

Preliminary Study on the Treatment of Aluminum Slag Hazardous Waste

[Study Awal Pengolahan Limbah B3 Slag Aluminium]

Moh Reza Nasrulloh¹⁾, Prantasi Harmi Tjahjanti^{*2)}

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

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

Abstract. Hazardous and toxic waste (B3) requires special attention due to its potential to harm the environment and human health if not managed properly. Consequently, the management of B3 waste—including aluminum slag—must be systematic and planned, encompassing reduction, storage, treatment, and reuse where feasible. In practice, however, much B3 waste is still managed using conventional methods, such as open stockpiling or direct transfer to third parties without on-site treatment. This study aimed to evaluate the initial performance of a prototype for treating aluminum slag waste housed in a wooden container, using temperature and gas levels as monitoring parameters. A total of 10 kg of aluminum slag was used, divided into two 5 kg batches: one untreated (without 10% sulfuric acid/H₂SO₄) and one mixed with 10% H₂SO₄ at a 1:1 ratio. The main testing phase consisted of three 5-minute sessions with the blower turned off. Sample 1 exhibited temperatures of 30.1–30.8°C and gas levels of 26–28, whereas Sample 2 showed a temperature rise from 44.8°C to 72.12°C and a gas level increase from 72 to 500. The MQ-2 sensor readings for Sample 2 exceeded the device's programmed threshold of 400 during the second and third sessions. Following the main test, the blower was activated for the cooling phase. The cooling figures presented here are reconstructions or estimates rather than actual measured values; sensor calibration and actual cooling measurements will be required in future testing.

Keywords - Hazardous and Toxic Waste; Aluminum Slag; Sulfuric Acid

Abstrak. Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) menjadi perhatian khusus karena memiliki potensi membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia apabila tidak dikelola secara tepat. Oleh karena itu, pengelolaan limbah B3 termasuk slag aluminium harus dilakukan secara sistematis dan terencana, mulai dari pengurangan, penyimpanan, pengolahan, hingga pemanfaatan kembali bila memungkinkan. Namun, pada praktiknya masih banyak limbah B3 yang dikelola secara konvensional, seperti penumpukan terbuka atau pengiriman langsung ke pihak ketiga tanpa upaya pengolahan di sumbernya. Tujuan penelitian adalah evaluasi kinerja awal prototipe pengolahan limbah B3 slag aluminium ditempatkan dalam wadah dari kayu, dengan metode pemantauannya melalui suhu dan level gas. Total sampel slag aluminium yang ditempatkan pada wadah kotak kayu sebanyak 10 kg, dengan dibagi 5 kg slag aluminium tanpa dicampur asam sulfat (H₂SO₄) 10% dengan rasio 1:1, dan 5 kg slag aluminium dicampur dengan H₂SO₄ 10%. Pengujian utama dilakukan tiga sesi masing-masing 5 menit dengan blower OFF. Sampel 1 menunjukkan suhu 30,1–30,8 °C dan level gas 26–28, sedangkan sampel 2 meningkat dari 44,8 menjadi 72,12 °C dan level gas dari 72 menjadi 500. Pembacaan MQ-2 pada sampel 2 melewati ambang program perangkat sebesar 400 pada sesi kedua dan ketiga. Setelah pengujian utama, blower dinyalakan pada tahap pendinginan. Angka pendinginan yang disajikan masih berupa rekonstruksi/estimasi, bukan hasil pengukuran aktual. Kalibrasi sensor dan pengukuran pendinginan aktual diperlukan pada pengujian lanjutan.

Kata Kunci - Limbah B3; Slag Aluminium; Asam Sulfat

I. PENDAHULUAN

Limbah industri merupakan konsekuensi kegiatan produksi yang perlu dikelola berdasarkan karakteristik dan potensi bahayanya. Pengelolaan limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) menuntut pengendalian sejak tahap penyimpanan, penanganan, pengolahan, hingga pemanfaatan kembali agar risiko terhadap pekerja dan lingkungan dapat diminimalkan [1]–[5]. Pada industri peleburan aluminium, salah satu residu yang dihasilkan adalah aluminium dross atau slag yang masih dapat mengandung aluminium aktif, oksida logam, dan senyawa reaktif [6]–[9].

Karakteristik slag aluminium (Gambar 1) bergantung pada bahan baku dan proses peleburan. Literatur melaporkan bahwa slag dapat mengandung Al₂O₃, sisa logam Al, MgO, CaO, SiO₂, AlN, dan senyawa lain dengan proporsi yang bervariasi. Kontak material yang masih reaktif dengan air atau kelembapan dapat memicu reaksi dan pelepasan gas, sehingga penanganan awal dan monitoring kondisi penyimpanan menjadi penting [10]–[12]. Di sisi lain, setelah

karakteristik bahayanya dikendalikan, residu aluminium memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali, antara lain sebagai bahan substitusi pada material berbasis semen dan geopolimer [13]–[15]. Stabilisasi/solidifikasi (S/S) merupakan salah satu pendekatan yang digunakan untuk menurunkan mobilitas kontaminan dan meningkatkan kestabilan limbah sebelum penyimpanan akhir atau pemanfaatan. Penelitian terdahulu menunjukkan potensi pemanfaatan slag aluminium pada beton ringan, material semen, dan geopolimer [10], [15]–[17]. Namun, penerapan proses pengolahan memerlukan sistem penanganan yang terstruktur serta monitoring kondisi material, khususnya suhu dan indikasi gas, agar perubahan kondisi internal dapat diketahui tanpa membuka wadah secara langsung [18]. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi respons awal prototipe kotak penyimpanan slag aluminium terhadap perubahan suhu dan level gas pada slag aluminium yang murni dan yang dicampur dengan asam sulfat (H_2SO_4).

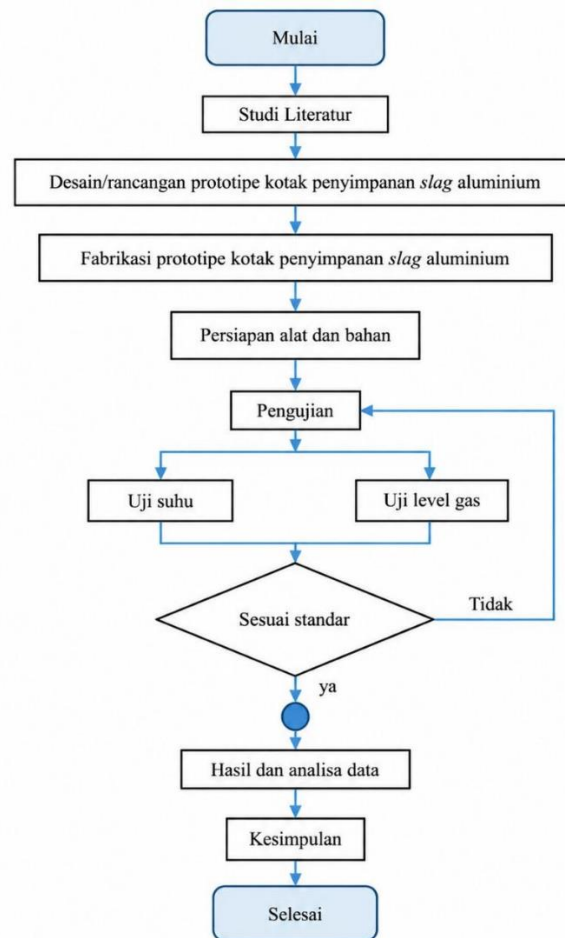


Gambar 1. Slag Aluminium

II. METODE

A. Diagram Alir (*Flow Chart*)

Alur kegiatan penelitian ditampilkan dalam Diagram Alir (*Flow Chart*) Gambar 2, dengan langkah-langkah pengerjaan sebagai berikut: (1) Desain prototipe dan sistem monitoring. Prototipe berupa kotak penyimpanan *slag* aluminium berukuran panjang, lebar, tinggi adalah $(100 \times 100 \times 100) \text{ cm}^3$ menggunakan material multipleks ketebalan 18 mm (Gambar 3). (2) Fabrikasi prototipe kotak penyimpanan *slag* aluminium menggunakan empat roda berpengunci, ventilasi sirkulasi udara, sensor gas MQ-2, sensor suhu dan kelembapan DHT22, blower 12 V DC, Arduino Nano, dan LCD. Sensor berfungsi untuk membaca kondisi internal wadah dan mengirimkan sinyal ke mikrokontroler; informasi ditampilkan pada LCD, sedangkan blower disiapkan sebagai aktuator untuk meningkatkan sirkulasi udara ketika diperlukan. Susunan mekanik dan elektronik ditunjukkan pada Gambar 4. (3) Persiapan alat dan bahan, (4) Pengujian prototipe kotak penyimpanan *slag* aluminium, (5) analisis hasil, dan penarikan simpulan.



Gambar 2. Diagram Alir (*Flow Chart*) Penelitian

B. Tahapan Perancangan Prototipe

Tahapan perancangan prototipe dilakukan secara bertahap dan sistematis, dimulai dari identifikasi kebutuhan sistem, persiapan alat dan bahan, pembuatan struktur mekanik, pemasangan komponen elektronik, hingga integrasi dan pengujian prototipe. Setiap tahapan dilakukan dengan mempertimbangkan fungsi utama prototipe sebagai wadah penyimpanan slag aluminium yang lebih aman serta dilengkapi dengan sistem pemantauan kondisi internal. Perancangan tidak hanya berfokus pada bentuk fisik wadah, tetapi juga mempertimbangkan aspek keamanan, kemudahan pemindahan, sirkulasi udara, serta kemampuan sistem dalam memberikan informasi mengenai perubahan kondisi di dalam wadah. Parameter yang digunakan dalam proses monitoring meliputi suhu, kelembapan, dan perubahan konsentrasi gas yang terdeteksi oleh sensor. Data hasil pembacaan sensor selanjutnya digunakan sebagai informasi untuk mengetahui kondisi slag aluminium selama proses penyimpanan dan pengamatan.

Identifikasi Kebutuhan Desain

Tahap pertama dalam perancangan adalah melakukan identifikasi terhadap kebutuhan prototipe. Identifikasi dilakukan dengan menentukan fungsi dan komponen yang diperlukan agar wadah dapat digunakan untuk menyimpan slag aluminium sekaligus melakukan pemantauan kondisi internal. Wadah dirancang memiliki struktur yang cukup kuat untuk menampung material slag aluminium, ruang khusus untuk penempatan sensor, serta jalur sirkulasi udara agar kondisi di dalam wadah dapat dipantau dengan baik. Selain itu, prototipe dilengkapi dengan sistem ventilasi menggunakan blower yang berfungsi membantu pergerakan udara di dalam sistem dan mendukung proses pendinginan apabila terjadi peningkatan suhu. Penempatan sensor juga dipertimbangkan agar sensor dapat memperoleh data yang merepresentasikan kondisi material secara lebih baik. Dengan adanya identifikasi kebutuhan sejak awal, setiap komponen yang digunakan dapat disesuaikan dengan fungsi dan tujuan dari prototipe.

Persiapan Alat dan Bahan

Setelah kebutuhan desain ditentukan, tahap berikutnya adalah mempersiapkan alat dan bahan yang diperlukan dalam proses pembuatan prototipe. Material utama yang digunakan untuk membangun struktur wadah adalah multipleks dengan ketebalan 18 mm. Multipleks dipilih sebagai bahan utama karena memiliki bentuk yang relatif mudah dipotong dan dirakit serta cukup kuat untuk digunakan sebagai struktur prototipe. Pada bagian elektronik

digunakan Arduino Nano sebagai mikrokontroler yang berfungsi menerima dan mengolah data dari sensor. Sensor MQ-2 digunakan untuk mendeteksi perubahan gas di dalam wadah, sedangkan sensor DHT22 digunakan untuk memperoleh data suhu dan kelembapan. Data hasil pembacaan sensor ditampilkan melalui LCD sehingga kondisi yang terukur dapat diketahui secara langsung. Prototipe juga dilengkapi blower 12 V DC sebagai sistem ventilasi dan empat buah roda yang dilengkapi pengunci untuk memudahkan proses pemindahan sekaligus menjaga prototipe tetap berada pada posisi yang stabil saat digunakan.

Pembuatan Struktur Mekanik

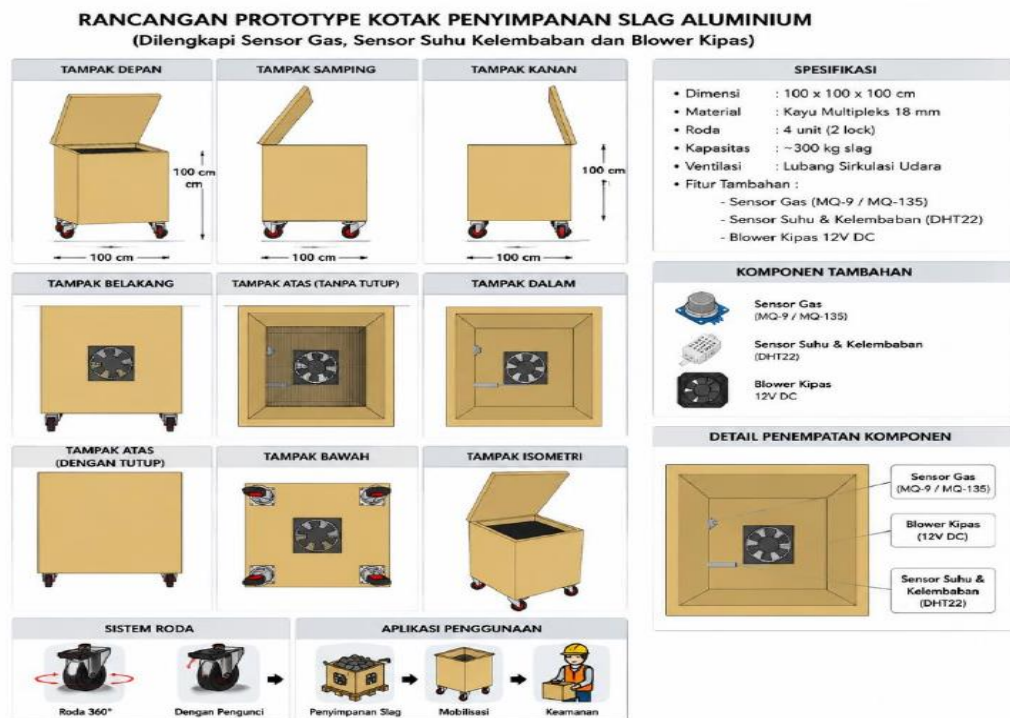
Pembuatan struktur mekanik dilakukan berdasarkan ukuran dan rancangan yang telah ditentukan sebelumnya. Multipleks dipotong dan disesuaikan dengan ukuran rancangan prototipe, yaitu sekitar $100 \times 100 \times 100 \text{ cm}^3$. Potongan multipleks kemudian dirakit menjadi bentuk kotak penyimpanan dengan memperhatikan kekuatan sambungan dan kestabilan struktur. Pada bagian dalam wadah disediakan ruang yang dapat digunakan untuk meletakkan sensor dan komponen pendukung lainnya. Struktur bagian dalam juga mempertimbangkan jalur sirkulasi udara sehingga udara dapat bergerak dengan baik ketika blower diaktifkan. Bagian bawah prototipe kemudian dipasang empat buah roda untuk memberikan mobilitas sehingga wadah dapat dipindahkan dengan lebih mudah. Roda dilengkapi dengan mekanisme pengunci agar prototipe tidak mudah bergerak ketika sedang digunakan untuk proses pengamatan atau pengujian.

Instalasi Sistem Elektronik

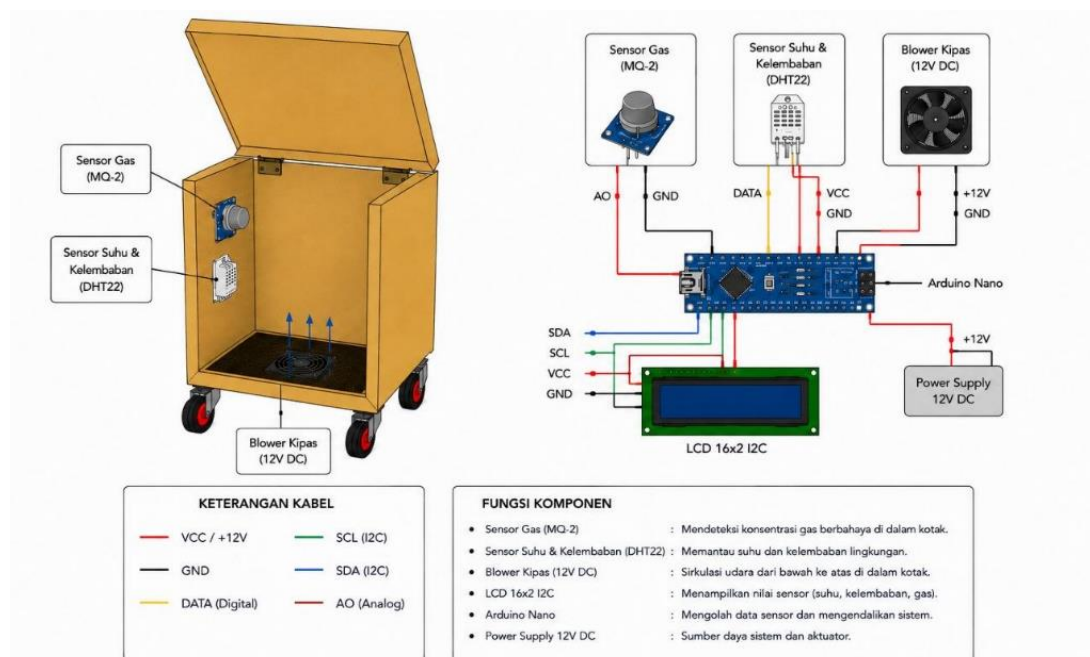
Tahap selanjutnya adalah pemasangan sistem elektronik pada struktur mekanik yang telah selesai dibuat. Sensor MQ-2 dan DHT22 ditempatkan pada posisi yang memungkinkan sensor membaca kondisi lingkungan di dalam wadah. Sensor MQ-2 digunakan untuk memberikan respons terhadap perubahan gas, sedangkan DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan. Seluruh sensor kemudian dihubungkan dengan Arduino Nano sebagai pusat pengendalian dan pengolahan data. Data yang diperoleh dari sensor diproses oleh Arduino dan selanjutnya ditampilkan pada LCD agar dapat diamati secara langsung selama proses pengujian. Blower 12 V DC juga dipasang sebagai bagian dari sistem ventilasi. Ketika blower diaktifkan, aliran udara di dalam wadah dapat membantu mengurangi penumpukan panas dan memperbaiki sirkulasi udara. Pemasangan setiap komponen dilakukan dengan memperhatikan posisi, jalur kabel, serta keamanan komponen agar sistem dapat bekerja dengan baik selama pengujian.

Integrasi dan Pengujian Prototipe

Setelah struktur mekanik dan sistem elektronik selesai dibuat, seluruh komponen kemudian diintegrasikan menjadi satu kesatuan sistem. Pada tahap ini dilakukan pemeriksaan terhadap fungsi masing-masing komponen, mulai dari sensor MQ-2, sensor DHT22, Arduino Nano, LCD, hingga blower. Pemeriksaan dilakukan untuk memastikan sensor dapat membaca kondisi yang terjadi di dalam wadah dan data hasil pengukuran dapat ditampilkan pada LCD. Setelah seluruh komponen dinyatakan dapat bekerja, dilakukan pengujian menggunakan dua kondisi sampel slag aluminium. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui respons prototipe terhadap perubahan kondisi material, khususnya perubahan suhu dan level gas yang terdeteksi oleh sensor. Selama pengujian dilakukan pengamatan dan pencatatan terhadap hasil pembacaan sensor pada setiap sesi. Data tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk melihat kemampuan prototipe dalam melakukan monitoring kondisi internal secara *real time* serta mengetahui perubahan yang terjadi pada masing-masing kondisi sampel. Hasil pengujian selanjutnya dapat digunakan sebagai bahan evaluasi untuk mengetahui kelebihan maupun bagian prototipe yang masih perlu dilakukan perbaikan.



Gambar 3. Desain prototype berupa kotak penyimpanan *slag* aluminium



Gambar 4. Susunan mekanik dan elektronik prototype kotak penyimpanan *slag* aluminium

Cara kerja elektronik prototype kotak penyimpanan *slag* aluminium sebagai berikut: sampel *slag* aluminium ditempatkan di dalam prototype, sensor suhu diposisikan pada material, kemudian wadah ditutup dan sistem monitoring dipastikan aktif. Pengujian utama dilakukan dalam tiga sesi, masing-masing selama 5 menit, dengan *blower* dalam kondisi OFF agar perubahan suhu dan pembacaan sensor gas dapat diamati tanpa intervensi pendinginan. Setelah sesi ketiga selesai, *blower* dinyalakan (ON) dan tahap pendinginan dilakukan selama tiga sesi, masing-masing 5 menit. Parameter yang dipantau adalah suhu dan level gas dari sensor MQ-2. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan nilai antar-sesi dan kecenderungan perubahan. Nilai 400 digunakan sebagai ambang indikatif pada program/perangkat penelitian untuk membedakan status aman dan bahaya; nilai tersebut bukan

batas konsentrasi gas baku. Karena sensor belum dikalibrasi terhadap konsentrasi gas tertentu, level gas diperlakukan sebagai pembacaan relatif tanpa satuan konsentrasi dan tidak digunakan untuk mengidentifikasi jenis gas[19].

C. Pencampuran *Slag* Aluminium dengan Larutan Asam Sulfat (H_2SO_4) 10%

Slag aluminium dicampur dengan asam sulfat (H_2SO_4) 10% fungsi utamanya untuk mengekstrak atau memulihkan kembali kandungan aluminium yang masih tersisa di dalam limbah tersebut[20]. Proses kimia ini disebut sebagai proses pelindian (*leaching*) atau asidifikasi [21]. Sampel *slag* aluminium pengujian terdiri atas 10 kg *slag* aluminium yang dibagi menjadi dua sampel masing-masing 5 kg. Sampel 1 di uji tanpa penambahan larutan H_2SO_4 10%. Sampel 2 menggunakan 5 kg *slag* aluminium yang dicampur dengan 5 kg larutan H_2SO_4 10% pada rasio massa 1:1. Larutan H_2SO_4 10% disiapkan dari H_2SO_4 pekat 98% berdasarkan neraca massa: massa H_2SO_4 98% = $(5.000 \text{ gram} \times 10\%)/98\% = 510,2 \text{ gram}$. Dengan densitas H_2SO_4 98% sekitar 1,84 gram/ml, jumlah tersebut setara sekitar 277,3 ml. Air yang dibutuhkan untuk mencapai massa larutan 5 kg adalah 4.489,8 gram atau sekitar 4.490 ml (Gambar 5).



Gambar 5. Proses pencampuran *slag* aluminium dengan H_2SO_4 10%

Pengenceran dilakukan sebagai tahap persiapan bahan dengan prinsip keselamatan laboratorium: larutan asam H_2SO_4 pekat ditambahkan perlahan ke dalam air sambil diaduk, bukan sebaliknya, karena pengenceran H_2SO_4 bersifat eksotermik [22]. Pekerjaan dilakukan menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) yang sesuai, wadah tahan asam dan panas, serta ventilasi yang memadai. Larutan dibiarkan mencapai kondisi temperatur yang sesuai sebelum digunakan pada pengujian. Rincian komposisi pengujian dirangkum pada Tabel 1. Sementara prototipe kotak *slag* aluminium ditunjukkan pada Gambar 6(a) dan meletakan *slag* aluminium pada prototipe kotak *slag* aluminium (Gambar 6(b)).

Tabel 1. Kondisi dan parameter pengujian

Sampel	Komposisi	Waktu pengamatan	Parameter / kondisi blower
1	5 kg slag aluminium, tanpa larutan	3 × 5 menit	Suhu dan level gas; uji utama OFF, pendinginan ON
2	5 kg slag aluminium + 5 kg larutan H_2SO_4 10%	3 × 5 menit	Suhu dan level gas; uji utama OFF, pendinginan ON



(a) (b)
Gambar 6 (a) Prototipe kotak *slag* aluminium yang sudah jadi
 (b) Meletakkan slag aluminium dalam kotak prototipe kotak *slag* aluminium yang sudah jadi

D. Prosedur Pengujian dan Analisis Data

Prosedur pengujian dan analisis data sebagai berikut: sampel ditempatkan di dalam prototipe kotak *slag* aluminium, sensor suhu diposisikan pada material, kemudian wadah ditutup dan sistem monitoring dipastikan aktif. Pengujian utama dilakukan dalam tiga sesi, masing-masing selama 5 menit, dengan *blower* dalam kondisi OFF agar perubahan suhu dan pembacaan sensor gas dapat diamati tanpa intervensi pendinginan. Setelah sesi ketiga selesai, *blower* dinyalakan (ON) dan tahap pendinginan dilakukan selama tiga sesi, masing-masing 5 menit. Parameter yang dipantau adalah suhu dan level gas dari sensor MQ-2. Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan nilai antar-sesi dan kecenderungan perubahan. Nilai 400 digunakan sebagai ambang indikatif pada program/perangkat penelitian untuk membedakan status aman dan bahaya; nilai tersebut bukan batas konsentrasi gas baku. Karena sensor belum dikalibrasi terhadap konsentrasi gas tertentu, level gas diperlakukan sebagai pembacaan relatif tanpa satuan konsentrasi dan tidak digunakan untuk mengidentifikasi jenis gas [23].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

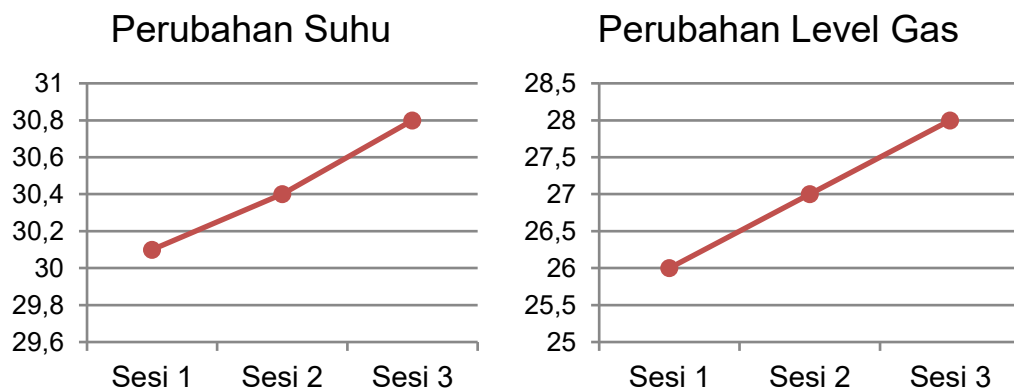
A. Hasil pengujian sampel 1

Pada sampel 1, suhu tercatat 30,1 °C, 30,4 °C, dan 30,8 °C pada tiga sesi berturut-turut. Level gas meningkat dari 26 menjadi 27 dan 28. Seluruh pembacaan masih berstatus aman pada sistem. Kenaikan suhu total sebesar 0,7 °C dan kenaikan level gas sebesar 2 menunjukkan respons yang relatif kecil selama 15 menit pengamatan. Seluruh data pengujian utama tersebut diperoleh saat *blower* dalam kondisi OFF.

Tabel 2. Hasil pengujian sampel 1

Sesi	Durasi	Suhu (°C)	Level gas
1	5 menit	30,1	26 (aman)
2	5 menit	30,4	27 (aman)
3	5 menit	30,8	28 (aman)

Respons yang rendah pada sampel tanpa larutan menunjukkan bahwa kondisi material selama periode pengamatan relatif stabil berdasarkan dua parameter yang dipantau. Meskipun demikian, slag aluminium mempunyai komposisi yang bervariasi dan dapat mengandung fase reaktif, sehingga hasil ini hanya menggambarkan sampel dan kondisi pengujian yang digunakan [11]–[13], [24].



Gambar 7. Grafik Perubahan Sampel 1

Seluruh sesi pengamatan berada pada kondisi yang aman dan menunjukkan perubahan yang relatif stabil selama proses berlangsung. Berdasarkan hasil pengamatan, terjadi kenaikan nilai yang sangat kecil pada setiap sesi, namun peningkatan tersebut masih dalam batas yang wajar dan tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses yang dilakukan berlangsung secara terkendali, tanpa adanya peningkatan yang drastis maupun perubahan kondisi yang dapat mengganggu keamanan selama pengujian. Dengan demikian, secara umum seluruh sesi dapat dikategorikan dalam kondisi aman dan stabil, dengan kenaikan yang terjadi masih tergolong sangat rendah.

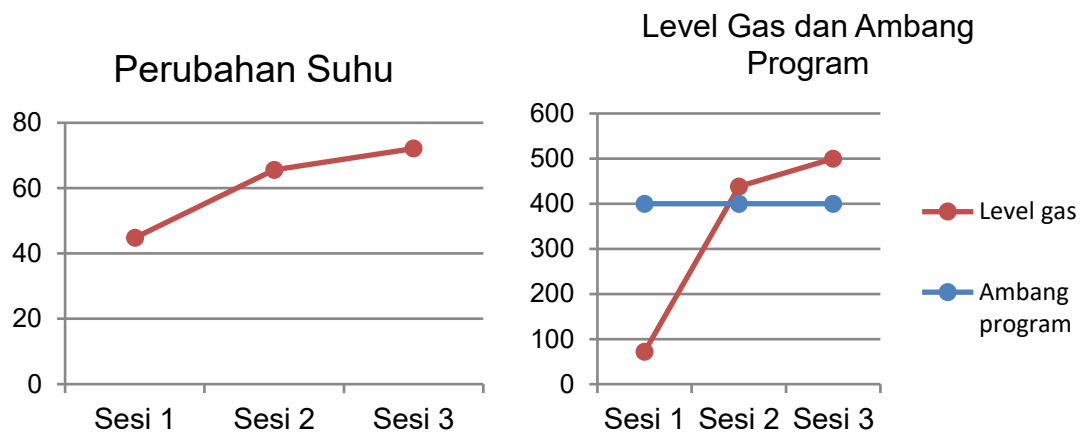
B. Hasil pengujian sampel 2

Pada sampel 2, setelah 5 kg slag aluminium dicampur dengan 5 kg larutan H_2SO_4 10%, suhu pada sesi pertama sebesar $44,8^\circ\text{C}$ dengan level gas 72 dan status aman. Pada sesi kedua suhu meningkat menjadi $65,6^\circ\text{C}$ dan level gas mencapai 438 sehingga sistem menunjukkan status bahaya. Pada sesi ketiga suhu mencapai $72,12^\circ\text{C}$ dan level gas 500, yang juga berstatus bahaya. Ketiga sesi pengujian utama dilakukan saat blower dalam kondisi OFF.

Tabel 3. Hasil pengujian sampel 2

Sesi	Durasi	Suhu ($^\circ\text{C}$)	Level gas
1	5 menit	44,8	72 (aman)
2	5 menit	65,6	438 (bahaya)
3	5 menit	72,12	500 (bahaya)

Dari sesi pertama hingga ketiga, suhu meningkat $27,32^\circ\text{C}$ dan level gas meningkat 428. Kenaikan tersebut jauh lebih besar daripada sampel 1. Secara ilmiah, penambahan larutan asam mengubah kondisi kimia material dan diikuti pelepasan panas serta peningkatan respons sensor gas [23]. Namun, tanpa identifikasi gas, karakterisasi kimia sebelum-sesudah pengujian, dan kurva kalibrasi sensor, data ini belum cukup untuk menetapkan mekanisme reaksi, jenis gas, atau konsentrasinya.

**Gambar 8.** Grafik Perubahan Sampel 2

Penambahan H_2SO_4 dengan konsentrasi 10% menyebabkan terjadinya perubahan kondisi yang lebih terlihat selama proses pengujian. Setelah larutan asam ditambahkan, suhu pada sampel mengalami peningkatan yang lebih tinggi dibandingkan kondisi awal, yang menunjukkan adanya respons akibat proses reaksi yang berlangsung. Selain itu, sensor gas juga menunjukkan respons yang jauh lebih besar, sehingga dapat dikatakan bahwa penambahan H_2SO_4 10% memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap kondisi sampel selama pengamatan. Secara keseluruhan, peningkatan panas dan respons sensor gas tersebut menjadi salah satu perubahan utama yang diamati pada sesi pengujian dengan penambahan H_2SO_4 10%.

C. Data Rekonstruksi Pendinginan

Data pada subbagian ini merupakan data rekonstruksi/estimasi untuk melengkapi format pencatatan tahap pendinginan dan bukan hasil pengukuran aktual. Prosedur yang digunakan pada tahap pendinginan adalah blower ON selama tiga sesi, masing-masing 5 menit. Oleh karena itu, angka suhu dan level gas berikut hanya digunakan sebagai ilustrasi format analisis dan tidak dijadikan bukti eksperimental utama.

Pendinginan sampel 1

Setelah sesi ketiga pengujian utama sampel 1 selesai, blower dinyalakan (ON) untuk tahap pendinginan. Sensor suhu dan MQ-2 dipantau dalam tiga sesi, masing-masing 5 menit. Karena pencatatan aktual pada tahap ini belum tersedia, nilai pada Tabel 4 merupakan rekonstruksi/estimasi.

Tabel 4. Data rekonstruksi pendinginan sampel 1

Sesi pendinginan	Durasi	Suhu (°C)	Level gas / status
1	5 menit	30,6	27 / Aman
2	5 menit	30,3	26 / Aman
3	5 menit	30,1	25 / Aman

Secara ilustratif, suhu sampel 1 menurun secara bertahap dan level gas tetap berada pada status aman. Pola tersebut menggambarkan kondisi yang secara teoritis diharapkan ketika sampel kembali mendekati kondisi awal, tetapi belum dapat dinyatakan sebagai temuan penelitian sebelum diverifikasi melalui pengukuran aktual.

Pendinginan sampel 2

Setelah sesi ketiga pengujian utama sampel 2 selesai pada suhu aktual 72,12 °C dan level gas 500, blower dinyalakan (ON) untuk tahap pendinginan. Pemantauan dirancang dalam tiga sesi, masing-masing 5 menit. Nilai pada Tabel 5 tetap berstatus rekonstruksi/estimasi karena data pendinginan aktual belum dicatat.

Tabel 5. Data rekonstruksi pendinginan sampel 2

Sesi pendinginan	Durasi	Suhu (°C)	Level gas / status
1	5 menit	64,8	455 / Bahaya
2	5 menit	57,3	380 / Aman
3	5 menit	51,6	315 / Aman

Secara ilustratif, data rekonstruksi menunjukkan kecenderungan penurunan suhu dan pembacaan MQ-2 selama blower ON. Status berubah dari bahaya pada sesi pertama menjadi aman pada sesi kedua dan ketiga berdasarkan ambang program sebesar 400. Pola ini belum dapat digunakan untuk menyatakan efektivitas blower secara eksperimental sebelum dilakukan pengukuran pendinginan aktual.

Perbandingan kedua sampel

Tabel 6. Perbandingan respons sampel 1 dan sampel 2

Parameter	Sampel 1	Sampel 2	Perbandingan
Suhu awal	30,1 °C	44,8 °C	Sampel 2 lebih tinggi 14,7 °C
Suhu akhir	30,8 °C	72,12 °C	Sampel 2 lebih tinggi 41,32 °C
Kenaikan suhu	0,7 °C	27,32 °C	Sampel 2 jauh lebih besar
Gas awal	26	72	Sampel 2 lebih tinggi 46
Gas akhir	28	500	Sampel 2 lebih tinggi 472
Kenaikan gas	2	428	Sampel 2 jauh lebih besar

Perbandingan menunjukkan perbedaan respons yang jelas. Sampel 1 mempertahankan suhu dan level gas pada rentang relatif stabil, sedangkan sampel 2 mengalami peningkatan tajam dan melewati ambang indikatif 400 pada sesi kedua dan ketiga. Hasil ini mendukung fungsi prototipe sebagai sarana deteksi awal perubahan kondisi internal. Integrasi sensor, LCD, dan blower juga memberi dasar bagi pengembangan sistem alarm dan ventilasi otomatis, tetapi batas kendali harus ditentukan melalui kalibrasi dan validasi lebih lanjut.

Data pendinginan sampel 1 dan sampel 2 dalam artikel ini masih berupa rekonstruksi/estimasi sehingga belum layak dibandingkan secara kuantitatif dengan penelitian terdahulu. Prosedur pendinginan yang sebenarnya menggunakan blower ON setelah tiga sesi pengujian utama dengan blower OFF. Pengujian ulang perlu mencatat suhu lingkungan, kelembapan, interval waktu, suhu sampel, dan level MQ-2 selama blower beroperasi agar laju pendinginan dan efektivitas ventilasi dapat dianalisis berdasarkan data aktual.

Peningkatan suhu setelah penambahan larutan H₂SO₄ 10% juga relevan dengan kajian pelindian aluminium menggunakan asam sulfat [25] serta kajian hidrometalurgi secondary aluminium dross [26], yang menunjukkan bahwa kondisi asam, temperatur, waktu, dan rasio cair-padat berpengaruh terhadap proses. Meskipun demikian, kondisi bahan dan tujuan penelitian terdahulu tidak identik dengan penelitian ini. Oleh karena itu, penelitian terdahulu digunakan sebagai pembandingan kecenderungan fenomena, bukan sebagai bukti bahwa mekanisme reaksi yang terjadi sama.

E. Pembahasan komparatif dengan penelitian terdahulu

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa sampel 2 menghasilkan respons termal dan pembacaan MQ-2 yang jauh lebih besar dibandingkan sampel 1. Temuan ini relevan dengan Padilla dkk. [11], [23], [27], [28], yang menjelaskan bahwa residu aluminium dross dapat bersifat reaktif dan menghasilkan gas ketika berkontak dengan air atau kelembapan. Kesamaan tersebut terletak pada kecenderungan meningkatnya aktivitas gas pada material dross. Namun, pembacaan MQ-2 dalam penelitian ini masih berupa level relatif dan tidak dapat digunakan untuk menentukan jenis maupun konsentrasi gas tanpa kalibrasi yang sesuai.

F. Implikasi terhadap rancangan pengolahan

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa monitoring suhu dan level gas menggunakan MQ-2 relevan ditempatkan pada tahap penanganan dan penyimpanan awal slag. Selama pengujian utama blower sengaja dimatikan, sedangkan blower diaktifkan setelah pengujian untuk tahap pendinginan. Rancangan ini memungkinkan respons awal sampel diamati terpisah dari intervensi ventilasi. Namun, karena data pendinginan aktual belum tersedia, efektivitas blower belum dapat dinilai secara kuantitatif. Pengembangan berikutnya perlu memasukkan kalibrasi MQ-2, pengukuran kelembapan dan pH, identifikasi gas, karakterisasi material, serta kriteria kestabilan hasil S/S agar keputusan “stabil” tidak hanya didasarkan pada pembacaan sensor.

Penggunaan H_2SO_4 pada sampel 2 harus dipahami sebagai kondisi eksperimen, bukan sebagai bukti bahwa penambahan asam merupakan metode stabilisasi yang telah tervalidasi. Peningkatan suhu dan level gas justru menunjukkan perlunya pengendalian temperatur, ventilasi, rasio pencampuran, prosedur penambahan, dan tanggap darurat yang terukur. Untuk tujuan pemanfaatan hasil pengolahan, literatur mengenai slag aluminium pada material semen dan geopolimer dapat menjadi dasar pengembangan, tetapi verifikasi karakteristik limbah dan persyaratan lingkungan tetap diperlukan [29]–[31].

VII. SIMPULAN

Prototipe mampu memantau perubahan suhu dan level gas menggunakan sensor MQ-2 pada dua kondisi slag aluminium selama tiga sesi pengujian utama dengan blower OFF. Sampel tanpa larutan menunjukkan respons relatif stabil, sedangkan sampel yang dicampur larutan H_2SO_4 10% menunjukkan peningkatan suhu dan level gas yang jauh lebih besar hingga melampaui ambang program perangkat sebesar 400 pada sesi kedua dan ketiga. Setelah pengujian utama, blower dioperasikan (ON) pada tahap pendinginan. Namun, karena data pendinginan yang tersedia masih berupa rekonstruksi/estimasi, efektivitas blower belum dapat disimpulkan dari penelitian ini. Data yang tersedia juga belum cukup untuk menentukan jenis atau konsentrasi gas maupun menyatakan keberhasilan stabilisasi limbah B3. Penelitian lanjutan perlu mencakup pengukuran pendinginan aktual, kalibrasi MQ-2, identifikasi gas, pengukuran parameter kimia, karakterisasi material, dan validasi kriteria keselamatan proses.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak perusahaan yang telah memberikan limbah slag aluminium sebagai bahan penelitian, sehingga pelaksanaan pengujian dan penelitian dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada pihak laboratorium dan pihak-pihak yang telah membantu dalam penyediaan fasilitas serta mendukung proses pengujian, khususnya dalam pemantauan suhu dan level gas selama penelitian berlangsung.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada keluarga, khususnya orang tua, atas doa, dukungan, motivasi, dan semangat yang senantiasa diberikan selama proses pendidikan hingga penyelesaian karya tulis ilmiah ini. Penulis turut menyampaikan terima kasih kepada pasangan yang telah memberikan dukungan, perhatian, semangat, dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan karya tulis ilmiah.

Terakhir, penulis mengucapkan terima kasih kepada teman-teman yang telah membantu dan memberikan dukungan selama pelaksanaan penelitian, baik dalam proses persiapan, pengujian, maupun penyelesaian karya tulis ilmiah ini. Segala bentuk bantuan dan dukungan yang telah diberikan sangat berarti bagi kelancaran penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Nurlina, “Toxic and Hazardous Waste (B3) Management at PT. Pal Indonesia (PERSERO),” *Indones. J. Public Heal.*, vol. 16, no. 3, pp. 449–460, 2021, doi: 10.20473/ijph.v116il.2021.449-460.

- [2] I. R. Wiryawan and K. Pharmawati, "Evaluation of B3 Liquid Waste Management In The Manufacturing Industry at PT. Z, Bandung City," *JPLB (J. Pengelolaan Lingkung. Berkelanjutan)*, vol. 8, no. 2, pp. 132–142, 2024.
- [3] S. W. Pratiwi S. Qotrunada and Z. Nisa, "Evaluation of Hazardous Waste Management in Manufacturing Industry," *Nusant. Hasana J.*, vol. 3, no. 7, pp. 68–83, 2023.
- [4] V. Alfianti, S. Rismawati, and N. Latifah, "Tinjauan Sistem Pengolahan Limbah B3 Pada Sektor Kesehatan Dan Industri," *Sains Med.*, vol. 3, no. 5, pp. 362–368, 2025.
- [5] I. P. Sari, L. M. Zainul, and A. Sesariyanto, "Analisis Pengolahan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun (B3) Pada PT Geoservices Di Balikpapan," *J. Keselamatan, Kesehat. Kerja dan Lindungan Lingkung.*, vol. 11, no. 4, pp. 1171–1175, 2025.
- [6] A. Nursabrina, T. Joko, and O. Septiani, "The Condition of Industrial Hazardous Waste Management in Indonesia and Its Potential Impact: A review," *J. Ris. Kesehat. Poltekkes Depkes Bandung*, vol. 13, no. 1, pp. 80–90, 2021.
- [7] I. S. D. Pramestie and S. A. Wilujeng, "Evaluasi Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) di PT. XYZ," *J. Tek. ITS*, vol. 12, no. 2, 2023.
- [8] M. W. Pratistita and I. Triadi, "Perlindungan Hukum Bagi Masyarakat Terhadap Pencemaran Udara Akibat Industri Peleburan Limbah Daur Ulang Aluminium," *J. Huk. IUS Publicum*, vol. 5, no. 1, 2024, doi: 10.55551/jip.v5i1.90.
- [9] M. Rizki, G. Nadi, C. Ruskandi, A. Siswanto, and E. Koswara, "Pendekatan Hukum Stokes Pada Proses Terjadinya Slag Untuk Meningkatkan Efektivitas Pembersihan Cairan Logam Pada Proses Peleburan Besi Cor," *Indones. J. Appl. Phys.*, vol. 12, no. 2, pp. 188–196, 2022.
- [10] K. A. P. Saraswati and M. Razif, "Potensi Pemanfaatan Slag Alumunium Sebagai Substitusi Semen Dalam Proses Stabilisasi/Solidifikasi Limbah B3 Dengan Kajian Pustaka (Studi Kasus : PT.X Kecamatan Kesamben, Jombang)," *J. Envirotek*, vol. 12, no. 2, 2020.
- [11] S. L.-A. I. Padilla M. Romero and A. López-Delgado, "Sustainable Management of Salt Slag," *Sustainability*, vol. 14, no. 9, p. 4887, 2022, doi: 10.3390/su14094887.
- [12] M. M. Ali and R. S. Yassen, "Recovery of Aluminum from Industrial Waste (Slag) by Melting and Electrefining Processes," *Al-Khwarizmi Eng. J.*, vol. 14, no. 3, pp. 81–91, 2018.
- [13] M. Lukita, Z. Abidin, E. Riani, and A. Ismail, "Utilization of hazardous waste of black dross aluminum : processing and application-a review," *J. Degrad. Min. Lands Manag.*, vol. 9, no. 2, pp. 3265–3271, 2022, doi: 10.15243/jdmmlm.2022.092.3265.
- [14] M. A. C. Putra, "Pelaksanaan Fungsi Pengawasan Pencemaran Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun(B3) Abu Slag Alumunium Pada Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Jombang," *Univ. Brawijaya*, 2021.
- [15] M. H. Elseknidy, A. Salmiaton, I. N. Shafizah, and A. H. Saad, "A Study on Mechanical Properties of Concrete Incorporating Aluminum Dross , Fly Ash , and Quarry Dust," *Sustainability*, vol. 12, no. 21, pp. 1–13, 2020.
- [16] A. R. N. Sholekah and Y. Risdianto, "Pemanfaatan Alumunium Slag Dan Fly Ash Sebagai Bahan Substitusi Semen Pada Campuran Pembuatan Beton Ringan Seluler," *J. Rekats*, vol. 10, no. 3, 2022.
- [17] R. D. Jayanto, E. Widodo, R. Firdaus, and A. Akbar, "The Manufacturing Planning of Installation Series-Parallel Combination Centrifugal Pump Testing Equipment Perencanaan Manufaktur Instalasi Pompa Sentrifugal Laboratorium Teknik Mesin Dengan Kombinasi Rangkaian Seri dan Paralel," vol. 6, no. 1, 2021.
- [18] B. Suhartawan *et al.*, *Pengelolaan Limbah Padat, Limbah Industry Dan B3*. 2023.
- [19] T. A. Puja, Y. Sidabutar, Fauzan, and A. I. Room, "Inovasi Material sebagai Solusi Konstruksi Hijau : Studi Kasus Pemanfaatan Limbah Industri Sebagai Bahan Bangunan," vol. 15, no. 2021, pp. 32–37, 2025.
- [20] A. Isyantimah, R. R. N. Sofi'i, Sani, and D. H. Astuti, "Pembuatan Alumunium Sulfat Al 2 (SO 4) 3 dari Limbah Lumpur PT. Drupadi Tirta Gresik," *J. Chem. Process Eng.*, vol. 03, no. 02, p. 5, 2022.
- [21] J. Li, T. Yu, C. Li, X. Han, and J. Gao, "RSC Advances Efficient and selective leaching of nickel and cobalt from nickel laterite ore by a combined atmospheric acid leaching-ferric chloride solution leaching," *RSC Adv.*, vol. 15, no. August, pp. 29176–29189, 2025, doi: 10.1039/D5RA04469C.
- [22] S. Ubaldini, P. Fornari, R. Massidda, and C. Abbruzzese, "An innovative thiourea gold leaching process," *ELSEVIER*, no. 48, pp. 113–124, 1998.
- [23] A. Refalista, R. Irawati, Irawan, and T. W. Wisjhnuadji, "Air Pollution Monitoring Berbasis Internet of Things," *J. TICOM Technol. Inf. Commun.*, vol. 12, no. September, pp. 31–36, 2023.
- [24] Husnul Hakim, A. Nurwahid, and E. Y. Wahyudi, "Peran Pemerintah Desa Terhadap Swadaya Pengelolaan Limbah Industri Di Desa Sumberejo Kecamatan Pagak," *J. Gov. Innov.*, vol. 7, no. 2, pp. 657–1714, 2025.
- [25] S. Sahrani, O. Hotimah, S. Habibah, and T. Sabitha, "Implementasi Ekonomi Sirkular Pada Sektor Pengelolaan Sampah Di Kawasan Asia Tenggara," *J. Geogr.*, vol. 20, no. 1, pp. 101–115, 2024.
- [26] Yogie Risdianto, "Addition of Fly Ash And Aluminum Slag As Cement Substitute Materials To Cellular Lightweight Concrete," *Int. J. Eng. Bus. Soc. Sci.*, vol. 1, no. 03, pp. 248–256, 2023.

- [27] I. R. K. J. G. M. G. Sathiyaseelan C. Bhagyanathan and P. Srinath, “Sustainable Geopolymer Cement Synthesized from Aluminium Dross Using Biomass-Derived Activators,” *Discov. Concr. Cem.*, vol. 2, p. 3, 2026, doi: 10.1007/s44416-026-00043-x.
- [28] H. Phungpha P. Laoratanakul and B. Cherdhirunkorn, “The Influence of Aluminium Dross Residue and Coal Fly Ash on the Properties of Geopolymers,” *J. Met. Mater. Miner.*, vol. 35, no. 2, pp. 1–7, 2025, doi: 10.55713/jmmm.v35i2.2180.
- [29] A. Harmaji, R. Jafari, G. Simard, and J. Bayer, “Valorization of Residue from Aluminum Industries : A Review,” *MDPI:materials*, vol. 17, no. 21, p. 5152, 2024.
- [30] M. Hidayat, Maryono, Widjonarko, M. D. Taqyuddin, Saraswati, and and Padmagitaning, “Evaluation of Rural Urban Waste Management : Integrating Logic Model and GIS Approach in Pemalang , Central Java , Indonesia,” *J. ILMU Lingkung.*, vol. 22, no. 3, pp. 825–835, 2024, doi: 10.14710/jil.22.3.825-835.
- [31] Haswanee PHUNGPHA, P. LAORATANAKUL, and and B. CHERDHIRUNKORN, “The Influence Of Aluminium Dross Residue And Coal Fly Ash On The Properties Of Geopolymers Haswanee,” *J. Met. Mater. Miner.*, vol. 35, no. 2, pp. 1–7, 2025, doi: 10.55713/jmmm.v35i2.2180.

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.