Jurnal Ilmiah Kanderang Tingang
Vol.17 No.2 Juli-Desember 2026
FKIP Universitas Palangka Raya

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Kajian Teoretis Pemanfaatan Limbah Lokal Sebagai Bahan Alternatif Untuk Konstruksi Berkelanjutan Dalam Pembelajaran Teknologi Beton

Tuah[1], Topan Eka Putra[1*], Revianti Coenraad[1], Danar Ariangga Windra Gautama[1], Yosevina[1], Heryanto Siahaan[1], Wafa Karama[1]
[1]Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Palangka Raya, Indonesia
*Email: topanekaputra@ptb.upr.ac.id

Diterima:13-10-2026; Disetujui:06-11-2026; Dipublikasi:09-11-2026

ABSTRAK

Sektor konstruksi memerlukan material yang mampu memenuhi kinerja teknis sekaligus mengurangi konsumsi sumber daya dan dampak lingkungan. Penelitian ini mengembangkan kerangka teoretis yang mengintegrasikan pemanfaatan limbah lokal, konstruksi berkelanjutan, dan pembelajaran teknologi beton dalam Pendidikan Teknik Bangunan, dengan fokus regional pada Kalimantan Tengah dan Kota Palangka Raya. Kajian pustaka integratif dipadukan dengan data kontekstual regional. Kalimantan Tengah menghasilkan 333,43 ribu ton gabah kering giling pada tahun 2025, sedangkan luas areal kelapa sawit pada tahun 2023 mencapai sekitar 1,94 juta ha di tingkat provinsi dan 13.873,64 ha di Palangka Raya. Timbunan sampah padat perkotaan Palangka Raya mencapai 156,01 ton/hari pada tahun 2023, meskipun fraksi limbah konstruksi belum dikuantifikasi secara terpisah. Hasil sintesis memprioritaskan abu sekam padi, residu pengolahan kelapa sawit, beton daur ulang, serta limbah bata/keramik untuk karakterisasi berbasis sumber pada penelitian berikutnya. Kelayakan penggunaannya harus diverifikasi melalui pengujian kimia, fisik, beton segar, mekanik, dan durabilitas. Penelitian ini menghasilkan peta limbah berbasis lokalitas, matriks fungsi material, matriks integrasi pembelajaran, serta model konseptual input-proses-output sebagai dasar pengembangan bahan ajar dan eksperimen lanjutan.

Kata kunci: Limbah Lokal; Bahan Alternatif; Teknologi Beton; Konstruksi Berkelanjutan; Pendidikan Teknik Bangunan

PENDAHULUAN

Beton tetap menjadi salah satu material utama yang digunakan pada pekerjaan struktur, infrastruktur, sistem drainase, perkerasan, dan berbagai aplikasi lingkungan binaan lainnya. Kinerjanya dikendalikan oleh interaksi antara bahan penyusun, proporsi campuran, mikrostruktur, proses pencampuran, pemadatan, perawatan, dan kondisi paparan. Oleh karena itu, setiap upaya mengganti sebagian bahan konvensional harus dievaluasi bukan hanya berdasarkan asal bahan alternatif tersebut, tetapi juga berdasarkan pengaruhnya terhadap beton segar dan beton keras. Kelecakan, kebutuhan air, berat jenis, porositas, kuat tekan, respons tarik atau lentur, serta durabilitas tetap menjadi parameter penting untuk menilai apakah suatu bahan alternatif dapat berfungsi secara bertanggung jawab dalam sistem berbasis semen (Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2011). Pada saat yang sama,

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. Copyright © Author.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

ketergantungan beton yang terus berlanjut terhadap semen Portland dan agregat alam memberikan tekanan pada konsumsi energi, emisi, dan eksploitasi sumber daya yang terbatas. Kombinasi kebutuhan teknis dan tekanan lingkungan tersebut telah mendorong pengembangan bahan tambah semen, agregat daur ulang, bahan pengisi mineral, dan sumber daya sekunder lainnya sebagai bagian dari strategi konstruksi berkelanjutan.

Limbah pertanian dan biomassa mendapat perhatian khusus karena sebagian abu dapat memiliki sifat pozzolan atau berfungsi sebagai bahan pengisi apabila komposisi kimia, kondisi pembakaran, kehalusan, dan tingkat reaksinya sesuai. Tinjauan luas mengenai bahan tambah semen yang berasal dari limbah pertanian menunjukkan bahwa potensinya sangat bergantung pada proses pengolahan dan karakterisasi yang terkendali, bukan semata-mata pada statusnya sebagai limbah (Aprianti et al., 2015). Abu sekam padi sangat relevan di wilayah yang memiliki rantai penggilingan padi berkelanjutan, sedangkan residu pengolahan kelapa sawit relevan di wilayah dengan aktivitas perkebunan dan pengolahan yang luas. Untuk abu-abu tersebut, komposisi, hilang pijar, ukuran partikel, silika reaktif, karbon tidak terbakar, dan kebutuhan air merupakan beberapa parameter yang menentukan apakah material dapat dipertimbangkan sebagai bahan tambah semen atau hanya sebagai bahan pengisi halus (Thomas, 2013). Dengan demikian, ketersediaan lokal membuka peluang penelitian, tetapi belum merupakan bukti teknis atas kelayakannya.

Limbah konstruksi dan pembongkaran memberikan jalur lain untuk mengurangi ketergantungan pada agregat alam baru dan mengalihkan limbah dari pembuangan akhir. Agregat beton daur ulang dapat mengurangi konsumsi agregat alam, tetapi umumnya masih mengandung mortar lama yang melekat, memiliki daya serap lebih tinggi, dan dapat menunjukkan variasi yang lebih besar dibandingkan agregat alam; oleh sebab itu, pengendalian sumber dan karakterisasi fisik sangat penting (Safiuddin et al., 2013; Nedeljkovic et al., 2021). Limbah bata dan keramik juga dapat dihancurkan menjadi fraksi agregat atau digiling menjadi serbuk halus, tetapi perilakunya bergantung pada bentuk partikel, tingkat substitusi, daya serap, kekerasan, dan komposisi mineralogi (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010; Jwaida et al., 2024). Tinjauan yang lebih baru juga menekankan kemungkinan pemanfaatan limbah industri dan konstruksi terpilih sebagai pengganti semen atau bahan tambahan, dengan syarat kinerja dan kebutuhan pengolahannya ditetapkan secara jelas (Khankhaje et al., 2024; Zito et al., 2023). Temuan ini memperkuat prinsip utama penelitian ini bahwa pemanfaatan limbah harus diorganisasikan berdasarkan fungsi material dan kebutuhan verifikasi, bukan hanya berdasarkan keberadaan aliran limbah.

Konstruksi berkelanjutan memperluas evaluasi teknis tersebut dengan mempertanyakan apakah pilihan material mampu mengurangi tekanan terhadap sumber daya tanpa memindahkan dampak ke aspek lain. Pada material berbasis semen, strategi seperti menurunkan kebutuhan klinker, memasukkan bahan tambah

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

semen, mendaur ulang limbah konstruksi, mengurangi pengambilan agregat alam, memperpanjang umur layan, dan menggunakan sumber yang sesuai secara geografis dapat berkontribusi pada perbaikan lingkungan. Namun, klaim keberlanjutan bersifat bersyarat. Energi penggilingan, riwayat pembakaran, jarak transportasi, kontaminasi, ketidakstabilan pasokan, praperlakuan, dan durabilitas beton yang dihasilkan dapat mengubah nilai keseluruhan suatu bahan alternatif. Penelitian mengenai semen ekoefisien menekankan bahwa efisiensi material harus dikaitkan dengan solusi yang layak secara teknis, bukan hanya dengan substitusi nominal (Scrivener et al., 2018). Perspektif ekonomi sirkular menambahkan dimensi lain dengan memperlakukan limbah sebagai sumber daya sekunder yang dapat dikembalikan ke siklus produksi setelah melalui seleksi dan pengendalian mutu.

Permasalahan tersebut juga penting secara pedagogis bagi Pendidikan Teknik Bangunan. Mata kuliah Teknologi Beton umumnya mencakup bahan penyusun, perancangan campuran, pengujian beton segar, pembuatan dan perawatan benda uji, pengujian beton keras, interpretasi hasil, serta penggunaan standar teknis. Memasukkan limbah lokal ke dalam urutan pembelajaran ini dapat mengubah keberlanjutan dari topik abstrak menjadi persoalan teknis berbasis bukti. Mahasiswa dapat diminta mengidentifikasi sumber limbah, menentukan kemungkinan fungsinya dalam beton, menelaah literatur pendukung, mengenali risiko, mengusulkan pengujian karakterisasi, dan memberikan justifikasi apakah eksperimen lanjutan layak dilakukan. Pembelajaran berbasis proyek dalam teknologi beton dilaporkan sebagai pendekatan yang bermanfaat untuk mengajarkan topik keberlanjutan karena menghubungkan konsep teknis dengan perumusan masalah, kerja kolaboratif, dan penyusunan keluaran proyek yang dapat dipertanggungjawabkan (Torres et al., 2024). Untuk persiapan vokasional dan profesional, pendekatan tersebut dapat memperkuat penalaran analitis dan komunikasi teknis tanpa mengurangi disiplin ilmu material beton.

Konteks regional Kalimantan Tengah memberikan dasar khusus bagi integrasi tersebut. Statistik resmi mencatat produksi gabah kering giling di Kalimantan Tengah sebesar 333,43 ribu ton pada tahun 2025 (Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah, 2026). Angka ini tidak secara langsung menyatakan jumlah sekam padi atau abu sekam padi yang tersedia untuk beton, tetapi menegaskan keberadaan rantai produksi dan penggilingan padi regional yang membenarkan penyelidikan residu sekam pada tingkat sumber. Sektor kelapa sawit juga memiliki peran penting. Pada tahun 2023, luas areal kelapa sawit di Kalimantan Tengah mencapai 1.936.605,49 ha, dengan 13.873,64 ha tercatat di Kota Palangka Raya (Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah, 2024). Sekali lagi, luas perkebunan tidak sama dengan jumlah abu cangkang atau abu serat yang tersedia. Abu hanya terbentuk apabila biomassa dibakar dalam suatu sistem pengolahan, sehingga identitas pabrik, jenis bahan bakar, kondisi pembakaran, dan

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

konsistensi residu harus didokumentasikan sebelum sampel dapat diperlakukan sebagai material yang terdefinisi.

Palangka Raya memberikan konteks yang berbeda namun saling melengkapi. Sebagai lokasi universitas, laboratorium, dan perkembangan perkotaan yang berkelanjutan, kota ini merupakan tempat yang praktis untuk mengidentifikasi residu beton, bata, dan keramik dari kegiatan konstruksi, renovasi, pembongkaran, bahan finishing rusak, serta limbah laboratorium. Laporan lingkungan daerah mencatat peningkatan timbulan sampah padat perkotaan dari 140,24 ton/hari pada tahun 2019 menjadi 156,01 ton/hari pada tahun 2023, setara dengan 56.945,11 ton/tahun. Pada tahun 2023, sekitar 42,38 ton/hari ditangani melalui skema terkait 3R, sedangkan 110,27 ton/hari masuk ke tempat pemrosesan akhir (Dinas Lingkungan Hidup Kota Palangka Raya, 2024). Angka-angka ini tidak boleh ditafsirkan sebagai volume limbah konstruksi karena data resmi tidak memisahkan fraksi tersebut. Meskipun demikian, data tersebut menunjukkan tekanan pengelolaan material yang lebih luas di kawasan perkotaan dan mendukung relevansi pemikiran ekonomi sirkular serta inventaris limbah berbasis sumber.

Atas dasar itu, konsep 'material lokal' dalam penelitian ini beroperasi pada dua skala spasial. Kalimantan Tengah diperlakukan sebagai wilayah sumber regional untuk residu pertanian, perkebunan, dan biomassa karena banyak sumber yang relevan berada di luar batas administratif Palangka Raya. Palangka Raya diperlakukan sebagai konteks akademik, laboratorium, dan konstruksi perkotaan tempat material dapat diinventarisasi, diuji, dan diintegrasikan ke dalam pembelajaran Teknologi Beton. Pembedaan ini menghindari klaim yang terlalu luas bahwa setiap material kandidat berasal dari dalam kota. Suatu material dapat dinilai relevan secara lokal apabila sumber regionalnya dapat diidentifikasi dan logistiknya menuju Palangka Raya realistis, namun rantai ketertelusuran sumber harus tetap dapat dilacak.

Dalam kumpulan literatur yang ditinjau pada penelitian ini, kajian teknis umumnya berfokus pada kinerja jenis limbah tertentu, sedangkan kajian pendidikan membahas metode pembelajaran dan pengajaran keberlanjutan dari perspektif terpisah. Oleh karena itu, masalah penelitian bukan sekadar mengidentifikasi tambahan limbah yang dapat dimasukkan ke dalam beton. Kesenjangan penelitian terletak pada upaya menghubungkan empat pertanyaan sekaligus: apakah suatu aliran limbah tersedia dalam konteks setempat, fungsi teknis apa yang mungkin dilakukannya, verifikasi apa yang diperlukan sebelum digunakan, dan bagaimana bukti tersebut dapat ditransformasikan menjadi kegiatan pembelajaran yang terstruktur. Kerangka regional yang menghubungkan dimensi-dimensi tersebut sangat penting dalam Program Pendidikan Teknik Bangunan karena keputusan pembelajaran tidak boleh menyiratkan bahwa suatu material aman atau dapat diterima secara teknis sebelum dilakukan karakterisasi.

Kebaruan penelitian ini terletak pada kerangka penyaringan terintegrasi berbasis lokalitas untuk Kalimantan Tengah dan Palangka Raya. Alih-alih hanya

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

menghasilkan daftar material potensial, penelitian ini memetakan jenis limbah terhadap fungsi dalam beton, mengidentifikasi manfaat dan risiko teoretis, menetapkan prioritas konseptual untuk eksperimen mendatang, menerjemahkan temuan ke dalam kegiatan pembelajaran dan produk asesmen, serta mengorganisasikan hubungan tersebut melalui model input-proses-output. Kerangka ini secara tegas memisahkan bukti ketersediaan regional dari bukti kelayakan teknis material dalam beton. Keberlanjutan juga diperlakukan sebagai pertukaran teknis-lingkungan, bukan sebagai konsekuensi otomatis dari penggunaan limbah.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk: mengklasifikasikan limbah lokal yang relevan berdasarkan potensi fungsinya sebagai bahan tambah semen, agregat, bahan pengisi, bahan tambahan, atau serat; menganalisis kelayakan teoretisnya berdasarkan karakteristik fisik-kimia, risiko teknis, dan pengujian lanjutan yang diperlukan; merumuskan matriks integrasi isu limbah lokal ke dalam pembelajaran Teknologi Beton; serta menyusun model konseptual yang menghubungkan teknologi beton, konstruksi berkelanjutan, dan Pendidikan Teknik Bangunan. Hasil sintesis ini dimaksudkan sebagai landasan untuk pengembangan bahan ajar dan eksperimen laboratorium berbasis sumber pada tahap penelitian berikutnya.

METODE PENELITIAN

Penelitian dasar ini menggunakan kajian pustaka integratif untuk mengumpulkan, mengklasifikasikan, membandingkan, dan mensintesis informasi mengenai material alternatif beton, bahan tambah semen, agregat daur ulang, konstruksi berkelanjutan, ekonomi sirkular, dan pembelajaran Teknologi Beton. Penelitian dilaksanakan selama enam bulan dalam periode hibah 2026 dengan Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Palangka Raya, sebagai konteks akademik. Penelitian tidak melibatkan subjek manusia maupun benda uji laboratorium; unit analisis utama berupa sumber publikasi dan institusional serta data kontekstual regional.

Sumber data meliputi buku akademik tentang teknologi beton, standar teknis, artikel jurnal nasional dan internasional, prosiding, laporan penelitian, dokumen kurikulum, serta rencana pembelajaran mata kuliah Teknologi Beton. Buku dan standar dasar dipertahankan untuk mendefinisikan konsep inti beton dan persyaratan pengujian, sedangkan publikasi jurnal yang lebih baru diprioritaskan untuk menggambarkan perkembangan pemanfaatan limbah dan pendekatan pembelajaran. Bukti kontekstual regional diperoleh dari dokumen statistik dan lingkungan resmi yang dikutip dalam laporan akhir penelitian. Karena tujuannya adalah sintesis lintas ranah teknis, lingkungan, dan pedagogis, kajian ini bersifat integratif dan bukan meta-analisis.

Literatur dipilih menggunakan enam kriteria: relevansi topik, kualitas sumber, kemutakhiran, kejelasan parameter teknis, relevansi keberlanjutan, dan

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

relevansi pedagogis. Kriteria tersebut mencegah kajian berubah menjadi sekadar katalog jenis limbah yang tidak memiliki hubungan langsung dengan tujuan penelitian. Kriteria ini juga memungkinkan referensi dasar yang lebih lama tetap digunakan ketika mendefinisikan perilaku dasar beton, sementara literatur yang lebih mutakhir lebih ditekankan untuk pengembangan material limbah dan integrasi pendidikan. Tabel 1 merangkum kriteria yang digunakan dalam proses pemilihan dan analisis.

Tabel 1. Kriteria Pemilihan dan Analisis Literatur

Kriteria	Indikator Operasional	Fungsi dalam Kajian
Relevansi topik	Membahas limbah lokal, material alternatif beton, keberlanjutan, atau pembelajaran teknologi beton.	Menjamin kontribusi langsung terhadap fokus penelitian.
Kualitas sumber	Buku akademik, standar resmi, jurnal ilmiah, prosiding, atau laporan penelitian yang dapat ditelusuri.	Memperkuat keandalan landasan teoretis.
Kemutakhiran	Memprioritaskan literatur terbaru dengan tetap mempertahankan buku dan standar fundamental.	Menyeimbangkan teori yang mapan dan perkembangan terkini.
Kejelasan parameter	Memberikan informasi tentang komposisi, sifat fisik, fungsi material, atau kinerja beton.	Mendukung klasifikasi kelayakan teoretis.
Relevansi keberlanjutan	Membahas pengurangan limbah, efisiensi semen/agregat, dampak lingkungan, atau ekonomi sirkular.	Mendukung indikator konstruksi berkelanjutan.
Relevansi pedagogis	Dapat dikaitkan dengan capaian pembelajaran, materi ajar, aktivitas pembelajaran, praktikum laboratorium, atau asesmen.	Mendukung model integrasi pembelajaran.

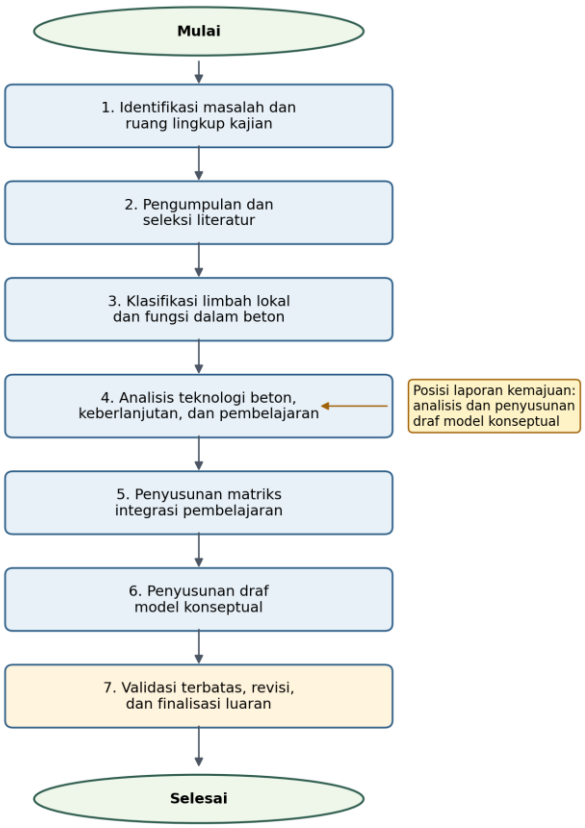
Sumber: Sintesis penelitian, 2026.

Informasi dari setiap sumber terpilih dicatat dalam matriks deskriptif-sintetik. Matriks tersebut mencakup jenis material, asal limbah, karakteristik fisik dan kimia yang relevan, potensi fungsi dalam beton, kemungkinan manfaat, risiko teknis, pengujian yang diperlukan, kontribusi terhadap efisiensi sumber daya, dan relevansi terhadap pembelajaran. Analisis selanjutnya membandingkan berbagai sumber untuk mengidentifikasi pola yang berulang, temuan yang berbeda, keterbatasan, serta hubungan antara dimensi teknis, lingkungan, dan pedagogis. Sintesis tersebut menghasilkan peta limbah-fungsi, matriks kelayakan teoretis, matriks integrasi pembelajaran, dan model konseptual input-proses-output.

Prosedur kajian diawali dengan identifikasi masalah dan penetapan ruang lingkup penelitian, dilanjutkan dengan pengumpulan dan seleksi literatur. Limbah

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

kandidat kemudian diklasifikasikan berdasarkan asal dan potensi fungsinya dalam beton. Tahap berikutnya menganalisis persyaratan teknologi beton bersama pertimbangan konstruksi berkelanjutan, kemudian hasilnya diterjemahkan ke dalam matriks integrasi pembelajaran. Selanjutnya disusun dan direvisi model konseptual, dan tahap akhir mengonsolidasikan hasil sintesis serta luaran yang direncanakan. Urutan ini digunakan untuk memastikan rekomendasi pedagogis tetap berlandaskan bukti teknis. Gambar 1 menyajikan prosedur penelitian yang tercantum dalam laporan akhir penelitian.



Gambar 1. Prosedur Penelitian

Prioritas material lokal ditetapkan secara teoretis berdasarkan enam pertimbangan: bukti bahwa sumber tersedia di Kalimantan Tengah atau Palangka Raya, kontinuitas dan ketertelusuran pasokan, jarak dan logistik ke laboratorium Pendidikan Teknik Bangunan, potensi fungsi dalam beton, risiko teknis dan lingkungan, serta relevansi pedagogis. Prioritas ini bukan pernyataan bahwa material aman digunakan dalam beton. Prioritas tersebut merupakan mekanisme penyaringan untuk memilih objek yang layak menjalani audit sumber, karakterisasi, dan pengujian campuran lanjutan. Kategori prioritas dinyatakan sebagai sangat tinggi, tinggi, sedang, dan bersyarat.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Untuk perbandingan visual yang disederhanakan, empat dimensi diberi skor pada skala 1-5: ketersediaan regional, kedekatan/logistik menuju Palangka Raya, ketertelusuran sumber, serta gabungan relevansi teknis-pedagogis. Skor konseptual maksimum adalah 20. Skor tersebut dihasilkan sebagai nilai pendukung keputusan dalam kajian teoretis dan secara tegas diperlakukan sebagai nilai yang dapat berubah setelah audit lapangan, pengambilan sampel, dan karakterisasi laboratorium. Oleh sebab itu, skor tidak boleh ditafsirkan sebagai kinerja material terukur maupun peringkat statistik.

Penelitian ini juga menetapkan jalur tindak lanjut praktis. Material kandidat terlebih dahulu harus dikaitkan dengan sumber yang dapat ditelusuri dan didokumentasikan berdasarkan lokasi, tanggal, kondisi awal, dan praperlakuan. Material jenis agregat setidaknya memerlukan karakterisasi dasar berupa berat jenis, penyerapan, dan gradasi; sedangkan abu atau serbuk memerlukan pengujian kehalusan, hilang pijar, serta analisis kimia dan/atau mineralogi apabila fasilitas tersedia. Setelah tahap tersebut, barulah campuran kontrol dan variasi substitusi dirancang untuk menguji kelecakan, kekuatan, penyerapan atau porositas, serta indikator durabilitas yang relevan. Laporan akhir penelitian juga merekomendasikan desain multi-sumber untuk eksperimen lanjutan agar variasi alami residu regional dapat dikenali.

Beberapa keterbatasan metodologis diakui. Laporan sumber tidak mendokumentasikan string pencarian per basis data, jumlah alur bergaya PRISMA, maupun dataset validasi eksternal, sehingga penelitian ini harus ditafsirkan sebagai sintesis teoretis integratif, bukan tinjauan sistematis yang mengklaim penelusuran menyeluruh. Terminologi material juga bervariasi dalam literatur, dan karakteristik limbah dari wilayah lain tidak dapat langsung diterapkan pada Kalimantan Tengah tanpa pengujian berbasis sumber. Batasan tersebut dipertahankan dalam paper agar hasil konseptual tidak disajikan seolah-olah telah terverifikasi melalui pengujian laboratorium.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pemetaan Limbah Lokal dan Potensi Fungsinya dalam Beton

Sintesis mengidentifikasi tujuh kelompok material yang relevan dengan konteks Kalimantan Tengah dan pembelajaran Teknologi Beton, yaitu abu sekam padi, abu/residu cangkang atau pengolahan kelapa sawit, limbah bata, limbah keramik, beton daur ulang, serbuk mineral atau batu kapur sebagai material bersyarat, serta serat alam seperti kelapa atau bambu. Klasifikasi ini bersifat fungsional, bukan semata-mata deskriptif. Abu pertanian dan biomassa terutama dikaitkan dengan jalur bahan tambah semen atau bahan pengisi; limbah beton, bata, dan keramik terutama dikaitkan dengan jalur agregat dan serbuk; serbuk mineral diperlakukan sebagai bahan pengisi hanya apabila sumber regionalnya dapat diverifikasi; sedangkan serat alam diperlakukan sebagai bahan tambahan terkait perkuatan, bukan sebagai pengganti agregat atau semen.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Pendekatan fungsional ini penting karena limbah yang sama dapat berpindah kategori setelah melalui pengolahan. Limbah keramik, misalnya, dapat digunakan sebagai agregat kasar atau halus apabila dihancurkan hingga ukuran agregat, sebagai bahan pengisi apabila digiling halus, atau dalam kondisi tertentu sebagai serbuk pengganti sebagian semen bergantung pada mineralogi dan kehalusannya (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010; Jwaida et al., 2024). Kehati-hatian yang sama berlaku untuk abu pertanian. Keberadaan biomassa yang mengandung silika tidak otomatis berarti bahwa abu yang dihasilkan bersifat pozzolan; suhu dan durasi pembakaran, kandungan karbon, serta proses penggilingan dapat mengubah material akhir secara signifikan (Aprianti et al., 2015; Thomas, 2013). Oleh karena itu, penelitian ini mengaitkan setiap fungsi yang diusulkan dengan kebutuhan karakterisasi yang spesifik.

Tabel 2 merangkum peta yang dihasilkan. Tabel ini dimaksudkan untuk memandu perencanaan laboratorium sekaligus desain pembelajaran. Untuk kepentingan pengajaran, setiap baris dapat diubah menjadi pertanyaan teknis: Apa fungsi kandidat material? Sifat apa yang mendukung fungsi tersebut? Risiko apa yang dapat menggugurkan penggunaannya? Pengujian apa yang diperlukan sebelum campuran dibuat? Struktur ini menggeser penekanan pembelajaran dari pernyataan sederhana bahwa 'limbah dapat menggantikan material konvensional' menjadi rangkaian bukti yang dapat dipertanggungjawabkan.

Tabel 2. Peta Limbah Lokal dan Potensi Fungsinya dalam Beton

Material Limbah	Potensi Fungsi	Aspek Utama yang Dikaji	Konteks Pembelajaran
Abu sekam padi	SCM / pengganti sebagian semen	Silika amorf, kehalusan, hilang pijar, kebutuhan air	Reaksi pozzolan dan beton dengan kadar semen lebih rendah
Abu/residu cangkang atau pengolahan kelapa sawit	SCM / bahan pengisi	Komposisi kimia, riwayat pembakaran, ukuran partikel, karbon tidak terbakar	Kasus limbah perkebunan Kalimantan Tengah
Limbah bata	Agregat halus/kasar atau bahan pengisi	Penyerapan, gradasi, kekuatan partikel	Daur ulang limbah bangunan
Limbah keramik	Agregat / bahan pengisi / kemungkinan pengganti sebagian semen	Kekerasan, bentuk partikel, komposisi silika-alumina	Pemanfaatan kembali limbah material finishing
Beton daur ulang	Agregat beton daur ulang	Mortar melekat, penyerapan, berat jenis, gradasi	Ekonomi sirkular dalam konstruksi

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Material Limbah	Potensi Fungsi	Aspek Utama yang Dikaji	Konteks Pembelajaran
Serbuk mineral/batu kapur (bersyarat)	Bahan pengisi halus apabila sumber terverifikasi	Kehalusan, $CaCO_3$, distribusi ukuran partikel	Kajian bahan pengisi dan verifikasi sumber regional
Serat kelapa/bambu	Serat alam	Penyerapan, ketahanan alkali, panjang dan dispersi serat	Konsep beton serat dan pengendalian retak

Sumber: Sintesis penelitian, 2026.

Prioritas Berbasis Lokalitas untuk Kalimantan Tengah dan Palangka Raya

Bukti regional mengubah prioritas material-material tersebut. Abu sekam padi memiliki dasar yang kuat karena produksi padi Kalimantan Tengah tahun 2025 menegaskan keberadaan rantai penggilingan regional yang cukup besar (Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah, 2026). Penelitian ini tidak langsung mengonversi angka produksi padi menjadi tonase abu karena perolehan sekam dan pembentukan abu bergantung pada praktik penggilingan dan pembakaran. Sebaliknya, statistik tersebut digunakan sebagai bukti bahwa penelusuran sumber secara langsung merupakan langkah yang rasional. Eksperimen mendatang karena itu perlu mengidentifikasi penggilingan yang nyata, mendokumentasikan asal dan proses pembakaran, serta mengambil beberapa sampel daripada mengasumsikan abu regional bersifat homogen.

Residu kelapa sawit juga relevan secara regional karena luas perkebunannya besar, namun rantai buktinya berbeda. Luas areal menunjukkan kuatnya sistem komoditas regional, sedangkan ketersediaan abu bergantung pada unit pengolahan yang membakar cangkang, serat, atau biomassa lainnya (Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah, 2024). Sampel yang bermakna secara teknis karena itu memerlukan metadata mengenai pabrik pengolahan, aliran bahan bakar, kondisi pembakaran, dan apakah residu merupakan abu cangkang, abu serat, abu boiler campuran, atau material lainnya. Perbedaan ini menjelaskan mengapa skor konseptual residu kelapa sawit lebih rendah daripada prioritas abu sekam padi dan beton daur ulang meskipun basis pertanian regionalnya kuat.

Beton daur ulang serta limbah bata/keramik diprioritaskan dari sisi perkotaan dalam kerangka ini. Keunggulan utamanya adalah kedekatan dengan kegiatan konstruksi, renovasi, pembongkaran, pasokan bahan bangunan, dan laboratorium universitas di Palangka Raya. Namun, laporan akhir tidak memuat inventaris resmi limbah konstruksi dan pembongkaran untuk seluruh kota. Karena itu, prioritas tinggi yang diberikan kepada material tersebut merupakan rekomendasi untuk melakukan audit lapangan, bukan pernyataan mengenai volume tahunan yang telah terukur. Inventaris praktis perlu mencatat jenis proyek, lokasi, perkiraan jumlah,

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

umur material jika diketahui, kontaminasi yang terlihat, metode pemisahan, dan praperlakuan yang direncanakan sebelum penghancuran atau penggilingan.

Serat alam tetap bermanfaat untuk pembelajaran dan dapat mendukung penelitian material mendatang, tetapi laporan menempatkannya pada prioritas sedang karena kontinuitas pasokan, praperlakuan, penyerapan air, degradasi alkali, dan variasi sifat masih memerlukan verifikasi lebih lanjut. Serbuk mineral atau batu kapur diperlakukan lebih hati-hati. Material tersebut dapat relevan secara teknis sebagai bahan pengisi, tetapi belum layak disebut sebagai material lokal Palangka Raya sampai sumber tambang atau pengolahannya serta jalur pasokannya dapat dibuktikan. Kategori bersyarat ini penting karena menggambarkan aturan metodologis yang lebih luas: lokalitas merupakan klaim berbasis bukti yang harus dapat ditelusuri, bukan label yang dapat diberikan berdasarkan kemudahan.

Tabel 3 menyajikan prioritas berbasis lokalitas untuk empat kelompok kandidat utama yang dipilih untuk tindak lanjut segera. Tabel ini membedakan bukti yang mendukung relevansi lokal dari fungsi teknis yang diusulkan untuk setiap material. Prioritas menunjukkan ke mana sumber daya penelitian yang terbatas sebaiknya terlebih dahulu diarahkan; prioritas tersebut tidak menggantikan karakterisasi atau pengujian kinerja.

Tabel 3. Material Prioritas untuk Penelitian Lanjutan dalam Konteks Regional

Material	Dasar Konteks Lokal	Strategi Sumber yang Disarankan	Potensi Fungsi	Prioritas
Abu sekam padi	Produksi padi Kalimantan Tengah tahun 2025: 333,43 ribu ton gabah kering giling	Penggilingan padi/sumber pembakaran di Kalimantan Tengah; sampel terdokumentasi diangkut ke laboratorium PTB	SCM / bahan pengisi	Sangat tinggi
Abu/residu kelapa sawit	Luas kelapa sawit tahun 2023: 1.936.605,49 ha di Kalimantan Tengah; 13.873,64 ha di Palangka Raya	Unit pengolahan dengan sumber pembakaran dan identitas residu yang terdokumentasi	SCM / bahan pengisi	Tinggi
Beton daur ulang	Relevan langsung dengan konstruksi/renovasi perkotaan; volume terpisah belum dikuantifikasi secara resmi	Audit proyek, sumber pembongkaran, dan limbah beton laboratorium; hancurkan dan ayak	Agregat daur ulang	Sangat tinggi

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

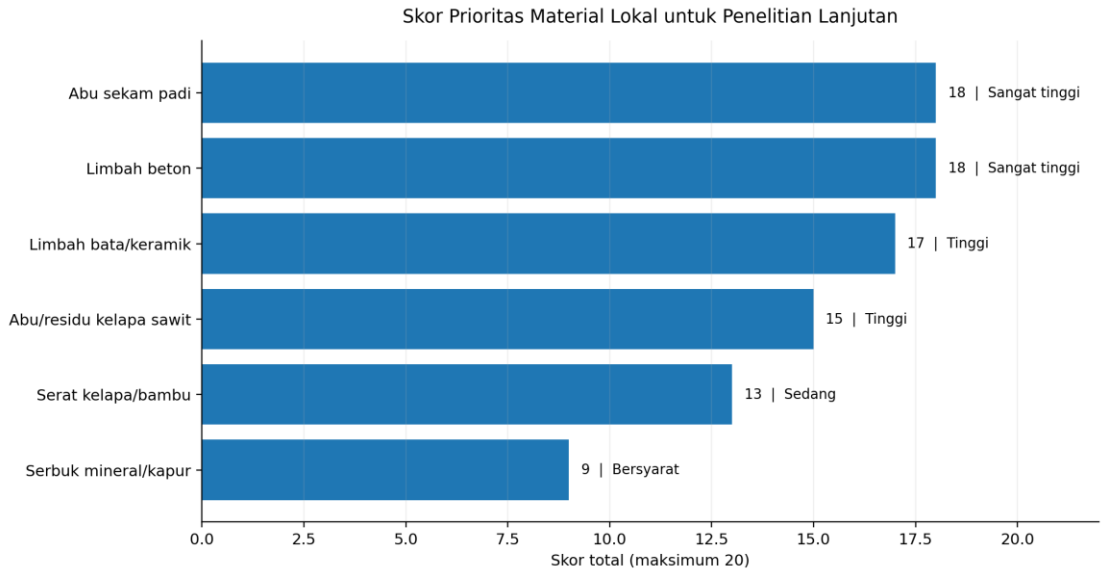
Material	Dasar Konteks Lokal	Strategi Sumber yang Disarankan	Potensi Fungsi	Prioritas
Limbah bata dan keramik	Relevan dengan renovasi, pembongkaran, dan limbah material finishing; volume terpisah belum dikuantifikasi	Proyek lokal dan sumber material di Palangka Raya; singkirkan kontaminan	Agregat / bahan pengisi / serbuk	Tinggi

Sumber: Sintesis penelitian, 2026.

Matriks penilaian konseptual memperlihatkan logika penyaringan secara jelas. Abu sekam padi dan beton daur ulang masing-masing memperoleh skor total 18, limbah bata/keramik 17, residu kelapa sawit 15, serat alam 13, dan serbuk mineral/batu kapur bersyarat 9. Skor tersebut menggabungkan ketersediaan regional, logistik menuju Palangka Raya, ketertelusuran sumber, serta relevansi teknis-pedago gis. Abu sekam padi memperoleh skor tinggi karena ketersediaan regional dan jalur penelitian terkait SCM yang jelas. Beton daur ulang memperoleh skor tinggi karena berhubungan erat dengan konteks perkotaan dan laboratorium serta memiliki jalur daur ulang agregat yang terdefinisi dengan baik. Limbah bata dan keramik berada sedikit di bawahnya, sedangkan residu kelapa sawit kehilangan poin terutama karena ketertelusuran sumber pembakaran masih perlu diperkuat. Gambar 2 menampilkan kembali hasil penyaringan konseptual tersebut.

Nilai tersebut harus dibaca sebagai alat pengelolaan penelitian. Nilai ini tidak dapat dibandingkan dengan kuat tekan, indeks aktivitas pozzolan, hasil analisis daur hidup lingkungan, atau variabel kinerja terukur lainnya. Laporan secara tegas menyatakan bahwa nilai dapat berubah setelah audit lapangan, pengambilan sampel, dan karakterisasi laboratorium. Menjaga pembedaan ini sangat penting ketika matriks digunakan dalam pembelajaran: mahasiswa perlu memahami bahwa prioritas tinggi untuk diteliti tidak sama dengan kinerja teknis yang tinggi dalam beton.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465



Gambar 2. Skor Prioritas Konseptual Material Lokal

Kelayakan Teoretis dan Verifikasi yang Diperlukan

Matriks kelayakan teknis yang dikembangkan dalam penelitian ini didasarkan pada prinsip bahwa ketersediaan dan manfaat lingkungan saja tidak cukup sebagai kriteria penerimaan material. Setiap kelompok limbah memperkenalkan mekanisme yang berbeda sehingga memiliki profil risiko yang berbeda pula. Abu pertanian atau biomassa hanya dapat mengurangi sebagian kebutuhan semen apabila komposisi dan reaktivitasnya sesuai. Abu yang dibakar kurang baik dengan kandungan karbon tidak terbakar tinggi atau kebutuhan air berlebihan dapat mengganggu perilaku beton segar dan mungkin tidak memberikan kontribusi sementisius yang diharapkan. Oleh sebab itu, jalur tindak lanjut mencakup pengujian kehalusan, hilang pijar, fluoresensi sinar-X dan/atau analisis mineralogi, evaluasi aktivitas pozzolan jika memungkinkan, serta pengujian kuat pada campuran terkendali. Relevansi konsep kimia dan pozzolan pada ASTM C618 bersifat metodologis, bukan klaim bahwa abu lokal telah memenuhi standar tersebut (ASTM International, 2023).

Agregat beton daur ulang menghadirkan rangkaian persoalan yang berbeda. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa mortar yang melekat dapat meningkatkan penyerapan dan menurunkan berat jenis, sedangkan agregat halus beton daur ulang dapat memiliki variasi yang tinggi (Safiuddin et al., 2013; Nedeljkovic et al., 2021). Oleh sebab itu, penelitian ini menetapkan berat jenis, penyerapan, abrasi jika relevan, gradasi, kelecakan, dan kuat tekan sebagai pengujian utama. Untuk penelitian berbasis sumber di Palangka Raya, kontaminasi visual dan asal beton lama juga perlu dicatat. Apabila material dikumpulkan dari beberapa proyek, kode sampel diperlukan untuk mencegah pencampuran sumber dan memungkinkan hasil ditelusuri kembali ke aliran pembongkaran atau laboratorium yang terkait.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Limbah bata dan keramik dapat berguna sebagai agregat atau bahan pengisi, tetapi struktur berpori, kekerasan, bentuk partikel tajam, dan perbedaan mineralogi dapat mengubah kebutuhan air dan perilaku mekanis. Literatur yang ditinjau menunjukkan bahwa kinerja bergantung pada apakah limbah digunakan sebagai agregat atau serbuk dan pada tingkat substitusi yang dipilih (Pacheco-Torgal & Jalali, 2010; Jwaida et al., 2024). Karena itu, verifikasi yang diusulkan mencakup gradasi, penyerapan, kekerasan atau integritas partikel, komposisi kimia apabila digunakan sebagai serbuk, serta pengamatan terkait durabilitas. Penelitian ini sengaja tidak menetapkan persentase substitusi universal karena belum tersedia data eksperimen lokal pada laporan sumber.

Serbuk mineral atau batu kapur menunjukkan mengapa penelitian ini menggabungkan penyaringan teknis dan lokalitas. Sebagai material halus, material ini dapat memperbaiki pengemasan partikel atau berfungsi sebagai bahan pengisi, tetapi dosis yang berlebihan dapat mengubah kebutuhan air dan perilaku pasta. Sebelum menjadi bagian dari klaim penelitian limbah lokal, sumbernya harus diverifikasi; setelah itu barulah kehalusan, kandungan CaCO3, distribusi ukuran, respons slump, dan kuat dapat dipertimbangkan. Serat alam juga memerlukan jalur yang mencakup penyerapan, panjang dan volume serat, praperlakuan, dispersi, ketahanan alkali, perilaku tarik atau lentur, dan durabilitas. Secara pedagogis, material ini menarik karena memungkinkan pembahasan mengenai pengendalian retak dan sumber daya terbarukan, namun laporan secara tepat menempatkannya sebagai objek penelitian prioritas sedang, bukan sebagai material yang langsung dianggap telah tervalidasi.

Tabel 4 merangkum manfaat teoretis, risiko, dan pengujian lanjutan tersebut. Matriks ini juga berfungsi sebagai kerangka pembelajaran karena menegaskan bahwa setiap klaim keberlanjutan harus disertai pertanyaan verifikasi teknis.

Tabel 4. Matriks Kelayakan Teoretis Bahan Alternatif

Kelompok Material	Potensi Manfaat	Risiko Teknis Utama	Pengujian Lanjutan yang Diperlukan
Abu pertanian/biomassa	Mengurangi sebagian semen; berpotensi memberikan kontribusi pozzolan	Variasi pembakaran, karbon tidak terbakar, kebutuhan air tinggi	XRF/XRD jika tersedia, kehalusan, hilang pijar, aktivitas pozzolan, kelecakan dan kuat
Agregat beton daur ulang	Mengurangi kebutuhan agregat alam dan mengalihkan limbah konstruksi	Penyerapan tinggi, mortar melekat, variasi sumber	Berat jenis, penyerapan, abrasi, gradasi, kelecakan, kuat tekan

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Kelompok Material	Potensi Manfaat	Risiko Teknis Utama	Pengujian Lanjutan yang Diperlukan
Limbah bata/keramik	Dapat berfungsi sebagai agregat, bahan pengisi, atau serbuk halus terpilih	Partikel tajam/berpori, penyerapan, variasi mineralogi	Gradasi, penyerapan, kekerasan, komposisi kimia, durabilitas
Serbuk mineral/batu kapur	Dapat memperbaiki pengemasan partikel sebagai bahan pengisi	Dosis berlebih dapat mengubah kebutuhan air dan perilaku pasta	Kehalusan, CaCO3, distribusi ukuran partikel, slump, kuat
Serat alam	Berpotensi mengendalikan retak dan memanfaatkan sumber daya lokal	Degradasi alkali, penyerapan, dispersi buruk	Panjang/volume serat, praperlakuan, penyerapan, perilaku tarik/lentur, durabilitas

Sumber: Sintesis penelitian, 2026.

Peta fungsi pada Gambar 3 semakin menegaskan bahwa material kandidat tidak semuanya harus mengikuti jalur eksperimen yang sama. Abu sekam padi terutama ditempatkan pada jalur SCM, sedangkan residu kelapa sawit dapat diteliti sebagai SCM dan/atau bahan pengisi bergantung pada karakter abu yang sebenarnya. Limbah bata terutama dikaitkan dengan fungsi agregat dan bahan pengisi; limbah keramik dapat mencakup jalur SCM, agregat, dan bahan pengisi bergantung pada penggilingan dan mineraloginya; beton daur ulang dikaitkan dengan jalur agregat; serbuk mineral bersyarat dikaitkan dengan bahan pengisi; dan serat alam mengikuti jalur perkuatan serat yang terpisah. Klasifikasi ini bermanfaat karena menentukan apa yang dimaksud sebagai campuran kontrol yang bermakna dan variabel laboratorium mana yang perlu diprioritaskan.

Pembedaan ini juga mencegah kesalahan konseptual yang umum dalam proyek pemanfaatan limbah, yaitu menggunakan satu alasan lingkungan yang sama untuk membenarkan material yang berbeda secara teknis. Mengganti sebagian semen dengan abu reaktif mengubah sistem pengikat, sedangkan mengganti agregat alam dengan beton daur ulang mengubah penyerapan agregat, berat jenis, dan perilaku antarmuka. Penambahan serat alam memperkenalkan mekanisme yang berbeda lagi. Nilai penelitian ini terletak pada upayanya memperjelas jalur-jalur tersebut sebelum desain eksperimen disusun.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Peta Fungsi Potensial Material Lokal terhadap Fungsi Beton

	SCM	Agregat	Filler	Serat
Abu sekam padi	✓	–	–	–
Abu/residu sawit	✓	–	✓	–
Limbah bata	–	✓	✓	–
Limbah keramik	✓	✓	✓	–
Limbah beton	–	✓	–	–
Serbuk mineral/kapur	–	–	✓	–
Serat alami	–	–	–	✓

Gambar 3. Potensi Fungsi Material Lokal dalam Beton

Konstruksi Berkelanjutan dan Interpretasi Ekonomi Sirkular

Dari perspektif konstruksi berkelanjutan, pemanfaatan limbah lokal memiliki tiga potensi manfaat utama dalam kerangka ini: mengalihkan material sisa dari pembuangan, mengurangi kebutuhan semen konvensional atau agregat alam apabila layak secara teknis, dan memperkuat pemanfaatan aliran sumber daya yang tersedia secara regional. Manfaat tersebut selaras dengan strategi yang lebih luas untuk sistem semen dan beton yang efisien sumber daya (Scrivener et al., 2018). Meskipun demikian, penelitian ini tidak mengklasifikasikan suatu material sebagai berkelanjutan hanya karena berasal dari limbah. Energi penggilingan, pembakaran terkendali, transportasi dari sumber ke Palangka Raya, pemilahan dan pencucian, konsistensi pasokan, kontaminasi, serta umur layan beton yang dihasilkan turut menentukan keseimbangannya.

Konsep lokalitas dua skala membantu memperjelas pertukaran tersebut. Residu dari kabupaten lain di Kalimantan Tengah masih dapat dianggap sesuai secara regional apabila dapat diangkut dan didokumentasikan secara efisien, sedangkan material yang secara nominal lokal tetapi memiliki ketertelusuran rendah atau memerlukan praperlakuan intensif dapat menjadi kurang menarik. Sebaliknya, limbah konstruksi perkotaan di Palangka Raya memiliki keunggulan jarak tetapi mungkin memerlukan pemisahan dan penghancuran yang cermat. Kerangka ini karena itu mendorong eksperimen mendatang untuk mencatat informasi pengolahan dan transportasi bersama data mekanis, bukan memperlakukannya sebagai rincian administratif yang tidak berkaitan.

Pembelajaran ekonomi sirkular menjadi lebih bermakna dalam interpretasi ini. Mahasiswa dapat memetakan jalur dari aktivitas produksi primer atau proyek konstruksi menuju aliran residu, kemudian menelaah intervensi yang diperlukan sebelum residu dapat kembali ke siklus material. Pengendalian mutu merupakan

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

bagian dari lingkaran sirkular: limbah yang terkontaminasi atau sangat bervariasi tidak otomatis menjadi sumber daya. Perspektif ini juga membangun hubungan yang bermanfaat antara ilmu material dan pertimbangan profesional karena mahasiswa harus menyeimbangkan tujuan lingkungan dengan bukti teknis dan ketidakpastian.

Integrasi ke dalam Pembelajaran Teknologi Beton

Sintesis pedagogis menghubungkan analisis limbah lokal dengan enam bidang Teknologi Beton: bahan pengikat dan hidrasi semen, agregat beton, beton segar, beton keras, konstruksi berkelanjutan, dan pembelajaran berbasis proyek. Setiap bidang dipasangkan dengan capaian pembelajaran, aktivitas berbasis limbah, produk pembelajaran, dan indikator penilaian. Struktur ini penting karena pemanfaatan limbah lokal tidak diperlakukan sebagai topik kuliah tambahan; melainkan menjadi konteks untuk menganalisis dan menerapkan konsep-konsep mata kuliah yang telah ada.

Pada topik bahan pengikat, mahasiswa dapat meninjau literatur tentang abu sekam padi atau abu kelapa sawit dan menjelaskan perbedaan antara aksi bahan pengisi dan reaksi pozzolan. Produk yang dihasilkan dapat berupa sintesis artikel atau peta konsep yang dinilai berdasarkan ketepatan konsep. Pada topik agregat, mahasiswa dapat membandingkan beton daur ulang, limbah bata, dan keramik berdasarkan gradasi, penyerapan, dan karakteristik partikel, kemudian menyusun matriks kelayakan. Kegiatan ini membangun jembatan langsung dari klasifikasi material menuju konsep agregat standar. Hal tersebut juga memberikan dasar yang dapat dipertanggungjawabkan untuk membahas mengapa variasi sumber penting pada material daur ulang.

Topik beton segar dapat menggunakan material lokal yang sama untuk memprediksi perubahan kelecakan, segregasi, dan kebutuhan air. Agregat berpori dan serbuk yang sangat halus menimbulkan tantangan yang berbeda, sehingga mahasiswa dapat mengusulkan strategi pengendalian campuran daripada bergantung pada satu aturan umum. Topik beton keras selanjutnya dapat mengalihkan diskusi ke kuat tekan, porositas, penyerapan, dan durabilitas. Karena penelitian ini belum memberikan hasil eksperimen lokal, mahasiswa dapat menggunakan data sekunder yang telah dipublikasikan dan merancang eksperimen mini yang menetapkan variabel kontrol, variabel substitusi, umur pengujian, dan pengukuran yang diperlukan untuk menguji suatu klaim. Hal ini menjaga pembedaan antara menafsirkan bukti dan menciptakan data.

Aktivitas konstruksi berkelanjutan dapat meminta mahasiswa membandingkan penghematan material dengan kebutuhan pengolahan dan transportasi, sedangkan modul berbasis proyek dapat menggabungkan pemetaan sumber, penyaringan teknis, dan komunikasi. Torres et al. (2024) memberikan dukungan yang relevan terhadap penggunaan pembelajaran berbasis proyek dalam teknologi beton untuk mengajarkan topik keberlanjutan. Dalam kerangka penelitian

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

ini, produk pembelajaran yang diharapkan meliputi presentasi, poster, peta sumber, matriks kelayakan, proposal eksperimen mini, dan lembar kerja. Produk tersebut dinilai tidak hanya dari kualitas penyajian, tetapi juga kualitas bukti, koherensi penalaran teknis, dan pengakuan terhadap keterbatasan.

Matriks pada Tabel 5 merangkum integrasi ini. Prinsip pedagogisnya adalah kehati-hatian, bukan advokasi: mahasiswa tidak boleh diarahkan untuk menyimpulkan bahwa suatu limbah lokal 'layak' sebelum bukti yang diperlukan tersedia. Sebaliknya, mahasiswa dibimbing untuk mengidentifikasi bukti apa yang diperlukan, hasil apa yang dapat memperkuat atau melemahkan hipotesis, dan bagaimana penggunaan yang diusulkan berhubungan dengan kinerja beton. Pendekatan ini secara bersamaan mendukung literasi teknis, pemecahan masalah, komunikasi, dan literasi keberlanjutan.

Tabel 5. Matriks Integrasi Limbah Lokal dalam Pembelajaran Teknologi Beton

Topik Mata Kuliah	Capaian Pembelajaran	Aktivitas Berbasis Limbah Lokal	Produk Pembelajaran	Indikator Penilaian
Bahan pengikat dan hidrasi semen	Menganalisis fungsi semen dan bahan tambah mineral	Menelaah RHA/abu kelapa sawit sebagai SCM dan menganalisis konsep pozzolan	Sintesis artikel dan peta konsep	Ketepatan konsep dan kualitas sintesis
Agregat beton	Menilai sifat dan kelayakan agregat	Membandingkan beton daur ulang, limbah bata, dan keramik berdasarkan gradasi/penyerapan	Matriks kelayakan agregat alternatif	Argumentasi teknis berbasis bukti
Beton segar	Menganalisis kelecakan, segregasi, dan kebutuhan air	Memprediksi pengaruh material berpori atau halus terhadap slump dan perilaku campuran	Rencana pengendalian campuran	Konsistensi penalaran sebab-akibat
Beton keras	Menganalisis kuat tekan, porositas, dan durabilitas	Menelaah data sekunder dan merancang pengujian lanjutan	Proposal eksperimen mini	Kesesuaian variabel dan metode pengujian
Konstruksi berkelanjutan	Menilai efisiensi sumber daya dan pertukaran dampak lingkungan	Menganalisis pengurangan semen/agregat, pengolahan, transportasi, dan sirkularitas	Studi kasus keberlanjutan lokal	Keseimbangan penalaran teknis dan lingkungan
Proyek pembelajaran	Mengintegrasikan teori, bukti, dan komunikasi teknis	Pemetaan dan penyaringan limbah lokal berbasis proyek	Presentasi, poster, peta sumber, atau lembar kerja	Kualitas produk, kolaborasi, ketertelusuran, dan refleksi

Sumber: Analisis penelitian, 2026.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Model Konseptual Terintegrasi

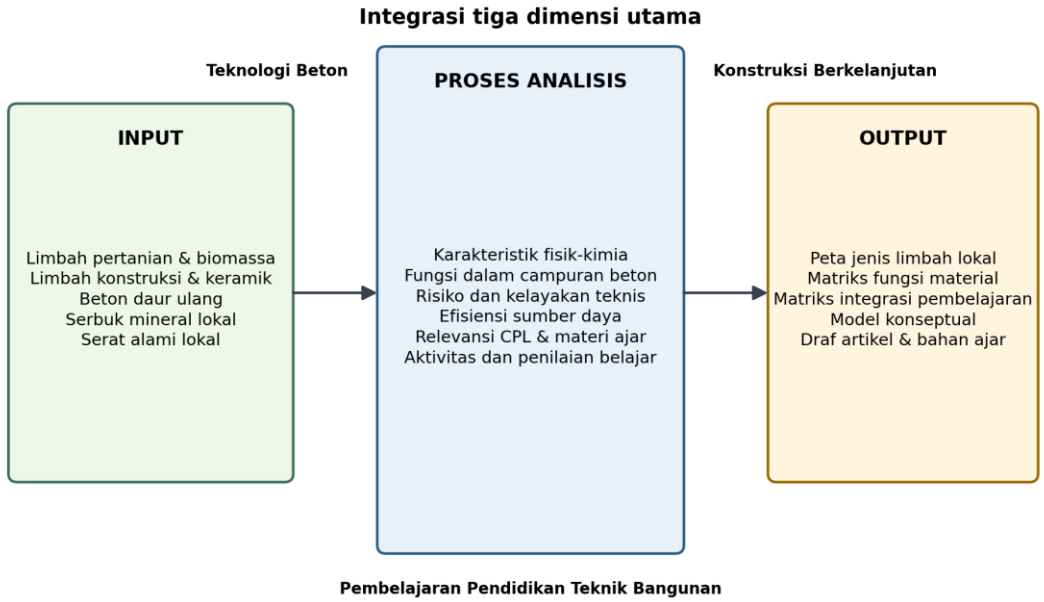
Luaran konseptual utama adalah model input-proses-output yang menghubungkan tiga dimensi: teknologi beton, konstruksi berkelanjutan, dan Pendidikan Teknik Bangunan. Input terdiri atas jenis limbah lokal, sumber limbah, bukti ketersediaan, dan konteks regional. Proses analisis mengkaji karakteristik fisik dan kimia, potensi fungsi dalam beton, risiko teknis, efisiensi sumber daya, relevansi terhadap capaian pembelajaran mata kuliah, materi ajar, aktivitas pembelajaran, dan asesmen. Output terdiri atas peta limbah, matriks fungsi material, matriks integrasi pembelajaran, model konseptual, draf artikel, dan landasan awal bahan ajar.

Model sengaja disusun untuk mencegah penalaran teknis dan pedagogis berjalan terpisah. Suatu material tidak dinyatakan bermanfaat bagi lingkungan tanpa menanyakan apakah material tersebut mampu memenuhi persyaratan kinerja dan durabilitas. Demikian pula, suatu material tidak dimasukkan ke dalam mata kuliah hanya karena bersifat lokal; dosen harus menentukan apa yang diharapkan untuk dianalisis mahasiswa, bukti apa yang digunakan, produk pembelajaran apa yang harus dihasilkan, dan bagaimana pekerjaan tersebut dinilai. Dengan demikian, informasi sumber yang sama mendukung desain penelitian sekaligus desain pembelajaran.

Gambar 4 menunjukkan model sebagaimana dikembangkan dalam laporan akhir penelitian. Residu pertanian dan biomassa, limbah konstruksi dan keramik, beton daur ulang, serbuk mineral regional, serta serat alam masuk sebagai input kandidat. Blok proses menggabungkan karakterisasi material, klasifikasi fungsional, asesmen risiko, pertimbangan efisiensi sumber daya, relevansi capaian pembelajaran, dan desain aktivitas. Luaran yang dihasilkan menjadi artefak yang dapat digunakan kembali untuk pengembangan berikutnya: agenda penelitian prioritas, lembar kerja laboratorium, kasus pembelajaran, bahan artikel, dan dasar bagi kajian eksperimental.

Model ini juga menetapkan peta jalan penelitian. Tahap 2026 berupa sintesis teoretis dan pemetaan konseptual. Tahap selanjutnya dapat mengembangkan bahan ajar dan lembar kerja, mengkarakterisasi serta menguji material lokal terpilih, menerapkan desain pembelajaran, kemudian bergerak menuju diseminasi akademik dan rekomendasi yang lebih luas. Dengan demikian, kajian teoretis ini bukan titik akhir, tetapi tahap penyaringan untuk membuat eksperimen dan pembelajaran berikutnya lebih dapat ditelusuri.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465



Gambar 4. Model Konseptual Input-Proses-Output Terintegrasi

Jalur Operasional untuk Eksperimen Berbasis Sumber di Masa Mendatang

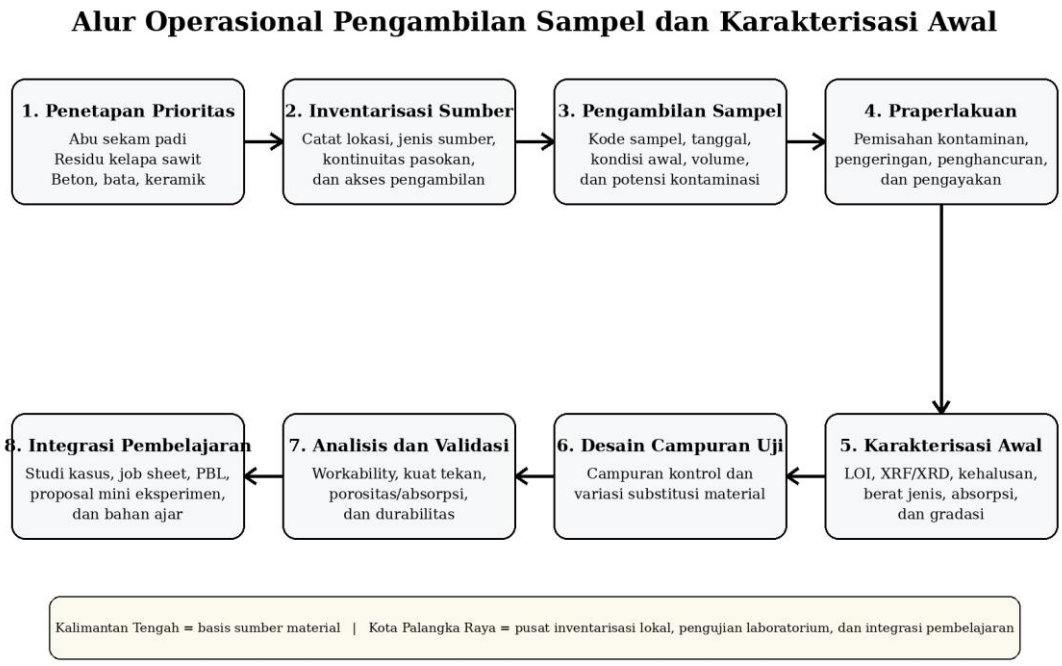
Laporan akhir menerjemahkan temuan konseptual menjadi jalur operasional untuk pengambilan sampel di masa mendatang. Abu sekam padi sebaiknya diperoleh dari sedikitnya tiga sumber penggilingan atau pembakaran di Kalimantan Tengah, sedangkan residu kelapa sawit sebaiknya diambil dari sedikitnya dua unit pengolahan yang proses pembakarannya dapat ditelusuri. Beton daur ulang, limbah bata, dan keramik sebaiknya dikumpulkan dari beberapa sumber konstruksi atau renovasi di Palangka Raya agar variasi sumber dapat diamati, bukan disembunyikan oleh pencampuran terlalu dini. Jumlah tersebut merupakan rekomendasi perencanaan dalam laporan, bukan jumlah sampel yang telah selesai diambil.

Setiap sampel perlu diberi kode yang mengidentifikasi jenis material, sumber, kabupaten atau kota, tanggal, kondisi awal, dan praperlakuan. Karakterisasi minimum berbeda untuk setiap jalur material. Material jenis agregat memerlukan kondisi kelembapan, berat jenis, penyerapan, dan gradasi sebagai titik awal. Abu dan serbuk memerlukan kehalusan, hilang pijar, serta jika tersedia, komposisi kimia melalui XRF dan/atau informasi mineralogi melalui XRD, disertai pemeriksaan visual terhadap kontaminasi. Hanya setelah sifat-sifat tersebut dipahami, campuran kontrol dan tingkat substitusi dapat dipilih untuk pengujian kelecakan, kuat tekan, penyerapan atau porositas, serta indikator durabilitas yang relevan. Prosedur campuran beton dan kuat tekan standar kemudian dapat digunakan sebagai kerangka acuan konvensional untuk desain eksperimen (Badan Standardisasi Nasional, 2000).

Palangka Raya diposisikan sebagai pusat pengujian dan pembelajaran, bukan satu-satunya sumber seluruh material. Interpretasi operasional ini menjaga identitas

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

regional penelitian sekaligus mengakui bahwa residu pertanian dan perkebunan sering dihasilkan di kabupaten-kabupaten sekitar. Hal ini juga membentuk rantai ketertelusuran edukatif yang bermanfaat: mahasiswa dapat mengikuti material mulai dari inventaris sumber, pengambilan sampel, dokumentasi, praperlakuan, karakterisasi, desain campuran, pengujian, analisis, hingga penyajian hasil. Gambar 5 menyajikan urutan tersebut.



Gambar 5. Alur Operasional Pengambilan Sampel, Karakterisasi, dan Integrasi Pembelajaran

Batasan Penelitian dan Interpretasi Temuan

Temuan harus ditafsirkan dalam batas-batas penelitian teoretis. Terminologi dalam literatur tidak selalu konsisten: SCM, bahan pengisi, bahan tambah mineral, agregat daur ulang, dan serbuk limbah dapat merujuk pada material dengan tingkat pengolahan dan fungsi yang berbeda. Karena itu, penelitian ini menggunakan kategori operasional untuk meningkatkan konsistensi internal, tetapi paper eksperimental di masa mendatang perlu melaporkan ukuran partikel, komposisi, dan jalur pengolahan aktual daripada hanya mengandalkan nama kategori. Demikian pula, sifat limbah yang dilaporkan dari negara atau sistem industri lain tidak dapat langsung diterapkan pada Kalimantan Tengah karena proses pembakaran, penggilingan, kontaminasi, riwayat agregat, dan praperlakuan dapat berbeda.

Data regional juga memiliki keterbatasan. Produksi padi dan luas areal kelapa sawit menunjukkan kekuatan rantai komoditas yang relevan, tetapi tidak mengkuantifikasi abu yang dapat diperoleh. Angka sampah padat perkotaan

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

menunjukkan tekanan pengelolaan material perkotaan, tetapi tidak mengkuantifikasi fraksi limbah konstruksi. Oleh karena itu, paper ini tidak memperkirakan tonase limbah yang belum diukur. Selain itu, laporan sumber belum memuat validasi eksternal terdokumentasi terhadap model konseptual maupun hasil karakterisasi laboratorium lokal. Model karena itu harus diperlakukan sebagai dasar terstruktur untuk validasi dan eksperimen, bukan sebagai model kinerja yang telah terverifikasi. Pembedaan ini merupakan inti kontribusi penelitian: kerangka tersebut memperjelas apa yang harus diuji selanjutnya dan bagaimana pengujian tersebut secara bersamaan dapat mendukung penelitian teknis dan pembelajaran.

KESIMPULAN

Kajian teoretis integratif ini menunjukkan bahwa limbah lokal di Kalimantan Tengah dapat diorganisasikan ke dalam jalur yang bermakna secara teknis untuk penelitian material beton dan pembelajaran Teknologi Beton. Abu sekam padi dan residu pengolahan kelapa sawit merupakan kandidat yang relevan secara regional untuk diteliti sebagai SCM atau bahan pengisi, sedangkan beton daur ulang serta limbah bata/keramik merupakan kandidat perkotaan penting untuk aplikasi agregat atau serbuk di Palangka Raya. Serat alam tetap menjadi pilihan dengan prioritas sedang dan serbuk mineral/batu kapur bersifat bersyarat sampai sumber dan jalur pasokannya diverifikasi. Penyaringan berbasis lokalitas tidak menetapkan kelayakan material dalam beton; sebaliknya, penyaringan tersebut mengidentifikasi ke mana audit sumber dan sumber daya laboratorium perlu diarahkan. Kelayakan tetap harus dibuktikan melalui dokumentasi sumber, karakterisasi fisik dan kimia, respons beton segar, kinerja mekanis, serta pengujian terkait durabilitas yang sesuai dengan fungsi material yang dimaksud.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa konsep konstruksi berkelanjutan dan ekonomi sirkular dapat diintegrasikan ke dalam Pendidikan Teknik Bangunan tanpa mengurangi ketelitian teknis. Limbah lokal dapat menjadi konteks untuk telaah artikel, pemetaan sumber, analisis gradasi dan penyerapan, prediksi kelecakan, desain campuran teoretis, proposal eksperimen mini, pembelajaran berbasis proyek, dan pengembangan lembar kerja. Model input-proses-output menghubungkan sumber limbah regional dengan analisis teknologi beton, pertukaran keberlanjutan, capaian pembelajaran, aktivitas, dan produk asesmen. Kontribusi utamanya adalah membangun jembatan yang disiplin antara konteks sumber daya lokal, pemilihan material berbasis bukti, dan pembelajaran vokasional. Penelitian selanjutnya perlu memvalidasi kerangka melalui pengambilan sampel multi-sumber di Kalimantan Tengah, karakterisasi laboratorium dan campuran beton terkendali di Palangka Raya, validasi ahli terhadap desain pembelajaran, serta implementasi di kelas. Pekerjaan tersebut akan mengubah peta prioritas teoretis saat ini menjadi data material terukur dan capaian pembelajaran yang dievaluasi, dengan tetap menjaga ketertelusuran dari sumber limbah hingga keputusan teknis dan pedagogis.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

DAFTAR PUSTAKA

Aprianti, E., Shafigh, P., Bahri, S., & Farahani, J. N. (2015). Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes: A review. *Construction and Building Materials, 74*, 176-187.

ASTM International. (2023). *ASTM C618: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.

Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah. (2024). *Luas areal tanaman perkebunan besar negara, perkebunan swasta, dan perkebunan rakyat menurut kabupaten/kota dan jenis tanaman di Provinsi Kalimantan Tengah, 2023*. Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah.

Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah. (2026). *Luas panen dan produksi padi di Provinsi Kalimantan Tengah 2025 (Angka Tetap)*. *Berita Resmi Statistik*, 2 Februari 2026. Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Tengah.

Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Badan Standardisasi Nasional.

Dinas Lingkungan Hidup Kota Palangka Raya. (2024). *Dokumen Informasi Kinerja Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah (DIKPLHD) Kota Palangka Raya Tahun 2024*. Pemerintah Kota Palangka Raya.

Jwaida, Z., Hajirasouliha, I., & Pilakoutas, K. (2024). The use of waste ceramic in concrete: A review. *Construction, 5(2)*, 24.

Khankhaje, E., Salim, M. R., Mirza, J., Hussin, M. W., & Rafieizonooz, M. (2024). A review of utilization of industrial waste materials as cement replacement in concrete. *Journal of Building Engineering, 82*, 108251.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Nedeljkovic, M., Visser, J., Valcke, S., Schlangen, E., & Ye, G. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. *Journal of Building Engineering, 38*, 102196.

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson.

Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials, 24(5)*, 832-838.

Safiuddin, M., Alengaram, U. J., Salam, M. A., Jumaat, M. Z., Jaafar, F. F., & Saad, H. B. (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete: A review. *Journal of Civil Engineering and Management, 19(6)*, 796-810.

Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research, 114*, 2-26.

Thomas, M. D. A. (2013). *Supplementary cementing materials in concrete*. CRC Press.

ISSN 2087-166X (printed)
ISSN 2721-012X (online)
DOI: https://doi.org/10.37304/jikt.v17i2.465

Torres, A., Delgado, J., & Hernández, S. (2024). Milestone-based project-based learning in a concrete technology undergraduate course to teach sustainability topics. *International Journal of Instruction, 17(2)*, 405-424.

Zito, S. V., Marvila, M. T., & Azevedo, A. R. G. (2023). Recycled construction and demolition waste as supplementary cementitious material: A review. *Waste, 1(4)*, 54.