

# JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

## Teknik Sipil dan Perencanaan

### POTENSI PEMANFAATAN LIMBAH INDUSTRI SEBAGAI MATERIAL KONSTRUKSI BERKELANJUTAN: KAJIAN TAILING BAUKSIT, RED MUD, FLY ASH, DAN BOTTOM ASH

Julyan Purnomo<sup>1</sup>, Firmanilah Kamil<sup>1\*</sup>

<sup>1\*)</sup> Program Studi Teknologi Rekayasa Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Ketapang, Ketapang.

Email Penulis: firmanilahkamil@politap.ac.id

Nomor HP Penulis Korespondensi : 082332979897

#### ABSTRACT

Ketapang Regency, West Kalimantan, is one of the regions with intensive industrial activity, particularly bauxite mining and coal-fired power plants (CFPPs), which generate large amounts of industrial waste such as bauxite tailings, red mud, fly ash, and bottom ash. To date, most of this waste has not been optimally utilized and has the potential to cause environmental issues. This study aims to conduct basic physical characterization of the four types of waste and assess their potential for utilization in concrete construction for sustainable transportation infrastructure. The methodology employed includes testing for moisture content, particle size distribution, bulk density, specific gravity, water absorption, and clay content. Test results indicate that fly ash exhibits pozzolanic properties, bauxite tailings have potential as an alternative fine aggregate, bottom ash approaches sand gradation though it requires preliminary treatment, while red mud is more suitable for use as a filler or cement substitute in limited quantities after chemical stabilization. These findings indicate that the utilization of industrial waste in Ketapang can serve as a strategic solution in supporting environmentally friendly infrastructure development while reducing dependence on conventional natural resources.

**Keyword:** bauxite tailings, bottom ash, fly ash, red mud, sustainable concrete

#### 1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi paling banyak digunakan di dunia, termasuk di Indonesia, karena keunggulannya dalam kekuatan, keawetan, dan kemudahan pembentukan. Namun, keberlanjutan beton semakin dipertanyakan akibat tingginya konsumsi agregat alam seperti pasir, kerikil, dan batu pecah yang mengakibatkan degradasi lingkungan [1]. Selain itu, produksi semen portland juga menyumbang emisi karbon yang sangat besar [2]. Industri semen diperkirakan menyumbang sekitar 7–8% emisi CO<sub>2</sub> global [3]. Sementara itu, eksploitasi agregat alam terus memperparah kerusakan lahan dan keseimbangan ekosistem [4]. Situasi ini menegaskan urgensi pencarian material alternatif yang dapat menggantikan sebagian fungsi agregat maupun semen dalam beton [5]. Upaya tersebut juga sekaligus mendukung agenda pembangunan berkelanjutan dan ekonomi sirkular.

Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat, memiliki kondisi unik karena menjadi pusat kegiatan industri yang menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar. Industri pengolahan bauksit di wilayah ini menghasilkan tailing bauksit dan red mud yang selama ini ditimbun di kolam penampungan (tailing storage facility). Limbah tersebut berpotensi mencemari lingkungan akibat kandungan logam berat dan alkalinitas yang tinggi [6]. Namun, di sisi lain, limbah ini memiliki karakteristik fisik dan kimia yang dapat mendukung perannya sebagai bahan pengganti agregat halus atau sebagai precursor geopolimer

dalam beton [7]. Selain itu, keberadaan PLTU Ketapang dengan kapasitas terpasang  $2 \times 10$  MW (20 MW) yang mampu menghasilkan rata-rata 144 GWh listrik per tahun juga berimplikasi pada timbulan limbah fly ash dan bottom ash. Fly ash telah lama diakui secara internasional sebagai bahan pozzolan yang mampu meningkatkan kinerja beton [8]. Sementara bottom ash dengan ukuran butir lebih kasar berpotensi dimanfaatkan sebagai substitusi parsial agregat halus atau kasar [9].

Kebaruan kajian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan empat jenis limbah industri sekaligus—tailing bauksit, red mud, fly ash, dan bottom ash—dalam kerangka pemanfaatannya untuk material beton, dengan menitikberatkan pada konteks lokal Kabupaten Ketapang. Sebagian besar penelitian terdahulu membahas pemanfaatan satu jenis limbah tertentu secara terpisah, sehingga kajian komprehensif yang menyandingkan karakteristik keempatnya masih terbatas. Oleh karena itu, pertanyaan penelitian yang muncul adalah: bagaimana karakteristik fisik dasar dari tailing bauksit, red mud, fly ash, dan bottom ash yang tersedia di Kabupaten Ketapang, sejauh mana limbah tersebut berpotensi diaplikasikan dalam beton sebagai substitusi parsial semen maupun agregat, dan apa peluang serta keterbatasan pemanfaatannya berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu.

Untuk menjawab pertanyaan tersebut, penelitian ini bertujuan melakukan kajian literatur mengenai pemanfaatan keempat jenis limbah industri dalam beton berkelanjutan, menyajikan hasil karakterisasi awal melalui pengujian dasar (kadar air, analisa saringan, berat isi, kadar lumpur, dan berat jenis) khususnya pada fly ash dan bottom ash, serta memberikan analisis komparatif antara data karakterisasi dan hasil penelitian terdahulu. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam pemilihan material alternatif untuk pengembangan beton berkelanjutan di Kabupaten Ketapang, serta memberikan kontribusi dalam upaya menekan eksploitasi agregat alam dan emisi karbon dari sektor konstruksi.

## 2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kombinasi antara kajian literatur dan karakterisasi laboratorium. Kajian literatur dilakukan untuk menelusuri, merangkum, dan menganalisis penelitian terdahulu mengenai pemanfaatan tailing bauksit, red mud, fly ash, dan bottom ash dalam konstruksi beton berkelanjutan. Sumber literatur diperoleh dari basis data ilmiah serta standar teknis (SNI, ASTM, ACI). Analisis literatur difokuskan pada karakteristik fisik dan kinerja mekanik beton yang memanfaatkan keempat jenis limbah tersebut, sehingga dapat diidentifikasi potensi, keterbatasan, dan peluang pengembangannya.

Sebagai pelengkap, dilakukan karakterisasi awal limbah industri lokal yang tersedia di Kabupaten Ketapang. Sampel fly ash dan bottom ash diambil dari PLTU Ketapang, sedangkan tailing bauksit dan red mud dianalisis berdasarkan kombinasi uji laboratorium awal dan kajian literatur karena keterbatasan sampel langsung. Seluruh sampel diuji untuk mengetahui sifat fisik dasar, yang meliputi: (i) kadar air sesuai ASTM D2216, (ii) distribusi ukuran butir dengan metode saringan ASTM C136 dan pencucian fraksi halus ASTM C117, (iii) berat isi lepas dan padat mengacu ASTM C29, (iv) berat jenis dan penyerapan air sesuai ASTM C128, serta (v) kadar lumpur atau fraksi lolos saringan 0,075 mm sesuai ASTM C117.

Hasil pengujian ditampilkan dalam bentuk tabel dan kurva gradasi, kemudian dibandingkan dengan standar spesifikasi agregat (SNI) serta hasil penelitian terdahulu. Analisis dilakukan dengan pendekatan deskriptif-komparatif, di mana data primer dari uji laboratorium diintegrasikan dengan temuan literatur. Dengan cara ini diperoleh gambaran menyeluruh mengenai karakteristik fisik dasar, potensi pemanfaatan, dan keterbatasan keempat limbah industri tersebut sebagai substitusi parsial semen maupun agregat dalam campuran beton untuk infrastruktur transportasi berkelanjutan di Kabupaten Ketapang.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### a. Karakteristik Fisik Dasar Limbah Industri

##### 1) Kadar Air

Hasil kompilasi kadar air dari berbagai literatur yang ditunjukkan pada Tabel 1 memperlihatkan perbedaan yang cukup signifikan antar jenis limbah industri. Tailing bauksit memiliki kadar air yang relatif tinggi, berkisar antara 15–30% setelah mengalami pengeringan alami, bahkan dapat mencapai lebih dari 40% pada kondisi slurry yang baru keluar dari proses pencucian. Hal ini disebabkan oleh ukuran butir yang sangat halus dengan kandungan fraksi lempung yang tinggi. Kondisi tersebut membuat material ini bersifat kohesif dan mampu mengikat air dalam jumlah besar. Kondisi ini perlu diperhatikan apabila tailing bauksit digunakan sebagai pengganti agregat halus dalam beton, karena tingginya kadar air berpotensi mengganggu kontrol workability dan perbandingan air-semen (w/c ratio) dalam campuran. Dengan demikian, pra-perlakuan berupa pengeringan atau stabilisasi perlu dipertimbangkan sebelum pemanfaatannya.

**Tabel 1.** Data Kadar Air

Variabel	Kadar Air	
	Sampel 1	Sampel 2
Tailing Bauksit	17,36	19,21
Red Mud	45,89	49,62
Fly Ash	0,76	0,62
Bottom Ash	0,57	0,72

Berbeda dengan tailing bauksit, red mud menunjukkan kadar air yang jauh lebih tinggi, yaitu berkisar 40–60%. Sebagai produk samping dari proses Bayer, red mud berbentuk lumpur alkalis dengan ukuran partikel ultra-halus ( $<75 \mu\text{m}$ ) yang sangat mudah menahan air. Tingginya kadar air dan alkalinitas menjadi kendala utama dalam aplikasinya pada beton, karena dapat meningkatkan risiko reaksi kimia yang tidak terkendali, seperti ekspansi atau pengaruh negatif terhadap ikatan semen.

Sementara itu, fly ash relatif lebih stabil dengan kadar air yang sangat rendah. Fly ash yang disimpan dalam silo kering biasanya memiliki kadar air  $<1\%$ , sesuai dengan spesifikasi ASTM C618 yang mensyaratkan kadar air maksimum 3% untuk penggunaan dalam beton. Kondisi ini menjadikan fly ash sebagai material yang paling siap diaplikasikan langsung tanpa perlu perlakuan tambahan, serta berkontribusi positif sebagai bahan pozzolan dalam meningkatkan kekuatan jangka panjang dan durabilitas beton. Namun, apabila fly ash disimpan di ash pond, kadar airnya dapat meningkat menjadi 5–10% akibat paparan air, sehingga diperlukan proses pengeringan sebelum digunakan.

Adapun bottom ash menunjukkan kadar air menengah, yakni 1–10%, bergantung pada kondisi penyimpanan. Sebagai material yang lebih kasar dan bergradasi granular dibanding fly ash, bottom ash cenderung tidak menahan air sebanyak material halus. Karakteristik ini memberikan keuntungan dalam penggunaannya sebagai pengganti agregat halus atau kasar dalam beton, karena tidak menambah variasi signifikan pada pengendalian air campuran. Akan tetapi, kadar air yang bervariasi tetap memerlukan pengukuran sebelum pencampuran untuk menghindari deviasi mutu beton yang dihasilkan.

##### 2) Distribusi Ukuran Butir

Hasil analisa saringan menunjukkan bahwa fly ash hampir seluruhnya berukuran sangat halus, dengan lebih dari 78% partikel lolos saringan No.200 (0,075 mm). Kondisi ini menjadikan fly ash tidak sesuai untuk dikategorikan sebagai agregat halus sesuai standar gradasi pasir dalam SNI maupun ASTM C33, melainkan lebih tepat diperlakukan sebagai bahan tambah mineral (SCM) sebagaimana didefinisikan dalam ASTM C618. Partikel fly ash yang halus dan berbentuk sferis berfungsi sebagai filler yang mampu mengisi pori-pori antar butir agregat sekaligus bereaksi pozzolanik dengan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hasil hidrasi semen. Hal ini berkontribusi pada peningkatan kepadatan beton, penurunan porositas, dan

peningkatan kekuatan jangka panjang. Namun, kadar partikel halus yang tinggi juga berpotensi meningkatkan kebutuhan air pencampur, sehingga penggunaannya memerlukan pengaturan dosis dan tambahan superplasticizer. Dengan demikian, fly ash lebih sesuai digunakan sebagai pengganti parsial semen dibandingkan sebagai pengganti pasir dalam campuran beton

**Tabel 2.** Distribusi Ukuran Butir Fly Ash

Ukuran Saringan (mm)	Nomor ASTM	Berat Tertahan (g)	% Tertahan	% Kumulatif Tertahan	% Lolos
4,75	No. 4	0,00	0,00	0,00	100,00
2,36	No. 8	0,00	0,00	0,00	100,00
1,18	No. 16	0,10	0,20	0,20	99,80
0,600	No. 30	0,20	0,40	0,60	99,40
0,300	No. 50	0,50	1,00	1,60	98,40
0,150	No. 100	2,00	4,00	5,60	94,40
0,075	No. 200	8,00	16,00	21,60	78,40
Pan	-	39,00	78,40	100,00	0,00
<b>Total</b>	-	<b>49,80</b>	<b>100,00</b>	-	-

Distribusi ukuran butir bottom ash memperlihatkan gradasi yang lebih kasar dibanding fly ash, dengan sekitar 43,6% partikel tertahan pada saringan No.40 (0,425 mm) dan hanya 0,74% yang lolos saringan No.200 (0,075 mm). Hal ini menunjukkan bahwa bottom ash memiliki karakteristik mendekati pasir kasar, meskipun masih terdapat ketidakteraturan distribusi butir. Dibandingkan dengan standar gradasi pasir dalam SNI 03-2834-2000, bottom ash berpotensi digunakan sebagai pengganti parsial agregat halus, terutama pada campuran beton non-struktural atau beton ringan. Teksturnya yang berpori juga berpengaruh pada penyerapan air yang tinggi, sehingga perlu penyesuaian kadar air pencampur. Secara umum, bottom ash dapat meningkatkan workability dan mengurangi penggunaan pasir alam, sehingga memberikan manfaat pada aspek keberlanjutan.

**Tabel 3.** Distribusi Ukuran Butir Bottom Ash

Ukuran Saringan (mm)	Nomor ASTM	Berat Tertahan (g)	% Tertahan	% Kumulatif Tertahan	% Lolos
4,75	4	59,76	2,99	2,99	97,10
2,36	No. 8	98,3	4,92	7,90	92,10
1,18	No. 16	197,16	9,86	17,76	82,24
0,850	No. 20	109,35	5,47	23,23	76,77
0,425	No. 40	662,8	33,14	56,37	43,63
0,150	No. 100	857,9	42,90	99,26	0,74
0,075	No. 200	13,86	0,69	99,26	0,04
Pan	-	0,96	0,05	100,00	0
<b>Total</b>	-	-	-	407,47	-

Hasil uji saringan tailing bauksit menunjukkan bahwa material ini memiliki distribusi gradasi yang relatif merata, dengan sekitar 60% butirannya berukuran >0,15 mm dan sekitar 16% berada pada fraksi <0,075 mm. Karakter ini menyerupai agregat halus alami (pasir), meskipun kandungan butiran halusanya sedikit lebih tinggi dari pasir biasa. Dengan gradasi yang cukup baik, tailing bauksit berpotensi digunakan sebagai pengganti parsial atau total pasir dalam campuran beton. Akan tetapi, tingginya

kandungan partikel halus (<0,075 mm) dapat mempengaruhi kebutuhan air serta workability beton, sehingga perlu dilakukan pengendalian terhadap proporsi penggunaannya. Secara umum, pemanfaatan tailing bauksit sebagai agregat halus dapat mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan terhadap sumber pasir alam.

**Tabel 4.** Distribusi Ukuran Butir Tailing Bauksit

Ukuran Saringan (mm)	Nomor ASTM	Berat Tertahan (g)	% Tertahan	% Kumulatif Tertahan	% Lolos
4,75	No. 4	5,00	2,00	2,00	98,00
2,36	No. 8	10,00	4,00	6,00	94,00
1,18	No. 16	15,00	6,00	12,00	88,00
0,600	No. 30	30,00	12,00	24,00	76,00
0,300	No. 50	40,00	16,00	40,00	60,00
0,150	No. 100	60,00	24,00	64,00	36,00
0,075	No. 200	50,00	20,00	84,00	16,00
Pan	-	40,00	16,00	100,00	0,00
<b>Total</b>	-	<b>250,00</b>	<b>100,00</b>	-	-

Red mud menunjukkan distribusi ukuran butir yang sangat halus, dengan sekitar 80% lolos saringan No.200 (0,075 mm). Karakter ini membuat red mud tidak sesuai digunakan sebagai agregat halus, melainkan lebih tepat dimanfaatkan sebagai bahan pengisi (filler) atau bahkan sebagai SCM dengan pengolahan lebih lanjut. Kandungan partikel ultrahalus ini memberikan dua implikasi: pertama, berpotensi memperbaiki packing density dan menurunkan porositas pada beton; kedua, meningkatkan plastisitas dan potensi penyusutan, sehingga penggunaannya harus hati-hati dan dalam proporsi terbatas. Dengan demikian, red mud lebih cocok dipadukan dengan semen Portland sebagai bahan tambahan reaktif, bukan sebagai pengganti pasir.

**Tabel 5.** Distribusi Ukuran Butir Red Mud

Ukuran Saringan (mm)	Nomor ASTM	Berat Tertahan (g)	% Tertahan	% Kumulatif Tertahan	% Lolos
4,75	No. 4	0,00	0,00	0,00	100,00
2,36	No. 8	0,00	0,00	0,00	100,00
1,18	No. 16	1,00	0,50	0,50	99,50
0,600	No. 30	2,00	1,00	1,50	98,50
0,300	No. 50	4,00	2,00	3,50	96,50
0,150	No. 100	8,00	4,00	7,50	92,50
0,075	No. 200	25,00	12,50	20,00	80,00
Pan	-	160,00	80,00	100,00	0,00
<b>Total</b>	-	<b>200,00</b>	<b>100,00</b>	-	-

### 3) Berat Isi

Hasil pengujian berat isi pada Tabel 6 dan Tabel 7 menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan antar jenis limbah. Fly ash memiliki berat isi lepas terendah sebesar 0,85 g/cm<sup>3</sup> (850 kg/m<sup>3</sup>) dan meningkat menjadi 1,10 g/cm<sup>3</sup> (1100 kg/m<sup>3</sup>) pada kondisi padat. Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan agregat halus alami, sehingga menegaskan bahwa fly ash lebih tepat dimanfaatkan sebagai bahan tambah mineral atau filler ringan dibandingkan sebagai pengganti pasir. Bottom ash menunjukkan berat isi yang lebih tinggi, yakni 1,10 g/cm<sup>3</sup> (1100 kg/m<sup>3</sup>) pada kondisi lepas dan 1,35 g/cm<sup>3</sup> (1350 kg/m<sup>3</sup>) pada kondisi

padat. Karakter ini mendekati kisaran berat isi pasir ringan, sehingga bottom ash berpotensi digunakan sebagai pengganti parsial agregat halus, terutama pada campuran beton non-struktural.

**Tabel 6.** Berat Isi Lepas (Loose Bulk Density) Limbah Industri

Material	Berat Isi Lepas (g/cm <sup>3</sup> )	Berat Isi Lepas (kg/m <sup>3</sup> )
Fly Ash	0,85	850
Bottom Ash	1,10	1100
Tailing Bauksit	1,45	1450
Red Mud	1,20	1200

**Tabel 7.** Berat Isi Padat (Compacted Bulk Density) Limbah Industri

Material	Berat Isi Padat (g/cm <sup>3</sup> )	Berat Isi Padat (kg/m <sup>3</sup> )
Fly Ash	1,10	1100
Bottom Ash	1,35	1350
Tailing Bauksit	1,65	1650
Red Mud	1,40	1400

Sementara itu, tailing bauksit mencatat berat isi tertinggi di antara semua sampel, yaitu 1,45 g/cm<sup>3</sup> (1450 kg/m<sup>3</sup>) pada kondisi lepas dan 1,65 g/cm<sup>3</sup> (1650 kg/m<sup>3</sup>) pada kondisi padat. Nilai ini hampir setara dengan berat isi pasir alam yang umumnya berkisar antara 1,6–1,7 g/cm<sup>3</sup>, sehingga memperkuat potensi tailing bauksit sebagai pengganti agregat halus dalam beton struktural. Adapun red mud memiliki berat isi menengah, yakni 1,20 g/cm<sup>3</sup> (1200 kg/m<sup>3</sup>) pada kondisi lepas dan 1,40 g/cm<sup>3</sup> (1400 kg/m<sup>3</sup>) pada kondisi padat. Dengan gradasi yang sangat halus, red mud lebih sesuai digunakan sebagai filler untuk meningkatkan kepadatan beton dibandingkan sebagai agregat utama.

#### 4) Berat Jenis dan Penyerapan Air

**Tabel 8.** Berat Jenis (Specific Gravity) Limbah Industri

Material	Berat Jenis (SSD)	Berat Jenis Kering (OD)	Berat Jenis Semu (Apparent)
Fly Ash	2,10	2,05	2,30
Bottom Ash	2,35	2,30	2,50
Tailing Bauksit	2,60	2,55	2,70
Red Mud	2,45	2,40	2,60

**Tabel 9.** Penyerapan Air Limbah Industri

Material	Penyerapan Air (%)
Fly Ash	1,5
Bottom Ash	6,0
Tailing Bauksit	3,5
Red Mud	8,0

Hasil pengujian berat jenis pada Tabel 8 menunjukkan variasi karakteristik yang mencerminkan perbedaan asal-usul dan struktur butir dari masing-masing limbah. Fly ash memiliki berat jenis relatif rendah, yakni 2,05–2,10, dengan berat jenis semu sebesar 2,30. Nilai ini lebih kecil dibandingkan agregat halus alam (umumnya 2,60–2,70), sehingga memperkuat posisinya sebagai bahan tambah mineral ringan. Penyerapan airnya juga rendah, hanya 1,5%, yang menandakan permukaan butir yang

halus dan tidak berpori. Sebaliknya, bottom ash menunjukkan berat jenis sedikit lebih tinggi (2,30–2,35) dengan berat jenis semu 2,50, namun memiliki daya serap air cukup besar, mencapai 6,0%. Kondisi ini mengindikasikan bahwa butiran bottom ash berpori, sehingga penggunaannya dalam campuran beton perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi kebutuhan air pencampur.

Tailing bauksit menunjukkan karakter paling mendekati agregat halus alami, dengan berat jenis 2,55–2,60 dan berat jenis semu 2,70, sementara penyerapan airnya sebesar 3,5%, masih dalam kisaran wajar untuk agregat halus. Hal ini memperkuat potensi tailing bauksit sebagai pengganti pasir alam dalam beton struktural. Sementara itu, red mud berada pada kategori menengah dengan berat jenis 2,40–2,45 dan berat jenis semu 2,60, namun mencatat penyerapan air tertinggi, yaitu 8,0%. Angka ini menunjukkan sifat porositas tinggi dan potensi masalah dalam kestabilan campuran, sehingga red mud lebih tepat difungsikan sebagai filler atau bahan tambahan dalam jumlah terbatas, bukan sebagai agregat utama.

## 5) Kadar Lumpur

**Tabel 10.** Kadar Lumpur pada Limbah Industri

<b>Material</b>	<b>Kadar Lumpur (%)</b>
Fly Ash	4,0
Bottom Ash	7,5
Tailing Bauksit	5,0
Red Mud	18,0

Hasil pengujian pada Tabel 10 menunjukkan bahwa kadar lumpur bervariasi cukup signifikan antar jenis limbah. Fly ash memiliki kadar lumpur terendah, yakni 4,0%, yang masih berada dalam batas toleransi penggunaan sebagai bahan campuran beton menurut standar agregat halus. Nilai ini sesuai dengan sifat fisiknya yang halus dan relatif homogen sehingga tidak menimbulkan masalah berarti terhadap kualitas campuran. Tailing bauksit menunjukkan kadar lumpur sedikit lebih tinggi, yaitu 5,0%, yang berada pada ambang batas persyaratan agregat halus ( $\leq 5\%$ ). Kondisi ini menandakan bahwa pemanfaatan tailing bauksit sebagai agregat halus masih memungkinkan, tetapi mungkin memerlukan pencucian atau pengolahan lebih lanjut untuk menurunkan kadar lumpur agar tidak mengganggu ikatan pasta semen.

Di sisi lain, bottom ash mencatat kadar lumpur sebesar 7,5%, yang telah melampaui standar maksimum untuk agregat halus dalam beton. Nilai ini mengindikasikan adanya fraksi butiran halus yang cukup banyak akibat porositas tinggi dari butiran bottom ash. Penggunaan bottom ash sebagai agregat halus dalam beton memerlukan perlakuan khusus, misalnya pencucian atau klasifikasi ukuran, untuk mengurangi kandungan lumpur yang berpotensi menurunkan kekuatan dan durabilitas beton. Sementara itu, red mud menunjukkan kadar lumpur tertinggi, yakni 18,0%, yang jauh melebihi standar yang diperbolehkan. Tingginya kadar lumpur pada red mud mencerminkan dominasi fraksi halus (silt dan clay) yang dapat mengganggu workability dan ikatan pasta semen. Oleh karena itu, red mud lebih sesuai difungsikan sebagai filler atau bahan tambahan dalam jumlah terbatas, bukan sebagai agregat utama dalam campuran beton.

### b. Analisis Perbandingan Antar Material

Hasil karakterisasi material menunjukkan perbedaan signifikan antar keempat limbah industri. Fly ash memiliki tekstur sangat halus, kadar lumpur rendah, penyerapan air kecil, dan berat jenis rendah, sehingga lebih sesuai sebagai bahan pozzolan. Bottom ash memiliki gradasi yang mendekati agregat halus, tetapi dengan penyerapan dan kadar lumpur yang lebih tinggi dari standar sehingga membutuhkan perlakuan pendahuluan. Tailing bauksit memiliki karakteristik paling mirip pasir alam dan memenuhi sebagian besar syarat agregat halus, sehingga paling potensial digunakan sebagai substitusi pasir. Red mud memiliki kadar lumpur dan penyerapan air sangat tinggi serta sifat kimia yang reaktif, sehingga

tidak direkomendasikan sebagai agregat, namun masih mungkin digunakan sebagai filler setelah stabilisasi. Perbandingan Karakteristik Fisik Material Limbah Industri dapat dilihat pada Tabel 11.

**Tabel 11.** Perbandingan Karakteristik Fisik Material Limbah Industri

Parameter	Fly Ash	Bottom Ash	Tailing Bauksit	Red Mud	Batas Standar Umum*
Dominasi Ukuran Butir	< 0,075 mm (sangat halus)	Halus–sedang, cenderung granular	Mirip pasir halus	Didominasi fraksi halus	–
Berat Jenis	2,05–2,30	2,30–2,50	2,55–2,70	2,40–2,60	2,50–2,70 (agregat halus, SNI 03-2461-2002)
Penyerapan Air (%)	1,5	6,0	3,5	8,0	< 3% (pasir baik), < 10% masih diizinkan
Kadar Lumpur (%)	4,0	7,5	5,0	18,0	Maks. 5% (SNI 03-2461-2002)
Berat Isi Padat (kg/m <sup>3</sup> )	–	–	±1650	–	1400–1900 (rentang umum agregat halus)
Potensi Penggunaan	Bahan tambahan pozzolan / substitusi semen	Substitusi parsial agregat halus (perlu perlakuan)	Substitusi agregat halus	Filler / substitusi semen terbatas (perlu stabilisasi)	–

### c. Potensi Aplikasi dalam Beton

Hasil karakterisasi fisik dasar dari keempat jenis limbah industri memberikan gambaran awal mengenai peluang pemanfaatannya dalam campuran beton. Berdasarkan standar agregat halus beton (ASTM C33)[10], parameter penting yang harus dipenuhi meliputi distribusi gradasi butir (SNI 03-2461-2002) [11], kadar lumpur maksimum 5%, berat jenis, serta penyerapan air. Sementara itu, untuk material pozzolan (SNI 15-3758-2004) [12], parameter yang lebih ditekankan adalah kehalusan (ASTM C618) [13], kandungan mineral, dan reaktivitas kimia.

Fly ash memiliki karakter yang paling sesuai sebagai material tambahan semen (Supplementary Cementitious Material/SCM). Distribusi butir yang sangat halus, berat jenis relatif rendah (2,05–2,30), serta penyerapan air rendah (1,5%) menjadikan fly ash mampu meningkatkan workability beton serta berkontribusi pada kekuatan jangka panjang melalui reaksi pozzolanik. Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan fly ash sebagai substitusi parsial semen pada kisaran 15–30% dapat meningkatkan durabilitas beton, menurunkan panas hidrasi, serta mengurangi emisi karbon dari produksi semen portland.

Bottom ash memperlihatkan karakter granulasi yang mendekati agregat halus alami, meskipun kadar lumpur yang cukup tinggi (7,5%) menjadi kendala. Dengan perlakuan pendahuluan seperti pencucian atau screening ulang, bottom ash dapat dimanfaatkan sebagai substitusi parsial pasir dalam beton pada kisaran 10–20%. Penelitian terdahulu melaporkan bahwa penggunaan bottom ash dalam kadar terbatas dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap suhu tinggi, namun berpotensi menurunkan kekuatan awal akibat porositas yang relatif besar.

Tailing bauksit merupakan material dengan karakter yang paling mendekati agregat halus konvensional. Berat jenis tinggi (2,55–2,70) dan distribusi butir yang relatif sesuai membuatnya sangat prospektif

sebagai pengganti pasir, khususnya di wilayah dengan ketersediaan melimpah seperti Kabupaten Ketapang. Dengan kadar lumpur yang masih berada di batas maksimum standar (5,0%) serta penyerapan air moderat (3,5%), pemanfaatan tailing bauksit dalam beton memerlukan pencucian atau pengolahan terbatas untuk menjamin kualitas campuran [14]. Potensi pemanfaatan ini sangat strategis, mengingat keterbatasan pasokan pasir alam di banyak daerah.

Sementara itu, red mud menunjukkan keterbatasan signifikan akibat kadar lumpur yang sangat tinggi (18,0%) serta penyerapan air besar (8,0%). Karakter dominan fraksi halus dan sifat kimia yang reaktif (tingginya kandungan alkali) membatasi penggunaannya sebagai agregat. Namun, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa red mud dapat dimanfaatkan sebagai filler atau substitusi parsial semen dalam jumlah kecil (<10%), setelah melalui proses stabilisasi kimia seperti penambahan kapur atau kalsinasi [15]. Dengan demikian, red mud lebih tepat diarahkan sebagai bahan tambahan pendukung, bukan sebagai komponen utama beton.

#### **d. Peluang dan Keterbatasan Pemanfaatan**

Pemanfaatan limbah industri sebagai bahan konstruksi berkelanjutan memiliki peluang yang cukup besar, terutama di wilayah Kabupaten Ketapang yang menjadi lokasi penelitian. Secara geografis, Ketapang memiliki cadangan tailing bauksit yang sangat melimpah akibat aktivitas penambangan dan pengolahan bauksit, sementara keberadaan PLTU Ketapang dengan kapasitas 20 MW secara rutin menghasilkan fly ash dan bottom ash sebagai limbah sampingan. Hal ini menciptakan potensi pasokan material alternatif yang berkesinambungan untuk mendukung kebutuhan infrastruktur transportasi di daerah tersebut.

Peluang pemanfaatan terlihat jelas pada fly ash dan tailing bauksit. Fly ash berpotensi sebagai bahan pengganti parsial semen karena sifat pozzolaniknya, sehingga dapat menurunkan konsumsi semen portland sekaligus mengurangi emisi karbon. Tailing bauksit, dengan karakter fisik yang menyerupai pasir, menawarkan solusi nyata untuk mengatasi keterbatasan pasokan agregat alam. Bottom ash juga memiliki peluang sebagai substitusi parsial agregat halus, terutama jika melalui perlakuan pendahuluan untuk mengurangi kadar lumpur dan porositas. Bahkan red mud, meskipun memiliki keterbatasan signifikan, tetap berpotensi dimanfaatkan sebagai filler atau aditif setelah proses stabilisasi.

Namun demikian, terdapat sejumlah keterbatasan teknis dan non-teknis yang harus diperhatikan. Secara teknis, perbedaan karakteristik fisik antar limbah menuntut perlakuan khusus sebelum digunakan dalam campuran beton. Tingginya kadar lumpur pada red mud dan bottom ash dapat menurunkan ikatan pasta-semen, sehingga mempengaruhi kekuatan dan durabilitas beton. Penyerapan air yang relatif tinggi juga berpotensi meningkatkan kebutuhan air dalam campuran, yang pada akhirnya dapat mengganggu rasio air-semen. Selain itu, aspek kimia seperti kandungan alkali tinggi pada red mud dapat menimbulkan masalah pada durabilitas jangka panjang, sehingga perlu kajian mendalam mengenai stabilitas kimia.

Dari sisi non-teknis, tantangan utama terletak pada ketersediaan standar teknis dan regulasi untuk pemanfaatan limbah industri dalam konstruksi. Hingga saat ini, pemanfaatan fly ash sudah banyak diatur dalam standar internasional (ASTM C618, SNI 15-3758-2004), namun untuk tailing bauksit maupun red mud, regulasi dan pedoman aplikatif masih terbatas. Aspek logistik dan biaya pengolahan juga harus diperhitungkan, terutama jika diperlukan proses pencucian atau stabilisasi.

Dengan demikian, peluang pemanfaatan limbah industri dalam infrastruktur transportasi di Kabupaten Ketapang cukup besar, tetapi perlu strategi yang tepat dalam mengatasi keterbatasannya. Pendekatan yang paling memungkinkan adalah kombinasi pemanfaatan, yakni penggunaan fly ash sebagai bahan tambah semen, tailing bauksit sebagai agregat halus, bottom ash sebagai substitusi parsial pasir, dan red mud sebagai filler setelah perlakuan kimia. Melalui integrasi pemanfaatan tersebut, diharapkan pembangunan infrastruktur transportasi dapat lebih berkelanjutan sekaligus mendukung program pengurangan dampak lingkungan dari industri energi dan pertambangan.

## **4. KESIMPULAN**

Hasil karakterisasi fisik dasar menunjukkan bahwa limbah industri di Kabupaten Ketapang memiliki potensi berbeda dalam aplikasi beton. Fly ash dengan ukuran butir sangat halus, berat jenis rendah, dan penyerapan air kecil lebih sesuai digunakan sebagai bahan tambah pozzolan untuk meningkatkan

workability serta durabilitas beton. Bottom ash memiliki gradasi yang mendekati agregat halus alami dan berat jenis cukup tinggi, namun kadar lumpur relatif besar sehingga memerlukan perlakuan pendahuluan sebelum dimanfaatkan sebagai substitusi parsial pasir. Tailing bauksit menampilkan sifat fisik yang paling menyerupai pasir alam dengan berat jenis tinggi dan penyerapan air moderat, menjadikannya kandidat utama sebagai agregat halus alternatif. Sementara itu, red mud memiliki kadar lumpur dan penyerapan air tinggi, sehingga penggunaannya lebih tepat sebagai filler atau substitusi semen dalam jumlah kecil setelah melalui proses stabilisasi kimia.

Secara umum, pemanfaatan limbah industri ini memberikan peluang besar untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam sekaligus mendukung pembangunan infrastruktur transportasi berkelanjutan di Kabupaten Ketapang. Namun, keterbatasan teknis seperti kandungan lumpur tinggi, kebutuhan pengolahan awal, dan ketiadaan standar spesifik untuk beberapa material perlu menjadi fokus penelitian lanjutan dan pengembangan regulasi agar pemanfaatan dapat dilakukan secara optimal, aman, dan berkelanjutan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi atas dukungan pendanaan dalam pelaksanaan penelitian ini melalui skema pendanaan penelitian dasar tahun 2025. Dukungan ini sangat berarti dalam pengembangan inovasi material ramah lingkungan berbasis pemanfaatan limbah plastik sebagai upaya mendukung konstruksi berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Kamil dan J. Purnomo, "Evaluation of Compressive Strength of Concrete with Replacement of Conventional Coarse and Fine Aggregates Using Palm Kernel Shell and Coconut Husk," *dts*, hlm. 60–67, Des 2024, doi: 10.23917/dts.v17i2.6167.
- [2] L. Herlina, E. Kurniyaningrum, S. Z. Rizkina, G. F. Kuswanda, dan U. F. Faisal, "Analisis Penggunaan Limbah Kalsit sebagai Pengganti Semen terhadap Sifat Mekanik pada Beton," *Jice*, vol. 5, no. 1, hlm. 46–55, Mar 2025, doi: 10.35583/jice.v5i1.103.
- [3] E. V. K. Tasik, A. A. Sila, dan C. Mayaindrawati, "PENGARUH PEMANFAATAN ABU SERABUT KELAPA SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON".
- [4] Mutiara Adhe Utami, Sartika Nisumanti, dan Ratih Baniva, "PENGARUH BATU BATA PRESS SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT KASAR TERHADAP NILAI KUAT TEKAN BETON," *JRFTSP*, vol. 12, no. 2, hlm. 203–210, Sep 2023, doi: 10.37037/jrftsp.v12i2.137.
- [5] M. Eniarti, M. Syahrony, S. Rawiana, T. Sulistyowati, dan S. Sulistyowati, "PEMANFAATAN CAMPURAN SERBUK BATU APUNG DENGAN ABU SEKAM PADI SEBAGAI PENGGANTI SEMEN: The Utilization of Pumice Powder and Rice Husk Ash as a Substitute for Portland Cement," *SS*, vol. 11, no. 1, hlm. 19–28, Mar 2024, doi: 10.29303/spektrum.v11i1.341.
- [6] R. Aprillia, W. Mukhtar, S. Setiawati, dan G. C. Asbanu, "Karakteristik tanah bekas tambang bauksit dan tailing di Kabupaten Sanggau, Kalimantan Barat," *JPIS*, vol. 10, no. 2, hlm. 208–217, Des 2021, doi: 10.31571/saintek.v10i2.3500.
- [7] N. A. Ginting, A. Nirmala, S. Syahrudin, dan H. Sutrisno, "Analisis Pengaruh Penambahan Tailing Bauksit Sebagai Agregat Halus Pada Pembuatan Paving Block Di PT. Anugerah Borneo Maruya Persada," *JTLB*, vol. 11, no. 2, hlm. 338–347, Jul 2023, doi: 10.26418/jtlb.v11i2.64977.
- [8] F. F. Bahar dan S. Wiranto, "Inovasi Material dalam Beton Berkelanjutan: Studi Literatur tentang Pemanfaatan Fly Ash dengan Peningkatan Kekuatan Beton," vol. 6, 2024.
- [9] A. T. Munthe dan T. Dewangga, "Analisis Pengaruh Substitusi Parsial Semen Dan Agregat Halus Menggunakan Fly Ash Dan Cangkang Kerang Darah Terhadap Kuat Tekan Beton," *G-Tech*, vol. 8, no. 4, hlm. 2850–2860, Okt 2024, doi: 10.70609/gtech.v8i4.5454.
- [10] "ASTM International, 'Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33C33M-18),' ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2018..pdf."

- [11]“Badan Standardisasi Nasional, ‘Spesifikasi Agregat Halus untuk Beton (SNI 03-2461-2002),’ BSN, Jakarta, 2002..pdf.”
- [12]“Badan Standardisasi Nasional, ‘Pozzolan untuk Bahan Bangunan (SNI 15-3758-2004),’ BSN, Jakarta, 2004..pdf.”
- [13]“ASTM International, ‘Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618-19),’ ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2019..pdf.”
- [14]A. M. Alamsyah, Pratikso, R. Mudiyo, dan A. Wahyudi Biantoro, “Utilization of bauxite waste as a fine aggregate material for concrete roads: A critical review,” *BIO Web Conf.*, vol. 159, hlm. 06004, 2025, doi: 10.1051/bioconf/202515906004.
- [15]M. A. Aziz, A. Aziz Al Gani, dan I. Sudarsono, “PENGARUH PEMANFAATAN LIMBAH TAMBANG BAUKSIT DAERAH SANGGAU SEBAGAI PENGGANTI AGREGAT HALUS TERHADAP KUAT TEKAN BETON,” *DEARSIP*, vol. 5, no. 01, hlm. 27–34, Mei 2025, doi: 10.52166/dearsip.v5i01.7936.