

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BATUBARA *LIGNITE*, *COALITE*
DAN *MOLASSES* TERHADAP KARAKTERISTIK KOKAS**

(Skripsi)

Oleh

Pratiwi

NPM 2117041060



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BATUBARA *LIGNITE*, *COALITE* DAN *MOLASSES* TERHADAP KARAKTERISTIK KOKAS

Oleh

PRATIWI

Batubara lignite merupakan batubara peringkat rendah dengan kadar air dan zat volatil tinggi sehingga kualitasnya kurang optimal meskipun ketersediaannya melimpah di Indonesia. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi Komposisi K1 (80% *lignite*, 10% *coalite*, 10% *molasses*), K2 (70% *lignite*, 20% *coalite*, 10% *molasses*), K3 (60% *lignite*, 30% *coalite*, 10% *molasses*), dan K4 (50% *lignite*, 40% *coalite*, 10% *molasses*)., Proses karbonisasi dilakukan pada suhu 600°C selama 1 jam, kemudian sampel dianalisis melalui uji proksimat, X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), dan Scanning Electron Microscopy (SEM). Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi komposisi lignite dan coalite berpengaruh terhadap kadar air, kadar zat volatil, kandungan karbon tetap, serta struktur mikro kokas. Analisis XRF mengindikasikan dominasi unsur Si, Al, Fe, dan Ca, sedangkan XRD mengidentifikasi fasa kuarsa dengan struktur karbon yang lebih kristalin. Variasi K3 (60% lignite, 30% coalite, 10% molase) memberikan karakteristik terbaik dengan kadar air terendah (0,28%), zat volatil terendah (2,08%), serta struktur karbon yang lebih stabil. Dengan demikian, pemanfaatan *lignite* dan *coalite* dengan penambahan *molasses* sebagai perekat berpotensi meningkatkan kualitas kokas sehingga lebih layak untuk aplikasi industri.

Kata kunci: *Lignite*, *Coalite*, *Molasses*, Kokas, Karakterisasi

ABSTRACT

THE EFFECT OF COMPOSITION VARIATIONS OF LIGNITE, COALITE AND MOLASSES COAL ON THE CHARACTERISTICS OF COKE

Oleh

PRATIWI

Lignite coal is a low-rank coal with high water and volatile content so that its quality is less than optimal even though its availability is abundant in Indonesia. This study aims to determine the effect of variations in Composition K1 (80% lignite, 10% coalite, 10% molasses), K2 (70% lignite, 20% coalite, 10% molasses), K3 (60% lignite, 30% coalite, 10% molasses), and K4 (50% lignite, 40% coalite, 10% molasses). The carbonization process was carried out at a temperature of 600°C for 1 hour, then the samples were analyzed through proximate tests, X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), and Scanning Electron Microscopy (SEM). The results showed that variations in the composition of lignite and coalite affected the moisture content, volatile matter content, fixed carbon content, and microstructure of coke. XRF analysis indicated the dominance of Si, Al, Fe, and Ca elements, while XRD identified a quartz phase with a more crystalline carbon structure. The K3 variation (60% lignite, 30% coalite, 10% molasses) provided the best characteristics with the lowest moisture content (0.28%), the lowest volatile matter (2.08%), and a more stable carbon structure. Thus, the use of lignite and coalite with the addition of molasses as an adhesive has the potential to improve the quality of coke, making it more suitable for industrial applications.

Keywords: Lignite, Coalite, Molasses, Coke, Characterization

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BATUBARA *LIGNITE*, *COALITE*
DAN *MOLASSES* TERHADAP KARAKTERISTIK KOKAS**

Oleh

PRATIWI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi : **Pengaruh Variasi Komposisi Batubara *Lignite*,
Coalite dan *Molasses* Terhadap Karakteristik
Kokas**

Nama Mahasiswa : **Pratiwi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2117041060**

Program Studi : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

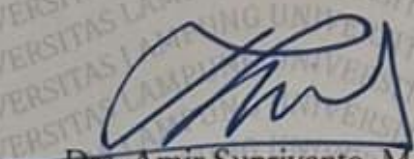


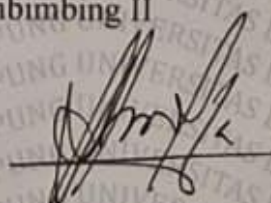
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

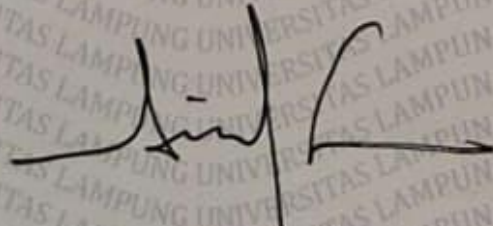
Pembimbing I

Pembimbing II


Drs. Amir Supriyanto, M.Si
NIP. 196504071991111001


Muhammad Amin, S.T., M.Si
NIP. 196906101999031004

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA


Arif Surtano, S.Si., M.Si., M.Eng
NIP. 1971090920001210011

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Drs. Amir Supriyanto, M.Si

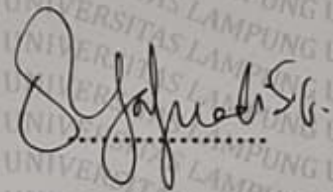


Sekretaris

: Muhammad Amin, S.T., M.Si

Penguji

Bukan Pembimbing : Drs. Syafriadi, M.Si

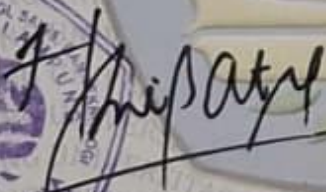


2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.

NIP. 197110012005011002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 06 Oktober 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Pratiwi
Nomor Pokok Mahasiswa : 2117041060
Jurusan : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya dengan judul **“Pengaruh Variasi Komposisi Batubara Lignite, Coalite dan Molasses Terhadap Karakteristik Kokas”** adalah hasil karya saya sendiri. Semua sumber data dan referensi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini telah disebutkan dengan benar sesuai dengan kaidah akademik. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini belum pernah diajukan sebelumnya untuk memperoleh gelar akademik di universitas atau institusi manapun.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 06 Oktober 2025


Pratiwi
NPM. 2117041060

RIWAYAT HIDUP



Pratiwi lahir di Bandar Lampung pada tanggal 23 April 2003. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Dede Afidi dan Ibu Rini Wahyuni. Penulis menyelesaikan pendidikan di TK Pajajaran pada tahun 2009, SD N 1 Jaga Baya III pada tahun 2015, SMP N 5 Bandar Lampung 2018, dan SMA Utama 2 Bandar Lampung pada tahun 2021. Penulis masuk sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN tahun 2021.

Selama menempuh pendidikan di Universitas Lampung, penulis aktif tergabung dalam organisasi Mahasiswa Pecinta Alam (Mapala) Tingkat Universitas Lampung sebagai anggota Divisi Gunung Hutan tahun 2023, dan menjadi Koordinator Petualangan Alam Bebas Universitas Lampung tahun 2024.

Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Riset Konversi dan Konservasi Energi Terbarukan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Cisitubandung dengan judul “Sistem Pemeliharaan Turbin Vortex Pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro”. Kegiatan pengabdian kepada masyarakat penuh penulis ikuti dalam program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung pada tahun 2024 di Desa Gedung Wani Timur, Marga Tiga, Lampung Timur. Penulis melaksanakan penelitian untuk menyusun skripsi dengan judul “**Pengaruh Variasi Komposisi Batubara *Lignite*, *Coalite* dan *Molasses* Terhadap Karakteristik Kokas**”, di bawah bimbingan Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si. dan Bapak Muhammad Amin, S.T., M.Si

MOTTO

*“Bernaunglah dalam karaktermu, sebagaimana laut
memeluk rahasia di kedalamannya”*

-Pratiwi

*“But life goes on, life doesn't revolve around you,
Hidup itu bukan tentang kamu, jadi mau hidup sepahit apa,
ya hidup aja”*

-Iqbal Ramadhan

“Jika jalannya buntu, maka buatlah jalanmu sendiri”
-Eichiro Oda (Roronoa Zoro - One Piece Eps.988, 20.40)

PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, kupersembahkan skripsi ini kepada:

Nenekku&Kakekku

Nursiyah Sarippudin dan Alm. Sarippudin

Atas segala doa, kasih sayang dan dukungan yang tak pernah henti.

Ketiga Orang Tuaku

Bapak Dede Afidi, Bapak Hasbullah Hasyim dan Ibu Rini

Wahyuni

Pahlawan hidupku yang dengan cinta, doa, dan pengorbanannya menjadi cahaya di setiap langkahku, yang menjadi penguat dan penyemangat dalam setiap perjalanan ini. Tanpa kalian, aku bukan apa-apa.

SANWACANA

Segala puji syukur ke hadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul:

“Pengaruh Variasi Komposisi Batubara *Lignite*, *Coalite* dan *Molasses* Terhadap Karakteristik Kokas”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Fisika di Universitas Lampung. Proses penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari dukungan, bimbingan, dan motivasi dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Drs. Amir Supriyanto, M.Si., selaku Dosen Pembimbing I atas kesabaran, bimbingan, serta kritik konstruktif yang diberikan selama proses penelitian hingga penyelesaian skripsi ini.
2. Bapak Muhammad Amin, S.T., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang telah membimbing, memberikn ilmu, motivasi dan arahan dalam proses penyusunan skripsi.
3. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si., selaku Dosen Pembahas yang telah memberikan arahan, kritik, serta masukan berharga dalam penyelesaian penyusunan skripsi.
4. Seluruh dosen Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan pengalaman berharga selama penulis menempuh studi.
5. Bapak Eng.Heri Saria, S.Si., M.Si., selaku Dekan FMIPA Univeritas Lampung.Bapak Arif Surtono, S.Si.,M.Eng., elaku ketua jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Prof. Drs. Posman Manurung, B.Sc., M.Si., Ph.D., selaku pembimbing akademik yang telah membimbing penulis selama berkuliah dan menjadi mahasiswa di Universitas Lampung.
7. Staff Administrasi Jurusan Fisika yang telah membantu penulis dalam mengurus administrasi selama menempuh pendidikan S1

8. Adikku tersayang, Anggun Pratista dan Muhammad Angga yang telah memberikan dukungan, canda tawa, dan kesabaran mendengar keluhan penulis selama masa penyusunan skripsi.
9. Aldi Prawira, seseorang yang sangat penulis syukuri. Sebagaimana telah memberikan dukungan dan kasih sayang yang diberikan kepada penulis. Terima kasih karena rela menemani, menguatkan, dan menjadi pendengar setia setiap kali penulis merasa lelah, serta mengingatkan untuk tetap istirahat di tengah padatnya jadwal.
10. Adikku Tersayang di Organisasi Mapala Onet, Embun, Sakiru dan Surai yang selalu menemani, menyemangati, membantu dan melepas penas untuk bermain.
11. Saudara, Kiyai, Kanjeng dan adik-adikku di Mapala Unila yang telah memberi canda tawa, nasehat dan kesabaran mendengar keluhan penulis selama penyusunan skripsi.
12. Serta teman-teman Fisika angkatan 2021.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan pihak yang telah membantu dengan balasan yang berlipat ganda.

Bandar Lampung, 06 Oktober 2025

Penulis,



Pratiwi

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah.....	5

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara	6
2.2 Batubara Lignite	8
2.3 <i>Coalite</i>	10
2.4 <i>Molasses</i>	12
2.5 Kokas.....	14
2.6 Karbonisasi.....	16
2.7 Uji Proksimat	16
2.8 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	19
2.9 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	21
2.10 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)</i>	22
2.11 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	24

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	26
3.2 Alat dan Bahan.....	26
3.3 Prosedur Penelitian.....	27
3.3.1 Preparasi Bahan.....	27
3.3.1.1 Pengeringan dan Penghalusan Awal	27
3.3.1.2 Penimbangan dan Pencampuran Bahan	28
3.3.2 Pembentukan Kokas.....	29
3.3.3 Proses Pengeringan	29
3.3.4 Penghalusan Ulang.....	29
3.3.5 Uji Proksimat	29
3.3.5.1 <i>Moisture Content</i> (kadar air).....	30

3.3.5.2 <i>Volatile Matter</i> (zat terbang).....	31
3.3.5.3 <i>Ash Content</i> (Kadar Abu).....	32
3.3.5.4 <i>Fixed Carbon</i> (Karbon Tetap).....	32
3.4 Diagram Alir Penelitian.....	35
3.4.1 Diagram Alir Preparasi Bahan	35
3.4.2 Diagram Alir Uji Proksimat	36
3.4.3 Diagram Alir Penelitian	37

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Variasi Komposisi Batubara <i>Lignite</i> , <i>Coalite</i> dan <i>Molasses</i> Terhadap Karakteristik Kokas.....	39
4.1.1 <i>Moisture Content</i>	39
4.1.2 <i>Volatile Matter</i>	40
4.1.3 <i>Ash Content</i>	40
4.1.4 <i>Fixed Carbon</i>	41
4.2 Pengaruh Variasi Komposisi Terhadap Hasil Karakterisasi Sampel Kokas Menggunakan <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	42
4.3 Pengaruh Variasi Komposisi Terhadap Hasil Karakterisasi Sampel Kokas Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	44
4.4 Pengaruh Variasi Komposisi Terhadap Hasil Karakterisasi Sampel Kokas Menggunakan <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR)	47
4.5 Pengaruh Variasi Komposisi Terhadap Hasil Karakterisasi Sampel Kokas Menggunakan <i>Scanning Elektron Microscopy</i> (SEM)	50

IV. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan	56
5.2 Saran.....	56

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Batubara Lignite.....	7
2. Coalite	10
3. Molase.....	12
4. Jenis Kokas Pengujian LTGK	15
5. Skema Kerja Alat XRF	22
6. Skema Kerja Alat FTIR	23
7. Skema Kerja Alat SEM.....	25
8. Diagram Alir Preparasi Bahan	33
9. Diagram Alir Uji Proksimat	34
10. Diagram Alir Penelitian	35
11. Grafik Hasil Sampel Kokas Menggunakan XRD	42
12. Grafik Hasil Sampel Kokas Menggunakan FTIR	45
13. Grafik Hasil Sampel Kokas Menggunakan SEM-EDS.....	50

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Alat-Alat Penelitian.....	24
2. Bahan-Bahan Penelitian.....	25
3. Variasi Komposisi Batubara <i>Lignite</i> , <i>Coalite</i> dan <i>Molase</i>	26
4. Rancangan Hasil Uji <i>Moisture Content</i> Kokas.....	31
5. Rancangan Hasil Uji <i>Volatile Matter</i> Kokas.....	31
6. Rancangan Hasil Uji <i>Ash Content</i> Kokas.....	32
7. Rancangan Hasil Uji <i>Fixed Carbon</i> Kokas.....	32
8. Hasil Uji Proksimat Kokas	36
9. Hasil Karakterisasi Oksida XRF Kokas	40
10. Fasa Dominan Kokas Berdasarkan aplikasi <i>Highscore</i>	42
11. Hasil Karakterisasi SEM-EDX Kokas	48

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil dan pengekspor batubara terbesar di dunia. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), cadangan batubara Indonesia diperkirakan akan habis dalam waktu sekitar 83 tahun apabila tingkat produksi saat ini tetap dipertahankan. Sebanyak 60% dari total cadangan tersebut merupakan batubara dengan peringkat rendah (low-rank coal), yang memiliki nilai kalor kurang dari 6.100 kal/gram. Meskipun kualitasnya rendah, jenis batubara ini banyak diminati di pasar global karena harganya yang relatif murah dan ketersediaannya yang melimpah (Afin & Kiono, 2021). Dengan produksi tahunan mencapai 562,5 juta ton, Indonesia menduduki peringkat ketiga dunia setelah Tiongkok dan India (BP Statistical Review, 2021). Walaupun demikian pemanfaatan batubara di dalam negeri masih dinilai belum optimal, terutama dalam sektor hilirisasi. Sebagian besar batubara digunakan untuk pembangkit listrik, sementara potensi lain seperti konversi menjadi kokas masih belum dimanfaatkan secara maksimal. Padahal, batubara *low-rank* seperti *lignite* dan *sub-bituminus* dapat dimanfaatkan lebih lanjut melalui proses karakterisasi dan pengolahan untuk mendukung program diversifikasi energi dan hilirisasi batubara. Karena cadangan energi fosil yang semakin menipis dan berpotensi merusak lingkungan di masa mendatang, banyak orang di seluruh dunia sekarang mendorong penggunaan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Sebaliknya, cara tersebut merupakan kampanye positif untuk melindungi alam dan Bumi dari kerusakan yang telah diobservasi oleh (Kamala et al., 2023).

Batubara merupakan adalah batuan sedimen yang berasal dari tumbuhan, berwarna coklat hingga hitam dan mengandung komponen karbon yang dapat terbakar. Komposisi dan sifat fisiknya sangat bergantung pada jenis tumbuhan asal serta kondisi geologis selama proses pembentukannya. Batubara diklasifikasikan ke dalam beberapa peringkat berdasarkan kandungan elemen kimianya, seperti kadar air, zat terbang, karbon tetap, abu, karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur (Ghony, 2022). Kemudian peneliti (Sufriadin et al., 2016) menunjukkan bahwa saat ini penggunaan batubara secara global sebagian besar masih didominasi oleh pembangkit tenaga listrik. Penggunaan lain dari batubara adalah produksi kokas sebagai bahan reduktor untuk kebutuhan industri besi dan baja. Selain itu batubara juga telah digunakan secara intensif sebagai bahan bakar pada pabrik semen yang tersebar di wilayah Indonesia

Dalam industri besi dan baja, khususnya proses tanur tiup (*blast furnace*), kokas memiliki peran sebagai bahan bakar, media reduktor, sekaligus penyangga beban. Kokas adalah material penting yang digunakan dalam industri baja sebagai reduktor dalam tanur tinggi. Proses pembuatan kokas umumnya dilakukan melalui karbonisasi. Pemilihan bahan baku dan kontrol suhu selama proses pemanasan sangat penting karena memengaruhi kualitas kokas yang dihasilkan, seperti kekuatan mekanik, reaktivitas, dan struktur mikrokristal (Zhang et al., 2021). Oleh karena itu, kokas harus memiliki kualitas mekanik dan kimia yang tinggi, seperti kekuatan tekan yang baik, daya tahan terhadap suhu tinggi, serta reaktivitas yang terkontrol terhadap gasifikasi ((Mohanty et al., 2019). Namun, pasokan batubara metalurgi berkualitas tinggi semakin terbatas dan harganya cenderung meningkat, sehingga perlu dikembangkan bahan baku alternatif untuk pembuatan kokas. Salah satu solusi yang dapat dikaji adalah pemanfaatan batubara peringkat rendah seperti *lignite* dan *coalite*. *Lignite* adalah batubara muda dengan kandungan volatil dan kelembaban yang tinggi. Meskipun kualitasnya lebih rendah, *lignite* banyak tersedia di Indonesia dan relatif murah. Sementara itu, *coalite* merupakan produk hasil karbonisasi parsial dari *lignite*, yang memiliki struktur karbon lebih stabil, kadar air lebih rendah, serta karakteristik termal yang lebih baik. Kombinasi *lignite*

dan *coalite* dalam proses pembuatan kokas berpotensi menurunkan biaya produksi dan memanfaatkan sumber daya lokal secara lebih efektif (Wang et al., 2023).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *lignite* dan *coalite* dapat memengaruhi sifat fisik dan kimia kokas, seperti *coke strength* (CS), *coke reactivity index* (CRI), dan *coke strength after reaction* (CSR). (Fang et al., 2019) menyatakan bahwa kadar air dalam *lignite* sangat memengaruhi pembentukan struktur karbon selama proses karbonisasi, yang berimplikasi langsung pada kekuatan mekanik kokas. Selain itu, penambahan *coalite* dalam jumlah kecil (kurang dari 6%) dapat meningkatkan densitas dan kekuatan kokas karena struktur karbon semi-stabil yang dimilikinya. Penelitian petrografi oleh (Wang et al., 2023) menunjukkan bahwa perbandingan antara komposisi maseral *lignite* dan *coalite* (*vitrinite* dan *inertinite*) berdampak pada struktur pori dan mikrostruktur kokas, sehingga proporsi campuran antara kedua bahan ini perlu dioptimalkan. Sementara itu, (Matsuoka et al., 2022) menunjukkan bahwa kokas dari *lignite* murni cenderung memiliki kandungan sulfur tinggi dan struktur yang tidak seragam, sehingga campuran dengan *coalite* menjadi strategi penting untuk memperbaiki kualitasnya. Di tengah meningkatnya perhatian global terhadap energi berkelanjutan dan efisiensi sumber daya, pemanfaatan *lignite* dan *coalite* sebagai bahan baku kokas juga menjadi langkah strategis untuk mengurangi ketergantungan terhadap impor batubara metalurgi serta meningkatkan nilai tambah batubara peringkat rendah yang selama ini kurang dimanfaatkan.

Berdasarkan uraian tersebut diperlukan penelitian yang lebih mendalam mengenai pengaruh variasi komposisi *lignite* dan *coalite* terhadap kualitas kokas, khususnya dalam aspek struktur kristal, komposisi kimia, morfologi permukaan, dan gugus fungsi senyawa karbon. Penelitian ini menjadi langkah awal yang penting dalam memahami karakteristik kokas berbasis *lignite* dan *coalite* sebagai bahan baku alternatif. Melalui analisis proksimat, XRD, XRF, FTIR, dan SEM, diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi kokas yang lebih ekonomis, efisien, dan mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan di sektor energi dan industri dalam negeri.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang diperoleh berdasarkan latar belakang sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap karakteristik kokas.
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap struktur kimia serta kristalinitas kokas.
3. Bagaimana pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap kandungan unsur kimia kokas.
4. Bagaimana pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap perubahan morfologi kokas.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap karakteristik kokas.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap struktur kimia dan kristalinitas kokas.
3. Mengetahui pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap kandungan unsur kimia kokas.
4. Mengetahui pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molases* terhadap perubahan morfologi kokas.

1. 4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian ini akan memberikan informasi dan wawasan mengenai pengaruh variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molasses* yang tepat menghasilkan kokas dengan kandungan karbon yang tinggi dan kadar abu yang rendah sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas kokas dalam aplikasi industri baja.

2. Dengan memahami sifat-sifat fisik dan kimia kokas yang dihasilkan, penelitian ini dapat memberikan manfaat untuk memastikan kualitas kokas memenuhi standar yang diperlukan dalam industri baja.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian ini menggunakan dua jenis bahan baku utama untuk pembuatan kokas, yaitu batubara *lignite* dan *coalite*.
2. Perekat yang digunakan berasal dari molase
3. Suhu pemanasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah 600°C.
4. Waktu pemanasan yang diterapkan adalah 1 jam
5. Variasi komposisi K1 (80% lignite, 10% coalite, 10% Molase), K2 (70% lignite, 20% coalite, 10% Molase), K1 (60% lignite, 30% coalite, 10% Molase), K1 (8-60% lignite, 40% coalite, 10% Molase).
6. Karakteristik kokas yang dihasilkan akan dianalisis menggunakan analisi proksimat, *teknik X-ray Fluorescence (XRF)*, *X-ray Diffraction (XRD)*, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)* dan *Scanning Electron Microscopy (SEM)*.
7. kondisi laboratorium dengan pengaturan suhu yang terkontrol dan bebas dari gangguan oksigen selama proses pemanasan.
8. Metode yang digunakan dalam pembuatan kokas adalah metode pemanasan dan pemadatan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Batubara

Energi batubara adalah salah satu sumber energi terbesar di dunia. Dalam arti lain, batubara adalah batuan sedimen (padatan) yang dapat terbakar yang berasal dari tumbuhan dan berwarna cokelat hingga hitam yang terkena proses fisika dan kimia sehingga mengandung karbon, hidrogen, dan oksigen dalam rantai karbon. karbonnya tinggi. Menurut Elliot dalam buku Batubara Indonesia (2014), batubara adalah batuan sedimen heterogen yang terdiri dari karbon, hidrogen, dan oksigen sebagai unsur utama, serta belerang dan nitrogen sebagai unsur tambahan (Kusniawati et al., 2023). Batubara juga mempunyai sifat yang mudah terbakar berasal dari tumbuhan dan mengalami proses fisika dan kimia yang membuatnya kaya dengan karbon. Batubara mengandung sulfur, yang menjadikannya salah satu sumber energi. Sebagai endapan gambut, sulfur termasuk dalam sistem pengendapan batubara dalam bentuk mineral sulfur, mineral sulfida, dan mineral organik. Gambut juga mengandung semua bentuk sulfur yang ditemukan dalam batubara, termasuk sulfur piritik, sulfat, dan organik, sehingga kandungan sulfurnya dapat diperkirakan (Yulmansyah, 2021).

Proses pembentukan batubara sendiri secara singkat dapat didefinisikan sebagai suatu perubahan dari sisa-sisa tumbuhan yang ada, mulai dari pembentukkan peat (*peatification*) kemudian lignit dan menjadi berbagai macam tingkat batubara, disebut juga sebagai proses *coalification*, yang kemudian berubah *menjadi anthracite*. Pembentukkan batubara ini sangat menemukan kualitas batubara. Batubara dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis berdasarkan kandungan karbon, kadar air, dan karakteristik fisiknya (Ibrahim et al., 2019).

Menurut, (Montallat et al., 2024) proses pembentukan batubara dibagi menjadi dua tahap, yang pertama yaitu tahap biokimia (penggambutan) dan yang kedua yaitu tahap pematubaraan (*coalification*). Pada tahap pematubaraan dibagi lagi dengan teori *in-situ* dan teori *drift*. Jenis-jenis batubara dibagi menjadi beberapa kelas, yaitu yang paling awal berjenis gambut, *lignit*, *sub-bituminous*, *bituminous*, dan *antrasit*. Pembagian kelas ini berdasarkan kandungan batubara yang berbeda-beda, salah satunya yaitu nilai kalor dari batubara. Jika nilai kalor pada batubara semakin tinggi, maka jenis batubaranya juga akan bagus. Penentuan kualitas batubara melalui metode proksimat adalah metode awal untuk mengetahui dan menentukan kadar *moisture* (air dalam batubara), kadar *mixture* ini mencakup pula nilai *free moisture* serta *total moisture*, *ash* (debu), *volatile matters* (zat terbang) dan *fixed carbon* (karbon yang tertambat) Dalam hal ini berikut salah satu jenis-jenis batubara seperti **Gambar 1**.



Gambar 1. Batubara Lignite (Brotowati & Pirman, 2017)

Dalam penelitian (Hibatulloh et al., 2022) karakteristik senyawa penyusun batubara, baik organik maupun anorganik, memengaruhi karakteristik kimia batubara. Analisis kimia batubara terdiri dari analisis *proximate* dan analisis *ultimate*. Analisis *proximate* adalah analisis yang biasa dilakukan untuk mengetahui seberapa berguna batubara bagi industri yang menggunakannya. Analisis *proximate* dilakukan untuk mengetahui jumlah unsur-unsur yang terkandung di dalam batubara, termasuk hidrogen, oksigen, karbon, nitrogen, dan sulfur. Analisis akhir dilakukan untuk mengetahui nilai kandungan air (kandungan air), kandungan relatif

zat terbang (*volatile matter*), karbon padat (*fixed carbon*), dan abu sebagai komponen anorganik dari pembakar. Standar ASTM membagi batubara ke dalam lima kelas umum. (1) Gambut, yang berpori dan memiliki kadar air di atas 75% dan nilai kalori yang paling rendah; (2) Lignite, yang mengandung air dari 35 hingga 75 persen beratnya; dan (3) *Ssubbituminus*, yang merupakan batubara peringkat rendah di mana *lignit* berada di daerah transisi dari jenis gambut ke batubara. rendah kandungan karbon tetapi memiliki kandungan air, zat terbang, dan oksigen yang tinggi; (4) Bituminus mengandung unsur karbon (C) antara 69 dan 86%, dan kadar VM antara 14 dan 54%; (5) Antrasit memiliki kandungan karbon lebih dari 93% dan kandungan zat terbang kurang dari 10% (Suhayadi, 2022).

2.2 Batubara *Lignite*

Batubara *lignite* atau dikenal sebagai *brown coal* merupakan jenis batubara dengan peringkat terendah dalam klasifikasi batubara berdasarkan tingkat kematangan geologis dan kandungan karbon. Lignite terbentuk dari proses pembatubaraan yang belum sempurna, dengan kondisi tekanan dan suhu yang masih relatif rendah. Karakteristik umum lignite mencakup kandungan air yang sangat tinggi (hingga 70%), nilai kalor yang rendah (sekitar 2500–5000 kcal/kg), dan kandungan *volatile matter* yang cukup besar. Warna *lignite* cenderung coklat kehitaman dengan struktur yang masih menyerupai jaringan tumbuhan asli. Dalam konteks sumber daya energi, lignite termasuk batubara yang kurang efisien jika dibandingkan dengan *bituminous* atau *anthracite*, namun keberlimpahannya serta biaya eksplorasi yang rendah menjadikannya alternatif penting bagi negara-negara berkembang yang memiliki cadangan besar. Penelitian oleh Davis et al. (2007) menunjukkan bahwa lignite Indonesia yang berasal dari endapan Tersier memiliki potensi hidrokarbon tinggi, dengan rasio hidrogen/karbon sebesar 1,1 hingga 1,3 yang mencerminkan keberadaan senyawa organik reaktif dan indikasi kematangan termal rendah pada lignite di Sumatera bagian barat.

Berdasarkan klasifikasi menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) 13-6011-1999, lignite termasuk dalam kategori batubara dengan nilai kalor *dry ash-free* (daf) di

bawah 7000 kal/gram. Klasifikasi ini sejalan dengan pendekatan internasional yang membedakan batubara berdasarkan tingkat kalor dan kadar karbon. Di Indonesia, lignite tersebar luas di wilayah Sumatera Selatan, Kalimantan Selatan, dan Kalimantan Timur. Salah satu studi yang relevan adalah yang dilakukan oleh Ramdhani et al. (2024), yang meneliti karakteristik batubara peringkat rendah dan menengah dari Sumatera Selatan. Hasil studi menunjukkan bahwa *lignite* dari formasi Muara Enim memiliki kapasitas *adsorpsi* CO₂ hingga 37,62 cc/g (dry ash-free basis), menunjukkan bahwa porositas dan kadar *vitrinite* sangat memengaruhi performa adsorpsi gas rumah kaca. Ini memperkuat potensi *lignite* tidak hanya sebagai sumber energi tetapi juga sebagai bahan untuk mitigasi emisi karbon dalam aplikasi *adsorpsi* gas.

Dalam pengoperasian pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), lignite sering dimanfaatkan sebagai bahan bakar karena ketersediaannya yang besar dan biaya tambang yang rendah. Namun, tantangan teknis muncul akibat sifat lignite yang mudah teroksidasi dan menimbulkan risiko pembakaran spontan dalam penyimpanan. Penelitian oleh Mahreni dan Puspitasari (2020) mencoba mengatasi kelemahan tersebut dengan memanfaatkan *biosurfaktan* dari alga cokelat untuk meningkatkan nilai kalor *lignite*. Mereka menggunakan *lignite* ukuran mesh-80 dan merendamnya dalam larutan *biosurfaktan* dialkil karbohidrat 0,5%, yang mampu meningkatkan nilai kalor hingga 11% dibandingkan dengan *lignite* asli. Proses ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pembakaran tetapi juga meningkatkan stabilitas penyimpanan *lignite* yang telah diproses secara biosurfaktan.

Selain itu, studi termal terhadap lignite juga sangat penting untuk memahami perilaku pembakarannya dalam reaktor termal industri. Penelitian yang dilakukan oleh Liu et al. (2016) terhadap lignite asal Indonesia menunjukkan bahwa proses upgrading menggunakan pelarut organik (seperti etanol) secara signifikan mampu meningkatkan nilai kalor lignite. Metode ini juga menurunkan kandungan air dan senyawa volatil yang sebelumnya menjadi penghambat dalam proses pembakaran efisien. Setelah proses perlakuan, lignite yang sebelumnya memiliki karakteristik

sulit terbakar menjadi lebih stabil dan bernilai energi lebih tinggi, menjadikannya lebih layak secara teknis untuk aplikasi energi berskala besar.

2.3 Coalite

Coalite merupakan hasil antara dari proses karbonisasi parsial batubara yang mengandung karbon tetap (*fixed carbon*) tinggi dan kadar zat mudah menguap (*volatile matter*) yang rendah. Produk ini dikenal juga sebagai *semikokas* dan banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar briket karbonisasi maupun sebagai bahan baku untuk karbon aktif. Proses pembentukannya sangat dipengaruhi oleh parameter suhu karbonisasi. Penelitian oleh (Nurisman et al., 2018) menunjukkan bahwa penggunaan alat *fluidized carbonizer* dengan variasi suhu antara 470°C hingga 500°C menghasilkan rendemen coalite yang menurun seiring peningkatan suhu. Sampel A (470–475°C) menghasilkan rendemen tertinggi sebesar 57%, sedangkan pada sampel C (495–500°C) rendemennya menurun drastis menjadi 42%. Penurunan ini disebabkan oleh terdekomposisinya komponen karbon dan volatil akibat suhu yang lebih tinggi, sehingga terjadi pembentukan abu dan gas dalam jumlah lebih besar. Secara fisik, *coalite* tampak sebagai padatan hitam keabu-abuan berpori, seperti diperlihatkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. *Coalite*

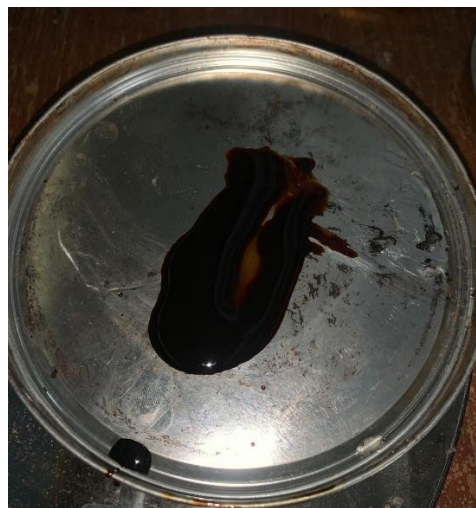
Uji proksimat memperlihatkan bahwa peningkatan suhu karbonisasi berdampak pada penurunan kualitas *coalite*. Kadar *fixed carbon* menurun dari 72,1% menjadi 70,2% akibat peningkatan ash content yang mencapai 16,4% pada suhu tertinggi. Selain itu, nilai kalor *coalite* juga mengalami penurunan dari 6.616 cal/gr menjadi 6.289 cal/gr. Penurunan nilai kalor ini berkaitan erat dengan peningkatan kadar abu dan penurunan kandungan karbon. Meski kadar *volatile matter* berkurang hingga 8,9%, yang menandakan efisiensi proses devolatilisasi, kualitas energi *coalite* tetap menurun akibat berkurangnya komponen pembakaran utama. Studi oleh (Novananda et al., 2020) juga mengungkapkan pentingnya tahapan karbonisasi dalam proses pembuatan karbon aktif dari lignit. Dalam penelitian tersebut, batubara lignit dikarbonisasi pada 500°C selama 2 jam sebelum diaktivasi dengan larutan. Hal ini menunjukkan bahwa *coalite* yang dihasilkan dari karbonisasi suhu menengah dapat berfungsi sebagai bahan antara yang penting dalam proses lebih lanjut menuju karbon aktif.

Penelitian tentang *coalite* kokas suhu rendah hasil karbonisasi batubara sekitar 640 °C menunjukkan bahwa pengendalian suhu sangat penting dalam menentukan kualitas produk karbon padat. Pada suhu karbonisasi 500–700 °C, seperti yang digunakan dalam produksi *semi-coke*, diperoleh karakteristik material dengan kadar karbon tetap tinggi, struktur pori yang berkembang, serta kadar abu yang masih terkendali. Studi oleh (Nurisman et al., 2018) menunjukkan bahwa peningkatan suhu karbonisasi secara berlebihan pada batubara peringkat rendah justru menurunkan kualitas *coalite*, ditandai dengan peningkatan abu dan penurunan nilai karbon tetap. Sementara itu, penelitian oleh (Young dan Ma, 2020) menunjukkan bahwa *semi-coke* yang dihasilkan dari karbonisasi suhu menengah memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap senyawa organik seperti fenol dan zat warna, menjadikannya bahan potensial untuk remedi lingkungan. Dalam pengembangan lebih lanjut, (Jing et al., 2022) melaporkan bahwa karbon aktif dari *semi-coke* hasil karbonisasi batubara mampu menyerap gas CO₂ secara efektif, dengan kinerja adsorpsi optimal pada struktur karbon yang terbentuk pada suhu karbonisasi sedang. Dengan demikian, suhu karbonisasi dalam rentang optimal ($\pm 500\text{--}600$ °C) tidak hanya menghasilkan *coalite* dengan kualitas energi dan

struktur yang baik, tetapi juga membuka peluang pemanfaatannya sebagai bahan dasar karbon aktif dan material *adsorben* lingkungan.

2.4 *Molasses*

Molasses merupakan bahan tambahan yang efektif dalam pembuatan briket batubara campuran dengan limbah pertanian. *Molasses* berfungsi sebagai perekat alami yang tidak hanya memperkuat struktur fisik briket, tetapi juga meningkatkan nilai kalor dan kestabilan pembakaran. Dalam studi tersebut, penambahan molase dengan variasi konsentrasi menunjukkan bahwa briket dengan 10% molase memiliki kerapatan yang lebih tinggi, ketahanan tekan yang lebih baik, dan residu abu yang lebih rendah dibanding briket dengan perekat sintetis maupun briket tanpa perekat. Kandungan gula dan unsur mineral dalam *molasses* seperti kalium dan magnesium juga berperan dalam mempercepat reaksi pembakaran dan mendukung terbentuknya karbon aktif saat proses pirolisis berlangsung. Hal ini menjadikan molase sebagai aditif yang ramah lingkungan dan efisien, serta cocok digunakan untuk meningkatkan kualitas bahan bakar padat berbasis batubara muda atau limbah biomassa (Rochani et al., 2016) (Mayasari, 2023). Secara visual, molase tampak sebagai cairan kental berwarna coklat tua dengan tekstur lengket, seperti diperlihatkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. *Molasses*

Studi lanjutan oleh (Wang et al., 2024) berfokus pada dinamika gasifikasi semi-coke (*coalite*) dan menunjukkan bahwa struktur pori yang terbentuk dalam karbon hasil karbonisasi memiliki pengaruh besar terhadap laju reaksi dengan gasifikasi CO₂. Meskipun molase tidak digunakan langsung dalam penelitian ini, hasilnya memberikan landasan penting bahwa bahan aditif organik seperti molase—yang kaya akan karbon volatil dan mineral katalitik—berpotensi mendukung pembentukan pori-pori aktif dan luas permukaan yang besar selama proses karbonisasi. Penambahan *molasses* ke dalam campuran *coalite* dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan gasifikasi karena kontribusinya terhadap struktur mikro karbon dan komposisi kimia akhir. Pentingnya kontrol suhu dan distribusi bahan organik dalam pembentukan semi-coke berkualitas tinggi, sehingga penambahan *molasses* sebagai modifikasi alami pada bahan bakar karbon padat sangat relevan dalam konteks ini, khususnya dalam peningkatan kinerja termal dan reaktivitas bahan bakar.

Sementara itu, jurnal internasional oleh (Zhuikov et al., 2022) mengkaji efek sinergis antara *semi-coke* dan cedarwood sebagai bahan campuran dalam pembuatan bahan bakar padat. Mereka menemukan bahwa pencampuran semi-coke dengan bahan organik mempercepat laju pembakaran dan menghasilkan output energi yang lebih stabil. Jika dibandingkan, molase memiliki karakteristik yang serupa dengan cedarwood dalam hal kandungan karbon organik, namun dengan kelebihan bentuk cair dan kandungan gula terlarut yang tinggi, yang dapat lebih mudah terdistribusi dalam matriks bahan bakar. Efek sinergis ini dapat dimanfaatkan dalam produksi briket atau pelet berbasis *coalite*, di mana *molasses* tidak hanya meningkatkan energi pembakaran tetapi juga memungkinkan keterikatan antarpartikel yang lebih kuat. Dengan demikian, *molasses* terbukti berpotensi sebagai aditif multifungsi dalam sistem pembakaran campuran, meningkatkan efisiensi termal, kestabilan struktural, dan sifat reaktif bahan bakar karbon padat.

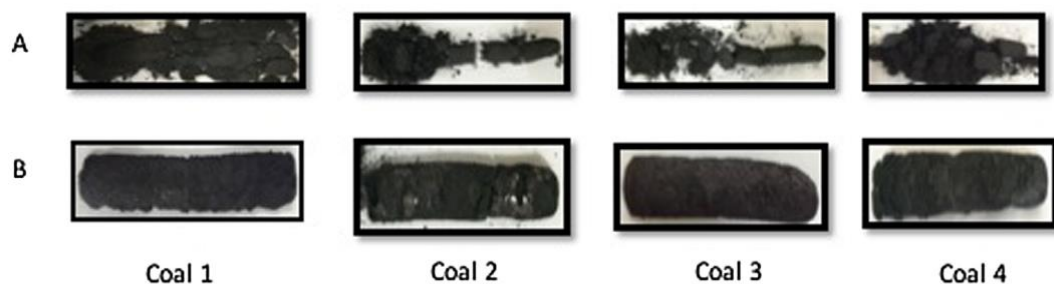
2.5 Kokas

Industri kokas adalah sumber energi dan bahan baku utama yang menghubungkan industri batubara, kokas, dan baja. Ini memainkan peran penting dalam rantai industri, konstruksi ekonomi, pembangunan sosial, dan aspek lain. Dengan munculnya tanur sembur skala besar, permintaan akan kokas berkualitas tinggi secara bertahap meningkat. Akibatnya, batubara kokas berkualitas tinggi semakin langka. Artinya, metode pencampuran batubara yang ideal dapat menjamin kualitas kokas yang baik dan pengurangan biaya. Dengan demikian, mengoptimalkan penggunaan campuran batubara menggunakan teknologi untuk memaksimalkan pemanfaatan sumber daya batubara dan menghasilkan kokas berkualitas tinggi sangat penting untuk memaksimalkan pemanfaatan sumber daya batubara dan meningkatkan kualitas kokas (Wang et al., 2023). Menurut penelitian oleh (Yustanti & Muda, 2021) kokas alam terbuat dari batubara jenis coking coal, yang bila dipanaskan menghasilkan kokas dengan kekuatan tekan yang tinggi. Batubara di Indonesia kebanyakan jenis *non-coking coal*, sehingga diperlukan bahan pengikat untuk membuat kokas. Kokas adalah produk dari pembriketan partikel (*briquetting*). Partikel padatan batu bara dicampur dengan bahan pengikat melalui proses pencetakan pada tekanan tertentu dan dikarbonisasi atau tidak dikarbonisasi.

Dalam Standar Nasional Indonesia (SNI), kokas diklasifikasikan dan diuji melalui sejumlah parameter fisis dan kimia. SNI 3477-1:2017 menetapkan metode penentuan kadar kelembaban menggunakan aliran udara kering sebagai salah satu parameter dasar untuk evaluasi kokas (BSN, 2017). Selain itu, SNI 13-3602:1994 dan SNI 13-3603:1994 mengatur metode pengujian berat jenis semu, berat jenis nyata, dan porositas total pada sampel kokas, yang sangat penting dalam menentukan densitas dan efisiensi reaksi kokas dalam lingkungan reduksi logam (BSN, 1994a; BSN, 1994b).

Kokas adalah produk dari batubara atau arang batubara yang dipanaskan pada suhu tinggi di dalam oven tanpa udara (tertutup). Hal ini menyebabkan kurangnya material volatile batubara dan peningkatan kandungan karbon tertambat. Jika batubara dipanaskan tanpa udara untuk dipirolisis atau dikarbonisasi, ia akan

berubah menjadi zat padar, cair, dan gas yang telah diteliti oleh (Sulistyo & Rinaldi, 2020). Kualitas kokas yang digunakan dalam industri metalurgi harus memenuhi kriteria tertentu, seperti kadar air di bawah 4 %, volatile matter < 1,25 %, kadar abu maksimum 12 %, dan kadar *fixed carbon* setinggi mungkin (>85 %). Selain itu, dua parameter penting lainnya adalah nilai CRI (Coke Reactivity Index) yang idealnya < 25 %, dan CSR (Coke Strength after Reaction) yang harus > 65 % untuk memastikan ketahanan struktur kokas dalam reaksi gasifikasi CO₂ (Wardana et al., 2020). Jenis kokas diklasifikasikan berdasarkan suhu dan tujuan penggunaannya. *Green coke* dihasilkan dari karbonisasi awal pada suhu rendah, sedangkan *calcined coke* merupakan hasil pemanasan lanjutan hingga ± 1.600 K. Sementara itu, *metallurgical coke* diproduksi untuk digunakan dalam aplikasi tanur tinggi dengan karakteristik yang telah diatur dalam SNI (BSN, 1994a). Semua jenis kokas tersebut diuji sesuai metode uji standar dalam SNI 13-6339.5-2001 tentang pengujian sifat fisik batubara dan kokas (Ditjen Minerba, 2024). Jenis kokas yang terdapat pada kokas indian ditunjukkan oleh **Gambar 4**.



Gambar 4. Jenis kokas pengujian LTGK pada batubara. Baris A: batubara induk non-kokas, Baris B: campuran batubara non-kokas yang diolah dengan panas dengan 2% EG, 30% SM, dan 5% air (Mohanty et al., 2019)

Gambar 4 memperlihatkan bagaimana bahan tambahan dan perlakuan panas dapat menginduksi sifat *coking* pada batubara *non-coking*, yang umumnya tidak bisa membentuk kokas secara alami. Hal ini penting dalam konteks pengembangan teknologi untuk memanfaatkan batubara *non-coking* dalam industri baja.

2.6 Karbonisasi

Proses karbonisasi merupakan proses pemecahan bahan-bahan organik berupa biomassa seperti ampas teh, kulit durian, serabut kelapa, dan lain-lain, yang mengalami proses pembakaran dalam ruangan tanpa kontak dengan udara sehingga menjadi arang. Proses karbonisasi biomassa atau pengarangan merupakan suatu proses yang bertujuan untuk menaikkan nilai kalor biomassa dan menghasilkan pembakaran yang bersih dengan sedikit asap. Proses karbonisasi bekerja pada prinsip bahwa biomassa dibakar tanpa kontak dengan udara, sehingga unsur karbon tetap tinggal dan hanya *volatile matter* yang terlepas. Proses karbonisasi menghasilkan karbon (arang), gas (CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , dan lain-lain), dan tar. Pada temperatur pembakaran di atas 170°C , pembakaran menghasilkan CO_2 , CO , dan asam asetat; pada 275°C , pembakaran menghasilkan metanol, tar, dan bahan lain; dan pada temperatur 400°C - 600°C , pembentukan karbon terjadi (Moeksin et al., 2016). Menurut, penelitian oleh (Putri et al., 2019) karbonisasi adalah proses di mana material organik ditambahkan ke bahan baku, yang menghasilkan dekomposisi material organik dan pengeluaran pengotor. Pada tahap ini, sebagian besar unsur non-karbon akan menjadi tidak ada lagi. Pelepasan komponen yang tidak stabil ini akan menyebabkan pembentukan dan pembukaan pori-pori. Struktur pori awal akan berubah seiring dengan karbonisasi. Setelah tidak mengeluarkan asap lagi, karbonisasi dihentikan. Untuk mempercepat reaksi pembentukan pori, memang diperlukan penambahan suhu. Namun, suhu juga harus dibatasi. Suhu yang terlalu tinggi, seperti di atas 1000°C , akan menyebabkan banyak abu terbentuk. Ini dapat menutupi pori-pori, mengurangi luas permukaan, dan mengurangi daya adsorpsi.

2.7 Uji Proksimat

Uji proksimat adalah metode standar yang digunakan untuk menentukan komposisi kimia dasar bahan pangan. Analisis ini mencakup pengukuran kadar air, abu, protein, lemak, serat kasar, dan karbohidrat, yang merupakan indikator utama nilai gizi suatu bahan makanan. Prosedur ini sering digunakan dalam penelitian, pengembangan produk pangan, serta untuk memastikan kualitas nutrisi dan

keamanan makanan. Metode ini memberikan panduan penting bagi industri pangan dalam menghasilkan produk yang berkualitas dan memenuhi kebutuhan konsumen (Adegoke et al., 2024). Uji proksimat kokas mencakup kadar air, kadar abu, zat volatil, dan karbon tetap, yang memberikan gambaran tentang efisiensi energi dan aplikasinya. Hasil uji proksimat menunjukkan bahwa nilai TM pada sampel batubara dari gudang memiliki nilai yang lebih tinggi, dengan kandungan air rata-rata 22,9 %. Ini dapat disebabkan oleh fakta bahwa batubara di gudang mudah terpapar air dari permukaan air. Jumlah kalori yang didapat dipengaruhi oleh kandungan air yang lebih tinggi. Nilai kalori rata-rata batubara dihasilkan oleh kadar air yang tinggi. Nilai FC dan nilai kalori sangat dipengaruhi oleh kandungan air; kandungan air yang tinggi pada batubara menurunkan nilai FC dan kalori, sedangkan kandungan air yang rendah meningkatkan nilai FC dan kalori. Kandungan air dan nilai karbon fix adalah dua komponen yang mempengaruhi jumlah kalori batubara yang diteliti oleh (Nur et al., 2020).

2.7.1 Parameter Uji pada Kokas

1. *Moisture Content*: Kadar air pada kokas biasanya sangat rendah untuk memastikan efisiensi pembakaran dan pengurangan korosi pada perangkat pembakar. Sebuah studi menemukan bahwa kadar air dalam kokas berkisar antara 1-3% untuk bahan berkualitas tinggi (Miroshnychenko et al., 2023). Dalam SNI, penentuan moisture mengacu pada metode pengeringan oven, sesuai dengan SNI 13-4729-1998, yaitu pemanasan sampel pada suhu $105 \pm 5^\circ\text{C}$ hingga berat konstan (BSN, 1998). Moisture tinggi mengurangi nilai kalor dan memperberat proses pengeringan dalam pirolisis. Studi terkini oleh Zhang et al. (2025) melaporkan moisture rata-rata sebesar 2,1 % pada contoh batubara metallurgical, diukur menggunakan TGA yang akurat, sejalan dengan metode SNI oven konvensional dan standar internasional (Zhang et al., 2025).
2. *Ash Content*: Kandungan abu yang rendah (di bawah 10%) menunjukkan kualitas kokas yang lebih baik karena mengurangi residu yang tidak terbakar setelah proses pembakaran (Baba et al., 2021). SNI juga mencakup metode pengukuran abu berdasarkan standar pembakaran hingga suhu $\pm 815^\circ\text{C}$ (BSN, 1994). Mengacu pada studi terbaru dari MDPI (2024), analisis proksimat modern

mengukur kadar abu, moisture, volatile matter, dan fixed carbon secara otomatis menggunakan hyperspectral imaging, menghasilkan tingkat akurasi sangat tinggi (R^2 : ash 0,993; VM 0,979; FC 0,948

3. *Volatile Matter*: Kandungan zat volatil yang rendah meningkatkan stabilitas kokas selama penyimpanan dan pengangkutan. Hal ini penting untuk kokas metalurgi yang digunakan dalam tanur tinggi (Fu et al., 2019). SNI 13-3734-1995 menetapkan metode pengukuran volatile matter dengan memanaskan sampel pada suhu $\sim 950^\circ\text{C}$ selama 7 menit dalam kondisi inert (BSN, 1995). Nilai volatile matter mencerminkan tar dan gas yang terbentuk selama pirolisis. Menurut penelitian terbaru Cui et al. (2024), terdapat hubungan erat antara volatile matter dan fixed carbon: saat volatile matter menurun, fixed carbon meningkat ($R^2 \sim 0,92$), menawarkan panduan untuk optimalisasi campuran kawat produksi kokas (Cui et al., 2024).
4. *Fixed Carbon*: Kandungan karbon tetap yang tinggi, biasanya di atas 70%, adalah tanda kokas berkualitas tinggi yang mampu menghasilkan lebih banyak energi saat digunakan sebagai bahan bakar (Prabhakaran et al., 2020). Fixed carbon dihitung sebagai sisa massa setelah moisture, ash, dan volatile matter dikurangi dari 100 %. SNI 13-3906-1994 menyebut perhitungan ini sebagai bagian dari analisis proksimat (BSN, 1994). Studi eksperimental oleh Li et al. (2025) menggunakan TGA dan menemukan fixed carbon berkisar 80–82 % pada kokas metallurgical berkualitas, mendukung standar SNI bagi industri metalurgi (Li et al., 2025).

Uji proksimat pada kokas adalah langkah penting dalam mengevaluasi kualitas dan efisiensi bahan karbon ini untuk berbagai aplikasi industri. Dalam konteks metalurgi, kokas digunakan sebagai bahan bakar dan agen pereduksi dalam proses tanur tinggi. Kandungan karbon tetap yang tinggi dan kadar zat volatil yang rendah, sebagaimana ditentukan melalui uji proksimat, memastikan pembakaran yang efisien dan stabilitas termal yang tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa kokas dengan karbon tetap di atas 70% dan kadar zat volatil yang rendah menghasilkan efisiensi energi yang optimal dan mengurangi emisi gas yang tidak diinginkan selama proses pembakaran (Baba et al., 2021). Selain itu, kokas dengan kadar abu

yang rendah sangat cocok digunakan dalam pembangkit energi karena residu pembakaran yang minimal meningkatkan efisiensi proses. Dalam aplikasi energi, kokas yang berasal dari *residu petrokimia*, seperti *pet-coke*, telah terbukti memiliki performa pembakaran yang stabil karena kandungan karbon tetap yang tinggi dan zat volatil yang rendah (Prabhakaran et al., 2020).

Kokas juga memainkan peran penting sebagai material adsorben dalam pengolahan air dan penyaringan gas. Kandungan karbon tetap yang tinggi dan struktur pori yang baik, sebagaimana diukur melalui uji proksimat, meningkatkan kapasitas adsorpsi kokas terhadap berbagai senyawa. Penelitian menunjukkan bahwa kokas dengan kandungan abu yang rendah dan porositas yang berkembang memiliki kinerja adsorpsi yang unggul dalam aplikasi tersebut (Miroshnychenko et al., 2023). Dalam proses gasifikasi, kandungan karbon tetap yang tinggi pada kokas memungkinkan produksi gas sintetis (*syngas*) yang lebih efisien. Uji proksimat digunakan untuk mengevaluasi reaktivitas kokas terhadap gasifikasi, dengan struktur mikro karbon menjadi faktor kunci yang memengaruhi efisiensi reaksi (Xu et al., 2019). Secara keseluruhan, analisis proksimat memberikan data penting untuk memastikan kokas memiliki kualitas yang sesuai dengan kebutuhan spesifik industri. Melalui evaluasi kadar air, karbon tetap, abu, dan zat volatil, analisis ini membantu dalam pemilihan bahan baku, optimasi proses produksi, dan pengembangan aplikasi inovatif untuk kokas.

2.8 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah metode karakterisasi kristalografi non-destruktif yang sangat penting dalam analisis struktur batubara dan material karbon. Prinsip kerja XRD mengikuti hukum Bragg ($n\lambda = 2d \sin\theta$), di mana sinar-X yang difraksikan oleh kisi kristal menghasilkan pola difraksi khas yang mencerminkan jarak antar bidang atom (*d-spacing*), ukuran kristalit (*La* dan *Lc*), dan tingkat kristalinitas. Wu et al. (2022) menunjukkan bahwa proses pirolisis pada low-rank coal dengan ukuran partikel $<75 \mu\text{m}$ pada suhu 600°C meningkatkan kristalinitas dan mengurangi kelabuan struktur amorf, sebagaimana ditunjukkan oleh

penyempitan dan peningkatan intensitas puncak 2θ . Yin et al. (2022) melaporkan bahwa lignit dan bituminous coal yang dipanaskan menunjukkan kemunculan puncak turbostratik pada 2θ sekitar 23° dan 43° , yang mengindikasikan peningkatan keteraturan struktur aromatik karbon selama pemanasan. Sementara itu, Fu et al. (2022) menggunakan XRD dan FTIR dalam studi gasifikasi bawah tanah (UCG) dan menemukan bahwa suhu tinggi (hingga 800°C) menyebabkan transformasi signifikan baik pada struktur mineral maupun karbon, yang mendukung efisiensi proses UCG.

Studi lebih lanjut oleh Yang et al. (2024) menggunakan XRD-PDF (Pair Distribution Function) untuk menganalisis struktur batubara superfine, mengungkapkan adanya short-range order (SRO) pada jarak atomik di atas $8\text{ \AA}$, yang tidak terdeteksi oleh XRD konvensional. Temuan ini menunjukkan potensi struktur graphitic-like yang berkembang pada skala atomik lokal. Wang et al. (2023) melaporkan bahwa proses termal lanjutan pada meta-antrasit mendorong terbentuknya struktur yang lebih kristalin, ditandai dengan peningkatan ukuran L_a dan L_c serta penyempitan puncak-puncak difraksi XRD. Selain itu, Zhang et al. (2025) dalam studi pada lignit yang mengalami oksidasi suhu rendah ($50\text{--}200^\circ\text{C}$) menunjukkan bahwa XRD dapat mengidentifikasi perubahan struktur kristal dan mineral yang berkaitan erat dengan kestabilan penyimpanan batubara dan risiko pembakaran spontan.

Prinsip kerja dari instrument XRD adalah penerepan dari prinsip Bragg yaitu perbedaan lintasan berkas difraksi sinar-X harus kelipatan panjang gelombang dengan rumus seperti berikut:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

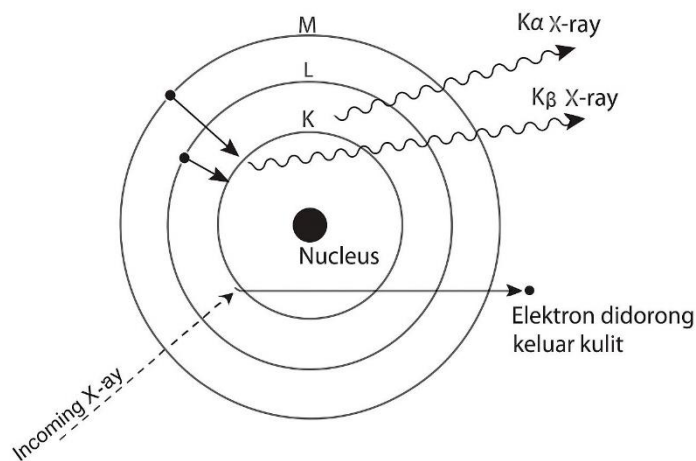
Dengan, λ = panjang gelombang sinar-X d = jarak antara bidang kristal θ = sudut difraksi Difraktogram yang didapat berisikan informasi deretan puncak atau peak difraksi dengan intensitas relatif sepanjang nilai 2θ pada rentang yang telah ditentukan. Intensitas relatif puncak besarnya tergantung dari banyaknya atom serta pendistribusinya dalam material (Sumari, dkk., 2020).

2.9 X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence (XRF) merupakan teknik analisis unsur non-destruktif yang digunakan secara luas dalam karakterisasi material anorganik, termasuk dalam penelitian batubara, abu pembakaran, dan kokas. Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip eksitasi atom oleh sinar-X primer, di mana elektron dari kulit dalam atom dikeluarkan, menyebabkan elektron dari kulit luar berpindah untuk mengisi kekosongan tersebut dan memancarkan sinar-X sekunder (fluoresen) dengan energi karakteristik masing-masing unsur. Deteksi dan analisis intensitas sinar-X fluoresen ini memungkinkan identifikasi serta kuantifikasi unsur-unsur mayor dan minor seperti Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, S, Ti, dan lain-lain (Beckhoff et al., 2020). Dalam analisis batubara, XRF berperan penting dalam menentukan kandungan unsur anorganik dan abu, yang berkaitan erat dengan sifat pembakaran, slagging-fouling, dan emisi logam berat saat pembakaran.

Dalam lima tahun terakhir, berbagai studi telah menunjukkan peningkatan akurasi dan efisiensi penggunaan XRF dalam karakterisasi batubara dan residunya. Misalnya, Liu et al. (2022) mengembangkan pendekatan XRF kalibrasi bebas (fundamental parameters) untuk analisis unsur dalam fly ash batubara, menunjukkan korelasi yang sangat baik ($R^2 > 0,99$) dengan ICP-OES. Zhang et al. (2021) mengaplikasikan XRF portabel untuk penentuan cepat kandungan logam berat (seperti As, Cr, dan Pb) pada abu dasar batubara dan membandingkannya dengan standar laboratorium, menunjukkan deviasi relatif $<10\%$. Sementara itu, penelitian oleh Shukla et al. (2023) memanfaatkan XRF untuk mengevaluasi variasi geokimia antar lapisan batubara di tambang terbuka India, menunjukkan hubungan yang erat antara kandungan unsur dan sifat geoteknik. Studi terkini oleh Haris et al. (2025) juga memanfaatkan XRF dan SEM-EDS secara simultan dalam menganalisis karakter abu hasil pembakaran lignit di suhu tinggi, menunjukkan transformasi mineral seperti kalsit, kuarsa, dan feldspar ke bentuk silikat kompleks. Oleh karena itu, XRF menjadi metode kunci dalam pengendalian kualitas dan studi

lingkungan dalam industri batubara, baik di laboratorium maupun langsung di lapangan.



Gambar 5. Skema Kerja Alat XRF (Fansuri,2010)

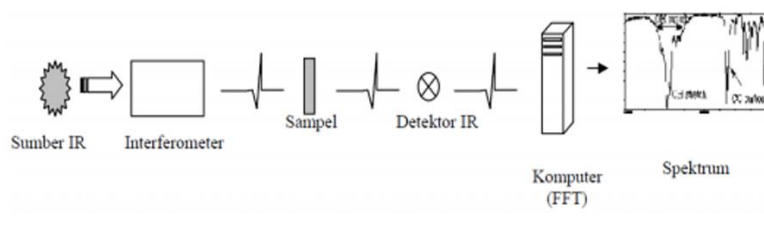
Prinsip kerja dari XRF ialah saat foton dengan energi tinggi (X-rays) menembak suatu elektron pada kulit dalam (umumnya kulit K atau L), hal tersebut menyebabkan elektron berpindah ke lapisan kulit terluar. Pada waktu yang bersamaan, kulit mengalami kekosongan elektron yang menyebabkan keadaan menjadi tidak stabil. Sehingga elektron dari kulit di atasnya akan berpindindah mengisi kekosongan tersebut dengan cara mengemisikan sinar atau fluorescence, dimana energi yang digunakan sebesar perbedaan energi dari kedua keadaan dan panjang gelombang sesuai dengan karakteristik dari setiap elemen. Intensitas sinar yang akan diemisikan sebanding dengan konsentrasi dari setiap elemen (Aurelia, 2005).

2.10 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) merupakan metode spektroskopi inframerah yang digunakan secara luas untuk menganalisis gugus fungsi dalam material organik dan anorganik, termasuk batubara dan kokas. Prinsip kerja FTIR didasarkan pada interaksi antara radiasi inframerah dengan ikatan kimia dalam sampel, yang menyebabkan vibrasi molekul tertentu dan menghasilkan spektrum

serapan karakteristik. Dalam konteks karakterisasi batubara, FTIR sangat berguna untuk mengidentifikasi gugus $-\text{OH}$, $-\text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$, $-\text{C}=\text{O}$, dan struktur aromatik seperti $\text{C}=\text{C}$, yang semuanya memberikan informasi penting tentang komposisi kimia dan tingkat aromatisasi material karbon. Penelitian oleh Jiangsu Mineral Resources & Geological Design Institute menunjukkan bahwa pemanasan batubara menengah menyebabkan penurunan intensitas gugus hidroksil dan metilen, serta peningkatan struktur aromatik yang mengindikasikan transformasi kimia selama pirolisis (Jiangsu et al., 2023). Hasil tersebut diperkuat oleh studi Wang yang menunjukkan bahwa residu tar batubara memiliki spektrum inframerah dominan pada gugus fenolik dan karbonil, serta rasio CH_2/CH_3 dapat digunakan sebagai indikator panjang rantai karbon dalam senyawa aromatik alifatik (Wang, 2023).

Selain analisis kualitatif gugus fungsi, FTIR juga dikembangkan menjadi metode kuantitatif cepat untuk memperkirakan komposisi unsur dalam batubara. Penelitian oleh Shukla menemukan bahwa data spektral mid-IR FTIR dapat digunakan untuk memperkirakan kandungan sulfur dalam batubara berkadar abu tinggi dengan tingkat korelasi yang sangat tinggi terhadap hasil laboratorium konvensional (Shukla, 2023). Sementara itu, Mishra menunjukkan bahwa kandungan total karbon juga dapat diprediksi secara akurat menggunakan model regresi berbasis data FTIR, sehingga mengurangi kebutuhan untuk analisis destruktif yang memakan waktu (Mishra, 2023). Kedua studi ini membuktikan bahwa FTIR tidak hanya berperan dalam identifikasi struktur molekuler, tetapi juga sebagai alternatif efisien dalam analisis proksimat batubara secara cepat dan non-destruktif. Oleh karena itu, FTIR menjadi salah satu metode karakterisasi utama dalam penelitian dan industri batubara modern.



Gambar 6. Skema Kerja Alat FTIR (Suseno dan Firdausi, 2008)

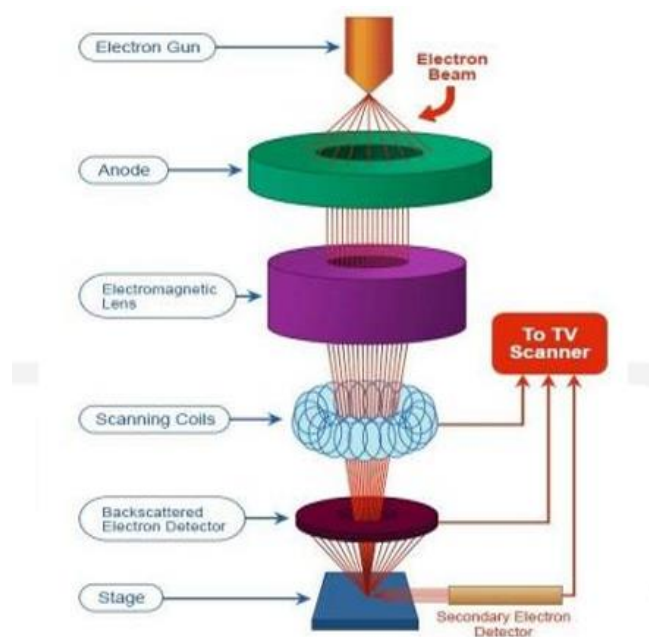
Prinsip kerja dari instrumen ini adalah adanya interaksi antara materi dengan energi. Instrumen spektroskopi FTIR akan menghasilkan sebuah berkas radiasi inframerah yang dipancarkan dari benda hitam. Radiasi inframerah tersebut kemudian akan dilanjutkan melewati interferometer (celah) menuju sampel sehingga terjadi pengkodean spektral. Celah ini berfungsi sebagai pengontrol jumlah energi yang akan berikatan dengan sampel. Sampel yang menyerap akan menciptakan interferensi konstruktif dan destruktif yang disebut dengan interferogram. Kemudian, detektor mengukur sinyal interferogram khusus dalam energi versus waktu untuk semua frekuensi secara bersamaan. Sinyal yang terukur lalu dikirim ke komputer untuk kemudian direkam dengan perangkat lunak komputer transformasi Fourier (Novianti, 2021).

2.11 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan salah satu teknik karakterisasi permukaan material yang sangat penting dalam analisis batubara, terutama untuk mengamati morfologi, distribusi pori, dan struktur mikro secara detail. Studi oleh Gaesenngwe et al. (2024) menunjukkan bahwa SEM mampu mengidentifikasi fase mineral yang tersebar tidak merata pada permukaan batubara Botswana dan menghubungkannya dengan performa penggerusan dan nilai kalor. Morfologi yang didominasi oleh phyllosilicate dan swelling clays diketahui memperburuk efisiensi pembakaran. Selain itu, penelitian Zhang et al. (2025) mengungkap bahwa proses oksidasi suhu rendah mengubah permukaan lignit menjadi lebih kasar dengan pembentukan pori makro, meningkatkan konektivitas gas dan kemungkinan rekahan. SEM dalam konteks ini tidak hanya berperan sebagai alat visualisasi, tetapi juga sarana mendeteksi potensi degradasi struktur dan memprediksi performa bahan dalam aplikasi energi dan industri.

Studi lanjutan dari Wang et al. (2023) mengintegrasikan SEM dengan perangkat lunak kuantifikasi citra seperti Pore-Crack Analysis System (PCAS) untuk menganalisis parameter porositas dan fraktal secara numerik. Hasilnya menunjukkan bahwa batubara berperingkat rendah memiliki distribusi pori yang

lebih luas dan morfologi retakan yang tidak seragam dibandingkan dengan batubara antrasit. Dalam konteks pemanfaatan batubara sebagai sumber energi, pemetaan sifat morfologi ini sangat penting karena memengaruhi laju reaksi dalam proses pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran. SEM juga banyak digunakan dalam penelitian pengembangan teknologi coalbed methane (CBM) karena kemampuannya memvisualisasikan jaringan pori yang menjadi jalur migrasi gas. Dengan perkembangan teknologi SEM resolusi tinggi, saat ini karakterisasi dapat dilakukan hingga level nanostruktur, memungkinkan korelasi yang lebih akurat antara tekstur mikro dan parameter fisik makroskopik. Oleh karena itu, SEM merupakan metode penting dalam studi rekayasa batubara yang mendukung peningkatan efisiensi dan keamanan dalam eksplorasi serta konversi energi.



Gambar 7. Skema Kerja Alat SEM (Shaban, 2020)

Cara kerja SEM yaitu pertama-tama gelombang elektron dipancarkan oleh electron gun sehingga terkondensasi di lensa kondensor dan terfokus sebagai suatu titik yang jelas oleh lensa objektif. Scanning coil diberi energi sehingga menyediakan medan magnet bagi sinar elektron. Kemudian elektron sekunder diperoleh dari berkas sinar elektron yang mengenai cuplikan lalu dikumpulkan oleh detektor backscatter atau detektor sekunder (Kroschwitz, 1990).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Tanjung Bintang, Lampung Selatan. Waktu yang digunakan untuk pelaksanaan penelitian ini pada bulan April 2025 sampai dengan bulan Juni 2025.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 1** sebagai berikut.

Tabel 1. Alat-alat Penelitian

No	Nama Alat	Fungsi
1.	Mortar dan Alu	Menghaluskan bahan
2.	Cawan Porselen	Memanaskan atau mengeringkan zat kimia
3.	Desikator	Menjaga sampel tetap kering
4.	Penjepit Besi	Menjepit peralatan saat pemanasan
5.	Mangkuk dan Piring	Menampung atau mencampur bahan
6.	Sendok	Mengambil atau mencampur bahan
7.	Timbangan Digital	Menimbang massa dengan akurasi tinggi
8.	Neraca Analitik	Menimbang presisi tinggi (hingga 0,0001 g)
9.	Wadah Klip Plastik	Menyimpan bahan agar tidak terkontaminasi
10.	Cetakan Kokas Silinder	Membentuk briket kokas silinder
11.	Sieve Shaker	Mengayak bahan berdasarkan ukuran
12.	Mesin Press	Menekan bahan jadi briket padat
13.	Carbonization Furnace	Mengarangkan bahan (karbonisasi)
14.	Oven Coke	Menguji struktur kristal bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 2** sebagai berikut.

Tabel 2. Bahan-bahan Penelitian

No.	Nama	Fungsi
1.	Batubara <i>Lignite</i>	Sebagai bahan utama dengan kadar abu rendah untuk membentuk kokas.
2.	<i>Coalite</i>	Sebagai bahan campuran untuk meningkatkan efisiensi dan kekuatan kokas.
3.	<i>Molase</i>	Sebagai bahan tambahan perekat untuk pembuatan kokas.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu: preparasi bahan, pembentukan kokas, proses pengeringan, penghalusan ulang, dan pengujian karakteristik kokas. Setiap tahapan dilakukan dengan memperhatikan kesesuaian terhadap metode standar untuk analisis bahan karbon padat.

3.3.1 Preparasi Bahan

Tahap awal yang dilakukan yaitu persiapan bahan baku yang terdiri dari batubara lignite, coalite dan molase sebagai bahan perekat

3.3.1.1 Pengeringan dan Penghalusan Awal

Pada tahap awal, dilakukan proses pengeringan terhadap batubara lignite dan coalite guna mengurangi kadar air internal serta mempermudah proses penghalusan. Masing-masing bahan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 600°C selama 1 jam. Setelah proses pemanasan selesai, sampel didinginkan terlebih dahulu hingga mencapai suhu ruang untuk menghindari degradasi termal saat proses penumbukan. Setelah suhu sampel stabil, proses penghalusan dilakukan

secara manual menggunakan mortar dan alu (pestle). Bahan ditumbuk dan diulak hingga diperoleh ukuran partikel yang seragam. Serbuk hasil penghalusan kemudian diayak menggunakan ayakan mesh 100 untuk memperoleh fraksi partikel berukuran $\leq 150 \mu\text{m}$. Serbuk halus ini selanjutnya digunakan dalam tahap pencampuran bahan.

3.3.1.2 Penimbangan dan Pencampuran Bahan

Setelah proses pengayakan, masing-masing bahan ditimbang menggunakan timbangan digital sesuai dengan variasi komposisi yang telah ditentukan. Komposisi campuran terdiri atas batubara lignite, coalite, dan molase sebagai perekat dengan rincian sebagai berikut.

Tabel 3. Variasi Komposisi Batubara Lignite, Coalite dan Molase

Variasi Komposisi	Batubara Lignite	Coalite	Molase
K1	80%	10%	10%
K2	70%	20%	10%
K3	60%	30%	10%
K4	50%	40%	10%

Tabel 3 memperlihatkan variasi komposisi campuran bahan diberi kode sebagai K1, K2, K3, dan K4. Pemberian kode ini didasarkan pada perbedaan rasio lignite dan coalite yang digunakan, dengan jumlah molase yang dikontrol tetap sebesar 10% pada seluruh sampel. Variasi K1 merupakan campuran dengan komposisi 80% lignite, 10% coalite, dan 10% molase. Variasi K2 terdiri atas 70% lignite, 20% coalite, dan 10% molase. Selanjutnya, K3 mengandung 60% lignite dan 30% coalite, serta 10% molase, sedangkan K4 memiliki komposisi 50% lignite, 40% coalite, dan 10% molase. Variasi tersebut dirancang untuk mengamati secara sistematis pengaruh peningkatan kandungan coalite dan penurunan kandungan lignite terhadap sifat kimia, fisik, serta struktur mikroskopis kokas yang dihasilkan. Dengan pengelompokan yang jelas, analisis pada setiap tahap karakterisasi dapat dilakukan secara terstruktur dan terarah. Setiap variasi memiliki massa total 10

gram. setelah ditimbang, seluruh bahan dicampurkan secara merata dalam cawan porselen dengan pengadukan manual selama ± 5 menit hingga diperoleh campuran yang homogen.

3.3.2 Pembentukan Kokas

Campuran homogen dimasukkan ke dalam cetakan silinder berdiameter ± 1 cm. Setelah bahan masuk ke dalam cetakan, dilakukan proses pemadatan menggunakan alat press hidrolik. Tekanan diberikan secara bertahap hingga mencapai tekanan maksimum sebesar 5 ton. Tekanan ini dipertahankan selama beberapa detik agar partikel di dalam campuran saling mengikat secara mekanis dan membentuk struktur padat yang stabil. Setiap briket memiliki massa akhir sekitar ± 10 gram. Briket yang telah terbentuk kemudian dilepas dari cetakan dan siap untuk tahap pengeringan.

3.3.3 Proses Pengeringan

Kokas yang telah terbentuk dikeringkan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 3 jam. Tujuan dari pengeringan ini adalah untuk menghilangkan kelembapan dan meningkatkan stabilitas kokas.

3.3.4 Penghalusan Ulang

Kokas kering kemudian dihancurkan kembali menggunakan mortar dan pestle. sampel hasil penghancuran ini diayak kembali dengan ayakan mesh 100 untuk memastikan ukuran serbuk tetap seragam sebelum dilakukan pengujian.

3.3.5 Uji Proximat

Uji proksimat merupakan metode yang digunakan untuk menentukan komposisi dasar dari bahan karbon, meliputi kadar air (*moisture content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), kadar abu (*ash content*), dan karbon tetap (*fixed carbon*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kualitas dan karakteristik pembakaran dari kokas yang dihasilkan. Setiap parameter dianalisis secara bertahap dengan prosedur standar menggunakan peralatan laboratorium yang sesuai.

3.3.5.1 *Moisture Content* (kadar air)

Moisture content adalah persentase massa air yang terkandung dalam sampel kokas. Penentuan *Moisture content* bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kandungan air dapat mempengaruhi sifat pembakaran serta kestabilan struktur kokas. Prosedur penentuan *Moisture content* dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Sampel kokas yang akan diuji disiapkan terlebih dahulu.
2. Cawan porselen kosong ditimbang menggunakan neraca analitik dan massanya dicatat.
3. Sampel kokas seberat 1 gram ditimbang dan dimasukkan ke dalam cawan porselen.
4. Cawan yang berisi sampel dimasukkan ke dalam oven dan dikeringkan pada suhu 100°C selama 2 jam.
5. Setelah proses pengeringan selesai, cawan dikeluarkan dan didinginkan di dalam desikator selama ± 45 menit.
6. Setelah mencapai suhu ruang, cawan ditimbang kembali untuk memperoleh massa akhir sampel.
7. Selisih antara massa sebelum dan sesudah pengeringan digunakan untuk menghitung *Moisture content* dalam sampe

Perhitungan *Moisture content* dilakukan menggunakan rumus dengan standar SNI 06-3730-1995 sebagai berikut.

$$MC = \frac{A-B}{B} \times 100\%$$

Keterangan : A = Sampel + Cawan

B = Sampel setelah di oven

3.3.5.2 *Volatile Matter* (zat terbang)

volatile matter (zat terbang) merupakan fraksi senyawa organik yang menguap dari sampel ketika dipanaskan dalam kondisi tertutup pada suhu tinggi, tanpa kehadiran oksigen. *volatile matter* terdiri atas gas dan uap yang dilepaskan saat proses pirolisis, dan dapat memengaruhi sifat pembakaran bahan bakar padat. Pengujian *volatile matter* dilakukan setelah pengukuran *Moisture content* selesai, dengan prosedur sebagai berikut.

1. Cawan porselen yang telah berisi sampel dan telah dikeringkan sebelumnya selama 2 jam, ditimbang menggunakan neraca analitik.
2. Cawan berisi sampel kemudian dimasukkan ke dalam furnace menggunakan penjepit, dalam keadaan tertutup.
3. Suhu furnace dipastikan berada pada temperatur 700°C sebelum cawan dimasukkan.
4. Sampel didiamkan di dalam furnace selama 7 menit dalam kondisi tertutup, untuk mencegah kontak langsung dengan udara (oksigen).
5. Setelah 7 menit, cawan dikeluarkan dari furnace dan didinginkan di dalam desikator selama ± 45 menit hingga mencapai suhu ruang.
6. Sampel kemudian ditimbang kembali untuk memperoleh massa akhir setelah pemanasan.
7. *volatile matter* dihitung berdasarkan selisih massa sebelum dan sesudah pemanasan.

Perhitungan *volatile matter* dilakukan menggunakan rumus dengan standar SNI SNI 06-3730-1995 sebagai berikut.

$$VM = \frac{A-B}{B} \times 100\%$$

Keterangan : A = Sampel + Cawan

B = Sampel setelah di furnace (8 menit)

3.3.5.3 *Ash Content* (Kadar Abu)

Ash Content merupakan sisa anorganik yang tidak terbakar setelah seluruh komponen organik dalam sampel terdegradasi oleh panas. Pengujian *Ash Content* dilakukan setelah pengukuran *volatile matter* selesai, dengan prosedur sebagai berikut.

1. Sampel yang telah melalui pemanasan selama 7 menit dalam furnace ditimbang kembali untuk memperoleh massa awal pengujian kadar abu.
2. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam furnace dalam kondisi cawan terbuka, dan dipanaskan pada suhu 700°C selama 2 jam untuk memastikan seluruh komponen organik terbakar sempurna.
3. Setelah pemanasan selesai, cawan dikeluarkan dan didinginkan di dalam desikator selama ± 45 menit hingga mencapai suhu ruang.
4. Selanjutnya, massa akhir sampel ditimbang kembali dan dicatat.
5. Kadar abu kemudian dihitung dari sisa massa yang tidak terbakar, dibandingkan terhadap massa awal sampel.

Perhitungan *ash content* dilakukan menggunakan rumus dengan standar SNI 3478:2010 sebagai berikut.

$$AC = \frac{A-B}{C-B} \times 100\%$$

Keterangan : A = Sampel + Cawan (Furnace 2 jam)

B = Cawan Kosong

C = Sampel + Cawan (Furnace 8 menit)

3.3.5.4 *Fixed Carbon* (Karbon Tetap)

Fixed carbon bagian dari bahan karbon yang tersisa setelah kadar air, zat terbang, dan abu telah diuji. Komponen ini tidak mudah menguap atau terbakar pada suhu pemanasan awal dan menunjukkan kandungan karbon murni yang berperan penting dalam proses pembakaran jangka panjang. Penentuan karbon tetap tidak dilakukan

secara langsung, melainkan dihitung berdasarkan selisih total 100% dengan jumlah *moisture content*, *volatile matter*, dan *ash content* yang telah diperoleh sebelumnya.

Perhitungan *fixed carbon* dilakukan menggunakan rumus dengan standar SNI 13-3479-1994 sebagai berikut.

$$\mathbf{F. Carbon = 100\% - (\%Mc + \%Vm + \% Ash)}$$

Keterangan : Mc = Moisture Content

Vm = Volatile Matter

Ash

Rancangan pengambilan data dari hasil pengujian pada penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 4** sampai **Tabel 3.7** sebagai berikut.

Tabel 4. Rancangan Hasil Uji *Moisture Content* Kokas

Variasi Komposisi	Cawan + Sampel (gram)	Setelah Pemanasan (gram)	<i>Moisture Content (%)</i>
K1			
K2			
K3			
K4			

Tabel 5. Rancangan Hasil Uji *Volatile Matter* Kokas

Variasi Komposisi	Setelah Pemanasan 2 jam (gram)	Setelah Pemanasan (gram)	<i>Volatile Matter (%)</i>
K1			
K2			
K3			
K4			

Tabel 6. Rancangan Hasil Uji *Ash Content* Kokas

Variasi Komposisi	Cawan Kosong (gram)	Setelah Pemanasan 7 menit (gram)	Cawan + Abu (gram)	Ash Content (%)
K1				
K2				
K3				
K4				

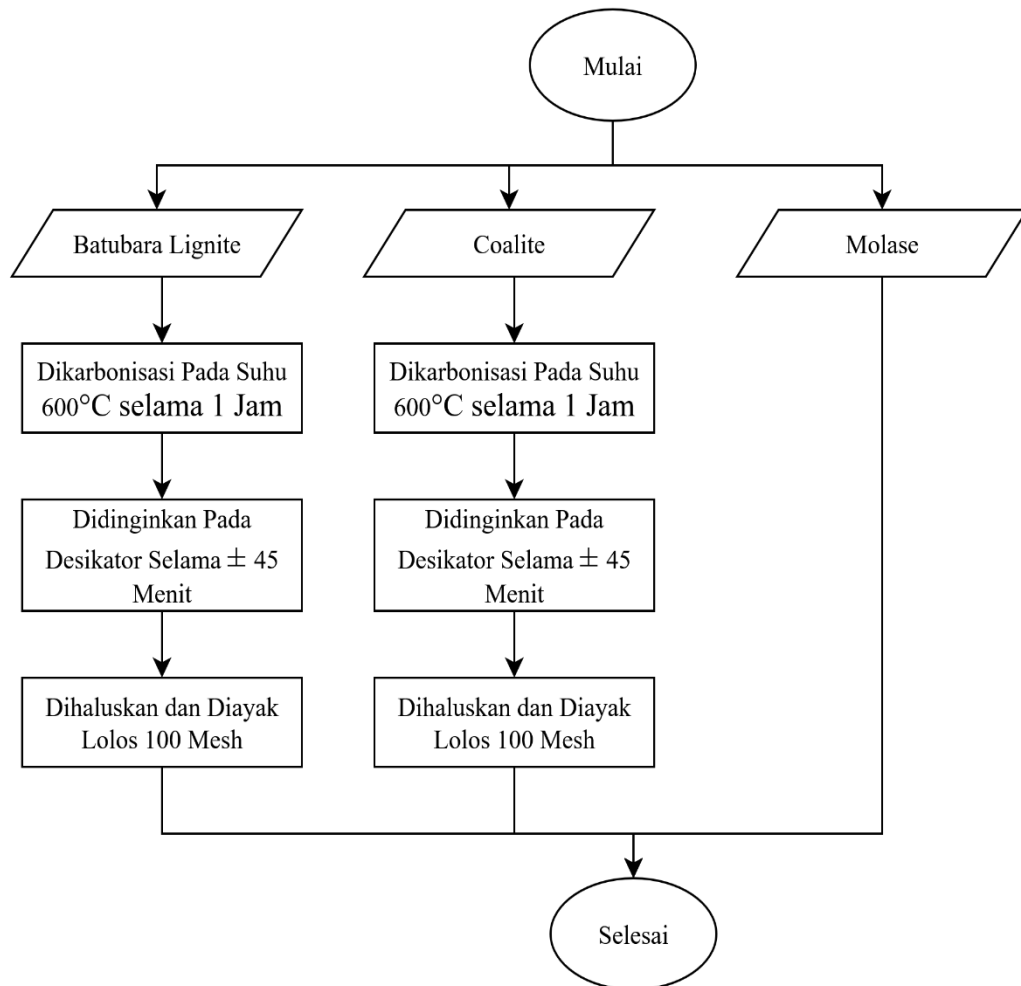
Tabel 7. Rancangan Hasil Uji *Fixed Carbon* Kokas

Parameter Uji	Variasi Komposisi			
	K1	K2	K3	K4
<i>Moisture Content (%)</i>				
<i>Volatile Matter (%)</i>				
<i>Ash Content (%)</i>				
<i>Fixed Carbon (%)</i>				

3.4 Diagram Alir Penelitian

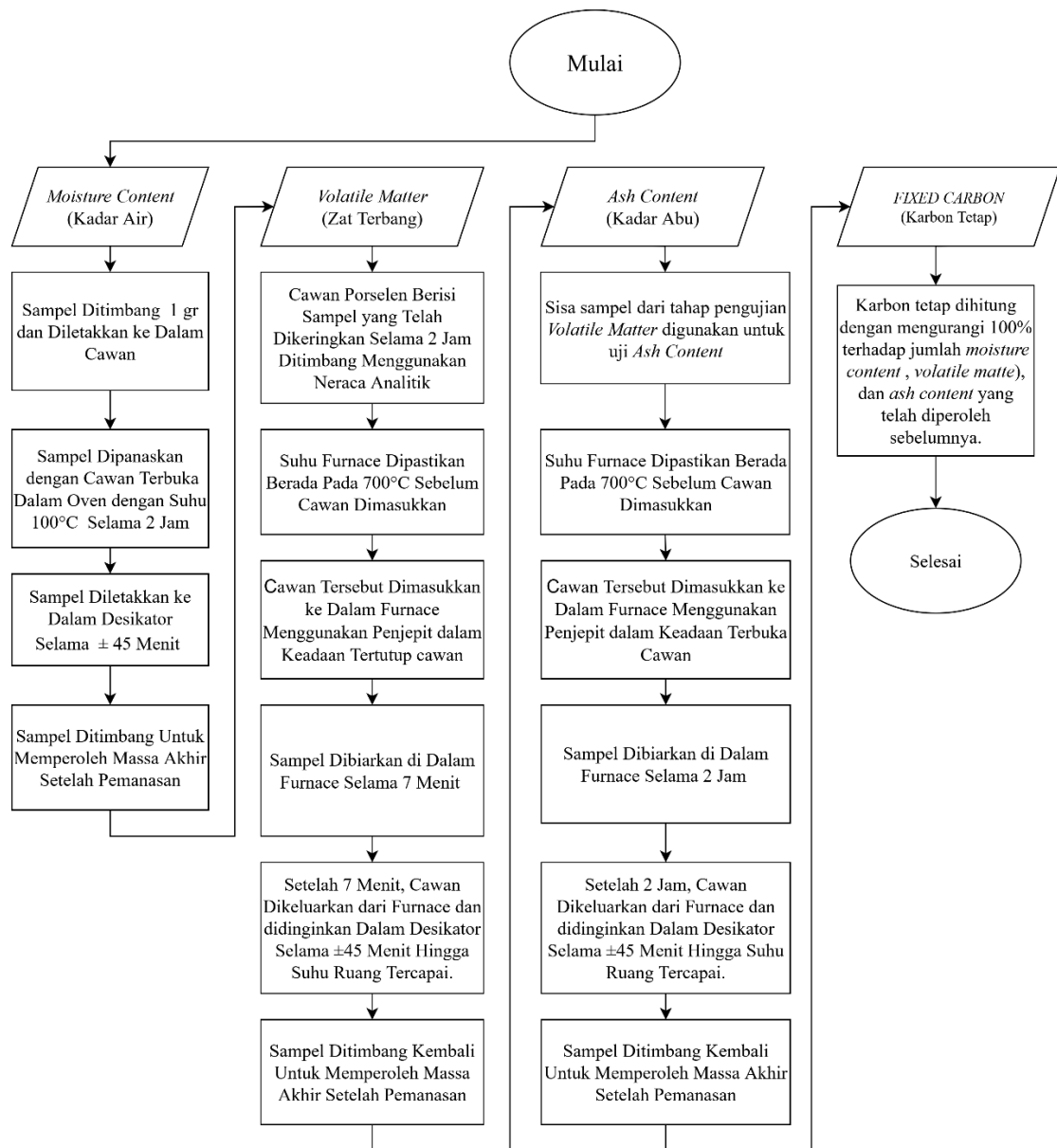
Diagram alir yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah preparasi bahan, uji proximat, pengujian karakterisasi serta diagram alir penelitian.

3.4.1 Diagram Alir Preparasi Bahan



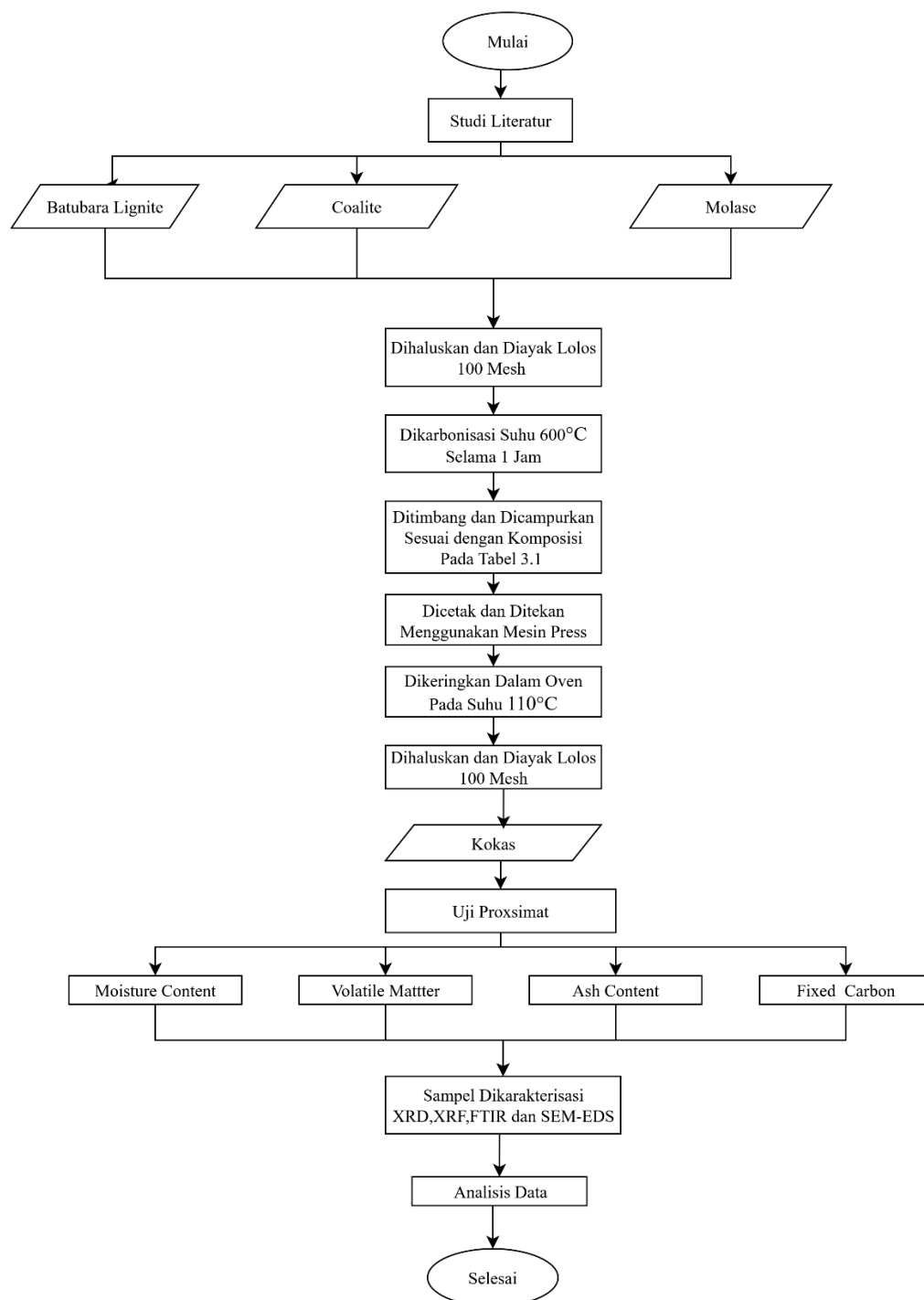
Gambar 8. Diagram Alir Preparasi Bahan

3.4.2 Diagram Alir Uji Proksimat



Gambar 9. Diagram Alir Uji Proksimat

3.4.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Hasil sampel kokas berdasarkan uji proksimat terlihat bahwa variasi komposisi batubara *lignite*, *coalite* dan *molasses* berpengaruh terhadap kualitas kokas. Berdasarkan SNI 01-6235-2000, kokas dengan nilai *fixed carbon* tertinggi sebesar 78,74% dan kadar abu terendah sebesar 18,32% dihasilkan oleh komposisi kokas K2 (70% *lignite*, 20% *coalite*, 10% *molasses*). Namun demikian keseluruhan hasil terbaik ditunjukkan oleh komposisi kokas K3 (60% *lignite*, 30% *coalite*, 10% *molasses*) karena keseimbangan yang lebih stabil antara *fixed carbon*, kadar abu dan kandungan sulfur.
2. Hasil karakterisasi sampel kokas menggunakan XRD terlihat bahwa komposisi variasi kokas K3 diperoleh keteraturan struktur kristal karbon meningkat dan intensitas puncak tertinggi sehingga stabilitas termal lebih baik akibat pengaruh variasi komposisi. Hal ini didukung oleh karakterisasi FTIR, di mana sampel kokas K3 terlihat spektrum yang lebih stabil dengan kandungan sulfur rendah.
3. Hasil karakterisasi sampel kokas menggunakan XRF terlihat bahwa komposisi variasi kokas K3 diperoleh kadar sulfur lebih rendah dan mineral pengotor yang minim sehingga dihasilkan kokas lebih bersih akibat dipengaruhi variasi komposisi.
4. Hasil karakterisasi sampel kokas menggunakan SEM-EDS terlihat bahwa komposisi variasi kokas K3 (60% *lignite*, 30% *coalite*, 10% *molasses*) diperoleh morfologi terbaik. Hal ini disebabkan oleh komposisi *lignite* dan *coalite* yang seimbang, sehingga dihasilkan permukaan padat, halus, homogen, minim retakan, serta dominasi karbon yang tinggi.

5.2 Saran

Saran dari peneliti yang dapat dilakukan untuk perbaikan riset selanjutnya sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil penelitian, komposisi optimum coalite berada pada 30% karena pada kondisi tersebut diperoleh kokas dengan morfologi paling padat, halus, homogen, serta minim retakan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk memperkuat temuan ini dengan menguji variasi coalite di sekitar 25–35% guna menentukan titik optimum secara lebih pasti.
2. Komposisi molase sebagai bahan pengikat perlu diteliti lebih lanjut, karena jumlah molase berpengaruh terhadap kadar sulfur serta kestabilan struktur permukaan kokas.
3. Peningkatan pengendalian terhadap proses karbonisasi, terutama pada parameter suhu dan waktu pembakaran, perlu dilakukan agar kokas yang dihasilkan memiliki karakteristik yang lebih seragam, dapat direproduksi secara konsisten, serta memberikan pemahaman yang lebih jelas mengenai pengaruh kondisi proses terhadap mutu akhir kokas.
4. Penelitian lanjutan disarankan untuk menambahkan pengujian sifat fisik kokas, seperti uji ketahanan tekan dan ketahanan tumbukan. Hal ini penting untuk menilai kelayakan kokas dalam aplikasi industri secara menyeluruh, tidak hanya berdasarkan karakterisasi kimia dan mikrostruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Adegoke, A. S., Oladapo, A. O., Adedapo, A. E., Olanrewaju, O. M., Adetayo, A. O., Olufisayo, O. M., & Department. (2024). Modelling of Proximate Composition of Amaranth, Sorghum, Pumpkin and Sunflower Flour Blends Using Response Surface Methodology. *African Journal of Agriculture and Food Science*, 7(2), 86–101.
- Afin, A. P., & Kiono, B. F. T. (2021). Potensi Energi Batubara serta Pemanfaatan dan Teknologinya di Indonesia Tahun 2020 – 2050 : Gasifikasi Batubara. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 144–122.
- Ajie Novananda, Ira Rahmawati, Sani, D. H. A., & Suprianti, L. (2020). Karbon aktif dari batubara lignite dengan proses aktivasi menggunakan hidrogen fluorida. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(1), 8–14.
- Alwathan, A., Irwan, M., Utomo, P. S., & Patmawati, Y. (2019). Chemical Activation of Lignite by using a Combination of $\text{H}_3\text{PO}_4\text{-NaHCO}_3$. In *Proceedings of the 8th Annual Southeast Asian International Seminar (ASAIS)*, pp. 182–185.
- Anyanwu, G. C., & Evangelina, O. O. (2022). Mineralogical and Chemical Composition Evaluation of Lignite Coal from Ihioma Orlu, Imo State, Nigeria. *Journal of Applied Science*, 8(4), 7–13.
- Aurelia, R. (2005). Prinsip kerja X-Ray Fluorescence (XRF). *Jurnal Sains dan Aplikasi Fisika*, 2(1), 12–18.
- Baba, N. M., Zubairu, Y., Onwuka, J. C., & Ambi, A. A. (2021). Production and characterization of metallurgical coke from duduguru coal. *International Journal of Advanced Chemistry*, 9(2), 192–195.
- Belkin, H., Tewalt, S., Hower, Stucker, & Keefe, J. (2008). Geochemistry and petrology of selected coal samples from sumatra, kalimantan, sulawesi, and papua Indonesia. *International journal of coal geology*, 77(3-4), 260-268.
- Brotowati, S., & Pirman. (2017). Pemanfaatan Batubara Kualitas Rendah Sebagai Bahan Kokas Melibatkan Proses Desulfurisasi, Demineralisasi dan Karbonisasi. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*, 03(02), 145–150

- Brody, E. M., Bolós, M., Bolívar, A., & de Prada, J. M. (2018). *Structural and microstructural characterization of petroleum coke: from green coke to graphitized carbon*. *Carbon*, 135, 206–219.
- Bielowicz, B. (2020). Ash Characteristics and Selected Critical Elements (Ga, Sc, V) in Coal and Ash in Polish Deposits. *Resources*, 9(115).
- Cheng, X., Zhang, Y., Liu, Z., & Li, W. (2016). Research progress in lignite flotation intensification. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 52(2), 689–701.
- Chen, J., Wen, Y., Jia, B., Mao, X., & Zhou, Q. (2025). Multiscale characterization of microstructural reconfiguration induced by oxidation in lignite from the Lingquan mining colliery. *Scientific Reports*, 15, 22494.
- Daulay, B., Santoso, B., & Ningrum, N. S. (2015). Evaluation of Selected High Rank Coal in Kutai Basin, East Kalimantan Relating To Its Coking Properties. *Indonesian Mining Journal*, 18(1), 1–10.
- Drizhd, N. A., Dauletzhanova, Z. T., Zamaliyev, N. M., & Dauletzhanov, A. Z. (2021). Influence of technological process parameters on qualitative characteristics of coal thermolysis products. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1(1), 39–46.
- Dunn, A. M., Hofmann, O. S., Waters, B., & Witchel, E. (2011). Cloaking malware with the trusted platform module. In *Proceedings of the 20th USENIX Security Symposium* (pp. 395–410).
- Fang, H., Han, J., Zhang, H., Zhao, B., & Qin, L. (2019). Effect of coal moisture content on coke's quality and yields of products during coal carbonization. *Journal of Central South University*, 26, 3225–3237.
- Fansuri, H. (2010). Dasar-dasar spektroskopi XRF. *Jurnal Ilmu Material Indonesia*, 5(1), 33–40.
- Figueirêdo, M. B., Venderbosch, R. H., Heeres, H. J., & Deuss, P. J. (2020). In-depth structural characterization of the lignin fraction of a pine-derived pyrolysis oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 149, 104837.
- Fu, Z., Zhu, J., Barghi, S., Zhao, Y., Luo, Z., & Duan, C. (2019). Dry coal beneficiation by the semi-industrial Air Dense Medium Fluidized Bed with binary mixtures of magnetite and fine coal particles. *Fuel*, 243(September 2018), 509–518.
- Gao, H., Wen, Z., Jin, L., Xiong, X., & Zhu, Y. (2022). Gasification characteristics of high moisture content lignite under CO₂ and auto-generated steam atmosphere in a moving bed tubular reactor. *Energies*, 15(18), 6751.

- Ghony, M. A. (2022). Pengaruh Suhu dan Waktu Pemanasan terhadap Nilai HGI pada Sampel Batubara di PT. Bukit Asam Tbk. *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*, 1(01), 1–7.
- Gul, H., Javaid, N., Ullah, I., Qamar, A. M., Afzal, M. K., & Joshi, G. P. (2020). Detection of Non-Technical Losses Using SOSTLink and Bidirectional Gated Recurrent Unit to Secure Smart Meters. *Applied Sciences*, 10(3151).
- Hakim, A., Hossain, J., & Khan, K. A. (2009). Temperature effect on the electrical properties of undoped NiO thin films. *Renewable Energy*, 34(11), 2625–2629.
- Hibatulloh, M. F., Kuncoro, B., & Harjanto, A. (2022). Geologi dan KGeologi dan Karakteristik Geometri Lapisan Batubara di Daerah Bunati. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 07(06), 1764-177k.
- Hisbullah, H., Kana, S., Nabila, N., & Faisal, M. (2022). Characterization of Physically and Chemically Activated Carbon Derived from Palm Kernel Shells. *International Journal of GEOMATE*, 23(97), 203–210.
- Ibrahim, E., Kurniawati, N., & Lasmana, F. (2019). Studi Modulus Elastisitas (Modulus Young) untuk Karakterisasi. *Jurnal Penelitian Sains*, 12(02), 1–5.
- Jiang, H., Zhang, L., & Sun, Q. (2019). *Characterization of low-rank coal and coke using FTIR and XRD techniques*. *Fuel Processing Technology*, 192, 78–87.
- Jing, J., Zhao, Z., Zhang, X., Feng, J., & Li, W. (2022). CO₂ capture over activated carbon derived from pulverized semi-coke. *Separations*, 9(7), 174.
- Kamala, R. A., Ahsani, Z. A., Rifaya, M. I., & Siregar, Z. E. (2023). Manifestasi kebijakan produk dimethyl ether dalam skema hilirisasi batubara sebagai transformasi peningkatan kesejahteraan rakyat. *Jurnal Restorasi Hukum*, 06(02), 168–184.
- Kielbasa, K., Bayar, Ş., Varol, E. A., Sreńszek-Nazzal, J., Bosacka, M., Miądlicki, P., Serafin, J., Wróbel, R. J., & Michalkiewicz, B. (2022). Carbon Dioxide Adsorption over Activated Carbons Produced from Molasses Using H₂SO₄, H₃PO₄, HCl, NaOH, and KOH as Activating Agents. *Molecules*, 27(21), 7467.
- Kurniadi, M., Rahmat, S. B., Amijaya, D. H., & Anggara, F. (2024). Characteristics and potential of coal for coking coal in Meliat Formation, Tarakan Basin, Nunukan, North Kalimantan, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1378(1).
- Kusniawati, E., Pratiwi, I., & Yonika, sasya nanda. (2023). Analisa pengaruh nilai total moisture terhadap gross calorific value pada batubara jenis X di PT Bukit Asam Tbk Unit Pelabuhan Tarahan. *Journal of Innovation Research and Knowledge*, 2(8), 3211–3222.

- Lartey-Young, G., & Ma, L. (2020). Remediation with Semicoke: Preparation, Characterization, and Adsorption Application. *Materials*, 13(4334).
- Li, R., Tang, Y., Song, X., Wang, S., Che, Q., & Chen, C. (2024). Chemical Structure Evolution of Thermally Altered Coal during the Preparation of Coal-Based Graphene and Division of Thermally Altered Zone: Based on FTIR and Raman. *ACS Omega*, 9, 34397–34412.
- Li, L., Bai, X., Qu, C., Zhou, K., & Sun, Y. (2022). Effects of moisture on the ignition and combustion characteristics of lignite particles: Modeling and experimental study. *ACS Omega*, 7(39), 34912–34920.
- Li, Z., Sun, Y., Zhang, X., & Chen, H. (2021). Mineral composition and catalytic effect of alkali and alkaline earth metals in lignite pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105129.
- Liu, Q., Zhang, Y., & Wang, J. (2020). Mineral matter characteristics and their transformation in coal during pyrolysis and gasification. *Fuel*, 270, 117465.
- Liu, Y., Wang, D., & Ren, X. (2022). Rapid Quantitation of Coal Proximate Analysis by Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Energies*, 15(2728).
- Mayasri, A. (2023). Fermentasi Molase dari Tetes Tebu sebagai Alternatif Bahan Bakar Terbarukan. *Lantanida Journal*, 11(1), 84–85.
- Mao, J., Zhao, H., Xie, Y., Wang, M., Wang, P., Shi, Y., & Zhao, Y. (2024). Fast and Nondestructive Proximate Analysis of Coal from Hyperspectral Images with Machine Learning and Combined Spectra-Texture Features. *Applied Sciences*, 14(7920).
- Matsuoka, H., Matsui, Y., Adachi, W., & Shibuya, Y. (2022). Possibility and Process of the Use of Upgraded Coal and Coke from Indonesian Lignite Coal in the Iron Making Process. *ISIJ International*, 62(12), 2500–2510.
- Mekonnen, T., Gessesse, A., & Wu, B. (2021). Review on the application, health usage, and negative effects of molasses. *Heliyon*, 7(5), e07064.
- Miroshnichenko, D., Shmeltser, K., & Kormer, M. (2023). Factors affecting the formation of the carbon structure of coke and the method of stabilizing its physical and mechanical properties. *Journal ChemEngineering*, 9(3), 66.
- Miroshnychenko, Kyrpychova str., K., Shmeltser, K. ., Kormer, M. V., & D.V. Sahalai. (2023). Influence of Raw Materials and Technological Factors on the Sorption. *Journal ChemEngineering*, 01(05), 17–33.

- Moeksin, R., Zarwan, N., & Alhusary, M. (2016). Pembuatan biobriket dari campuran tempurung kelapa dan cangkang biji karet *Jurnal Teknik Kimia*, 22(03), 35–44.
- Mohanty, A., Chakladar, S., Mallick, S., & Chakravarty, S. (2019). Structural characterization of coking component of an Indian coking coal. *Journal Fuel*, 249(June 2018), 411–417.
- Montallat, D., Tengah, K., Yuwanto, S. H., Syah, A., & Bahar, H. (2024). Analisis Proksimat untuk Menentukan Jenis dan Kualitas Batubara. *Journal Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan IV (SENASTITAN IV)*, 01(04), 1–8.
- Nasruddin, N., & Affandy, R. (2011). Karakteristik Briket dari Tongkol Jagung dengan Perekat Tetes Tebu dan Kanji. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 22(2), 1–10.
- Nur, Z., Oktavia, M., & Desmawita. (2020). Analisis kualitas batubara di pit dan stockpile dengan metoda analisis proksimat di PT. Surya Anugrah Sejahtera, Kecamatan Rantau Pandan, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi. *Jurnal Mine Magazine*, 01(02), 1–5.
- Nurisman, E., Lubis, J. F., & Wahyudi, A. (2017, November). Studi eksperimental pengaruh temperatur karbonisasi terhadap rendemen dan kualitas semikokas (coalite) berdasarkan analisis proksimat dan nilai kalori di Pabrik Briket PT Bukit Asam (Persero) Tbk. *Seminar Nasional AVoER IX*, Palembang, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
- Novananda, A., Rahmawati, I., Sani, D.H.A., Astuty, D.H., & Suprianti, L. (2020). Karbon Aktif dari Batubara Lignite dengan Proses Aktivasi Menggunakan Hidrogen Fluorida. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(1), 8–9.
- Prabhakaran, S., G., S., & Joshi, V. V. (2020). Thermogravimetric analysis of hazardous waste : Pet-coke , by kinetic models and Artificial neural network modeling. *Journal Fuel*, 01(02), 16–61.
- Putri, R. W., Haryati, S., & Rahmatullah. (2019). Pengaruh suhu karbonisasi terhadap kualitas karbon aktif dari limbah ampas tebu. *Jurnal Teknik Kimia*, 25(1), 1–4.
- Qi, H., Zhang, Y., Xue, Q., & Wang, F. (2019). Mineral transformation and distribution of coal ash during high-temperature processing of lignite. *Fuel Processing Technology*, 189, 27–35.

- Qiu, S., Yu, X., Chen, Y., Huang, X., Yin, C., & Zhang, S. (2023). Influence of Fe_2O_3 on the properties and structure of iron coke. *ACS Omega*, 8(35), 31946–31953.
- Rajaguguk, T. O., & Sumardi, S. (2018). Variations of Temperature Pack Carburizing and Comparisons Between Media Composition Bone Cows and Coconut Across Of Low Carbon Steel. Prosiding SNTTM XVII, 118–124. Bandar Lampung: Universitas Malahayati.
- Rochani, A., Yuniningsih, S., & Ma'sum, Z. (2015). Pengaruh Konsentrasi Gula Larutan Molases terhadap Kadar Etanol pada Proses Fermentasi. *Jurnal Reka Buana*, 1(1), 43–44.
- Sheng, C., & Azevedo, J. L. T. (2005). Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, 28(5), 499–507.
- Sufriadin, Widodo, S., & Mendaun, Y. (2016). Analisis Petrografi dan Kualitas Batubara Sinjai, Sulawesi Selatan. *Jurnal JPE*, 20(2), 21–25.
- Suhayadi, F. (2022). Kajian Lingkungan Pengendapan Berdasarkan Karakteristik Batubara Formasi Pulau Balang. *Jurnal Riset Teknik Pertambangan Unisba Press*, 02(01), 1–8.
- Sukarta, I. N., Sastrawidana, I. D. K., & Suyasa, I. W. B. (2023). Proximate analysis and calorific value of fuel briquettes from wood and coffee skins biomass as a renewable energy source. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 24(8), 293–300.
- Sulistyo, A. B., & Rinaldi, A. (2020). Pemilihan komposisi batubara GC-8 atau SMM untuk mendapatkan kualitas dan biaya produksi yang optimum di PT. Vinysea. *Jurnal InTent*, 3(2), 52–66.
- Sumari, R., Putri, A., & Wibowo, T. (2020). Analisis struktur kristal menggunakan metode XRD. *Jurnal Fisika Indonesia*, 24(2), 89–97.
- Suseno, A., & Firdausi, F. (2008). Spektroskopi Inframerah: Prinsip dan Aplikasi. *Jurnal Sains Material*, 4(1), 12–20.
- Vega, M. F., Díaz-Faes, E., & Barriocanal, C. (2021). Influence of the Heating Rate on the Quality of Metallurgical Coke. *ACS Omega*, 6(50), 34615–34623.
- Varkolu, M., Gundekari, S., Omvesh, Palla, V. C. S., Kumar, P., Bhattacharjee, S., & Vinodkumar, T. (2025). Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications. *Catalysts*, 15(3), 243.

- Wang, J., Li, Y., Zhao, L., & Chen, X. (2023). Influence of oxygen-containing functional groups on the surface reactivity of coal char. *Energy & Fuels*, 37(2), 1123–1134.
- Wang, J., Zhou, A., Song, Z., Liu, G., Qin, S., & Wang, J. (2024). The Kinetics of Semi-Coke CO₂ Gasification Based on Pore Fractal Growth. *Energies*, 17(483).
- Wang, Y., Zhou, Q., Zhao, Q., Qu, S., & Zhang, Y. (2023). Study on Relationships between Coal Microstructure and Coke. *Journal Processes*, 11(724), 1–16.
- Wang, X., He, X., & Wang, X. (2023). FTIR Analysis of the Functional Group Composition of Coal Tar Residue Extracts and Extractive Residues. *Applied Sciences*, 13(5162).
- Wang, X., Li, Y., & Chen, J. (2023). *FTIR analysis of coal carbonization residues: Influence of hydrogen bonding on overlapping absorption bands*. *Journal of Analytical Science*, 45(3), 215–227.
- Wardana, S. K., Bayquni, B., Perkasa, M. G., & Wafi, Z. A. (2020). Pengaruh Komposisi Campuran Batu Bara Lokal Dan Impor Terhadap Kualitas Kokas Pt Abc. *Jurnal Inovasi Teknik Kimia*, 5(1), 17–21.
- Wiranata, B., Amijaya, H., Anggara, F., Perdana, A. R., Isnadiyati, O. F., & Tanggara, D. N. S. P. (2019). Total sulfur and ash yield of Tanjung Formation coal in Sekako, Barito Basin, Central Kalimantan: Implication of depositional process. *Journal of Applied Geology*, 4(2), 1–10.
- Wu, M., Qin, Y., Qin, Y., Xu, N., & Feng, L. (2023). The Effect of Temperature on Molecular Structure of Medium-Rank Coal via Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Materials*, 16(20), 6746.
- Xia, J., Gao, Y., Li, S., Li, Q., & Wang, Y. (2022). Influence of the Heating Temperature on the Electrochemical Performance of Coal-Based Needle Coke Anode for Lithium Ion Batteries. *E3S Web of Conferences*, 358(02), 1–4.
- Xu, J., Zuo, H., Wang, G., Zhang, J., Guo, K., & Liang, W. (2019). Gasification mechanism and kinetics analysis of coke using distributed activation energy model (DAEM). *Applied Thermal Engineering*, 152(October 2018), 605–614.
- Yulmansyah, R. (2021). Kajian Korosi Struktur Conveyor B pada Tambang Batubara PT XYZ di Kabupaten Merangin Provinsi Jambi. *Journal Riset Teknik Pertambangan*, 01(01), 54–61.
- Yustanti, E. (2019). Pencampuran Batubara Coking Dengan Batubara Lignite Hasil Karbonisasi Sebagai Bahan Pembuatan Kokas. *Jurnal of Waste Management Technology*, 15, 15–30.

- Yustanti, E., & Muda, I. (2021). Pembuatan briket kokas dari batu bara lignite dengan binder recovered oil *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 01(02), 1–18.
- Yustanti, E., Muharman, A., & Mursito, A. T. (2022). The effect of wood tar and molasses composition on calorific value and compressive strength in bio-coke briquetting. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(3), 600–607.
- Zamroni, A., Sugarbo, O., Prastowo, R., Widiatmoko, R., Safii, Y., & Wijaya, E. (2020). The Relationship between in between indonesian coal qualities and their geologic histories. Conference paper in AIP conference proceedings, 01(03), 1-7.
- Zhang, F., Niu, S., He, J., Zhang, K., & Qin, Z. (2025). Deformation and pore structure characteristics of lignite pyrolysis with temperature under triaxial stress. *Processes*, 13(5), 1444.
- Zhang, L., Wang, G., Xue, Q., Zuo, H., She, X., & Wang, J. (2021). Effect of preheating on coking coal and metallurgical coke properties: A review. *Fuel Processing Technology*, 221(March), 106942.
- Zhang, Y., Liu, P., & Wang, D. (2022). *Aromatic structure evolution in coke: Implications for thermal stability and ash content*. Carbon Resources Conversion, 5(4), 456–468.
- Zhao, L., Chen, Y., Zhang, Z., & Li, H. (2021). Mineralogical characteristics and ash fusion behavior of coalite during thermal conversion. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105–116.
- Zhao, Z., Wang, R., Ge, L., Wu, J., Yin, Q., & Wang, C. (2019). Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurrying, combustion, and pollutant emission. *Energy*, 168, 609–618.
- Zheng, H., Xu, R., Zhang, J., Daghighaleh, O., Schenk, J., Li, C., & Wang, W. (2022). A Comprehensive Review of Characterization Methods for Metallurgical Coke Structures. *Materials*, 15(174)
- Životić, D., Cvetković, O., Vulić, P., Gržetić, I., dkk. (2019). Distribution of Major and Trace Elements in the Kovin Lignite (Serbia). *Geologia Croatica*, 72(1), 51–79.
- Zhuikov, A., Irtyugo, L., Samoilo, A., Zhuikova, Y., Grishina, I., Pyanykh, T., & Chicherin, S. (2024). Advanced Fuel Based on Semi-Coke and Cedarwood: Kinetic Characteristics and Synergetic Effects. *Energies*, 17(4963).