. Bahan utama untuk pembuatan *biochar* adalah limbah-limbah pertanian dan perkebunan seperti sekam padi, tempurung kelapa, kulit buah kakao, serta kayu-kayu yang berasal dari tanaman hutan industri. Teknik penggunaan *biochar* berasal dari Basin Amazon sejak 2500 tahun yang lalu. Penduduk asli

Indian memasukkan limbah-limbah pertanian dan perkebunan tersebut ke dalam suatu lubang di dalam tanah. Sebagai contoh 8 yaitu “*Terra Preta*” yang sudah cukup dikenal di Brazil. Tanah ini terbentuk akibat proses perladangan berpindah dan kaya residu organik yang berasal dari sisa-sisa pembakaran kayu hutan. *Biochar* dibuat dari bahan-bahan organik yang sulit terdekomposisi, yang dibakar secara tidak sempurna (*pyrolysis*) atau tanpa oksigen pada suhu yang tinggi (Glaser *et al.*, 2002).



Gambar 1. Mekanisme *Biochar* (Wang *et al.*, 2019)

Arang hitam *biochar* memiliki sifat dengan luas permukaan spesifik yang besar, kapasitas adsorpsi yang tinggi, biaya rendah, dan stabilitas yang kuat, *biochar* telah diterapkan secara luas sebagai pembenah tanah dan memulihkan lingkungan yang tercemar. *Biochar* bersifat rekalsitran yaitu sulit terdekomposisi dalam tanah sehingga aplikasi tunggal *biochar* dapat menyediakan efek yang bermanfaat selama beberapa musim tanam sehingga *biochar* tidak perlu diaplikasikan setiap musim tanah seperti pengaplikasian pupuk organik dan pupuk anorganik. *Biochar* yang direkayasa, yang diturunkan melalui modifikasi fisik dan kimia menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam menyerap, menurunkan atau melumpuhkan polutan dari air limbah dan tanah, mengurangi kemampuan pelindian dan bioavailabilitas polutan (Wu *et al.*, 2020).

Modifikasi *biochar* dapat meningkatkan kemampuan penyerapan kontaminan dengan menciptakan penyerapan tambahan dan area permukaan yang meningkat serta memungkinkan afinitas penyerapan yang lebih besar melalui interaksi yang lebih kuat dengan gugus fungsi permukaan tertentu. Secara umum tujuan modifikasi *biochar* adalah untuk memperbesar luas

permukaan, mengubah gugus fungsi, meningkatkan kinerja magnetik dan kapasitas katalitik (Wang dan Wang, 2019). Pirolisis adalah suatu proses yang mempunyai satu atau lebih zona reaksi, dimana oksigen dapat ditambahkan sepanjang paling sedikit disatu zona sehingga terjadi dekomposisi termis tanpa adanya oksigen. Pirolisis merupakan suatu proses perengkahan molekul hidrokarbon rantai panjang menjadi molekul hidrokarbon dengan rantai karbon yang lebih pendek tanpa atau sedikit melibatkan oksigen. Pada pirolisis, reaksi terjadi secara acak, tidak ada suatu molekul hidrokarbon yang terengkah menurut satu mekanisme reaksi yang pasti. Molekul dapat terengkah diberbagai tempat tergantung pada jenis molekul hidrokarbon dan kondisi operasi (Fardhyanti, 2020).

2.2 Cangkang Kelapa Sawit

Cangkang kelapa sawit adalah bagian paling keras pada komponen yang terdapat pada kelapa sawit. Pada pengolahan kelapa sawit, bagian ini disebut juga dengan jenis limbah padat. Cangkang kelapa sawit juga merupakan bahan bakar padat kelas tinggi yang dapat diperbarui untuk pembakaran, baik bersama-sama dengan uap batubara atau dibakar dibiomassa pembangkit tenaga listrik. Biasanya dalam proses pembakarannya dicampur dengan tingkatan lain dari biomassa, seperti potongan kayu. Limbah padat ini mempunyai potensi untuk dikembangkan menjadi produk yang bermanfaat dan bernilai ekonomis lebih, karena mengandung bahan organik dengan kadar yang cukup tinggi. Komposisi kimia tandan kosong kelapa sawit terdiri atas hemiselulosa (23,24%), selulosa (33,25%), lignin (25,83%), kadar air (6,95%), dan zat ekstraktif (4,19%), (Dewanti, 2018) sedangkan kandungan pada bagian cangkangnya terdiri atas hemiselulosa (24%), selulosa (40%), lignin (21%), abu (15%). Dikarenakan kandungan lignoselulosa yang tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa cangkang sawit berpotensi sebagai bahan baku pembuatan *biochar* untuk pembenah tanah dan penyerapan polutan CO₂ (Wang dan Wang, 2019).



Gambar 2. Cangkang Kelapa Sawit

2.3 Karbon Dioksida (CO₂)

Karbon dioksida (CO₂) merupakan senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen (O₂) yang terikat secara kovalen dengan atom karbon (C) sebagai buangan dari sisa hasil pembakaran karbon yang sempurna. Karbondioksida (CO₂) mempunyai sifat menyerap sinar panas matahari yaitu dipancarkan sehingga membuat suhu udara di permukaan bumi tinggi karenanya. Dalam proses terbentuknya karbon dioksida (CO₂) di udara senyawa karbon (C) yang dianalisis dengan oksigen (O₂) menggunakan energi sinar matahari kemudian terbentuknya gas karbon dioksida (CO₂). Pembakaran karbon sempurna akan menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂). Namun jika pembakaran karbon tidak sempurna karena berkurangnya oksigen maka akan menghasilkan gas karbon monoksida (CO) yang bersifat racun (Sihotang dan Assomadi, 2010). Adapun konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) yang tinggi diudara jika berlarut-larut tidak segera diatasi maka dapat meningkatkan suhu global (global warming) karena karbon dioksida (CO₂) merupakan salah satu unsur dari gas rumah kaca yang menyerap infra merah dari radiasi matahari yang diteruskan oleh atmosfer dan diserap oleh permukaan bumi. Penyerapan ini akan memanaskan permukaan bumi. Peningkatan emisi (CO₂) ini berkorelasi positif dengan peningkatan jumlah bahan bakar fosil.

Karbon dioksida (CO₂) pada umumnya tidak berbahaya bagi manusia dengan meningkatnya kadar karbon dioksida (CO₂) dapat meningkatkan suhu di bumi. Pada kendaraan otomatis konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) yang semakin tinggi menunjukkan kinerja mesin pembakaran pada kendaraan bermotor semakin baik. Tetapi pada keadaan tertentu konsentrasi karbon dioksida (CO₂) yang tinggi terbalik dengan keadaan iklim (Sudarmadji, 2004). Berbagai metode dilakukan dalam menekan produksi karbon dioksida (CO₂) seperti melakukan adsorpsi menggunakan bahan-bahan berpori sebagai adsorben seperti zeolit, karbon aktif dan sebagainya. Metode lain yang digunakan adalah dengan mereduksi karbon dioksida (CO₂) untuk penyesuaian menjadi senyawa lain seperti 1-propanol, asam karbamat dll.

Menurut Sihotang dan Assomadi (2010) karbon dioksida (CO₂) merupakan senyawa kimia yang terdiri dari dua atom oksigen (O₂) yang terikat secara kovalen dengan atom karbon (C) sebagai buangan dari sisa hasil pembakaran karbon yang sempurna. Karbon dioksida (CO₂) mempunyai sifat menyerap sinar panas matahari yaitu infra merah sehingga membuat suhu udara di permukaan bumi tinggi. Karbon dioksida (CO₂) suatu gas yang penting tetapi keberadaannya yang tidak seimbang akan membuat fenomena alam yang mampu merusak bumi. Mulai dari tenggelamnya beberapa pulau di dunia

sampai musnahnya beberapa jenis spesies di bumi. Oleh karena itu, konsentrasi konsentrasi karbon dioksida yang sesuai harus dipertahankan. Menurut Jasiman (2008), komposisi karbon dioksida dalam udara bersih seharusnya adalah 314 ppm. Efek yang diakibatkan dari kelebihan kadar karbon dioksida (CO_2) diantaranya:

1. Melubangi lapisan ozon
2. Efek rumah kaca, cahaya dan panas matahari yang masuk ke bumi tidak dapat dilepas keluar angkasa secara kosmis
3. Meningkatnya suhu bumi secara global beberapa derajat
4. Mencairnya kutub sehingga meningkatkan permukaan air laut.

Karbon dioksida (CO_2) memiliki bentuk molekul linier dengan atom (C) sebagai pusat atom. Atom (O) lebih elektronegatif dibandingkan dengan atom (C) yang bertindak sebagai pusat atom, (pada gambar yang berwarna hitam) sehingga ikatan elektron lebih tertarik ke arah atom (O). Namun, atom C mengikat dua atom yang sejenis saat ikatan yang terbentuk tertarik ke arah yang berlawanan dengan kekuatan yang sama, sehingga molekulnya bersifat nonpolar (Syarifudin, 2008). Berikut ini sifat-sifat karbon dioksida (CO_2):

- Rumus Kimia: CO_2
- Penampilan: gas tidak berwarna
- Densitas: 1.600 g/L (padat), 1,98 g/L (gas)
- Massa molar: 4,0095 (1) g/mol
- Titik didih: -78°C (195 K) menyublim
- Titik lebur: -57°C (216 K) dibawah tekanan
- Keasamaan (pKa): 6,35 dan 10,33
- Kelarutan dalam udara: 1,45 g/L

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi ialah terserapnya suatu zat (molekul atau ion) pada permukaan adsorben. Mekanisme adsorpsi digambarkan sebagai proses dimana molekul yang semula ada pada larutan, menempel pada permukaan zat adsorben secara fisika. Suatu molekul dapat teradsorpsi jika gaya adhesi antara molekul adsorbat dengan molekul adsorben lebih besar dibandingkan dengan gaya kohesi pada masing-masing molekul. Proses adsorpsi ini biasanya dilakukan untuk mengurangi senyawa organik yang terdapat dalam limbah cair, sehingga limbah cair dapat dimurnikan. Proses adsorpsi terjadi karena adanya luas

permukaan, makin luas permukaan adsorben yang disediakan maka semakin banyak molekul yang diserap (Bassett, 1994).

Adsorpsi merupakan proses transfer fase yang banyak digunakan untuk menghilangkan zat dari fase fluida (gas atau cairan). Permukaan zat padat dicirikan oleh situs aktif dan kaya energi yang dapat berinteraksi dengan zat terlarut dalam fase air yang berdekatan karena sifat elektronik dan spasialnya yang spesifik. Biasanya, situs aktif memiliki energi yang berbeda atau biasa disebut heterogen (Worch, 2012). Proses adsorpsi terjadi pada permukaan yang menghubungkan dua buah fasa yang didalamnya terdapat gaya kohesif termasuk gaya hidrostatis dan gaya ikatan hidrogen yang bekerja diantara molekul seluruh material. Gaya-gaya yang tidak seimbang pada batas fasa tersebut menyebabkan perubahan pada konsentrasi molekul *interface solid/fluida*. Proses adsorpsi melibatkan pemisahan sebuah zat dari suatu fase yang diikuti oleh akumulasi pada permukaan zat yang lain (Sakti, 2014).

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 (Wahab *et al.*, 2005). Metode adsorpsi ini dipilih karena memiliki keuntungan dari pada metode yang lain karena melibatkan instrumen yang paling canggih dengan pengoperasian yang mudah dan dapat dioperasikan dengan berbagai adsorben. Metode adsorpsi secara dasar menggunakan adsorben untuk menyerap adsorbat yang berupa ion-ion logam. Adsorben yang digunakan dapat berupa adsorben organik maupun anorganik. Setiap adsorben memiliki keunggulan dan kelemahan masing-masing sehingga pemilihan adsorben sangat penting dalam proses adsorpsi ion logam (Lesbani *et al.*, 2012).

Bahan padat yang menyediakan permukaan untuk adsorpsi disebut dengan adsorben, spesies yang akan diadsorpsi diberi nama adsorbat. Spesies yang teradsorpsi dapat dilepaskan dari permukaan dan dipindahkan kembali ke fase cair dengan mengubah sifat fase cair (seperti konsentrasi, pH dan suhu). Proses terbalik ini disebut dengan desorpsi. Jika fenomena adsorpsi disebabkan dari gaya *Van der Waals* dan gaya hidrostatis 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

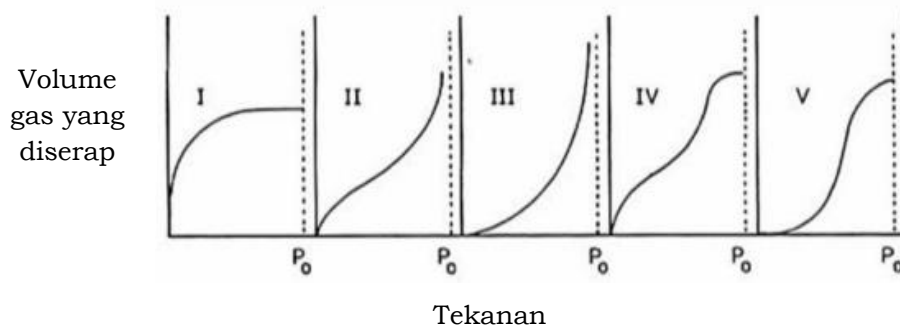
eksotermis yang diikuti oleh adanya pelepasan panas. Luas permukaan pada adsorpsi menjadi sangat penting dan merupakan parameter kualitas utama dari adsorben.

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 (Worch, 2012). 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.

2.5 Isoterm Adsorpsi

Proses adsorpsi digambarkan dengan persamaan isoterm adsorpsi. Isoterm adsorpsi menggambarkan proses distribusi adsorbat di antara fase cair dan fase padat. Dalam isoterm adsorpsi proses tersebut digambarkan dengan sebuah persamaan atau rumus. Isoterm adsorpsi yang umum digunakan ialah isoterm Freundlich dan isoterm *Langmuir* (Kusuma *et al.*, 2014).

Ada 5 bentuk isoterm adsorpsi yang sampai saat ini digunakan untuk menjelaskan teori isoterm *Langmuir*, *Freundlich*, dan *BET* (Brunauer, Emmet, dan Teller) yaitu seperti yang terlihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Bentuk Isoterm Adsorpsi

Tingkat penyerapan adsorbat tergantung pada volume pori yang dapat dilalui. Isoterm adsorpsi bentuk I menunjukkan bahwa adsorben memiliki

bentuk pori sangat kecil atau mikropori dan interaksi yang berlangsung adalah interaksi *monolayer*. Isoterm adsorpsi bentuk II dan bentuk IV menunjukkan bahwa adsorben memiliki bentuk pori sangat besar atau makropori dengan interaksi dari *monolayer* hingga *multilayer* yang tidak terbatas. Isoterm bentuk III menunjukkan bahwa adsorben memiliki bentuk pori yang variatif antara mikropori dan mesopori. Isoterm adsorpsi bentuk IV dan bentuk V memiliki karakteristik interaksi gas-padat yang lemah. Isoterm adsorpsi bentuk IV menjelaskan bahwa proses adsorpsi berlangsung secara *multilayer*. kemudian Isoterm adsorpsi bentuk IV menunjukkan bahwa adsorben memiliki bentuk pori sedang atau mesopori dan isoterm adsorpsi bentuk V menunjukkan bahwa adsorben memiliki bentuk pori yang bervariasi yakni mikropori dan mesopori (Botahala, 2019).

Mekanisme adsorpsi menurut Reynolds (1982), adapun mekanisme penyerapan adsorben terhadap zat terlarut terbagi menjadi 4 tahap yaitu :

1. Transfer molekul-molekul zat terlarut yang teradsorpsi menuju lapisan film yang mengelilingi adsorben.
2. Difusi zat terlarut yang teradsorpsi melalui lapisan film yang mengelilingi adsorben (*film diffusion process*).
3. Difusi zat terlarut teradsorpsi melalui kapiler atau pori dalam adsorben.
4. Adsorpsi zat terlarut yang teradsorpsi pada dinding pori atau permukaan adsorben.

Isoterm Adsorpsi Langmuir

Isoterm adsorpsi Langmuir menggambarkan bahwa suatu adsorpsi mengikuti asumsi sebagai berikut:

- a. Adsorben dan adsorbat membentuk lapis tunggal (*monolayer*),
- b. Adsorpsi terlokalisasi,
- c. Kalor adsorpsi tidak tergantung pada penutupan permukaan,
- d. Semua situs bersifat sama dan permukaan adsorben bersifat homogen,
- e. Kemampuan adsorpsi molekul pada suatu situs tidak tergantung
- f. pada situs yang lainnya.

Menurut Sitorus *et al.* (2021), isoterm *langmuir* merupakan yang paling banyak digunakan untuk mengolah dan mempresentasikan data hasil proses adsorpsi. Ada beberapa ciri khas proses adsorpsi yang dapat mengikuti persamaan isoterm *langmuir*:

- a. Adsorpsi dari adsorben hanya terjadi satu lapisan saja (*monolayer*)
- b. Semua situs adsorpsi mempunyai energi yang sama dan masing-masing

- c. situs hanya memfasilitasi satu molekul atau ion adsorbat saja
- d. Tidak terjadi interaksi lateral antar molekul atau ion adsorbat



Gambar 4. Adsorpsi satu lapis (*monolayer*)

Secara matematis, persamaan isoterm *langmuir* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q_e = \frac{Q_m \cdot k_L \cdot C_e}{1 + k_L \cdot C_e} \dots\dots\dots(1)$$

Diperoleh bentuk linear sebagai berikut:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{k_L \cdot Q_m} \dots\dots\dots(1i)$$

Di mana :

q_e = jumlah ion atau molekul adsorbat (mg/gr)

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

Q_m = konstan *langmuir* yang mengindikasikan kapasitas maksimum adsorpsi (mg/gr)

k_L = konstan *langmuir* yang mengindikasikan energi adsorpsi (L/mg)

Dalam menentukan pola adsorpsi *isoterm langmuir* dari data adsorpsi dapat dibuat grafik, linear q_e terhadap C_e . Konsentrasi *langmuir* dapat diperoleh 0 melalui intersep dan kemiringan dari persamaan linear.

Isoterm Adsorpsi *Freundlich*

Adsorpsi isoterm *freundlich* merupakan isoterm adsorpsi kurva yang menghubungkan konsentrasi zat terlarut di permukaan dari adsorben, dengan konsentrasi zat terlarut dalam cairan yang bersentuhan. Tipe isoterm ini didasarkan atas pendapat bahwa adsorben memiliki permukaan yang heterogen serta tiap molekulnya memiliki peluang yang berbeda, persamaan isoterm digunakan untuk penetapan praktis (Reynolds, 1982). Isoterm ini paling umum dilakukan karena menghasilkan permukaan yang heterogen dan biasanya banyak terdapat pada bahan alam. Proses adsorpsi pada adsorben dipengaruhi beberapa faktor serta mempunyai pola isoterm adsorpsi tertentu yang khas. Jenis adsorben, jenis zat yang diserap, luas permukaan adsorben, konsentrasi zat yang diadsorpsi, dan suhu yang dapat mempengaruhi dalam proses adsorpsi.

Isoterm *Freundlich* adalah bentuk terbatas dari isoterm *langmuir* dan hanya bisa diterapkan pada tekanan uap sedang. Isoterm *freundlich* biasanya berlaku untuk adsorpsi cairan pada permukaan padatan. Isoterm ini biasanya

yang paling umum digunakan, karena dapat mencirikan kebanyakan proses adsorpsi dengan baik. Isoterm *freundlich* menganggap, bahwa pada sisi permukaan adsorben terjadi proses adsorpsi dibawah kondisi yang diberikan. Namun, isoterm *freundlich* tidak memperkirakan keberadaan sisi-sisi permukaan yang dapat mengganggu terjadinya adsorpsi saat kesetimbangan tercapai. Di sisi lain, hanya ada beberapa sisi aktif saja yang mampu mengadsorpsi molekul terlarut (Sugita *et al.*, 2009).

Menurut sandra *et al.* (2022), Persamaan isoterm *freundlich* merupakan salah satu persamaan empiris yang dapat menggambarkan data kesetimbangan adsorpsi dan sudah lama digunakan. Isoterm *freundlich* mendefinisikan adsorpsi jenis fisika dimana terdapat lebih dari satu lapisan permukaan dan bersifat heterogen. Persamaan ini umumnya digunakan untuk memprediksi data kesetimbangan adsorpsi cair senyawa organik dengan karbon aktif. Isoterm *freundlich* dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q_e = K_f \times C_e^{1/n} \dots \dots \dots (2)$$

Untuk mendapatkan konstanta K_f dan $1/n$, maka perlu dilakukan linearisasi terhadap persamaan berikut :

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_f + (1/n) \text{Log } C_e \dots \dots \dots (2i)$$

Dimana :

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

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

K_f = konstanta *Freundlich* yang berkaitan dengan kapasitas (L/mg)

n = konstanta *Freundlich* yang berkaitan dengan afinitas (L/mg)

Dalam hal ini, ada beberapa faktor yang mempengaruhi daya serap adsorpsi, yaitu :

a. Sifat Serapan

Banyak senyawa yang dapat diadsorpsi oleh arang aktif, tetapi kemampuannya untuk mengadsorpsi berbeda untuk masing- masing senyawa. Adsorpsi akan bertambah besar sesuai dengan bertambahnya ukuran molekul serapan dari sturktur yang sama, seperti dalam deret homolog. Adsorpsi juga dipengaruhi oleh gugus fungsi, posisi gugus fungsi, ikatan rangkap, struktur rantai dari senyawa serapan.

b. Temperatur

Dalam pemakaian arang aktif dianjurkan untuk mengamati temperatur pada saat berlangsungnya proses. Faktor yang mempengaruhi temperatur proses adsorpsi adalah viskositas dan stabilitas termal senyawa serapan. Jika pemanasan tidak mempengaruhi sifat-sifat senyawa serapan, seperti terjadi perubahan warna maupun dekomposisi, maka perlakuan dilakukan pada titik

didihnya. Untuk senyawa volatil, adsorpsi dilakukan pada temperatur kamar atau bila memungkinkan pada temperatur yang lebih rendah.

c. pH (Derajat Keasaman)

Untuk asam-asam organik, adsorpsi akan meningkat bila pH diturunkan, yaitu dengan penambahan asam-asam mineral. Ini disebabkan karena kemampuan asam mineral untuk mengurangi ionisasi asam organik tersebut. Sebaliknya bila pH asam organik dinaikkan yaitu dengan menambahkan alkali, adsorpsi akan berkurang sebagai akibat terbentuknya garam.

d. Waktu Singgung

Bila arang aktif ditambahkan dalam suatu cairan, dibutuhkan waktu untuk mencapai kesetimbangan. Waktu yang dibutuhkan berbanding terbalik dengan jumlah arang yang digunakan. Selisih ditentukan oleh dosis arang aktif, pengadukan juga mempengaruhi waktu singgung. Pengadukan dimaksudkan untuk memberi kesempatan pada partikel arang aktif untuk bersinggungan dengan senyawa serapan. Untuk larutan yang mempunyai viskositas tinggi, dibutuhkan waktu singgung yang lebih lama.

2.6 Modified biochar as strategi capture CO₂ di udara

Biomaterial *biochar* dihasilkan dari pirolisis bahan organik yang dipanaskan pada suhu relatif rendah di lingkungan oksigen yang terbatas (Promraksa dan Rakmak, 2020). *Biochar* memiliki stabilitas jauh lebih tinggi dari bahan *organic* asal, *porous* dan mengandung gugus fungsi sehingga *biochar* telah banyak diaplikasikan untuk berbagai keperluan seperti reduksi emisi gas CO₂ dari udara (Nguyen dan Lee, 2016; Promraksa dan Rakmak, 2020; Dissanayake *et al.*, 2019; Chatterjee *et al.*, 2020) dan dari tanah perkebunan sawit (Damris, 2019), removal logam berat beracun (Li *et al.*, 2020; Jiang *et al.*, 2022), dan peningkatan sifat psikokimia tanah, remediasi tanah dan meningkatkan kesuburan tanah (Damris *et al.*, 2019). Perubahan struktur kimia selama proses pirolisis merubah struktur kimia bahan penyusun menjadi planar aromatis sehingga memiliki stabilitas yang lebih tinggi. Karakteristik *biochar* yang dihasilkan bergantung kepada dua faktor utama yaitu asal bahan organik dan kondisi dan suhu pirolisis. Biasanya pirolisis bahan organik dari limbah pertanian menghasilkan antara 10-50% *biochar* dari berat kering bahan baku.

Meskipun *biochar* memiliki karakteristik yang bagus seperti luas permukaan besar, pori yang halus dan stabilitas tinggi, tetapi kinerja *biochar* terhadap target tertentu biasanya masih rendah. Untuk itu, sebelum diaplikasikan beberapa peneliti memodifikasi *biochar* untuk meningkatkan karakteristik *biochar* yang dihasilkan seperti meningkatkan polaritas

permukaan, keasaman permukaan, meningkatkan *micropores* atau memperkaya gugus fungsi tertentu. Zhang *et al.*, (2020) modifikasi *biochar* dengan KOH untuk adsorpsi kation divalent. Sedangkan untuk *capture* CO₂ modifikasi banyak dilakukan melalui N-doped *biochar* (Nguyen dan Lee, 2016; Kurniawan *et al.*, 2019; Wan *et al.*, 2020; Han *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2021). Modified *biochar* melalui N-doped menunjukkan kapasitas *capture* CO₂ yang jauh lebih tinggi daripada karbon aktif komersial dan adsorben lainnya (Nguyen dan Lee, 2016).

Dewasa ini, N-doped modified *biochar* berbasis karbon dinilai memiliki keunggulan seperti biaya relatif rendah, regenerasi yang mudah dan kinerja siklus yang umumnya stabil. *Biochar* memiliki potensi untuk adsorpsi fisik CO₂ karena porositas mikro yang sangat berkembang dan luas permukaan yang besar (Nguyen dan Lee, 2016; Wan *et al.*, 2020; Ji *et al.*, 2021). Namun, *biochar* biasanya hanya dapat mencapai kapasitas adsorpsi yang lebih baik pada tekanan parsial CO₂ tinggi, sehingga membatasi penggunaan untuk *capture* CO₂ pada tekanan rendah (Nguyen dan Lee, 2016; Ji *et al.*, 2021). Untuk meningkatkan kapasitas *biochar* untuk *capture* CO₂ modifikasi *biochar* adalah diperlukan. Berbagai strategi untuk peningkatan afinitas permukaan *biochar* untuk *capture* CO₂ melalui pengayaan permukaan *biochar* seperti peningkatan kandungan gugus fungsi oksigen permukaan (Sethupathi *et al.*, 2017) dan peningkatan gugus fungsi yang mengandung nitrogen untuk *capture* CO₂ adalah metode yang menjanjikan (Wan *et al.*, 2020; Qiao dan Wu, 2022). Hal ini didukung dengan adsorben yang didoping nitrogen memiliki adsorpsi yang sangat selektif dan tingkat difusi CO₂ yang tinggi di dalam mesopori (Qiao dan Wu, 2022) dan *doping* nitrogen juga memberikan struktur mikropori tambahan, volume pori yang besar dan peningkatan luas permukaan adsorben yang mendorong adsorpsi fisik CO₂ (Ok *et al.*, 2015; Ji *et al.*, 2021).

2.7 Pengaruh N-doping untuk capture CO₂

N-doping untuk memperkaya nitrogen eksogen pada *biochar* umumnya penambahan N dari sumber eksternal anorganik seperti amonia, garam amonium, dan asam nitrat dan spesies organik seperti urea, melamin, dan anilin (Wan *et al.*, 2020). Penambahan zat kaya N eksternal berfungsi untuk membangun lingkungan sekitar kaya nitrogen buatan (Promraksa dan Rakmak, 2020). Kondisi operasional selama *doping* N dan menggunakan sumber N yang berbeda dapat menghasilkan struktur makromolekul dan komposisi kimia yang berbeda pula (Wan *et al.*, 2020). Demikian pula konfigurasi ikatan N yang dimasukkan dalam *biochar* yang dihasilkan juga bervariasi dengan kondisi operasional (Wan *et al.*, 2020).

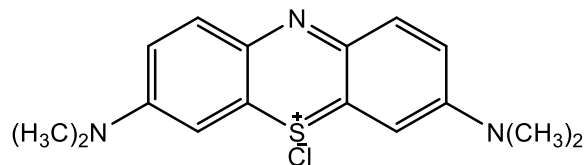
Perlu juga untuk diperhatikan bahwa kelimpahan gugus fungsi oksigen dalam bahan mentah biomassa (*precursor*) berkorelasi positif dengan *tingkat N-doping* dalam *biochar* yang dihasilkan, karena fungsi oksigen dapat langsung berikatan dengan prekursor N atau mengalami dekomposisi termal untuk bereaksi dengan prekursor N (Promraksa dan Rakmak, 2020).

Disamping kandungan N pada *biochar*, *capture* gas pada bahan karbon berpori seperti *biochar* juga penting untuk memperhatikan luas permukaan spesifik dan volume pori karena keduanya parameter yang sangat penting (Creamer *et al.*, 2016). Walaupun tidak ada ketergantungan yang jelas antara volume pori total, volume pori-pori yang lebih besar dari diameter 1 nm, ukuran pori rata-rata dan jumlah CO₂ yang dapat di-*capture* (Sevilla *et al.*, 2012). Pada tekanan parsial CO₂ yang rendah total volume pori-pori dengan diameter $\leq 0,5$ nm berkontribusi terhadap total *capture* CO₂ dan pada tekanan parsial yang lebih tinggi volume pori-pori yang lebih kecil dari 0,8 nm menghasilkan korelasi terbaik (Sevilla *et al.*, 2012). Kandungan gugus fungsi N berperan untuk *capture* CO₂ bersama dengan volume mikropori sempit, yang terkait dengan nonpolaritas dan polarisasi lemah dari molekul CO₂. Oleh karena itu, *N-doped biochar* telah banyak dipelajari dan dikembangkan untuk meningkatkan *capture* CO₂ karena *N-doped biochar* adalah material *porous* pilihan dan paling menjanjikan untuk *capture* CO₂ dengan sejumlah keuntungan seperti kebutuhan energi yang rendah untuk regenerasi dan menghilangkan masalah korosi pada larutan amina (Zhang *et al.*, 2016), memiliki stabilitas tinggi serta kandungan gugus fungsi N yang dapat ditingkatkan (Ji *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022), ketersediaan bahan baku yang luas, prekursor terbarukan, biaya rendah, stabilitas termal tinggi dan sensitivitas rendah terhadap kelembaban (Han *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022). Sehingga *biochar* yang diperkaya dengan nitrogen menjadi pilihan yang menjanjikan untuk *capture* CO₂ (Han *et al.*, 2021).

2.8 Methylene Blue (MB)

Metilen biru dengan rumus molekul (C₁₆H₁₈ClN₃S), memiliki nama kimia [3,7-bis (Dimethylamino)-phenaza-thionium chloride Tetramethylthionine chloride] adalah senyawa hidrokarbon aromatik yang bersifat racun. Metilen biru (MB) merupakan salah satu pewarna kationik thiazine yang banyak digunakan karena harganya cukup murah, dan mudah didapat. Senyawa ini berupa kristal berwarna hijau gelap. Ketika dilarutkan, *methylene blue* dalam air atau alkohol akan menghasilkan larutan berwarna biru. *Methylene blue* memiliki berat molekul 319,86 gr/mol, dengan titik lebur di 105°C dan daya larut sebesar 4,36 x 10⁴ mg/L (Endang, 2006).

Warna biru yang ada pada MB merupakan senyawa komplementer yang dapat dilihat pada daerah *visible* dengan spektrum cahaya pada panjang gelombang 500-700 nm. Hal ini yang membuat penentuan panjang gelombang MB terletak pada range panjang gelombang tersebut (Day dan Underwood, 2002). Larutan MB pada pH rendah ($\text{pH} < 7$) memiliki efisiensi dan kapasitas adsorpsi cenderung meningkat. Hal ini karena sifat kationik metilen biru memainkan peranan penting pada mekanisme adsorpsi. Sifat kationik tersebut baru akan tampak pada pH asam, sehingga metilen biru yang memiliki spesies bermuatan positif akan berikatan dengan sisi adsorben yang bermuatan negatif. Sifat inilah yang menyebabkan efisiensi dan kapasitas adsorpsi cenderung meningkat pada saat pH larutan diturunkan (Day dan Underwood, 2002). Berikut ini Struktur *methylene blue* yaitu :



Gambar 5. Struktur kimia *Methylene Blue* (Endang, 2006)

2.9 Packed Column sebagai Media Adsorpsi CO₂

Packed column adalah peralatan perpindahan massa antara fase gas dan fase cair maupun pada perpindahan massa fase gas padat yang berkontak sehingga membuat komposisi kedua fase berubah pada sebuah kolom absorpsi maupun adsorpsi. Pada keadaan ini, fase gas dinamakan sebagai fase kontinu sedangkan fase cair dinamakan sebagai fase yang mengalami disperse. *Packing* adalah material yang digunakan untuk memperluas area permukaan didalam kolom sehingga zat pendispersi dan terdispersi dapat berkontak lebih lama. Karena itu kebanyakan ruang didalam Menara diisi dengan material yang mempunyai permukaan yang lebih banyak. Adapun material *packing* ini dapat berupa kerikil, pecahan keramik, kaca, besi, tembaga, atau apapun asal tidak berkarat dan bereaksi dengan alkohol. Aluminium dan bahan plastik sebaiknya tidak digunakan. Pada saat pengisian bahan *packing* juga tidak boleh terlalu rapat hal ini dikarenakan dapat menyumbat aliran gas (Fitriana, 2019).

Adapun prinsip kerja dari *packed column* yakni cairan memasuki menara dari atas kemudian terdistribusi secara merata ke pengepakan menara dan selanjutnya cairan mengalir ke bawah di sepanjang permukaan *packing* menara. Menara *adsorpsi dipacking* dengan padatan yang bertujuan untuk berkontak dengan gas pada kolom adsorpsi. Penelitian yang dilakukan oleh Gantina dan Farhani (2020), menunjukkan bahwa terdapat pengaruh pada lama waktu kontak antara gas dengan adsorben yang digunakan pada kolom adsorpsi

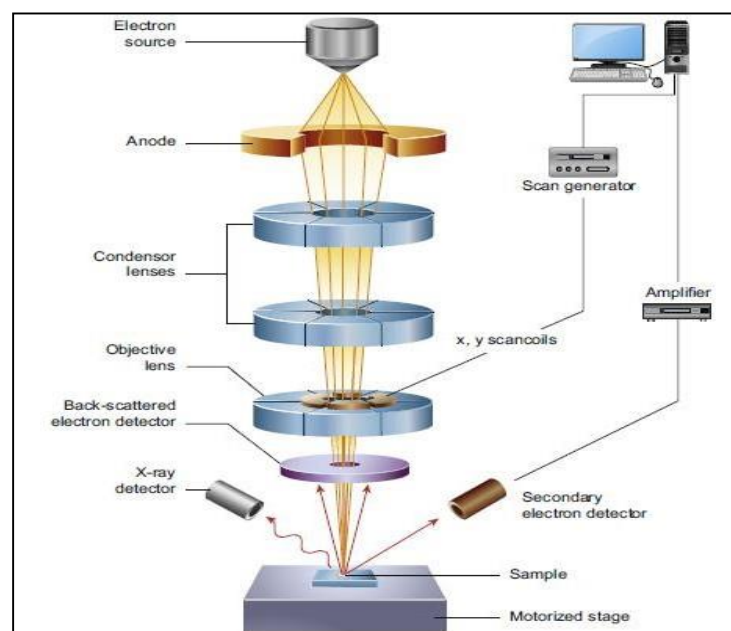
sebagai media untuk *capture* CO₂. Upaya untuk memperlama waktu kontak pada kolom *adsorpsi* dapat dilakukan dengan mendesain kolom adsorpsi dengan kolom yang lebih Panjang. Semakin Panjang kolom adsorpsi maka semakin lama pula waktu berkontak antara adsorbat dengan adsorben sehingga proses adsorpsi *capture* CO₂ akan semakin baik (Gantina dan Farhani, 2020).

Pada kolom *adsorpsi* dengan tipe *packing*, material *packing* yang dipakai pada kolom *adsorpsi* juga mempengaruhi kinerja proses *adsorpsi*. Terdapat beberapa pertimbangan dalam menentukam isian dari kolom *adsorpsi*, antara seperti: isian pada kolom *adsorpsi* sebisa mungkin tidak ikut bereaksi dengan fluida yang mengalir disepanjang kolom; isian pada kolom *adsorpsi* mempunyai karakter fisik yang kuat namun tidak berat; tidak menyebabkan penurunan tekanan pada fluida yang mengalir; tidak terlalu mahal (Gantina dan Farhani, 2020). Pada penelitian ini jenis isian yang digunakan untuk mengisi kolom *adsorpsi* berupa *biochar* yang telah dimodifikasi oleh basa.

2.10 Karakterisasi

Scanning Electron Microscopy (SEM)

Menurut Sujarwata dan Astuti 2015, SEM adalah jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas electron untuk menggambarkan bentuk permukaan material yang dianalisis. Fungsi SEM adalah memindai yang terfokus pada balok halus elektron ke sampel. Elektron berinteraksi dengan sampel komposisi molekul. Energi elektron menuju kesampel secara langsung dalam proposi jenis interaksi elektron yang dihasilkan dari sampel.



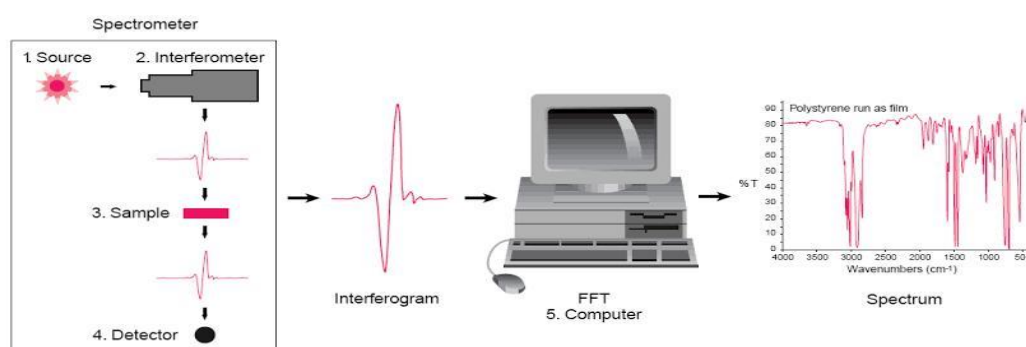
Gambar 6. Prinsip Kerja SEM (Schweitzer, 2014)

Berdasarkan **Gambar 6** mengenai prinsip kerja dijelaskan sebagai berikut: sumber elektron filamen yang terbuat dari tungsten memancarkan berkas elektron. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (spesimen) maka akan menghasilkan elektron sekunder dan sinar-X karakteristik. *Scanning* permukaan bahan yang dikehendaki dapat dilakukan dengan mengatur *Scanning generator* dan *coils*. Elektron sekunder hasil interaksi elektron dengan permukaan spesimen ditangkap detektor SE (*Secondary Electron*) kemudian diolah, diperkuat amplifier dan divisualisasikan monitor sinar katoda.

FTIR (*Fourier Transform Infrared*)

FTIR ialah salah satu teknik spektroskopi optik yang secara efektif dapat memberikan informasi mengenai komposisi kimia bahan pada tingkat molekuler. FTIR digunakan untuk menentukan gugus fungsi kimia dari senyawa organik maupun anorganik (Bunaciu *et al.*, 2015). Hampir semua senyawa menunjukkan karakteristik penyerapan atau emisi di daerah spektrum IR. Dengan demikian, FTIR digunakan untuk menganalisis senyawa baik secara kuantitatif maupun kualitatif (Simonescu, 2012). Sampel yang dikarakterisasi menggunakan spektrofotometer FTIR akan didapat data berupa bilangan gelombang (cm^{-1}) dan transmitansi (%) (Miftahatul, 2013). Bilangan gelombang ialah jumlah panjang gelombang per cm sehingga bilangan gelombang berbanding terbalik dengan panjang gelombang yang diserap oleh detektor.

Prinsip kerja FTIR, interferometer dapat mengubah cahaya IR yang polikromatik menghasilkan beberapa berkas cahaya membentuk sinyal interferogram. Gelombang tersebut dilewatkan pada sampel kemudian ditangkap oleh detektor yang terhubung pada komputer sehingga dihasilkan gambaran spektrum sampel yang diuji, dimana spektrum menunjukkan hubungan antara intensitas serapan sampel dan bilangan gelombang (Suseno dan Firdausi, 2008).



Gambar 7. Prinsip Kerja FTIR (Suseno dan Firdausi, 2008)

Prinsip kerja FTIR pada **Gambar 7** adalah sebagai berikut: berkas radiasi inframerah dari sumber radiasi diteruskan ke interferometer sebagai pengganti monokromator. Dari inferometer radiasi inframerah diteruskan ke sampel. Sebagian radiasi di adsorpsi oleh sampel sedangkan sebagian lain diteruskan kedetektor. Radiasi yang melewati sampel diubah menjadi sinyal listrik oleh detektor. Dari detektor sinyal listrik masuk ke *amplifier and filter* listrik dan akhirnya kedalam sirkuit dan akhirnya diproses oleh *AD converter* menjadi angka (Setianingsih dan Prananto, 2020).

Menurut Sari *et al.* (2021), Teknik karakterisasi dengan menggunakan FTIR merupakan salah satu teknik karakterisasi biomaterial yang berdasarkan pada teknik spektroskopi dan paling umum digunakan dalam suatu eksperimen atau penelitian. Teknik spektroskopi FTIR bekerja berdasar pada vibrasi molekul ketika menyerap radiasi Inframerah. Daerah serapan pada FTIR bisa dilihat pada **Tabel 1** di bawah ini.

Tabel 1. Daerah Serapan Gugus Fungsi pada IR (Takeuchi, 2009)

Gugus fungsi	Jenis senyawa	Daerah serapan (cm ⁻¹)
C-H	Alkana	2850-2960; 1350-1470
C-H	Alkena	3020-3080; 675-870
C-H	Aromatik	3000-3100; 675-870
C-H	Alkuna	3300
C=C	Alkena	1640-1680
C=C	Aromatik	1500-1600
C-O	Alkohol, eter, asam karboksilat, ester	1080-1300
C=O	Aldehida, keton, asam karboksilat, ester	1690-1760
O-H	Alkohol, fenol (monomer)	3610-3640
O-H	Alkohol, fenol (ikatan H)	2000-3600 (lebar)
O-H	Asam karboksilat	2000-3600 (lebar)
N-H	Amina	3310-3500 (sempit)
C-N	Amina	1180-1360
-NO ₂	Nitro	1515-1560; 1345-1385
C=N	Imina	1600-1680

2.1.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai metode penelitian terkait yaitu :

Tabel 2. Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	(Li <i>et al.</i> , 2021) <i>Insights into CO₂ adsorption on KOH-activated biochars derived from the mixed sewage sludge and pine sawdust</i>	Dalam penelitian ini, menyelidiki <i>adsorpsi</i> CO ₂ dari <i>biochar</i> yang berasal dari campuran bahan baku 70% serbuk gergaji pinus dan 30% lumpur limbah dengan modifikasi KOH. Sifat tekstual dan gugus fungsional dari <i>biochar</i> murni telah ditingkatkan secara signifikan setelah aktivasi KOH. Dengan mikroporositas yang sangat berkembang, luas permukaan spesifik (SSA) dari <i>biochar</i> yang dimodifikasi KOH meningkat 3,9–14,5 kali lipat. Selanjutnya, kapasitas <i>adsorpsi</i> CO ₂ yang lebih tinggi dari 136,7-182,0 mg/g diamati untuk <i>biochar</i> yang dimodifikasi, dibandingkan dengan yang murni (35,5-42,9 mg/g). Pengembangan mikropori dengan aktivasi KOH secara signifikan meningkatkan kapasitas adsorpsi CO ₂ . Sementara itu, keberadaan atom hetero (O dan K) juga berpengaruh positif terhadap kapasitas adsorpsi CO ₂ <i>biochar</i> . Tampak jelas, adsorpsi fisik dan kimia memainkan peran penting dalam penangkapan CO ₂
2	(Nguyen dan lee, 2016) <i>A novel removal of CO₂ using nitrogen doped biochar beads as a green adsorbent</i>	Studi ini menyelidiki karakteristik penghilangan CO ₂ oleh adsorben <i>biochar</i> yang didoping nitrogen berpori. MAMBC memiliki struktur pori yang berkembang dengan baik dengan luas permukaan spesifik dengan tinggi sebesar 328,6 m ² a, yang sangat membantu untuk adsorpsi CO ₂ . Dalam uji adsorpsi yang dilakukan dengan menggunakan kolom <i>fixed-bed</i> skala laboratorium, kinerja penyisihan CO ₂ lebih ditingkatkan dengan meningkatkan porositas dan luas permukaan spesifik adsorben.

3. (Liu <i>et al.</i> , 2020) <i>Preparation of Acid- and Alkali-Modified Biochar for Removal of Methylene Blue Pigmen</i>	Pada penelitian ini, <i>biochar</i> kulit kenari dan <i>biochar</i> serbuk kayu yang dibuat menggunakan proses pirolisis oksigen terbatas digunakan sebagai bahan baku, dan ZnCl_2, KOH, H_2SO_4, dan H_3PO_4 digunakan untuk memodifikasinya. Evaluasi kinerja adsorpsi fase cair menggunakan <i>methylene blue</i> (MB) sebagai model pigmen menunjukkan bahwa <i>biochar</i> termodifikasi yang dibuat dari kedua biomassa memiliki struktur mesopori yang lebih besar. Namun, modifikasi basa lebih kondusif untuk pembentukan pori-pori pada bahan <i>biochar</i> yang dimodifikasi biomassa. Perlakuan KOH menghasilkan luas permukaan spesifik <i>biochar</i> termodifikasi tertinggi. Adsorpsi isothermal MB (<i>methylene blue</i>) oleh dua arang pirolisis biomassa sesuai dengan persamaan <i>Freundlich</i>, dan proses adsorpsi sesuai dengan persamaan kinetik orde dua, yang sebagian besar merupakan adsorpsi fisik. Sejumlah besar gugus fungsi yang mengandung oksigen pada permukaan partikel menyediakan lebih banyak situs adsorpsi untuk adsorpsi MB (<i>methylene blue</i>), yang bermanfaat bagi reaksi adsorpsi.
4 (Goenadi dan Santi, 2017) <i>Kontroversi Aplikasi dan Standar Mutu Biochar</i>	Menurut penelitian ini dengan adanya area permukaan yang lebih luas maka <i>biochar</i> memiliki kapasitas menahan air yang cukup tinggi pula. Sementara itu, hasil pembacaan dengan <i>spektroskopi fourier transform infrared</i> (FTIR) diketahui bahwa <i>biochar</i> asal cangkang kelapa sawit ini memiliki pita-pita intensif pada rentang $3.413\text{--}3.400\text{ cm}^{-1}$ yang mencirikan pita regangan O-H (hidroksil) dan N-H (amina). Pada wilayah $1.170\text{--}950\text{ cm}^{-1}$, <i>biochar</i> menunjukkan karakteristik penyerapan pada 1.034 cm^{-1} yang mencirikan vibrasi O-CH₃. Gugus-gugus fungsional O-H, N-H, dan O-CH₃ sebagaimana halnya dengan gugus fungsional yang sama pada bahan organik berperan

		dalam agregasi tanah sebagai perekat antar partikel primer tanah melalui ikatan elektrostatis. Analisis <i>Scanning Electrone Microscopy</i> (SEM) telah dilakukan untuk melihat struktur mikro <i>biochar</i> asal cangkang kelapa sawit. Struktur mikro <i>biochar</i> dengan pembesaran 10.000 kali menunjukkan keporian yang relatif sarang (porous). Lubang pori terlihat tunggal dan ganda. Pada beberapa bagian pori yang letaknya berdampingan, sekat pori ada yang runtuh sehingga membentuk pori yang lebih besar. Ukuran lubang pori bervariasi antara 2-5 μm.
5	(Donda <i>et al.</i>, 2015) PEMANFAATAN CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI ARANG AKTIF DALAM ADSORBSI MINYAK GORENG BEKAS	Menurut penelitian ini proses aktivasi adalah perubahan secara fisik luas permukaan dari karbon aktif meningkat tajam dikarenakan adanya penghilangan yang tajam dari senyawa dan sisa senyawa penggaraman. Daya serap karbon akan semakin meningkat disebabkan dengan meningkatkan konsentrasi dari bahan aktivator yang diberikan, hal ini akan memberikan pengaruh terhadap pengikatan senyawa/zat yang akan keluar dari mikro pori-pori dari karbon aktif, sehingga permukaan karbon aktif tersebut semakin kuat dan luas yang menyebabkan semakin besar pula daya serap karbon aktif tersebut. Suhu karbonisasi sangat mempengaruhi terhadap arang aktif sebab semakin tinggi suhu maka arang yang dihasilkan akan semakin berkurang, namun hasil dari cairan dan gas akan meningkat, oleh karena semakin banyak zat-zat yang terurai dan teruapkan. Waktu perendaman bahan dengan aktivator sangat mempengaruhi, tergantung bahan yang digunakan. Konsentrasi aktivator sangat mempengaruhi dimana semakin tinggi konsentrasi dari bahan kimia maka semakin kuat pengaruh dari bahan tersebut terhadap pengikatan senyawa dan karbonisasi untuk keluar melalui pori-pori permukaan semakin porous yang semakin

		meningkat daya adsorpsi karbon aktif tersebut.
6	(Nafis, 2017) Pengaruh Penyerapan CO ₂ terhadap Laju Alir Absorben Air dan Kecepatan Alir Udara pada Alat <i>Revamping</i> <i>Absorber Tipe</i> <i>Sieve Tray</i>	Penelitian ini menyatakan bahwa semakin besar laju alir NaOH, jumlah CO₂ terserap semakin kecil. Hal ini dikarenakan pada operasi absorpsi dengan laju alir besar, waktu kontak antara NaOH dengan CO₂ untuk jumlah molekul yang sama akan semakin kecil. Waktu kontak yang singkat ini menyebabkan transfer massa yang terjadi lebih sedikit dan jumlah CO₂ yang terserap juga lebih sedikit. Didapatkan bahwa semakin lama waktu, kontak antara NaOH dengan CO₂ semakin lama sehingga terjadi peningkatan jumlah CO₂ yang terserap. Semakin besar laju alir, nilai k_{Ga} turun kemudian naik karena aliran belum <i>steady</i>. Semakin besar laju alir, nilai k_{La} turun kemudian naik karena aliran belum <i>steady</i>. Semakin besar laju alir maka nilai k₂ makin tinggi. Secara umum, proses absorpsi gas CO₂ ke dalam larutan NaOH yang disertai reaksi kimia berlangsung melalui empat tahap, yaitu perpindahan massa CO₂ melalui lapisan gas menuju lapisan antar fase gas-cairan, kesetimbangan antara CO₂ dalam fase gas dan dalam fase larutan, perpindahan massa CO₂ dari lapisan gas ke badan utama larutan NaOH dan reaksi antara CO₂ terlarut dengan gugus hidroksil (OH⁻).

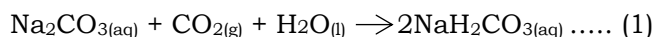
7	(Creamer <i>et al.</i> , 2016) <i>Carbon dioxide capture using various metal oxyhydroxide-biochar composites.</i>	Berdasarkan menunjukkan bahwa aktivasi dengan KOH pada suhu 860 °C selama 1 jam dapat memperluas permukaan <i>biochar</i> dari 365 menjadi 1250 m ² g ⁻¹ dan kapasitas adsorpsinya terhadap gas CO ₂ naik dari 1,9 mmol g ⁻¹ menjadi 4,4 mmol g ⁻¹ . Tiga limbah pertanian yang berbeda, yaitu kulit pistachio, kulit kemiri dan serbuk gergaji kayu pinus digunakan sebagai <i>biochar</i> juga dimodifikasi menggunakan 1M KOH dan 1M FeCl ₃ , diuji untuk menghilangkan fenol dari larutan sintetis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa KOH merupakan pengubah <i>biochar</i> yang lebih efisien dibandingkan dengan FeCl ₃ , karena menghasilkan peningkatan kandungan karbon, porositas dan luas permukaan. Modifikasi PI- <i>biochar</i> dengan KOH dan FeCl ₃ menghasilkan efisiensi adsorpsi fenol yang lebih baik dibandingkan dengan karbon aktif komersial. Kemampuan <i>biochar</i> dalam mengadsorpsi CO ₂ dipengaruhi oleh sifat fisiko-kimia seperti microporositas, aromatik, hidrofobisitas dan adanya gugus fungsi dasar yang dipengaruhi oleh bahan baku dan kondisi produksi <i>biochar</i> .
8	(Yoo <i>et al.</i> , 2013) <i>Carbon Dioxide Capture of Sodium Hydroxide Aqueous Solution</i>	Berdasarkan menunjukkan bahwa aktivasi dengan KOH pada suhu 860 °C selama 1 jam dapat memperluas permukaan <i>biochar</i> dari 365 menjadi 1250 m ² g ⁻¹ dan kapasitas adsorpsinya terhadap gas CO ₂ naik dari 1,9 mmol g ⁻¹ menjadi 4,4 mmol g ⁻¹ . Tiga limbah pertanian yang berbeda, yaitu kulit pistachio, kulit kemiri dan serbuk gergaji kayu pinus digunakan sebagai <i>biochar</i> juga dimodifikasi menggunakan 1M KOH dan 1M FeCl ₃ , diuji untuk menghilangkan fenol dari larutan sintetis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa KOH merupakan pengubah <i>biochar</i> yang lebih efisien dibandingkan dengan FeCl ₃ , karena menghasilkan peningkatan kandungan karbon, porositas dan luas permukaan. Modifikasi PI- <i>biochar</i> dengan KOH dan FeCl ₃

menghasilkan efisiensi adsorpsi fenol yang lebih baik dibandingkan dengan karbon aktif komersial. Kemampuan *biochar* dalam mengadsorpsi CO₂ dipengaruhi oleh sifat fisiko-kimia seperti microporositas, aromatik, hidrofobisitas dan adanya gugus fungsi dasar yang dipengaruhi oleh bahan baku dan kondisi produksi *biochar*.

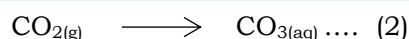
8 (Yoo *et al.*, 2013)

*Carbon Dioxide
Capture of Sodium
Hydroxide
Aqueous Solution*

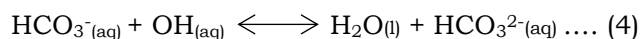
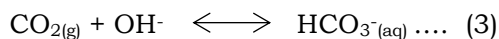
Selama NaOH berada dalam larutan NaOH, karbon dioksida bereaksi dengan hidroksida menghasilkan natrium karbonat (Na₂CO₃). Gas karbon dioksida (CO₂) juga terikat pada senyawa lain selain natrium karbonat dan dihasilkan bikarbonat, Adapun reaksinya adalah sebagai berikut.



Mekanisme penyerapan gas karbon dioksida (CO₂) dalam larutan NaOH yaitu Na dan OH hampir seluruhnya terionisasi dalam air murni karena NaOH merupakan basa kuat. Ketika gas karbon dioksida (CO₂) direaksikan kedalam larutan NaOH, gas karbon dioksida (CO₂) akan diserap sehingga menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂) berubah fasa gas ke fasa cair.



Selanjutnya gas CO₂ akan bereaksi dengan OH menghasilkan HCO₃⁻ dan CO₃²⁻ dengan persamaan reaksi berikut.



Reaksi kedua merupakan reaksi *reversible* dengan laju yang sangat cepat dalam kisaran pH tinggi yang ditunjukkan oleh persamaan reaksi 3 dan 4. Persamaan reaksi 3 dominan pada awal reaksi dikarenakan penyerap dipertahankan dengan

alkalinitas yang sangat tinggi yang dapat meningkatkan konsentrasi gas CO₂ terhadap gas HCO₃. Oleh karena itu, penyerap konsentrasi gas CO₂ meningkat. Adapun reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.



Reaksi absorpsi yang terjadi antara gas CO₂ dengan NaOH adalah gas CO₂ langsung bereaksi dengan NaOH, yaitu dengan berkurangnya konsentrasi gas CO₂ sebagai akibat reaksi dengan NaOH, maka semakin banyak gas CO₂ yang terabsorpsi oleh absorben. Hal ini disebabkan karena meningkatnya jumlah molekul NaOH seiring dengan perubahan Konsentrasinya, sehingga semakin banyak pula molekul absorben yang dikontakkan dengan molekul CO₂

III. METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian laboratorium dan akan dilaksanakan pada Lab Instrumentasi dan Tugas Akhir, FST Universitas Jambi Sintesis *biochar* dan *N-doping biochar* untuk *capture* CO₂ dengan *fixed-bed absorption column* dan *absorber purging bubble* dilakukan di Lab yang sama.

3.2 Bahan dan Alat penelitian

Bahan yang akan digunakan untuk mendukung penelitian ini diantaranya adalah KOH, Aquades, NaOH, HCl, CO₂, N₂, kertas saring, *biochar* cangkang kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq*), indikator fenolftalein, melamin sianurat dan *methylene blue*.

Alat yang akan digunakan untuk mendukung penelitian ini diantaranya timbangan analitik, gelas ukur, oven, buret, stirrer/*magnetic stirrer*, *hot plate*, batang pengaduk, *purging bubble column*, regulator, *packed column*, rotameter (*flowmeter*), pipa penyambung, selang gas, tabung *acrylic*, SEM-EDX dan FTIR.

3.3 Persiapan bahan baku dan pembuatan *biochar*

Mengikuti prosedur yang diberikan oleh Damris dan Ngatijo (2021). Preparasi *biochar* dilakukan dengan menggunakan cangkang kelapa sawit yang dicuci menggunakan air dan dikeringkan dibawah sinar matahari. Dikeringkan dengan cara diangin-anginkan 7 hari untuk mengurangi kandungan air. Kemudian cangkang kelapa sawit dimasukkan dalam *muffle crucible* dan dipirolisis dengan suhu 500°C (kondisi dengan gas oksigen terbatas) selama 2 jam. Sampel yang telah dipirolisis dilanjutkan dengan dicuci menggunakan akuades dan dikeringkan pada suhu 100°C. Setelah pendinginan sampel *biochar* yang dihasilkan digerus dengan mortal alu diayak dengan 200 *mesh*, hasil ayakan yang diperoleh ditimbang dan rasio bahan baku dan *biochar* yang dihasilkan dihitung.

3.4 Mempersiapkan *alkaline KOH-modified biochar*

KOH-modified biochar dipersiapkan mengikuti prosedur yang diberikan oleh Nutfitria *et al*, (2019). Pada proses aktivasi kimia digunakan perbandingan 1:4 untuk campuran antara *biochar* dan KOH 2 N. Kemudian dipanaskan dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer hotplate* dengan putaran 200 rpm dan suhu 80°C selama 4 jam. Campuran kemudian didiamkan selama satu hari hingga terbentuk endapan. Proses filtrasi dilakukan hingga didapatkan endapan *biochar* dan filtratnya dibuang. Karbon lalu dicuci dengan menambahkan aquades dan berulang sampai pH nya mendekati netral. Aktivasi fisika karbon aktif dilakukan setelah proses aktivasi kimia dengan cara pengeringan karbon

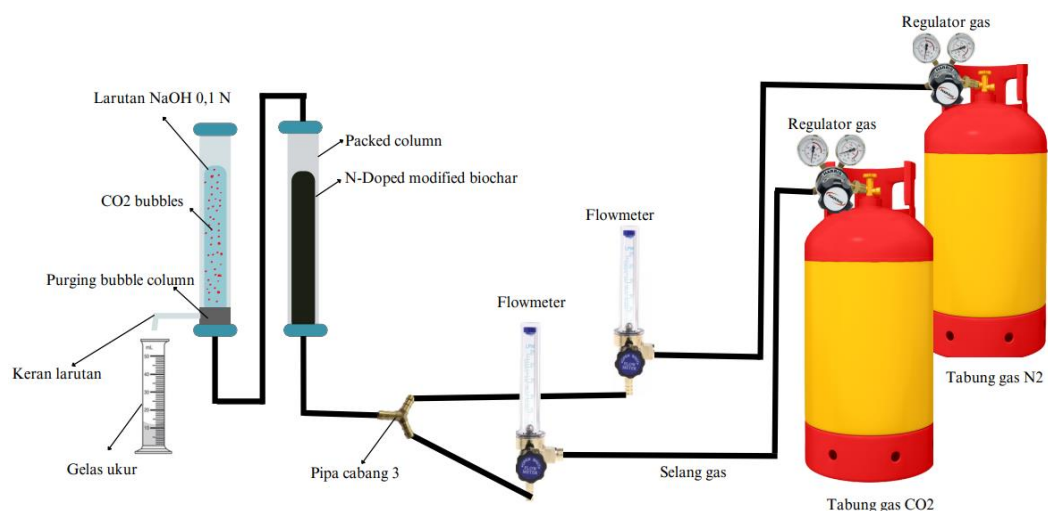
menggunakan *crucible* pada suhu 105°C di dalam oven dengan waktu selama 4 jam.

3.5 Mempersiapkan N-doped Modified Biochar

Hasil aktivasi *biochar* dengan KOH sebelumnya akan dimodifikasi kembali dengan nitrogen (N) guna meningkatkan reaktivitas permukaannya dengan memasukkan situs aktif. Dengan perbandingan *biochar* : nitrogen yaitu 10:1, maka *biochar* sebanyak 10 gr dicampur dengan sumber nitrogen yaitu melamin sianurat ($C_3H_6N_6 \cdot C_3H_3N_3O_3$) 99% sebanyak 1 gr dalam 50 ml air deionisasi selama 1 jam dengan suhu perendaman 400°C. Setelah itu saring *biochar* teraktivasi dengan kertas *Whatmann* dan bilas beberapa kali menggunakan air deionisasi hingga pH filtrat yang dihasilkan bersifat netral (pH 7). Selanjutnya dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 8 jam (Kasera *et al.*, 2020).

3.6 Fixed-bed N-doped Modified Biochar

Percobaan *capture CO₂* dilakukan dengan menggunakan dua kolom. Kolom pertama dimodifikasi dari Promraksa dan Rakmak, (2016) untuk *fixed-bed absorption column* untuk *capture CO₂* dengan *N-doped modified biochar* dan kolom kedua untuk *absorber purging bubble column* untuk penangkapan *CO₂* pada larutan NaOH dimodifikasi dari Mashuri *et al.*, (2013). Kedua kolom dihubungkan pipa sehingga gas *CO₂* yang tidak terserap pada kolom pertama diteruskan ke kolom kedua dan diserap larutan NaOH. Larutan NaOH yang telah menyerap *CO₂* dikeluarkan dari kolom menuju gelas ukur dan selanjutnya dititrasasi dengan larutan HCl untuk mengetahui konsentrasi gas *CO₂* yang tidak terserap *N-doped modified biochar column*.



Gambar 8. Desain eksperimen *capture CO₂* pada *fixed-bed N-doped modified biochar* dan NaOH *absorber purging bubble*

Pada **Gambar 8** digunakan dua flowmeter untuk mengontrol laju alir gas CO₂ dan N₂. Kolom *capture fixed-bed* dibuat dari tabung transparan dengan dimensi tinggi 50 cm, *internal diameter* 6 mm dan *outer diameter* 8 mm. *Fiberglass* dipasang dibagian bawah kolom untuk mendukung adsorben. Variasi laju aliran gas pencampuran yaitu 1 ;3; 5; 7 dan 10 L/menit. Sampel *biochar* 6,0 g digunakan untuk menguji kapasitas *capture* CO₂ pada setiap percobaan. Eksperimen *capture* gas CO₂ diuji pada tekanan atmosfer dan suhu kamar. Gas yang tidak terserap *fixed-bed absorption column* dialirkan ke *absorber purging bubble column* yang berisi larutan NaOH 1 M sebanyak 15 mL.

3.7 Penentuan Konsentrasi CO₂ dengan Titration Asam-basa

Setelah dilakukan uji penyerapan gas CO₂ dengan *fixed-bed N-doped modified biochar*, selanjutnya dihitung gas CO₂ tidak terserap oleh NaOH 1 M dengan menggunakan metode titrasi asam-basa. Disiapkan alat titrasi yang telah diisi dengan HCl 1 M, dan diatur posisi buret supaya lurus sehingga tepat dalam pembacaan skala. Selanjutnya, diambil sampel dengan gelas ukur, dimasukkan kedalam Erlenmeyer 250 mL, lalu ditambahkan 3 tetes indikator PP. Setelah itu, dilakukan proses titrasi sambil digoyang perlahan-lahan agar pencampuran merata. Jika sampel sudah berwarna bening maka hentikan proses titrasi HCl dan catat volume titran yang diperoleh (V₁) (Ardhiany, 2018).

3.8 Karakterisasi

Penentuan Luas Permukaan spesifik (*Specific Surface Area/ SSA*)

Dibuat dengan mencampurkan 1 g bubuk kering MB (*Methylene Blue*) dengan 200 mL air deionisasi. Diaduk larutan MB menggunakan *magnetic stirrer hotplate* hingga homogen. Ditimbang 1 gr sampel *biochar* kemudian letakkan sampel diatas kertas saring *whatmann*. Kemudian larutan MB diteteskan dengan hati-hati ke *biochar* dengan peningkatan 0,5 mL menggunakan pipet tetes. Dihentikan penambahan 0,5 mL MB jika terbentuk lingkaran biru disekitaran sampel *biochar* pada kertas saring, hal ini menunjukkan bahwa MB telah menggantikan kation dalam *biochar*. Kemudian ditentukan luas permukaan dari jumlah MB yang digunakan pada saat terbentuk lingkaran biru (Yukselen, 2006).

Penentuan Kandungan Gugus Fungsi

a. *Biochar non aktivasi*

Diambil *biochar* yang belum diaktivasi, kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan FTIR untuk mengetahui kandungan gugus fungsinya.

b. *Biochar Aktivasi KOH*

Diambil *biochar* yang telah diaktivasi KOH 2 N, kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan FTIR untuk mengetahui kandungan gugus fungsinya.

c. N-doped Modified Biochar

Diambil *N-doped Modified Biochar*, Kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan FTIR untuk mengetahui kandungan gugus fungsinya.

Penentuan Morfologi Permukaan Biochar

a. Biochar non aktivasi

Diambil *biochar* yang belum diaktivasi, Kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan SEM-EDX untuk mengetahui morfologi permukaan *biochar*.

b. Biochar Aktivasi KOH

Diambil *biochar* yang telah diaktivasi KOH, Kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan SEM-EDX untuk mengetahui morfologi permukaan *biochar*.

c. N-doped Modified Biochar

Diambil *N-doped modified biochar*, Kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan SEM-EDX untuk mengetahui morfologi permukaan *biochar*.

3.9 Analisis Data

% Efisiensi Capture CO₂

Persentase efisiensi *capture* CO₂ dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

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

Keterangan :

% E = Efisiensi serapan gas CO₂ (%)

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

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

Penentuan Konsentrasi Gas Ideal

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

Keterangan :

V = volume gas (L)

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)

Penentuan Tekanan Parsial

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_x$$

$$P_{\text{total}} = \left(\frac{n_1 \cdot R_1 \cdot T_1}{V_1} \right) + \left(\frac{n_2 \cdot R_2 \cdot T_2}{V_2} \right) + \left(\frac{n_3 \cdot R_2 \cdot T_3}{V_3} \right) + \dots + \left(\frac{n_x \cdot R_x \cdot T_x}{V_x} \right)$$

Keterangan :

V = volume gas (L)

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)

Penentuan Kapasitas Adsorpsi

Penentuan kapasitas adsorpsi dilakukan untuk mengetahui kemampuan *biochar* sebagai adsorben dalam penyerapan gas CO₂.

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

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)

Metode Adsorpsi Isoterm Freundlich

Isoterm *freundlich* dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$Q_e = K_f \times C_e^{1/n}$$

Untuk mendapatkan konstanta K_f dan 1/n, maka perlu dilakukan linearisasi terhadap persamaan berikut :

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_f + (1/n) \text{Log } C_e$$

Dimana :

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

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

K_f = konstanta *Freundlich* yang berkaitan dengan kapasitas (L/mg)

n = konstanta *Freundlich* yang berkaitan dengan afinitas (L/mg)

Metode Adsorpsi Isoterm Langmuir

Secara matematis, persamaan isoterm *langmuir* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q_e = \frac{Q_m \cdot k_L \cdot C_e}{1 + k_L \cdot C_e}$$

Diperoleh bentuk linear sebagai berikut:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{k_L \cdot Q_m}$$

Keterangan :

q_e = jumlah ion atau molekul adsorbat (mg/gr)

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

Q_m = konstan *langmuir* yang mengindikasikan kapasitas maksimum adsorpsi (mg/gr)

k_L = konstan *langmuir* yang mengindikasikan energi adsorpsi (L/mg)

Penentuan Nilai SSA Pada Biochar

$$SSA = \frac{1}{319,87} \frac{1}{200} (0,5 N) A_v A_{mb} \frac{1}{10}$$

Keterangan :

N = Jumlah penambahan MB (*Methylene blue*) yang ditambahkan

A_v = Bilangan Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$ mol)

A_{mb} = Area yang dicakup oleh satu molekul MB (biasanya diasumsikan $130 \text{ \AA}^2$)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Preparasi Cangkang Kelapa Sawit

Pada penelitian ini cangkang kelapa sawit yang digunakan berasal dari Provinsi Jambi. Cangkang kelapa sawit yang diambil ialah hasil limbah produksi. Pada tahap preparasi ini, cangkang kelapa sawit terlebih dahulu dicuci menggunakan air hingga bersih. Selanjutnya dikeringkan dibawah sinar matahari. Tujuan dikeringkan untuk mengurangi kandungan air. Kandungan air yang tinggi dapat mengurangi efisiensi proses pirolisis. Selanjutnya dipecahkan menjadi ukuran yang lebih kecil. Pemecahan cangkang kelapa sawit lebih kecil bertujuan untuk memperluas permukaan kontak dengan panas selama proses pirolisis. Selanjutnya cangkang kelapa sawit yang telah kering dan dipecahkan, dimasukkan ke dalam *murfle crucible* lalu dipanaskan di dalam oven pada suhu 105°C selama 1 jam untuk mengurangi kadar air yang masih ada pada cangkang kelapa sawit.

4.2 Pirolisis Cangkang Kelapa Sawit Menjadi *Biochar*

Sampel selanjutnya dilakukan proses pirolisis. Proses pirolisis ini menggunakan alat reaktor dengan suhu 500°C. Dimana pirolisis ialah proses dekomposisi kimia bahan organik melalui proses pemanasan tanpa atau sedikit oksigen, pada saat pirolisis terjadi proses aktivasi seperti proses pemutusan rantai karbon dan senyawa organik dengan bantuan panas, uap, CO₂, O₂ dan N₂. Produk dari hasil proses pirolisis ini dapat berupa padatan, gas, cairan serta *biochar*. Struktur *biochar* yang dihasilkan dari proses pirolisis pada suhu tinggi akan menghasilkan luas permukaan yang lebih besar dan gugus aromatik-karbon yang dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi yang diperlukan untuk penyerapan gas CO₂ di udara. Setelah dilakukan proses pirolisis, dilakukan pengeringan pada suhu 100°C. Selanjutnya digerus menggunakan mortal dan alu dan diayak dengan kehalusan 200 *mesh*. Penghalusan *biochar* hingga 200 *mesh* bertujuan untuk menghasilkan *biochar* dengan luas permukaan yang lebih besar, dengan menghaluskan *biochar* hingga ukuran partikel yang sangat kecil, luas permukaan total *biochar* akan meningkat secara signifikan.

4.3 *Alkaline KOH-Modified Biochar*

Pembuatan *Alkaline KOH-Modified Biochar* dilakukan untuk mengetahui kekuatan KOH yang digunakan sebagai kinerja pengurangan kandungan logam. Aktivasi dengan Larutan Alkaline berfungsi untuk meningkatkan porositas dan pori *biochar*. Pada penelitian ini, *Alkaline KOH-Modified Biochar* dibuat dengan mereaksikan *Biochar* dan larutan KOH 2 N dengan perbandingan 1:4 (*biochar* : larutan KOH 2N) sambil dilakukan pengadukan selama 4 jam menggunakan

suhu perendaman sebesar 80°C dengan pengadukan 200 rpm. Setelah dilakukan pengadukan, larutan *biochar* tersebut didiamkan semalaman yang bertujuan supaya larutan mengendap dan lebih meningkatkan porositas maupun pori *biochar* tersebut. Pengadukan berfungsi untuk menghomogenkan larutan dan memperluas bidang permukaan kontak antara substrat. *Biochar* dipisahkan dengan cara filtrasi. Filtrasi merupakan proses pemisahan solid-liquid dengan cara melewatkan liquid melalui media berpori atau menghilangkan banyaknya butiran-butiran halus zat padat tersuspensi dari liquid.



Gambar 9. Proses Filtrasi

Kemudian *biochar* ditambahkan air demineralisasi yang berfungsi sebagai pencuci yang dilakukan secara berulang hingga larutan sampel memiliki pH netral (pH 7). Pencucian menggunakan air demineralisasi untuk menghilangkan ion-ion sisa berupa kation dan anion terlarut. Selanjutnya *biochar* dipisahkan lagi dengan cara filtrasi dan dikeringkan pada suhu 105°C selama 4 jam. Proses pengeringan pada suhu 105°C bertujuan untuk menghilangkan sisa kandungan air yang ada dalam *biochar* tersebut. Kemudian *biochar* yang diperoleh didinginkan selama kurang lebih 5 jam lama-nya. *Biochar* yang diperoleh diberi kode *Biochar* Aktivasi KOH 2 N yang dihasilkan tersebut dianalisis menggunakan FTIR dan SEM-EDX.



(a)



(b)

Gambar 10. *Alkaline KOH-Modified Biochar* (a) sebelum dikeringkan (b) setelah proses pengeringan

4.4 *N-Doped Modified Biochar*

Pada penelitian ini, *N-Doped Modified Biochar* dibuat dengan mereaksikan *Biochar* yang telah diaktivasi KOH 2N dengan melamin sianurat dengan perbandingan 10 : 1 (*biochar aktivasi KOH 2N* : melamin sianurat) sambil dilakukan pengadukan selama 1 jam menggunakan suhu perendaman sebesar 400°C dengan pengadukan 200 rpm. Pengadukan berfungsi untuk menghomogenkan larutan dan memperluas bidang permukaan kontak antara substrat. *Biochar* dipisahkan dengan cara filtrasi. Filtrasi merupakan proses pemisahan solid-liquid dengan cara melewatkan liquid melalui media berpori atau menghilangkan banyaknya butiran-butiran halus zat padat tersuspensi dari liquid.



(a)

(b)

(c)

Gambar 11. (a) Melamin sianurat (b) *Alkaline KOH-Modified Biochar* (c) Proses filtrasi *N-Doped Modified Biochar*

Kemudian *N-Doped Modified Biochar* ditambahkan air demineralisasi yang berfungsi sebagai pencuci yang dilakukan secara berulang hingga larutan sampel memiliki pH netral (pH 7). Pencucian menggunakan air demineralisasi untuk menghilangkan ion-ion sisa berupa kation dan anion terlarut. Selanjutnya *N-Doped Modified Biochar* yang telah dipisahkan lagi dengan cara filtrasi dan dikeringkan pada suhu 105°C selama 8 jam. Proses pengeringan pada suhu 105°C bertujuan untuk menghilangkan sisa kandungan air yang ada dalam *biochar* tersebut. Kemudian *biochar* yang diperoleh didinginkan selama kurang lebih 5 jam lama-nya. *Biochar* yang diperoleh diberi kode *N-Doped Modified Biochar* yang dihasilkan tersebut dianalisis menggunakan FTIR dan SEM-EDX.

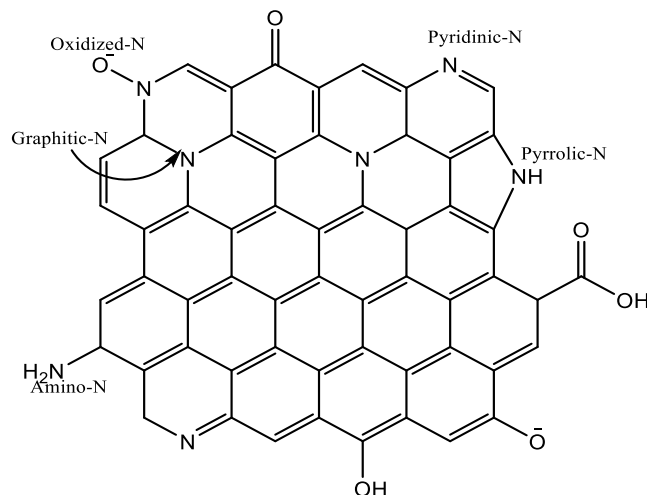


Gambar 12. *N-Doped Modified Biochar* yang telah kering

Pembuatan *N-Doped Modified Biochar* dilakukan untuk meningkatkan kapasitas *capture* CO₂ dengan cara memperkaya gugus fungsi nitrogen. Keragaman sifat kimia *biochar* sebagian besar berasal dari heterogenitas permukaan terutama keberadaan atom non-karbon, seperti hidrogen, nitrogen, oksigen, belerang dan fosfor (Jiang *et al.*, 2022; Olivera *et al.*, 2018). Pembentukan gugus fungsi dari hetero-atom ini menentukan keasaman dan kebasaan permukaan *biochar* yang dihasilkan. Secara umum, gugus fungsi oksigen memberikan karakter asam dan gugus fungsi nitrogen memberikan kebasaan permukaan *biochar*; gugus fungsi nitrogen inilah yang menyediakan sisi aktif permukaan *biochar* untuk *capture* CO₂ disamping luas permukaan, dipol-dipol, ikatan hidrogen, ikatan kovalen, dan lain-lain (Chatterjee *et al.*, 2020; Damris, 2019; Creamer *et al.*, 2016). Karena CO₂ sebagai asam Lewis lemah, maka penambahan basa Lewis ke permukaan *biochar* dengan memperkaya nitrogen melalui *N-doped modified biochar* maka kapasitas *capture* CO₂ dapat ditingkatkan dan gugus fungsi oksigen pada permukaan *biochar* dapat direduksi melalui oksidasi permukaan *biochar* menambah sifat akseptor elektron ke permukaan *biochar* (Chatterjee *et al.*, 2020).

N-Doped modified biochar adalah proses penambahan nitrogen ke dalam *biochar* yang telah diaktivasi untuk meningkatkan sifat-sifatnya dalam aplikasi lingkungan dan energi. *Doping* nitrogen mempromosikan polarisasi elektron π dan menghasilkan gugus yang kaya elektron π pada *biochar*, yang meningkatkan sifat penyerapannya. Tujuan dilakukan pendopingan senyawa nitrogen pada *biochar*, karena *biochar* merupakan arang hasil proses pirolisis dengan suhu sekitar 300-500°C dalam kondisi tanpa oksigen atau oksigen yang terbatas. Maka saat terjadi proses pirolisis, nitrogen yang terkandung dalam *biochar* hilang saat proses penguapan. Hal ini menyebabkan kandungan nitrogen didalam *biochar* menjadi berkurang atau rendah nitrogen. Salah satu alasan mengapa *biochar* perlu diperkaya dengan nitrogen yaitu untuk mengganti unsur N yang telah hilang dalam *biochar*. Karena *biochar* dengan penambahan unsur nitrogen bermanfaat untuk memperbaiki sifat fisik, kimia,

penyerapan dan biologi tanah serta memperkaya unsur hara di dalamnya (Hidayati *et al.*, 2018).



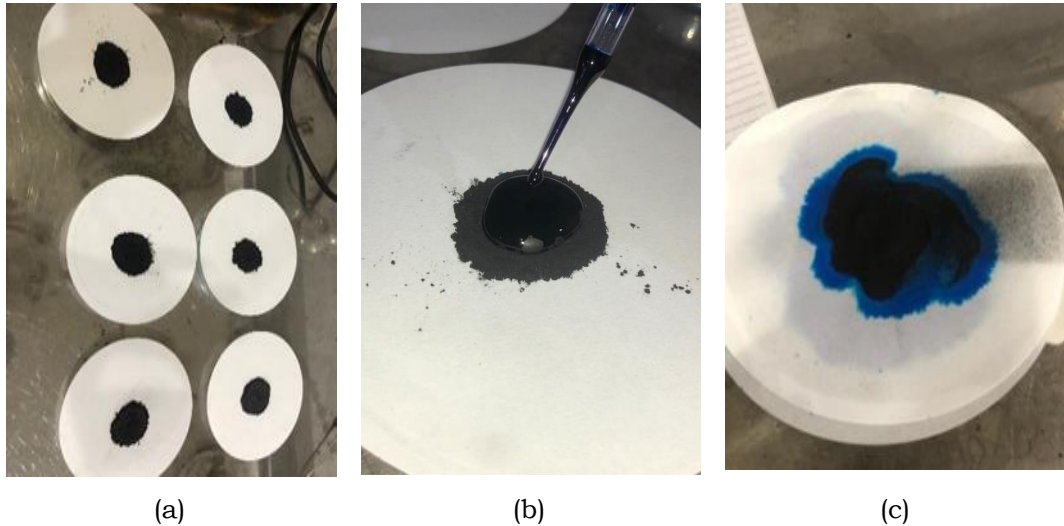
Gambar 13. Struktur *N-Doped Modified Biochar* (Kasera *et al.*, 2022)

4.5 Luas Permukaan Spesifik (*Specific Surface Area/SSA*) *Biochar* Cangkang Kelapa Sawit

Luas permukaan spesifik (*Specific Surface Area/SSA*) adalah ukuran dari sejauh mana permukaan suatu benda dapat berinteraksi dengan zat sekitarnya. Dalam konteks *biochar*, luas permukaan spesifik mengacu pada jumlah permukaan yang tersedia untuk berinteraksi dengan lingkungan sekitar, seperti media tanah atau air. *Biochar* memiliki luas permukaan spesifik yang relatif tinggi dibandingkan dengan bahan organik lainnya. Ini disebabkan oleh struktur pori-pori yang kompleks yang terbentuk selama proses pembuatan *biochar*, seperti pirolisis. Luas permukaan spesifik *biochar* penting karena mempengaruhi kemampuan *biochar* dalam menyerap dan menyimpan nutrisi, air, dan zat organik. Semakin besar luas permukaan spesifik *biochar*, semakin banyak area yang tersedia untuk interaksi dengan lingkungan sekitarnya, sehingga meningkatkan penyerapan pada *biochar*.

Pada penelitian ini untuk menentukan luas permukaan spesifik dilakukan menggunakan metode uji MB Spot (*Methylene Blue Spot*) dengan mencampurkan 1 g bubuk kering MB (*Methylene Blue*) dengan 200 mL air deionisasi. . Kemudian larutan tersebut diaduk menggunakan *magnetic stirrer hotplate* hingga homogen. Pengadukan berfungsi untuk menghomogenkan larutan dan memperluas bidang permukaan kontak antar substrat. Kemudian ditimbang 1 g sampel *biochar* kemudian letakkan sampel diatas kertas saring *whatmann* F4. Kemudian larutan MB ditetaskan dengan hati-hati ke *biochar* dengan peningkatan 0,5 mL menggunakan pipet tetes. Dihentikan penambahan 0,5 mL MB jika terbentuk lingkaran biru di sekitaran sampel *biochar* pada

kertas saring, hal ini menunjukkan bahwa MB telah menggantikan kation dalam *biochar*. Pada saat penetesan metilen biru diatas kertas saring, larutan metilen biru harus diaduk terus-menerus agar larutan tidak menggumpal dan tetap homogen pada saat penetesan di atas kertas saring. Kemudian ditentukan luas permukaan dari jumlah MB yang digunakan pada saat terbentuk lingkaran biru.



Gambar 14. (a) *Biochar* 1 gr diletakkan diatas kertas *whatmann* F4 (b) penetesan metilen biru diatas sampel *biochar* (c) Terbentuk lingkaran biru pada *biochar*

Dalam metode ini, *biochar* sebagai adsorben sedangkan metilen biru sebagai adsorbat. Adsorbat adalah zat atau molekul yang diserap atau teradsorpsi oleh permukaan adsorben. Dalam konteks penyerapan, adsorbat merujuk pada zat yang terlarut dalam fase cair atau terdispersi dalam fase gas yang berinteraksi dengan permukaan material adsorben. Sedangkan adsorben adalah bahan atau material yang memiliki kemampuan untuk menyerap atau mengadsorpsi zat terlarut atau molekul. Adsorben berfungsi sebagai media yang menyerap atau menahan adsorbat pada permukaan atau dalam struktur pori-pori mereka.

Biochar memiliki kemampuan untuk menyerap zat-zat dari larutan, termasuk zat pewarna seperti metilen biru. Metilen biru adalah pewarna anorganik yang umum digunakan dalam laboratorium dan industri. Proses penyerapan metilen biru oleh *biochar* terjadi melalui mekanisme adsorpsi, di mana molekul metilen biru terikat pada permukaan *biochar* melalui interaksi fisik atau kimia. Luas permukaan spesifik yang tinggi pada *biochar* berkontribusi pada kemampuannya untuk menyerap zat-zat dari larutan, termasuk metilen biru. Permukaan *biochar* yang porus dan memiliki struktur pori yang kompleks menyediakan area yang luas untuk interaksi dengan zat-zat

terlarut dalam larutan. Porus adalah suatu ruang kosong atau saluran di dalam suatu material yang memungkinkan fluida, gas, atau zat terlarut untuk melewati atau menempati ruang tersebut.

Adapun jumlah tetesan metilen biru yang diserap oleh *biochar* cangkang kelapa sawit yaitu :

Tabel 3. Jumlah tetesan metilen biru yang diserap oleh *biochar* cangkang kelapa sawit

Sampel	Jumlah tetesan metilen biru			Nrata-rata	Luas Permukaan spesifik (m^2g^{-1})
	1	2	3		
<i>Biochar</i> non aktivasi	72	70	74	72	2.862,54
<i>Biochar</i> aktivasi KOH 2N	88	89	92	89,67	3.565,04
<i>N-Doped Modified Biochar</i>	77	79	80	78,66	3.127,32

Berdasarkan data yang didapatkan *biochar* non aktivasi mampu menyerap adsorbat sebanyak 72 tetesan, *biochar* aktivasi KOH 2N menyerap adsorbat sebanyak 78,66 tetesan dan *N-Doped Modified Biochar* mampu menyerap adsorbat sebesar 89,67 tetesan. *Biochar* sebelum dimodifikasi memiliki luas permukaan spesifik sebesar $2.862,54 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, *biochar* yang telah diaktivasi larutan KOH 2N memiliki luas permukaan spesifik sebesar $3.565,04 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$. Sedangkan *N-Doped Modified Biochar* memiliki luas permukaan spesifik sebesar $3.127,32 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$.

Berdasarkan luas permukaan spesifik yang didapatkan, *biochar* sebelum aktivasi memiliki luas permukaan terkecil karena *biochar* tersebut masih mengandung zat pengotor dalam *biochar* hasil pengarangan yang kurang sempurna seperti zat volatil dan tar, sehingga pori-pori *biochar* belum maksimal terbuka. *Biochar* yang telah diaktivasi KOH 2N mempunyai luas permukaan yang melebihi *biochar* sebelum modifikasi dan *N-Doped Modified Biochar* karena penambahan KOH membuat daya serap semakin besar dan bebas pengotor pada pori-pori *biochar*. Berdasarkan penelitian bahwasanya KOH adalah aktivator kimia yang baik pada *biochar* karena dapat meningkatkan luas permukaannya hingga $3000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ (Nurfitria *et al.*, 2019).

Sedangkan sampel *N-Doped Modified biochar* memiliki luas permukaan spesifik yang lebih tinggi dibanding sampel *biochar* sebelum aktivasi karena *biochar* yang digunakan tersebut telah dimodifikasi KOH 2N dan telah dilakukan pendopingan senyawa nitrogen yang membuat daya serap semakin meningkat. Sampel *N-Doped Modified biochar* memiliki luas permukaan spesifik lebih rendah dibanding *biochar* yang telah diaktivasi KOH 2N yang disebabkan oleh faktor penurunan luas permukaan pada sampel *biochar* yang telah di-

doping. Berikut faktor yang menyebabkan luas permukaan spesifik pada sampel *N-Doped Modified Biochar* menurun yaitu :

- Struktur dan Pori-Pori: Proses *doping* atau pengotoran pada *biochar* dapat mengubah struktur pori-pori dan permukaan material. *Doping* dapat menyebabkan pengisian atau penyumbatan pori-pori, sehingga mengurangi luas permukaan yang tersedia untuk reaksi atau penyerapan.
- Interaksi dan Reaksi: Molekul atau atom yang masuk ke dalam struktur *biochar* saat di-*doping* dapat mengubah ikatan atau berinteraksi dengan komponen *biochar*, sehingga mempengaruhi permukaan dan struktur material.
- Pemrosesan: Metode atau kondisi proses *doping* juga dapat mempengaruhi luas permukaan. Dalam beberapa kasus, kondisi pemanasan atau perlakuan kimia selama proses *doping* dapat mengubah struktur dan luas permukaan dari sampel *biochar*.
- Jenis *doping* yang digunakan: Beberapa *doping* mungkin mempengaruhi luas permukaan lebih signifikan daripada yang lain. *Doping* nitrogen pada *biochar* dapat mengubah sifat-sifat fisik dan kimia *biochar*, yang pada gilirannya mempengaruhi penyerapan adsorbat.

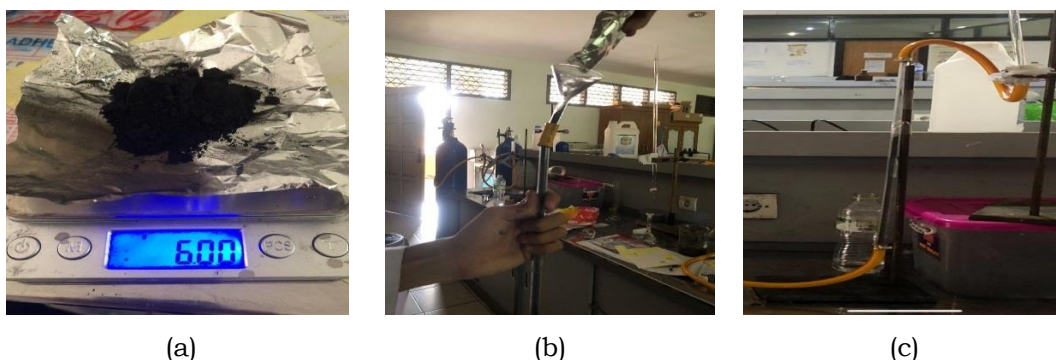
Doping nitrogen pada *biochar* dapat meningkatkan luas permukaan spesifik dan struktur pori-pori, sehingga meningkatkan ketersediaan area permukaan untuk interaksi dengan adsorbat. Nitrogen juga dapat membentuk gugus fungsional seperti amida, amina, atau gugus nitroksil pada *biochar*, yang dapat berperan dalam penyerapan zat-zat terlarut. Gugus-gugus fungsional ini dapat meningkatkan afinitas dan interaksi dengan molekul-molekul adsorbat, sehingga meningkatkan kapasitas penyerapan dan efisiensi penyerapan. Selain itu, *doping* nitrogen pada *biochar* juga dapat mengubah sifat kimia permukaan, seperti meningkatkan keasaman atau mengubah tingkat oksidasi. Perubahan ini dapat mempengaruhi sifat permukaan *biochar*, termasuk interaksi dengan adsorbat.

Proses penyerapan melibatkan interaksi antara permukaan adsorben dengan adsorbat melalui gaya-gaya intermolekul seperti gaya van der Waals, ikatan hidrogen, atau interaksi elektrostatik. Ketika adsorbat berinteraksi dengan permukaan adsorben, molekul adsorbat dapat terikat secara fisik atau secara kimiawi pada permukaan atau dalam pori-pori adsorben. *Biochar* memiliki gaya van der Waals saat menyerap adsorbat karena interaksi tersebut merupakan salah satu gaya antarmolekul yang umum terjadi di permukaan

material padat. Gaya van der Waals merupakan gaya tarik-menarik antara molekul-molekul yang terjadi karena fluktuasi sementara muatan positif dan negatif pada molekul tersebut. Ketika *biochar* menyerap adsorbat, seperti molekul metilen biru, molekul-molekul adsorbat tersebut mendekati permukaan *biochar*. Pada jarak yang sangat dekat, terjadi interaksi antara muatan positif pada *biochar* dengan muatan negatif pada adsorbat, dan sebaliknya. Interaksi ini adalah hasil dari gaya van der Waals yang terjadi karena polarisasi sementara elektron pada molekul-molekul tersebut. Gaya van der Waals tidak hanya terjadi antara molekul polar, tetapi juga antara molekul nonpolar. Pada *biochar*, permukaan yang porus dan kompleks memiliki struktur karbon yang mengandung ikatan kovalen nonpolar. Oleh karena itu, gaya van der Waals berperan penting dalam penyerapan adsorbat pada permukaan *biochar*, terlepas dari apakah adsorbat itu sendiri polar atau nonpolar. Selain gaya van der Waals, ada juga kemungkinan adanya interaksi elektrostatik atau interaksi kimia lainnya antara *biochar* dan adsorbat tergantung pada karakteristik kimia dan permukaan *biochar* yang spesifik. Namun, dalam konteks umum, gaya van der Waals memiliki peran yang signifikan dalam proses penyerapan adsorbat pada *biochar*.

4.6 Rangkaian Alat Capture Gas CO₂

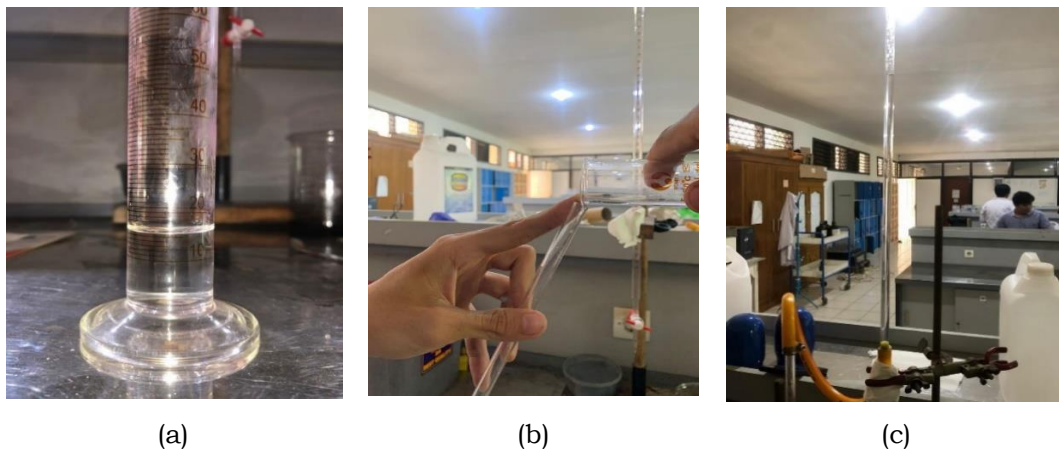
Pada percobaan *capture* CO₂ menggunakan *biochar* termodifikasi sebagai media adsorpsi ini dilakukan pada alat yang rakit secara mandiri, terdiri dari dua buah kolom yang digunakan sebagai media analisa. Kolom pertama, dirakit berdasarkan modifikasi dari Promraksa dan Rakmak, (2016) untuk digunakan sebagai tempat meletakkan *N-doped modified biochar* untuk *capture* (menangkap) CO₂ di udara yang dialirkan ke dalamnya yang disebut sebagai “*fixed-bed adsorption column*”.



Gambar 15. (a) Ditimbang 6 gr *biochar* (b) *biochar* dimasukkan kedalam *packed column* (c) *fixed-bed adsorption column* yang telah dirakit

Sedangkan kolom kedua, digunakan sebagai tempat menyimpan larutan NaOH yang nantinya akan menyerap sisa-sisa gas CO₂ yang melewati kolom

pertama menuju kolom kedua melalui pipa penghubung sebelum larutan NaOH dititrasi. Kolom kedua tersebut dinamakan “*absorber purging bubble column*” berdasarkan informasi modifikasi oleh Mahsuri *et al.*, (2013).



Gambar 16. 15 mL larutan NaOH 1 M (b) 15 mL larutan NaOH dimasukkan ke dalam *packed column* (c) *absorber purging bubble column* yang telah dirakit

Instrumen *capture CO₂* terdapat 2 flowmeter yang harus diletakan tegak lurus agar pembacaan laju alir gas nya stabil dan akurat. Flowmeter terdiri dari flowmeter untuk penentuan laju alir gas CO₂ dan flowmeter untuk penentuan laju alir gas nitrogen. Flowmeter berfungsi untuk mengukur dan memantau laju aliran gas yang masuk ke dalam proses penyerapan gas CO₂. Pemantauan ini penting agar proses penyerapan dapat diatur dan dikendalikan sesuai dengan kebutuhan. Flowmeter dikontakkan dengan selang gas merk PVC. Selang gas berfungsi untuk saluran pengaliran gas CO₂ dari tabung gas ke-*packed column*. Pada alat rangkaian menggunakan Selang pipa tiga berfungsi untuk saluran gas nitrogen dan karbon dioksida menuju *packed column*.



Gambar 17. Flowmeter gas CO₂ dan N₂ yang telah dirakit

Pada alat instrumen *capture CO₂* menggunakan tabung gas yang berisi gas CO₂ dan N₂. Tabung gas nitrogen (N₂): sebagai gas pembawa untuk

mengalirkan gas CO_2 dari sumbernya melalui larutan NaOH dan media penyerap *biochar* dan berfungsi untuk pengencer gas CO_2 . Gas nitrogen juga ikut membantu dalam memfasilitasi transfer massa antara gas CO_2 , larutan NaOH , dan media penyerap *biochar*. Ini meningkatkan kontak dan interaksi antara komponen-komponen ini, dan meningkatkan efisiensi proses penyerapan gas CO_2 . Tabung gas karbon dioksida (CO_2) : CO_2 bertindak sebagai adsorbat dalam proses adsorpsi, di mana CO_2 diserap atau dikumpulkan oleh permukaan material adsorben. Penggunaan gas juga membutuhkan regulator gas. Dalam hal ini terdapat 2 regulator yaitu regulator gas CO_2 dan N_2 . Regulator gas CO_2 dan gas nitrogen berfungsi untuk mengurangi tekanan tinggi dari tabung atau sumber gas menjadi tekanan yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Gas dalam tekanan tinggi dapat menjadi berbahaya jika tidak diatur dengan baik. Regulator gas juga membantu menjaga tekanan gas dalam batas yang aman untuk menghindari risiko kebocoran, ledakan, atau kerusakan peralatan.



Gambar 18. Tabung gas CO_2 dan N_2 yang masing-masing telah dipasangkan regulator gas

Instrumen yang telah dirakit terdiri dari dua flowmeter, tabung gas yang berisi gas nitrogen dan karbon dioksida, 2 *packed column*, selang gas, regulator gas nitrogen, regulator gas CO_2 dan selang gas. Kolom *capture fixed-bed* dibuat dari tabung transparan dengan dimensi tinggi 50 cm dan diameter 3 cm. *Fiberglass* dipasang dibagian bawah kolom untuk mendukung adsorben. Variasi laju alir yang digunakan yaitu 1; 3; 5; 7 dan 10 L/Menit. Sampel *biochar* 6,0 g digunakan untuk menguji kapasitas *capture* CO_2 pada setiap percobaan dan masing-masing variasi laju alir gas CO_2 dialirkan selama 2 menit. Eksperimen *capture* gas CO_2 diuji pada tekanan atmosfer dan suhu kamar. Gas yang tidak terserap *fixed-bed adsorption column* dialirkan ke *absorber purging bubble column* yang berisi larutan NaOH 1 M sebanyak 15 mL. Dalam pengaplikasian alat

capture tersebut, larutan NaOH yang digunakan yaitu sebanyak 15 mL. Berikut rangkaian alat yang telah selesai dirakit pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.



Gambar 19. Rangkaian Alat *Capture CO₂* pada *fixed-bed N-doped modified biochar* dan NaOH absorber purging bubble

4.7 Titrasi Asam Basa

Tabel 4. Tabel hasil titrasi asam basa

Adsorben	Laju Alir Gas CO ₂ (L/Menit)	Volume HCl yang terpakai (mL)		Volume HCl rata-rata (mL)	Volume NaOH Pasca Penyerapan (mL)	Ce (Mg/L)
		P ₁	P ₂			
<i>Biochar Non Aktivasi</i>	1	3,6	3,4	3,5	15	38,5
<i>Biochar Non Aktivasi</i>	3	3,8	3,8	3,8	15	13,915
<i>Biochar Non Aktivasi</i>	5	4,2	4	4,1	15	9,009
<i>Biochar Non Aktivasi</i>	7	4,6	4,2	4,4	15	6,91
<i>Biochar Non Aktivasi</i>	10	4,6	4,8	4,7	15	5,1645
<i>N-Doped Modified Biochar</i>	1	2,8	3	2,9	15	31,845
<i>N-Doped Modified Biochar</i>	3	3,2	3,4	3,3	15	12,1
<i>N-Doped Modified Biochar</i>	5	3,8	3,6	3,7	15	8,14
<i>N-Doped Modified Biochar</i>	7	4,2	4	4,1	15	6,411
<i>N-Doped Modified Biochar</i>	10	4,6	4,4	4,5	15	4,95

Titration merupakan sebuah metode analisis kimia dalam penentuan konsentrasi dari suatu larutan dengan mereaksikan larutan tersebut dengan larutan yang lain yang sudah diketahui konsentrasinya. Sesuai dengan definisinya, maka tujuan utama dari titration itu adalah penentuan konsentrasi suatu zat yang belum diketahui.

Titration yang dilakukan pada penentuan molaritas NaOH ini, termasuk dalam titration asam basa jenis asidimetri. Asidimetri merupakan penentuan kadar secara kuantitatif terhadap senyawa yang bersifat basa dengan menggunakan larutan standar yang bersifat asam. Pada percobaan ini digunakan asam klorida sebagai larutan standar primer yang akan dipakai sebagai pentiter untuk menentukan konsentrasi analit NaOH pasca penyerapan CO₂. Untuk membuat larutan standar primer ini, maka dibutuhkan senyawa murni berupa padatannya. Oleh karena itu, dibutuhkan 7,3 gram padatan asam klorida murni yang kemudian dilarutkan dalam 200 mL air, agar larutan standar primer tersebut diketahui secara pasti konsentrasinya sehingga bisa digunakan untuk menitrasi dan juga menentukan kadar NaOH. Disini NaOH sebelum penyerapan CO₂ memiliki molaritas sebesar 1 M sebagai analit atau zat yang akan ditentukan molaritas NaOH dan CO₂ pasca penyerapan CO₂ menggunakan alat *capture* CO₂.

Setelah dilakukan uji penyerapan gas CO₂ dengan *fixed-bed N-doped modified biochar*, selanjutnya dihitung gas CO₂ tidak terserap oleh NaOH 1 M dengan menggunakan metode titration asam-basa. Pertama-tama disiapkan alat titration yang telah diisi dengan HCl 1 M, dan diatur posisi buret supaya lurus sehingga tepat dalam pembacaan skala. Selanjutnya, diambil sampel yang telah dilakukan proses penyerapan CO₂ dengan gelas ukur, dimasukkan kedalam Erlenmeyer 250 mL, lalu ditambahkan 3 tetes indikator PP. Setelah itu, dilakukan proses titration sambil digoyang perlahan-lahan agar pencampuran merata. Jika sampel sudah berwarna bening maka hentikan proses titration HCl dan catat volume titran yang diperoleh.

Sebuah proses dari titration dapat dikatakan telah selesai atau berakhir apabila telah mencapai titik akhir (*end point*). Titik akhir ini dapat diketahui atau dilihat apabila analit telah berubah warna sesuai dengan indikator yang digunakan. Titik ekuivalen berbeda dengan titik akhir. Titik ekuivalen merupakan titik yang menunjukkan saat titran ditambah bereaksi seluruhnya dengan analit yang dititrasi. Dengan kata lain, jumlah mol titran setara dengan jumlah mol analit menurut perhitungan stoikiometri. Sedangkan titik akhir merupakan tanda dimana proses titration telah selesai yang bisa diamati secara visual dengan menggunakan bantuan dari indikator. Idealnya titik akhir titration

terjadi bersamaan dengan titik ekuivalen, tetapi ini jarang terjadi. Hal ini disebabkan karena titik akhir mampu diamati mata melalui perubahan warna pada indikator sedangkan pada titik ekuivalen tidak dapat diamati karena tidak adanya indikator yang mampu menunjukkan kejadian ini, kecuali dengan metode tertentu saja. Sehingga pada umumnya, titik akhir tercapai berdekatan setelah titik ekuivalen. Dalam mengamati titik akhir dapat digunakan kertas putih sebagai alas, hal ini bertujuan untuk mempermudah dalam mengidentifikasi perubahan warna yang terjadi dari kekontrasan warna putih dari kertas dan perubahan warna dari indikator itu sendiri, selain itu juga untuk mengurangi pembiasan cahaya yang terjadi. Selain itu dalam percobaan ini dilakukan titrasi dengan pengulangan sebanyak dua kali pada setiap penggunaan adsorben *biochar* dan NaOH pasca penyerapan CO₂, hal ini bertujuan untuk membandingkan volume titran (asam klorida) yang dibutuhkan untuk menitrasi NaOH pasca penyerapan CO₂ agar didapat hasil yang lebih presisi.

Adapun jumlah asam klorida yang dibutuhkan pada penggunaan laju alir gas CO₂ 1 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *biochar* non aktivasi) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 3,6 mL dan 3,4 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 3,5 mL. Pada laju alir gas CO₂ 3 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *biochar* non aktivasi) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 3,8 mL dan 3,8 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 3,8 mL. laju alir gas CO₂ 5 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *biochar* non aktivasi) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 4,2 mL dan 4 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 4,1 mL. laju alir gas CO₂ 7 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *biochar* non aktivasi) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 4,6 mL dan 4,2 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 4,4 mL. laju alir gas CO₂ 10 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *biochar* non aktivasi) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 4,6 mL dan 4,8 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 4,7 mL. Sedangkan laju alir gas CO₂ 1 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *N-Doped Modified Biochar*) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 2,8 mL dan 3 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 2,9 mL. laju alir gas CO₂ 3 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *N-Doped Modified Biochar*) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 3,2 mL dan 3,4 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 3,3 mL. Laju alir gas CO₂ 5 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *N-Doped Modified Biochar*) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 3,8 mL dan 3,6 mL dengan rata-rata

asam klorida yang digunakan ialah 3,7 mL. Laju alir gas CO₂ 7 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *N-Doped Modified Biochar*) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 4,2 mL dan 4 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 4,1 mL. Laju alir gas CO₂ 10 L/Menit (CO₂ yang tidak terjerap pada *N-Doped Modified Biochar*) titrasi pertama dan kedua secara berurut adalah sebesar 4,6 mL dan 4,4 mL dengan rata-rata asam klorida yang digunakan ialah 4,5 mL. Penggunaan masing-masing NaOH pasca penyerapan CO₂ masing-masing 15 mL. Setelah dilakukan titrasi dan perhitungan didapat molaritas NaOH, jika diketahui molaritas NaOH kita bisa menentukan molaritas CO₂ dari reaksi dibawah ini yaitu



Berikut hasil molaritas NaOH dan CO₂ pasca titrasi yaitu :

Tabel 5. Hasil molaritas NaOH dan CO₂ pasca titrasi

No	Adsorben	Laju Alir Gas CO ₂ (L/Menit)	Molaritas Pasca Titrasi Asam Basa (M)	
			NaOH	CO ₂
1	<i>Biochar</i> Non Aktivasi	1	0,233	0,116
2	<i>Biochar</i> Non Aktivasi	3	0,253	0,1265
3	<i>Biochar</i> Non Aktivasi	5	0,273	0,1265
4	<i>Biochar</i> Non Aktivasi	7	0,293	0,1465
5	<i>Biochar</i> Non Aktivasi	10	0,313	0,1565
6	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	1	0,193	0,0965
7	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	3	0,22	0,11
8	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	5	0,247	0,123
9	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	7	0,273	0,136
10	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	10	0,3	0,15

Dalam titrasi ini, maka akan menghasilkan larutan standar baru yang diketahui konsentrasinya yaitu NaOH. Larutan standar ini kemudian disebut sebagai larutan standar sekunder. Berdasarkan molaritas CO₂ yang didapatkan pada saat penyerapan gas CO₂ ke dalam larutan NaOH, molaritas CO₂ dalam larutan NaOH meningkat seiring bertambahnya laju alir gas CO₂ karena larutan NaOH berfungsi sebagai agen penyerap CO₂. Saat CO₂ melewati larutan NaOH, terjadi reaksi kimia antara CO₂ dan NaOH. CO₂ akan bereaksi dengan ion hidroksida (OH⁻) dalam NaOH untuk membentuk ion bikarbonat (HCO₃⁻) dan karbonat (CO₃²⁻) yang mengakibatkan peningkatan konsentrasi ion-ion bikarbonat dan karbonat dalam larutan, yang pada gilirannya meningkatkan molaritas CO₂ dalam larutan NaOH (Yoo et al., 2013).

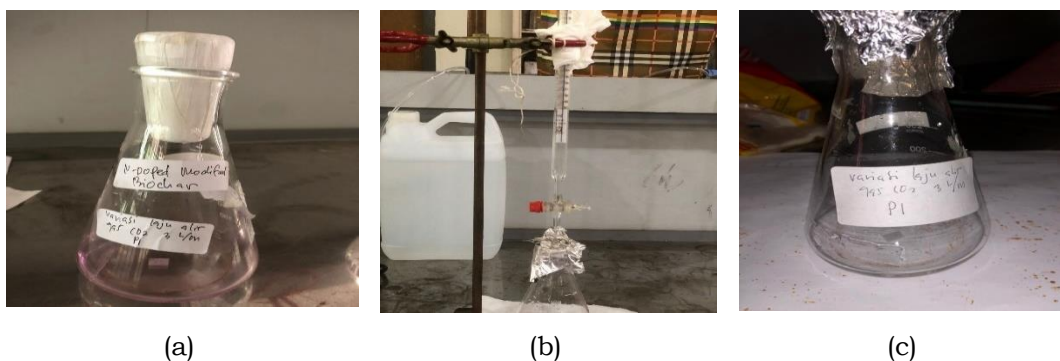
Berdasarkan hasil titrasi yang didapatkan pada penggunaan adsorben Biochar non aktivasi digunakan variasi laju alir gas CO₂ yaitu 1;3;5;7;10

L/Menit didapatkan Konsentrasi gas CO₂ yang terserap oleh larutan NaOH (ppm) yaitu masing-masing 38,5; 13,915; 9,009; 6,91 dan 5,1645 mg/L. Sedangkan penggunaan adsorben *N-Doped Modified Biochar* juga digunakan variasi laju alir gas CO₂ yaitu 1;3;5;7 dan 10 L/Menit didapatkan konsentrasi gas CO₂ yang terserap oleh larutan NaOH (ppm) yaitu masing-masing 31,845; 12,1; 8,14; 6,411 dan 4,95 mg/L. Berikut *packed column* yang berisi NaOH yang telah dikontakkan dengan gas CO₂ dan N₂ yaitu :



Gambar 20. Gelembung gas CO₂ dalam larutan NaOH pada *packed column*

Dalam percobaan ini digunakan indikator fenolftalein (PP). Tujuan digunakannya fenolftalein (PP) sebagai indikator, karena pada titrasi asam basa ini digunakan asam kuat (asam klorida) dan basa kuat (NaOH) yang nantinya akan menghasilkan senyawa garam yang memiliki sifat basa. Hal ini sangat sesuai dengan indikaor PP yang mempunyai trayek pH antara 8,3 sampai 10, sehingga dapat diidentifikasi bila telah mencapai titik akhir tersebut. Saat mencapai titik akhir indikator fenolftalein (PP) akan berubah warna menjadi merah jambu keunguan dari semula yang tidak berwarna.

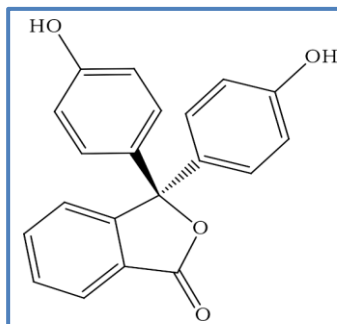


Gambar 21. Larutan NaOH pasca penyerapan gas CO₂ yang telah dimasukkan indikator PP (b) Titrasi dengan HCl (c) Terjadi perubahan warna (titik akhir)

Adapun persamaan reaksi yang terjadi pada titrasi ini adalah sebagai berikut:

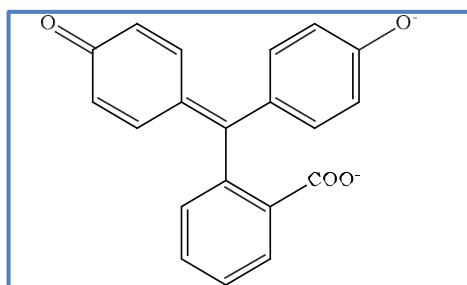
$\text{HCl (aq)} + \text{NaOH (aq)} \rightarrow \text{NaCl (aq)} + \text{H}_2\text{O (aq)}$ Indikator fenilftalein atau yang sering disebut PP merupakan senyawa kimia dengan rumus molekul C₂₀H₁₄O₄ yang dapat dibuat melalui reaksi kondensasi (penggabungan), menggunakan

fenol dan ftalat anhidrad. Indikator fenolftalein memiliki nama IUPAC atau nama resmi 3,3-bis (4-*hydroxyphenyl*) isobenzofuran-1(3H)-one. Indikator fenolftalein sangat sering digunakan dalam titrasi asam basa, fenolftalein akan berubah warna dari tidak berwarna dalam larutan asam menjadi merah jambu keunguan dalam larutan basa. Berikut ini merupakan struktur molekul dari indikator fenolftalein



Gambar 22. Struktur molekul fenolftalein

Apabila fenolftalein diberikan pada larutan yang memiliki kelebihan basa warna larutan yang semula merah jambu keunguan akan memudar atau tidak berwarna jika dibiarkan selama beberapa saat. Itulah mengapa saat persiapan sampel atau bahan jangan membiarkan terlalu lama memberikan indikator PP pada larutan basa yang diuji agar warnanya tidak hilang perlahan sebelum dilakukan titrasi dan tidak mempengaruhi hasil titrasi yang akan dilakukan. Berikut ini struktur molekul Fenolftalein (PP) dalam suasana basa setelah bereaksi dengan NaOH yaitu :



Gambar 23. Struktur Molekul Fenolftalein Dalam Suasana Basa

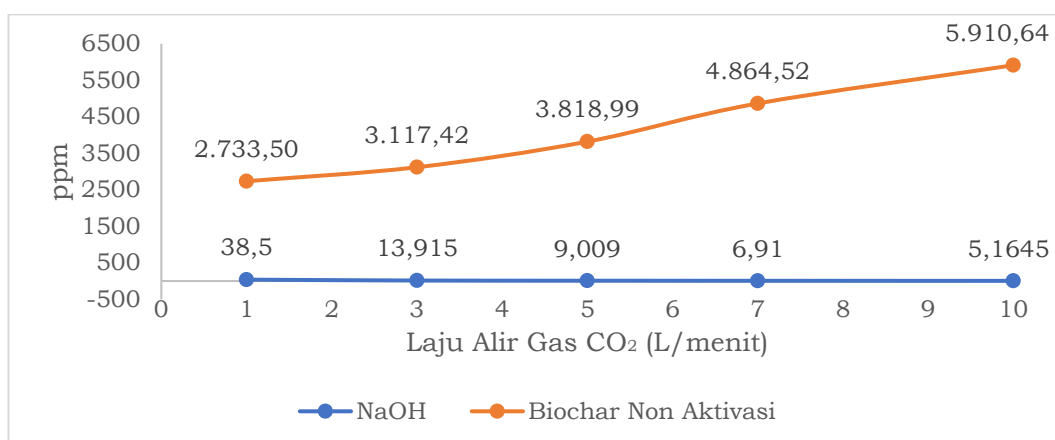
4.8 Hasil Penyerapan Gas CO₂ Pasca Penyerapan Biochar dan Titrasi

Berikut hasil penyerapan gas CO₂ oleh *biochar* dan NaOH yaitu sebagai berikut

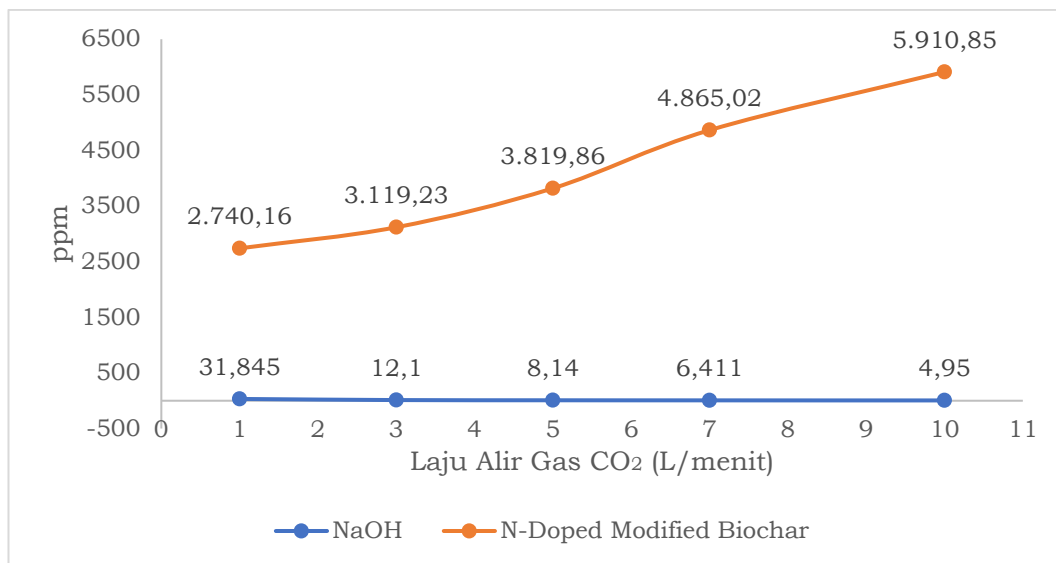
Tabel 6. Tabel hasil penyerapan gas CO₂ oleh *biochar* dan NaOH

Sampel	Laju Alir Gas CO ₂ (L/Menit)	Co (ppm)	Hasil Penyerapan NaOH (ppm) (Ce)	Hasil Penyerapan Biochar (ppm) (Co-Ce)
Biochar Non Aktivasi	1	2.772	38,5	2.733,5
Biochar Non Aktivasi	3	3.131,333	13,915	3.117,418
Biochar Non Aktivasi	5	3.828	9,009	3.818,991
Biochar Non Aktivasi	7	4.871,428	6,91	4.864,518
Biochar Non Aktivasi	10	5.915,8	5,1645	5.910,635
N-Doped Modified Biochar	1	2.772	31,845	2.740,155
N-Doped Modified Biochar	3	3.131,333	12,1	3.119,233
N-Doped Modified Biochar	5	3.828	8,14	3.819,86
N-Doped Modified Biochar	7	4.871,428	6,411	4.865,017
N-Doped Modified Biochar	10	5.915,8	4,95	5.910,85

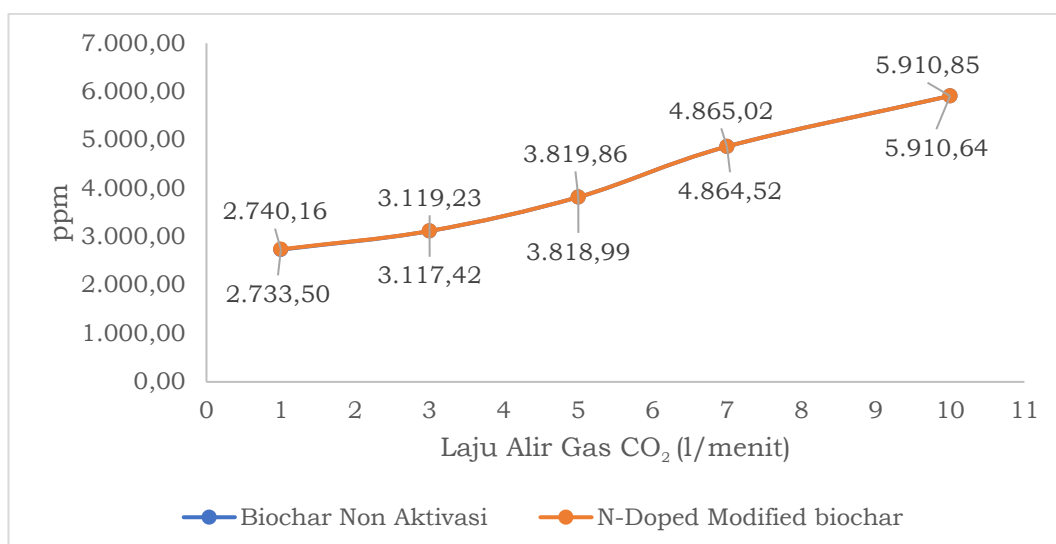
Dari data di atas bisa ditentukan hubungan laju alir gas CO₂ terhadap penyerapan gas CO₂ oleh adsorben *biochar* dan larutan NaOH dalam bentuk grafik di bawah ini yaitu :



Gambar 24. Grafik Hubungan Laju Alir Gas CO₂ Oleh Penyerapan Gas CO₂ Oleh *Biochar* Non Aktivasi dan NaOH



Gambar 25. Grafik Hubungan Laju Alir Gas CO₂ Terhadap Penyerapan Gas CO₂ Oleh *N-Doped Modified Biochar* dan NaOH

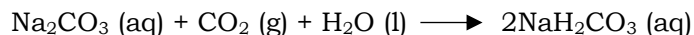


Gambar 26. Grafik Hubungan Laju Alir Gas CO₂ Terhadap Penyerapan CO₂ Oleh *N-Doped Modified Biochar* dan *Biochar Non Aktivasi*

Biochar adalah bahan organik padat yang dihasilkan dari proses pirolisis (penguraian termal bahan organik dalam kondisi tanpa oksigen). *Biochar* memiliki struktur pori-pori yang besar dan permukaan yang luas, yang membuatnya memiliki kapasitas penyerapan yang baik terhadap berbagai senyawa, termasuk CO₂.

Penyerapan CO₂ oleh NaOH (Setelah Dititrasi): NaOH (natrium hidroksida) adalah basa kuat yang dapat bereaksi dengan asam karbonat (H₂CO₃), yang terbentuk ketika CO₂ larut dalam air membentuk asam karbonat. Reaksi ini mengarah pada pembentukan garam natrium karbonat (Na₂CO₃),

yang umumnya tidak memiliki sifat adsorpsi yang kuat terhadap CO₂ seperti yang dimiliki oleh *biochar*. Berikut reaksi kimia yang terjadi yaitu :



Berdasarkan grafik pada **Gambar 24** yang menjelaskan hubungan laju alir gas CO₂ terhadap penyerapan gas CO₂ oleh *biochar* non aktivasi dan larutan NaOH. Dilihat dari grafik tersebut bahwasanya semakin tinggi laju alir gas CO₂ semakin banyak penyerapan gas CO₂ sedangkan semakin tinggi laju alir gas CO₂ semakin rendah penyerapan gas CO₂ oleh NaOH. Ketika laju aliran gas CO₂ semakin tinggi, berarti ada lebih banyak molekul CO₂ yang bersentuhan dengan permukaan *biochar* non aktivasi. *Biochar* memiliki sifat adsorpsi (penyerapan) yang memungkinkan molekul CO₂ melekat pada permukaannya melalui gaya-gaya van der Waals dan interaksi kimia lainnya. Semakin tinggi laju alir gas CO₂, semakin banyak molekul CO₂ yang dapat diadsorpsi oleh permukaan *biochar* dalam satu waktu. Oleh karena itu, penyerapan CO₂ oleh *biochar* akan semakin tinggi seiring dengan peningkatan laju alir gas CO₂.

Berdasarkan grafik pada **Gambar 25** yang menjelaskan hubungan laju alir gas CO₂ terhadap penyerapan gas CO₂ oleh *N-Doped Modified Biochar* dan NaOH, bentuk penyerapan nya tidak jauh berbeda dengan penyerapan oleh *biochar* non aktivasi. Grafik tersebut menjelaskan semakin tinggi laju alir gas CO₂ semakin tinggi penyerapan gas CO₂ oleh *N-Doped Modified Biochar* sedangkan semakin tinggi laju alir gas CO₂ maka semakin rendah penyerapan gas CO₂ oleh NaOH. Berikut penyebab menurunnya penyerapan CO₂ oleh larutan NaOH yaitu sebagai berikut.

- Ketersediaan NaOH: Jika larutan NaOH terbatas dalam konsentrasi, maka ketika CO₂ larut di dalamnya, konsentrasi NaOH akan menurun, yang pada gilirannya dapat memperlambat reaksi penyerapan CO₂.
- Keseimbangan Kimia: Reaksi antara CO₂ dan NaOH adalah reaksi kesetimbangan kimia. Saat CO₂ direaksikan dengan NaOH, ion karbonat (CO₃²⁻) terbentuk, tetapi reaksi ini dapat mencapai titik jenuh. Semakin tinggi laju alir CO₂, semakin cepat larutan mencapai titik jenuhnya, sehingga penyerapan CO₂ menjadi kurang efisien.
- Pembentukan Lapisan: Ketika CO₂ terlarut dalam larutan NaOH, lapisan ion karbonat dapat terbentuk di permukaan larutan, yang dapat menghalangi kontak CO₂ tambahan dengan larutan NaOH. Ini dapat mengurangi efisiensi penyerapan CO₂.

Berdasarkan grafik pada **Gambar 26** yang menjelaskan hubungan laju alir gas CO₂ terhadap penyerapan gas CO₂ oleh *biochar* non aktivasi dan *n-doped modified biochar*. Grafik tersebut menjelaskan bahwasanya seiring

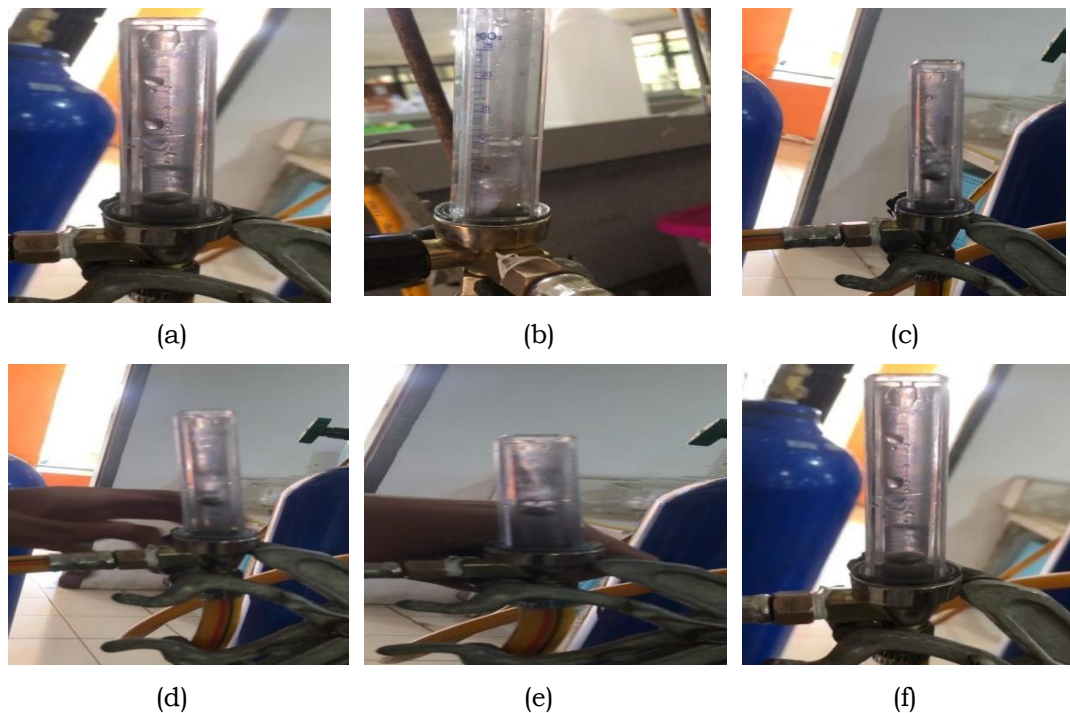
bertambahnya laju alir gas CO₂ semakin tinggi penyerapan CO₂ oleh *biochar* non aktivasi dan *n-doped modified biochar*. Penyerapan gas CO₂ terendah oleh *biochar* non aktivasi sebesar 2.733,5 mg/L pada laju alir gas CO₂ 1 L/Menit, sedangkan penyerapan gas CO₂ tertinggi yaitu 5.910,635 mg/L dengan laju alir 10 L/Menit. Sedangkan penyerapan gas CO₂ terendah oleh *n-doped modified biochar* sebesar 2.740,155 mg/L pada laju alir gas CO₂ 1 L/Menit, penyerapan CO₂ tertinggi yaitu 5.910,85 mg/L pada laju alir gas CO₂ 10 L/Menit.

Dilihat dari efisiensi penyerapan CO₂ oleh adsorben, *n-doped modified biochar* memiliki penyerapan tertinggi dibanding *biochar* non aktivasi. Hal ini dikarenakan *N-Doped Modified biochar* memiliki luas permukaan spesifik yang lebih tinggi dibanding *biochar* sebelum aktivasi karena *biochar* yang digunakan tersebut telah dimodifikasi KOH 2N dan telah dilakukan pendopingan senyawa nitrogen yang membuat daya serap CO₂ semakin tinggi. Kandungan gugus fungsi N berperan untuk *capture* CO₂ bersama dengan volume mikropori sempit, yang terkait dengan nonpolaritas dan polarisasi lemah dari molekul CO₂ (Creamer *et al.*, 2016). Gugus fungsi nitrogen pada *biochar* dapat berperan dalam mengikat karbon dioksida (CO₂) melalui beberapa mekanisme berikut:

1. Adsorpsi Fisik: Gugus fungsi nitrogen pada *biochar* dapat berperan dalam adsorpsi CO₂ secara fisik. Permukaan *biochar* yang mengandung nitrogen memiliki sifat adsorben yang kuat, dan gugus fungsi ini dapat berinteraksi dengan molekul CO₂ melalui gaya-gaya Van der Waals. Ini menyebabkan CO₂ secara fisik menempel pada permukaan *biochar* yang kaya nitrogen.
2. Interaksi Kimia: Gugus fungsi nitrogen pada *biochar* dapat membentuk ikatan kimia dengan CO₂. Terutama, gugus fungsi seperti amina (NH₂) dapat berinteraksi dengan CO₂ untuk membentuk senyawa seperti karbamida (NH₂CONH₂) atau karbonat. Interaksi ini mengikat CO₂ secara kimia, yang dapat meningkatkan kapasitas *biochar* untuk menangkap dan menyimpan CO₂.
3. Perubahan Struktur Pori-pori: pendopingan *biochar* dengan nitrogen, ini dapat meningkatkan kapasitas *biochar* untuk menangkap CO₂ dalam pori-pori dan celah-celahnya.
4. Permukaan yang Terkondisi: *Biochar* yang diaktivasi dengan nitrogen sering kali memiliki permukaan yang lebih terkondisi dan lebih bersifat asam. Ini dapat meningkatkan kemampuan *biochar* untuk berinteraksi dengan CO₂ dan mengikatnya.
5. Selektivitas Adsorpsi: Gugus fungsi nitrogen pada *biochar* juga dapat memberikan selektivitas adsorpsi terhadap CO₂ dibandingkan dengan

gas-gas lainnya. Ini membuatnya lebih efisien dalam menangkap CO_2 dalam campuran gas.

Berdasarkan tekanan parsial yang digunakan pada alat *capture* CO_2 didapatkan laju alir gas CO_2 yang sesuai dengan variasi laju alir gas CO_2 yang digunakan yaitu sebagai berikut:

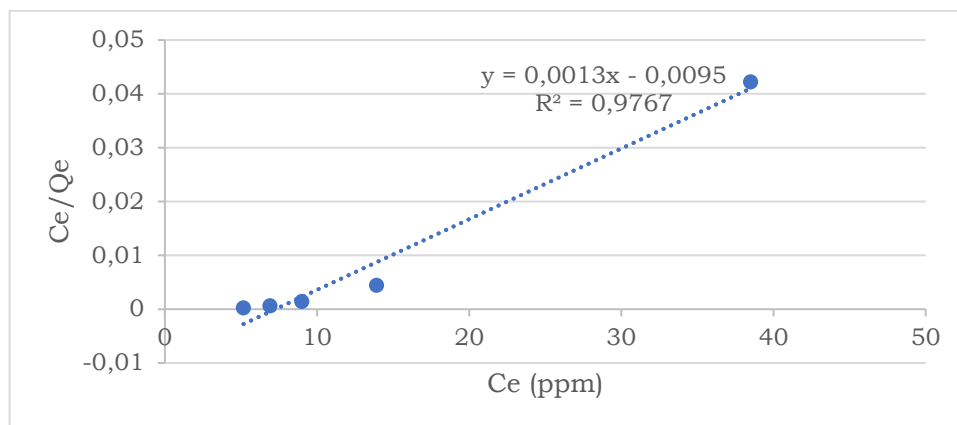


Gambar 27. Laju alir gas CO_2 1 L/Menit (b) Laju Alir Gas CO_2 3 L/Menit (c) Laju Alir Gas CO_2 5 L/Menit (d) Laju Alir Gas CO_2 7 L/Menit (e) Laju Alir Gas CO_2 10 L/Menit (f) Laju Alir Gas N_2 0,5 L/Menit

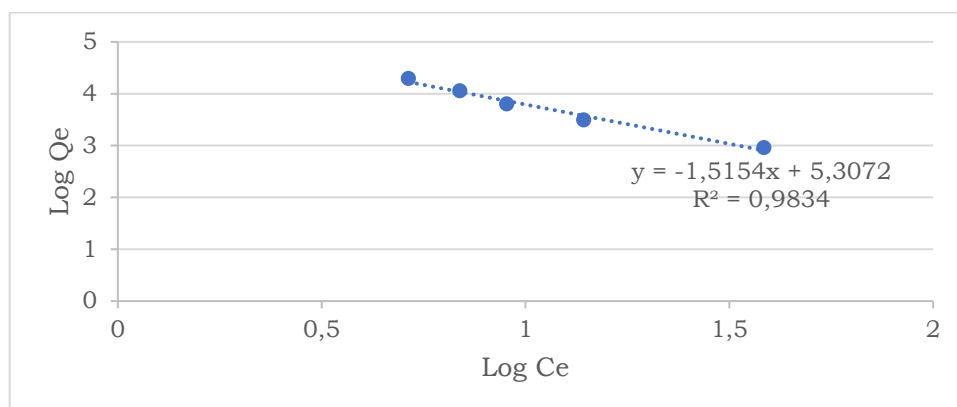
Penentuan Isoterm Adsorpsi *Biochar* Non Aktivasi dan *N-Doped Modified Biochar*

Isoterm adsorpsi adalah hubungan antara jumlah zat yang diadsorpsi dan tekanan kesetimbangan atau konsentrasi kesetimbangan pada temperatur tertentu. Model isoterm adsorpsi untuk tiap massa *biochar* non aktivasi dan *N-Doped Modified Biochar* ditentukan dengan melihat nilai koefisien (R^2) pada persamaan adsorpsi. Nilai koefisien korelasi terbesar menunjukkan bahwa proses adsorpsi menggunakan adsorbat tersebut sesuai dengan karakteristik asumsi. Semakin besar nilai koefisien korelasi menunjukkan bahwa terdapat korelasi yang signifikan antara jumlah gas CO_2 yang diserap dengan massa *N-Doped Modified Biochar* dan *biochar* non aktivasi. Dalam menentukan jenis isoterm adsorpsi digunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich. Isoterm adsorpsi ini digunakan untuk mempelajari mekanisme adsorpsi gas CO_2 dengan *biochar* non aktivasi dan *n-doped modified biochar*. Penentuan model isoterm pada proses adsorpsi *biochar* non aktivasi dan *n-doped modified biochar*

menggunakan persamaan regresi linear dengan membandingkan nilai koefisien korelasi (R^2) dari grafik hubungan nilai C_e/q_e terhadap C_e untuk isoterm Langmuir, sehingga diperoleh persamaan linear dengan intersep $1/a$ dan kemiringan (b/a) . Grafik hubungan antara $\log C_e$ terhadap $\log Q_e$ digunakan untuk penentuan isoterm Freundlich. Adapun kurva yang didapat dari penentuan adsorpsi gas CO_2 menggunakan Langmuir dan Freundlich pada *biochar* non aktivasi dapat dilihat seperti berikut.



Gambar 28. Kurva Isoterm Langmuir *Biochar* Non Aktivasi

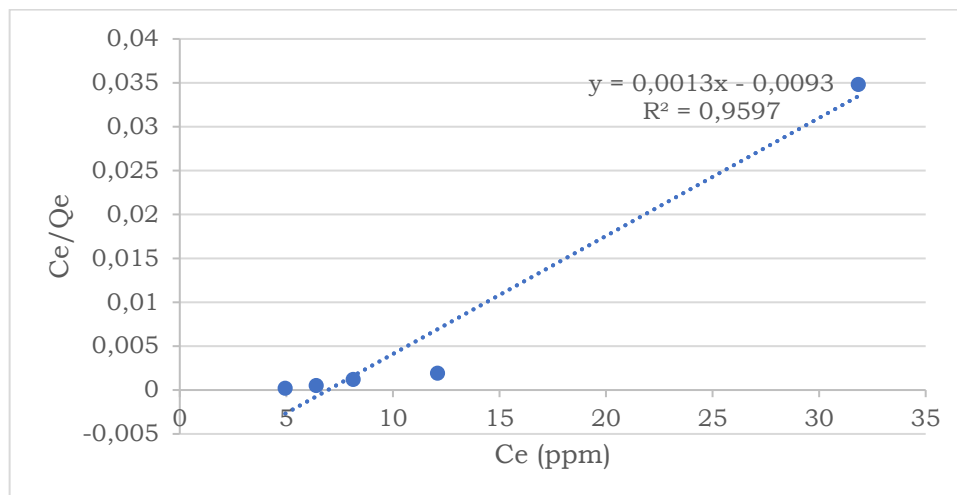


Gambar 29. Kurva Isoterm Freundlich *Biochar* Non Aktivasi

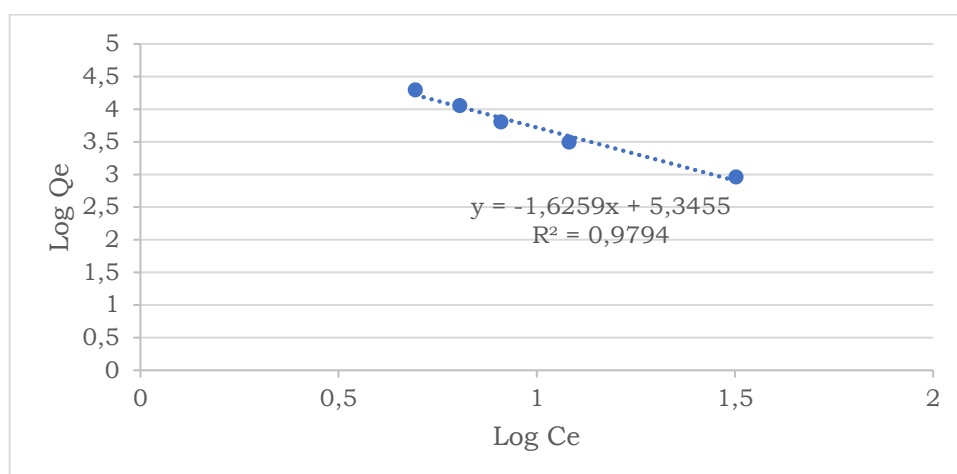
Model persamaan Langmuir mengasumsikan adsorpsi monolayer pada permukaan yang mengandung sejumlah pusat-pusat aktif yang identik. Model ini menganggap bahwa energi adsorpsi seragam pada permukaan dan tidak ada perpindahan adsorbat pada bidang permukaan, menunjukkan bahwa adsorpsi kimia. Model persamaan Freundlich mengasumsikan bahwa terdapat lebih dari satu lapisan permukaan (multilayer) dari sisi bersifat heterogen dan menunjukkan terjadi secara fisika, yaitu adanya perbedaan energi pengikat pada tiap-tiap sisi adsorpsi mengikuti isoterm Langmuir. Isoterm adsorpsi Freundlich juga mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi secara fisik artinya penyerapan lebih banyak terjadi pada permukaan arang (Suhaeri *et al.*, 2014). Langmuir diasumsikan sebagai serapan molekul adsorpsi terjadi pada

permukaan homogen oleh monolayer adsorpsi tanpa interaksi dengan adsorbat. Masing-masing situs aktif hanya dapat megadsorpsi satu molekul adsorbat saja sehingga adsorpsi hanya akan terbatas pada permukaan lapisan tunggal.

Berdasarkan kurva **Gambar 28** dan **Gambar 29** menunjukkan kurva isoterm Langmuir dan Freundlich pada *biochar* non aktivasi terlihat dimana pada kurva isoterm Langmuir memiliki nilai R^2 yaitu 0,9767 dan pada kurva isoterm Freundlich memiliki nilai R^2 yaitu 0,9834 yang menunjukkan bahwa isoterm adsorpsi gas CO_2 oleh *biochar* non aktivasi cenderung mengikuti model isoterm Freundlich. Berdasarkan grafik linearitas yang baik adalah dengan mempunyai nilai koefisien korelasi (R^2) ≥ 9 (mendekati 1). Kemudian pada penentuan isoterm adsorpsi gas CO_2 menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich juga dapat dilihat seperti pada gambar berikut.



Gambar 30. Kurva Isoterm Langmuir *N-Doped Modified Biochar*



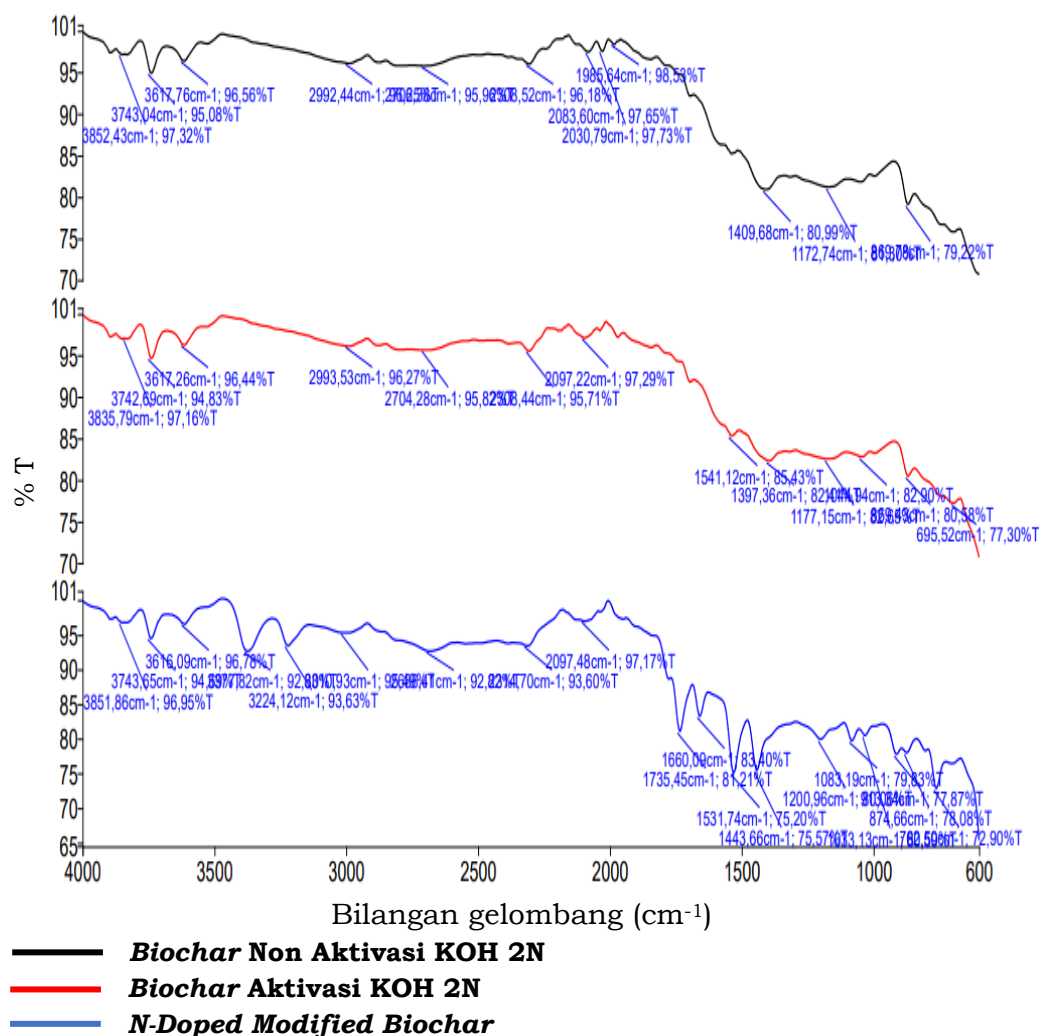
Gambar 31. Kurva Isoterm Freundlich *N-Doped Modified Biochar*

Berdasarkan kurva pada **Gambar 30** dan **Gambar 31** yang menunjukkan kurva isoterm Langmuir dan Freundlich pada *N-Doped Modified Biochar* terlihat dimana pada kurva isoterm Langmuir memiliki nilai R^2 yaitu 0,9597 dan pada kurva isoterm Freundlich memiliki nilai R^2 yaitu 0,9 yang menunjukkan bahwa isoterm adsorpsi gas CO_2 oleh *n-doped modified biochar* mengikuti model isoterm Freundlich. Dari hasil *biochar* non aktivasi dan *n-doped modified biochar* diatas tidak mengikuti model persamaan isoterm adsorpsi Langmuir, hal tersebut karena nilai koefisien korelasi yang diperoleh tidak memenuhi grafik linearitas yang baik. Kesesuaian dengan persamaan isoterm Freundlich tersebut menunjukkan bahwa adsorpsi yang terjadi membentuk lapisan multilayer. Isoterm adsorpsi Freundlich juga mengasumsikan bahwa adsorpsi gas CO_2 terjadi secara fisik artinya penyerapan lebih banyak terjadi pada permukaan *biochar* non aktivasi dan *n-doped modified biochar*.

4.9 Karakterisasi

FTIR (*Fourier Transform Infrared*)

Analisis FTIR (*Fourier Transform Infrared*) digunakan untuk menganalisis perbandingan gugus fungsi yang terkandung dalam sampel yang dianalisis. Ketika suatu senyawa dianalisis menggunakan FTIR, maka setiap ikatan kimia akan memberikan respon jika diberi energi dalam jumlah tertentu yang bertujuan untuk mengurangi efek dari suatu pertambahan energi agar dapat kembali dalam keadaan stabilnya. Hal ini juga berlaku bagi sinar inframerah yang frekuensinya mampu untuk membuat ikatan kimia melakukan vibrasi. Intensitas cahaya yang diperoleh akan terbaca dalam bentuk spektra sebagai transmitansi dimana transmitansi ini akan membentuk puncak. Puncak-puncak ini yang akan mendeteksi adanya suatu gugus fungsi tertentu dalam suatu sampel yang dianalisis. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh spektrum transmitansi IR sampel yang diperlihatkan pada **Gambar 32**.



Gambar 32. Split Grafik Tiga Sampel Biochar

Pada penelitian ini interpretasi spektra FTIR yang digunakan pada bilangan gelombang $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$, dalam FTIR sumbu y merupakan absorbansi atau persen transmittan dimana banyaknya frekuensi yang melewati senyawa (yang tidak diserap) akan diukur, sedangkan pada sumbu x merupakan bilangan gelombang (cm^{-1}). Dapat dilihat untuk hasil analisis FTIR pada **Gambar 32** Biochar asal cangkang kelapa sawit yang belum diaktivasi didapatkan pita serapan pada bilangan gelombang $3617,76\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan vibrasi O-H, bilangan gelombang $2992,44\text{--}2030\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan serapan vibrasi O-H yang menandakan adanya ikatan H, pita serapan pada bilangan gelombang $869,78\text{ cm}^{-1}$ menunjukan vibrasi C-H yang menandakan adanya gugus aromatik.

Sedangkan dari hasil analisis FTIR pada sampel Biochar Aktivasi KOH 2N bahwasanya pita-pita serapan yang diperoleh berada pada bilangan gelombang $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$. Pada bilangan gelombang $3617,26\text{ cm}^{-1}$

menunjukkan adanya vibrasi OH, pada bilangan gelombang 2993,53-2097,22 cm^{-1} merupakan serapan vibrasi OH menunjukkan adanya ikatan atom H, gugus OH berasal dari air, gugus alkohol, fenol dan karboksil. Bilangan gelombang 1541,12 cm^{-1} menunjukkan adanya vibrasi C=C yang menandakan adanya gugus aromatik. Bilangan gelombang 869,43-695,52 cm^{-1} menunjukkan vibrasi C-H yang menandakan adanya gugus aromatik. Hasil FTIR antara sampel *biochar* sebelum dan sesudah aktivasi menginformasikan bahwa hasil uji FTIR tersebut tidak menunjukkan hasil bilangan gelombang yang tidak terlalu signifikan.

Hasil analisis FTIR pada sampel *N-Doped Modified Biochar* didapatkan hasil spektrum FTIR *biochar* menunjukkan pita-pita serapan yang muncul pada bilangan gelombang 4000-500 cm^{-1} , dimana hasil pita serapan yang terdapat pada *biochar* seperti pada panjang gelombang 3616,09 cm^{-1} menunjukkan adanya gugus OH monomer (mengandung senyawa alkohol dan fenol), pada panjang gelombang 3377,82-2097,48 cm^{-1} didapakkannya gugus O-H yang berikatan dengan atom H (mengandung senyawa alkohol dan fenol), pada panjang gelombang 1735,45 cm^{-1} terdapat adanya serapan vibrasi C=O (gugus karbonil). Pada panjang gelombang 1660,09 cm^{-1} adanya serapan vibrasi C=N yang menandakan *biochar* sudah ditutupi senyawa nitrogen karena proses pendopongan gugus nitrogen dan terdapat gugus imina. Pada panjang gelombang 1531,74 cm^{-1} adanya serapan vibrasi C=C yang menandakan adanya gugus aromatik. Pada panjang gelombang 762,50 cm^{-1} adanya serapan vibrasi C-H yang menandakan adanya gugus alkana. Pada panjang gelombang 1443,66 cm^{-1} adanya serapan vibrasi C-H yang menandakan adanya gugus alkena. Pada panjang gelombang 1200,96 cm^{-1} adanya serapan vibrasi C-N (terdeteksi gugus amina). Pada panjang gelombang 1083,19-1033,13 cm^{-1} adanya serapan vibrasi C-O yang menandakan adanya gugus asam karboksilat. Pada bilangan gelombang 3377,82 cm^{-1} (daerah serapan sempit) adanya serapan vibrasi N-H yang menandakan adanya gugus amina. Dilihat dari panjang gelombang sampel *N-Doped Modified Biochar* telah terdeteksi gugus C=N ; N-H dan C-N yang menandakan bahwa permukaan *biochar* sudah ditutupi senyawa nitrogen karena proses pendopongan gugus N.

Jumlah serapan dari ketiga data karakterisasi yang diperoleh antara *biochar* sebelum modifikasi, *biochar* yang telah diaktivasi KOH 2N dan *N-doped modified biochar*, berikut data perbandingan spektrum FTIR dengan literature.

Tabel 7. Perbandingan spektrum FTIR sampel dengan literatur

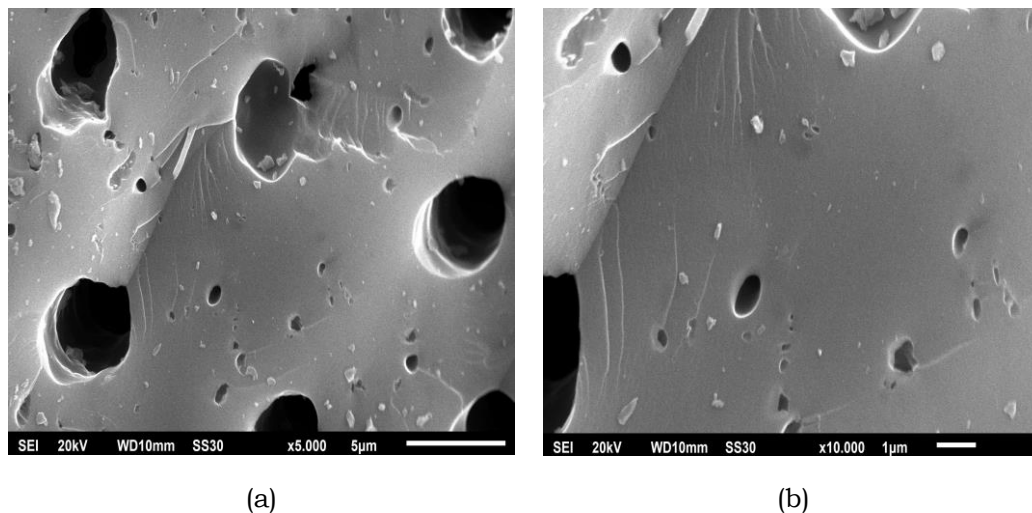
Literatur (Takeuchi,2009)	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)			Gugus Fungsi
	<i>Biochar</i> Non Aktivasi	<i>Biochar</i> Aktivasi KOH 2 N	<i>N-Doped</i> <i>Modified</i> <i>Biochar</i>	
3610-3640	3617,76	3617,26	3616,09	O-H (Monomer)
2000-3600	2992,44- 2030,79	2993,53- 2097,22	3377,82- 2097,48	O-H (Ikatan H)
1690-1760	-	-	1735,45	C=O
1600-1680	-	-	1660,09	C=N
1500-1600	-	1541,12	1531,74	C=C
675-870	869,78	869,43-695,52	762,50	Aromatik C-H
1350-1470	-	-	1443,66	Aromatik C-H
1180-1360	-	-	1200,96	Alkana C-N
1080-1300	-	-	1083,19- 1033,13	C-O
3310-3500	-	-	3377,82	N-H

Kemampuan *biochar* untuk mengadsorpsi ditentukan oleh struktur kimianya yaitu atom C, H, dan O yang terikat secara kimia membentuk gugus fungsional. Gugus fungsional ini membuat *biochar* secara kimiawi dapat mempengaruhi sifat adsorpsinya. Sehingga dapat dilihat perbandingan antara hasil FTIR yang diperoleh pada sampel *biochar* sebelum modifikasi dan *biochar* yang telah diaktivasi KOH 2N tidak jauh berbeda yang artinya proses aktivasi dengan menggunakan KOH sebagian besar tidak mempengaruhi gugus fungsi dari *biochar*. Kemudian dengan adanya ikatan OH dan C-O menunjukkan bahwa *Biochar* yang dihasilkan cenderung bersifat lebih polar. Dengan demikian *biochar* yang dihasilkan dapat digunakan sebagai adsorben zat yang cenderung polar seperti penjernihan air, gula, alkohol atau sebagai penyerap (Kumar *et al.*, 2011).

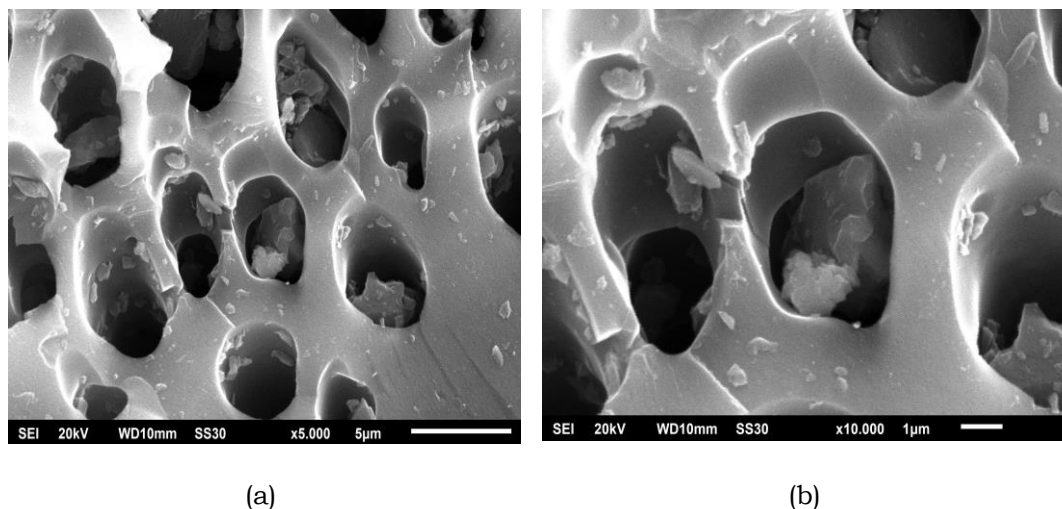
SEM EDX (Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

SEM (Scanning Electron Microscope) adalah alat yang digunakan untuk memvisualisasikan dan memperoleh gambar permukaan sampel dengan menggunakan elektron sebagai sumber sinar. Sedangkan EDX (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy): EDX adalah metode analisis yang biasanya digunakan bersama dengan SEM. Ini memungkinkan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terkandung dalam sampel dengan mendeteksi dan menganalisis spektrum sinar-X yang dihasilkan ketika sampel diserang oleh elektron dalam SEM. Pada penelitian ini, struktur Morfologi dari *alkaline KOH-*

Modified Biochar dibandingkan dengan struktur *biochar* tanpa modifikasi dan *N-Doped Modified Biochar*. Karakterisasi *Biochar* Tanpa Modifikasi yang dilihat dari morfologi permukaannya dengan percepatan voltase 20 kV dan perbesaran 5.000x dan 10.000x. Berikut ini hasil analisis SEM *Biochar* Tanpa Modifikasi pada **Gambar 33**.



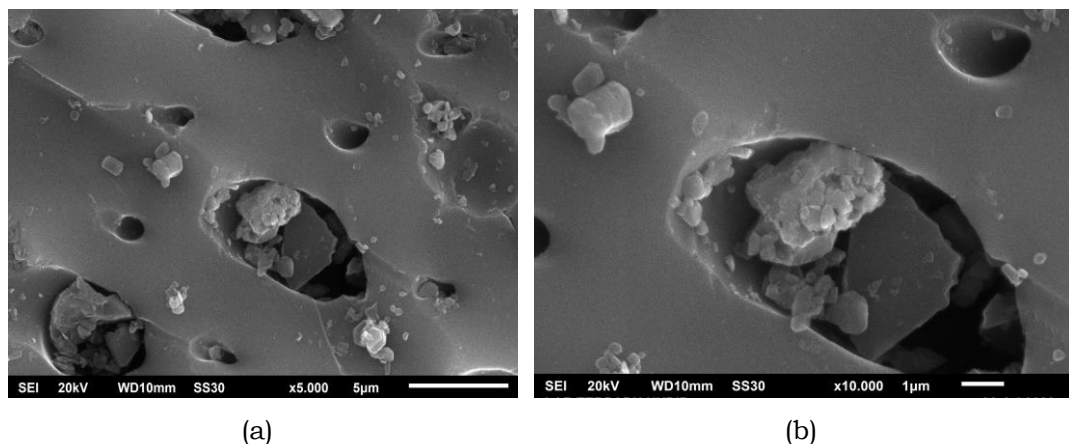
Gambar 33. Hasil Analisis SEM *Biochar* Tanpa Modifikasi (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran 10000x
Selanjutnya hasil karakterisasi sampel *biochar* yang telah diaktivasi KOH 2N yang dilihat dari morfologi permukaannya dengan percepatan voltase 20 kV dan perbesaran 5.000x dan 10.000x. Berikut hasil analisis SEM sampel *biochar* aktivasi 2N pada **Gambar 34**.



Gambar 34. Hasil analisis SEM *Biochar* Aktivasi KOH 2N (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran 10000x

Selanjutnya hasil karakterisasi sampel *N-Doped Modified Biochar* yakni *biochar* yang telah melalui proses aktivasi KOH 2N dan di-*doping* menggunakan melamin sianurat yang dilihat dari morfologi permukaannya dengan percepatan

voltase 20 kV dan perbesaran 5.000x dan 10.000x. Berikut hasil analisis SEM sampel *N-Doped Modified Biochar* pada **Gambar 35**.



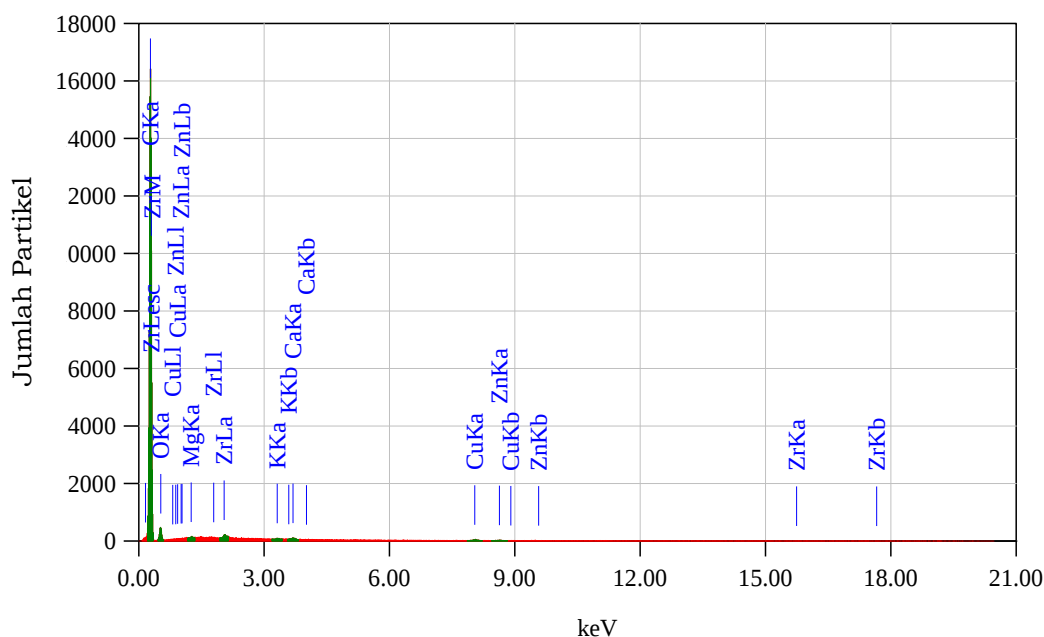
Gambar 35. Hasil analisis SEM *N-Doped Modified Biochar* (a) perbesaran 5000x (b) perbesaran 10000x

Kemudian pada **Gambar 33** dapat diketahui bentuk *biochar* sebelum dimodifikasi pada **Gambar 33 (a)** menggunakan perbesaran 5000 kali terlihat memiliki permukaan yang menunjukkan keporian yang relatif sarang, sedangkan pada **Gambar 33 (b)** menggunakan perbesaran 10.000 kali terdapat banyak pori-pori pada permukaan serta memiliki diameter yang kecil. Pada hasil SEM tersebut terlihat pada bagian atas permukaan terdapat senyawa pengotor. Pada **Gambar 34** pada perbesaran 5000 dan 10.000 kali menunjukkan keporian yang relatif sarang (*porous*). Lubang pori terlihat tunggal dan ganda. Pada beberapa bagian pori yang letaknya berdampingan, sekat pori ada yang runtuh sehingga membentuk pori yang lebih besar. Ukuran lubang pori bervariasi antara 2-5 μm (Goenadi dan Santi, 2017). Hal ini dikarenakan aktivasi dengan KOH dapat meningkatkan struktur berpori dari *biochar*, sebab alkali memiliki selektivitas terhadap lignin, ada kemungkinan ion hidroksil dari KOH dapat mengkatalisis pemutusan ikatan eter dalam lignin, sehingga membebaskan fenolat yang larut dalam cairan (Kumar *et al.*, 2011). Berdasarkan hasil analisis SEM yang diperoleh dari *alkaline KOH-Modified Biochar* dan *Biochar* Tanpa Modifikasi menunjukkan bahwa struktur permukaan *alkaline KOH-Modified Biochar* yang secara substansial berubah setelah diaktivasi dengan KOH. Hal ini dikarenakan struktur permukaan dari *alkaline KOH-Modified Biochar* yang diaktifkan memberikan tingkat aksesibilitas yang lebih tinggi ke kelompok fungsional permukaannya (Regmi *et al.*, 2012).

Sedangkan pada **Gambar 35** pada sampel *N-Doped Modified Biochar* pada perbesaran 5000 dan 10.000 kali terlihat pori yang lebih besar dikarenakan telah melalui proses aktivasi. Tetapi pada pori *biochar* tersebut

mengalami pengisian atau penyumbatan pori-pori oleh nitrogen karena proses pendopingan. Penyumbatan pori tersebut karena interaksi molekul atau atom yang masuk ke dalam struktur *biochar* saat di-*doping* dapat mengubah ikatan atau berinteraksi dengan komponen *biochar*, sehingga mempengaruhi permukaan dan struktur material. *Biochar* yang telah didoping nitrogen mempengaruhi sifat permukaan *biochar*. Terlihat perubahan dalam kekasaran permukaan dan distribusi titik-titik nitrogen yang didoping. Kemudian hasil analisis EDX yang diperoleh menunjukkan komposisi unsur yang terdapat pada permukaan *biochar* sebelum dimodifikasi, *biochar* yang telah diaktivasi KOH dan *N-Doped Modified Biochar*. Prinsip dari analisis ini ialah menggunakan elektron yang direfleksikan dari permukaan sampel untuk menghasilkan gambar 3D serta menghasilkan puncak-puncak dari komposisi penyusun material dari sampel yang dianalisis.

Selanjutnya analisis EDX yang diperoleh menunjukkan komposisi unsur yang terdapat pada permukaan *Biochar* tanpa Modifikasi yaitu sebagai berikut :



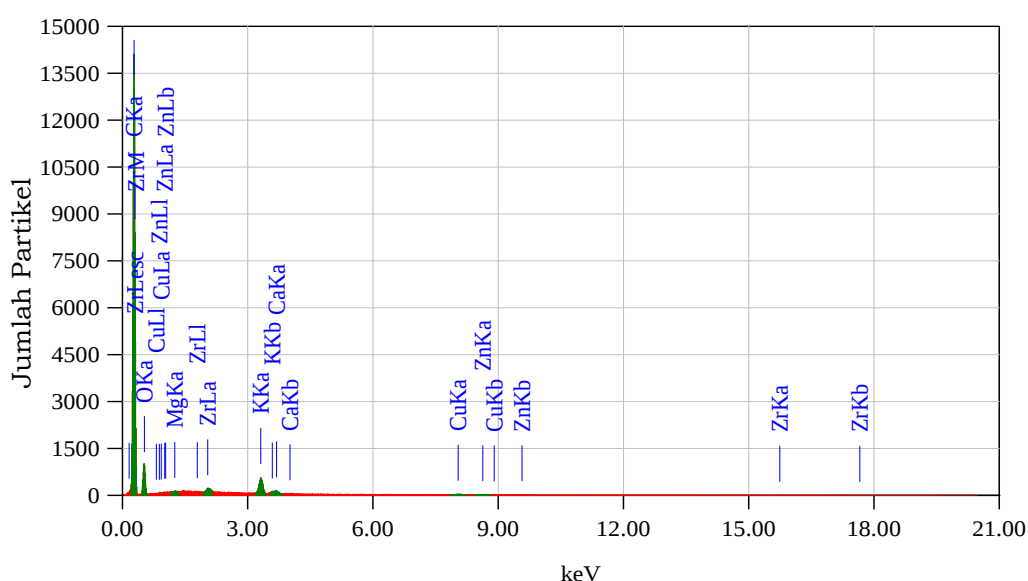
Gambar 36. Hasil EDX Sampel *Biochar Non Aktivasi*

Tabel 8. Kandungan Unsur dalam *Biochar Non Aktivasi*

No	Unsur	% Massa
1	C (Karbon)	89,37
2	O (Oksigen)	9,33
3	Mg (Magnesium)	0,04
4	K (Kalium)	0,06
5	Ca (Kalsium)	0,11
6	Cu (Tembaga)	0,40
7	Zn (Seng)	0,34
8	Zr (Zirkonium)	0,35

Kandungan unsur dari *Biochar* Tanpa Modifikasi terdiri dari unsur C (karbon), O (oksigen), Mg (magnesium), K (kalium), Ca (kalsium), Cu (tembaga), Zn (seng) dan Zr (zirkonium). Berdasarkan variasi nilai indeks dari masing masing unsur, kandungan karbon dan oksigen dari *biochar* cangkang kelapa sawit diperoleh cukup tinggi karena berasal dari bahan organik yang ada dalam cangkang kelapa sawit itu sendiri. Ketika cangkang kelapa sawit diproses melalui pirolisis, yaitu pemanasan pada suhu tinggi dan dalam kondisi tanpa oksigen (anaerobik), bahan organik tersebut diuraikan. Pada saat ini, sebagian oksigen dilepaskan sebagai gas seperti karbon dioksida (CO_2) atau air (H_2O), sementara sebagian karbon tetap dalam bentuk padat dan menjadi bagian dari *biochar*. Jadi, unsur karbon dalam *biochar* cangkang kelapa sawit yang tidak terurai menjadi gas selama proses pirolisis, sedangkan unsur oksigen dilepaskan sebagai gas selama proses tersebut. Ini adalah bagaimana unsur karbon dan oksigen hadir dalam *biochar* cangkang kelapa sawit.

Sedangkan Unsur magnesium (Mg), kalium (K), kalsium (Ca), tembaga (Cu), seng (Zn), dan zirkonium (Zr) dalam *biochar* cangkang kelapa sawit berasal dari bahan baku cangkang kelapa sawit itu sendiri. Cangkang kelapa sawit mengandung mineral dan unsur jejak seperti magnesium, kalium, kalsium, tembaga, seng, dan zirkonium. Selama proses pirolisis, sebagian kecil dari elemen-elemen ini akan terdistribusi dalam *biochar* bersama dengan karbon dan unsur-unsur lainnya yang dihasilkan dari bahan organik cangkang kelapa sawit. Selanjutnya analisis EDX yang diperoleh menunjukkan komposisi unsur yang terdapat pada permukaan *Biochar* yang telah diaktivasi larutan KOH 2N, berikut disajikan pada **Gambar 37**.



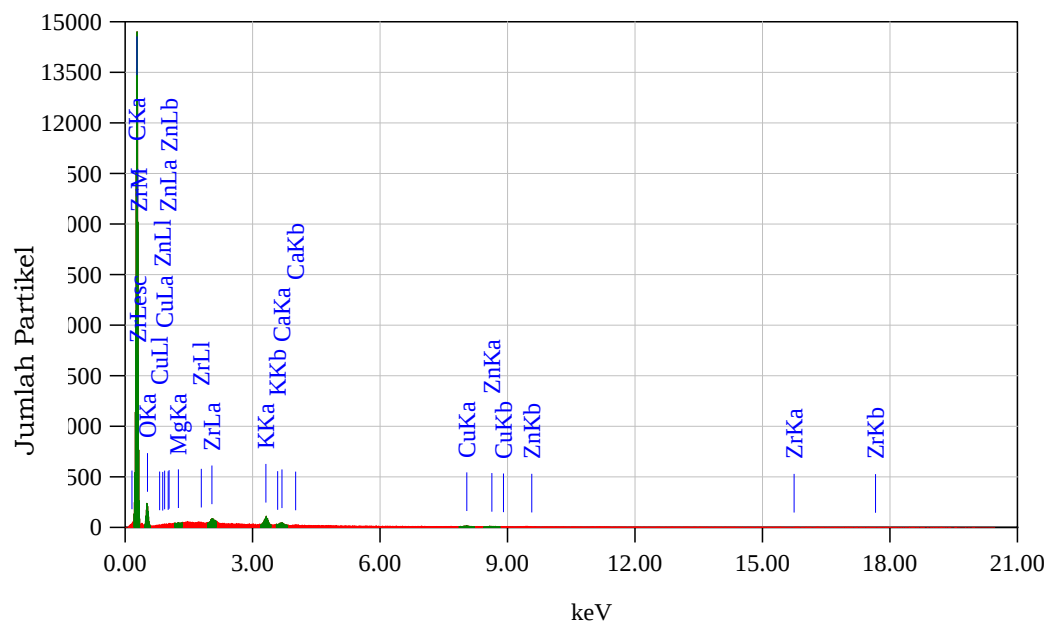
Gambar 37. Hasil EDX Sampel *Biochar* Aktivasi KOH 2N

Tabel 9. Kandungan Unsur Sampel *Biochar* Aktivasi KOH 2N

No	Unsur	% Massa
1	C (Karbon)	80,07
2	O (Oksigen)	17,81
3	Mg (Magnesium)	0,04
4	K (Kalium)	1,02
5	Ca (Kalsium)	0,17
6	Cu (Tembaga)	0,30
7	Zn (Seng)	0,19
8	Zr (Zirkonium)	0,40

Berdasarkan kandungan unsur sampel *biochar* aktivasi KOH 2N, unsur C (karbon), Mg (magnesium), Cu (tembaga), dan Zn (seng) mengalami penurunan persentase massa disebabkan karena penghilangan senyawa pengotor atau tar pada pori *biochar* sedangkan unsur O (oksigen) dan K (kalium), Ca (kalsium) dan Zr (zirkonium) mengalami peningkatan persen massa dikarenakan pori-pori *biochar* lebih besar dan lebih banyak juga memberikan ruang yang lebih luas untuk menjerap dan menyimpan ion kalium (K^+) maupun oksigen. Peningkatan kandungan unsur massa juga disebabkan oleh terjadinya ikatan pada saat proses aktivasi dengan larutan KOH. Sehingga hal ini dapat dikatakan bahwa *biochar* berhasil teraktivasi dengan KOH.

Selanjutnya analisis EDX yang diperoleh menunjukkan komposisi



unsur yang terdapat pada permukaan sampel *N-Doped Modified Biochar* yaitu:

Gambar 38. Hasil EDX Sampel *N-Doped Modified Biochar*

Tabel 10. Kandungan Unsur Sampel *N-Doped Modified Biochar*

No	Unsur	% Massa
1	C (Karbon)	84,64
2	O (Oksigen)	13,60
3	Mg (Magnesium)	0,02
4	K (Kalium)	0,49
5	Ca (Kalsium)	0,16
6	Cu (Tembaga)	0,33
7	Zn (Seng)	0,26
8	Zr (Zirkonium)	0,49

Berdasarkan **Tabel 11**, kandungan unsur dari sampel *N-Doped Modified Biochar* mengalami peningkatan kandungan unsur C (karbon), Cu (tembaga), Zn (seng) dan Zr (zirkonium). Berikut penyebab peningkatan kandungan unsur pada sampel *N-Doped Modified Biochar* yaitu sebagai berikut :

- Adsorpsi dan Pengikatan: Proses *doping* nitrogen pada *biochar* dapat menyebabkan adanya ikatan atau pengikatan antara nitrogen dan unsur-unsur lain dalam *biochar*, seperti karbon, tembaga, seng, dan zirkonium. Nitrogen berfungsi sebagai pengikat tambahan yang membantu menahan atau menarik unsur-unsur ini ke dalam struktur *biochar*.
- Reaksi Kimia: Proses *doping* dengan nitrogen dapat memicu reaksi kimia antara nitrogen dan unsur-unsur lain dalam *biochar*. Reaksi ini dapat menghasilkan senyawa-senyawa yang lebih kompleks yang mengandung unsur-unsur tersebut dan mengakibatkan peningkatan kandungan mereka dalam *biochar*.
- Penyisipan Mikrostruktur: Penyisipan atau penggantian nitrogen dalam pori-pori dan permukaan *biochar* dapat menyebabkan peningkatan kapasitas penyerapan dan retensi unsur-unsur, termasuk tembaga, seng, dan zirkonium, serta meningkatkan kandungan karbon.
- Peningkatan Stabilitas: Sebagai hasil dari stabilitas yang lebih tinggi ini, *biochar* mengalami dekomposisi atau degradasi yang lebih lambat, yang berarti unsur-unsur yang terperangkap dalam strukturnya akan tetap ada dalam jumlah yang lebih tinggi.
- Efek Katalis: Nitrogen dalam beberapa kasus dapat bertindak sebagai katalis, memfasilitasi reaksi kimia tertentu *biochar*. Reaksi-reaksi ini berkontribusi pada peningkatan kandungan unsur karbon dan logam lainnya.

Sedangkan kandungan unsur O (oksigen), Mg (magnesium), K (kalium) dan Ca (kalsium) mengalami penurunan persentase massa. Berikut penyebab penurunan kandungan unsur massa dalam sampel *N-Doped Modified Biochar* yaitu sebagai berikut :

- **Reaksi Reduksi:** yaitu reaksi kimia di mana oksigen dilepaskan dari senyawa kimia. Nitrogen dalam *biochar* dapat berinteraksi dengan oksigen yang ada, membentuk berbagai senyawa nitrogen seperti amonia, nitrogen dioksida, atau nitrogen oksida, dan melepaskan oksigen dalam prosesnya.
- **Volatilisasi Unsur:** Beberapa unsur seperti magnesium, kalium, dan kalsium dapat berada dalam bentuk senyawa yang relatif mudah menguap. Selama proses *doping* nitrogen, suhu dan tekanan tinggi yang terlibat menyebabkan volatilisasi atau penguapan sebagian senyawa-senyawa ini. Sebagai hasilnya, kandungan magnesium, kalium, dan kalsium dalam *biochar* berkurang.
- **Penggantian Atom:** Dalam beberapa kasus, atom nitrogen dapat menggantikan atom oksigen atau atom logam lain dalam struktur *biochar*. Misalnya, dalam senyawa nitrogen monoksida (NO), atom nitrogen (N) dapat menggantikan atom oksigen (O) dalam *biochar*. Penggantian atom ini dapat menyebabkan penurunan kandungan oksigen, magnesium, kalium, dan kalsium dalam *biochar*.
- **Reaksi dengan Senyawa Logam:** Nitrogen dalam *biochar* dapat membentuk senyawa kompleks dengan magnesium, kalium, dan kalsium yang ada dalam *biochar*. Senyawa-senyawa kompleks ini memiliki kelarutan yang lebih tinggi dan cenderung terlarut dalam medium tertentu, sehingga menyebabkan penurunan kandungan massa dari unsur-unsur tersebut dalam *biochar*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Penyerapan gas CO₂ oleh adsorben *biochar* non aktivasi dan *N-Doped Modified Biochar* sama-sama meningkat seiring bertambahnya laju alir gas CO₂. Penyerapan gas CO₂ terendah oleh *biochar* non aktivasi sebesar 2.733,5 mg/L pada laju alir gas CO₂ 1 L/Menit, sedangkan penyerapan gas CO₂ tertinggi yaitu 5.910,635 mg/L dengan laju alir 10 L/Menit. Sedangkan penyerapan gas CO₂ terendah oleh *n-doped modified biochar* sebesar 2.740,155 mg/L pada laju alir gas CO₂ 1 L/Menit, sedangkan penyerapan CO₂ tertinggi yaitu 5.910,85 mg/L pada laju alir gas CO₂ 10 L/Menit.
2. Kapasitas adsorpsi *biochar* non aktivasi terendah didapatkan sebesar 911,166 mg/g pada laju alir gas 1 L/Menit dan kapasitas adsorpsi tertinggi yaitu 19.702,12 mg/g pada laju alir gas CO₂ 10 L/Menit. Sedangkan kapasitas adsorpsi *N-Doped Modified Biochar* terendah yaitu 913,385 mg/g pada laju alir gas CO₂ 1 L/Menit dan kapasitas adsorpsi tertinggi yaitu 19.702,833 mg/g.
3. Adapun hasil karakterisasi dari *N-Doped Modified Biochar* yaitu :
 - a. Hasil analisis FTIR pada sampel *N-Doped Modified Biochar* didapatkan gugus OH, serapan vibrasi C=O (gugus karbonil), serapan vibrasi C=N, serapan vibrasi C=C (gugus aromatik), serapan vibrasi C-H (gugus alkana), serapan vibrasi C-H (gugus alkena), serapan vibrasi C-N (gugus amina). serapan vibrasi C-O (asam karboksilat) dan serapan vibrasi N-H (gugus amina).
 - b. Hasil SEM *N-Doped Modified Biochar* pada perbesaran 5000 dan 10.000 kali terlihat pori yang lebih besar dikarenakan telah melalui proses aktivasi. Tetapi pada pori *biochar* mengalami penyumbatan pori-pori karena proses pendopongan.

5.2 Saran

Untuk mengatasi penurunan efisiensi penyerapan CO₂, Sebaiknya juga dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengkaji mengenai pengaruh laju alir gas CO₂ terhadap lama penyerapan gas CO₂, tinggi larutan NaOH sebagai media penyerap gas CO₂, Konsentrasi NaOH dan berat sampel *biochar* dalam *packed column*.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, I. 2019. *Multimanfaat Arang dan Asap Cair dari Limbah Biomasa*. Yogyakarta: DEEPUBLISH
- Ardhiany, S. 2018. "Proses Absorpsi 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.
- Bali, S., Chen, T.T., Chaikittisilp, W. dan Jones, C.W. 2013. *Oxidative stability of amino polymer-alumina hybrid adsorbents for carbon dioxide capture*. *Energy & Fuels*. 27(3) : 1547-1554.
- Bassett, J., 1994. *Buku Ajar Vogel Kimia Analisis Kuantitatif Anorganik*. Jakarta: Penerbit buku Kedokteran EGC.
- Bunaciu, A.A., V.D Hoang and H.Y.A Enein. 2015. Applications of FT-IR Spectrophotometry in Cancer Diagnostics. *Critical Review in Analytical Chemistry*. Vol 2(45): 156-165.
- Botahala, L. 2019. *Perbandingan Efektivitas Daya Adsorpsi Sekam Padi Dan Cangkang Kemiri Terhadap Logam besi (Fe) pada Air Sumur Gali*. Yogyakarta: DEEPUBLISH.
- Chen, Y., Zhang, X., Chen, W., Yang, H. dan Chen, H. 2017. *The structure evolution of biochar from biomass pyrolysis and its correlation with gas pollutant adsorption performance*. *Bioresource Technology*. 246(1) : 101–109.
- Chatterjee R, Sajjad B, Chen WY, Mattern DL, Hammer N, Raman V dan Dorris A (2020) effect of pyrolysis temperature on physicochemical properties and acoustic-based amination of *biochar* for efficient CO₂ adsorption. *Front. Energy Res*. 8:85. doi: 10.3389/fenrg.2020.00085
- Creamer AE, Gao B dan Wang S (2016) Carbon dioxide capture using various metal oxyhydroxide–biochar composites. *Chemical Engineering Journal*. 283 (2016) 826–832
- Damris M, Ngatijo, Ira Galih Prabasari dan Bunga Mardhotillah (2023) the effects of biochar incorporation on the CO₂, N₂O, and CH₄ emissions from the soils of stallholder palm oil plantations, Jambi Province Indonesia. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*. 7(3): 300 –313.
- Damris M (2019) Biomaterial biochar for soil carbon sequestration strategy and its future prospects. *Earth and Environmental Science*, 391; doi:10.1088/1755- 1315/391/1/012014.

- Damris M, Ngatijo dan Syamsuruzal (2018) Biochar amendments untuk immobilisasi logam berat beracun sebagai strategi low-cost remediasi lahan bekas tambang batubara di Provinsi Jambi. Laporan Penelitian, Universitas Jambi.
- Damris M dan Diah Riski Gusti (2021) Aplikasi biochar sebagai strategi mitigasi emisi gas rumah kaca CO₂ dan N₂O pada lahan perkebunan sawit. Laporan Penelitian, Universitas Jambi.
- Day, R. A. and A. L. Underwood. (2002). *Analisis Kimia Kuantitatif, edisi Keenam*. Erlangga. Jakarta.
- 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*.
- Donda., M. Silalahi dan Y. Fransisco. 2015. "PEMANFAATAN CANGKANG KELAPA SAWIT SEBAGAI ARANG AKTIF DALAM ADSORBSI MINYAK GORENG BEKAS". *Regional Development Industry & Health Science, Technology and Art of Life*. Vol.5(3): 74-78.
- Endang, P. (2006). *Fotokatalisis dan Fotoelektrolisis Menggunakan Film TiO₂*. Skripsi, 1–32.
- Fardhyanti, D. S. 2020. *Monograf Bio-Oil Berbasis Biomassa*. Yogyakarta : DEEPUBLISH.
- Fitriana, L. (2019). *Stripper Column Design Dengan Tipe Packed Column Pada Pabrik Ethanolamine Dengan Proses Ammonia Aqueous*. Universitas Negeri Semarang.
- Gantina, T. M dan Farhani, D. (2020). Penurunan CO₂ biogas dengan metoda adsorpsi menggunakan zeolit alam. *Jurnal Energi*, 10(1), 49–52.
- Glaser, B., J. Lehmann & W. Zech. 2002. "Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in The Tropics with Charcoal –A review". *Biology and Fertility of Soils*. Vol 35: 219-230.
- Goenadi, D. H dan L. P. Santi. 2017. "Kontroversi Aplikasi dan Standar Mutu Biochar". *Jurnal Sumberdaya Lahan*. Vol. 11(1): 23-32.
- Han R. FangY, Sun P, Xie K, Zhai Z, Liu H dan Liu H (2021) N-doped *biochar* as a new metal-free activator of peroxymonosulfate for singlet oxygen-

- dominated catalytic degradation of acid orange 7. *Nanomaterials*, 11, 2288. <https://doi.org/10.3390/nano11092288>.
- Hidayati, L., Martika, Iskandar, T. dan Proborini, W.D. 2018. Pengkayaan Biochar Tongkol Jagung, Sekam Padi dan Pupuk Kandang Kotoran Ayam dengan Penambahan Asam Nitrat (HNO_3). *eUREKA : Jurnal Penelitian Mahasiswa Teknik Sipil dan Teknik Kimia*. 2(2) : 208-214.
- Ndĩritũ, H.M., Kibicho, K., and Gathitũ. (2011). Effect of Heating on Absorption of CO_2 as Greenhouse Gas in a Structured Packed Scrubber. *German Education Exchange (DAAD) and Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology (JKUAT)*.
- Jasiman, A., 2008, *Pencemaran Alam Sekitar*, Eddiplex, Surabaya.
- Jeong, C.Y., Dodla, S.K., dan Wang, J.J. (2015). Fundamental and Molecular Composition Characteristics of Biochars Produced from Sugarcane and Rice Crop Residues and By-Products. *Chemosphere*, 142, 4–13.
- Jiang S, Wang R, Li G, Rao P, Ju M, Jian L, Guo X, dan Che L (2022) Recyclable nitrogen-doped biochar via low-temperature pyrolysis for enhanced lead(II) removal. *Chemosphere* 286 (2022) 131666
- Ji R, Wu Y, Bian Y, Song Y, Sun Q, Jiang X, Zhang L, Han J dan Cheng H (2021) Nitrogen-doped porous biochar derived from marine algae for efficient solid-phase microextraction of chlorobenzenes from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials* 407 (2021) 124785.
- Kasera, N., Hall, S. dan Kolar, P. 2022. “Effect of surface modification by Nitrogen-containing chemicals on morphology and surface characteristics of N-doped Pined bark Biochar”. *ASABE journal*. 1(1) : 1-20.
- Kumar, S., V. A. Loganathan., R. B. Gupta & M. O. Barnett. 2011. “An Assessment of U(VI) Removal From Groundwater Using Biochar Produced from Hydrothermal Carbonization”. *Journal Environ Manage*. Vol 92 (10) : 2504-2512.
- Kurniawan RY, Kurniawan IDO, Atmaja L dan Widiastuti W (2019) synthesis n-doped activated carbon from sugarcane bagasse for CO_2 adsorption. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, Vol. 30(3), December. 2019. 2088-2033
- Lesbani, A., Sumiati dan Mardiyanto. 2012. Kajian Kinetika dan Termodinamika Adsorpsi Besi (II) dan Seng (II) dengan Pasir Kuarsa. *Majalah Ilmiah Jurusan FMIPA FKIP Universitas Sriwijaya*. Vol 15(2) : 1-12.

- 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>.
- Mashuri AP, Ahmad, AM dan Djojowasito G (2013). Rancang bangun sistem penyerap karbon dioksida (CO₂) pada aliran biogas dengan menggunakan larutan Ca(OH)₂. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*. Vol. 1 No. 1, 19- 28.
- Mayer ZA, Eltom Y, Stennett D, Schroder E, Apfelbacher A, dan Hornung A (2014) Characterization of engineered biochar for soil management. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 33, 490–496. doi: 10.1002/ep.11788.
- McCabe, Warren L, 2013. *Unit Operations of Chemical Engineering*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Miftahatul, A.I., D. Hikmawati, Siswanto. 2013. Sintesis Membra Penyaring Logam Berat Timbal (Pb) di Udara Berbasis Selulosa Asetat dari Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*). *Jurnal Fisika dan Terapannya*. 1(3) : 1-13.
- Mohrig, J.R., C.N. Hammond dan P.F. Scatz. 2010. *Techniques in Organic Chemistry*, Third Edition, Clancy Marshall, United States of America.
- Nafis, Ahmat. (2017). Pengaruh Penyerapan CO₂ terhadap Laju Alir Absorben Air dan Kecepatan Alir Udara pada Alat Revamping Absorber Tipe Sieve Tray, Politeknik Akamigas Palembang.Palembang
- Nguyen MB dan Lee BK (2016) novel removal of CO₂ using nitrogen doped biochar beads as a green adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection* xxx (2016) xxx-xxx
- Nurfitria, N., Febriyantiningrum, K., Utomo, W.P., Nugraheni, Z.V., Pangastuti, D.D., Maulida, H dan Ariyanti. F.N. 2019. “Pengaruh Konsentrasi Aktivator Kalium Hidroksida (KOH) pada Karbon Aktif dan Waktu Kontak Terhadap Daya Adsorpsi Logam Pb dalam Sampel Air Kawasan Mangrove Wonorejo, Surabaya”. *AKTA KIMIA INDONESIA*. Vol. 4(1): 75-85.
- Ok YS, Chang SX, Gao B dan Chung HJ (2015) SMART biochar technology—A shifting paradigm towards advanced materials and healthcare research. *Environmental Technology & Innovation* 4 (2015) 206–209
- Olivera RF, Patel AK, Jaisi DP, Adhikari S, Lu Hand dan Khanal SK (2018) Review Environmental application of biochar Current status and perspectives Bioresource Technology.

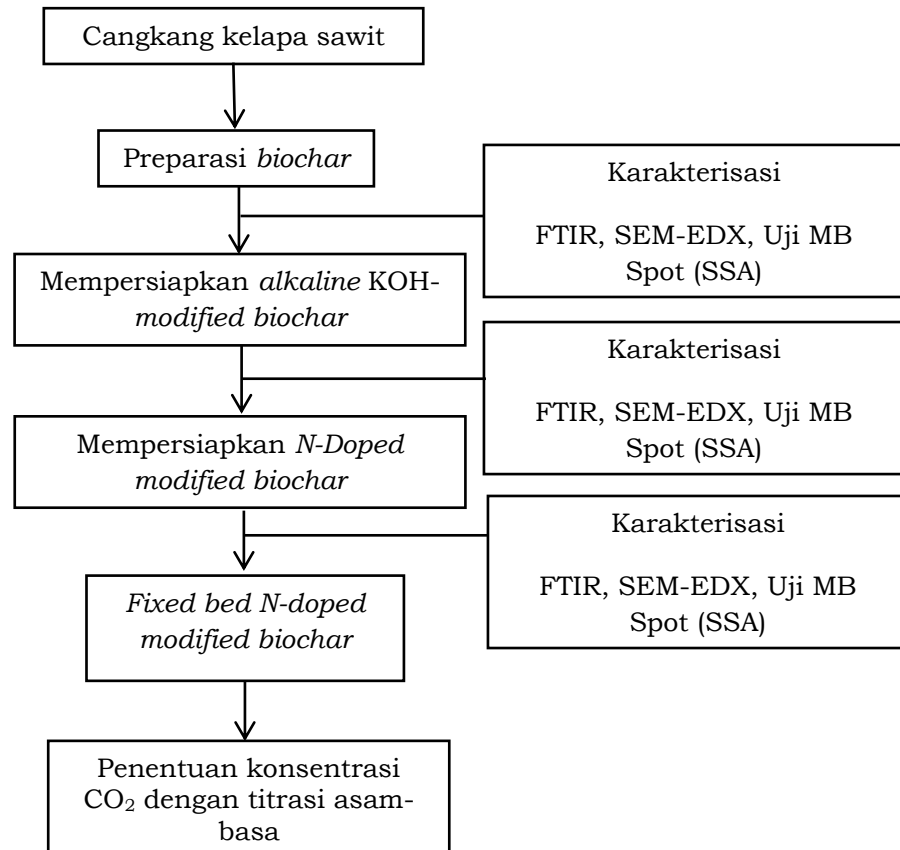
- Pambudi, P. A., Rahardjanto, A., Nurwidodo., Husamah. 2017. Analisis Serapan Karbondioksida (CO₂) Tumbuhan Di Blok Puyer Kawasan Ranu Pani Taman Nasional Bromo Tengger Semeru (Tnbs) Pada Tahun 2016. *Prosiding Seminar Nasional III*, 277-282.
- Promraksa A dan Rakmak N (2020) Biochar production from palm oil mill residues and application of the biochar to adsorb carbon dioxide. *Heliyon* 6. e04019
- Qiao Y dan Wu C (2022) Nitrogen enriched biochar used as CO₂ adsorbents: a brief review. *Carbon Capture Science & Technology* 2. 100018
- Regmi, P., garcia Moscosos, J.L., Kumar, S., Cao, X., Mao, J., Schafran, G. 2012. "Removal of Copper and Cadmium from Aqueous Solution Using Switchgrass Biochar Produced Via Hydrotemal Carbonization Process". *J. Environ Manag.* Vol 109 : 61-69.
- Reynolds, Tom, D. 1982. *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*. Wadsworth Inc : California.
- Sari. Y. W., N. A. Nuzulia., A. Saputra & B. Abdurrahman. 2021. *Pengantar Biomaterial Untuk Aplikasi Kesehatan*. Bogor: IPB Press.
- Sakti, G. 2014. *Analisa Regenerasi Zeolit Sebagai Adsorben pada Alat Pendingin*. Skripsi. Surabaya : Jurusan teknik Perkapalan fakultas Teknik Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sandra, L., F. M. Jasin., R. Pido., R. Makbul., K. Udyani., Patimah., D. K. Sari., D. Satriawan., H. R. Fajar., E. Ningsih dan J. Sinaga. 2022. Proses Pengolahan Limbah. Sumatra Barat : PT. Global Eksekutif Teknologi.
- Sethupathi S, Zhang M, Rajapaksha AU, Lee SR, Nor NM, Mohamed AR, Al-Wabel M, Lee SS, dan Ok YS (2017) Biochars as Potential Adsorbers of CH₄, CO₂ and H₂S. *Sustainability* 2017, 9, 121; doi:10.3390/su9010121
- Setianingsih, T & Y. P. Prananto. 2020. Spektroskopi Inframerah untuk Karakterisasi Material Anorganik. Malang : UB Press
- Sevilla M, Falco C, Titirici MM dan Fuertes AB (2012) High-performance CO₂ sorbents from algae. *RSC Adv*;2:12792–7.
- Sihotang, SR dan Assomadi, AF, 2010, Pemetaan Distribusi Karbon Dioksida (CO₂) dari Kontribusi Kendaraan Bermotor di Kampus ITS Surabaya, *Karya Ilmiah Surabaya*, Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS, Surabaya.

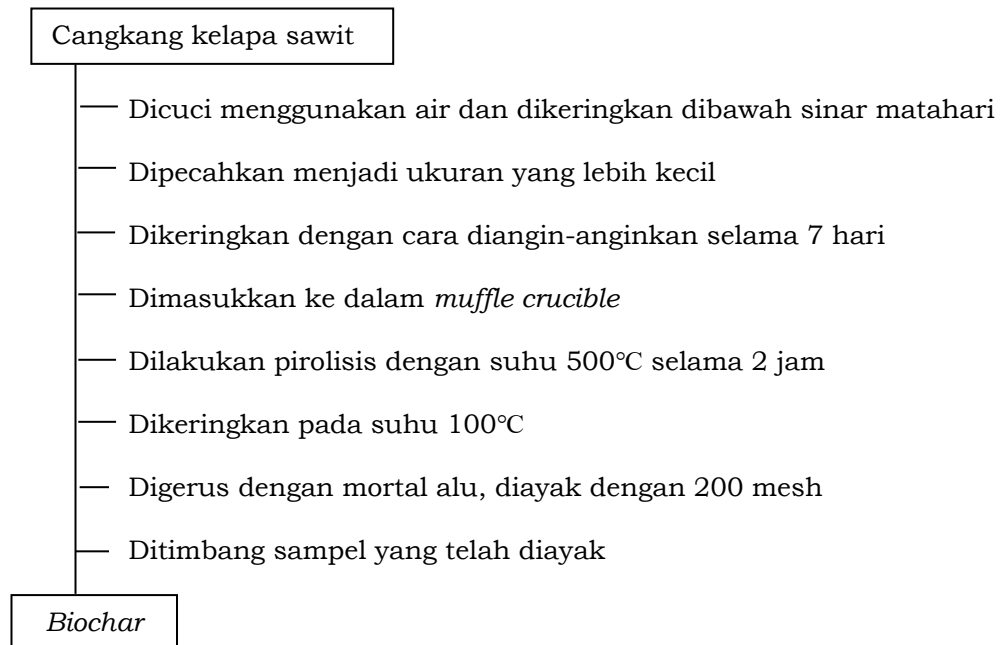
- Simonescu, C.M. 2012. *Application of FTIR Spectroscopy in Environmental Studies*. Intech.
- Sitorus, E., E. Sutrisno., R. Armus., K. Gurning., F. Fatma., L. Parinduri., M. Chaerul., I. Marzuki & Y. Priastomo. *Proses Pengolahan Timah*. Sumatra Utara : Yayasan Kita Menulis.
- Suhaeri, A., Maryno dan S. Side. 2014. Kapasitas Adsorpsi Arang Aktif Kulit Singkong Terhadap Ion Cr6+. *Jurnal Chemical*. Vol 15 (2) : 95-104.
- Sudarmadji, 2004, *Pengantar Ilmu Lingkungan*, Universitas Jember, Jember.
- Sugita, P., T. Wukirsari., A. Sjahriza dan D. Wahyono. 2009. *Kitosan : Sumber Biomaterial Masa Depan*. Bandung : IPB Press.
- Sujarwata dan B. Astuti. 2015. *Sensor Ofet Berbasis Film Tipis Untuk Deteksi Gas Beracun*. Yogyakarta: DEEPUBLISH.
- Suseno, J.E dan Firdausi, K.S. 2008. Rancangan Bangun Spektroskopi FTIR untuk Penentuan Kualitas Susu Sapi. *Berkala Fisika*. 11(1) : 23-28.
- Syarifudin. 2008. *Kimia Pers Ilmiah*. Tangerang.
- Takeuchi, Y. 2009. *Buku Teks Pengantar Kimia*. Iwanami Shouten. Tokyo.
- Underwood,A.L and R.A Day,Jr. 1986. *Analisa Kimia Kuantitatif*. Jakarta: Erlangga.
- Wahab., Nemr, Sikaily dan Khaled. 2005. Use of Rice Husk for Adsorption of Direct Dyes from Aqueous Solution: A Case Study of Direct F. Scarlet. *Egyption Journal of Aquatic Research*. Vol 31(1) : 1-11.
- Wang, J & S. Wang. 2019. "Preparation, modification and environmental application of biochar : a review". *Journal Of Cleaner Production*. Vol 227 : 1002-1022.
- Wan Z, Sun Y, Tseng DCW, Khan E, Yip ACK, Ng YH, Rinklebe J dan OK YS (2021) Customised fabrication of nitrogen-doped biochar for environmental and energy applications. *Chemical engineering Journal* 410. 126136.
- Worch, E. 2012. *Adsorption Technology In Water Treatment Fundamentals, Processes and Modeling*. Germany : Hubert & Co. GmbH & Co. KG, Go'ttingen ISBN 978-3-11-024022-1 e-isbn 978-3-11-024023-8.
- Wu, P., Z. Wang., H. Wang., N. S. Bolan., Y. Wang & W. Chen. 2020. "Visualizing the emerging trend of biochar research and applications in 2019: a

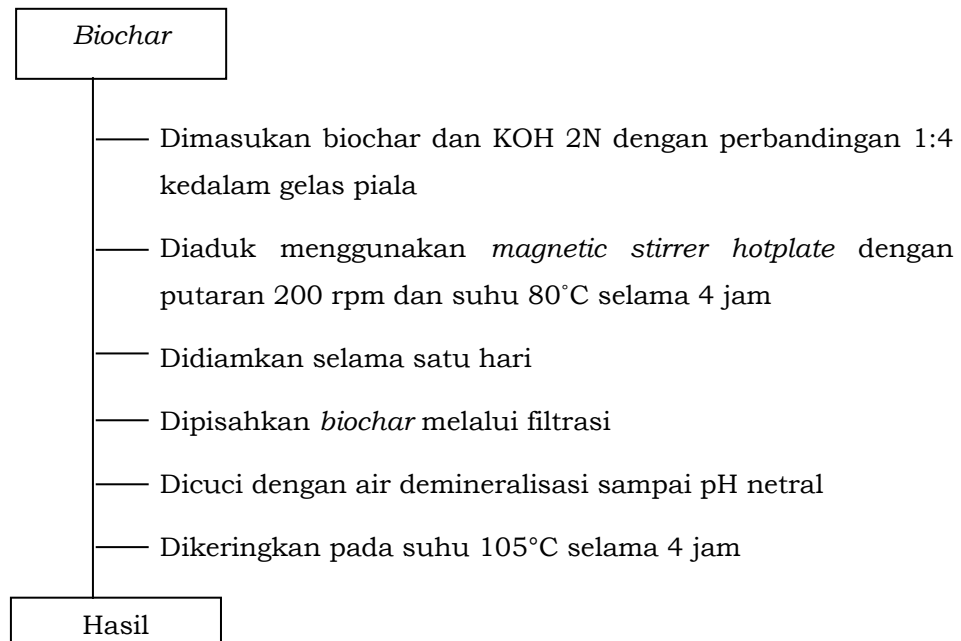
- scientometric analysis and review". *Journal Of Cleaner Production*. Vol 2: 135-150.
- Yoo, M., S. J. Han dan J. H. Wee. 2013. "Carbon Dioxide Capture of Sodium Hydroxide Aqueous Solution". *Journal of Enviromental Management*. Vol. 114(2013) : 512-5129.
- Yuningsih, L. M., D. Mulyadi dan A. J. Kurnia. 2016. "Pengaruh Aktivasi Arang Aktif dari Tongkol Jagung dan Tempurung Kelapa Terhadap Luas Permukaan dan Daya Jerap Iodin". *Jurnal Kimia VALENSI: Jurnal Penelitian dan Pengembangan Ilmu Kimia*. Vol.2(1) : 30-34.
- Zhang H, Xu F, Xue J, Chen S, Wang J dan Yang Y (2020) *Enhanced removal of heavy metal ions from aqueous solution using manganese dioxide-loaded biochar: Behavior and mechanism*. www.nature.com/scientificreports/.
- Zhang X, Zhang S, Yang H, Shao J, Chen Y, Liao X, Wang X dan Chen H (2016) Generalized two-dimensional correlation infrared spectroscopy to reveal mechanisms of CO₂ capture in nitrogen enriched biochar. *Proceedings of the Combustion Institute* 000. 1–8

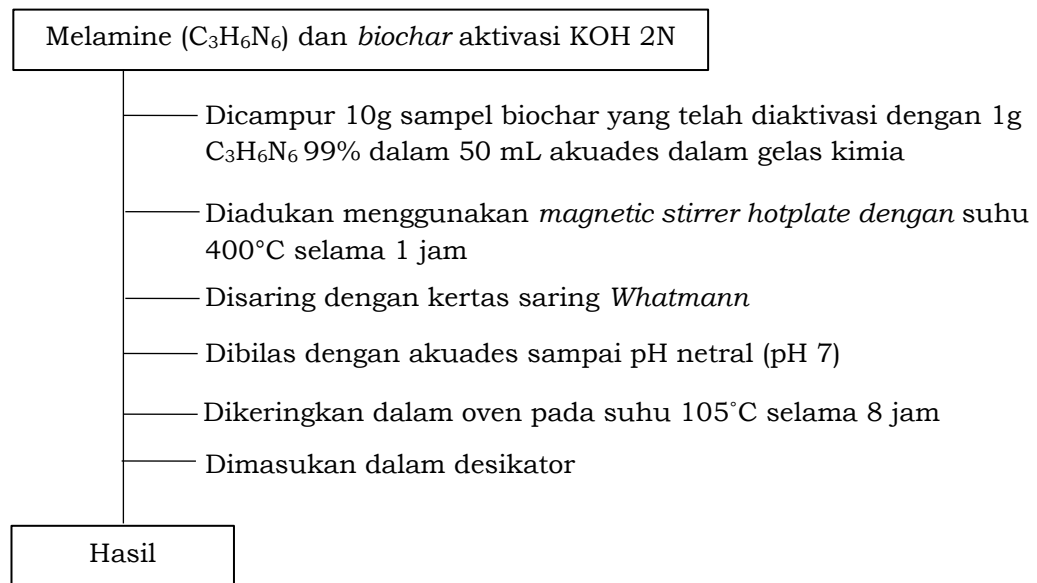
LAMPIRAN

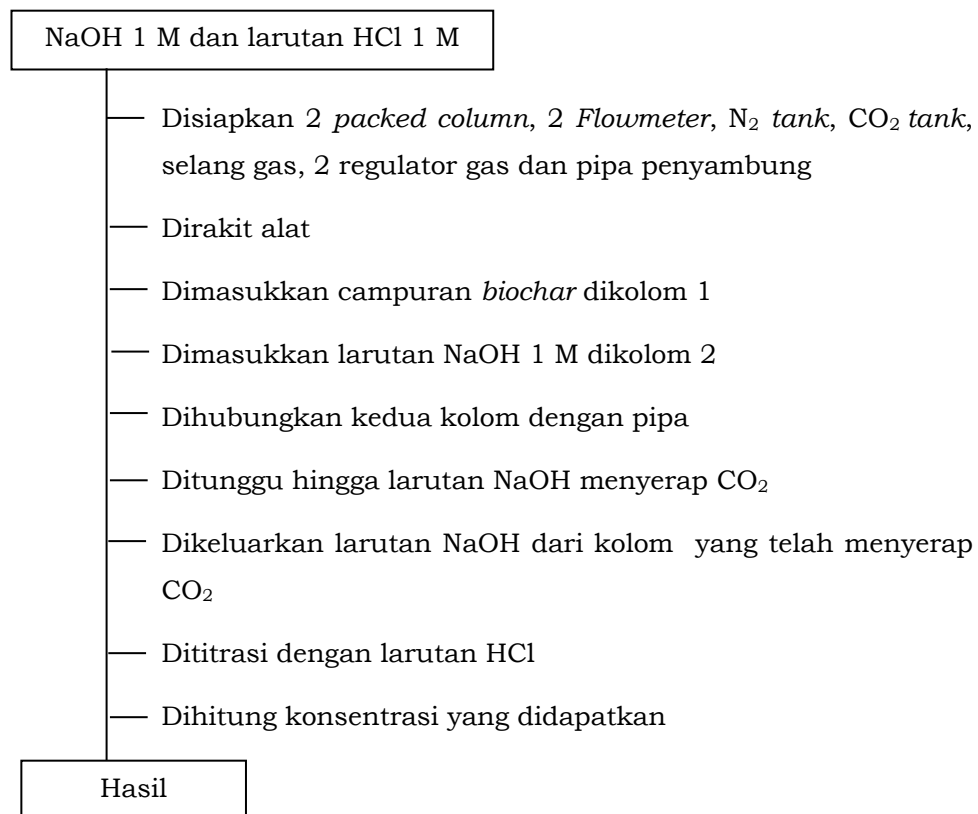
Lampiran 1. Skema Umum Penelitian

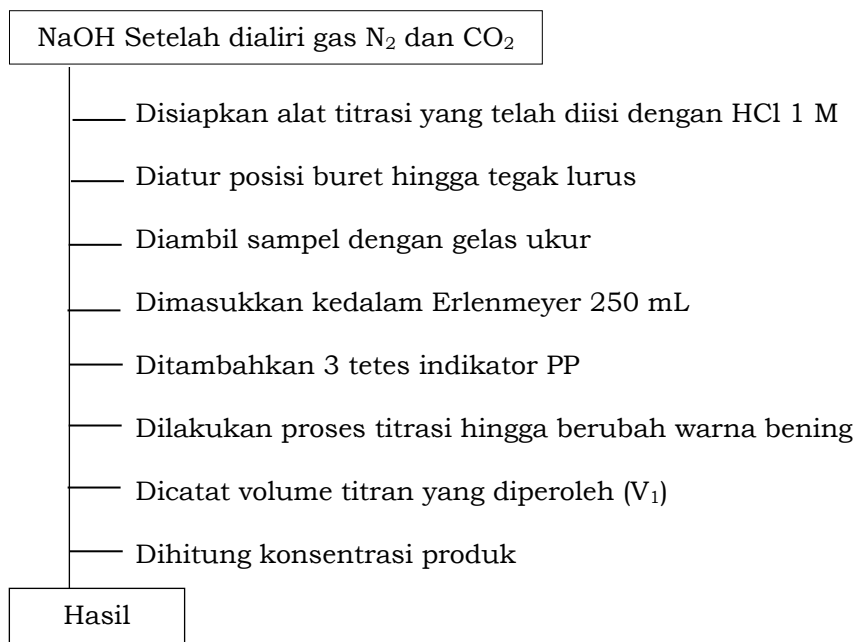


Lampiran 2. Persiapan bahan baku dan pembuatan *biochar*

Lampiran 3. Mempersiapkan *alkaline* KOH-modified biochar

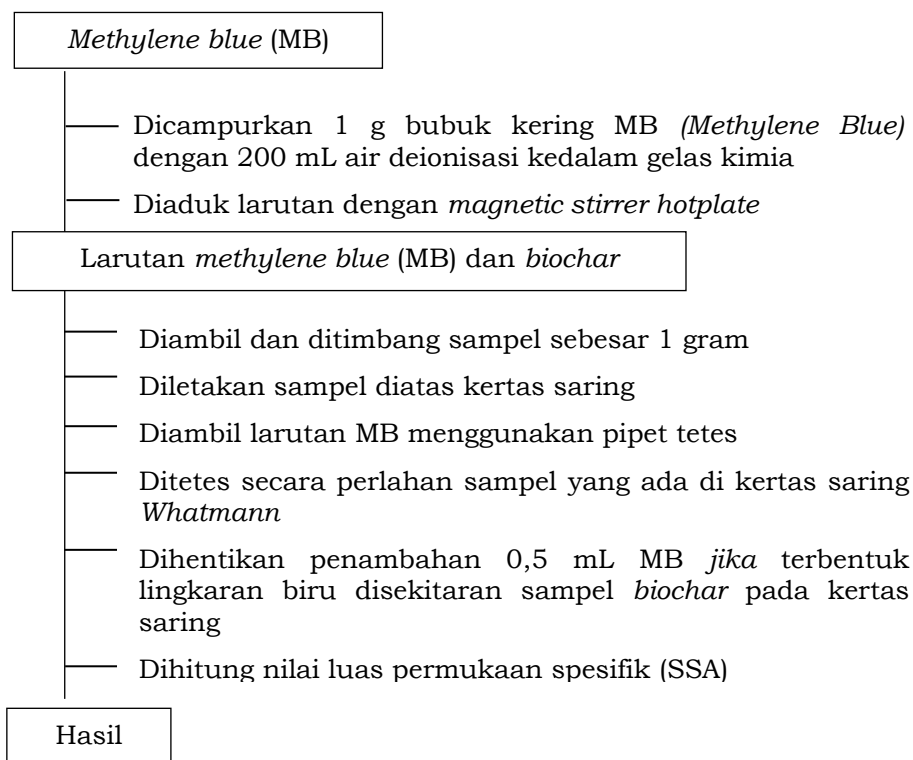
Lampiran 4. Mempersiapkan *N-doped Modified Biochar*

Lampiran 5. Fixed-bed N-doped Modified Biochar

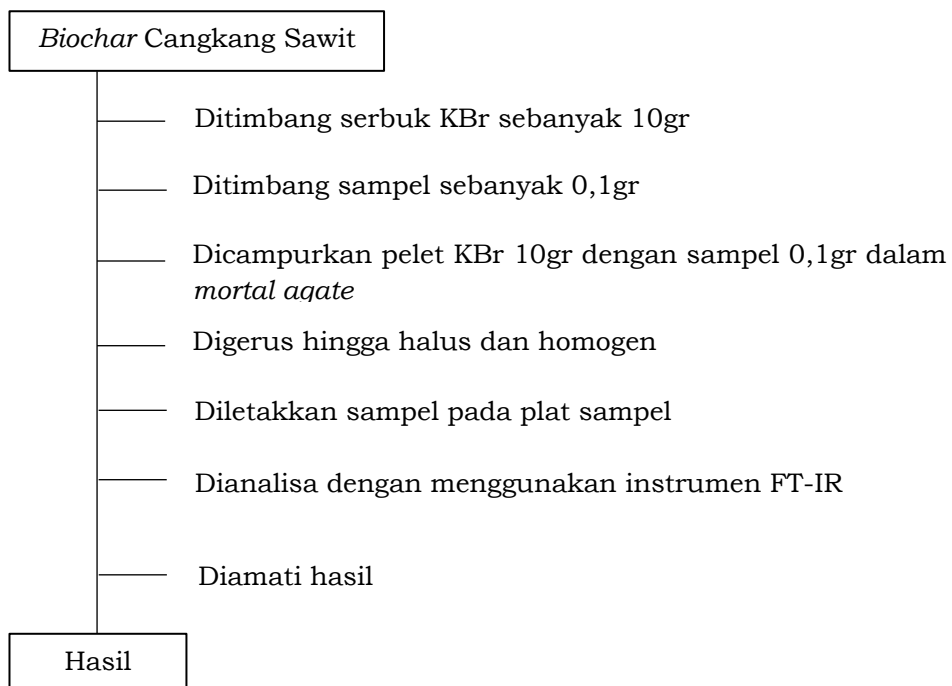
Lampiran 6. Penentuan Konsentrasi CO_2 dengan Titrasi Asam-basa

Lampiran 7. Karakterisasi

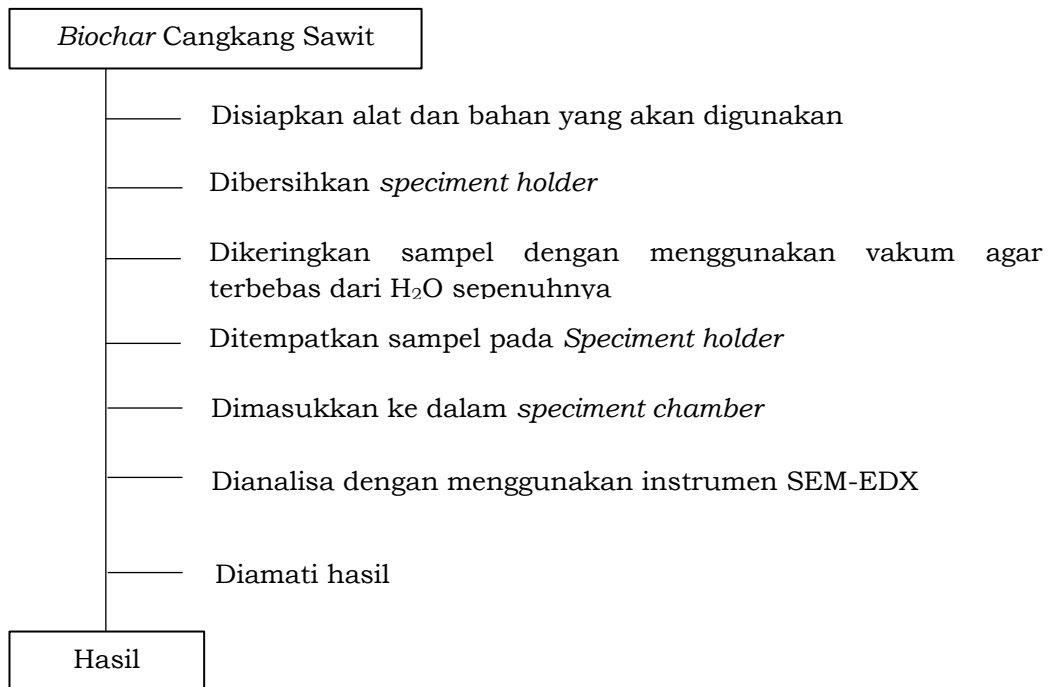
A. Penentuan Luas Permukaan Spesifik (SSA)



B. Penentuan Kandungan Gugus Fungsi



C. Penentuan Morfologi Permukaan *Biochar*



Lampiran 8. Perhitungan**A. Pembuatan Larutan KOH**

$$N = \frac{n \times a}{V}$$

Keterangan :

N = Normalitas (N)

n = Mol suatu zat (mol)

a = Ekivalen suatu zat

V = Volume Larutan (L)

Diketahui :

$$\text{KOH} = 2 \text{ N}$$

$$\text{Mr KOH} = 56 \text{ g/mL}$$

$$V = 40 \text{ mL} = 0,04 \text{ L}$$

$$2 \text{ N} = \frac{n \times 1}{0,04 \text{ L}} \quad n = \frac{gr}{Mr}$$

$$N = 2 \times 0,04 \text{ L} \quad gr = n \cdot Mr$$

$$N = 0,08 \text{ mol} \quad gr = 0,08 \text{ mol} \cdot 56 \text{ g/mL}$$

$$gr = 4,48 \text{ gr}$$

B. ppm Pada Larutan Metilen biru

$$\text{ppm} = \frac{mg}{L} \text{ atau } = \frac{\mu g}{mL}$$

$$\text{Diketahui : } mg \text{ MB} = 1 \text{ gr} = 1000 \text{ mg}$$

$$L = 200 \text{ mL} = 0,2 \text{ L}$$

$$\text{MB} = \frac{Mg}{L} = \frac{1000 \text{ mg}}{0,2 \text{ L}} = 5000 \text{ ppm}$$

C. Pembuatan Larutan NaOH 1 M Untuk Pengisian Packed Column

$$1 \text{ M} = \frac{gr}{Mr} \times \frac{1000}{mL}$$

$$1 \text{ M} = \frac{gr}{40} \times \frac{1000}{100 \text{ mL}}$$

$$gr \times 1000 = 4000 \times 1$$

$$gr \times 1000 = 4000$$

$$gr = \frac{4000}{1000}$$

$$gr = 4 \text{ gr}$$

D. Pembuatan Larutan HCl 1 M Untuk Larutan Titran

$$1 \text{ M} = \frac{gr}{Mr} \times \frac{1000}{mL}$$

$$1 \text{ M} = \frac{gr}{36,5} \times \frac{1000}{200 \text{ mL}}$$

$$gr \times 1000 = 7300 \times 1$$

$$gr \times 1000 = 7300$$

$$gr = \frac{7300}{1000}$$

$$gr = 7,3 \text{ gr}$$

E. Penentuan Luas Permukaan Spesifik (*Specific Surface Area/SSA*) (Uji MB Spot)***Biochar Non Aktivasi***

$$\begin{aligned} \text{Diketahui : } N_{\text{rata-rata}} &= 72 \text{ tetesan} = \frac{72}{20} = 3,6 \text{ mL} \\ Av &= 6,02 \times 10^{23} \text{ mol} \end{aligned}$$

$$Amb = 130 \text{ \AA}^2 = (1,3 \times 10^{-8})^2 \text{ m}^2 = 1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2$$

Ditanya : SSA (m^2g^{-1})

$$SSA = \frac{1}{319,87} \times \frac{1}{200} (0,5 \text{ N}) \times Av \times Amb \times \frac{1}{10}$$

$$SSA = \frac{1}{319,87} \times \frac{1}{200} (0,5 \times 3,6 \text{ mL}) \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2) \times \frac{1}{10}$$

$$SSA = \frac{1}{63,974} \times (1,8 \text{ mL}) \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2) \times \frac{1}{10}$$

$$SSA = \frac{1,8}{639,740} \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2)$$

$$SSA = \frac{1,8}{639,740} \times (10,1738 \times 10^8)$$

$$SSA = \frac{18,31284 \times 10^8}{639,740}$$

$$SSA = 0,00002863 \times 10^8$$

$$SSA = 2.862,54 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$$

N-Doped Modified Biochar

$$\begin{aligned} \text{Diketahui : } N_{\text{rata-rata}} &= 99,66 \text{ tetesan} = \frac{78,66}{20} = 3,933 \text{ mL} \\ Av &= 6,02 \times 10^{23} \text{ mol} \end{aligned}$$

$$Amb = 130 \text{ \AA}^2 = (1,3 \times 10^{-8})^2 \text{ m}^2 = 1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2$$

Ditanya : SSA (m^2g^{-1})

$$\text{SSA} = \frac{1}{319,87} \times \frac{1}{200} (\text{O},5 \text{ N}) \times \text{Av} \times \text{Amb} \times \frac{1}{10}$$

$$\text{SSA} = \frac{1}{319,87} \times \frac{1}{200} (\text{O},5 \times 3,933 \text{ mL}) \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2) \times \frac{1}{10}$$

$$\text{SSA} = \frac{1}{63.974} \times (1,9665 \text{ mL}) \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2) \times \frac{1}{10}$$

$$\text{SSA} = \frac{1,9665}{639.740} \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2)$$

$$\text{SSA} = \frac{2,4915}{639.740} \times (10,1738 \times 10^8)$$

$$\text{SSA} = \frac{20.0067 \times 10^8}{639.740}$$

$$\text{SSA} = 0,00003127 \times 10^8$$

$$\text{SSA} = 3.127,32 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$$

Biochar Aktivasi KOH 2N

$$\text{Diketahui : } N_{\text{rata-rata}} = 89,67 \text{ tetesan} = \frac{89,67}{20} = 4,4835 \text{ mL}$$

$$\text{Av} = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}$$

$$\text{Amb} = 130 \text{ \AA}^2 = (1,3 \times 10^{-8})^2 \text{ m}^2 = 1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2$$

Ditanya : SSA (m^2g^{-1})

$$\text{SSA} = \frac{1}{319,87} \times \frac{1}{200} (\text{O},5 \text{ N}) \times \text{Av} \times \text{Amb} \times \frac{1}{10}$$

$$\text{SSA} = \frac{1}{319,87} \times \frac{1}{200} (\text{O},5 \times 4,4835 \text{ mL}) \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2) \times \frac{1}{10}$$

$$\text{SSA} = \frac{1}{63.974} \times (2,24175 \text{ mL}) \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2) \times \frac{1}{10}$$

$$\text{SSA} = \frac{2,24175}{639.740} \times (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}) \times (1,69 \times 10^{-16} \text{ m}^2)$$

$$\text{SSA} = \frac{2,24175}{639.740} \times (10,1738 \times 10^8)$$

$$\text{SSA} = \frac{22,807 \times 10^8}{639.740}$$

$$\text{SSA} = 0,00003565 \times 10^8$$

$$\text{SSA} = 3.565,04 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$$

F. Perhitungan Penyerapan Gas CO₂ Oleh NaOH dan Biochar

1. Sampel Biochar Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 1 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^{\circ}\text{C} = 298^{\circ}\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 2 \text{ L}$$

Lama penyerapan = 2 menit

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ Atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,77489}{24,4658} \\ &= 0,276 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{1,548 \text{ atm} \times 2 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{3,0976}{24,4658} \\ &= 0,126 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 0,126} = 0,686 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,126}{0,276 + 0,126} = 0,313 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{1,548 \times 2 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298^{\circ}\text{K}}$$

$$n = \frac{3,0976}{24,465}$$

$$n = 0,126 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 0,126 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 5,544 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{5.544}{2} = 2.772 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{3,6+3,4}{2} = 3,5 \text{ mL}$$

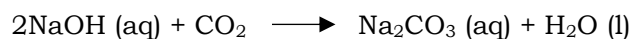
$$V \text{ NaOH} = \frac{15+15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 3,5 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$3,7 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{3,5}{15} = 0,233 \text{ M}$$



$$0,233 \text{ M} \quad 0,116 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,233 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,116 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,116 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 1,75 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 1,75 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,077 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{77}{2} = 38,5 \text{ mg/L}$$

2. Sampel Biochar Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 3 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 6 \text{ L}$$

$$\text{Lama penyerapan} = 2 \text{ menit}$$

Penyelesaian :

$$\text{Mol gas N}_2 = \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298 \text{ K}}$$

$$= \frac{6,77489}{24,4658}$$

$$= 0,276 \text{ mol}$$

$$\text{Mol gas CO}_2 = \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{1,742 \text{ atm} \times 6 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298 \text{ K}}$$

$$= \frac{10,45}{24,4658}$$

$$= 0,427 \text{ mol}$$

Fraaksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 0,427} = 0,392 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,427}{0,276 + 0,427} = 0,607 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{1,742 \text{ atm} \times 6 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298^\circ \text{K}}$$

$$n = \frac{10,452}{24,465}$$

$$n = 0,427 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 0,427 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 18,788 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{18,788}{6} = 3.131,33 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{3,8 + 3,8}{2} = 3,8 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{15 + 15}{2} = 15 \text{ mL}$$

$$M_a \times V_a \times a = M$$

$$b \times V_b \times b$$

$$1 \times 3,8 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$3,8 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{3,8}{15} = 0,253 \text{ M}$$



$$0,253 \text{ M} \quad 0,1265 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO_2 adalah 0,253 M, sedangkan molaritas CO_2 setelah penyerapan sebesar 0,1265 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,1265 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 1,8975 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 1,8975 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,08349 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{83,49}{6} = 13,915 \text{ mg/L}$$

3. Sampel *Biochar* Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO_2 5 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 10 \text{ L}$$

$$\text{Lama penyerapan} = 2 \text{ menit}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,77489}{24,4658} \\ &= 0,276 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{2,129 \text{ atm} \times 10 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{21,2925}{24,4658} \\ &= 0,87 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraaksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{N_2} = \frac{\text{mol } N_2}{\text{mol } N_2 + \text{mol } CO_2} = \frac{0,276}{0,276 + 0,87} = 0,24 \text{ mol}$$

$$X_{CO_2} = \frac{\text{mol } CO_2}{\text{mol } N_2 + \text{mol } CO_2} = \frac{0,87}{0,276 + 0,87} = 0,759 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{2,129 \text{ atm} \times 10 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol}} \cdot K \times 298^\circ K}$$

$$n = \frac{21,29}{24,465}$$

$$n = 0,87 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

$$\text{gr } CO_2 = n \times M_r$$

$$\text{gr } CO_2 = 0,87 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr } CO_2 = 38,28 \text{ gr}$$

$$\text{ppm } CO_2 = \frac{Mg}{L} = \frac{38,280}{10} = 3.828 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{4,2+4}{2} = 4,1 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{15+15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 4,1 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$4,1 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{4,1}{15} = 0,273 \text{ M}$$



$$0,273 \text{ M} \quad 0,1365 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,273 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,1365 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,1365 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 2,0475 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 2,0475 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,09009 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{90,09}{10} = 9,009 \text{ mg/L}$$

4. Sampel Biochar Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 7 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 14 \text{ L}$$

Lama penyerapan = 2 menit

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,77489}{24,4658} \\ &= 0,276 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{2,709 \text{ atm} \times 14 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{37,926}{24,465} \\ &= 1,55 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 1,55} = 0,151 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{1,55}{0,276 + 1,55} = 0,848 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{2,709 \times 14 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298^\circ \text{K}}$$

$$n = \frac{37,926}{24,465}$$

$$n = 1,55 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 1,55 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 68,2 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{68.200}{14} = 4,871,428 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{4,6+4,2}{2} = 4,4 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{15+15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 4,4 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$4,4 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{4,4}{15} = 0,293 \text{ M}$$



$$0,293 \text{ M} \quad 0,1465 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,293 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,1465 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,1465 \text{ M} \times 0,015 \text{ mL} = 2,1975 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 2,1975 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,09669$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{96,69}{14} = 6,91 \text{ mg/L}$$

5. Sampel Biochar Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 10 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^{\circ}\text{C} = 298^{\circ}\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 20 \text{ L}$$

Lama penyerapan = 2 menit

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ Atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{Atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,774}{24,465} \\ &= 0,276 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{3,290 \text{ atm} \times 20 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{Atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{65,813}{24,465} \\ &= 2,69 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 2,69} = 0,093 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{2,69}{0,276 + 2,69} = 0,906 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{3,290 \times 20 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{Atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298^{\circ}\text{K}}$$

$$n = \frac{65,8}{24,465}$$

$$n = 2,689 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 2,689 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 118,316 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{118.316}{20} = 5.915,8 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{4,6+4,8}{2} = 4,7 \text{ mL}$$

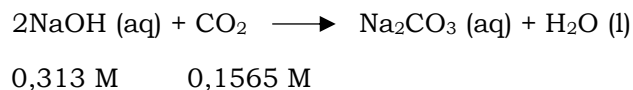
$$V \text{ NaOH} = \frac{15+15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 4,7 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$4,7 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{4,7}{15} = 0,313 \text{ M}$$



Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,313 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,1565 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,1565 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 2,3475 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 2,3475 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,10329 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{103,29}{20} = 5,164 \text{ mg/L}$$

6. Sampel N-Doped Modified Biochar (Laju Alir Gas CO₂ 1 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 2 \text{ L}$$

$$\text{Lama penyerapan} = 2 \text{ menit}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ Atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{Atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,774}{24,465} \end{aligned}$$

$$= 0,276 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{1,548 \text{ atm} \times 2 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{3,097}{24,465} \\ &= 0,126 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraaksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 0,126} = 0,686 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,126}{0,276 + 0,126} = 0,313 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{1,548 \times 2 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298^\circ \text{K}}$$

$$n = \frac{3,096}{24,465}$$

$$n = 0,126 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 0,126 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 5,544 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{5.544}{2} = 2.772 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{2,8-3}{2} = 2,9 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{15+15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 2,9 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$2,9 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{2,9}{15} = 0,193M$$



$$0,193 M \quad 0,0965 M$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,193 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,0965 M

$$Mol CO_2 = M \times V$$

$$Mol CO_2 = 0,0965 M \times 0,015 L = 1,4475 \times 10^{-3} mol$$

$$Gr CO_2 = n \times Mr$$

$$Gr CO_2 = 1,4475 \times 10^{-3} mol \times 44 gr/mol$$

$$Gr CO_2 = 0,06369 gr$$

$$Ppm = \frac{Mg}{L} = \frac{63,69}{2} = 31,845 mg/L$$

7. Sampel *N-Doped Modified Biochar* (Laju Alir Gas CO₂ 3 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^\circ C = 298^\circ K$$

$$R = 0,0821 L \cdot atm/mol \cdot K$$

$$V CO_2 = 6 L$$

$$Lama penyerapan = 2 \text{ menit}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} Mol \text{ gas } N_2 &= \frac{P \times V N_2}{R \times T} = \frac{6,774 atm \times 1 L}{0,0821 L \cdot \frac{atm}{mol} \cdot K \times 298 K} \\ &= \frac{6,77489}{24,4658} \\ &= 0,276 mol \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mol \text{ gas } CO_2 &= \frac{P \times V CO_2}{R \times T} = \frac{1,742 atm \times 6 L}{0,0821 L \cdot \frac{atm}{mol} \cdot K \times 298 K} \\ &= \frac{10,45}{24,4658} \\ &= 0,427 mol \end{aligned}$$

Fraksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{N_2} = \frac{mol N_2}{mol N_2 + mol CO_2} = \frac{0,276}{0,276 + 0,427} = 0,392 mol$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,427}{0,276 + 0,427} = 0,607 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{1,742 \text{ atm} \times 6 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298^\circ \text{K}}$$

$$n = \frac{10,452}{24,465}$$

$$n = 0,427 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 0,427 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 18,788 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{18.788}{6} = 3.131,33 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{3,2 + 3,4}{2} = 3,3 \text{ mL}$$

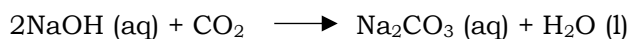
$$V \text{ NaOH} = \frac{15 + 15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 3,3 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$3,3 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{3,3}{15} = 0,22 \text{ M}$$



$$0,22 \text{ M} \quad 0,11 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,22 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,11 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,11 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 1,65 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 1,62 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,0726 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{72,6}{6} = 12,1 \text{ mg/L}$$

8. Sampel *N-Doped Modified Biochar* (Laju Alir Gas CO₂ 5 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 10 \text{ L}$$

Lama penyerapan = 2 menit

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,77489}{24,4658} \\ &= 0,276 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{2,129 \text{ atm} \times 10 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{21,2925}{24,4658} \\ &= 0,87 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 0,87} = 0,24 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,87}{0,276 + 0,87} = 0,759 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{2,129 \text{ atm} \times 10 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298^\circ\text{K}}$$

$$n = \frac{21,29}{24,465}$$

$$n = 0,87 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 0,87 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 38,28 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{38,280}{10} = 3.828 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{3,8+3,6}{2} = 3,7 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{15+15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 3,7 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$3,7 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{3,7}{15} = 0,246 \text{ M}$$



$$0,247 \text{ M} \quad 0,123 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,247 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,123 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,123 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 1,85 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 1,85 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,0814 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{81,4}{10} = 8,14 \text{ mg/L}$$

9. Sampel N-Doped Modified Biochar (Laju Alir Gas CO₂ 7 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^{\circ}\text{C} = 298^{\circ}\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 14 \text{ L}$$

$$\text{Lama penyerapan} = 2 \text{ menit}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,77489}{24,4658} \\ &= 0,276 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{2,709 \text{ atm} \times 14 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{37,926}{24,465} \\ &= 1,55 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 1,55} = 0,151 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{1,55}{0,276 + 1,55} = 0,848 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{2,709 \times 14 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{Atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298^{\circ}\text{K}}$$

$$n = \frac{37,926}{24,465}$$

$$n = 1,55 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 1,55 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 68,2 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{Mg}{L} = \frac{68.200}{14} = 4,871,428 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{4,2 + 4}{2} = 4,1 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{15 + 15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 4,1 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$4,1 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{4,1}{15} = 0,273 \text{ M}$$



$$0,273 \text{ M} \quad 0,136 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,273 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,136 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,136 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 2,04 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{gr CO}_2 = 2,04 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 0,08976 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{Mg}{L} = \frac{89,76}{14} = 6,411 \text{ mg/L}$$

10. Sampel N-Doped Modified Biochar (Laju Alir Gas CO₂ 10 L/menit)

Diketahui :

$$T = 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K}$$

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

$$V \text{ CO}_2 = 20 \text{ L}$$

$$\text{Lama penyerapan} = 2 \text{ menit}$$

Penyelesaian :

$$\begin{aligned} \text{Mol gas N}_2 &= \frac{P \times V \text{ N}_2}{R \times T} = \frac{6,774 \text{ Atm} \times 1 \text{ L}}{0,0821 \text{ L}\cdot\frac{\text{Atm}}{\text{mol}}\cdot\text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{6,774}{24,465} \end{aligned}$$

$$= 0,276 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} \text{Mol gas CO}_2 &= \frac{P \times V \text{ CO}_2}{R \times T} = \frac{3,290 \text{ atm} \times 20 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298 \text{ K}} \\ &= \frac{65,813}{24,465} \\ &= 2,69 \text{ mol} \end{aligned}$$

Fraaksi mol gas CO₂ dan N₂

$$X_{\text{N}_2} = \frac{\text{mol N}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{0,276}{0,276 + 2,69} = 0,093 \text{ mol}$$

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol N}_2 + \text{mol CO}_2} = \frac{2,69}{0,276 + 2,69} = 0,906 \text{ mol}$$

Penentuan mol CO₂ pada saat penyerapan

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

$$n = \frac{P \text{ CO}_2 \times V \text{ CO}_2}{R \times T}$$

$$n = \frac{3,290 \times 20 \text{ L}}{0,0821 \text{ L} \cdot \frac{\text{Atm}}{\text{mol}} \cdot \text{K} \times 298^\circ \text{K}}$$

$$n = \frac{65,8}{24,465}$$

$$n = 2,689 \text{ mol}$$

Penentuan berat gas CO₂ sebelum penyerapan

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

$$\text{gr CO}_2 = 2,689 \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{gr CO}_2 = 118,316 \text{ gr}$$

$$\text{ppm CO}_2 = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{118,316}{20} = 5.915,8 \text{ mg/L}$$

Hasil Titration Asam-Basa :

$$V \text{ HCl} = \frac{4,6 + 4,4}{2} = 4,5 \text{ mL}$$

$$V \text{ NaOH} = \frac{15 + 15}{2} = 15 \text{ mL}$$

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

$$1 \times 4,5 \times 1 = M_b \times 15 \times 1$$

$$4,5 = M_b \times 15$$

$$M_b = \frac{4,5}{15} = 0,3 \text{ M}$$



$$0,3 \text{ M} \qquad 0,15 \text{ M}$$

Jadi Molaritas NaOH setelah penyerapan gas CO₂ adalah 0,3 M, sedangkan molaritas CO₂ setelah penyerapan sebesar 0,15 M

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

$$\text{Mol CO}_2 = 0,15 \text{ M} \times 0,015 \text{ L} = 2,25 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

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

$$\text{Gr CO}_2 = 2,25 \times 10^{-3} \text{ mol} \times 44 \text{ gr/mol}$$

$$\text{Gr CO}_2 = 0,099 \text{ gr}$$

$$\text{Ppm} = \frac{\text{Mg}}{\text{L}} = \frac{99}{20} = 4,95 \text{ mg/L}$$

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

Adsorben *Biochar Non Aktivasi*

Variasi Laju Alir Gas CO ₂ (L/Menit)	Co (ppm)	Ce (ppm)	Qe (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (% E)
1	2.772	38,5	911,166	98,61
3	3.131,333	13,915	3.117,418	99,55
5	3.828	9,009	6.364,985	99,76
7	4.871,428	6,91	11.350,542	99,85
10	5.915,8	5,164	19.702,12	99,91

Adsorben *N-Doped Modified Biochar*

Variasi Laju Alir Gas CO ₂ (L/Menit)	Co (ppm)	Ce (ppm)	Qe (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (% E)
1	2.772	31,845	913,385	98,85
3	3.131,333	12,1	3.119,233	99,61
5	3.828	8,14	6.366,433	99,78
7	4.871,428	6,411	11.351,706	99,87
10	5.915,8	4,95	19.702,833	99,92

1. Sampel *Biochar Non Aktivasi* (Laju Alir Gas CO₂ 1 L/menit)

Diketahui :

$$Co = 2.772 \text{ mg/L}$$

$$Ce = 38,5 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{2.772 - 38,5}{2.772} \times 100\%$$

$$\% E = 98,61 \%$$

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

$$Qe = \frac{2.772 - 38,5}{6} \times 2 \text{ L}$$

$$Qe = 911,166 \text{ mg/g}$$

2. Sampel *Biochar* Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 3 L/menit)

Diketahui :

$$C_o = 3.131,333 \text{ mg/L}$$

$$C_e = 13,915 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{3.131,333 - 13,915}{3.131,333} \times 100\%$$

$$\% E = 99,55 \%$$

$$Q_e = \frac{C_o - C_e}{m} \times V$$

$$Q_e = \frac{3.131,333 - 13,915}{6} \times 6 \text{ L}$$

$$Q_e = 3.117,418 \text{ mg/g}$$

3. Sampel *Biochar* Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 5 L/menit)

$$C_o = 3.828 \text{ mg/L}$$

$$C_e = 9,009 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{3.828 - 9,009}{3.828} \times 100\%$$

$$\% E = 99,76 \%$$

$$Q_e = \frac{C_o - C_e}{m} \times V$$

$$Q_e = \frac{3.828 - 9,009}{6} \times 10 \text{ L}$$

$$Q_e = 6.364,985 \text{ mg/g}$$

4. Sampel *Biochar* Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 7 L/menit)

$$C_o = 4.871,428 \text{ mg/L}$$

$$C_e = 6,91 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{4.871,428 - 6,91}{4.871,428} \times 100\%$$

$$\% E = 99,85 \%$$

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

$$Q_e = \frac{4.871,428 - 6,91}{6} \times 14 \text{ L}$$

$$Q_e = 11.350,542 \text{ mg/g}$$

5. Sampel *Biochar* Non Aktivasi (Laju Alir Gas CO₂ 10 L/menit)

$$Co = 5.915,8 \text{ mg/L}$$

$$Ce = 5,164 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{5.915,8 - 5,164}{5.915,8} \times 100\%$$

$$\% E = 99,91 \%$$

$$Q_e = \frac{C1 - C0}{m} \times V$$

$$Q_e = \frac{5.915,8 - 5,164}{6} \times 20 \text{ L}$$

$$Q_e = 19.702,12 \text{ mg/g}$$

6. Sampel *N-Doped Modified Biochar* (Laju Alir Gas CO₂ 1 L/menit)

$$Co = 2.772 \text{ mg/L}$$

$$Ce = 31,845 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{2.772 - 31,845}{2.772} \times 100\%$$

$$\% E = 98,85 \%$$

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

$$Q_e = \frac{2.772 - 31,845}{6} \times 2 \text{ L}$$

$$Q_e = 913,385 \text{ mg/g}$$

7. Sampel N-Doped Modified Biochar (Laju Alir Gas CO₂ 3 L/menit)

$$Co = 3.131,333 \text{ mg/L}$$

$$Ce = 12,1 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{3.131,333 - 12,1}{3.131,333} \times 100\%$$

$$\% E = 99,61 \%$$

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

$$Q_e = \frac{3.131,333 - 12,1}{6} \times 6 \text{ L}$$

$$Q_e = 3.119,233 \text{ mg/g}$$

8. Sampel N-Doped Modified Biochar (Laju Alir Gas CO₂ 5 L/menit)

$$Co = 3.828 \text{ mg/L}$$

$$Ce = 8,14 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{3.828 - 8,14}{3.828} \times 100\%$$

$$\% E = 99,78 \%$$

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

$$Q_e = \frac{3.828 - 8,14}{6} \times 10 \text{ L}$$

$$Q_e = 6.366,433 \text{ mg/g}$$

9. Sampel N-Doped Modified Biochar (Laju Alir Gas CO₂ 7 L/menit)

$$C_o = 4.871,428 \text{ mg/L}$$

$$C_e = 6,411 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{4.871,428 - 6,411}{4.871,428} \times 100\%$$

$$\% E = 99,87 \%$$

$$Q_e = \frac{C_o - C_e}{m} \times V$$

$$Q_e = \frac{4.871,428 - 6,411}{6} \times 14 \text{ L}$$

$$Q_e = 11.351,706 \text{ mg/g}$$

10. Sampel N-Doped Modified Biochar (Laju Alir Gas CO₂ 10 L/menit)

$$C_o = 5.915,8 \text{ mg/L}$$

$$C_e = 4,95 \text{ mg/L}$$

Jawab :

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

$$\% E = \frac{5.915,8 - 4,95}{5.915,8} \times 100\%$$

$$\% E = 99,92 \%$$

$$Q_e = \frac{C_o - C_e}{m} \times V$$

$$Q_e = \frac{5.915,8 - 4,95}{6} \times 20 \text{ L}$$

$$Q_e = 19.702,833 \text{ mg/L}$$

H. Penentuan Isoterm Adsorpsi

1. Penentuan Model Isoterm Adsorpsi *Biochar Non Aktivasi*

Co (ppm)	Ce (ppm)	Qe (mg/g)	Isoterm Langmuir		Isotherm Freundlich	
			Ce (ppm)	(Ce/Qe)	Log Ce	Log Qe
2.772	38,5	911,166	38,5	0,0422	1,585	2,959
3.131,333	13,915	3.117,418	13,915	0,0044	1,143	3,493
3.828	9,009	6.364,985	9,009	0,0014	0,954	3,803
4.871,428	6,91	11.350,542	6,91	0,0006	0,839	4,055
5.915,8	5,1645	19.702,12	5,1645	0,0002	0,713	4,294

- Isoterm Langmuir

$$\frac{Ce}{Qe} = \frac{1}{kLQm} + \frac{1}{Qm} Ce$$

Persamaan y = 0,0013x-0,0095

R²= 0,9767

Sehingga diperoleh :

$$\frac{1}{Qm} = 0,0013$$

$$Qm = \frac{1}{0,0013} = 769,23 \text{ mg/g}$$

$$\frac{1}{kLQm} = -0,0095$$

$$kL = \frac{1}{-0,0095 \times 769,23}$$

$$kL = 0,136 \text{ L/mg}$$

- Isoterm Freundlich

$$\log qe = \log Kf + (1/n)\log Ce$$

Persamaan y = -1,5154x+5,3072

R²= 0,9834

Sehingga diperoleh

$$\frac{1}{n} = -1,5154$$

$$n = -0,659 \text{ L/mg}$$

$$\log Kf = 5,3072$$

$$Kf = 205.947$$

Keterangan ;

Ce : Konsentrasi ion atau molekul adsorbat pada saat setimbang (mg/L)

Qe : Jumlah ion atau molekul adsorbat (mg/g)

kL : Konstanta Langmuir (L/mg)

Qm : Konstan Langmuir yang mengindikasikan kapasitas maksimum adsorpsi (mg/g)

Keterangan ;

qe : Jumlah ion yang terserap pada saat equilibrium (mg/g)

Kf : Konstanta Freundlich yang berkaitan dengan kapasitas (L/mg)

N : Konstanta Freundlich berkaitan dengan afinitas (L/mg)

Ce : Konsentrasi ion pada saat setimbang (mg/L)

2. Penentuan Model Isoterm Adsorpsi *N-Doped Modified Biochar*

Co (ppm)	Ce (ppm)	Qe (mg/g)	Isoterm Langmuir		Isotherm Freundlich	
			Ce (ppm)	(Ce/Qe)	Log Ce	Log Qe
2.772	31,845	913,385	31,845	0,0348	1,503	2,960
3.131,333	12,1	3.119,233	12,1	0,0019	1,082	3,494
3.828	8,14	6.366,433	8,14	0,0012	0,910	3,803
4.871,428	6,411	11.351,706	6,411	0,0005	0,806	4,055
5.915,8	4,95	19.702,833	4,95	0,0002	0,694	4,294

- Isoterm Langmuir

$$\frac{Ce}{Qe} = \frac{1}{kLQm} + \frac{1}{Qm} Ce$$

Persamaan y = 0,0013x-0,0093

R²= 0,9597

Sehingga diperoleh :

$$\frac{1}{Qm} = 0,0013$$

$$Qm = \frac{1}{0,0013} = 769,23 \text{ mg/g}$$

$$\frac{1}{kLQm} = -0,0093$$

$$kL = \frac{1}{-0,0093 \times 769,23}$$

$$kL = -0,139 \text{ L/Mg}$$

- Isoterm Freundlich

$$\text{Log } qe = \text{Log } Kf + (1/n)\text{Log } Ce$$

Persamaan y = -1,6259x+5,3455

R²= 0,9794

Sehingga diperoleh

$$\frac{1}{n} = -1,6259$$

$$n = -0,615$$

$$\text{Log } Kf = 5,3455$$

$$Kf = 233.947$$

Keterangan ;

Ce : Konsentrasi ion atau molekul adsorbat pada saat setimbang (mg/L)

Qe : Jumlah ion atau molekul adsorbat (mg/g)

kL : Konstanta Langmuir (L/mg)

Qm : Konstan Langmuir yang mengindikasikan kapasitas maksimum adsorpsi (mg/g)

Keterangan ;

qe : Jumlah ion yang terserap pada saat *equilibrium* (mg/g)

Kf : Konstanta Freundlich yang berkaitan dengan kapasitas (L/mg)

N : Konstanta Freundlich berkaitan dengan afinitas (L/mg)

Ce : Konsentrasi ion pada saat setimbang (mg/L)

Lampiran 9. Dokumentasi Penelitian



Cangkang kelapa sawit kering



Hasil *biochar* yang telah dihaluskan dan diayak 200 mesh



Ditimbang 10 g *biochar* untuk persiapan aktivasi



Dicampur KOH 40 mL dan *Biochar*, diaduk menggunakan *magnetic stirrer*



Dipisahkan dengan filtrasi hingga mencapai pH netral



Dikeringkan hasil filtrasi menggunakan suhu 105°C selama 4 jam



Hasil *biochar* aktivasi KOH 2N



Ditimbang 1 g melamin sianurat



Ditimbang 10 g *biochar* aktivasi KOH 2N



Dicampur 1 g melamin sianurat dan *biochar* aktivasi 2N menggunakan *magnetic stirrer hotplate*



Dipisahkan dengan filtrasi hingga mencapai pH netral



Dikeringkan hasil filtrasi menggunakan suhu 105°C selama 8 jam



Hasil *N-Doped modified biochar*



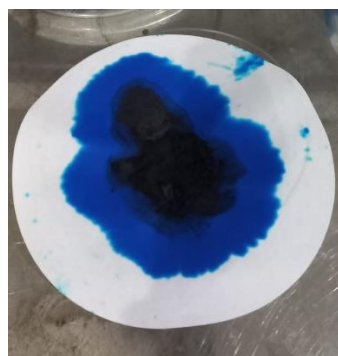
Ditimbang *biochar* 1 g



Ditimbang metilen biru 1 g



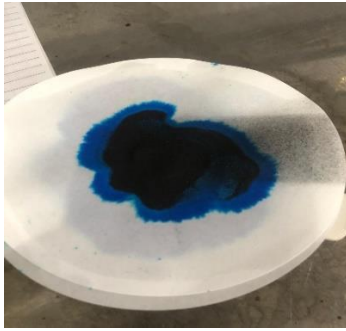
Dicampur metilen biru 1 g dengan akuades 200 mL menggunakan *magnetic stirrer hotplate*



Hasil tetesan metilen biru pada *biochar* non aktivasi diatas kertas saring



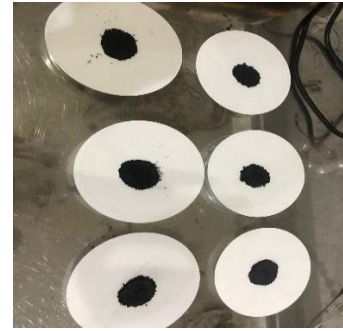
Hasil tetesan metilen biru pada *N-Doped modified biochar* diatas kertas saring



Hasil tetesan metilen biru pada *biochar* aktivasi KOH 2N di atas kertas saring



Uji MB Spot pengulangan 2 dan 3 yang telah ditetesi metilen biru dan terbentuk agregat



Uji MB Spot pengulangan 2 dan 3 yang belum ditetesi metilen biru



Flowmeter gas N_2 dan CO_2



Gas CO_2 didalam larutan NaOH pada saat proses penyerapan gas CO_2



Dimasukkan 15 mL larutan NaOH 1 M kedalam *packed column*



Dimasukkan 6 g *biochar* ke dalam *packed column*



Penutupan menggunakan aluminium foil pada erlenmeyer berisi NaOH pasca penyerapan



Laju alir gas CO_2 1 L/Menit



Laju alir gas N_2 0,5
L/Menit



Laju alir gas CO_2 7
L/Menit



Laju alir gas CO_2 10
L/Menit



Laju alir gas CO_2 3
L/Menit



Laju alir gas CO_2 5
L/Menit



Tekanan gas CO_2 untuk
laju alir 10 L/Menit



Tekanan gas CO_2 untuk
laju alir gas CO_2 3
L/Menit



Tekanan gas CO_2 untuk
laju alir gas CO_2 7
L/Menit



Tekanan gas CO_2 untuk
laju alir gas CO_2 5
L/Menit



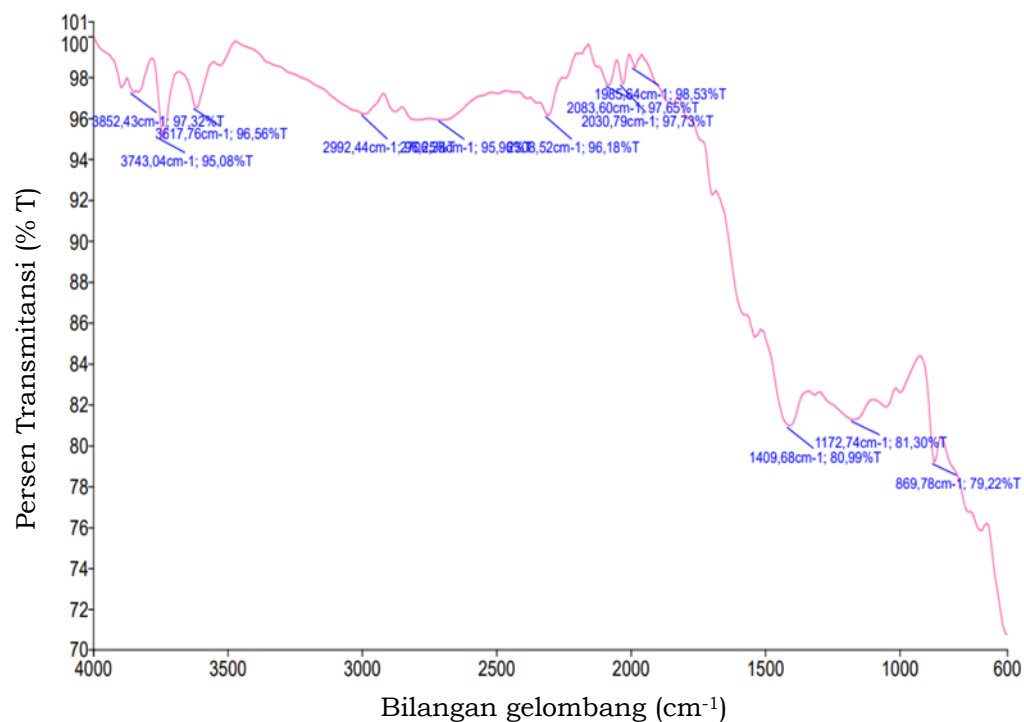
Rangkaian alat *Capture* CO₂ sebelum dikontakkan dengan *biochar*, larutan NaOH dan tabung berisi gas N₂ dan CO₂



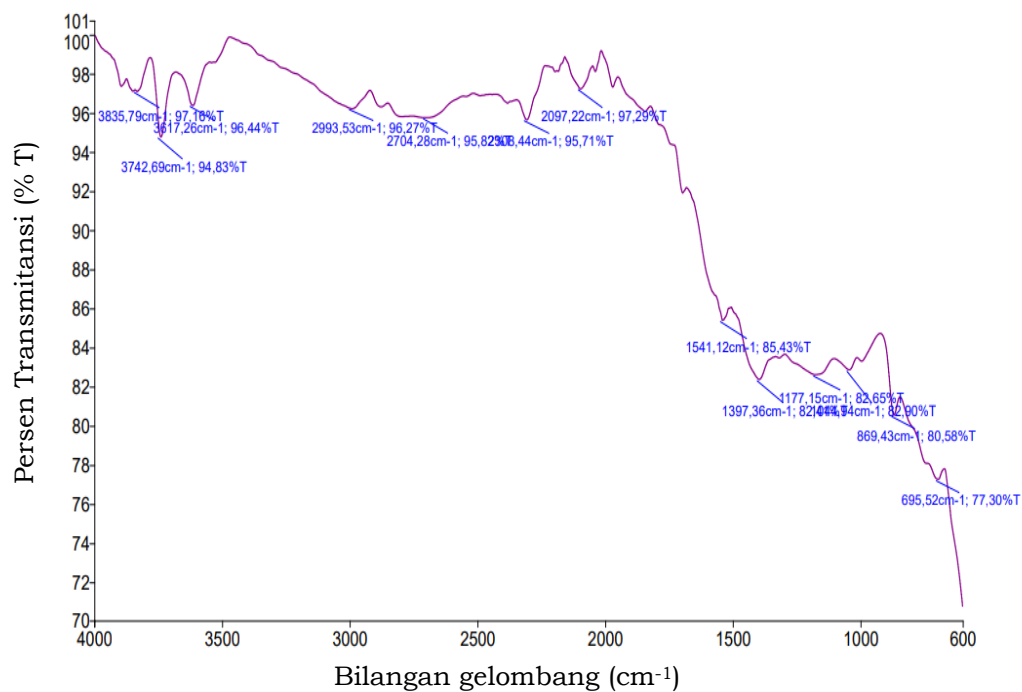
Rangkaian alat capture CO₂ setelah dikontakan gas CO₂, gas N₂, sampel *biochar* dan NaOH di dalam *packed column*

Lampiran 10. Hasil Karakterisasi

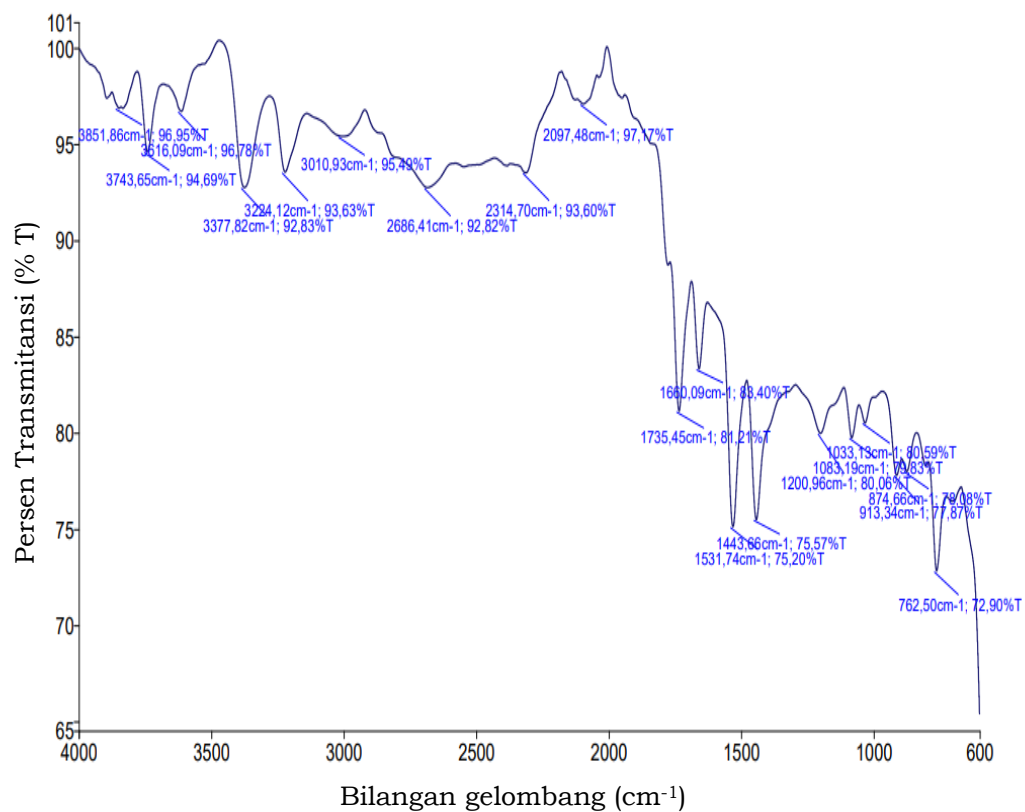
A. FTIR (Fourier Transform Infrared)



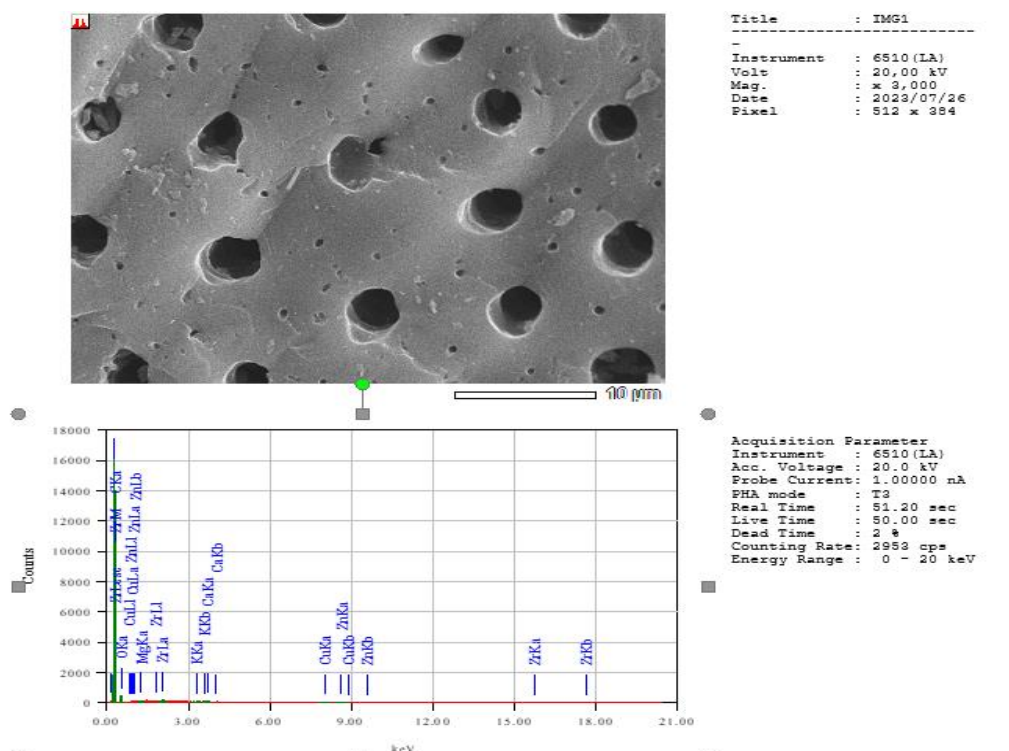
Hasil FTIR Sampel *Biochar* Non Aktivasi

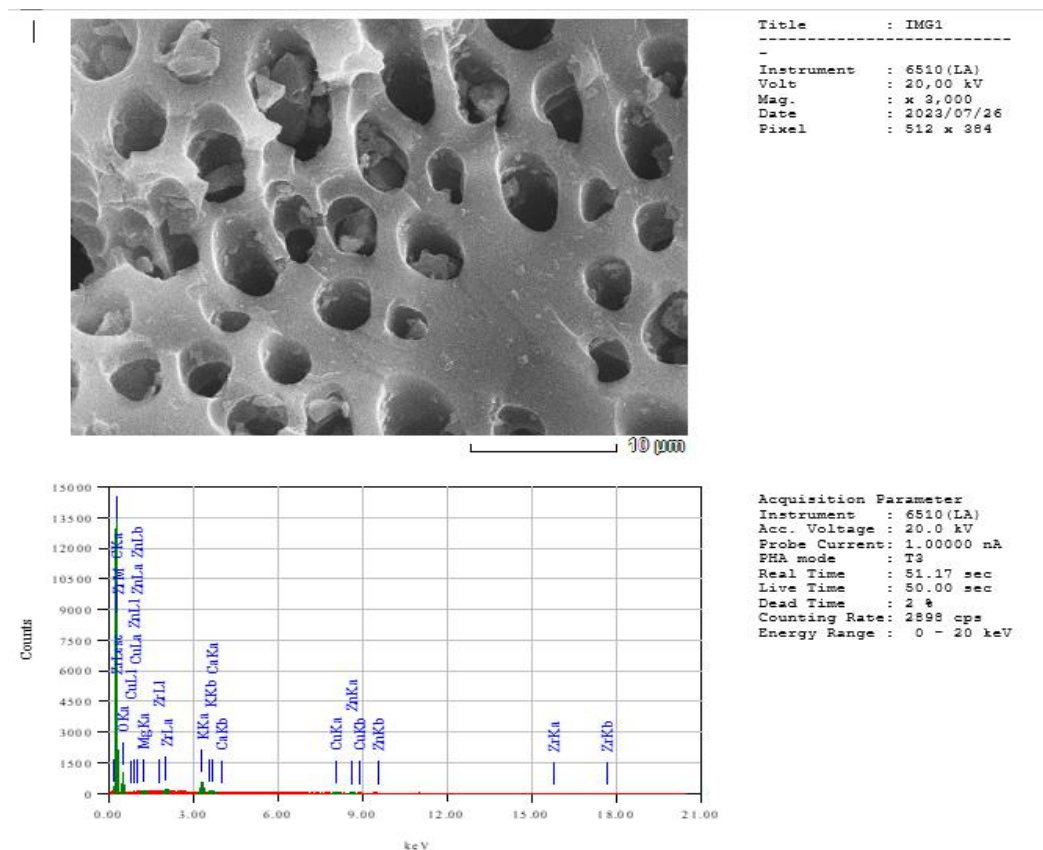


Hasil FTIR Sampel *Biochar* Aktivasi KOH 2N

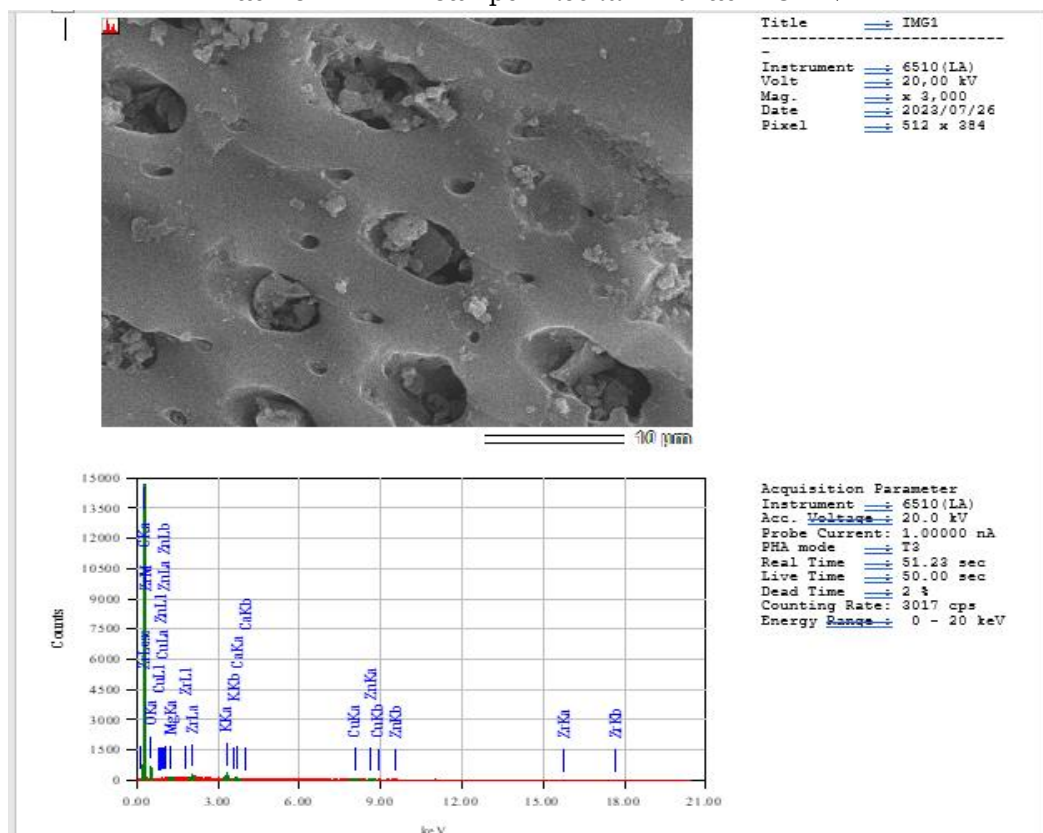


B. SEM EDX (Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)





Hasil SEM-EDX Sampel *Biochar Aktivasi KOH 2N*



Hasil SEM-EDX Sampel *N-Doped Modified Biochar*

Lampiran 11. Data Lapangan Pada Rangkaian Alat *Capture CO₂*

No	Sampel	Laju Alir Gas		Tekanan Gas		Hasil Penyerapan Gas		Suhu Ruang (K)	Lama penyerapan		Volume Gas CO ₂ (L)	Hasil Titrasi Buret (mL)		
		(L/menit)				CO ₂ (ppm)			(menit)					
		N ₂	CO ₂	N ₂	CO ₂	Biochar	NaOH		P ₁	P ₂		1	2	
				(Kg/cm ²)	(Kgf/cm ²)									
1	Biochar Non Aktivasi	0,5	1	7	1,4	2.733,5	38,5	298	2	2	2	Skala awal	0	3,6
												Skala akhir	3,6	7
												Volume HCl	3,6	3,4
												Volume NaOH	15	15
2	Biochar Non Aktivasi	0,5	3	7	1,8	3.117,418	13,915	298	2	2	6	Skala awal	7	10,8
												Skala akhir	10,8	14,6
												Volume HCl	3,8	3,8
												Volume NaOH	15	15
3	Biochar Non Aktivasi	0,5	5	7	2,2	3.818,991	9,009	298	2	2	10	Skala awal	14,6	18,8
												Skala akhir	18,8	22,8
												Volume HCl	4,2	4
												Volume NaOH	15	15
4	Biochar Non Aktivasi	0,5	7	7	2,8	4.864,518	6,91	298	2	2	14	Skala awal	22,8	27,4
												Skala akhir	27,4	31,6
												Volume HCl	4,6	4,2
												Volume NaOH	15	15
5	Biochar Non Aktivasi	0,5	10	7	3,4	5.910,635	5,1645	298	2	2	20	Skala awal	0	4,6
												Skala akhir	4,6	9,4

Aktivasi												Volume HCl	4,6	4,8
												Volume NaOH	15	15
6	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	0,5	1	7	1,4	2.740,155	31,845	298	2	2	2	Skala awal	9,4	12,2
												Skala akhir	12,2	15,2
												Volume HCl	2,8	3
												Volume NaOH	15	15
7	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	0,5	3	7	1,8	3.119,233	12,1	298	2	2	6	Skala awal	15,2	18,4
												Skala akhir	18,4	21,8
												Volume HCl	3,2	3,4
												Volume NaOH	15	15
8	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	0,5	5	7	2,2	3.819,86	8,14	298	2	2	10	Skala awal	0	3,8
												Skala akhir	3,8	7,4
												Volume HCl	3,8	3,6
												Volume NaOH	15	15
9	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	0,5	7	7	2,8	4.865,017	6,14	298	2	2	14	Skala awal	7,4	11,6
												Skala akhir	11,6	15,6
												Volume HCl	4,2	4
												Volume NaOH	15	15
10	<i>N-Doped Modified Biochar</i>	0,5	10	7	3,4	5.910,85	4,95	298	2	2	20	Skala awal	15,6	20,2
												Skala akhir	20,2	24,6
												Volume HCl	4,6	4,4
												Volume NaOH	15	15