

Analisis Komposisi Mineral *Bottom Ash* Boiler Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Spektrometer Xrf

Hafiz Rizqa Pratama¹, Mahyunis^{2*}

^{1,2)} Program Studi Teknologi Pengolahan Hasil Perkebunan, Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Sawit Indonesia

Email : mahyunis@itsi.ic.id

ABSTRACT

Boiler Bottom Ash is a solid waste generated from the palm oil processing industry that has not been optimally utilized. In fact, this waste contains various inorganic compounds such as silica, calcium oxide, potassium oxide, and phosphorus pentoxide which have potential in agriculture, construction, and industry. Previous studies have shown that boiler Bottom Ash has a high content of oxidized silica, but its chemical composition analysis is still limited. This study aims to analyze the composition of palm oil mill boiler Bottom Ash using X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometer Test. The research method used is a laboratory experimental method with analysis of the mineral composition of boiler Bottom Ash using X-Ray Fluorescence (EDXRF) Spectrometers. Samples were taken from the combustion of boiler Bottom Ash, then prepared in the form of drying and homogenization before testing. The results showed that boiler Bottom Ash contained 52.43% SiO₂, 19.98% CaO, 9.78% K₂O, and 7.88% P₂O₅. These results demonstrate that boiler Bottom Ash has significant potential as an industrial raw material and soil conditioner. This research is expected to support sustainable waste utilization and the circular economy concept.

Keywords : *Bottom Ash boiler, XRF and Minerals*

PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit di Indonesia merupakan salah satu sektor unggulan yang berperan penting dalam meningkatkan devisa negara serta membuka lapangan pekerjaan[1]. Namun, di balik kontribusi ekonominya yang besar, industri ini juga menghasilkan limbah dalam jumlah signifikan, baik berupa limbah cair, gas, maupun padat. Salah satu limbah padat yang dihasilkan adalah *Bottom Ash* boiler[2]. Abu ini berasal dari proses pembakaran biomassa seperti serat (*fiber*) dan cangkang (*shell*) yang digunakan sebagai bahan bakar dalam boiler untuk menghasilkan energi panas. Selama ini, *Bottom Ash* boiler masih sering dianggap sebagai limbah yang kurang bernilai dan hanya dibuang atau digunakan secara terbatas [3].

Limbah *Bottom Ash* boiler merupakan residu dari proses pembakaran bahan biomassa seperti serat (*fiber*) dan cangkang (*shell*) sawit didalam boiler yang digunakan untuk menghasilkan uap panas di pabrik kelapa sawit[4]. Abu ini sering kali hanya ditumpuk atau dibuang begitu saja di area tertentu, atau dimanfaatkan secara terbatas sebagai material urug atau penetral bau di lokasi penimbunan limbah[5]. Padahal, hasil studi dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa *Bottom Ash* boiler mengandung senyawa-senyawa anorganik seperti silika (SiO₂), kalsium oksida (CaO), Kalium Oksida (K₂O) dan Fosfor Pentoksida (P₂O₅), dan unsur logam lain yang memiliki nilai manfaat tinggi, baik untuk sektor pertanian, konstruksi, maupun industri bahan baku kimia [6].



Gambar 1. Sampel *Bottom Ash* Boiler PKS

Silika, yang merupakan salah satu komponen dominan dalam *Bottom Ash* boiler, memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan tambahan pada industri semen, keramik, pembuatan bata ringan, hingga bahan dasar pupuk silika[7]. Dalam sektor pertanian, misalnya, silika diketahui dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap hama dan cekaman abiotik seperti kekeringan[8]. Di industri konstruksi, silika sering digunakan sebagai bahan pozzolan yang mampu meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton[9]. pada *Bottom Ash* boiler industri kelapa sawit, silika merupakan komponen yang paling dominan jumlahnya[10]. Begitupula pada industri kelapa sawit, pada *Bottom Ash* boiler industri kelapa sawit, silika merupakan komponen yang paling dominan jumlahnya pada cangkang sebesar 61% lalu pada *fiber* kelapa sawit sebesar 59,1%[11]. Uji spektrometer, seperti *X-Ray Fluorescence* (XRF), *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), atau metode lain, misalnya seperti analisis XRD mampu menunjukkan bahwa *Bottom Ash* boiler didominasi oleh mineral silika dalam bentuk kuarsa dan kristobalit, yang ditandai dengan pola difraktogram puncak tajam pada sudut tertentu[12]. Selain itu, uji spektrofotometri dapat digunakan untuk mengukur konsentrasi unsur logam seperti besi, kalsium, dan magnesium secara kuantitatif.[13]

Spektrometer X-Ray Fluorescence adalah instrumen analisis mutakhir yang di rancang khusus untuk menganalisis dan mengidentifikasi jenis unsur sekaligus konsentrasi atau kadar dari berbagai elemen kimia yang terkandung di dalam suatu material, alat ini dikategorikan sebagai alat dengan metode pengujian non destruktif yaitu alat ini mampu membedah kandungan kimia suatu sampel tanpa harus mengubah bentuk fisik, merusak struktur, maupun menghabiskan massa sampel tersebut, sehingga material yang di analisis tetap utuh dan dapat digunakan kembali untuk keperluan yang lain[14]. Alat ini bekerja dengan cara memancarkan radiasi sinar X primer yang berenergi tinggi ke arah sampel, radiasi tersebut memicu atom – atom di dalam sampel tersebut untuk memancarkan kembali radiasi balasan berupa sinar X sekunder atau yang dikenal sebagai sinar X fluoresensi [15]. Spektrometer X-Ray Fluorescence seperti Gambar dibawah ini.



Gambar 2. Alat Spektrometer XRF

Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah (1). Mengidentifikasi unsur utama dalam *Bottom Ash* boiler. (2). Menganalisis komposisi *Bottom Ash* boiler. (3). Menentukan potensi pemanfaatan *Bottom Ash* boiler.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan selama tiga bulan, terhitung dari bulan Januari s.d April 2026 dan dilakukan di Laboratorium terpadu Institut Teknologi Sawit Indonesia. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen laboratorium dengan analisis komposisi mineral *Bottom Ash* boiler menggunakan *Spectrometeres X-Ray Fluorescence* (XRF).

Alat dan Bahan

1. Alat yang digunakan dalam mendukung penelitian ini adalah:
 - a. Spektrometer XRF ini berfungsi sebagai alat uji komposisi *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit.
 - b. Timbangan Analitik mempunyai fungsi yaitu sebagai alat ukur untuk menimbang seberapa berat sampel yang diperlukan untuk di uji.

- c. Mortar dan Pestle berfungsi untuk menggerus dan menghaluskan sampel menjadi serbuk halus agar supaya lebih mudah diproses atau bereaksi.
2. Bahan yang digunakan dalam mendukung penelitian ini adalah *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit sebagai bahan atau sampel yang digunakan dalam proses penelitian ini.

Tahapan Penelitian:

1. Pengambilan Sampel
Tahap awal penelitian dilakukan dengan pengambilan sampel *Bottom Ash* boiler dari pabrik kelapa sawit. Sampel diambil secara representatif dari area pembuangan *Bottom Ash* boiler, Abu berasal dari hasil pembakaran biomassa (*fiber* dan cangkang). Sampel dikumpulkan dalam wadah tertutup untuk menghindari kontaminasi dengan tujuan memperoleh sampel yang mewakili kondisi sebenarnya di lapangan.
2. Preparasi Sampel (Persiapan Awal)
Sampel yang telah diambil dipersiapkan sebelum dianalisis dilakukan dengan penghalusan menggunakan mortar, pengayakan dengan ukuran 100 mesh untuk mendapatkan ukuran yang seragam dan lebih halus, homogenisasi sampel, dengan tujuan Memastikan sampel dalam kondisi homogen dan bebas air agar hasil uji akurat.
3. Pembuatan Pelet (*Pelletizing*)
Dalam metode XRF, sampel dibuat dalam bentuk pelet lalu Sampel ditimbang sebanyak 250 gram, Dipres menggunakan alat press hingga berbentuk pelet padat, dengan tujuan menghasilkan permukaan sampel yang rata dan stabil untuk analisis XRF.
4. Kalibrasi Alat XRF
Sebelum pengujian, alat harus dikalibrasi lalu Menyiapkan standard refence material (SRM), Mengatur parameter alat (tegangan, waktu *scanning*), Melakukan pengecekan akurasi alat, dengan tujuan memastikan hasil pengukuran valid dan sesuai standar.
5. Pengujian Menggunakan XRF
Tahap ini penelitian yaitu analisis komposisi kimia yaitu Meletakkan sampel pada chamber XRF, Menjalankan proses *scanning*, Alat akan mendeteksi unsur berdasarkan energi sinar-X yang dipancarkan. *Output* data unsur kimia dalam bentuk persen (% berat), Spektrum energi tiap unsur, dengan tujuan Mengetahui kandungan unsur seperti SiO₂, CaO, K₂O, dan P₂O₅.
6. Analisis dan Interpretasi Data
Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara ilmiah dengan cara mengidentifikasi unsur dominan yaitu silika, membandingkan dengan literatur penelitian sebelumnya. Menentukan sifat mineral *Bottom Ash* boiler, dengan tujuan memahami karakteristik material *Bottom Ash* boiler dan mengetahui potensi pemanfaatan dari *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit.
7. Evaluasi Potensi Pemanfaatan
Berdasarkan hasil komposisi kimia, dilakukan analisis pemanfaatan untuk Bidang pertanian (pupuk, amelioran tanah), Bidang konstruksi (campuran beton), Bidang industri (bahan baku silika) dengan tujuan Memberikan nilai tambah dari limbah *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit.
8. Penarikan Kesimpulan
Tahap akhir berupa penyusunan kesimpulan berdasarkan hasil penelitian ini menyimpulkan komposisi utama di dalam *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit, menentukan potensi pemanfaatan *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian

Dalam penelitian ini, untuk mengetahui komponen mineral yang ada didalam *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit yaitu menggunakan alat spektrometer XRF dengan berat sampel yang di analisis sebanyak 10 gram.

Tabel 1. Hasil analisis *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit menggunakan spektrometer XRF.

No	Komponen	Persentase (%)
1	SiO ₂	52,43 %

No	Komponen	Persentase (%)
2	CaO	19,98 %
3	K ₂ O	9,78 %
4	P ₂ O ₅	7,88 %

Pembahasan

1. Silika (SiO₂)

Silika merupakan komponen utama dalam *Bottom Ash* boiler dengan kandungan sebesar 52,43%. Tingginya kandungan silika ini disebabkan oleh proses pembakaran biomassa (serat dan cangkang) yang mengandung senyawa silika alami. Kandungan silika yang tinggi menunjukkan bahwa *Bottom Ash* boiler memiliki kualitas yang baik sebagai bahan tambahan industri. Nilai ini juga mendekati hasil penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa *Bottom Ash* boiler dapat mengandung silika sehingga kurang lebih 50%.

2. Kalsium Oksida (CaO)

Kalsium oksida pada *Bottom Ash* boiler ini memiliki kandungan sebesar 19,98% yang termasuk kategori tinggi. Tingginya CaO menunjukkan bahwa *Bottom Ash* boiler dapat berfungsi sebagai amelioran tanah. Selain itu dalam industri konstruksi, CaO berperan dalam proses hidrasi semen.

3. Kalium Oksida (K₂O)

Kandungan K₂O pada *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit ini memiliki kandungan sebesar 9,78% menunjukkan bahwa *Bottom Ash* boiler mengandung unsur kalium dalam jumlah cukup. *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai sumber pupuk kalium alami, terutama untuk tanaman perkebunan kelapa sawit.

4. Fosfor Pentoksida (P₂O₅)

Kandungan P₂O₅ pada *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit yaitu sebesar 7,88% menunjukkan bahwa adanya fosfor yang cukup signifikan. Kandungan fosfor memperkuat potensi *Bottom Ash* boiler sebagai bahan pupuk karena mengandung unsur hara makro penting.

Perbandingan Data Penelitian ini dengan Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian ini karakterisasi unsur kimia pada *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit dilakukan menggunakan pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)[16]. Berdasarkan hasil dari analisis XRF ini, sampel *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit dalam penelitian ini menunjukkan kandungan mineral utama yaitu berupa Silika dioksida (SiO₂) sebesar 52,43%, Kalsium oksida (CaO) sebesar 19,98%, Kalium oksida (K₂O) sebesar 9,78%, dan Fosfor pentoksida (P₂O₅) sebesar 7,88%[17]. Untuk mengevaluasi karakteristik, keunggulan, dan potensi aplikasi dari *Bottom Ash* boiler pabrik kelapa sawit yang di analisis menggunakan spektrometer X-Ray Fluorescence, dilakukan studi komparatif dengan tiga literatur ilmiah sejenis yang juga memanfaatkan limbah padat kelapa sawit. Ketiga penelitian perbandingan tersebut yaitu penelitian oleh Natalia Pangaribuan & Mahyunis (2026), Azira (2023), dan Ananda et al., (2023).[18]

Perbandingan data komposisi unsur dominan hasil analisa spektrometer X-Ray Fluorescence dari keempat studi tersebut dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 2. Perbandingan hasil analisis komposisi unsur dan senyawa berbasis XRF

No	Komposisi Oksida	Jurnal saya :Hafiz & Mahyunis)	Jurnal1:Pangaribuan & Mahyunis (2026)	Jurnal 2:Ayu Azira (2023)	Jurnal3:Ananda et al. (2023)
1	Bahan Baku	Bottom Ash boiler PKS	Cangkang sawit (Tenera)	Bottom Ash cangkang sawit	Tandan kosong kelapa sawit
2	Silika (SiO ₂)	52,43%	43,35%	15,734%	12,12%
3	Kalsium Oksida (CaO)	19,98%	Tidak terdeteksi dominan	71,064%	5,34%
4	Kalium Oksida (K ₂ O)	9,78%	30,27%	Tidak terdeteksi dominan	48,25%
5	Fosfor	7,88%	Tidak terdeteksi	Tidak	3,45%

No	Komposisi Oksida	Jurnal saya :Hafiz & Mahyunis)	Jurnal1:Pangaribuan & Mahyunis (2026)	Jurnal 2:Ayu Azira (2023)	Jurnal3:Ananda et al. (2023)
	Pentoksida (P_2O_5)		dominan	terdeteksi dominan	

Pembahasan Perbandingan Data

Pada perbandingan data penelitian ini dengan penelitian sebelumnya yaitu pengujian menggunakan spektrometer X-Ray Fluorescence (XRF) ditujukan untuk memetakan konsentrasi mineralogi dan senyawa oksida pada sampel Bottom Ash boiler pabrik kelapa sawit secara kuantitatif. Perbedaan yang signifikan pada 4 komponen oksida utama yaitu SiO_2 , CaO , K_2O , P_2O_5 sangat dipengaruhi oleh karakteristik asal jenis bagian tanaman atau biomassa, efisiensi pembakaran stasiun boiler industri, serta perlakuan awal kimia dan fisika yang diterapkan pada masing-masing riset.

1. Silika (SiO_2), Berdasarkan data XRF, penelitian ini menghasilkan kandungan silika (SiO_2) tertinggi di antara material padat kelapa sawit mentah lainnya, yaitu sebesar 52,43%. Nilai ini berdekatan dengan hasil penelitian Jurnal 1 (Pangaribuan & Mahyunis, 2026) yang mengukur kadar silika abu cangkang murni hasil pembakaran pirolisis bersuhu $500^\circ C$ sebesar 43,35%. Tingginya kadar silika pada sampel ini membuktikan bahwa pembakaran suhu tinggi di dalam boiler pabrik kelapa sawit secara alamiah mengonsentrasikan fasa anorganik pozzolanik silika karena fraksi karbon organiknya telah habis menguap. Kondisi ini berbanding terbalik dengan Jurnal 2 (Ayu Azira, 2023) yang menggunakan fasa teraktivasi asam HCl dengan kadar silika 15,734%, serta Jurnal 3 (Ananda et al., 2023) pada material abu tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang hanya memiliki kadar silika sebesar 12,94%. Perbedaan ini menunjukkan bahwa fraksi padat seperti serat serabut atau fiber dan cangkang yang masuk ke boiler pada penelitian ini membawa kandungan silika silikat alami dari tanah jauh lebih pekat dibandingkan fasa tandan kosong kelapa sawit.
2. Kalsium Oksida (CaO), Kandungan kalsium oksida (CaO) pada sampel Bottom Ash boiler pada penelitian ini berada pada angka 19,98%. Angka ini merepresentasikan komposisi standar Bottom Ash industri kelapa sawit mentah yang fungsional. Jika dikomparasikan dengan Jurnal 3 (Ananda et al., 2023), kadar kalsium oksida pada abu tandan kosong sawit murni tercatat sangat rendah, yakni hanya sebesar 5,34%. Namun, deviasi yang sangat ekstrem terlihat saat disandingkan dengan Jurnal 2 (Ayu Azira, 2023), di mana kadar Kalsium Oksida (CaO) mereka melonjak hingga mencapai 71,064%. Fenomena lonjakan pada Jurnal 2 ini dipengaruhi oleh kombinasi efek perlakuan awal berupa pencucian asam kuat (HCl) yang melarutkan senyawa pengotor logam lain secara masif, sehingga saat dilanjutkan dengan proses kalsinasi fisik bersuhu $500^\circ C$ fasa kalsium menjadi fasa mineral tunggal yang menguasai sebagian besar permukaan sampel.
3. Kalium Oksida (K_2O), Kandungan kalium oksida pada penelitian ini tercatat sebesar 9,78%. Senyawa kalium merupakan mineral hara makro utama yang diserap tanaman dari pemupukan intensif perkebunan kelapa sawit. Karakteristik akumulasi kalium ini terlihat sangat dominan pada bagian biomassa lunak atau sisa tandan. Pada Jurnal 1 (Pangaribuan & Mahyunis, 2026), abu cangkang kelapa sawit varietas Tenera mengandung kalium sebesar 30,27%. Sementara itu, akumulasi tertinggi ditemukan pada Jurnal 3 (Ananda et al., 2023) yang meneliti abu Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dengan kadar kalium mencapai 48,25%. Melalui komparasi ini, terlihat jelas bahwa abu dari tandan kosong (TKKS) menyimpan fraksi kalium yang jauh lebih pekat dibandingkan dengan Bottom Ash boiler Anda, membuat abu TKKS lebih optimal difungsikan sebagai fasa pembentuk katalis basa heterogen atau bahan baku pupuk cair.
4. Fosfor Pentoksida (P_2O_5), Fosfor pentoksida (P_2O_5) terdeteksi secara kuantitatif pada sampel Bottom Ash boiler Anda dengan kadar sebesar 7,88%. Unsur fosfor diserap tanaman dari sisa-sisa pemupukan tanah perkebunan kelapa sawit yang melekat pada serat serabut pembentuk bahan bakar boiler pabrik. Poin ini memunculkan kebaruan dan keunikan tersendiri dari riset penelitian ini. Namun, pada Jurnal 3 (Ananda et al., 2023), senyawa Fosfor Pentoksida (P_2O_5) ini muncul dalam jumlah kecil pada abu tandan kosong sawit, yaitu sebesar 3,45%. Fakta ini

mengonfirmasi bahwa Bottom Ash boiler pada penelitian ini mengikat kandungan unsur hara P_2O_5 dua kali lipat lebih tinggi daripada abu tandan kosong kelapa sawit komersial.

Kesimpulan Perbandingan Data

Berdasarkan hasil analisis perbandingan 4 komponen oksida ini yaitu (SiO_2, CaO, K_2O, P_2O_5) antara penelitian Anda dengan tiga jurnal pembanding, dapat disimpulkan bahwa:

1. Keunggulan Akumulasi Fasa Silika AlamI pada Bottom Ash boiler pabrik kelapa sawit pada penelitian ini terbukti memiliki keunggulan konsentrasi silika (SiO_2) sebesar 52,43% yang paling tinggi, mengungguli abu cangkang pirolisis yaitu sebesar 43,35%), Bottom Ash teraktivasi asam (15,734%), maupun abu tandan kosong sawit (12,94%). Hal ini menempatkan material Anda sebagai bahan pozzolanik instan yang sangat potensial untuk industri konstruksi tanpa memerlukan tahapan sintesis kimia yang rumit.
2. Ketergantungan Kadar Kalsium Terhadap Modifikasi yang dimana kandungan CaO pada Bottom Ash boiler pabrik kelapa sawit pada penelitian ini sebesar 19,98% tergolong ideal untuk limbah boiler komersial, di mana potensinya berada jauh di atas abu tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yaitu sebesar 5,34%, namun persentase ini masih bisa dimurnikan lebih lanjut hingga mencapai fasa murni 71,064% jika diberi perlakuan aktivasi asam kuat seperti pada draf riset Ayu Azira.
3. Potensi Agronomi Berbasis Unsur Hara Makro, pada penelitian ini hasil komparasi senyawa Kalium Oksida (CaO) sebesar 9,78% dan Fosfor Pentoksida sebesar 7,88% yang terukur signifikan pada penelitian ini menegaskan bahwa Bottom Ash boiler pada penelitian ini masih mempertahankan karakteristik hara mineral kelapa sawit asli. Meskipun konsentrasi kaliumnya tidak setinggi abu cangkang 30,27% atau abu tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebesar 48,25%, sinergi kadar Fosfor Pentoksida (P_2O_5) yang tinggi yaitu sebesar 7,88% dari pada abu tandan kosong kelapa sawit sebesar 3,45, memberikan nilai tambah bagi Bottom Ash boiler pabrik kelapa sawit pada penelitian ini untuk diaplikasikan secara fungsional sebagai material pembenah tanah perkebunan guna mengembalikan kesuburan makro tanah kelapa sawit.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium menggunakan Spektrometer *X-Ray Fluorescence*, dapat disimpulkan bahwa Bottom Ash boiler pabrik kelapa sawit didominasi oleh senyawa silika dioksida (SiO_2) dengan kadar yang cukup tinggi yaitu sebesar 52,43%. Selain silika yang menjadi komponen utama di Bottom Ash boiler pabrik kelapa sawit, limbah padat ini juga mengandung unsur penting lainnya yaitu seperti kalsium oksida (CaO) sebanyak 19,98%, kalium oksida (K_2O) sebesar 9,78%, serta fosfor pentoksida (P_2O_5) senilai 7,88%. Tingginya konsentrasi unsur-unsur tersebut mengindikasikan bahwa residu pembakaran biomassa ini menyimpan prospek pemanfaatan yang sangat luas yaitu mulai dari bahan baku sekunder untuk sektor manufaktur, pengisi material konstruksi, hingga sebagai agen pembenah nutrisi tanah di bidang agrikultur. Melalui analisis komparatif, terbukti pula bahwa karakteristik kimiawi abu sawit ini memiliki nilai tambah yang lebih fleksibel dan kaya unsur hara organik esensial jika dibandingkan dengan abu batu bara biasa. Dengan demikian, optimalisasi pemanfaatan Bottom Ash boiler pabrik kelapa sawit ini tidak hanya mengurangi timbunan limbah operasional secara signifikan, tetapi juga menjadi langkah konkret dalam mengadopsi konsep ekonomi sirkular demi mewujudkan industri perkebunan kelapa sawit yang berkelanjutan.

SARAN

Untuk pengembangan riset kedepan, disarankan agar cakupan pengambilan sampel diperluas dengan mengambil bahan uji dari beberapa pabrik kelapa sawit yang berbeda guna memperoleh variasi data yang lebih representatif dan komprehensif. Disamping itu, pengujian lanjutan mengenai kandungan logam berat di dalam material abu ini sangat mendesak untuk dilakukan demi memastikan regulasi keamanan lingkungan sebelum diaplikasikan secara massal. Terakhir, untuk saran penelitian berikutnya diharap berfokus pada eksperimen aplikasi langsung di lapangan, baik untuk menguji efektivitasnya terhadap peningkatan kualitas pertumbuhan tanaman di sektor

pertanian maupun stabilitas mekanisnya saat dicampur kedalam formulasi beton pada bidang konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Haryanti N, Marsono A. Strategi Implementasi Pengembangan Perkebunan Kelapa Sawit Di Era Industri 4 . 0 2021;08:76–87.
- [2] Febriyanti F, Fadila N, Sanjaya AS, Bindar Y. PEMANFAATAN LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT MENJADI BIO-CHAR , BIO-OIL DAN GAS DENGAN UTILIZATION OF EMPTY FRUIT BUNCHES WASTE INTO BIO-CHAR , BIO-OIL AND GASES WITH PYROLYSIS METHOD 2019;03.
- [3] Satriawisti G, Parung J. KEBERLANJUTAN INDUSTRI KELAPA SAWIT : LITERATURE REVIEW 2024;19:122–35.
- [4] Nurjanah RF, Mahbub M, Ifansyah H. Pengaruh Pemberian Kombinasi Limbah Decanter Solid dan Abu Boiler Kelapa Sawit terhadap Perubahan Beberapa Sifat Kimia Tanah Ultisol 2025;2:75–85. <https://doi.org/10.20527/actasolum.v3i2.2883>.
- [5] Agribisnis J, Sawit K, Teknologi P, Industri K, Medan K. SAWIT UNTUK BAHAN CAMPURAN MATERIAL POLIMER 2023;2:32–7.
- [6] Siswanto JE. Analisis Limbah Kelapa Sawit Sebagai Bahan Bakar Boiler dengan Menggunakan Variasi Campuran Antara Fiber dan Cangkang Buah Sawit 2020;3:22–7. <https://doi.org/10.33087/jepca.v3i1.35>.
- [7] Munizar R. Inventa : Journal of Science , Technology , and Innovation Kajian Awal Pemanfaatan Limbah Abu Boiler Kelapa Sawit Sebagai Material Konstruksi Non-Struktural 2025;1.
- [8] Limbah P, Perkebunan P, Sawit K, Provisi DI. Wahana Forestra : Jurnal Kehutanan Wahana Forestra : Jurnal Kehutanan 2020;15. <https://doi.org/10.31849/forestra.v15i2.4696>.
- [9] Penambahan D, Tandan S, Kelapa K. Jurnal Teknologi Kimia Unimal 2022;1:76–90.
- [10] Meidinariasty A, Purnamasari I, Zamhari M. TERHADAP SIFAT FISIS SILIKA GEL HASIL SINTESIS EFFECT OF VARIATIONS BOILER ASH AND CONCENTRATION OF HCl TO THE PHYSICAL PROPERTIES OF SILICA GEL SYNTHESIZED 2020;11:28–33.
- [11] Andrian R, Ningrum RL, Mardiah M. Pembuatan Silika Dari Abu Boiler Kelapa Sawit Sebagai Material Katoda Udara Pada Baterai Logam Udara. J Chemurg 2020;4:24. <https://doi.org/10.30872/cmg.v4i2.4493>.
- [12] Meidinariasty A, Purnamasari I, Zamhari M, Permadi J, Zaky Fadillah N, Luthfiah S, et al. PENGARUH VARIASI JENIS ABU BOILER DAN KOSENTRASI HCl TERHADAP SIFAT FISIS SILIKA GEL HASIL SINTESIS EFFECT OF VARIATIONS BOILER ASH AND CONCENTRATION OF HCl TO THE PHYSICAL PROPERTIES OF SILICA GEL SYNTHESIZED. J Kinet 2020;11:28–33.
- [13] Gunawan HC, Mungok CD, Lestyowati Y. Pemanfaatan Abu Boiler Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Beton. JeLAST J PWK, Laut, Sipil, Tambang 2018;5:1–9.
- [14] Tri I, Sasongko Z. Pengaruh Abu Boiler dan Pupuk TSP Terhadap Pertumbuhan Serta Produksi Tanaman Kacang Hijau (*Vigna Radiata* L.). J Agroteknologi Agribisnis Dan Akuakultur 2023;3:146–60.
- [15] Alimah SNUR. Tugas akhir analisis performa spektrofotometer 2019.
- [16] Azira A. ADSORPSI ZAT WARNA REMAZOL BRILLIANT BLUE MENGGUNAKAN BOTTOM ASH CANGKANG SAWIT TERAKTIVASI HCl. 2023.
- [17] Ananda R. DP, Komariah LN, Putri NP, Arita S. Potensi dan karakteristik abu tandan kosong kelapa sawit sebagai katalis heterogen untuk produksi biodiesel. J Tek Kim 2023;29:36–45. <https://doi.org/10.36706/jtk.v29i1.1551>.
- [18] Jurnal IRA, Mesin T, Pangaribuan N. Analisis Unsur Abu Cangkang Kelapa Sawit Hasil Pirolisis Menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) Elemental Analysis of Palm Kernel Shell Ash from Pyrolysis Using X-Ray Fluorescence (XRF) 2026;5:205–12.