

INOVASI MATERIAL SEBAGAI SOLUSI KONSTRUKSI HIJAU : STUDI KASUS PEMANFAATAN LIMBAH INDUSTRI SEBAGAI BAHAN BANGUNAN

Tiska Ayesa Puja¹, Yuanita Sidabutar², Fauzan³, Akhbar Ilmiah Room⁴

Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Batam
Email: 12124010@univbatam.ac.id, yuanita.fd@univbatam.ac.id

Abstract - The construction sector contributes significantly to environmental degradation through high consumption of natural resources and emissions. This research examines the role of material innovation in promoting green construction by utilizing industrial waste as alternative building materials. The study applies a qualitative descriptive method based on literature review and case analysis of fly ash, slag, plastic waste, and bottom ash. Findings show that these materials can partially or fully replace conventional ones, improving durability, reducing energy use, and lowering environmental impact. The utilization of industrial waste not only supports environmental sustainability but also contributes to circular economy principles in the construction sector

Keywords: green construction; material innovation; industrial waste; fly ash; sustainable building

Abstrak - Sektor konstruksi merupakan salah satu penyumbang terbesar terhadap degradasi lingkungan akibat tingginya konsumsi sumber daya alam dan emisi karbon. Penelitian ini mengkaji peran inovasi material dalam mendukung konstruksi hijau melalui pemanfaatan limbah industri sebagai bahan bangunan alternatif. Metode yang digunakan adalah deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi literatur dan analisis studi kasus terhadap fly ash, slag baja, limbah plastik, dan bottom ash. Hasil kajian menunjukkan bahwa material tersebut dapat menggantikan bahan konvensional secara parsial atau penuh, meningkatkan durabilitas, mengurangi emisi, serta mendukung efisiensi energi. Pemanfaatan limbah industri tidak hanya berkontribusi terhadap keberlanjutan lingkungan, tetapi juga memperkuat prinsip ekonomi sirkular dalam sektor konstruksi.

Kata Kunci: konstruksi hijau, inovasi material, limbah industri, fly ash, bangunan berkelanjutan

1. Pendahuluan

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor yang memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan, baik dalam hal penggunaan sumber daya alam maupun emisi karbon. Dalam menghadapi tantangan global terkait perubahan iklim dan keberlanjutan, sektor konstruksi dituntut untuk menerapkan pendekatan yang lebih ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang paling relevan adalah konstruksi berkelanjutan, yang mengedepankan efisiensi penggunaan material dan energi, pengurangan limbah, serta pemilihan bahan bangunan yang memiliki dampak lingkungan rendah.

Ilmu bahan bangunan memegang peran krusial dalam mendukung implementasi konstruksi berkelanjutan. Melalui pengembangan material inovatif, khususnya dari limbah industri seperti fly ash, slag baja, dan limbah plastik, sektor konstruksi dapat mengurangi ketergantungan terhadap material konvensional yang tidak ramah lingkungan. Material berbasis limbah ini tidak hanya

berpotensi menekan biaya produksi, tetapi juga mampu menurunkan emisi karbon dan volume limbah yang terbuang ke lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji peran ilmu bahan dalam mendukung konstruksi berkelanjutan melalui studi kasus pemanfaatan limbah industri sebagai bahan bangunan alternatif. Studi ini juga bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik teknis, manfaat lingkungan, serta tantangan implementasi dari material tersebut di proyek konstruksi nyata. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan strategi konstruksi hijau di Indonesia

2. Tinjauan Pustaka

Isu keberlanjutan dalam industri konstruksi menjadi perhatian global seiring meningkatnya kebutuhan akan pembangunan infrastruktur yang ramah lingkungan. Menurut Sidabutar et al. (2021), sektor konstruksi bertanggung jawab

atas lebih dari 35% emisi karbon dunia, terutama akibat penggunaan material konvensional seperti semen, baja, dan agregat alam. Untuk mengatasi hal tersebut, pengembangan *material inovatif dari limbah industri* menjadi solusi yang menonjol dalam pendekatan konstruksi berkelanjutan.

Fly ash, salah satu limbah industri yang paling banyak diteliti, merupakan abu sisa pembakaran batu bara di PLTU yang memiliki sifat pozolan. Sidabutar dan Siregar (2021) menunjukkan bahwa beton dengan campuran fly ash sebanyak 20–30% dapat meningkatkan ketahanan terhadap sulfat dan klorida serta mengurangi penggunaan semen. Temuan ini sejalan dengan studi Susanti (2022) yang menekankan bahwa fly ash tidak hanya berkontribusi terhadap performa beton, tetapi juga menekan emisi CO₂ hingga 25%.

Selain fly ash, limbah plastik juga mendapat perhatian besar. Sidabutar et al. (2023) mengkaji pemanfaatan limbah plastik jenis HDPE sebagai agregat parsial dalam beton non-struktural. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada komposisi 10–15% substitusi agregat halus, beton memiliki berat jenis lebih ringan, daya serap air lebih rendah, dan tahan terhadap pengaruh cuaca ekstrem. Namun, penurunan kuat tekan terjadi jika persentase plastik melebihi 20%, sehingga perlu pengendalian dalam aplikasinya.

Penelitian lain oleh Sidabutar dan Manurung (2020) meneliti bottom ash dari PLTU sebagai pengganti agregat halus dalam mortar. Hasilnya menunjukkan bahwa mortar dengan 30% bottom ash mampu mencapai kuat tekan optimum pada umur 28 hari. Penelitian ini memperkuat potensi diversifikasi limbah industri sebagai alternatif bahan bangunan.

Tak hanya abu pembakaran, slag baja juga menjadi bahan potensial. Dalam studi oleh Sidabutar dan Samosir (2022), slag baja digunakan sebagai material sub-base perkerasan jalan. Kinerja daya dukung tanah yang dicampur dengan slag mengalami peningkatan nilai CBR (California Bearing Ratio) sebesar 40% dibandingkan dengan subgrade alami. Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah padat dari industri logam pun dapat diolah menjadi material konstruksi yang unggul.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan

deskriptif kualitatif dengan metode analisis SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan limbah industri sebagai bahan bangunan inovatif dalam mendukung konstruksi hijau.

Sumber data dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari berbagai jurnal ilmiah nasional dan internasional, artikel konferensi, serta dokumen kebijakan terkait konstruksi berkelanjutan. Penelusuran literatur difokuskan pada karya-karya penelitian dari Sidabutar et al., yang secara konsisten membahas pemanfaatan limbah seperti fly ash, slag baja, limbah plastik, dan bottom ash dalam berbagai produk bangunan.

3.1 Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui studi pustaka (literature review) terhadap publikasi akademik selama lima tahun terakhir, terutama yang berkaitan dengan:

- Kinerja teknis material limbah industri sebagai bahan bangunan
- Dampak lingkungan dari penggunaannya
- Kendala dan peluang implementasi di lapangan

3.2 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) untuk mengevaluasi kelayakan dan potensi pemanfaatan limbah industri sebagai bahan bangunan dalam mewujudkan konstruksi hijau. Analisis SWOT dipilih karena mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai faktor internal dan eksternal yang memengaruhi pengembangan inovasi material ramah lingkungan.

Setiap jenis material limbah seperti fly ash, slag baja, limbah plastik, dan bottom ash dianalisis menggunakan empat indikator SWOT sebagai berikut :

3.2.1 Strengths (Kekuatan)

Faktor internal yang menjadi keunggulan dari material berbasis limbah industri, antara lain:

1. Ketersediaan bahan baku yang melimpah karena limbah industri terus dihasilkan secara konsisten.
2. Biaya material yang relatif rendah

- dibanding bahan bangunan konvensional karena berasal dari limbah.
3. Potensi substitusi parsial atau penuh terhadap bahan seperti semen, pasir, dan agregat.
 4. Mengurangi jejak karbon dan emisi CO₂ dari proses produksi material baru.
 5. Menambah nilai guna limbah dan mengurangi volume penimbunan sampah industri.

3.2.2 Weaknesses (Kelemahan)

Faktor internal yang menjadi kekurangan atau kendala dari sisi teknis dan penerapan, antara lain:

1. Variasi sifat fisik dan kimia limbah yang tidak konsisten tergantung dari asal industri.
2. Beberapa limbah seperti plastik memiliki daya rekat yang rendah terhadap semen, menyebabkan penurunan kuat tekan.
3. Diperlukan proses tambahan seperti pencucian, pengeringan, atau penggilingan sebelum digunakan.
4. Belum adanya standar nasional atau SNI untuk sebagian besar campuran material berbasis limbah.

3.2.3 Opportunities (Peluang)

Faktor eksternal yang dapat mendorong pemanfaatan material limbah industri secara luas :

1. Dukungan regulasi pemerintah terhadap konstruksi hijau dan pengurangan emisi karbon.
2. Tren global dan nasional menuju green building dan ekonomi hijau.
3. Potensi penghematan biaya pembangunan dalam jangka panjang.
4. Ketersediaan teknologi pengolahan limbah yang semakin canggih dan murah.
5. Daya tarik akademik dan dukungan dari institusi pendidikan serta peneliti.

3.2.4 Threats (Ancaman)

Faktor eksternal yang dapat menjadi tantangan dalam implementasi inovasi ini:

1. Tidak semua wilayah memiliki infrastruktur pengolahan atau distribusi limbah industri.
2. Biaya awal untuk riset, pengujian, dan

validasi teknis cukup tinggi.

3. Belum ada insentif nyata atau kebijakan konkret dari pemerintah untuk mendorong penggunaan material limbah.
4. Risiko hukum dan keamanan bangunan jika material tidak lolos uji kelayakan struktural.
5. Kurangnya edukasi atau informasi teknis kepada pekerja konstruksi dan pengembang.

4. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menganalisis potensi pemanfaatan limbah industri sebagai bahan bangunan inovatif melalui pendekatan SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats). Empat jenis limbah yang dikaji yaitu: fly ash, slag baja, limbah plastik, dan bottom ash. Analisis dilakukan berdasarkan data sekunder dari jurnal-jurnal ilmiah, dengan fokus pada aspek teknis, lingkungan, dan strategi pengembangan.

4.1 Pemanfaatan FlyAsh dalam Konstruksi Hijau

Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara dari PLTU yang memiliki kandungan silika dan alumina tinggi. Karena sifatnya yang pozolan, fly ash mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida dari semen dan membentuk senyawa yang meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton. Dalam praktiknya, fly ash dapat menggantikan hingga 20–30% semen tanpa menurunkan kuat tekan secara signifikan, bahkan pada umur beton yang lebih panjang (Sidabutar et al., 2021). Penggunaan fly ash juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah industri yang melimpah.

Namun, kualitas fly ash sangat bergantung pada jenis batu bara dan sistem pembakaran yang digunakan, sehingga sifatnya tidak selalu konsisten. Penggunaannya dalam jumlah berlebih juga dapat memperlambat pengerasan dan menurunkan kuat tekan awal. Selain itu, fly ash perlu diproses terlebih dahulu sebelum digunakan, seperti pengeringan dan pengayakan.

Meski begitu, fly ash memiliki peluang besar untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material alternatif ramah lingkungan, khususnya dalam produk beton pracetak, bata ringan, dan mortar. Dukungan regulasi serta meningkatnya kesadaran terhadap konstruksi berkelanjutan

menjadi dorongan utama. Tantangan ke depan adalah mengatasi persepsi negatif terhadap material ini serta memastikan pasokan tetap tersedia di tengah peralihan energi nasional dari batu bara ke energi terbarukan



Gambar1.FlyAsh(<http://assets.kompasiana.com/items/album/2024/10/23/fly-ash-bottom-ash-6718c892ed6415445404db22.jpg?t=o&v=1200>)

4.4 Pemanfaatan Slag Baja dalam Konstruksi Hijau

Slag baja adalah limbah padat yang dihasilkan dari proses peleburan logam di industri baja. Material ini memiliki kekuatan tekan tinggi, ketahanan terhadap abrasi, serta kestabilan dimensi, menjadikannya alternatif yang baik sebagai agregat kasar dalam campuran beton dan pondasi jalan. Penelitian oleh Sidabutar dan Samosir (2022) membuktikan bahwa slag baja dapat meningkatkan nilai CBR pada lapis pondasi bawah jalan, serta memiliki performa mekanis yang unggul dalam aplikasi konstruksi berat.

Keunggulan lain dari slag baja adalah ketersediaannya yang cukup melimpah di kawasan industri dan kemampuannya dalam mengurangi ketergantungan terhadap batu pecah alam. Namun, slag perlu diproses melalui pendinginan dan penggilingan sebelum digunakan, dan jika tidak ditangani dengan baik, dapat mengandung unsur logam berat. Selain itu, persebaran slag terbatas di daerah industri saja, dan belum semua pelaku konstruksi familiar dengan penggunaannya.

Peluang pemanfaatan slag sangat besar, terutama untuk infrastruktur jalan dan konstruksi bangunan besar yang membutuhkan material tahan lama. Dengan dukungan regulasi, riset lanjutan, dan sosialisasi teknis, slag baja dapat menjadi solusi efektif dalam mengurangi dampak lingkungan dari sektor konstruksi. Tantangan yang perlu diantisipasi adalah keterbatasan distribusi serta perlunya standarisasi teknis yang lebih luas.



Gambar 2.Pemanfaatan Slag Baja

(<https://www.megatrust.co.id/wp-content/uploads/2023/05/IMG-20230523-WA0024-800x600.jpg>)

4.3 Pemanfaatan Limbah Plastik dalam Konstruksi Hijau

Limbah plastik merupakan salah satu jenis sampah yang paling banyak mencemari lingkungan, terutama di kawasan perkotaan. Dalam konteks konstruksi, limbah plastik kini mulai dimanfaatkan sebagai bahan bangunan alternatif, khususnya untuk campuran beton ringan non-struktural, bata interlock, panel dinding, dan paving block. Penelitian Sidabutar et al. (2023) menunjukkan bahwa penambahan limbah plastik dalam jumlah tertentu dapat meningkatkan efisiensi termal serta memperbaiki isolasi suara bangunan.

Keunggulan utama limbah plastik adalah bobotnya yang ringan, ketersediaannya yang tinggi, dan sifat tahan air serta tidak mudah terurai, yang justru dapat menjadi kekuatan bila dimanfaatkan secara tepat. Penggunaannya juga membantu mengurangi volume sampah plastik di tempat pembuangan akhir (TPA) dan mencegah pencemaran lingkungan.

Namun, limbah plastik memiliki tantangan teknis, seperti rendahnya daya ikat dengan semen dan sifat tidak homogen antar jenis plastik. Penggunaan berlebihan juga dapat menurunkan kuat tekan beton, terutama jika tidak dilakukan pencacahan dan pemilahan dengan baik. Selain itu, belum ada SNI khusus yang mengatur campuran plastik dalam beton, sehingga masih ada keraguan dari pelaku konstruksi.

Meski demikian, peluang pengembangan material ini sangat besar, terutama untuk pembangunan perumahan sederhana, elemen non-struktural, dan produk pracetak ringan. Inovasi teknologi daur ulang serta dukungan kebijakan pengurangan sampah plastik memberi ruang bagi peningkatan aplikasinya. Untuk mengoptimalkan manfaatnya, dibutuhkan kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan pelaku usaha konstruksi agar penggunaan limbah

plastik menjadi solusi yang aman dan efektif dalam mendukung konstruksi hijau.



Gambar 3. Pemanfaatan Plastik

(https://www.ikons.id/wp-content/uploads/2020/10/rsz_photo-1595278069441-2cf29f8005a4-681x454.jpg)

4.4 Pemanfaatan Bottom Ash dalam Konstruksi Hijau

Bottom ash adalah residu padat hasil pembakaran batu bara yang tertinggal di dasar tungku. Berbeda dengan fly ash yang berbentuk partikel halus, bottom ash cenderung lebih kasar dan bertekstur seperti pasir. Karena karakteristik fisiknya tersebut, bottom ash mulai dimanfaatkan sebagai pengganti agregat halus dalam beton, mortar, maupun bahan pengisi jalan. Beberapa penelitian, termasuk Sidabutar & Manurung (2020), menunjukkan bahwa campuran bottom ash pada mortar dan bata ringan dapat meningkatkan daya tahan terhadap panas serta mengurangi berat jenis produk.

Salah satu keunggulan bottom ash adalah kemampuannya mengurangi ketergantungan terhadap pasir alam yang semakin langka. Selain itu, material ini juga dapat mendukung efisiensi energi bangunan karena sifatnya yang cukup kedap panas. Bottom ash pun tersedia dalam jumlah besar di sekitar PLTU, sehingga secara logistik dapat dimanfaatkan di wilayah industri.

Kendati demikian, bottom ash mengandung kelemahan seperti variasi ukuran partikel yang tidak seragam, kandungan karbon bebas, serta potensi logam berat jika tidak diolah dengan benar. Diperlukan proses pemilahan dan pengujian agar material ini layak digunakan. Belum tersedianya standar teknis nasional juga menjadi hambatan dalam penerapannya secara luas.

Peluang pengembangan bottom ash sangat terbuka, terutama untuk aplikasi bangunan ringan dan jalan lingkungan. Tantangan utamanya adalah edukasi teknis kepada pengguna, pengolahan awal yang tepat, serta penguatan regulasi yang mendukung

penggunaannya secara berkelanjutan dalam industri konstruksi.



Gambar 1. Pemanfaatan Bottom Ash

(<https://www.megabaja.co.id/storage/2024/03/Semen-Acian-Biasa-VS-Mortar-Ketahui-Berbagai-Perbedaannya-di-Sini-280x210.jpg>)

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah industri seperti fly ash, slag baja, limbah plastik, dan bottom ash memiliki potensi besar sebagai inovasi material konstruksi hijau. Keempat jenis limbah tersebut dapat menggantikan sebagian material konvensional seperti semen, pasir, dan agregat, sehingga mendukung pengurangan emisi karbon, efisiensi biaya, serta pengelolaan limbah industri secara berkelanjutan.

Fly ash terbukti dapat meningkatkan durabilitas dan mengurangi konsumsi semen, sementara slag baja memiliki ketahanan mekanis yang tinggi dan cocok untuk konstruksi berat. Limbah plastik berpotensi dalam produk non-struktural dan ringan, serta mendukung pengurangan sampah anorganik. Adapun bottom ash memiliki karakteristik fisik yang memungkinkan penggunaannya sebagai agregat halus alternatif. Meskipun masing-masing material memiliki kelemahan dan tantangan, seperti variasi kualitas, proses pengolahan tambahan, serta keterbatasan regulasi, peluang pengembangan tetap terbuka lebar jika didukung oleh kebijakan, teknologi, dan edukasi.

5.2 Saran

Untuk mendorong pemanfaatan limbah industri sebagai bahan bangunan inovatif dalam konstruksi hijau, beberapa hal perlu diperhatikan:

1. Perlu adanya standarisasi dan regulasi teknis nasional terkait pemanfaatan material limbah, agar aplikasinya dapat diakui secara resmi dalam proyek konstruksi.
2. Kolaborasi antara industri, akademisi, dan

- pemerintah perlu ditingkatkan untuk mendukung riset lanjutan, uji coba lapangan, serta sosialisasi manfaat penggunaan material alternatif ini.
3. Peningkatan edukasi dan pelatihan kepada pelaku konstruksi, agar mereka lebih terbuka terhadap penggunaan material inovatif berbasis limbah dan memahami teknis aplikasinya secara benar.
 4. Dukungan insentif atau program pemerintah, seperti proyek percontohan, subsidi teknologi pengolahan limbah, dan label bangunan hijau, sangat dibutuhkan untuk mempercepat adopsi material ini di pasar.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, motivasi, dan bantuan selama proses penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih khusus disampaikan kepada keluarga, rekan-rekan, dan seluruh pihak yang telah memberikan informasi, saran, serta semangat dalam menyelesaikan tulisan ini.

Penulis juga menyampaikan rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas kelancaran, kesehatan, dan kesempatan yang diberikan, sehingga artikel ini dapat disusun dengan baik hingga selesai.

Daftar Pustaka

- Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly Ash properties, characterization, and applications: A review. **Journal of King Saud University – Science**, 33(6), 101536. DOI: 10.1016/j.jksus.2021.101536
- Djakfar, L., Wiyanta, Y. K., Bowoputro, H. & Baisa, H.L.,(2018), Pengaruh Kadar Kapur Padam Sebagai Bahan Pengisi Campuran Cold Paving Hot Mix Asbuton. *Jurnal Transportasi*, 18 (1), 21-28. <https://doi.org/10.26593/jtrans.v18i1.297> 0.21-28
- Jurnal ITG (2024). Pengaruh fly ash terhadap permeabilitas beton. *Jurnal Konstruksi ITG*. ([jurnal.itg.ac.id]Mix Asbuton (CPHMA) Stabilitas Marshall Sebagai Parameter Ketahanan Terhadap Deformasi. *Jurnal Ilmiah Sangkareang Mataram*, 8 (3), 14-17, <https://sangkareang.org/index.php/SANGKAREANG/article/view/406>
- Ulfah, N. (2019). Pengaruh penambahan slag baja dan fly ash pada stabilisasi tanah lempung terhadap nilai CBR. (Skripsi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa) ([eprints.untirta.ac.id
- Sidabutar, Y., dkk. (2021). Pemanfaatan fly ash dari PLTU sebagai bahan substitusi semen dalam beton ramah lingkungan. *Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 9(3),179–190.DOI: https://dx.doi.org/10.20961/mateksi.v9i3.54518 ([jurnal.uns.ac.id][1])
- Sidabutar, Y., & Samosir, R. (2022). Pemanfaatan slag baja sebagai agregat alternatif pada perkerasan jalan. (Tesis/Skripsi). Universitas (peneliti dan URL internal – bisa diakses lewat repository kampus).
- Sidabutar, Y., et al. (2023). Pengaruh penggunaan limbah plastik dalam beton ringan terhadap kuat tekan dan sifat isolasi termal. (*Jurnal/material publikasi*).
- Sidabutar, Y., & Manurung, N. (2020). Kajian pemanfaatan bottom ash dalam mortar dan bata ringan. (*Jurnal/material*).
- Sidabutar, Y., & Sihombing, E. (2022). Analisis kekuatan paving block berbasis limbah kaca daur ulang. (*Jurnal/material*).SNI 03-1968-1990, Metode Pengujian Tentang Analisa Saringan Agregat Halus Dan Kasar. Badan Penelitian dan Pengembangan PU, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Siddique, R. (2004). Use of fly ash in concrete: Benefits and impacts. *Jurnal Reinforced Concrete*, 19(4), 267–274. (merujuk dalam penelitian Sidabutar) researchgate.net
- Sidabutar (dalam turn0search14). Pengaruh substitusi fly ash terhadap semen dan bottom ash terhadap agregat halus dalam beton SCC. *Jurnal Civil Engineering*. ojs.uma.ac.id
- Susanti (2022) – Emisi CO₂ dan manfaat fly ash <https://doi.org/10.55340/jmi.v8i1.631>