

TUGAS AKHIR
MORFOLOGI DAN KARAKTERISTIK ABU HASIL
PEMBAKARAN PADA LOKASI CHIMNEY DAN ASHPIT
BOILER BERBAHAN BAKAR FIBER DAN CANGKANG
KELAPA SAWIT

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelara Sarjana Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:
NURAZIM SYAH
2107230072



PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025

HALAMAN PENGESAHAN

Penelitian Tugas akhir ini diajukan oleh :

Nama : Nur Azim Syah
NPM : 2107230072
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tugas Akhir : Morfologi dan Karakteristik Abu Hasil Pembakaran Pada Lokasi Chimney dan Ashpit Boiler Berbahan Bakar Fiber dan Cangkang Kelapa Sawit
Bidang ilmu : Konversi Energi

Telah diperiksa oleh Dosen Pembimbing dan dinyatakan dapat dilanjutkan untuk mengikuti seminar proposal penelitian pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 13 Agustus 2025

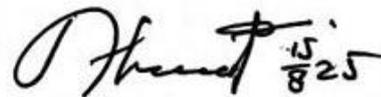
Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Penguji I



Chandra A Siregar, S.T., M.T

Dosen Penguji II



Ahmad Marabdi Siregar, S.T., M.T

Dosen Penguji III
14/08/2025



Iqbal Tanjung, S.T., M.T

Program Studi Teknik Mesin

Ketua



Chandra A Siregar, S.T., M.T

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertandatangan di bawah ini :

Nama Lengkap : Nur Azim Syah
NPM : 2107230072
Tempat / Tanggal Lahir : Medan, 22 Desember 2000
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Mesin

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul :

“MORFOLOGI DAN KARAKTERISTIK ABU HASIL PEMBAKARAN PADA LOKASI CHIMNEY DAN ASHPIT BOILER BERBAHAN BAKAR FIBER DAN CANGKANG KELAPA SAWIT”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karna hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain yang pada hakikatnya bukan merupakan karya tulis tugas akhir secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia di proses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan / kesarjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 13 Agustus 2025



Nur Azim Syah

ABSTRAK

Pemanfaatan limbah biomassa seperti fiber dan cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler semakin banyak diterapkan di industri kelapa sawit. Namun, penggunaan bahan bakar ini juga menghasilkan abu sisa pembakaran yang berpotensi menyebabkan slagging dan fouling, sehingga menurunkan kinerja boiler. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis morfologi dan karakteristik kimia abu hasil pembakaran fiber dan cangkang yang diambil dari dua lokasi berbeda, yaitu chimney dan ashpit. Metode pengujian yang digunakan meliputi Scanning Electron Microscope (SEM) untuk analisis morfologi dan X-Ray Fluorescence (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia abu. Hasil uji menunjukkan kandungan dominan berupa CaO (48,44%), SiO₂ (20,76%), dan SO₃ (11,20%). Nilai indeks slagging (Sr) sebesar 27,50 dan fouling (Fu) sebesar 10,98 mengindikasikan potensi penumpukan abu yang tinggi. Hasil SEM menunjukkan morfologi abu dengan bentuk partikel sferis, tidak beraturan, dan berpori yang dapat mempercepat terjadinya kerak pada dinding boiler. Dengan demikian, karakteristik abu yang dihasilkan berpotensi besar menyebabkan gangguan operasional boiler jika tidak ditangani secara tepat. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk strategi pengelolaan dan pemanfaatan abu sebagai material substitusi dalam aplikasi konstruksi.

Kata kunci: abu boiler, fiber, cangkang, morfologi, slagging, fouling, SEM, XRF.

ABSTRACT

The use of biomass waste such as palm fiber and shell as boiler fuel is increasingly being implemented in the palm oil industry. However, this type of fuel also produces combustion ash that has the potential to cause slagging and fouling, thus reducing boiler performance. This study aims to analyze the morphology and chemical characteristics of ash resulting from the combustion of fiber and shell, collected from two different locations: the chimney and the ashpit. The testing methods employed include Scanning Electron Microscopy (SEM) for morphological analysis and X-Ray Fluorescence (XRF) to determine the chemical composition of the ash. The test results show that the dominant components are CaO (48.44%), SiO₂ (20.76%), and SO₃ (11.20%). The slagging index (Sr) of 27.50 and fouling index (Fu) of 10.98 indicate a high potential for ash accumulation. SEM observations revealed ash morphology in the form of spherical, irregular, and porous particles, which can accelerate the formation of deposits on boiler walls. Therefore, the characteristics of the resulting ash have a high potential to cause operational disturbances in boilers if not properly managed. The findings of this research are expected to serve as a foundation for developing ash management strategies and for utilizing ash as a substitute material in construction applications.

Keywords: boiler ash, fiber, shell, morphology, slagging, fouling, SEM, XRF.

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan proposal penelitian ini dengan judul “Morfologi Dan Karakteristik Abu Hasil Pembakaran Pada Lokasi Chimney Dan Ashpit Boiler Berbahan Bakar Fiber Dan Cangkang Kelapa Sawit”.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan Proposal Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Iqbal Tanjung S.T., M.T, selaku dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
2. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T., Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang terus mendukung seluruh kegiatan mahasiswa/i Fakultas Teknik dalam proses perkuliahan.
3. Bapak Chandra A Siregar, S.T., M.T dan Bapak Ahmad Marabdi, S.T., M.T., Ketua dan Sekretaris Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan nasehat dan bimbingan dalam penyelesaian proposal penelitian penulis.
4. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknikmesinan kepada penulis.
5. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan proses administrasi selama proses perkuliahan.
6. Rahmad Juarsa(alm) dan DRA.Saniah , bapak dan ibu penulis yang selalu memberikan dukungan dan doa terbaik yang tiada henti untuk kesuksesan dan keberhasilan penulis selama proses perkuliahan.
7. Sahabat-sahabat penulis: Abangda Mirza Prasetya Winata, Dimas Arya, Rama Afrian, Putri Adinda Lestari yang selalu memberi semangat dan dukungan kepada penulis.

Proposal Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu keteknik-mesinan.

Medan, 27 Februari 2025

Nur Azim Syah

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR NOTASI	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumus Masalah	2
1.3 Ruang Lingkup	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Boiler	4
2.1.1 Chimney	5
2.1.2 Ashpit	6
2.2 Jenis-Jenis Boiler	7
2.2.1 Boiler Pipa Api	7
2.2.2 Boiler Pipa Air	7
2.3 Bahan Bakar Boiler	8
2.3.1 Fiber	8
2.3.2 Cangkang	9
2.4 Abu Boiler	10
2.5 <i>Slagging dan Fouling</i>	10
2.5.1 Indeks Slagging	12
2.5.2 Indeks Fouling	13
2.5.3 Rasio Basa/Asam	15
BAB 3 METODE PENELITIAN	17
3.1 Tempat dan Waktu	17
3.1.1 Tempat Penelitian	17
3.1.2 Waktu Penelitian	17
3.2 Bahan dan Alat Penelitian	18
3.2.1 Bahan Penelitian	18
3.2.2 Alat Penelitian	19
3.3 Bagan Alir Penelitian	20
3.4 Rancangan alat Penelitian	21
3.5 Prosedur Penelitian	23
3.6 Variabel yang akan diteliti	24

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Hasil Pengujian	25
4.2 Nilai <i>Slagging</i> dan <i>Fouling</i> Abu Hasil Pembakaran	28
4.3 Morfologi abu hasil pembakaran fiber dan cangkang	30
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	34
5.1 Kesimpulan	34
5.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN 1. SK PEMBIMBING	
LAMPIRAN 2. LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR	
LAMPIRAN 3. BERITA ACARA SEMINAR HASIL PENELITIAN	
LAMPIRAN 4. DAFTAR RIWAYAT HIDUP	

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai klasifikasi <i>slagging</i> berdasarkan nilai Sr	13
Tabel 2. Rentang nilai AtS yang aman terhadap <i>Fouling</i>	13
Tabel 3. Nilai klasifikasi potensi <i>fouling</i> berdasarkan nilai Fu	14
Tabel 4. Standar Nilai Rasio Basa/Asam	15
Tabel 5. Jadwal dan kegiatan saat melakukan penelitian	17

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Boiler	4
Gambar 2.2 Chimney dan Ashpit	5
Gambar 2.3 Boiler Pipa Api	7
Gambar 2.4 Boiler Pipa Air	7
Gambar 2.5 Fiber	8
Gambar 2.6 Cangkang	9
Gambar 2.7 Abu Boiler	10
Gambar 2.8 Dinding Ketel	11
Gambar 3.1 Abu Chimney	17
Gambar 3.2 Abi Ashpit	17
Gambar 3.3 <i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	18
Gambar 3.4 <i>X-Ray Flourescence (X-RF)</i>	18
Gambar 3.5 Diagram Alir	19
Gambar 3.6 Pengambilan abu dilokasi Chimney	20
Gambar 3.7 Pengambilan abu dilokasi Ashpit	20
Gambar 3.8 Sampel Abu Chimney	21
Gambar 3.9 Sampel Abu Ashpit	21
Gambar 4.1 Nilai Komposisi Pembakaran	24
Gambar 4.2 Nilai Komposisi Murni	26
Gambar 4.3 Morfologi Uji SEM 100 μm	29
Gambar 4.4 Morfologi Uji SEM 30 μm	30
Gambar 4.5 Morfologi Uji SEM 20 μm	31

DAFTAR NOTASI

R_s	= <i>Slagging Index</i>
R_f	= <i>Fouling Index</i>
S	= Kadar Kandungan Sulfur pada bahan bakar (%)
R b/a	= Rasio basa/asam
CaO	= Kalsium Oksida
SiO ₂	= Silika Oksida
SO ₃	= Sulfur Oksida
Fe ₂ O ₃	= Besi Oksida
Cl	= Clorin Oksida
K ₂ O	= Kalium Oksida
P ₂ O ₅	= Fosfor Oksida
Al ₂ O ₃	= Aluminium Oksida
Na ₂ O	= Natrium Oksida
MnO	= Mangan Oksida
TiO ₂	= Titanium Oksida

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis di Indonesia, perkembangannya juga semakin pesat, baik peningkatan luas lahan kelapa sawit maupun peningkatan jumlah pabrik pengolahan kelapa sawit. (Antoni et al., 2021). Seiring dengan meningkatnya produksi kelapa sawit, limbah padat biomassa seperti fiber dan cangkang buah kelapa sawit juga melimpah. Limbah ini sering dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan energi panas yang diperlukan dalam proses produksi. (Dewi et al., 2022).

Boiler (*Steam Generator*) merupakan bejana tertutup yang berisi fluida air untuk dipanaskan. Energi panas yang dihasilkan dari fluida menghasilkan uap dan uap tersebut kemudian digunakan untuk berbagai macam aplikasi seperti sebagai penggerak turbin uap, pemanas ruangan, pemanas dalam proses produksi dan lain-lain (Frastiyanto & Arsyad, 2020). Berdasarkan proses konversi energi, boiler atau ketel uap berfungsi untuk merubah energi kimia yang terdapat pada bahan bakar menjadi energi panas yang ditransfer melalui fluida. Panas yang diberikan kepada fluida berasal dari proses pembakaran berbagai jenis bahan bakar yang digunakan, seperti bahan bakar cair, bahan bakar padat, maupun bahan bakar gas. Dengan semakin majunya perkembangan teknologi, energi nuklir pun digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan sumber panas pada boiler pada masa saat ini (Hikmawan et al., 2020).

Sebagian besar boiler atau ketel uap di Indonesia masih didominasi memakai bahan bakar batu bara. Dalam jangka waktu panjang pasokan batubara terus semakin berkurang dan memiliki nilai jual harga yang tinggi. Salah satu bahan bakar alternatif pengganti batu bara dalam proses pengoperasian boiler adalah memanfaatkan limbah biomassa yaitu produk turunan kelapa sawit fiber dan cangkang. Limbah biomassa ini memiliki keunggulan yaitu ketersediaannya yang melimpah dan harga yang rendah (Aditya et al., 2022).

Penggunaan limbah biomassa fiber dan cangkang sebagai bahan bakar alternatif boiler menghasilkan limbah padat berupa abu boiler. Abu yang dihasilkan

menimbulkan permasalahan pada lingkungan yaitu menjadi sebagai tumpukan pada area pabrik dan juga menyebabkan terjadinya *Slagging* dan *Fouling* pada dinding pipa boiler yang mengakibatkan menurunnya efisiensi kinerja pada boiler (Yuliyani et al., 2021).

Morfologi secara umum berarti bentuk atau struktur. Dalam konteks penelitian ini adalah morfologi mengacu pada bentuk fisik dan struktur mikroskopis dari partikel abu yang dihasilkan proses pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit pada lokasi chimney dan ashpit boiler. Ini biasanya diamati menggunakan alat mikroskop, seperti SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan X-RF (*X-Ray Fluorescence*).

Karakteristik pada penelitian ini ialah sifat fisik dan kimia atau ciri-ciri tertentu yang terdapat pada abu hasil pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit pada lokasi chimney dan ashpit boiler.

Berdasarkan dari latar belakang tersebut pengamatan Morfologi dan karakteristik pemicu penumpukan abu pada boiler berbahan bakar fiber dan cangkang merupakan topik riset yang cukup menjanjikan.

1.2 Rumus Masalah

Pada penelitian sebelumnya (Virza Rizky Pratama 2021) telah melakukan sebuah penelitian mengenai karakteristik dan pemicu tumpukan abu pada lokasi tungku pembakaran, dust-collector boiler TAKUMA berkapasitas 20 ton/jam dengan variasi bahan bakar fiber dan cangkang. Tumpukan abu yang terbentuk sebagian besar disebabkan oleh Terak yang mencair pada pembakaran suhu temperatur tinggi dan melekat pada pipa dinding ketel. Namun, untuk bagian chimney dan ashpit belum dilakukan pengamatan lebih lanjut berdasarkan rumus masalah tersebut objektif tugas akhir ini adalah untuk mengamati morfologi dan karakteristik pemicu penumpukan abu pada lokasi chimney dan ashpit boiler dengan bahan bakar fiber dan cangkang kelapa sawit.

1.3 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup pada penelitian ini adalah riset berfokus terhadap morfologi bentuk dan karakteristik abu serta unsur penyebab terbentuknya

penumpukan abu hasil pembakaran pada lokasi chimney dan ashpit boiler dengan bahan bakar fiber dan cangkang kelapa sawit.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk mengamati morfologi dan karakteristik pemicu penumpukan abu pada lokasi Chimney dan Ashpit pada boiler dengan bahan bakar fiber dan cangkang kelapa sawit.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat riset ini adalah dapat mengamati morfologi dan karakteristik abu hasil pembakaran fiber dan cangkang, dan juga dapat mengetahui faktor penyebab tumpukan abu dan nilai *slagging fouling* pada boiler industri kelapa sawit.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Boiler

Boiler (*Steam Generator*) merupakan suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk menghasilkan uap dengan daya muat yang besar secara terus menerus bertekanan dan suhu temperatur tertentu memanaskan air menggunakan bahan bakar. Proses ini menghasilkan panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap yang memiliki pressure dan temperatur tinggi. Uap yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai proses aplikasi dalam industri, seperti penggerak turbin, pemanas, proses pengoperasian mesin, dan lain-lain (Frastiyono & Arsyad, 2020).



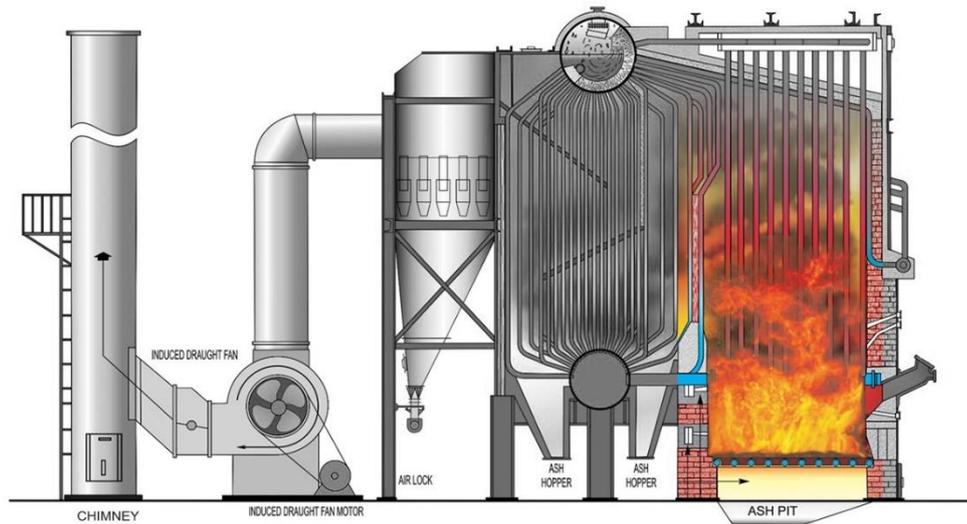
Gambar 2.1 Boiler

Gambar dikutip dari: PT. PERMATA HIJAU, Mananti Sosa Jae, Huta Raja Tinggi, Kabupaten Padang Lawas, Sumatera Utara.

Boiler (*Steam Generator*) berfungsi mengubah energi kimiawi yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas, yang kemudian dikirim melalui fluida. Pada proses pembakaran berbagai jenis bahan bakar seperti, bahan bakar cair, bahan bakar padat, bahan bakar gas dan energi nuklir menciptakan energi

panas untuk fluida. Nilai kalor bahan bakar merupakan komponen penting karena memengaruhi efisiensi boiler secara keseluruhan selain kapasitasnya untuk mengubah air menjadi uap (Cimon et al., 2024).

2.1.1 Chimney



Gambar 2.2 Chimney dan Ashpit

Gambar dikutip dari :(Lusiana et al., 2019)

Chimney atau cerobong merupakan komponen boiler yang berfungsi untuk mengalirkan gas buang hasil pembakaran dari ruang bakar menuju atmosfer. Chimney bekerja dengan memanfaatkan efek draft alami akibat perbedaan densitas udara panas didalam cerobong dan udara luar, atau dibantu oleh *forced draft fan* pada sistem tertentu.

Fungsi utama chimney pada boiler adalah :

1. Mengalirkan gas buang ke ketinggian tertentu sehingga mengurangi konsentrasi polutan di area pembakaran.
2. Menjaga aliran udara pembakaran tetap stabil
3. Mencegah akumulasi gas berbahaya di dalam ruang bakar

Pada proses pembakaran bahan bakar biomassa seperti fiber dan cangkang kelapa sawit, sebagian abu berbentuk *fly ash* terbawa aliran gas panas dan keluar melalui chimney. Abu ini memiliki ukuran partikel sangat halus (mikrometer) dan biasanya

mengandung senyawa alkali seperti K_2O dan Na_2O yang mudah bereaksi dengan SiO_2 membentuk senyawa bertitik leleh rendah. Senyawa ini berpotensi menempel pada permukaan pipa pemanas lanjut (*superheater*) dan memicu *fouling* (Miles et al., 1996).

Karakteristik abu pada chimney :

1. Ukuran partikel halus dengan permukaan relatif halus atau berbentuk sferis akibat pendinginan cepat.
2. Komposisi kimia didominasi unsur alkali dan oksida asam seperti SiO_2
3. Potensi tinggi menyebabkan *fouling* dan korosi suhu rendah jika mengandung SO_3 dan Cl dalam jumlah signifikan (Vainio et al., 2016)

2.1.2 Ashpit

Ashpit merupakan komponen pada bagian dasar tungku pembakaran boiler yang berfungsi menampung abu hasil pembakaran yang jatuh dari *grate* atau dasar tungku. Abu pada ashpit dikenal sebagai *bottom ash* atau abu dasar, yang umumnya berukuran lebih besar dan lebih berat dibandingkan *fly ash*.

Fungsi utama ashpit :

1. Menampung abu agar tidak mengganggu proses pembakaran
2. Memudahkan pembuangan abu secara periodik
3. Menjaga suplai udara primer tetap lancar dari bawah *grate*

Karakteristik abu pada ashpit :

1. Berukuran besar dan tidak seluruhnya terbakar sempurna, sering masih mengandung *char*.
2. Didominasi senyawa seperti CaO , MgO , dan Fe_2O_3 yang memiliki titik leleh tinggi dan relatif stabil pada suhu pembakaran (G & Saravanan, 2016).

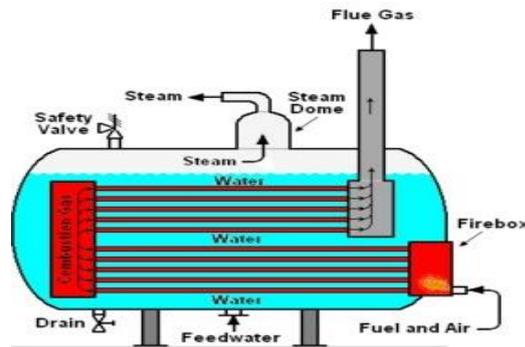
Meskipun abu pada ashpit jarang menjadi penyebab langsung *fouling* pada pipa pemanas, penumpukan berlebihan dapat menghambat aliran udara primer dan menurunkan efisiensi pembakaran. Oleh karena itu, pembuangan abu secara rutin menjadi langkah penting dalam perawatan boiler (Vamvuka & Zografos, 2004).

2.2 Jenis-Jenis Boiler

Prinsip pada boiler dapat dibagi menjadi 2 bagian, yaitu :

2.2.1 Boiler Pipa Api

Boiler pipa api ialah boiler yang bekerja dengan melewatkan gas panas hasil pembakaran melalui pipa yang digunakan untuk mengkonversikan air menjadi uap. Jenis boiler ini biasanya digunakan untuk menghasilkan uap dalam kapasitas kecil dengan tekanan yang rendah (Frastiyono & Arsyad, 2020).

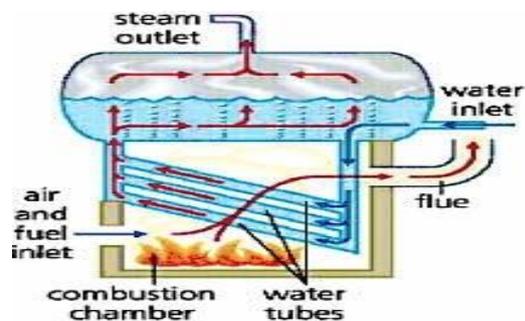


Gambar 2.3 Boiler Pipa Api

Gambar dikutip dari: artikel (Frastiyono & Arsyad, 2020)

2.2.2 Boiler Pipa Air

Boiler pipa air ialah boiler yang bekerja dengan air mengalir melalui pipa dengan dikelilingi nyala api dan gas panas dari luar pipa untuk menghasilkan uap. Boiler jenis ini biasanya digunakan untuk menghasilkan uap dalam kapasitas dengan tekanan yang besar (Frastiyono & Arsyad, 2020).



Gambar 2.4 Boiler Pipa Air

Gambar dikutip dari: artikel (Frastiyono & Arsyad, 2020)

2.3 Bahan Bakar Boiler

Dalam penelitian ini, sumber energi biomassa menjadi bahan bakar alternatif boiler untuk proses produksi yaitu menggunakan fiber dan cangkang kelapa sawit. Untuk menghasilkan presentase pembakaran biomassa bahan bakar yang baik maka digunakan 75% fiber dan 25% cangkang (Andri & Arizona, 2023).

2.3.1 Fiber

Fiber merupakan produk limbah kelapa sawit yang berbentuk serabut seperti benang dan berwarna kuning kecoklatan. Fiber dapat dihasilkan ketika buah kelapa sawit diperas selama proses pengepresan. Fiber memiliki nilai kalor sekitar 2.637 kkal/kg – 3.998 kkal/kg sehingga panas yang dihasilkan oleh fiber lebih kecil dibandingkan dengan panas yang dihasilkan oleh cangkang, sehingga pembakaran pada boiler diterapkan perbandingan lebih besar fiber dari pada cangkang dalam pembakaran boiler (Andri & Arizona, 2023).



Gambar 2.5 Fiber

Gambar dikutip dari: artikel (Andri & Arizona, 2023)

Pada proses pembakaran bahan bakar biomassa jenis fiber ini bila penggunaan secara berlebihan dapat memberikan dampak negatif. Fiber cenderung lebih cepat habis menjadi abu dikarenakan tekstur bentuknya halus, yang dapat menghambat panas dalam pipa di tungku pembakaran. Selain itu, penggunaan fiber yang berlebihan juga dapat menyebabkan tumpukan abu dalam tungku pembakaran sehingga sulit saat proses pembuangan abu melalui pintu keluar abu dan arang (pintu ekspansi).

2.3.2 Cangkang

Cangkang merupakan produk limbah kelapa sawit yang dihasilkan dari proses produksi minyak yang berbentuk seperti tempurung kelapa yang berwarna hitam namun berbentuk kecil, cangkang juga memiliki nilai kalor sebesar 3.500 kkal/kg – 4.100 kkal/kg (Kurniati, 2008). Cangkang memiliki kandungan unsur kimia seperti Carbon (C), Hidrogen (H₂), Nitrogen (N₂), Oksigen (O₂), dan abu, dan memiliki tampilan yang bervariasi (Setiawan, 2016).



Gambar 2.6 Cangkang

Gambar dikutip dari: (Andri & Arizona, 2023)

Penggunaan cangkang pada proses pembakaran menyebabkan cangkang berubah menjadi arang. Arang akan masuk ke tungku sebagai partikel pijar kecil saat terkena udara, arang yang terkumpul dapat menghalangi panas dan mengurangi nyala api pada tungku jika terlalu banyak cangkang yang digunakan. Disisi lain, jika tidak cukup banyak cangkang yang digunakan, panas yang dihasilkan akan rendah dikarenakan cangkang memiliki potensi menghasilkan panas yang lebih besar saat dibakar (Kurniati, 2008).

Penggunaan cangkang dan fiber sebagai bahan bakar boiler terdapat beberapa alasan sebagai berikut :

1. Ketersediaan limbah cangkang dan fiber yang melimpah di pabrik kelapa sawit.
2. Cangkang dan fiber merupakan limbah biomassa yang dihasilkan dari proses pengolahan kelapa sawit dan dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan.

3. Cangkang dan fiber memiliki nilai kalor yang cukup tinggi sehingga mampu menghasilkan panas yang cukup untuk proses pembakaran boiler.
4. Cangkang dan fiber memiliki harga yang ekonomis dibandingkan dengan bahan bakar fosil dan mengurangi masalah pada pembuangan limbah padat.

2.4 Abu Boiler

Abu boiler termasuk salah satu jenis limbah biomassa hasil sisa pembakaran bahan bakar cangkang dan fiber dalam kinerja boiler. Abu boiler memiliki berat jenis kurang dari $1,20 \text{ g/cm}^3$, yaitu hanya $0,160 \text{ g/cm}^3$. Abu boiler dapat dikategorikan sebagai material alam dan termasuk dalam klasifikasi agregat ringan. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui komposisi abu agar dilakukan pemanfaatan dalam berbagai macam aplikasi (Bukit et al., 2022).

Setelah dilakukan analisis komposisi kimia abu, telah didapatkan hasil bahwa abu boiler mengandung SiO_2 (silika) sebesar 57,5% dan Al_2O_3 (alumina) sebesar 4,20%. Selain itu, abu boiler juga mengandung unsur kimia seperti kalsium (Ca) sebesar 6,95%, dan magnesium (MgO) sebesar 4,35%, serta beberapa unsur jejak lainnya (Yani, 2021).



Gambar 2.7 Abu Boiler

Gambar dikutip dari: (Kimia et al., 2013)

2.5 *Slagging dan Fouling*

Slagging dan *fouling* merupakan suatu fenomena menempel dan menumpuknya abu hasil pembakaran cangkang dan fiber yang mempengaruhi

peforma kinerja boiler. Abu sisa pembakaran cangkang dan fiber berbentuk leburan atau plastis yang mengakibatkan abu dapat menumpuk pada dinding tungku (*furnance*) yang membentuk *Slagging* dan terbawa bersama *fly ash* menempel pada pipa boiler sebagai *fouling* (Fadhilla et al., 2020).

Slagging dan *fouling* kerap terjadi pada pembangkit tenaga listrik industri pengolahan kelapa sawit. Hal ini disebabkan bahan bakar cangkang dan fiber memiliki kandungan abu yang relatif tinggi dan memiliki suhu leleh abu yang relatif rendah. Fenomena ini berdampak signifikan terhadap kinerja boiler, seperti terjadinya penyumbatan pipa dan kerusakan pipa didalam tungku pembakaran, meningkatnya konsumsi bahan bakar, menghambat penghantaran panas pada pipa (*head exchanger tube*), dan turunnya efisiensi boiler dan dapat menimbulkan korosi. Seluruh permasalahan ini kerap disebut sebagai *clinker trouble* (Yuliyani et al., 2021).

Permasalahan pada *slagging* dan *fouling* perlu ditangani dengan serius karena dapat berdampak pada kinerja boiler serta mempengaruhi keseluruhan operasional pabrik. Pemantauan terhadap komposisi dan suhu lebur abu harus dilakukan secara berkelanjutan untuk mencegah dan mengidentifikasi potensi gangguan sebelum berkembang menjadi masalah yang lebih besar. Tindakan pencegahan harus diterapkan agar menjaga kinerja dan efisiensi boiler tetap optimal.



Gambar 2.8 Dinding Ketel

Gambar dikutip dari: PT. PERMATA HIJAU, Mananti Sosa Jae, Huta Raja Tinggi, Kabupaten Padang Lawas, Sumatera Utara.

2.5.1 Indeks Slagging

Slagging merupakan sebuah fenomena terjadi penumpukan abu yang berbentuk padat maupun leburan pada permukaan dinding penghantar panas di dalam tungku pembakaran. Sebab terjadinya *Slagging* merupakan akibat pembakaran pada tungku dimana suhu pada outlet dari tungku pembakaran (*furnance*) lebih tinggi dari suhu melunak abu (Yuliyani et al., 2021).

Proses terjadinya *slagging* dimulai ketika abu dari bahan bakar berada di area dengan suhu yang lebih tinggi dari suhu melunak abu didalam tungku pembakaran. Kemudian abu berpindah dan menempel pada dinding pipa boiler atau area lain dengan temperatur lebih rendah, mengeras dan menyebabkan gangguan pada proses pebakaran.

Dalam mengevaluasi *slagging*, karakteristiknya dapat dianalisis melalui dua faktor utama yaitu : suhu lebur abu (AFT) dan kondisi abu itu sendiri. Suhu lebur abu yang rendah menjadi faktor yang mudah terjadinya *slagging*. Selain itu, diketahui bahwa rasio basa seperti (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O) terhadap unsur asam seperti (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) meningkat, potensi timbulnya *slagging* juga meningkat.

Indeks viskositas slag atau *slag viscosity index (Sr)* digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan pembentukan *slagging* (kerak) di dalam tungku pembakaran. Indeks ini dihitung berdasarkan rasio kandungan SiO_2 terhadap jumlah total oksida logam utama penyusun abu, yakni CaO , MgO , dan Fe_2O_3 , sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan berikut (Lachman et al., 2021):

$$Sr = \frac{SiO_2}{SiO_2 + CaO + MgO + Fe_2O_3} \times 100$$

Silika memiliki titik leleh yang tinggi dan cenderung meningkatkan viskositas abu. Oleh karena itu, semakin besar nilai Sr , maka abu akan lebih kental dan lebih sulit untuk mencair atau menempel pada permukaan tungku. Dengan demikian, nilai Sr yang tinggi menunjukkan kecenderungan *slagging* yang rendah. Abu yang menempel di dinding tungku atau pada sistem pembakaran umumnya mempertahankan kandungan silika tinggi dari bahan bakar asalnya. Adapun Klasifikasi nilai Sr terhadap kecenderungan *slagging* pada tabel 3.

Tabel 1. Nilai klasifikasi *slagging* berdasarkan nilai Sr (Lachman et al., 2021)

Kategori potensi <i>Slagging</i>	Nilai Sr
<i>Low</i>	Sr > 72
<i>Medium</i>	65 < 72
<i>High</i>	< 65

Selain itu, unsur alkali seperti K₂O dan Na₂O dapat membentuk senyawa eutektik dengan titik leleh rendah ketika bereaksi dengan silika (SiO₂), yang mempercepat terjadinya fouling maupun slagging. Oleh karena itu, digunakan pula parameter *alkali to silica ratio* (AtS) yang dihitung melalui rumus (Lachman et al., 2021):

$$AtS = \frac{K_2O + Na_2O}{SiO_2}$$

Menurut penelitian oleh (Najser et al., 2020) nilai AtS yang dianggap aman terhadap pembentukan fouling pada suhu pembakaran hingga 1100 °C adalah dalam rentang 0,35 – 0,45. Nilai yang melebihi batas ini menunjukkan risiko peningkatan fouling akibat terbentuknya senyawa leleh alkali-silika.

Tabel 2. Rentang nilai AtS yang aman terhadap *Fouling*

Kategori potensi <i>Slagging</i>	Rentang nilai AtS
Aman (rendah)	0,35 – 0,45
Beresiko tinggi terhadap <i>fouling</i>	> 0,45
Potensi sangat rendah / kurang signifikan	< 0,35

2.5.2 Indeks *Fouling*

Fouling merupakan proses pengumpulan atau penimbunan abu pada permukaan aliran dinding penghantar panas, yaitu aliran gas buang hasil dari pembakaran fiber dan cangkang yang melewati permukaan superheater dan reheater dengan suhu tinggi, dimana hasil proses pembakaran tersebut memiliki suhu yang

rendah di bandingkan suhu melunak abu pada bagian tungku pembakaran (*Furnance*).

Indeks fouling digunakan untuk mengevaluasi potensi pembentukan *fouling* pada permukaan peralatan termal akibat endapan abu selama proses pembakaran biomassa. Nilai indeks ini dihitung berdasarkan rasio unsur basa terhadap unsur asam (B/A), kemudian dikalikan dengan jumlah kandungan oksida natrium (Na₂O) dan oksida kalium (K₂O) dalam abu biomassa, sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan (Lachman et al., 2021) :

$$Fu = \frac{B}{A} \times (Na_2O + K_2O)$$

Kalium diketahui sebagai salah satu unsur dominan dalam abu biomassa, sementara kandungan natrium umumnya lebih rendah. Kalium dapat mengalami kondensasi dan menempel pada partikel abu terbang (*fly ash*), yang kemudian meningkatkan daya rekat permukaan partikel tersebut. Hal ini menyebabkan partikel abu mudah menempel pada permukaan (*superheater*), sehingga memicu terbentuknya *fouling*. Fenomena ini telah diamati oleh (Miles et al., 1996) yang menemukan bahwa endapan abu pada superheater banyak mengandung K₂O, SO₃, dan CaO sebagai komponen utama. Kecenderungan *fouling* berdasarkan nilai Fu pada tabel 4.

Tabel 3. Nilai klasifikasi potensi *fouling* berdasarkan nilai Fu (Lachman et al., 2021)

Kategori potensi <i>fouling</i>	Nilai Fu
<i>Low</i>	< 0,6
<i>Medium</i>	0,6 > 40
<i>High</i>	40 >

Nilai unsur yang sangat mempengaruhi pengumpulan atau penimbunan abu ialah material basa, yaitu natrium (Na), yang biasa disebut kadar Na₂O. Jika nilai-nilai tersebut tinggi maka secara umum kecenderungan terjadinya *fouling* menjadi meningkat, faktor inilah yang menghambat pada proses kinerja boiler.

2.5.3 Rasio Basa/Asam

Dalam analisis unsur abu dari hasil pembakaran terdapat unsur pokok abu diklasifikasikan sebagai basa atau asam. Unsur basa terdiri dari besi (Fe_2O_3), logam alkali, kalsium oksida (CaO), magnesium (MgO), natrium oksida (Na_2O), dan kalium oksida (K_2O). Unsur asam terdiri dari silika (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), dan titanium (TiO_2). Basa dan asam cenderung bergabung membentuk senyawa dengan suhu leleh yang lebih rendah (Konferensi & Bumi, 2019). Analisis unsur pada rasio basa asam dapat menggunakan persamaan (Lachman et al., 2021) :

$$R \frac{b}{a} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

Slagging rendah terjadi ketika B/A di bawah 0,75, menggunakan persamaan Bed Agglomerasi Indeks sebagai berikut :

Indeks Agglomerasi guna untuk menilai potensi terjadinya gangguan operasional akibat pembentukan abu selama proses pembakaran pada *Fluidized Bed System* (Sistem unggun terfluidasi). Agglomerasi ini terjadi akibat suhu leleh abu (AFT) yang rendah. Oleh karena itu, nilai BAI yang lebih tinggi menunjukkan kecenderungan AFT yang lebih tinggi dan resiko agglomerasi yang rendah. Menurut (Vamvuka & Zografos, 2004) agglomerasi unggun berpotensi terjadi ketika nilai BAI berada di bawah 0,15.

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{Na_2O + Al_2O_3}$$

Tabel 4. Standar Nilai Rasio Basa/Asam (Lachman et al., 2021)

Potensi <i>Fouling</i>	Rasio Basa/Asam
<i>Low</i>	0,5 <
<i>Medium</i>	Atau > 1
<i>High</i>	Hingga > 1,75

Untuk mengetahui nilai senyawa dan bentuk Morfologi abu, pengamatan dilakukan pada 2 titik sampel abu deposit yang terbentuk selama proses pembakaran. Titik pengamatan tersebut pada bagian *Chimney* dan *Ashpit*. Hal ini dilakukan untuk mengetahui akibat terjadinya *Slagging* dan *Fouling* pada pembangkit listrik industri kelapa sawit.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

3.1.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, kota medan dan Laboratorium Terpadu Universitas Sumatera Utara untuk proses pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *X-Ray Flourescence (X-RF)*.

3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu implementasi penelitian tugas akhir ini selama kurang lebih 6 bulan dimulai dari disetujuinya penulisan proposal tugas akhir, persiapan sampel abu, proses pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *X-Ray Flourescence (X-RF)* , pengambilan data, pengolahan data, seminar hasil hingga sidang akhir.

Tabel 5. Jadwal dan kegiatan saat melakukan penelitian

No	Kegiatan	Waktu (Bulan)					
		1	2	3	4	5	6
1	Studi Literatur	■	■				
2	Pengumpulan Data	■	■				
3	Pengambilan Sampel Abu		■	■			
4	Pengujian dan Pengambilan Data		■	■	■		
5	Analisa Data			■	■	■	
6	Hasil dan Pembahasan				■	■	■
7	Penulisan Laporan					■	■
8	Sidang Sarjana						■

3.2 Bahan dan Alat Penelitian

3.2.1 Bahan Penelitian

1) Abu Pembakaran Boiler

Penelitian yang akan diteliti adalah abu hasil pembakaran pada lokasi Chimney dan Ashpit Boiler sebagai objek untuk mengetahui karakteristik yang terdapat pada abu hasil pembakaran boiler tersebut.



Gambar 3.1 Abu Chimney



Gambar 3.2 Abu Ashpit

3.2.2 Alat Penelitian

1) *Scanning Electron Microscope (SEM)*

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop electron yang menggunakan berkas electron untuk menggambar profil permukaan atau struktur morfologi abu boiler. Proses pengujian (*SEM*) dilakukan di Laboratorium terpadu Universitas Sumatera Utara.



Gambar 3.3 *Scanning Electron Microscope (SEM)*

2) *X-Ray Fluorescence (X-RF)*

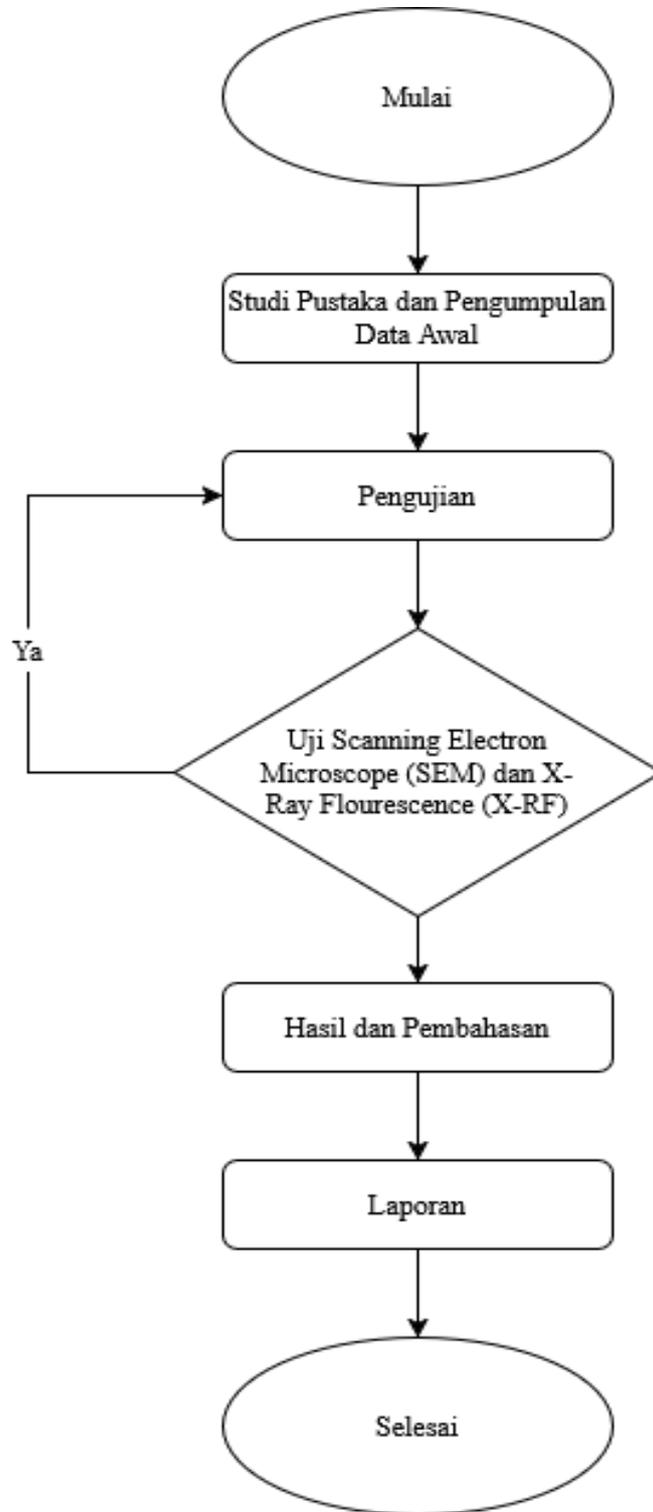
X-ray Fluorescence (X-RF) merupakan alat Teknik analisis komposisi kimiawi suatu sampel dengan menggunakan interaksi sinar-X Fluoresen. *X-RF* biasanya digunakan untuk menganalisa unsur benda padat, cair, dan bubuk. Spektroskopi *X-RF* adalah metode yang efektif untuk menganalisis kualitatif dan kuantitatif komposisi material. Analisis kualitatif dilakukan untuk menganalisis jenis unsur yang terkandung dalam bahan, dan analisis kuantitatif dilakukan untuk menentukan konsentrasi unsur dalam sampel suatu bahan.



Gambar 3.4 *X-Ray Fluorescence (X-RF)*

3.3 Bagan Alir Penelitian

Bagan alir penelitian yang akan dilakukan sebagai berikut :



Gambar 3.5 Diagram Alir

3.4 Rancangan alat Penelitian

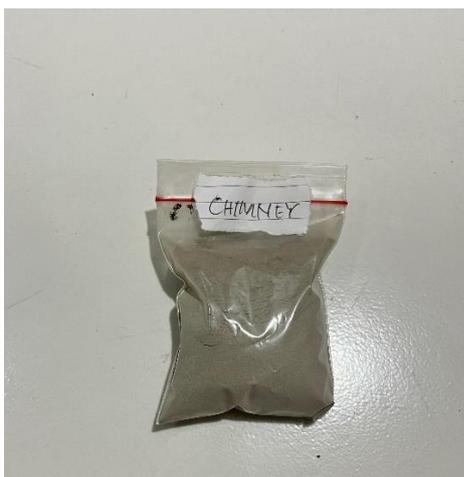
Penelitian ini dimulai dari studi literatur kemudian pengambilan sampel dari dua lokasi boiler (Chimney dan Ashpit) lalu Sampel dikumpulkan menggunakan wadah tertutup dan diberi label sesuai lokasi abu kemudian dilakukan di laboratorium Universitas Sumatera Utara (USU) untuk proses pengujian *Scanning Electron Microscope (SEM)* dan *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Uji SEM dilakukan untuk menganalisis karakteristik abu, Uji XRF dilakukan untuk menganalisis komposisi kimia beserta unsur-unsur yang terkandung dalam abu. Data yang diperoleh dapat menjadi dasar untuk menilai terjadinya *slagging* dan *fouling*.



Gambar 3.5 Pengambilan Sampel abu dilokasi Chimney



Gambar 3.6 Pengambilan Sampel Abu dilokasi Ashpit



Gambar 3.7 Sampel Abu Chimney



Gambar 3.8 Sampel Abu Ashpit

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur Penelitian yang akan dilakukan adalah sebagai berikut.

1) Studi Pustaka dan Pengumpulan Data

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi pustaka mengenai boiler, bahan bakar boiler dan abu boiler sebagai acuan untuk Morfologi dan Karakteristik abu hasil pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit.

2) Persiapan Uji Material

Mempersiapkan material uji berupa sampel abu boiler. Pengambilan sampel abu dilakukan pada beberapa lokasi pembakaran boiler seperti : abu Chimney dan abu Ashpit. Sampel abu dilihat dari kasat mata jenis Morfologi dan Karakteristiknya sebelum kemudian dibawa ke laboratorium untuk di uji karakteristiknya.

3) Proses Pengujian *Scanning Electron Mikroscope (SEM)*

Pengujian dengan metode *Scanning Electron Microscope (SEM)* dilakukan untuk menganalisis karakteristik abu hasil pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit.

4) Proses Pengujian *X-Ray Flourescence (X-RF)*

Pengujian dengan metode *X-Ray Flourescance (X-RF)* dilakukan untuk menganalisis komposisi kimia beserta unsur-unsur yang terkandung dalam abu pembakaran dengan menggunakan metode spektometri.

5) Analisis Abu dan Faktor Penumpukan

Data analisis yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar untuk penelitian lebih lanjut untuk mengeksploitasi komposisi abu boiler. Selain itu, unsur-unsur yang berkontribusi terhadap penumpukan abu dapat dievaluasi dimasa mendatang untuk peningkatan efisiensi dan desain ruang bakar pada boiler.

6) Hasil penelitian dan Pembahasan

Penulisan hasil dan pembahasan dilakukan untuk menulis analisis data yang telah dilakukan untuk membuat perbandingan karakteristik abu boiler pada titik pengambilan sampel abu di dalam ruang bakar Chimney dan Ashpit boiler.

3.6 Variabel yang akan diteliti

Adapun variabel dari penelitian ini terdiri dari 2 variabel, diantaranya :

Variabel Independen

Variabel Independen ialah variabel yang mempengaruhi rasio asam/basa dari bahan bakar fiber dan cangkang kelapa sawit.

Variabel Dependen

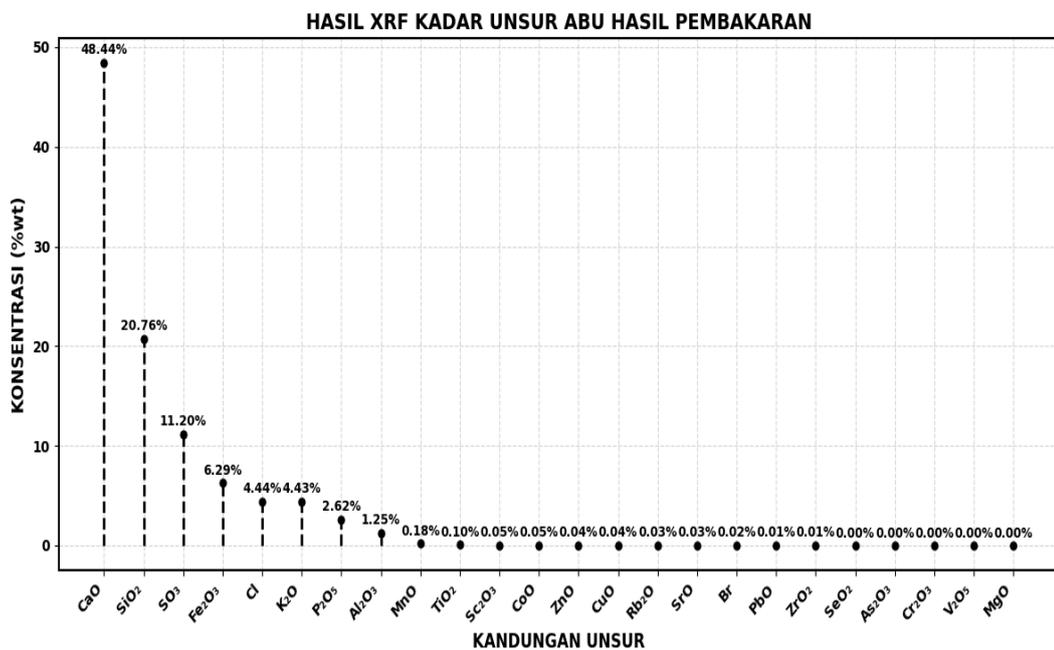
Variabel Dependen ialah variabel yang dipengaruhi jumlah *Slagging* dan *Fouling* dari proses pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pengujian bentuk morfologi material uji dan nilai kandungan unsur senyawa yang terdapat pada material uji. Berikut terdapat nilai komposisi yang ada pada sampel setelah uji *X-Ray Flourescence*.

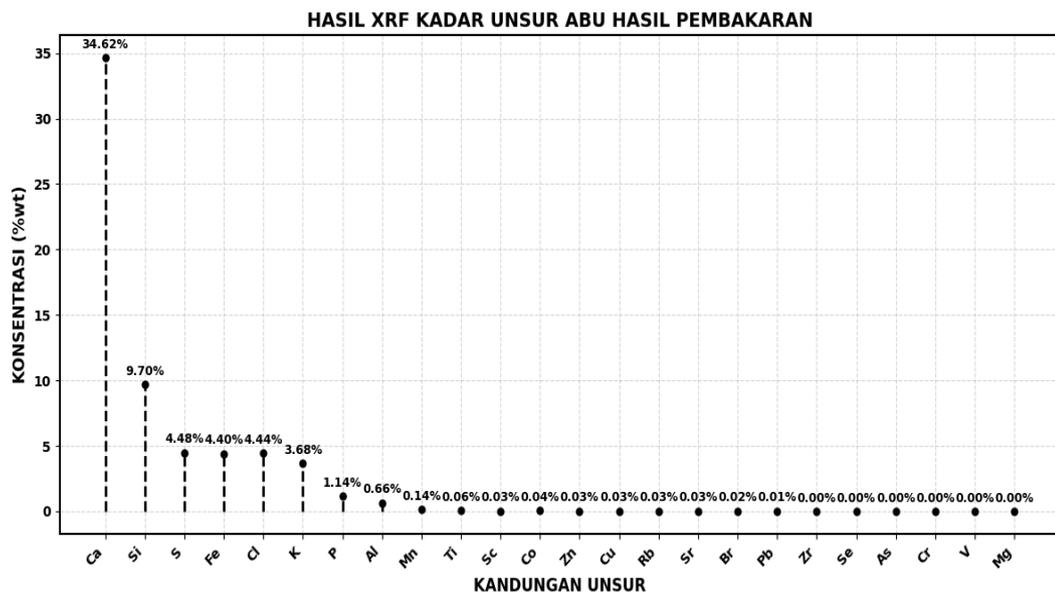


Gambar 4.1 Nilai Komposisi Pembakaran

Berdasarkan hasil uji XRF (*X-Ray Flourescences*), diketahui bahwa abu hasil pembakaran cangkang dan fiber kelapa sawit mengandung berbagai unsur. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk konsentrasi (%wt), sebagaimana disajikan pada Gambar 4.1. Kandungan komposisi abu dengan karakteristik yang mendominasi oleh kandungan senyawa oksida, seperti CaO, SiO₂, SO₃, Fe₂O₃, Cl, K₂O, P₂O₅, Al₂O₃. CaO (Kalsium Oksida) memiliki nilai presentase sebesar 48,44%. Kadar yang tinggi menunjukkan bahwa bahan bakar fiber dan cangkang mengandung banyak kalsium, yang bisa berasal dari mineral alami atau adiktif pembakaran (Bungo, 2021). SiO₂ sebesar 20,76% yang tergolong cukup tinggi dan umum

ditemukan dalam abu biomassa. SiO_2 bersifat oksida asam yang memiliki titik leleh rendah saat bercampur dengan K_2O dan Na_2O membentuk silikat yang lengket sehingga bisa menyebabkan *slagging* di dinding ruang bakar pada boiler (Mlonka-Mędrala et al., 2020). SO_3 (Sulfur Oksida) memiliki nilai presentase 11,20% dalam abu biomassa tergolong tinggi. Menurut penelitian (Vainio et al., 2016) kandungan SO_3 yang tinggi dapat menyebabkan pembentukan asam sulfat (H_2SO_4) pada suhu rendah, yang bersifat korosi dan dapat merusak peralatan boiler. Pada penelitian (Li, 2016) menjelaskan bahwa SO_3 dapat bereaksi dengan logam alkali seperti kalium (K) dan natrium (Na) membentuk senyawa sulfat yang memiliki titik leleh rendah, meningkatkan risiko terjadinya *Slagging* dan *Fouling* pada dinding pipa boiler. Fe_2O_3 (Besi) memiliki nilai presentase 6,29% termasuk aman dan umum ditemukan dalam abu pembakaran biomassa. Menurut (G & Saravanan, 2016) Fe_2O_3 membantu meningkatkan titik leleh abu, yang berarti dapat mengurangi risiko *slagging* jika dibandingkan dengan abu yang dominan unsur alkali (K_2O , Na_2O). Cl (Chlorine) memiliki nilai presentase 4,44% yang tergolong cukup tinggi dalam pembakaran biomassa. Kandungan klorin sebesar ini umumnya tidak diinginkan, karena bisa menimbulkan masalah pada sistem pembakaran pada boiler. Pada penelitian (Shao et al., 2012) menerangkan bahwa senyawa ini mudah mencair dan menempel di permukaan boiler yang menyebabkan terjadinya *Slagging* dan *Fouling*. K_2O (Kalium Oksida) memiliki nilai presentase sebesar 4,43% yang termasuk cukup tinggi untuk abu biomassa. K_2O bereaksi dengan unsur lain seperti SiO_2 dan Cl membentuk senyawa silikat dan klorida yang memiliki titik leleh yang rendah. Ini menyebabkan abu mencair, menempel dipermukaan, dan membentuk kerak padat yang disebut sebagai *Slagging* dan *Fouling* (Mlonka-Mędrala et al., 2020). P_2O_5 (Fosfor Pentoksida) memiliki nilai presentase 2,62% dalam abu biomassa adalah tergolong baik, P_2O_5 tidak bersifat korosif dan tidak mudah membentuk senyawa dengan titik leleh rendah seperti kalium (K) atau natrium (Na). Oleh karena itu, keberadaannya tidak menimbulkan risiko *Slagging* dan *Fouling* yang signifikan pada boiler (Lidman Olsson et al., 2023). Al_2O_3 (Aluminium Oksida) memiliki nilai presentase 1,25% yang termasuk rendah hingga sedang dalam abu biomassa. Secara umum nilai ini tergolong baik dan stabil dalam konteks pembakaran biomassa. Al_2O_3 memiliki titik leleh sangat tinggi (2050°C),

sehingga tidak menyebabkan *Slagging*. Dalam campuran abu Al_2O_3 membantu menstabilkan struktur abu dan meningkatkan titik leleh campuran dalam mencegah kerak (*Slagging*) di dinding pipa boiler (Lidman Olsson et al., 2023). MnO (mangan oksida) hingga MgO (magnesium oksida) memiliki nilai presentase yang sama sebesar 0,18% - 0,00%. Menurut Dari penelitian (Sodikin, 2011) menjelaskan bahwa komposisi abu pada biomassa sebagian besar terdiri dari SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O dan CaO .



Gambar 4.2 Nilai Komposisi Murni

Grafik pada gambar 4.2 menjelaskan komposisi senyawa murni pada sampel abu dari hasil uji XRF (*X-Ray Fluorescence*). Unsur logam seperti kalsium (Ca) 34,62%, silika (Si) 9,70%, sulfur (S) 4,48%, besi (Fe) 4,40%, klorin (Cl) 4,44%, kalium (K) 3,68%, fosforus (P) 1,14%, alumina (Al) 0,66%, mangan (Mn) hingga magnesium (Mg) memiliki presentase yang sama 0,14% - 0,00%. Yang terdeteksi dalam abu hasil pembakaran pada dasarnya sudah terdapat dalam bahan bakar biomassa sebelum proses pembakaran berlangsung. Keberadaan unsur tersebut berasal dari dua sumber utama, yaitu kandungan alami dalam tanaman dan kontaminasi eksternal. Tanaman kelapa sawit, seperti halnya tanaman lain, secara alami menyerap unsur hara dari tanah melalui proses fisiologi selama masa pertumbuhan, sehingga unsur kalsium (Ca), kalium (K), fosforus (P), dan unsur

lainnya terkandung dalam bentuk senyawa organik atau anorganik. Selain itu, partikel tanah, debu mineral, dan pasir yang menempel pada permukaan tandan kosong, fiber, atau cangkang juga dapat menjadi sumber kontaminan anorganik seperti silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃) dan oksida logam lainnya (Demirbas, 2004).

Namun demikian, unsur-unsur tersebut tidak hadir dalam bentuk unsur murni (elemental) sebelum pembakaran. Pembakaran pada suhu tinggi, seperti yang terjadi dalam ruang bakar boiler (>600°C), menyebabkan terjadinya reaksi pirolisis, dekomposisi termal, dan reaksi oksida yang intens. Proses ini merusak struktur kimia senyawa asli, melepaskan komponen volatil seperti karbon dioksida (CO₂), air (H₂O), dan sulfur dioksida (SO₂), serta mengubah unsur logam menjadi bentuk yang lebih stabil, yaitu senyawa oksida (Ummah, 2019). Meskipun analisis XRF (*X-Ray Fluorescence*) mendeteksi unsur dalam bentuk bebas, hal ini tidak berarti unsur tersebut hadir dalam bentuk murni di dalam abu. XRF hanya mengukur keberadaan unsur berdasarkan spektrum energi yang dipancarkan oleh atom setelah dipaparkan sinar-X, tanpa mempertimbangkan bentuk kimianya. Oleh karena itu, unsur seperti Ca yang terdeteksi oleh XRF dalam abu kemungkinan besar sebenarnya berasal dari CaO, yang terbentuk melalui proses pembakaran (Situma et al., 2018).

4.2 Nilai *Slagging* dan *Fouling* Abu Hasil Pembakaran

Untuk mengetahui kecenderungan terjadinya *Slagging* dan *Fouling* dari abu hasil pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit dapat menggunakan persamaan rasio basa/asam, dikarenakan hasil Na₂O mendapatkan hasil yang kecil bahkan tidak terdeteksi dari hasil uji XRF (*X-Ray Fluorescence*) rasio basa/asam dapat digunakan dalam bentuk yang disederhanakan dengan persamaan (Garcia-Maraver et al., 2017).

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

1) Rasio Basa/Asam

$$\frac{B}{A} = \frac{6.29 + 48.44 + 0}{20.76 + 1.25} = 2.48$$

Dari penelitian ini di dapatkan hasil rasio basa/asam sebesar 2,48. Dari tabel 4 menerangkan bahwa nilai rasio basa/asam tergolong tinggi. Menurut (Pronobis, 2005) menjelaskan bahwa rasio basa/asam merupakan salah satu indikator prediktif untuk kecenderungan slagging pada sistem pembakaran biomassa. Rasio lebih dari 0,5 menunjukkan kecenderungan slagging sedang hingga tinggi.

2) Bed aglomerasi index (BAI)

$$BAI = \frac{6.29}{0 + 4.43} = 1.41$$

Dari penelitian ini didapat nilai BAI sebesar 1.41 . Menurut (Vamvuka & Zografos, 2004) aglomerasi index berpotensi terjadi ketika nilai BAI berada dibawah 0.15. maka nilai BAI pada penelitian tergolong baik (Bartels et al., 2008).

3) Fouling Indeks

$$Fu = 2.48 \cdot (0 + 4.43) = 10.98$$

Dari penelitian ini nilai *Fouling Indeks* didapat sebesar 10.98 . Menurut (Lachman et al., 2021) kecenderungan terjadinya *fouling* jika nilai diatas >0.6 tergolong tinggi.

4) Slagging Indeks

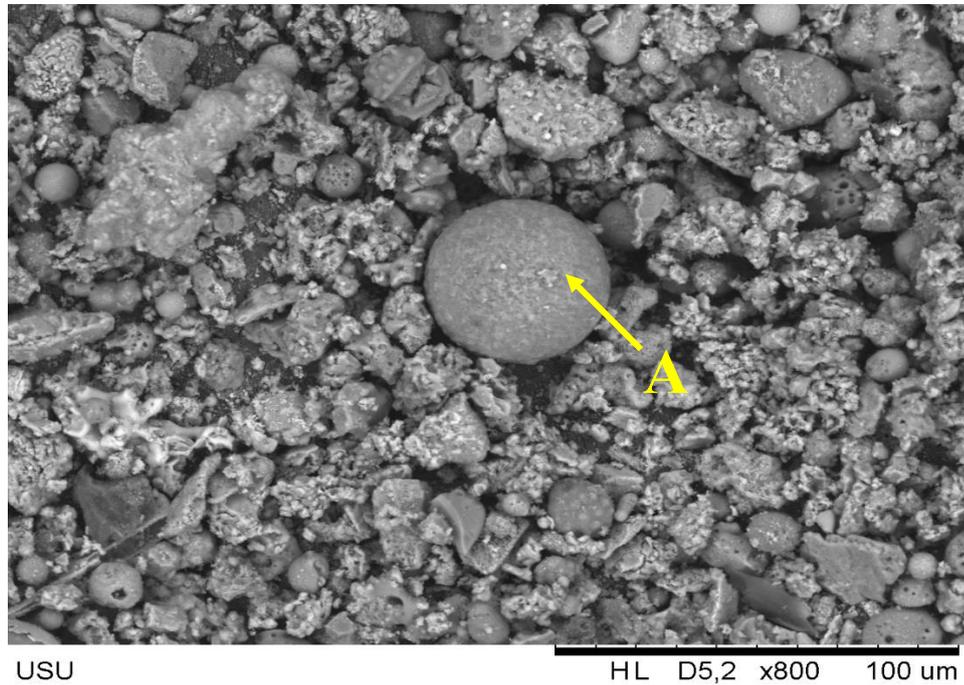
$$Sr = \frac{20.76}{20.76 + 48.44 + 0 + 6.29} \times 100 = 27.50$$

Dari penelitian ini didapatkan nilai *Slagging Indeks* sebesar 27.50 . Menurut penelitian (Lachman et al., 2021) nilai *slagging* 27.50 tergolong tinggi.

$$Sr II = \frac{4.43}{20.76} = 0.21 = 21\%$$

Pada penelitian ini ditentukan suhu tungku sebesar 600 – 650 °C. Maka di dapat nilai AtS sebesar 0.21 . Berdasarkan penelitian (Xing et al., 2016) nilai AtS 0.35 – 0.45 dengan suhu tungku hingga 1100 °C dianggap aman.

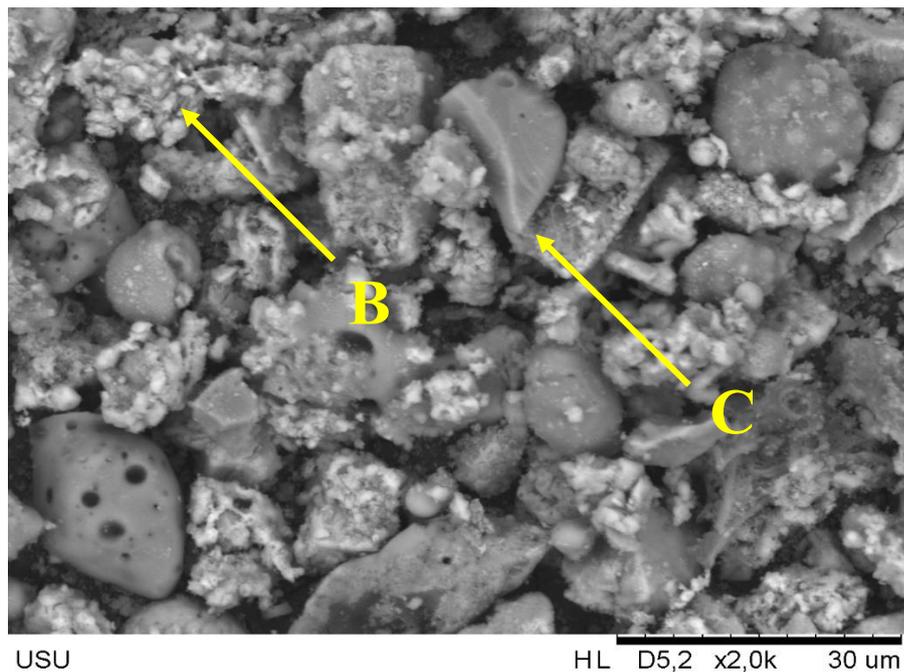
4.3 Morfologi abu hasil pembakaran fiber dan cangkang



Gambar 4.3 Morfologi Uji SEM 100 μm

Gambar diatas merupakan pengamatan morfologi abu hasil pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit menggunakan *Scanning Electron Microscope*. Berdasarkan hasil pengamatan terdapat partikel berbentuk Sferis (Spherical Particles) pada pengamatan diukuran 100 μm . Morfologi ini memiliki ciri permukaan halus dan bulat sempurna seperti yang di tunjukkan pada tanda (A) dihasil pengamatan. Selanjutnya, disisi lain ada partikel yang berbentuk tidak teratur, berpori atau berlubang, menyerupai gumpalan atau agregat, fragmen tajam dan partikel kecil tersebar di seluruh gambar mengisi celah-celah antar partikel besar. Umumnya partikel sferis terbentuk akibat pelelehan parsial mineral seperti silika atau oksida logam selama pembakaran bersuhu tinggi, kemudian membeku membentuk bola saat mendingin. Pada penelitian (Mon Oo et al., 2020) menjelaskan bahwa partikel sferis mikro merupakan hasil volatilisasi dan kondensasi kembali dari senyawa anorganik selama pembakaran biomassa bersuhu tinggi. Menurut (Johansson et al., 2003) bentuk bulat sempurna ini sering dijumpai pada abu pembakaran dari biomassa yang terbakar dalam suhu tinggi. Temuan ini juga diperkuat oleh

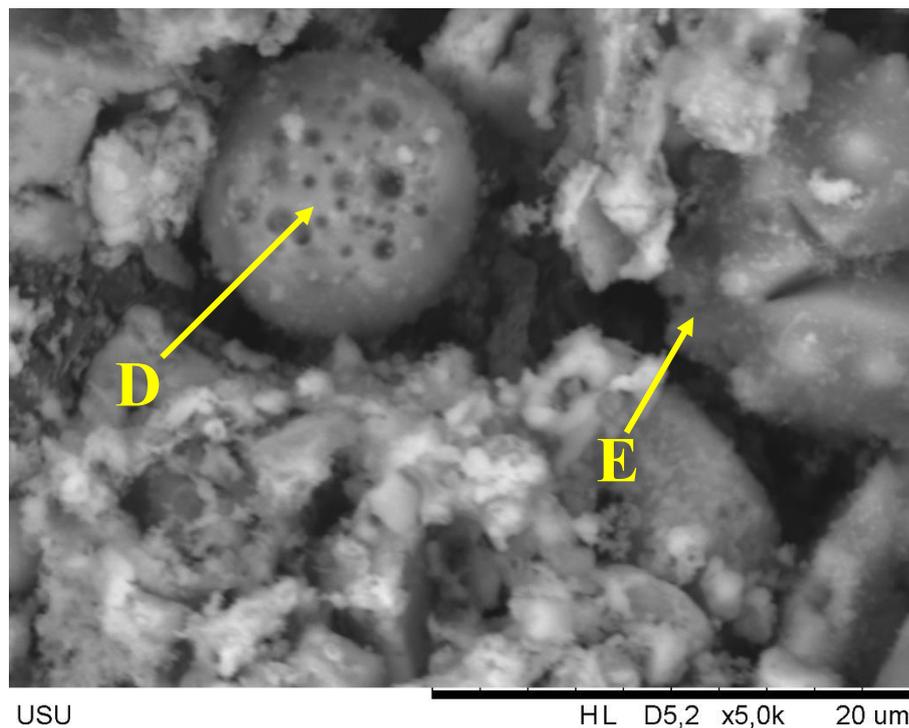
penelitian (Imoisili et al., 2020) yang mengatakan bahwa adanya partikel nano-sferis berukuran 50-98 μm hasil ekstraksi abu biomassa. Struktur ini terbentuk melalui proses fusi dan pendinginan cepat dalam lingkungan reaktif, memperkuat kemungkinan kemunculan partikel bulat di abu hasil pembakaran. Jika partikel ini memiliki jumlah yang signifikan akan berpotensi terjadinya *slagging* dan *fouling* pada permukaan boiler.



Gambar 4.4 Morfologi Uji SEM 30 μm

Hasil pengamatan dilanjutkan dengan ukuran yang lebih kecil sebesar 30 μm untuk mengamati morfologi lain yang berukuran lebih kecil dari pengamatan awal. Pada perbesaran ini diidentifikasi beberapa tipe morfologi utama yaitu partikel dengan bentuk tidak beraturan dan permukaan kasar (B), partikel permukaan halus dengan sudut yang tajam (C). Namun uniknya ada partikel berpori menunjukkan permukaan lubang kecil namun tidak terdeteksi dengan ukuran 30 μm . Partikel dengan bentuk tidak beraturan dan permukaan kasar, yang merupakan hasil dari pembakaran mineral anorganik seperti silika, alumina, dan oksida logam lainnya. Bentuk ini menunjukkan bahwa proses pembakaran tidak sepenuhnya sempurna, menurut (Vamvuka et al., 2008) menjelaskan bahwa bentuk tidak beraturan seperti

ini menunjukkan kestabilan mineral refraktori yang tidak meleleh selama pembakaran. Beberapa partikel memiliki permukaan yang halus namun berbentuk sudut-sudut tajam seperti yang di tunjukkan pada tanda (C), ini berasal dari pecahan kerak (*Slagging*) yang terbentuk pada permukaan boiler akibat pendinginan cepat atau tekanan mekanis, menurut (Kosior-Kazberuk & Józwiak-Niedźwiedzka, 2010) menyatakan bahwa partikel seperti ini sering kali berasal dari permukaan sinter atau kerak abu yang terlepas.



Gambar 4.5 Morfologi Uji SEM 20 μm

Untuk mengamati permukaan porositas dengan ukuran yang kecil pengamatan dilakukan dengan ukuran 20 μm . Berdasarkan pengamatan terlihat jelas bahwa abu memiliki struktur berpori yang di tunjukkan pada tanda (D). Dari penelitian (Shen et al., 2014) mengatakan bahwa struktur berpori ini merupakan hasil dari proses devolatilisasi, yaitu pelepasan gas volatil dari bahan organik selama pembakaran, yang meninggalkan rongga didalam struktur abu. Fenomena ini umum dijumpai pada pembakaran biomassa dengan kandungan volatil yang tinggi seperti bahan bakar biomassa ini. Teramati pula struktur agregat mikroskopis, yaitu kumpulan partikel abu halus yang saling menempel membentuk gumpalan kecil yang

ditunjukkan pada tanda (E). Hal ini menunjukkan adanya proses aglomerasi yang dapat terjadi akibat suhu tinggi atau reaktivitas antar senyawa mineral. Pada penelitian (Kalembkiewicz & Chmielarz, 2012) menyatakan bahwa agregat semacam ini berpotensi menjadi penyebab awal *fouling* dan *slagging* jika terus menempel pada permukaan boiler. Secara keseluruhan, morfologi abu pada ukuran 100 μm , 30 μm , 20 μm menggambarkan karakteristik khas biomassa yaitu memiliki struktur berpori akibat devolatilisasi, partikel tidak beraturan dari mineral refraktori, serta sferis mikro akibat fusi logam alkali. Ciri-ciri ini memberikan gambaran penting terkait potensi pembentukan *slagging* dan *fouling* dalam sistem pembakaran.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian morfologi dan karakteristik abu hasil pembakaran pada lokasi chimney dan ashpit boiler berbahan bakar fiber dan cangkang, ditemukan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Setelah dilakukan hasil uji *X-Ray Fluorescence (XRF)* menunjukkan bahwa abu didominasi oleh senyawa CaO (48,44%), SiO₂ (20,76%), SO₃ (11,20%), Fe₂O₃ (6,29%), Cl (4,44%), dan K₂O (4,43%). Kandungan tinggi CaO dan unsur alkali berkontribusi terhadap potensi terjadinya *slagging* dan *fouling*.
2. Nilai rasio basa/asam sebesar 2,48 , *Slagging Indeks (Sr)* sebesar 27,50 , *Fouling Indeks (Fu)* sebesar 10,98 mengindikasikan potensi *slagging fouling* yang tinggi, sedangkan *Bed Agglomerasi Indeks (BAI)* sebesar 1,41 menunjukkan aglomerasi yang rendah.
3. Hasil pengamatan *Scanning Electron Microscope (SEM)* menunjukkan bentuk partikel Sferis, tidak beraturan dengan permukaan kasar, pecahan kerak dengan sudut tajam dan struktur berpori. Karakteristik ini memperkuat potensi abu untuk menempel pada permukaan boiler.
4. Karakteristik kimia dan morfologi abu dari pembakaran fiber dan cangkang kelapa sawit berpotensi mempercepat pembentukan kerak (*slagging*) dan endapan (*fouling*) pada boiler, sehingga dapat menurunkan peforma boiler, memperpendek umur peralatan.

5.2 Saran

Diperlukan pengembangan lanjutan untuk memanfaatkan abu hasil pembakaran boiler berbahan bakar fiber dan cangkang kelapa sawit sebagai material substitusi mengingat memiliki kadar dan morfologi yang baik sebagai penguat beton dan bata ringan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya, I. A., Haryadi, F. N., & Haryani, I. (2022). Analisis Pengujian Co-Firing Biomassa Cangkang Kelapa Sawit Pada PLTU Circulating Fluidized Bed (CFB) Sebagai Upaya Bauran Energi Terbarukan. *Rotasi*, 24(2), 61–66.
- Andri, S. A., & Arizona, R. (2023). Persentase perbandingan bahan bakar campuran cangkang dan fiber kelapa sawit terhadap unjuk kerja boiler di PKS PTPN V sei galuh. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 18(2), 100–104. <https://doi.org/10.36289/jtmi.v18i2.466>
- Antoni, A., Siregar, Y. I., & Suwondo, S. (2021). Strategi pemanfaatan Palm Oil Mill Effluent (POME) sebagai sumber energi berkelanjutan di pabrik kelapa sawit PT. Meridan Sejati Surya Plantation Kabupaten Siak. *Jurnal Zona*, 4(2), 50–59. <https://doi.org/10.52364/jz.v4i2.18>
- Bartels, M., Lin, W., Nijenhuis, J., Kapteijn, F., & van Ommen, J. R. (2008). Agglomeration in fluidized beds at high temperatures: Mechanisms, detection and prevention. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(5), 633–666. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.04.002>
- Bukit, B. F., Frida, E., Humaidi, S., Sinuhaji, P., & Bukit, N. (2022). *Jurnal Teknik Ekologi Optimalisasi Limbah Biomassa Abu Boiler Kelapa Sawit Sebagai Sumber Silika Dengan Berbagai Metode Preparasi*. 23(8), 193–199.
- Bungo, K. K. (2021). *Sawit, Cangkang Kelapa Sawit, Zeolit 4A, Pembangun Deterjen*. 5(1).
- Cimon, P. L. C., Ramadan, I., & Mamesah, C. M. (2024). *Rancang Bangun Sistem Pengendalian Tekanan Uap Air Pada Tabung Boiler Dengan*. 01(1), 82–92.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(2), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2003.10.004>
- Dewi, R., Djufri, U., & Wijaya, H. (2022). Pemanfaatan Biomassa Padat Kelapa Sawit Sebagai Energi Baru Terbarukan DI PLTU Pabrik Kelapa Sawit PT. Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Bunut. *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)*, 5(1), 17. <https://doi.org/10.33087/jepca.v5i1.71>
- Fadhilla, N., Ekayuliana, A., & Nusyirwan, N. (2020). Analisis Pengaruh

- Terbentuknya Slagging dan Fouling Terhadap Efisiensi Boiler pada Boiler Supercritical. *Jurnal Mekanik Terapan*, 1(1), 9–18. <https://doi.org/10.32722/jmt.v1i1.3326>
- Frastiyono, A., & Arsyad, M. (2020). Pengoperasian Mesin Boiler Tuff. *Program Studi D3 Teknik Elektronika Institut Teknologi Nasional Yogyakarta*.
- G, A. K. M., & Saravanan, V. (2016). *A study on the slagging and fouling propensity of imported coals blended with Indian coal*. 12(3), 591–602.
- Garcia-Maraver, A., Mata-Sanchez, J., Carpio, M., & Perez-Jimenez, J. A. (2017). Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *Journal of the Energy Institute*, 90(2), 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.02.002>
- Hikmawan, O., Naufa, M., & Simarmata, L. H. (2020). Pemanfaatan cangkang dan serat kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler utilization of palm kernel shell and fiber as boiler fuel. *Jurnal Teknik Dan Teknologi*, 18–26.
- Imoisili, P. E., Ukoba, K. O., & Jen, T. C. (2020). Green technology extraction and characterisation of silica nanoparticles from palm kernel shell ash via sol-gel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.10.059>
- Johansson, L. S., Tullin, C., Leckner, B., & Sjövall, P. (2003). Particle emissions from biomass combustion in small combustors. *Biomass and Bioenergy*, 25(4), 435–446. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00036-9)
- Kalembkiewicz, J., & Chmielarz, U. (2012). Ashes from co-combustion of coal and biomass: New industrial wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 69, 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.09.010>
- Kimia, K., Boiler, A., Sawit, K., Geopolimer, K., Yahya, Z., Mustafa, M., Bakri, A. L., Andrei, A., Sandu, V., & Hussin, K. (2013). *Karakterisasi Kimia dan Fisika Abu Boiler dari Kelapa Sawit Limbah Industri untuk Komposit Geopolimer*.
- Konferensi, S., & Bumi, I. O. P. (2019). *Investigasi pengendapan abu pada boiler PF selama Machine Translated by Google Investigasi pengendapan abu di boiler PF selama pembakaran biomassa torrefied*.
- Kosior-Kazberuk, M., & Józwiak-Niedźwiedzka, D. (2010). Influence of fly ash

- form co-combustion of coal and biomass on scalling resistance of concrete. *Archives of Civil Engineering*, 56(3), 239–254. <https://doi.org/10.2478/v.10169-010-0013-x>
- Kurniati, E. (2008). Utilization of Palm Oil Shells as Activated Charcoal. *Jurnal Penelitian Ilmu Teknik*, 8(2), 96–103.
- Lachman, J., Baláš, M., Lisý, M., Lisá, H., Milčák, P., & Elbl, P. (2021). An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels. *Fuel Processing Technology*, 217(March). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106804>
- Li, J. (2016). *Effect of Coal Blending on Ash Fouling and Slagging in Pulverized Coal-Fired Supercritical (SC) and Ultra-Supercritical (USC) Power Plants. September.*
- Lidman Olsson, E. O., Glarborg, P., Dam-Johansen, K., & Wu, H. (2023). Review of Phosphorus Chemistry in the Thermal Conversion of Biomass: Progress and Perspectives. *Energy and Fuels*, 37(10), 6907–6998. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c04048>
- Lusiana, L., Citrawati, F., Martides, E., & Gumilar, G. (2019). Analisis Kegagalan Pipa Boiler Superheater Pada Pabrik Kelapa Sawit. *DINAMIKA : Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 11(1), 26. <https://doi.org/10.33772/djitm.v11i1.9357>
- Miles, T. R., Miles, T. R., Baxter, L. L., Bryers, R. W., Jenkins, B. M., & Oden, L. L. (1996). Boiler deposits from firing biomass fuels. *Biomass and Bioenergy*, 10(2–3), 125–138. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00067-4](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00067-4)
- Mlonka-Mędrala, A., Magdziarz, A., Gajek, M., Nowińska, K., & Nowak, W. (2020). Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour. *Fuel*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116421>
- Mon Oo, H., Karin, P., Masomtob, M., Saisirirat, P., Chollacoop, N., & Hanamura, K. (2020). Characterization of Particulate Matters Emitted From Biomass Combustion Using Electron Microscopy and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy. *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, 8(1), 67–76. <https://doi.org/10.14456/jrame.2020.8>
- Najser, J., Mikeska, M., Peer, V., Frantík, J., & Kielar, J. (2020). The addition of dolomite to the combustion of biomass fuel forms: the study of ashes

- agglomeration and fusibility. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 10(2), 471–481. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00438-w>
- Pronobis, M. (2005). Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. *Biomass and Bioenergy*, 28(4), 375–383. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.11.003>
- Setiawan, Y. (2016). Karakteristik Campuran Cangkang Dan Serabut Buah Kelapa Sawit Terhadap Nilai Kalor Di Propinsi Bangka Belitung. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 1(1), 38–43. <https://doi.org/10.24127/trb.v1i1.85>
- Shao, Y., Wang, J., Preto, F., Zhu, J., & Xu, C. (2012). Ash deposition in biomass combustion or co-firing for power/heat generation. *Energies*, 5(12), 5171–5189. <https://doi.org/10.3390/en5125171>
- Shen, Y., Zhao, P., Shao, Q., Ma, D., Takahashi, F., & Yoshikawa, K. (2014). In-situ catalytic conversion of tar using rice husk char-supported nickel-iron catalysts for biomass pyrolysis/gasification. *Applied Catalysis B: Environmental*, 152–153(1), 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.01.032>
- Situma, Y., Odhiambo, J. O., & Makokha, J. W. (2018). EDXRF Spectroscopic Elemental Analysis for Efficacy of Kibabii University Sewage Treatment System. *OALib*, 05(11), 1–12. <https://doi.org/10.4236/oalib.1104992>
- Sodikin, H. M. (2011). Pengembangan sistem pembakaran co-firing batubara-biomassa. Tugas Akhir. *Coursehero.Com*.
- Ummah, M. S. (2019). The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 1). http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Vainio, E., Kinnunen, H., Laurén, T., Brink, A., Yrjas, P., DeMartini, N., & Hupa, M. (2016). Low-temperature corrosion in co-combustion of biomass and solid recovered fuels. *Fuel*, 184, 957–965. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.03.096>

- Vamvuka, D., & Zografos, D. (2004). Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. *Fuel*, 83(14-15 SPEC. ISS.), 2051–2057. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.04.012>
- Vamvuka, D., Zografos, D., & Alevizos, G. (2008). Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds. *Bioresource Technology*, 99(9), 3534–3544. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.07.049>
- Xing, P., Darvell, L. I., Jones, J. M., Ma, L., Pourkashanian, M., & Williams, A. (2016). Experimental and theoretical methods for evaluating ash properties of pine and El Cerrejon coal used in co-firing. *Fuel*, 183, 39–54. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.036>
- Yani, P. (2021). Pengaruh Campuran Partikel Abu Boiler Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Kuat Tekan Beton. *Einstein*, 9(1), 23. <https://doi.org/10.24114/eins.v9i1.28848>
- Yuliyani, I., Sumitra, I., & Indrayana, M. (2021). Evaluasi Indeks Slagging dan Fouling pada Boiler Batubara Jenis Lignit dan Bituminus. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(3), 299. <https://doi.org/10.32497/jrm.v16i3.2393>

LAMPIRAN 1. SK PEMBIMBING



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

Bila menjawab surat ini, agar disebutkan nomor dan tanggalnya

MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Ppj/PT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003
<https://fatek.umsu.ac.id> fatek@umsu.ac.id [umsumedan](#) [umsumedan](#) [umsumedan](#) [umsumedan](#)

PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUJUKAN DOSEN PEMBIMBING

Nomor : 2115/II.3AU/UMSU-07/F/2024

Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, berdasarkan rekomendasi Atas Nama Ketua Program Studi Teknik Mesin Pada Tanggal 13 November 2024 dengan ini Menetapkan :

Nama : NUR AZIM SYAH
Npm : 2107230072
Program Studi : TEKNIK MESIN
Semester : 7 (Tujuh)
Judul Tugas Akhir : MORFOLOGI DAN KARAKTERISTIK ABU HASIL
PEMBAKARAN PADA LOKASI CHIMNEY DAN ASH PIT
BOILER BERBAHAN BAKAR FIBER DAN CANGKANG .

Pembimbing : IQBAL TANJUNG ST.MT

Dengan demikian diizinkan untuk menulis tugas akhir dengan ketentuan :

1. Bila judul Tugas Akhir kurang sesuai dapat diganti oleh Dosen Pembimbing setelah mendapat persetujuan dari Program Studi Teknik Mesin
2. Menulis Tugas Akhir dinyatakan batal setelah 1 (satu) Tahun dan tanggal yang telah ditetapkan.

Demikian surat penunjukan dosen Pembimbing dan menetapkan Judul Tugas Akhir ini dibuat untuk dapat dilaksanakan sebagaimana mestinya

Medan, 13 Jumadil Awal 1446 H
13 November 2024 M



Munawar Alfansury Siregar, ST.,MT
NIDN: 0101017202



LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Judul : Morfologi dan Karakteristik Abu Hasil Pembakaran Pada Lokasi Chimney dan Ashpit Boiler Berbahan Bakar Fiber dan Cangkang Kelapa Sawit
Nama : Nur Azim Syah
NPM : 2107230072
Dosen Pembimbing : Iqbal Tanjung, S.T., M.T.

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
1	11/08/2025	Tambahkan "Rancangan Alat Penelitian"	f
2	14/08/2025	Lengkapi kesimpulan	f
3	16/08/2025	Rapikan Gambar	f
4	18/08/2025	Rapikan Penulisan	f
5	20/08/2025	Tambahkan Materi	f
6	ACE!!!		f

all section. Lersann Jal

Dosen Pembimbing 15/08/2025

Iqbal

Iqbal Tanjung, S.T., M.T.

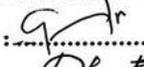
**DAFTAR HADIR SEMINAR
TUGAS AKHIR TEKNIK Mesin
FAKULTAS TEKNIK – UMSU
TAHUN AKADEMIK 2024 – 2025**

Peserta seminar

Nama : Nur Azim Syah

NPM : 2107230072

Judul Tugas Akhir : Morfologi Dan Karakteristik Abu Hasil Pembakaran Pada Lokasi c himney dan Ashpit Boiler Berbahan Bakar Cangkang Dan Fiber Kelapa

DAFTAR HADIR			TANDA TANGAN
Pembimbing – I	: Iqbal Tanjung ST.MT	:
Pembanding – I	: Chandra A Siregar ST.MT	:	
Pembanding – II	: Ahmad Marabdi Siregar ST.MT	:	
No	NPM	Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
1	2107230057	M. Abid Azhan	
2	2107230043	ALFI SYAHRI	
3	2107230029	FATHURAHMAN BAYU K.	
4	2007230168	M. RUVANZA PRADIPTA	
5	2107230028	Mhd. Fahrudi	
6	1007230140	RIAN FAHR/ ARRAHMAL	
7			
8			
9			
10			

Medan 17 Safar 1447 H
11 Agustus 2025 M

Ketua Prodi. T. Mesin



Chandra A Siregar ST.MT

**DAFTAR EVALUASI SEMINAR FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

Nama : Nur Azim Syah
NPM : 2107230072
Judul Tugas Akhir : Morfologi Dan Karakteristik Abu Hasil Pembakaran Pada Lokasi chimney dan Ashpit Boiler Berbahan Bakar Cangkang Dan Fiber Kelapa

Dosen Pembanding – I : Chandra A Siregar ST.MT
Dosen Pembanding – II : Ahmad Marabdi Siregar ST.MT
Dosen Pembimbing – I : Iqbal Tanjung ST .MT

KEPUTUSAN

1. Baik dapat diterima ke sidang sarjana (collogium)
2. Dapat mengikuti sidang sarjana (collogium) setelah selesai melaksanakan perbaikan antara lain :
..... *lengkapi prosedur dengan Skrt.*
.....
.....
3. Harus mengikuti seminar kembali
Perbaikan :
.....
.....
.....

Medan 17 Safar 1447 H
11 Agustus 2025 M

Diketahui :
Ketua Prodi. T. Mesin



Chandra A Siregar ST.MT

Dosen Pembanding- II



Ahmad Marabdi Siregar ST.MT

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



A. DATA PRIBADI

Nama : Nur Azim Syah
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Tempat, Tanggal Lahir : Medan, 22 Desember 2000
Alamat : Jl.Kaptan Muslim Gg.Rapi No.5a
Agama : Islam
E-mail : azimsyah43@gmail.com
No. Handphone : 082361646432

B. RIWAYAT PENDIDIKAN

- | | |
|--|-----------------|
| 1. SD Amanah Deli Serdang | Tahun 2006-2012 |
| 2. SMP Darussalam Medan | Tahun 2012-2015 |
| 3. SMK Sinar Husni 2 TR Labuhan Deli | Tahun 2015-2018 |
| 4. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara | Tahun 2021-2025 |