

Evaluation of the Implementation of Environmental, Social, and Governance (ESG) Standards in the Management and Utilization of FABA Waste in the National Energy Industry

[Evaluasi Penerapan Standar Environmental, Social, Governance ESG (ESG) dalam Pengelolaan dan Pemanfaatan Limbah FABA pada Industri Energi Nasional]

Abubakar Hamada¹⁾, Rita Ambarwati Sukmono²⁾

¹⁾ Program Studi Magister Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

²⁾ Program Studi Magister Manajemen, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

*Email Penulis Korespondensi: ritaambarwati@umsida.ac.id

Abstract. The surge in national electricity consumption has significantly increased the volume of coal combustion waste, particularly Fly Ash and Bottom Ash (FABA), posing serious environmental risks if not managed sustainably. Although the regulatory status of FABA has shifted from hazardous (B3) to non-hazardous waste through Government Regulation No. 22 of 2021, its external utilization remains remarkably low. This condition underscores the urgency to design strategic approaches that transcend technical solutions and embed holistic sustainability principles, notably through the Environmental, Social, and Governance (ESG) framework. This study aims to analyze the key ESG-related factors that influence external demand for FABA utilization, identify both opportunities and constraints faced by stakeholders, and formulate a sustainable management strategy applicable and replicable across power generation facilities. Employing a mixed-method approach, the study combines quantitative analysis through Exploratory Factor Analysis (EFA) involving 115 respondents, and qualitative exploration via in-depth interviews with representatives from the power plant and local government. The findings reveal two dominant factors: Infrastructure and Support for FABA Utilization, and Promotion and Regulation of FABA. Additionally, five major challenges are identified: economic constraints, infrastructure gaps, regulatory barriers, weak socialization, and lack of multi-stakeholder synergy. The originality of this research lies in the systematic integration of ESG principles into the formulation of a circular economy strategy for FABA waste management, offering an inclusive, adaptive, and practical model for the national energy sector.

Keywords: Environmental Social Governance; Fly Ash Bottom Ash; Waste Management; Circular Economy; Power Plant.

Abstrak. Peningkatan konsumsi listrik nasional telah memicu pertumbuhan volume limbah pembakaran batu bara, khususnya Fly Ash dan Bottom Ash (FABA), yang menimbulkan risiko lingkungan serius apabila tidak dikelola secara berkelanjutan. Meskipun status FABA telah berubah dari limbah B3 menjadi non-B3 melalui PP No. 22 Tahun 2021, pemanfaatan eksternalnya masih sangat rendah. Hal ini menunjukkan adanya urgensi untuk merancang pendekatan strategis yang tidak hanya berfokus pada aspek teknis, tetapi juga mencakup prinsip keberlanjutan secara holistik, salah satunya melalui kerangka Environmental, Social, and Governance (ESG). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor-faktor utama dalam dimensi ESG yang memengaruhi tingkat permintaan eksternal terhadap pemanfaatan FABA, mengidentifikasi peluang dan kendala yang dihadapi pemangku kepentingan, serta merumuskan strategi pengelolaan berkelanjutan yang dapat diimplementasikan dan direplikasi di pembangkit lain. Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed-method, dengan analisis kuantitatif menggunakan Exploratory Factor Analysis (EFA) terhadap 115 responden, serta pendekatan kualitatif melalui wawancara mendalam dengan perwakilan PLTU dan pemerintah desa. Hasil penelitian mengidentifikasi dua faktor dominan, yaitu Infrastruktur dan Dukungan Pemanfaatan FABA serta Promosi dan Regulasi FABA. Selain itu, ditemukan lima tantangan utama yang mencakup hambatan ekonomi, kesenjangan infrastruktur, kendala regulatif, lemahnya sosialisasi, dan minimnya sinergi multipihak. Originalitas penelitian ini terletak pada integrasi sistematis prinsip ESG dalam formulasi strategi ekonomi sirkular untuk pengelolaan limbah FABA yang inklusif, adaptif, dan aplikatif bagi sektor energi nasional.

Kata Kunci: Environmental Social Governance; Fly Ash Bottom Ash; Manajemen Limbah; Ekonomi Sirkular; Pembangkit Listrik

I. PENDAHULUAN

Permintaan listrik nasional yang terus meningkat memaksa pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan bakar batubara beroperasi pada kapasitas tinggi. Konsekuensinya, residu pembakaran berupa fly ash dan bottom ash (FABA)

bertambah drastis, menembus lebih dari sebelas juta ton per tahun [1]. Meskipun status FABA telah diturunkan dari limbah B3 menjadi non-B3 melalui PP No. 22/2021, realitas di lapangan menunjukkan limbah ini masih diperlakukan sebagai buangan tanpa nilai ekonomi [2]. Di PLTU Asam-Asam, sepanjang 2024 tercatat 104 805 ton FABA dihasilkan, namun hanya 553 ton sekitar setengah persen yang dimanfaatkan di luar lokasi (Tabel 1). Sisanya menumpuk di lahan penimbunan, memicu kekhawatiran akan pencemaran udara, tanah, dan air serta mencerminkan belum optimalnya penerapan ekonomi sirkular di sektor energi [3]. Persoalan FABA bukan sekadar akumulasi volume limbah, melainkan kegagalan mengintegrasikan dimensi Environmental, Social, dan Governance (ESG) dalam rantai pengelolaan. Berdasarkan sudut pandang Environmental, FABA memiliki potensi besar sebagai substitusi semen dalam beton, penstabil tanah, dan bahan baku geopolymers, semuanya berkontribusi menekan emisi karbon dan mengurangi eksploitasi sumber daya alam [4][5]. Namun, peluang ini terkendala keterbatasan teknologi ekstraksi logam tanah jarang, ketiadaan standar kualitas produk turunan, dan lemahnya sistem pemantauan dampak lingkungan [6]. Pada dimensi Social, pemanfaatan FABA seharusnya membuka peluang bisnis bagi usaha kecil-menengah di sektor material bangunan dan industri kreatif, sekaligus meningkatkan literasi masyarakat tentang pengelolaan limbah berkelanjutan [7]. Rendahnya tingkat pengetahuan publik, minimnya program pelatihan teknis, serta persepsi negatif terhadap limbah menghambat partisipasi komunitas dalam rantai nilai FABA [8]. Aspek Governance tidak kalah krusial dimana perubahan regulasi belum diikuti mekanisme insentif, panduan teknis, dan skema perizinan yang jelas serta mudah diakses. Transparansi rantai pasok FABA masih terbatas, sementara forum kolaborasi multipihak yang menghubungkan pemerintah, industri, akademisi, dan masyarakat belum terbangun kokoh [9]. Ketidaksinkronan kebijakan ini menyebabkan inisiatif pemanfaatan FABA berjalan parsial dan sporadis, sehingga perlu evaluasi mendalam terhadap implementasi prinsip ESG pengelolaan FABA dan juga merumuskan strategi terpadu yang menjadikan FABA sebagai aset bernilai bukan sekadar limbah.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi secara mendalam faktor-faktor utama dalam dimensi Environmental, Social, dan Governance (ESG) yang berperan signifikan dalam memengaruhi tingkat permintaan eksternal terhadap pemanfaatan limbah Fly Ash and Bottom Ash (FABA) di PLTU Asam-Asam. Dengan menggunakan pendekatan yang terintegrasi, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi berbagai peluang yang dapat dimanfaatkan serta kendala-kendala yang dihadapi oleh para pemangku kepentingan, baik dari sektor pemerintah, pelaku industri, hingga masyarakat lokal, dalam proses pengelolaan dan pemanfaatan FABA secara berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini diarahkan untuk merumuskan strategi terpadu berbasis prinsip-prinsip ESG yang paling efektif dalam meningkatkan tingkat pemanfaatan eksternal FABA, dengan harapan bahwa strategi tersebut tidak hanya dapat diimplementasikan di PLTU Asam-Asam, tetapi juga dapat direplikasi di pembangkit listrik lainnya sebagai model praktik terbaik (best practice) dalam pengelolaan limbah industri berbasis keberlanjutan.

Table 1. FABA Utilization Data at PLTU Asam Asam

Month	Internal Utilization (Ton)	Internal Utilization (Ton)
January	5127	0
February	3544,4	0
March	1987,04	0
April	13089,04	0
May	15885,03	0
June	2483,78	0
July	11904,35	0
August	33720	0
September	13875	0
October	1500	0
November	830,69	285,74
December	858,91	268,07

Total	104805,2481	553,81
-------	-------------	--------

Pendekatan pemecahan masalah penelitian ini menekankan pentingnya penerapan prinsip Environmental, Social, and Governance (ESG) secara terpadu dalam manajemen limbah industri, terutama pada sektor energi nasional. Dari perspektif lingkungan, penerapan prinsip zero waste menjadi dasar utama dalam meminimalkan limbah industri dan memperluas praktik ekonomi sirkular. Konsep ini berfokus pada pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang limbah secara sistemik [10]. Penerapan strategi ini memberikan peluang besar pengelolaan FABA untuk substitusi bahan konstruksi, serta meminimalisasi emisi karbon dan eksploitasi sumber daya alam [11]. Namun, tantangan struktural dan regulatif di negara berkembang masih menjadi hambatan utama [12]. Dari aspek sosial, pendekatan ESG menekankan pentingnya peningkatan kesadaran masyarakat melalui pendidikan dan pelibatan komunitas dalam praktik manajemen limbah yang berkelanjutan [13]. Kesadaran dan partisipasi masyarakat merupakan kunci sukses dalam transisi menuju ekonomi sirkular, terutama bila didukung oleh persepsi positif stakeholder [14]. Aspek tata kelola menuntut strategi pengelolaan limbah yang berbasis risiko dan terintegrasi untuk menjaga kesinambungan usaha dan memenuhi aspek keberlanjutan [15]. Strategi pengelolaan yang dikembangkan dalam kerangka manajemen limbah harus bersifat dinamis dan berbasis data, mencakup evaluasi stakeholder [16]. Pada negara berkembang seperti Indonesia, gap dalam manajemen limbah mencakup aspek kelembagaan, pendanaan, dan perilaku masyarakat [17]. Integrasi teknologi informasi dalam sistem manajemen limbah mampu meningkatkan efisiensi, transparansi, dan akuntabilitas [18]. Selain itu, aspek pengendalian risiko terhadap sumber daya manusia juga menjadi bagian tak terpisahkan dari penerapan ESG, pengelolaan risiko sumber daya manusia secara umum menjadi bagian penting dalam menjaga kelangsungan operasional perusahaan, meningkatkan produktivitas dan mendukung implementasi tata kelola perusahaan yang berkelanjutan [19].

Studi-studi sebelumnya menyoroti pentingnya pengelolaan energi regional yang berkelanjutan guna memperkuat ketahanan energi nasional [20]. Pada level material, beragam penelitian telah mengkaji karakteristik fisik-kimia FABA dan mendemonstrasikan potensi pemanfaatannya di sektor konstruksi, pertanian, hingga industri berteknologi tinggi [21][22]. Meski demikian, pengalaman negara berkembang seperti Ethiopia menunjukkan bahwa tantangan regulasi, lemahnya infrastruktur, dan rendahnya partisipasi publik masih menjadi penghambat utama penerapan praktik pengelolaan limbah yang efektif [17]. Perkembangan terkini di ranah teknologi menawarkan berbagai inovasi, antara lain pembuatan geopolimer berbasis abu terbang dan silika panas bumi [23], peningkatan kekuatan mekanis beton dengan campuran FABA [24], serta sintesis zeolit dari FABA untuk aplikasi industri berkelanjutan [25]. Selain aspek teknis, kajian mengenai kelayakan ekonomi dan dimensi keberlanjutan juga semakin mendapat perhatian untuk memastikan rantai daur ulang FABA dapat bersaing secara komersial [26]. Mayoritas penelitian sebelumnya masih berfokus pada satu dimensi baik lingkungan, sosial, maupun ekonomi, tanpa melihat keterkaitan ketiganya secara terintegrasi. Belum ada kajian yang secara komprehensif memasukkan kerangka Environmental, Social, and Governance (ESG) sebagai landasan strategis dalam pemanfaatan eksternal FABA, khususnya pada konteks PLTU di Indonesia, sehingga kebaruan penelitian ini adalah (Tabel 2):

- a. mengintegrasikan ketiga dimensi ESG ke dalam model pengelolaan FABA;
- b. menyelaraskan inovasi teknis dengan kebutuhan sosial-ekonomi lokal; dan
- c. menyediakan rekomendasi kebijakan yang bersifat aplikatif serta dapat direplikasi di pembangkit lain.

Table 2. Previous Studies and the Determination of Research Position

Researcher	Model Classification	Parameter	Objective
Marinina et al. [4]	Stakeholder Circular Economy Model	Stakeholder involvement, economic efficiency of FABA recycling	To analyze economic efficiency and stakeholder conflict in FABA recycling projects
Awasthi et al. [7]	Conceptual Zero Waste Model	Waste generation, recycling potential, pollution risk	To promote sustainable waste management systems using the zero-waste approach
Bazrbachi et al. [9]	Smart Waste Management Model	Household intensity, source waste separation	To evaluate measurement models

van Langen et al. [14]	Multi-Stakeholder Perception Model	Perception, awareness, stakeholder groups	for smart waste management systems To assess awareness and views on the circular economy transition
Zorpas [16]	Integrated Strategy Model	Regional evaluation, EIA, SWOT, LCA, EMAS	To develop waste management strategies based on the circular economy
Teshome [17]	Integrated Stakeholder Model	Technical, social, institutional, financial	To evaluate waste management systems and formulate collaborative improvements
Kurniawan et al. [18]	Digitalization & Circular Economy Model	Digitalization, industry 4.0, reuse, 3R	To analyze solid waste management transformation in China through digitalization
Alterary & Marei [21]	Material Characterization Model	FA composition, UC, metal oxide, characterization techniques	To review the properties, characterization, and applications of FA across sectors
This Research Position	Integrated ESG Strategic Model	ESG dimensions: environmental, social, governance, participation, risk	To formulate strategies for the external utilization of FABA using an ESG-based approach

RUMUSAN MASALAH:

1. Apa saja faktor utama dalam dimensi *Environmental, Social, and Governance (ESG)* yang memengaruhi tingkat permintaan eksternal terhadap pemanfaatan limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) di PLTU Asam-Asam?
2. Apa saja peluang dan kendala yang dihadapi para pemangku kepentingan (pemerintah, industri, masyarakat) dalam pengelolaan dan pemanfaatan limbah FABA secara berkelanjutan?
3. Bagaimana merumuskan strategi pengelolaan dan pemanfaatan FABA yang terintegrasi dan berbasis ESG agar dapat diimplementasikan dan direplikasi di pembangkit listrik lainnya?

TUJUAN PENELITIAN:

1. Menganalisis faktor-faktor utama dalam dimensi *Environmental, Social, and Governance (ESG)* yang berpengaruh terhadap tingkat permintaan eksternal terhadap pemanfaatan limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) di PLTU Asam-Asam.
2. Mengidentifikasi berbagai peluang dan kendala yang dihadapi para pemangku kepentingan termasuk pemerintah, pelaku industri, dan masyarakat lokal dalam proses pengelolaan dan pemanfaatan FABA secara berkelanjutan.
3. Merumuskan strategi pengelolaan FABA yang terintegrasi dan berbasis prinsip ESG, sehingga dapat diimplementasikan secara efektif di PLTU Asam-Asam serta direplikasi di pembangkit listrik lainnya sebagai model praktik terbaik pengelolaan limbah industri yang berkelanjutan.

KATEGORI SDGS: Penelitian ini masuk ke dalam kategori Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) nomor 12, yaitu *Responsible Consumption and Production* (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi penerapan prinsip Environmental, Social, dan Governance (ESG) dalam pengelolaan dan pemanfaatan limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) yang dihasilkan oleh PLTU berbahan bakar batubara. Dengan mengusung pendekatan ekonomi sirkular dan integrasi multipihak, penelitian ini mendorong pemanfaatan limbah industri menjadi sumber daya bernilai guna yang dapat digunakan kembali secara produktif, sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Upaya ini sejalan dengan target SDGs 12 untuk meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi produksi limbah melalui pencegahan, daur ulang, dan penggunaan kembali, serta mendorong pola produksi dan konsumsi yang berkelanjutan di sektor energi nasional.

II. LITERATURE REVIEW

Environmental, Social, and Governance (ESG)

ESG merupakan kerangka kerja strategis yang digunakan untuk menilai keberlanjutan dan dampak etis dari suatu organisasi berdasarkan tiga dimensi utama:

- Environmental berfokus pada dampak aktivitas terhadap lingkungan hidup, termasuk pengelolaan limbah, efisiensi energi, emisi karbon, dan konservasi sumber daya alam.
- Social mencakup aspek hubungan organisasi dengan masyarakat, pekerja, dan pemangku kepentingan lainnya, termasuk isu keadilan sosial, pemberdayaan komunitas, dan kesehatan serta keselamatan kerja.
- Governance menekankan tata kelola yang baik, transparansi, akuntabilitas, dan kepatuhan terhadap regulasi.

Dalam konteks penelitian ini, ESG digunakan sebagai fondasi untuk merancang strategi pemanfaatan limbah FABA yang berkelanjutan dan inklusif di sektor energi nasional.

Fly Ash dan Bottom Ash (FABA)

FABA adalah residu hasil pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), terdiri dari:

- Fly Ash: partikel halus yang terbawa bersama gas buang dan ditangkap melalui sistem elektrostatik atau filter.
- Bottom Ash: partikel kasar yang tertinggal di dasar tungku pembakaran.

Meskipun semula dikategorikan sebagai limbah B3, FABA kini digolongkan sebagai limbah non-B3 berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021, dan memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bangunan, stabilisasi tanah, dan bahan baku geopolimer.

Pengelolaan Limbah Industri

Merujuk pada seluruh proses sistematis dalam menangani limbah hasil aktivitas industri, mulai dari pengumpulan, penyimpanan, pemrosesan, hingga pemanfaatan kembali atau pembuangan akhir, dengan tujuan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Dalam penelitian ini, pengelolaan limbah FABA diarahkan untuk mendukung prinsip *zero waste* dan ekonomi sirkular melalui strategi berbasis ESG.

Ekonomi Sirkular

Ekonomi sirkular adalah model ekonomi yang bertujuan untuk mempertahankan nilai produk, material, dan sumber daya selama mungkin dalam siklus ekonomi, sekaligus meminimalkan produksi limbah. Dalam konteks FABA, ekonomi sirkular diwujudkan melalui pemanfaatan limbah sebagai bahan baku substitusi dalam industri lain, sehingga menciptakan nilai tambah dan mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam baru.

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah mixed-method, yaitu pendekatan metodologis yang menggabungkan metode kuantitatif dan kualitatif secara terintegrasi untuk menjawab tujuan penelitian secara komprehensif. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran mendalam dan menyeluruh terhadap permasalahan yang kompleks, seperti evaluasi penerapan standar ESG dalam pengelolaan limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) pada industri energi, khususnya di PLTU Asam-Asam. Prosedur penelitian dilakukan dengan tiga tahapan (Gambar 2).

Tahap Pertama, penelitian diawali dengan pendekatan kuantitatif untuk mengidentifikasi dan menganalisis faktor-faktor yang secara signifikan memengaruhi permintaan eksternal terhadap pemanfaatan FABA. Faktor-faktor ini mencakup partisipasi masyarakat, ketersediaan sumber daya, kesadaran masyarakat, ketersediaan pasar, komitmen politik, serta kebijakan dan regulasi (Tabel 3). Pemilihan faktor tersebut didasarkan pada studi literatur yang komprehensif terhadap penelitian terdahulu dan diadaptasi sesuai konteks lokal di sekitar PLTU Asam-Asam. Kuesioner ini menggunakan skala Likert (1-5) guna mendapatkan persepsi responden secara jelas dan terukur. Populasi dalam penelitian ini meliputi stakeholder utama seperti masyarakat sekitar PLTU, pelaku usaha lokal khususnya UMKM yang berpotensi menggunakan FABA, dan karyawan PLTU Asam-Asam yang bertanggung jawab dalam pengelolaan limbah.

Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling, yang memungkinkan peneliti untuk memilih responden secara spesifik berdasarkan kriteria tertentu, seperti tingkat pengetahuan responden tentang pemanfaatan FABA dan keterlibatan langsung dengan limbah tersebut. Target sampel minimal adalah sebanyak 150 responden guna memastikan data yang diperoleh memiliki reliabilitas dan validitas yang tinggi. Analisis data kuantitatif dilakukan dengan menggunakan Exploratory Factor Analysis (EFA), metode statistik multivariat yang bertujuan untuk mereduksi data dan mengidentifikasi hubungan antara variabel yang diamati dalam bentuk beberapa faktor dominan. Langkah pertama dalam analisis EFA ini adalah melakukan uji validitas dan reliabilitas instrumen penelitian. Uji validitas instrument dilakukan dengan menggunakan Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Measure of Sampling Adequacy yang bertujuan untuk mengukur kecukupan sampel yang tersedia dan tingkat korelasi antar variabel. Nilai KMO yang dianggap memadai untuk melanjutkan proses EFA adalah minimal 0,5, dengan nilai di atas 0,7 dianggap baik hingga sangat baik. Selain itu, dilakukan uji Bartlett's Test of Sphericity yang berfungsi menguji hipotesis bahwa matriks korelasi antar variabel tidak bersifat identitas, yang menandakan bahwa data cukup berkorelasi satu sama lain dan layak untuk dianalisis lebih lanjut melalui EFA. Nilai signifikansi Bartlett's Test harus di bawah 0,05 agar proses analisis dapat dilanjutkan.

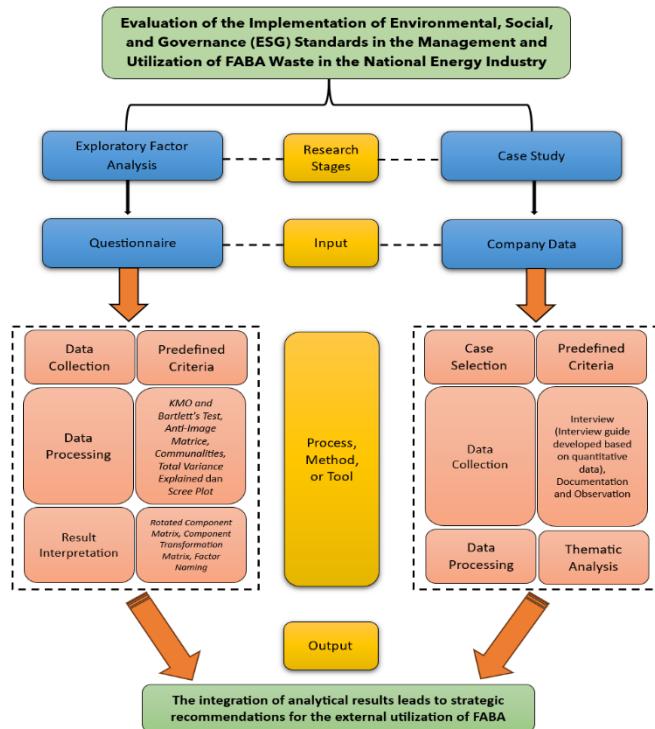
Data dinyatakan layak berdasarkan hasil KMO dan Bartlett's Test, tahap berikutnya adalah ekstraksi faktor menggunakan metode Principal Component Analysis (PCA). Metode ini merupakan teknik ekstraksi faktor yang paling sering digunakan dalam EFA karena kemampuannya untuk mengidentifikasi faktor-faktor utama yang mampu menjelaskan sebagian besar varians yang ada dalam data penelitian. Dalam tahap ekstraksi ini, penentuan jumlah faktor dilakukan dengan menggunakan kriteria eigenvalue, di mana faktor-faktor yang memiliki nilai eigenvalue di atas 1 dianggap signifikan dan layak untuk dipertahankan dalam analisis lanjutan. Langkah berikutnya adalah melakukan rotasi faktor untuk mendapatkan interpretasi yang lebih jelas terhadap faktor-faktor yang dihasilkan dengan metode rotasi Varimax, yang bertujuan untuk menyederhanakan struktur faktor sehingga setiap variabel memiliki pembebatan yang tinggi pada satu faktor saja.

Hasil rotasi Varimax disajikan dalam bentuk matriks faktor yang menunjukkan nilai factor loading masing-masing variabel terhadap faktor-faktor yang terbentuk. Variabel yang memiliki nilai loading di atas 0,4 umumnya dianggap memiliki kontribusi signifikan dalam faktor tersebut. Setelah faktor-faktor terbentuk melalui proses ekstraksi dan rotasi, dilakukan interpretasi faktor berdasarkan pembebatan (loading factor) yang signifikan, teori-teori terkait, serta konteks praktis dari penelitian ini. Interpretasi ini penting untuk memberikan makna konseptual terhadap faktor-faktor yang dihasilkan, sehingga dapat digunakan dalam merumuskan rekomendasi strategis dalam pengelolaan Limbah FABA berbasis ESG.

Tahap kedua penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif untuk menggali secara mendalam peluang dan kendala yang dihadapi dalam pengelolaan dan pemanfaatan FABA di PLTU Asam-Asam. Data kualitatif dikumpulkan melalui wawancara mendalam secara semi-terstruktur dengan narasumber kunci yang terdiri dari pemerintah lokal dalam hal ini Pemerintah Desa, serta manajemen PLTU Asam-Asam khususnya Team Leader Lingkungan yang menangani Pengelolaan limbah. Panduan wawancara disusun secara sistematis berdasarkan indikator-indikator yang digunakan dalam instrument kuantitatif guna menjaga konsistensi dan integrasi hasil penelitian. Wawancara mendalam ini bertujuan untuk mengeksplorasi lebih dalam mengenai persepsi, pengalaman, pandangan, serta rekomendasi dari stakeholder terkait praktik pengelolaan FABA. Data kualitatif ini kemudian dianalisis dengan menggunakan analisis tematik, yaitu teknik analisis yang bertujuan mengidentifikasi pola-pola penting dalam data kualitatif yang diperoleh dari wawancara. Analisis ini dilakukan melalui proses coding secara manual dengan mengelompokkan data ke dalam tema-tema tertentu yang relevan dengan tujuan penelitian. Proses

ini melibatkan tahapan yang sistematis mulai dari familiarisasi data, identifikasi awal kode, pencarian tema utama, hingga definisi dan penamaan tema secara rinci.

Tahap Ketiga adalah integrasi kedua hasil analisis tersebut. Proses integrasi ini bertujuan untuk merumuskan strategi holistik dan rekomendasi aplikatif yang mencakup dimensi ESG untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan dan pemanfaatan limbah FABA. Integrasi ini akan menghasilkan rekomendasi strategis berupa model kebijakan berbasis prinsip ekonomi sirkular yang mampu diimplementasikan secara nyata oleh stakeholder terkait. Hasil integrasi ini didiskusikan kembali dengan para stakeholder untuk memperoleh validasi akhir dan meningkatkan relevansi hasil rekomendasi. Koordinasi yang erat dengan stakeholder, termasuk masyarakat lokal, pelaku usaha, pemerintah lokal, serta manajemen PLTU Asam-Asam dilakukan untuk memastikan hasil penelitian yang diperoleh memiliki relevansi tinggi terhadap konteks lokal dan dapat diterapkan secara nyata.



Gambar 1. Research Stages

Hasil penelitian yang diharapkan dari studi ini adalah tersusunnya evaluasi komprehensif terhadap penerapan standar Environmental, Social, dan Governance (ESG) dalam pengelolaan dan pemanfaatan limbah FABA pada industri energi nasional, sehingga menjadi strategi pemanfaatan FABA secara eksternal yang efektif digunakan oleh Industri Energi Nasional khususnya pembangkit listrik tenaga uap selaku penghasil FABA. Penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi secara sistematis faktor-faktor penghambat dan pendukung dari masing-masing dimensi ESG serta menghasilkan langkah-langkah strategis yang aplikatif bagi para pemangku kepentingan. Dalam dimensi Environmental, diharapkan muncul rekomendasi pengelolaan limbah yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga berorientasi pada pemanfaatan eksternal yang produktif. Pada aspek Social, hasil yang diharapkan mencakup peningkatan keterlibatan masyarakat dan pelaku industri lokal dalam rantai nilai FABA. Sedangkan pada aspek Governance, ditargetkan adanya formulasi kebijakan yang mendorong sinergi lintas sektor dan insentif bagi pemanfaatan FABA secara eksternal.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL PENELITIAN

Profil responden dalam penelitian ini memberikan wawasan mendalam mengenai karakteristik demografis yang berperan dalam pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) di PLTU Asam-Asam. Dari total 115 responden,

majoritas merupakan laki-laki (96,5%), dengan jumlah 111 orang, sementara jumlah perempuan hanya 4 orang (3,5%). Dari segi usia, distribusi responden cukup bervariasi dengan rata-rata usia 30,56 tahun dan rentang usia 18 hingga 54 tahun. Keberagaman usia ini menunjukkan bahwa partisipasi dalam pemanfaatan FABA mencakup individu dari berbagai kelompok umur.

Table 3. Validity Results

Indicator	Pearson Correlation	R-Tabel	Description
I1	0,726	0,3610	Valid
I2	0,667		Valid
I3	0,655		Valid
I4	0,892		Valid
I5	0,772		Valid
I6	0,860		Valid
I7	0,793		Valid
I8	0,764		Valid
I9	0,882		Valid
I10	0,831		Valid
I11	0,783		Valid
I12	0,849		Valid
I13	0,722		Valid
I14	0,507		Valid
I15	0,746		Valid
I16	0,548		Valid
I17	0,746		Valid
I18	0,603		Valid

Source: Authors

Dalam penelitian kuantitatif, validitas dan reliabilitas merupakan dua aspek krusial dalam memastikan kualitas dan keandalan instrumen pengukuran. Validitas mengacu pada sejauh mana instrumen mampu mengukur apa yang seharusnya diukur. sementara reliabilitas mengukur konsistensi hasil ketika instrumen digunakan dalam kondisi yang serupa. Validitas instrumen diuji menggunakan teknik korelasi Pearson (Pearson Product-Moment Correlation), yang mengukur kekuatan hubungan antara setiap indikator dengan total skor konstruknya. Berdasarkan perhitungan, jumlah responden dalam penelitian ini adalah 29 orang, sehingga derajat kebebasan (degrees of freedom, df) dalam uji korelasi adalah $df = n - 2 = 29 - 2 = 27$. Dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, nilai r-tabel yang digunakan sebagai acuan adalah 0,3673, sebagaimana diperoleh dari tabel distribusi statistik Pearson. Hasil uji validitas menunjukkan bahwa semua indikator, yakni I1 hingga I18, memiliki nilai Pearson Correlation lebih besar dari 0,3673. Selain itu, setiap indikator memiliki nilai signifikansi (Sig. 2-tailed) $< 0,05$, yang berarti bahwa korelasi antara setiap indikator dengan total skor adalah signifikan secara statistik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa semua indikator yang digunakan dalam instrumen penelitian ini adalah valid, karena telah memenuhi kriteria signifikansi dan memiliki korelasi yang cukup kuat terhadap total skor variabel yang diukur.

Setelah validitas instrumen dikonfirmasi, langkah berikutnya adalah menguji reliabilitasnya. Reliabilitas diuji menggunakan Cronbach's Alpha, yaitu suatu metode yang umum digunakan untuk mengukur konsistensi internal suatu skala. Nilai Cronbach's Alpha berkisar antara 0 hingga 1, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan reliabilitas yang lebih baik. Instrumen dapat dikategorikan sebagai cukup reliabel jika Cronbach's Alpha berada dalam rentang 0,6 – 0,7, reliabel jika dalam rentang 0,7 – 0,8, dan sangat reliabel jika melebihi 0,8. Dalam penelitian ini, uji reliabilitas menghasilkan nilai Cronbach's Alpha sebesar 0,951, yang menunjukkan bahwa instrumen memiliki reliabilitas yang sangat tinggi. Nilai ini mengindikasikan bahwa instrumen penelitian memiliki konsistensi internal yang sangat baik, sehingga setiap indikator yang digunakan mampu mengukur konstruk secara stabil dan konsisten.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa instrumen yang digunakan valid dan reliabel, sehingga dapat digunakan untuk mengumpulkan data dalam penelitian ini dengan tingkat kepercayaan yang tinggi. Temuan

ini mendukung pentingnya uji validitas dan reliabilitas dalam memastikan kualitas instrumen penelitian, terutama dalam studi yang melibatkan pengukuran aspek-aspek psikologis dan perilaku.

Analisis terhadap hasil uji KMO dan Bartlett's Test menunjukkan bahwa data dalam penelitian ini layak untuk dilakukan analisis faktor. Kriteria pengujian awal mengacu pada dua parameter utama, yaitu nilai Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy (KMO MSA) yang harus lebih besar dari 0,50 dan signifikansi dari Bartlett's Test of Sphericity yang harus kurang dari atau sama dengan 0,05. Kriteria ini bertujuan untuk memastikan bahwa korelasi antar variabel dalam data mencukupi untuk diekstraksi ke dalam struktur faktor yang valid. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai KMO MSA adalah sebesar 0,940, jauh melampaui ambang batas minimum 0,50. Hal ini mengindikasikan bahwa sampel dalam penelitian ini sangat memadai untuk dilakukan eksplorasi lebih lanjut melalui teknik analisis faktor. KMO sebesar ini umumnya dikategorikan dalam klasifikasi "sangat baik" menurut standar statistik multivariat. Selain itu, nilai Bartlett's Test of Sphericity diperoleh sebesar 1306,367 dengan tingkat signifikansi sebesar 0,01 yang lebih kecil dari 0,05. Hal ini berarti bahwa matriks korelasi antar variabel tidak identik, sehingga terdapat korelasi yang cukup kuat di antara variabel-variabel yang dianalisis. Dengan demikian, data yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi asumsi multivariate normality dan dapat dilanjutkan ke tahap analisis faktor berikutnya.

Table 4. Anti-Image Matrices Table

Indicator	Anti-Image Correlation	Reference Value	Description
	Value		
I1	0,903	0,50	MSA
I2	0,933		Satisfied
I3	0,956		
I4	0,956		
I5	0,945		
I6	0,923		
I7	0,934		
I8	0,959		
I9	0,949		
I10	0,934		
I11	0,923		
I12	0,903		
I13	0,940		
I14	0,946		
I15	0,950		
I16	0,967		
I17	0,948		
I18	0,934		

Source: Authors

Analisis terhadap hasil uji Anti-Image Correlation dalam kerangka Exploratory Factor Analysis (EFA) menunjukkan bahwa seluruh indikator dalam instrumen penelitian ini telah memenuhi syarat kecukupan sampel (Measure of Sampling Adequacy/MSA). Secara teoritis, indikator dianggap layak untuk dimasukkan dalam analisis lebih lanjut apabila nilai Anti-Image Correlation-nya melebihi ambang batas 0,50. Kriteria ini digunakan untuk memastikan bahwa setiap variabel memiliki kontribusi yang memadai terhadap struktur faktor yang akan dibentuk. Berdasarkan hasil perhitungan, diketahui bahwa semua nilai MSA dari masing-masing indikator berada di atas nilai ambang batas 0,50. Temuan ini memberikan dasar yang kuat bahwa semua indikator tersebut secara statistik layak untuk dianalisis lebih lanjut dalam proses ekstraksi faktor. Dengan demikian, tidak ada satupun indikator yang perlu dieliminasi pada tahap ini, dan keseluruhan variabel dapat dilibatkan dalam pembentukan konstruk yang valid dan reliabel.

Table 5. Communalities Table

Indicator	Initial	Extraction
I1	1	0,545
I2	1	0,528
I3	1	0,447
I4	1	0,713
I5	1	0,588
I6	1	0,562
I7	1	0,648
I8	1	0,638
I9	1	0,649
I10	1	0,663
I11	1	0,570
I12	1	0,765
I13	1	0,618
I14	1	0,528
I15	1	0,673
I16	1	0,439
I17	1	0,638
I18	1	0,567

Source: Authors

Dalam proses analisis faktor eksploratori, salah satu tahap penting adalah mengevaluasi nilai communalities dari masing-masing indikator. Kriteria yang digunakan untuk menilai kelayakan indikator pada tahap ini adalah nilai extraction communalities, di mana setiap indikator dianggap memenuhi syarat apabila nilai extraction-nya lebih besar dari 0,50. Nilai ini menunjukkan proporsi varians dari masing-masing variabel yang dapat dijelaskan oleh faktor yang terbentuk dalam model. Berdasarkan hasil perhitungan, dari total 18 indikator yang dianalisis, terdapat dua indikator yang memiliki nilai extraction di bawah ambang batas 0,50, yaitu indikator I3 dan I16. Dengan demikian, kedua indikator ini dianggap tidak cukup merepresentasikan konstruk laten yang sedang dikaji dan oleh karena itu dikeluarkan dari tahap analisis lanjutan. Sementara itu, 16 indikator lainnya telah menunjukkan nilai extraction yang memadai dan dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya dalam analisis faktor. Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar indikator dalam penelitian ini memiliki kontribusi yang signifikan dalam menjelaskan struktur faktor yang terbentuk.

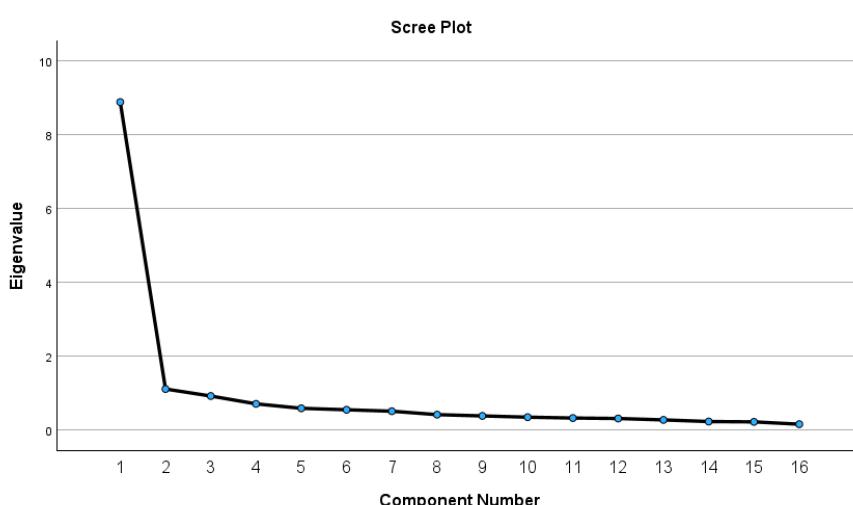


Figure 2. Scree Plot

Analisis terhadap hasil eksplorasi varians menunjukkan bahwa terdapat dua faktor utama yang berhasil terbentuk dari 16 indikator yang dianalisis. Faktor pertama memiliki nilai eigen sebesar 8,890 dan berkontribusi secara signifikan dalam menjelaskan 55,561% variasi yang terdapat dalam keseluruhan data. Ini menandakan bahwa lebih dari separuh informasi yang terkandung dalam indikator-indikator tersebut dapat direpresentasikan oleh satu faktor utama saja. Sementara itu, faktor kedua menunjukkan nilai eigen sebesar 1,115 yang turut menjelaskan tambahan variasi sebesar 6,967%. Secara kumulatif, kedua faktor ini mampu menjelaskan total 62,529% variasi data, suatu nilai yang dianggap sangat memadai dalam analisis faktor karena telah melampaui ambang batas minimal interpretabilitas model. Keberadaan dua faktor ini juga diperkuat oleh pola visual yang ditampilkan dalam grafik scree plot, yaitu grafik yang menggambarkan hubungan antara nilai eigen dengan jumlah faktor yang diekstraksi. Dalam grafik tersebut, terlihat bahwa titik "scree" yakni titik di mana kemiringan grafik mulai mendatar terjadi tepat setelah dua faktor pertama. Hal ini menunjukkan bahwa dua faktor tersebut merupakan jumlah optimal dalam struktur data, dan faktor-faktor berikutnya tidak memberikan kontribusi variasi yang signifikan.

Table 6. Rotated Component

Indikator	Component 1	Component 2
r	0,808	
I14	0,776	
I17	0,732	
I1	0,730	
I5	0,724	
I9	0,697	
I8	0,678	
I2	0,676	
I15	0,664	
I18	0,652	
I10	0,625	
I17	0,614	
I12		0,827
I13		0,738
I11		0,722
I6		0,700

Source: Authors

Analisis terhadap Rotated Component Matrix dalam penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi struktur faktor dari 16 indikator yang telah lolos tahap validitas dan reliabilitas. Kriteria yang digunakan dalam proses ini adalah nilai factor loading, di mana setiap variabel dinyatakan signifikan apabila memiliki nilai loading lebih besar dari 0,55 dan mengelompok pada satu komponen tertentu. Nilai ini menunjukkan kekuatan hubungan antara indikator dengan faktor yang terbentuk. Berdasarkan hasil rotasi, diketahui bahwa terdapat dua komponen utama yang terbentuk. Komponen pertama terdiri dari 12 indikator memiliki nilai factor loading di atas 0,55 dan mengelompok secara konsisten dalam satu dimensi. Hal ini menunjukkan bahwa ke-12 indikator tersebut memiliki korelasi yang kuat dan membentuk satu faktor yang utuh, yang kemudian dapat diinterpretasikan sebagai Faktor 1. Sementara itu, komponen kedua terdiri dari 4 indikator lainnya menunjukkan nilai factor loading di atas 0,55 dan membentuk kelompok tersendiri dalam Component 2. Konsistensi pengelompokan ini mengindikasikan bahwa keempat indikator tersebut merepresentasikan konstruk yang berbeda dari kelompok pertama, dan dengan demikian membentuk Faktor 2. Temuan ini memperkuat validitas struktural dari alat ukur yang digunakan, karena setiap indikator berhasil mengkonvergensi ke dalam faktor yang sesuai.

Setelah terbentuk faktor yang masing-masing beranggotakan indikator yang diteliti, maka dilakukan penamaan faktor berdasarkan karakteristik yang sesuai dengan anggotanya.

Table 7. Exploratory Factor Analysis Results

Faktor	Indikator
1	I4, I7, I1, I5, I9, I8, I2, I15, I18, I10, I17, I14
2	I12, I13, I11, I6

Source: Authors

Faktor pertama mencerminkan dimensi struktural dan institusional yang mendukung keberhasilan pemanfaatan FABA secara menyeluruh. Indikator-indikator yang termasuk dalam faktor ini menyoroti pentingnya keberadaan infrastruktur yang memadai sebagai fondasi awal dalam menunjang distribusi dan penggunaan FABA. Selain itu, tingkat pemahaman masyarakat mengenai manfaat FABA sebagai bahan konstruksi berkontribusi langsung pada penerimaan dan penggunaan material ini di tingkat lokal. Potensi masyarakat dalam berpartisipasi aktif, kesiapan teknologi yang dimiliki industri kecil, serta program edukasi dan kampanye informasi turut memperkuat kesadaran kolektif mengenai pentingnya pemanfaatan FABA. Dukungan lain yang teridentifikasi adalah forum kolaboratif sebagai ruang inovasi, ketersediaan panduan implementasi yang terstruktur, keberadaan pasar lokal yang siap menyerap produk FABA, kemudahan dalam proses perizinan, serta sinergi antara pemerintah, dunia usaha, dan komunitas lokal yang secara bersama-sama menciptakan ekosistem pemanfaatan yang kondusif dan berkelanjutan. Sementara itu, faktor kedua menitikberatkan pada aspek promosi, regulasi, dan penguatan hubungan antaraktor dalam rantai nilai FABA. Indikator yang tergabung dalam faktor ini meliputi strategi promosi dan pemasaran FABA yang efektif untuk memperluas penerimaan pasar. Komitmen dari pihak pemerintah maupun PLTU dalam mendukung implementasi regulasi FABA menjadi penopang penting bagi kelangsungan inisiatif ini. Selain itu, tingkat koneksi antara PLTU sebagai produsen dengan sektor industri pengguna juga menjadi elemen vital, yang apabila diperkuat akan mempercepat proses pemanfaatan. Terakhir, pelatihan teknis yang ditujukan bagi pelaku UMKM menjadi jembatan penting dalam mentransfer keterampilan praktis dan memperluas kapasitas produksi masyarakat dalam mengelola limbah FABA menjadi produk yang bernilai ekonomi.

Analisis data kualitatif dalam penelitian ini menggunakan pendekatan case study, tujuan dari pendekatan ini adalah untuk membangun tema dan konsep berdasarkan data lapangan secara induktif. Analisis dilakukan melalui tiga tahap utama yaitu open coding, axial coding dan selective coding. Wawancara dilakukan dengan dua narasumber strategis yaitu Pahrinnor perwakilan manajemen PLTU Asam-Asam dan Zainal Arifin Sekretaris Desa Pandansari. Wawancara dilakukan secara semi-terstruktur dan dianalisis menggunakan teknik koding manual. Setiap transkrip ditelaah secara mendalam untuk mengekstrak "ide pokok" dan "kata kunci" yang kemudian dikembangkan dalam proses open coding. Hasil open coding kemudian dimasukkan ke tahap axial coding dan selective coding untuk merumuskan konseptualisasi, kategorisasi, dan tematisasi dari hasil wawancara. Open coding merupakan proses awal dalam analisis kualitatif yang dilakukan dengan membaca secara teliti seluruh transkrip wawancara dari dua informan utama yang memiliki peran strategis dalam konteks pengelolaan dan pemanfaatan FABA. Tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan memisahkan setiap segmen data yang mengandung makna penting ke dalam unit-unit informasi dasar. Unit-unit makna tersebut diinterpretasikan sebagai representasi langsung dari pengalaman, persepsi, dan pemikiran informan mengenai realitas di lapangan. Proses ini tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga interpretatif, di mana peneliti berperan aktif dalam menyusun potongan informasi menjadi kategori-kategori awal yang mencerminkan isu tematik yang muncul secara berulang. Dari seluruh analisis, diperoleh empat belas kategori utama yang menjadi fondasi awal dalam penyusunan kategori konseptual pada tahap berikutnya. Dari hasil open coding, unit-unit makna yang memiliki kesamaan substansi dan menunjukkan kecenderungan tematik yang serupa kemudian dikonsolidasikan dalam tahap axial coding. Proses ini dilakukan untuk menyusun pola hubungan yang lebih bermakna antara unit data, yang kemudian disusun menjadi kategori konseptual yang lebih luas dan terstruktur. Axial coding memungkinkan peneliti mengidentifikasi keterkaitan antara kondisi kausal, konteks, intervensi, strategi, serta konsekuensi dari fenomena yang dikaji. Melalui proses ini, data yang bersifat fragmentaris diorganisasikan ke dalam sepuluh kategori tematik yang mengandung makna konseptual lebih dalam. Kategori tersebut kemudian digunakan untuk memahami dinamika yang lebih kompleks dalam konteks pemanfaatan FABA, yang selanjutnya mengarah pada tahap integrasi data dalam selective coding. Axial coding kemudian disusun kembali dalam struktur tematik yang lebih luas dan sistematis yang mencerminkan fokus utama dalam penelitian ini. Proses ini menghasilkan lima elemen pokok yang mewakili kerangka pemahaman atas berbagai aspek penting dalam

pengelolaan dan pemanfaatan FABA, yakni dukungan ekonomi, infrastruktur, regulasi dan perizinan, sosialisasi, serta kolaborasi multipihak. Masing-masing elemen ini berperan sebagai pilar analitis untuk memahami dinamika sistem yang terlibat. Dari kelima elemen tersebut, dukungan ekonomi diidentifikasi sebagai area yang paling krusial dan mendesak, karena secara langsung memengaruhi kapasitas masyarakat lokal dalam mengakses peluang usaha, permodalan, dan kelayakan operasional dalam pemanfaatan limbah industri. Struktur pengkodean ini memberikan kerangka konseptual yang kuat untuk mengkaji lebih dalam interaksi antar faktor dalam konteks ESG.

Table 8. Manual Coding

Open Coding	Axial Coding	Selective Coding (Element)
Biaya produksi awal tinggi; butuh subsidi bahan baku dan alat sederhana	Hambatan Modal Awal dan Biaya Produksi	Dukungan Ekonomi
Insentif non-tunai dibutuhkan seperti cetakan paving, truk, pelatihan	Bentuk Insentif Produktif	Dukungan Ekonomi
Belum ada subsidi langsung dari pemerintah/PLN untuk usaha FABA	Ketiadaan Skema Insentif Formal	Dukungan Ekonomi
Perlu akses ke hibah mikro untuk memulai usaha kecil	Akses terhadap Pembiayaan Mikro	Dukungan Ekonomi
Harga produk FABA lebih murah tapi belum diminati karena tampilan	Kesenjangan Nilai Ekonomi dan Estetika Produk	Dukungan Ekonomi
Infrastruktur PLTU memadai; desa tidak punya alat, jalan, gudang	Ketimpangan Infrastruktur	Infrastruktur
PLTU siap teknologi dan alat berat; desa perlu alat sederhana dan pelatihan	Kesiapan Fasilitas Industri vs Kebutuhan Lokal	Infrastruktur
PLTU gunakan MOU; UMKM desa terhambat izin lingkungan dan administrasi	Perbedaan Prosedur Legalitas	Regulasi dan Perizinan
Perlu "layanan satu pintu" untuk bantu izin usaha kecil	Kompleksitas Legal UMKM	Regulasi dan Perizinan
Sosialisasi masyarakat belum merata; industri sudah paham	Ketimpangan Akses Informasi	Sosialisasi
Strategi promosi desa masih pasif, tergantung undangan	Kelemahan Strategi Informasi Lokal	Sosialisasi
Forum koordinatif sudah ada tapi belum mendorong transformasi ekonomi	Skala dan Arah Kolaborasi	Kolaborasi Multipihak
Sinergi perlu penggerak utama dan biaya operasional untuk eksekusi	Kebutuhan Inisiatif Kolaboratif	Kolaborasi Multipihak
Pemerintah desa siap memimpin usaha jika difasilitasi alat dan pelatihan	Kesiapan Pemerintah Lokal sebagai Aktor Utama	Kolaborasi Multipihak

Source: Authors

Table 8. Element Dukungan Ekonomi

Element	Responden	Kutipan Wawancara
Dukungan Ekonomi	RT1	Produk FABA lebih terjangkau tapi terkendala pada aspek estetika produk.
Dukungan Ekonomi	RT2	Biaya produksi awal tinggi; warga sulit memulai tanpa bantuan

Dukungan Ekonomi	RT2	alat dan bahan. Subsidi keuangan belum pernah diterima, padahal potensi usaha besar.
Dukungan Ekonomi	RT2	Pelaku lokal butuh akses ke hibah mikro atau CSR untuk memulai usaha kecil.
Dukungan Ekonomi	RT1	PLTU menyediakan FABA secara gratis, tapi masyarakat terkendala transportasi.
Dukungan Ekonomi	RT2	Insentif non-tunai seperti cetakan paving, truk dan pelatihan lebih dibutuhkan.
Dukungan Ekonomi	RT2	Hambatan utama adalah pembiayaan awal untuk alat dan bahan pendukung produksi.
Dukungan Ekonomi	RT2	Pasar lokal potensial, tapi daya beli rendah dan persepsi kualitas FABA masih negatif.

Source: Authors

Hasil analisis kualitatif ini memperlihatkan bahwa tantangan utama dalam pemanfaatan FABA bukan hanya pada kesiapan teknologi, melainkan pada ketimpangan akses ekonomi, infrastruktur, dan tata kelola. Kategori dukungan ekonomi muncul sebagai tema dominan yang berakar pada permasalahan struktural, seperti ketidadaan subsidi alat, kebutuhan pelatihan, dan minimnya skema pembiayaan mikro. Temuan ini menyoroti bahwa keberlanjutan proyek pemanfaatan FABA sangat tergantung pada hadirnya intervensi ekonomi yang kontekstual dan tepat sasaran. Lebih lanjut, wawancara memperkuat bahwa masyarakat desa memiliki kemauan tinggi untuk berpartisipasi, namun tersandera oleh keterbatasan akses pada modal, teknologi, dan pasar. Hal ini mencerminkan adanya gap antara semangat lokal dengan dukungan sistemik yang dibutuhkan. Jika tidak diintervensi, potensi ekonomi dari FABA akan tetap terpendam dalam rantai pasok yang terfragmentasi.

Dengan demikian, strategi berbasis ESG yang diusulkan tidak cukup hanya menyangkut aspek lingkungan dan tata kelola, tetapi juga harus menempatkan dukungan ekonomi sebagai entry point intervensi. Strategi ESG perlu dirancang sebagai pendekatan terintegrasi yang menjembatani ketimpangan aktor dan sumber daya dalam sistem pengelolaan limbah berbasis ekonomi sirkular. Di sisi lain, penelitian ini juga mengungkap berbagai peluang yang dapat dikapitalisasi untuk mempercepat pemanfaatan FABA secara berkelanjutan. Di antaranya adalah kesiapan PLTU dalam menyediakan material FABA, adanya potensi pasar lokal yang meskipun terbatas tetap dapat dikembangkan, serta kesiapan kelembagaan desa untuk menjadi penggerak ekonomi lokal melalui skema BUMDes. Potensi sinergi antar aktor, termasuk pemerintah, industri, dan komunitas, membuka ruang kolaborasi yang dapat menghasilkan dampak berkelanjutan jika difasilitasi secara tepat.

Temuan ini menunjukkan bahwa tantangan utama dalam pemanfaatan FABA berada pada dimensi struktural, terutama ketimpangan kapasitas ekonomi, keterbatasan kelembagaan lokal, dan minimnya skema pendukung yang berorientasi pada pemberdayaan masyarakat. Kesulitan akses terhadap alat produksi, keterbatasan permodalan, dan proses perizinan yang kompleks menjadi penghambat utama dalam memulai dan mempertahankan usaha berbasis FABA. Namun, di balik hambatan tersebut terdapat sejumlah peluang yang bisa dioptimalkan. Tersedianya bahan baku secara gratis, komitmen aktor lokal, dan kesiapan desa dalam mengelola kegiatan ekonomi berbasis sumber daya lokal merupakan fondasi penting yang dapat dikembangkan. Potensi sinergi antar pemangku kepentingan juga menciptakan ruang strategis bagi implementasi program kolaboratif. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan pemanfaatan FABA secara berkelanjutan sangat ditentukan oleh kemampuan untuk mengatasi hambatan ekonomi mikro dan kelembagaan lokal melalui strategi intervensi yang tepat sasaran dan responsif terhadap kebutuhan nyata di lapisan masyarakat paling dasar.

PEMBAHASAN

Penelitian ini mengkaji penerapan prinsip Environmental, Social, and Governance (ESG) dalam pengelolaan limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) di PLTU Asam-Asam, dengan pendekatan mixed-method. Hasil studi menunjukkan bahwa keberhasilan pemanfaatan FABA secara eksternal sangat ditentukan oleh integrasi antara dukungan infrastruktur, regulasi yang adaptif, keterlibatan masyarakat, serta skema tata kelola kolaboratif. Dua

faktor utama ditemukan dari analisis kuantitatif, yakni "Infrastruktur dan Dukungan Pemanfaatan FABA" serta "Promosi dan Regulasi FABA". Dari sisi kualitatif, ditemukan lima elemen krusial sebagai pilar pengelolaan FABA: dukungan ekonomi, infrastruktur, regulasi dan perizinan, sosialisasi, serta kolaborasi multipihak. Integrasi kedua pendekatan ini menjadi dasar formulasi strategi terpadu yang dapat direplikasi di PLTU lainnya.

Faktor-Faktor Permintaan Eksternal Terhadap Pemanfaatan FABA

Melalui pendekatan statistik Exploratory Factor Analysis (EFA), penelitian ini berhasil mengidentifikasi dua konstruk utama yang secara signifikan memengaruhi permintaan eksternal terhadap pemanfaatan limbah FABA. Temuan ini memperkuat asumsi bahwa sistem pendukung pemanfaatan FABA tidak dapat dilepaskan dari kekuatan struktural dan dinamika kelembagaan yang ada.

Konstruk pertama yang diidentifikasi diberi nama "Infrastruktur dan Dukungan Pemanfaatan FABA". Faktor ini memuat beragam indikator strategis seperti kesiapan infrastruktur fisik, pemahaman serta kesadaran masyarakat terhadap manfaat FABA, serta kecanggihan teknologi yang dimiliki oleh pelaku industri berskala kecil. Lebih lanjut, indikator lainnya mencakup pelaksanaan edukasi dan kampanye publik secara masif, keberadaan forum kolaboratif yang aktif, panduan implementasi teknis yang mudah diakses, ketersediaan pasar lokal, keluwesan dalam proses perizinan, serta sinergi multipihak yang mendukung transformasi FABA dari limbah menjadi sumber daya strategis. Keseluruhan elemen ini saling berinteraksi dan membentuk satu sistem yang memungkinkan terjadinya utilisasi FABA secara lebih sistemik dan berkelanjutan.

Sementara itu, faktor kedua dinamakan "Promosi dan Regulasi FABA". Dalam dimensi ini, indikator-indikator utama mencakup strategi promosi yang terarah dan berkelanjutan, komitmen dari institusi pemerintah dan manajemen PLTU dalam implementasi regulasi, tingkat koneksi antara PLTU sebagai produsen dengan pelaku usaha sebagai pengguna FABA, serta upaya pelatihan teknis yang diperlukan bagi pelaku UMKM guna meningkatkan kapasitas produksi mereka. Faktor ini menekankan bahwa keberhasilan pemanfaatan FABA tidak hanya ditentukan oleh kesiapan infrastruktur dan masyarakat, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh efektivitas kebijakan, koordinasi lintas sektor, serta keterpaduan antara kebijakan publik dan dinamika pasar lokal. Dengan demikian, kedua faktor ini mencerminkan bahwa strategi pemanfaatan FABA harus mencakup pendekatan menyeluruh yang tidak hanya memperkuat sisi teknis dan infrastruktur, tetapi juga mendorong regulasi yang progresif serta komunikasi yang intensif antar pemangku kepentingan.

Peluang dan Tantangan dalam Pengelolaan FABA

Hasil wawancara mendalam dengan pihak PLTU dan pemerintah desa memperlihatkan bahwa tantangan dalam pengelolaan dan pemanfaatan FABA bukan sekadar persoalan teknis atau teknologi semata, melainkan lebih pada ketidaksiapan sistemik yang meliputi berbagai aspek fundamental. Lima elemen utama teridentifikasi sebagai dimensi kunci dalam memahami dinamika hambatan yang dihadapi di tingkat lokal.

Pertama, aspek infrastruktur menjadi sorotan penting. Meskipun PLTU telah memiliki kesiapan dalam hal teknologi dan logistik internal, desa-desa sekitar masih kekurangan alat sederhana, ruang penyimpanan, dan jalur distribusi yang memadai. Ketimpangan ini menyebabkan kesenjangan akses terhadap material FABA, yang pada akhirnya menghambat implementasi pemanfaatan secara luas.

Kedua, dari dimensi regulasi dan perizinan, ditemukan bahwa pelaku usaha kecil di desa mengalami hambatan signifikan dalam mengakses izin legalitas usaha maupun izin lingkungan. Prosedur yang kompleks dan minimnya pendampingan teknis menjadikan proses perizinan sebagai titik lemah dalam rantai pengelolaan FABA.

Ketiga, tantangan sosialisasi muncul sebagai hambatan laten. Informasi mengenai manfaat FABA dan peluang usaha berbasis limbah ini belum tersampaikan secara merata ke seluruh lapisan masyarakat. Strategi komunikasi yang masih pasif dan bergantung pada undangan formal mengakibatkan rendahnya partisipasi masyarakat dalam program pemanfaatan FABA.

Keempat, elemen kolaborasi multipihak belum berkembang secara optimal. Meskipun terdapat forum koordinatif, belum ada sistem kerja sama lintas aktor yang mampu mendorong transformasi ekonomi berbasis FABA. Ketiadaan inisiatif kolaboratif dan keterbatasan dana operasional semakin memperlemah daya dorong inisiatif lokal.

Kelima, dan yang paling dominan, adalah elemen dukungan ekonomi. Masalah biaya produksi awal yang tinggi, keterbatasan akses pada pembiayaan mikro, serta tidak adanya insentif produktif seperti subsidi alat atau pelatihan, menjadikan masyarakat lokal kesulitan memulai usaha berbasis FABA. Meski semangat dan komitmen masyarakat untuk berpartisipasi tinggi, keterbatasan modal dan akses terhadap sarana produksi menjadikan potensi ekonomi dari

limbah FABA tidak dapat dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, dukungan ekonomi harus menjadi prioritas utama dalam strategi intervensi yang dirancang untuk mengakselerasi pemanfaatan FABA secara berkelanjutan.

Strategi Pemanfaatan FABA

Dengan mengintegrasikan temuan dari analisis kuantitatif dan kualitatif, dirumuskan sebuah strategi terpadu yang bertujuan untuk mendorong pemanfaatan limbah FABA secara berkelanjutan melalui pendekatan ESG (Environmental, Social, and Governance). Strategi ini disusun dengan mempertimbangkan realitas sosial-ekonomi di tingkat lokal serta keterbatasan struktural yang menjadi hambatan utama, khususnya hambatan ekonomi yang sangat dominan.

Langkah pertama terfokus pada peningkatan infrastruktur desa, yang melibatkan pengadaan fasilitas dasar seperti gudang komunal untuk penyimpanan FABA, jalur logistik ringan yang memfasilitasi mobilitas material dari PLTU ke lokasi pemanfaatan, serta pengadaan alat angkut melalui skema CSR. Langkah ini bertujuan untuk menjawab kesenjangan fisik antara pusat produksi (PLTU) dan komunitas pengguna di desa. Selanjutnya, strategi pemberdayaan masyarakat diarahkan pada peningkatan kapasitas teknis dan manajerial melalui pelatihan praktis. Program ini dilengkapi dengan pembentukan Tim Inisiatif Desa sebagai motor penggerak internal serta pengembangan modul pelatihan yang disusun oleh perguruan tinggi guna meningkatkan kualitas pembelajaran berbasis kebutuhan lokal. Di sisi komunikasi publik, strategi promosi dan edukasi menekankan pada pendekatan visual dan kontekstual, seperti produksi media infografis, video edukasi, dan pembangunan proyek percontohan berbasis FABA yang ditempatkan di ruang publik desa. Kegiatan ini diperkuat dengan pelibatan tokoh masyarakat sebagai agen perubahan guna meningkatkan penerimaan sosial terhadap FABA. Strategi berikutnya berkaitan dengan legalitas dan tata kelola, yaitu menyusun SOP teknis sesuai regulasi yang berlaku (Permen LHK No. 19 Tahun 2021), pendampingan administrasi usaha kepada pelaku UMKM, serta penyusunan nota kesepahaman antar pemangku kepentingan untuk menjamin keberlangsungan kolaborasi lintas sektor.

Akhirnya, strategi penguatan kelembagaan menjadi kunci dalam menjamin keberlanjutan program. BUMDes diinisiasi sebagai simpul produksi dan distribusi FABA, dibentuk unit usaha mitra yang bertanggung jawab terhadap pemasaran dan pengolahan produk, serta dilakukan integrasi menyeluruh dalam rantai nilai FABA dari hulu hingga hilir. Seluruh pendekatan ini berorientasi pada tujuan strategis: membangun sistem pemanfaatan FABA yang inklusif, berbasis komunitas, dan mampu mengatasi hambatan ekonomi sebagai faktor paling krusial. Dengan menjadikan dukungan ekonomi sebagai fokus utama, strategi ini tidak hanya dirancang untuk PLTU Asam-Asam, melainkan juga dapat diadopsi sebagai model replikasi nasional bagi pengelolaan limbah industri berbasis keberlanjutan.

V. SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi prinsip Environmental, Social, and Governance (ESG) memainkan peran kunci dalam mendorong pemanfaatan limbah Fly Ash and Bottom Ash (FABA) secara berkelanjutan, khususnya di PLTU Asam-Asam. Melalui pendekatan kuantitatif, ditemukan dua faktor dominan yang membentuk dasar strategi pengelolaan, yakni "Infrastruktur dan Dukungan Pemanfaatan FABA" serta "Promosi dan Regulasi FABA". Di sisi lain, pendekatan kualitatif berhasil mengungkap lima tantangan utama, yaitu ketimpangan infrastruktur, regulasi yang kompleks, lemahnya strategi sosialisasi, terbatasnya dukungan ekonomi, serta belum sinergisnya kolaborasi antar aktor. Implikasi dari temuan ini menunjukkan bahwa untuk meningkatkan tingkat pemanfaatan eksternal FABA, diperlukan strategi intervensi yang tidak hanya bersifat teknokratis, tetapi juga mengedepankan pendekatan sosial dan kelembagaan. Rekomendasi strategis yang ditawarkan tidak hanya berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan, tetapi juga membuka ruang bagi pertumbuhan ekonomi lokal, pemberdayaan masyarakat, serta tata kelola berbasis kolaborasi lintas sektor. Dengan menjadikan hambatan ekonomi sebagai fokus utama, strategi ini mampu menjawab akar permasalahan yang sering dihadapi masyarakat dalam memulai usaha pemanfaatan limbah industri. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan utama. Pertama, penelitian hanya terfokus pada satu lokasi PLTU, yakni PLTU Asam-Asam, sehingga hasil temuan mungkin tidak sepenuhnya dapat diterapkan secara langsung pada lokasi PLTU lain yang memiliki konteks dan tantangan berbeda. Kedua, analisis regulasi yang dilakukan sebatas pada tinjauan dokumen serta wawancara terbatas, sehingga ada kemungkinan bahwa aspek regulasi mikro atau regulasi lokal belum sepenuhnya terungkap dalam penelitian ini. Berdasarkan keterbatasan tersebut, maka disarankan beberapa poin penting untuk penelitian berikutnya. Pertama,

melakukan pendekatan penelitian terhadap beberapa jenis PLTU dengan karakteristik geografis dan sosial ekonomi yang beragam untuk mengeksplorasi efektivitas beragam strategi ESG. Kedua, menambahkan analisis mengenai dampak mengenai dampak regulasi terhadap penerapan prinsip ESG dan pemanfaatan FABA, serta mengeksplorasi secara komprehensif terkait hambatan administratif yang dihadapi di tingkat daerah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Ibu Rita Ambarwati, S.E., M.M., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh narasumber dari PLTU Asam-Asam dan Pemerintah Desa Pandansari yang telah meluangkan waktu serta memberikan informasi yang mendalam terkait praktik pengelolaan limbah FABA. Tidak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh responden yang telah berpartisipasi dalam pengisian kuesioner, serta kepada pihak Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas segala fasilitas dan dukungan akademik yang telah diberikan. Semoga penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam upaya mendorong pengelolaan limbah industri yang berkelanjutan di Indonesia.

- [1] I. S. Mir, P. P. S. Cheema, and S. P. Singh, "Implementation analysis of solid waste management in Ludhiana city of Punjab," *Environ. Challenges*, vol. 2, p. 100023, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100023.
- [2] D. A. A. Besari, F. Anggara, W. Rosita, and H. T. B. M. Petrus, "Characterization and mode of occurrence of rare earth elements and yttrium in fly and bottom ash from coal-fired power plants in Java, Indonesia," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, p. 20, Dec. 2022, doi: 10.1007/s40789-022-00476-2.
- [3] N. Petronijević *et al.*, "Analysis of the Mechanism of Acid Mine Drainage Neutralization Using Fly Ash as an Alternative Material: A Case Study of the Extremely Acidic Lake Robule in Eastern Serbia," *Water*, vol. 14, no. 20, p. 3244, Oct. 2022, doi: 10.3390/w14203244.
- [4] O. Marinina, M. Nevskaya, I. Jonek-Kowalska, R. Wolniak, and M. Marinin, "Recycling of Coal Fly Ash as an Example of an Efficient Circular Economy: A Stakeholder Approach," *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3597, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14123597.
- [5] A. Mousa, "Utilization of coal bottom ash from thermal power plants as a cement replacement for building: A promising sustainable practice," *J. Build. Eng.*, vol. 74, p. 106885, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.106885.
- [6] Á. Vega-Zamaniillo, L. López-López, E. López-López, and M. Á. Calzada-Pérez, "Use of Bottom Ash from a Thermal Power Plant and Lime to Improve Soils in Subgrades and Road Embankments," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 8, p. 3197, Apr. 2024, doi: 10.3390/app14083197.
- [7] A. K. Awasthi *et al.*, "Zero waste approach towards a sustainable waste management," *Resour. Environ. Sustain.*, vol. 3, p. 100014, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.resenv.2021.100014.
- [8] A. K. Ram and S. Mohanty, "State of the art review on physicochemical and engineering characteristics of fly ash and its applications," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, p. 9, Dec. 2022, doi: 10.1007/s40789-022-00472-6.
- [9] A. Bazrbachi, S. F. Sidiq, S. U. Adam, N. W. bt Ismail, and T. Y. Sheng, "Assessing the Measurement Model for Source-Separating Waste for Recycling under a Proposed Smart Waste Management Scheme in Shah Alam, Malaysia," *Recycling*, vol. 8, no. 4, p. 58, Jul. 2023, doi: 10.3390/recycling8040058.
- [10] S. Coskun, "Zero Waste Management Behavior: Conceptualization, Scale Development and Validation—A Case Study in Turkey," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12654, Oct. 2022, doi: 10.3390/su141912654.
- [11] E. Aycin and S. Kayapinar Kaya, "Towards the circular economy: Analysis of barriers to implementation of Turkey's zero waste management using the fuzzy DEMATEL method," *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.*, vol. 39, no. 8, pp. 1078–1089, Aug. 2021, doi: 10.1177/0734242X20988781.
- [12] J. Nimita Jebaranjitham, J. D. Selvan Christyraj, A. Prasannan, K. Rajagopalan, K. S. Chelladurai, and J. K. J. S. Gnanaraja, "Current scenario of solid waste management techniques and challenges in Covid-19 – A review," *Heliyon*, vol. 8, no. 7, p. e09855, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09855.
- [13] J. K. Debrah, D. G. Vidal, and M. A. P. Dinis, "Raising Awareness on Solid Waste Management through Formal Education for Sustainability: A Developing Countries Evidence Review," *Recycling*, vol. 6, no. 1, p. 6, Jan. 2021, doi: 10.3390/recycling6010006.
- [14] S. Kevin van Langen, C. Vassillo, P. Ghisellini, D. Restaino, R. Passaro, and S. Ulgiati, "Promoting circular economy transition: A study about perceptions and awareness by different stakeholders groups," *J. Clean. Prod.*, vol. 316, p. 128166, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128166.
- [15] R. Ambarwati, Dedy, R. Dijaya, and I. Anshory, "A multi-method study of risk assessment and human risk control for power plant business continuity in Indonesia," *Results Eng.*, vol. 21, p. 101863, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101863.
- [16] A. A. Zorpas, "Strategy development in the framework of waste management," *Sci. Total Environ.*, vol. 716, p. 137088, May 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137088.
- [17] L. Hirpe and C. Yeom, "Municipal Solid Waste Management Policies, Practices, and Challenges in Ethiopia: A Systematic Review," *Sustainability*, vol. 13, no. 20, p. 11241, Oct. 2021, doi: 10.3390/su132011241.
- [18] T. A. Kurniawan *et al.*, "Transformation of Solid Waste Management in China: Moving towards Sustainability through Digitalization-Based Circular Economy," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 2374, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14042374.

- [19] R. Ambarwati, D. Yuliastri, and W. Sulistiyowati, "Human resource risk control through COVID-19 risk assessment in Indonesian manufacturing," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 74, p. 104665, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104665.
- [20] S. Thamrin, R. Ambarwati, and S. Hidayat, "The Strategies Of West Java's Regional Energy Management To Support National Energy Security," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 10, no. 6, pp. 376–382, Oct. 2020, doi: 10.32479/ijEEP.10259.
- [21] S. S. Alterary and N. H. Marei, "Fly ash properties, characterization, and applications: A review," *J. King Saud Univ. - Sci.*, vol. 33, no. 6, p. 101536, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jksus.2021.101536.
- [22] G. Li *et al.*, "Fly Ash Application as Supplementary Cementitious Material: A Review," *Materials (Basel)*., vol. 15, no. 7, p. 2664, Apr. 2022, doi: 10.3390/ma15072664.
- [23] H. T. B. M. Petrus *et al.*, "Circular Economy of Coal Fly Ash and Silica Geothermal for Green Geopolymer: Characteristic and Kinetic Study," *Gels*, vol. 8, no. 4, p. 233, Apr. 2022, doi: 10.3390/gels8040233.
- [24] H. Tariq *et al.*, "Mechanical Performance of Polymeric ARGF-Based Fly Ash-Concrete Composites: A Study for Eco-Friendly Circular Economy Application," *Polymers (Basel)*., vol. 14, no. 9, p. 1774, Apr. 2022, doi: 10.3390/polym14091774.
- [25] A. Mlonka-Mędrala, "Recent Findings on Fly Ash-Derived Zeolites Synthesis and Utilization According to the Circular Economy Concept," *Energies*, vol. 16, no. 18, p. 6593, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186593.
- [26] A. Q. Vilakazi, S. Ndlovu, L. Chipise, and A. Shemi, "The Recycling of Coal Fly Ash: A Review on Sustainable Developments and Economic Considerations," *Sustainability*, vol. 14, no. 4, p. 1958, Feb. 2022, doi: 10.3390/su14041958.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.