

Analisis Sisa Material Keramik pada Proyek Pakuwon Residence Bekasi *Mixed-Use Development* Menggunakan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)

Cintiawati¹, Henita Rahmayanti², Rezi Berliana³

Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta^{1,2,3}

*Email Korespondensi: cintiawati_1503621006@mhs.unj.ac.id

Sejarah Artikel:

Diterima 01-08-2025
Disetujui 08-08-2025
Diterbitkan 10-08-2025

ABSTRACT

The construction sector is known as one of the major contributors to material waste, which can negatively impact the environment. One cintiawati_1503621006@mhs.unj.ac.id of the materials that often generates significant leftover waste is ceramic, especially during finishing works. This study aims to analyze the environmental impact of ceramic material waste in the Pakuwon Residence Bekasi Mixed-Use Development project using the Life Cycle Assessment (LCA) method. The approach used is gate-to-gate, covering the stages of material storage and handling, material usage, and waste management. The analysis was conducted using SimaPro 9.5 software and the IMPACT 2002+ method in the LCIA stage. The results show that the most dominant impact category across all stages is Human Health, with the highest score in the weighting stage reaching 20.5 Pt. The main emissions originate from ceramic cutting and the use of additional materials such as MU 450 and MU 408. Improvement scenarios are proposed through optimizing ceramic tile sizes to reduce cutting, using environmentally friendly mortar with cement substitution materials such as fly ash or slag to reduce carbon emissions, and applying a baghouse filter in the waste management stage with the assumption that ceramic waste is processed into recycled aggregates using a portable crusher machine. The storage and handling stage was not analyzed using SimaPro 9.5 due to the absence of direct emissions; however, potential damage from forklift operations is still anticipated by applying anti-slip solutions to the forklift. These findings provide recommendations for contractors to improve material waste management and significantly reduce environmental impacts.

Keywords: Life Cycle Assessment, Waste material, and SimaPro 9.5.

ABSTRAK

Sektor konstruksi dikenal sebagai salah satu penyumbang utama limbah material yang dapat memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu material yang kerap menghasilkan sisa signifikan adalah material keramik, khususnya pada pekerjaan finishing. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan dari sisa material keramik pada proyek Pakuwon Residence Bekasi Mixed-Use Development dengan menggunakan metode Life Cycle Assessment (LCA). Pendekatan yang digunakan adalah gate to gate, yang mencakup tahap penyimpanan dan penanganan, penggunaan material, serta pengelolaan waste. Analisis dilakukan dengan bantuan software SimaPro 9.5 dan dengan menggunakan metode IMPACT 2002+ pada tahapan LCIA. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kategori dampak paling

dominan pada seluruh tahapan adalah Human Health, dengan skor tertinggi pada weighting (pembobotan) mencapai 20,5 Pt. Emisi utama yang dihasilkan berasal dari pemotongan keramik serta penggunaan bahan tambahan seperti MU 450 dan MU 408. Skenario perbaikan diusulkan melalui optimalisasi ukuran keramik untuk mengurangi pemotongan dan penggunaan mortar ramah lingkungan dengan substitusi bahan semen seperti fly ash atau slag untuk menurunkan emisi karbon, serta penggunaan baghouse filter pada pengelolaan waste dengan menggunakan asumsi penghancuran keramik menjadi agregat daur ulang menggunakan portable crusher machine. Tahap penyimpanan dan penanganan tidak dianalisis melalui software SimaPro 9.5 karena tidak menghasilkan emisi langsung, namun potensi kerusakan akibat forklift tetap diantisipasi dengan mengaplikasikan anti-slip pada forklift. Temuan ini memberikan rekomendasi bagi kontraktor agar lebih memperhatikan pengelolaan sisa material guna mengurangi dampak lingkungan secara signifikan.

Kata Kunci: Life Cycle Assessment, Sisa material, dan SimaPro 9.5.

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Cintiawati, Henita Rahmayanti², & Rezi Berliana. (2025). Analisis Sisa Material Keramik pada Proyek Pakuwon Residence Bekasi Mixed-Use Development Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA). Jejak Digital: Jurnal Ilmiah Multidisiplin, 1(5), 2964-2974. <https://doi.org/10.63822/cq1ekm23>

PENDAHULUAN

Pada pelaksanaan sebuah proyek konstruksi bangunan, sudah tidak dapat dihindari lagi terhadap hadirnya sisa material konstruksi atau biasa disebut dengan *waste material* (Mas Pertiwi dkk., 2019). Sisa material konstruksi dapat didefinisikan sebagai material yang sifatnya berlebih dari yang ditentukan, baik itu berupa hasil pekerjaan ataupun material konstruksi yang tersisa/berserakan/rusak sehingga tidak bisa digunakan kembali sesuai dengan fungsinya (Wijaya & Huda, 2020). Menurut (Nawawi dkk., 2021), banyak faktor yang dapat menimbulkan sisa material tersebut antara lain faktor desain, faktor pengadaan material, faktor penanganan material, faktor pelaksanaan, faktor residual, dan faktor lainnya.

Sisa material konstruksi dapat menambah kuantitas dari sampah kota yang dimana tempat pembuangan (*landfill*) yang tersedia tidak cukup bagi kota-kota besar yang mengakibatkan beban lingkungan semakin bertambah (Mas Pertiwi dkk., 2019). Pernyataan ini juga diperkuat oleh HH Lau & A. Whyte 2007 dalam (Firmawan, 2012) yang menyatakan bahwa industri konstruksi menjadi salah satu kontributor utama dari dampak negatif terhadap lingkungan, yang diakibatkan oleh tingginya jumlah limbah yang dihasilkan dari konstruksi, baik dalam pekerjaan renovasi, pembongkaran ataupun kegiatan yang masih terikat dengan kegiatan konstruksi. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa sisa material yang tidak dikelola dengan baik akan menjadi limbah yang memberikan dampak negatif pada lingkungan.

Pada proyek Pakuwon *Residence Bekasi Mixed-Use Development* yang memiliki skala proyek besar dengan luas lahan 31.392 m^2 dan luas bangunan seluas 15.086 m^2 serta terdapat 5 tower dengan 41 lantai yang berfungsi sebagai apartemen, mall dan hotel, sangat penting untuk mengidentifikasi jenis material yang sering menyisakan limbah serta potensi daur ulang material yang berpotensi memiliki dampak terhadap lingkungan. Dengan memahami bahwa proyek konstruksi skala besar dapat menghasilkan limbah material dalam jumlah signifikan, maka sangat penting untuk diterapkan metode yang dapat mengelola dampak lingkungan serta meminimalisir dari adanya dampak yang dihasilkan dari sisa material tersebut. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode *Life Cycle Assesment* (LCA).

LCA digunakan sebagai pendekatan yang komprehensif untuk mengetahui dampak lingkungan dari material serta proses konstruksi sepanjang dengan siklus hidupnya. LCA sendiri adalah suatu metode yang digunakan untuk menilai dan mengevaluasi dampak bagi lingkungan secara menyeluruh yang ditimbulkan oleh suatu produk (Devia dkk., 2017). Penggunaan material dalam konstruksi merupakan salah satu sumber dari emisi karbon dioksida, pada penelitian yang dilakukan oleh (Zabalza dkk, 2011) didapatkan informasi bahwa material konstruksi memiliki signifikansi sumber emisi karbon dioksida terbesar yang terdiri dari semen (30,3%), keramik (20,3%) serta baja (18,7%). Salah satu dari material tersebut adalah material yang ada pada pekerjaan *finishing* yaitu keramik. Sejauh ini, belum ada penelitian yang membahas mengenai sisa material pada pekerjaan *finishing* menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA). Oleh karena itu, penelitian ini akan berfokus pada sisa material yang ada pada pekerjaan finishing dengan menggunakan metode LCA.

Penelitian terdahulu dengan judul '*Life Cycle Assessment* (LCA) Paving Block Tanpa Semen Menggunakan Limbah Botol Plastik' oleh (Karisma dkk., 2023), merupakan salah satu penelitian yang paling relevan dengan penelitian ini. Meskipun terfokus pada paving block berbahan limbah plastik, pendekatan yang digunakan dalam mengevaluasi dampak lingkungan material konstruksi melalui metode LCA dapat diadaptasi dalam penelitian ini.

Maka, Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis sisa material pada pekerjaan *finishing* dalam proyek *Pakuwon Residence Bekasi Mixed-Use Development* dengan menggunakan metode LCA, guna menilai dampak lingkungan dan mengusulkan skenario perbaikan terhadap pengelolaan

material yang lebih efisien. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi bagi kontraktor dalam merancang strategi pengelolaan material yang lebih efektif

METODE PELAKSANAAN

Tempat dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian berada di Pakuwon *Residence* Bekasi *Mixed-Use Development* yang terletak di Jl. Raya Pekayon No.002, RT.001/RW.001, Pekayon Jaya, Kec. Bekasi Sel., Kota Bekasi, Jawa Barat 17530. Penelitian ini dilaksanakan pada sekitar bulan April-Juli 2025.

Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi keseluruhan dalam penelitian ini adalah seluruh karyawan Proyek Pakuwon *Residences* Bekasi *Mixed-Use Development*. Adapun kriteria inklusi dalam penelitian ini mencakup karyawan yang secara aktif terlibat dalam kegiatan proyek, khususnya dalam proses pengelolaan material konstruksi. Sementara itu, kriteria eksklusi ditetapkan untuk menghindari data dari individu yang tidak sesuai dengan fokus penelitian, berupa karyawan non-teknis, pekerja harian lepas, serta karyawan yang sedang cuti atau tidak aktif selama periode pengumpulan data.

Pada sampel penelitian ini, kriteria inklusi mencakup individu yang memiliki jabatan sebagai *Quantity Surveyor (QS)*, *Quality Control (QC)*, dan bagian *logistik (SCM)*, dengan pengalaman kerja minimal satu tahun di proyek konstruksi serta memiliki keterlibatan aktif dalam pengelolaan, pengawasan, atau distribusi material. Selain itu, hanya individu yang bersedia dan mampu memberikan informasi secara lengkap yang dijadikan sampel. Adapun kriteria eksklusi meliputi individu yang tidak memiliki peran teknis terhadap material proyek, sedang tidak aktif bekerja saat pengumpulan data berlangsung, atau yang menolak berpartisipasi dalam penelitian ini.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan pengumpulan data primer melalui observasi dan wawancara dan data sekunder melalui studi dokumentasi dan Studi literatur. Dengan menggunakan metode *Life Cycle Assessment (LCA)*, data tersebut dianalisis secara kuantitatif menggunakan *software* SimaPro dan hasilnya dideskripsikan, sehingga pada penelitian ini akan diketahui dampak lingkungan yang dihasilkan dari material konstruksi yang paling banyak menghasilkan sisa serta membuat skenario perbaikannya. Adapun diagram alir penelitian ini yang

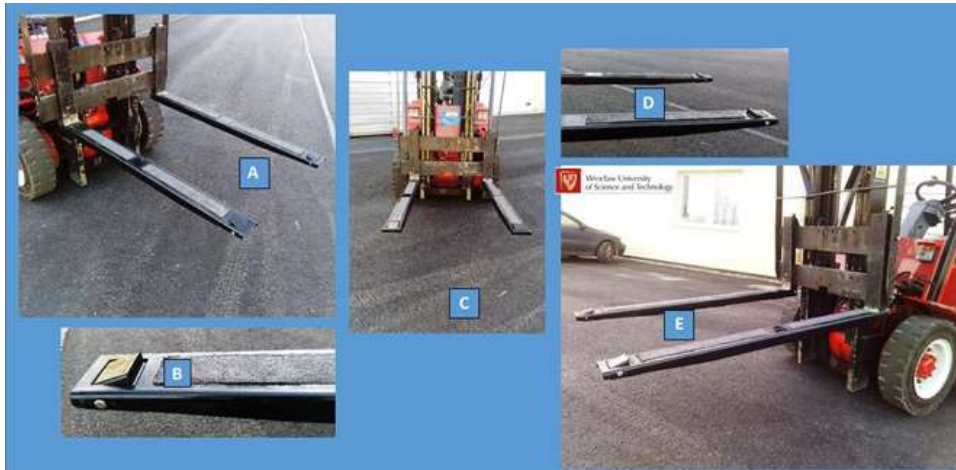
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Tahap Penyimpanan dan Penanganan

Aktivitas penyimpanan dan penanganan material keramik tidak memberikan kontribusi langsung terhadap dampak lingkungan dalam konteks LCA menggunakan *software* SimaPro 9.5. Hal ini dikarenakan seluruh proses dilakukan secara manual tanpa konsumsi energi listrik maupun bahan bakar lainnya, sehingga tidak terjadi pelepasan emisi ataupun penggunaan energi yang dapat dikalkulasi dalam bentuk skoring dampak lingkungan.

Selain itu, kerusakan material berupa pecah akibat pembongkaran dengan *forklift* juga tidak menghasilkan emisi langsung karena tidak melibatkan proses kimia maupun mekanis. Potensi dampaknya telah diakomodasi melalui estimasi waste lapangan, yang telah dimasukkan ke dalam model SimaPro 9.5 pada tahap pengelolaan waste material. Oleh karena itu, memasukkan tahapan ini secara eksplisit dalam model SimaPro dinilai tidak relevan dan berisiko menyebabkan penghitungan ganda (*double counting*).

Skenario Perbaikan yang dapat dilakukan untuk mengurangi kerusakan pada material keramik akibat *forklift* adalah menambahkan Pelindung Tambahan pada *forklift*, Studi oleh (Zajac dkk., 2021) menunjukkan bahwa pemasangan lapisan *anti-slip* berbasis *poliuretan* dan *corundum* pada *forklift* dapat meningkatkan stabilitas muatan dan mengurangi kerusakan selama pemindahan *pallet* tanpa menambah penggunaan energi atau memperbesar jejak karbon. Adapun saran alternatif adalah dengan tidak harus membeli alat tambahan terpisah, namun lebih kepada pemilihan *forklift* yang sudah terintegrasi dengan pelindung *anti-slip* yang dimana bisa menjadi solusi yang lebih efisien, minim intervensi teknis, dan hemat biaya jangka panjang. Berikut pada gambar 4.21 adalah contoh penggunaan *anti-slip* pada *forklift* berbahan dasar *poliuretan* dan *corundum*.



Gambar 1, (A) Tampak Samping Kanan, (B) Pengunci Sebelah Kanan, (C) Tampak Depan, (D) Tampak Sebelah Kiri, (E) Pengunci Sebelah Kiri

Sumber: Zajac dkk., 2021

Tahap Penggunaan Material

Penilaian dampak lingkungan pada tahap penggunaan material menunjukkan bahwa kategori *Human Health* menjadi dampak paling dominan di seluruh tahapan, walaupun pada tahap *characterization* kategori berupa *Aquatic Ecotoxicity*, *Non-renewable Energy*, dan *Terrestrial Ecotoxicity* terlihat tinggi di tahap tersebut dikarenakan nilai absolutnya yang besar. Namun setelah melalui proses *normalization* dan *weighting*, dampak terhadap *Human Health* menjadi lebih menonjol karena ia memiliki relevansi yang lebih besar terhadap kesejahteraan manusia dan diakui lebih penting secara global, hal ini menandakan bahwa penggunaan material, terutama keramik dan mortar, memberikan kontribusi besar terhadap risiko kesehatan manusia, yang kemungkinan disebabkan oleh emisi zat berbahaya selama proses pemasangan terutama pada pemotongan keramik. Dampak terhadap kategori lain seperti *Climate Change*, *Resources*, dan *Ecosystem Quality* juga muncul namun relatif lebih rendah, masing-masing mencerminkan kontribusi terhadap emisi karbon, konsumsi energi primer, dan kerusakan ekosistem.

Pemotongan keramik selama pemasangan dapat disebabkan karena ukuran keramik kurang proporsional terhadap bentuk ruangan yang dipasang, sehingga banyak keramik yang harus dipotong agar sesuai (Tong dkk., 2024). Maka, skenario perbaikan yang dapat dilakukan agar mengurangi pemotongan keramik adalah penggunaan ukuran keramik yang lebih sesuai dengan dimensi ruang, sehingga potensi pemotongan dapat ditekan. Kemudian, dengan pemilihan ukuran keramik yang sesuai guna meminimalisir potongan pada keramik adalah dengan memanfaatkan *Building Information Modeling* (BIM) menggunakan autodesk Revit. Menurut jurnal *Implementasi Building Information Modelling (BIM) dalam Estimasi Volume Pekerjaan Struktural dan Arsitektural* oleh (Aulya Reista & Ilham, 2022), penerapan BIM menggunakan Autodesk Revit terbukti mampu meningkatkan akurasi dalam proses estimasi volume pekerjaan bangunan, termasuk elemen arsitektural seperti pola lantai. Dalam studi kasus yang dilakukan pada proyek Rumah Sehat Baznas (RSB) Berau, hasil perbandingan antara model BIM dan dokumen Bill of Quantity (BQ) menunjukkan bahwa rata-rata perbedaan volume pada pekerjaan pola lantai hanya sebesar 5%. Nilai deviasi yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa pemanfaatan BIM dapat secara signifikan mengurangi potensi kesalahan dalam perencanaan, khususnya yang berkaitan dengan kuantitas material dan potongan di lapangan.

Lebih lanjut, penelitian ini juga menyimpulkan bahwa metode konvensional berbasis gambar 2D rentan terhadap misinterpretasi dan perhitungan ganda, sedangkan dengan BIM, volume dapat dihitung secara otomatis dan akurat sesuai kondisi geometri aktual bangunan. Dengan demikian, penggunaan BIM tidak hanya meningkatkan efisiensi waktu perhitungan, tetapi juga mendukung ketepatan perencanaan dan pengendalian material konstruksi di lapangan. Meskipun proyek tersebut telah menerapkan BIM, tingginya potongan keramik yang diidentifikasi melalui analisis LCA menunjukkan bahwa pemanfaatan BIM belum sepenuhnya terintegrasi dengan proses pemilihan ukuran material. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan optimasi desain modular yang mempertimbangkan dimensi keramik sejak tahap perencanaan. Selain itu, disarankan juga untuk menyediakan panduan visual pemasangan keramik berbasis model BIM kepada pekerja untuk memastikan pemasangan mengikuti layout yang sudah dioptimalisasi.

Kemudian, Untuk menurunkan dampak lingkungan dari penggunaan mortar dalam pemasangan keramik, salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah menggunakan mortar ramah lingkungan yang mengandung bahan substitusi semen seperti *fly ash* atau *slag*. Penggunaan material ini terbukti dapat mengurangi emisi karbon secara signifikan, serta menurunkan konsumsi energi dan risiko terhadap kesehatan manusia. Selain itu, pengaturan volume campuran mortar yang lebih presisi di lapangan juga dapat meminimalkan sisa bahan dan pemborosan, sehingga mendukung efisiensi material secara keseluruhan. (Setya Negara dkk., 2023)

Tahap Pengelolaan Waste

Penilaian dampak lingkungan pada tahap pengelolaan waste menunjukkan bahwa kategori *Human Health* kembali menjadi dampak dominan di seluruh tahapan, terutama dengan skor tertinggi pada normalisasi sebesar 0,735 dan pada weighting sebesar 735 mPt. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun limbah keramik telah dikelola, proses daur ulangnya tetap memberikan kontribusi besar terhadap potensi risiko kesehatan manusia, akibat adanya emisi berbahaya dan residu limbah. Selain itu, kategori *Climate Change* dan *Resources* masing-masing mencatat skor 66,9 mPt dan 58,7 mPt, yang mencerminkan emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi primer yang masih cukup besar. Sementara itu, *Ecosystem Quality*

menunjukkan dampak paling rendah yaitu 9,49 mPt, yang mengindikasikan bahwa dampaknya terhadap ekosistem lebih kecil dibanding kategori lain.

Skenario perbaikan yang dapat dilakukan untuk mengoptimalkan penghancuran keramik adalah dengan Implementasi sistem filtrasi yang efisien. Pemasangan sistem filtrasi debu seperti *baghouse filter* pada *portable crusher machine* sangat direkomendasikan. Sistem ini bekerja dengan menyaring partikel halus dari udara sebelum dilepaskan ke lingkungan. Berdasarkan literatur (Niosh, 2010), penggunaan sistem filtrasi tertutup dapat mengurangi konsentrasi debu hingga 93% pada sekitar mesin penghancur dengan penerapan seperti pasang plenum (saluran hisap) dengan kipas pengisap yang terhubung ke *baghouse filter*. Penerapan pada sistem filtrasi juga sejalan dengan standar kesehatan kerja dan lingkungan yang berlaku.



Gambar 2. *Baghouse Filter*

Sumber: *Ever Lucky Machinery (Google Images)*

Pengelolaan *waste material* dengan mendaur ulang keramik dianggap menghasilkan emisi yang lebih sedikit dibandingkan dengan waste keramik yang dibuang langsung ke TPA. Limbah keramik yang dibuang ke TPA dapat menimbulkan dampak lingkungan yang serius. Seperti dijelaskan oleh (Ahmad dkk., 2024), pembuangan limbah keramik ke TPA tidak hanya meningkatkan tekanan terhadap keterbatasan lahan, tetapi juga berpotensi mencemari tanah, udara, dan air tanah akibat proses degradasi material yang berlangsung secara perlahan. Kondisi ini diperparah oleh minimnya praktik daur ulang limbah keramik di berbagai wilayah, yang menyebabkan potensi limbah tersebut sebagai bahan konstruksi alternatif tidak dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah keramik sebagai agregat dalam beton atau aspal merupakan langkah strategis untuk mengurangi pencemaran, menghemat sumber daya alam, serta mendukung konstruksi berkelanjutan.

Keterbatasan Penelitian

1. Penarikan kesimpulan didasarkan hanya pada kategori yang menghasilkan dampak paling tinggi, sehingga dampak lain yang dihasilkan tidak dianalisis.
2. Emisi yang dihitung hanya emisi yang memiliki konsentrasi kandungan paling tinggi pada tiap material dan umumnya adalah *silika dioksida (SiO₂)*.
3. Proses daur ulang keramik hanya pada tahap penghancuran, tidak diamati secara keseluruhan proses pencampuran untuk aspal.
4. Data yang digunakan pada tahap pengelolaan waste hanya berdasarkan literatur dan berupa asumsi.

KESIMPULAN

1. Tahap penyimpanan dan penanganan material keramik tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap dampak lingkungan dalam kerangka LCA menggunakan *software* SimaPro 9.5, karena seluruh proses dilakukan secara manual tanpa konsumsi energi atau pelepasan emisi langsung pada proses penyimpanan dan penanganan. Selain itu, kerusakan material keramik telah dimodelkan melalui tahap pengelolaan waste menggunakan estimasi, sehingga tidak perlu dimasukkan kembali dalam perhitungan untuk menghindari *double counting*. Skenario Perbaikan kerusakan material keramik akibat penggunaan *forklift* dapat berupa penggunaan *forklift* dengan pelindung tambahan berupa lapisan *anti-slip* berbasis *poliuretan* dan *corundum*, sebagaimana dibuktikan efektivitasnya dalam studi oleh Zajac dkk. (2021), atau dengan memilih *forklift* yang telah terintegrasi fitur tersebut untuk efisiensi dan penghematan biaya jangka panjang tanpa menambah jejak karbon.
2. Tahap penggunaan material menunjukkan bahwa *kategori Human Health* menjadi dampak paling dominan pada tahap penggunaan material, terutama setelah proses *normalisasi* dan *weighting*. Meskipun pada tahap *characterization* dampak terbesar muncul pada kategori *Aquatic Ecotoxicity*, *Non-renewable Energy*, dan *Terrestrial Ecotoxicity* terlihat tinggi di tahap *characterization* bobot dampak terhadap *Human Health* menjadi lebih signifikan karena relevansinya yang tinggi secara global. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan material berupa keramik dan mortar memberikan kontribusi besar terhadap risiko kesehatan, terutama akibat emisi zat berbahaya saat proses pemasangan dan pemotongan keramik. Sementara itu, dampak terhadap *Climate Change*, *Resources*, dan *Ecosystem Quality* juga tercatat, meskipun relatif lebih rendah. Namun, seluruhnya tetap berasal dari keseluruhan tahap penggunaan material. Skenario perbaikan yang diusulkan adalah Mengoptimalkan penerapan *Building Information Modeling* (BIM) dengan *Autodesk Revit* untuk meningkatkan akurasi perencanaan, meminimalkan potongan, serta menghindari kesalahan estimasi volume. Meskipun proyek tersebut telah menerapkan BIM, tingginya potongan keramik yang diidentifikasi melalui analisis LCA menunjukkan bahwa pemanfaatan BIM belum sepenuhnya terintegrasi dengan proses pemilihan ukuran material. Oleh karena itu, diperlukan optimalisasi desain modular sejak awal perencanaan dan penyediaan panduan pemasangan berbasis BIM kepada pekerja agar dapat meminimalkan pemotongan keramik, menurunkan emisi debu, dan mengurangi dampak lingkungan. Lalu, Penggunaan mortar ramah lingkungan dengan substitusi bahan semen seperti *fly ash* atau *slag* dapat secara signifikan menurunkan emisi karbon, konsumsi energi, dan dampak terhadap kesehatan manusia. Selain itu, pengaturan volume campuran yang presisi di lapangan juga berperan penting dalam mengurangi sisa bahan dan mendukung efisiensi material secara keseluruhan.
3. Tahap pengelolaan waste melalui asumsi penghancuran keramik menunjukkan total dampak lingkungan pada perhitungan *weighting* (pembobotan) sebesar 870 mPt, dengan 735 mPt di antaranya berasal dari aspek *Human Health*, diikuti oleh kategori *climate change* juga menyumbang skor yang cukup besar yaitu sebesar 66,9 mPt, diikuti oleh *resources* sebesar 58,7 mPt, dan *ecosystem quality* sebesar 9,49 mPt. Temuan ini menegaskan bahwa pengelolaan limbah, terutama keramik, masih membawa beban lingkungan yang cukup tinggi. Skenario perbaikan dalam penghancuran keramik dapat dilakukan melalui pemasangan sistem filtrasi debu seperti *baghouse filter* pada *portable crusher machine*, yang terbukti mampu menurunkan

konsentrasi debu hingga 93% sesuai standar kesehatan dan lingkungan. Pengelolaan limbah keramik melalui daur ulang jauh lebih ramah lingkungan dibandingkan pembuangan ke TPA, yang dapat mencemari tanah, udara, dan air tanah. Studi menyatakan bahwa pemanfaatan limbah keramik sebagai agregat dalam beton atau aspal merupakan strategi efektif untuk mengurangi dampak lingkungan, menghemat sumber daya alam, serta mendukung pembangunan berkelanjutan

SARAN

1. Penelitian selanjutnya sebaiknya melakukan penelitian mendalam terhadap proses penggunaan waste keramik sebagai agregat untuk bahan campuran aspal menggunakan metode *Life Cycle Assessment*.
2. Penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan metode lain sehingga dapat dibandingkan dengan metode pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrizstantia, L., & Handoyotomo. (2020). Evaluasi Konsep Mixed-Use Building Sebagai Alternatif Penataan Ruang Bangunan Di Masjid RSI Cileungsi Bogor. In *Seminar Karya & Pameran Arsitektur Indonesia*.
- Aini Ayu Ismawati, N., & Andaryati, dan. (2024). Pengaruh Penggunaan Limbah Keramik Sebagai Bahan Pengganti Agregat Halus Terhadap Karakteristik Beton. 12(1), 39–046.
- Amin, F. N., Garancang, S., & Abunawas, K. (2023). Konsep Umum Populasi dan Sampel Dalam Penelitian.
- Aulya Reista, I., & Ilham, dan. (2022). Implementasi Building Information Modelling (BIM) dalam Estimasi Volume Pekerjaan Struktural dan Arsitektural. *Journal of Sustainable Construction*, 2(1), 13–22. <https://journal.unpar.ac.id/index.php/josc>
- Chaerul, M., & Allia, V. (2020). Tinjauan Kritis Studi Life Cycle Assessment (LCA) di Indonesia. *Serambi Engineering*, V(1). <http://garuda.ristekdikti.go.id/>
- Christhy, Sapulete, A., Lie, H. A., & Priastiwi, Y. A. (2018). Sustainability Beton Metode Life Cycle Assessment Studi Kasus: Limbah Beton Laboratorium Bahan dan Konstruksi Departemen Teknik Sipil Universitas Diponegoro Semarang. In *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 24, Issue 2).
- Devia, Y. P., Unas, S. E., Safrianto, R. W., & Nariswari, W. (2010). Identifikasi Sisa Material Konstruksi Dalam Upaya Memenuhi Bangunan Berkelanjutan (*Construction Waste Identification for Complying Sustainable Building*). *Rekayasa Sipil*, 4(3).
- Devia, D., Lestari, P., Sembiring, E., & Studi Teknik Lingkungan, P. (2017). *Life Cycle Assessment (LCA) Produk Semen Portland Komposit (studi kasus: PT X) [Life Cycle Assessment of Portland Cement Composite (case study: PT X)]*. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 23.
- Fajar, S., Happy Puspasari, veronika, & Waluyo, R. (2018). *Evaluasi Dan Nalisa Sisa Material Konstruksi* (Vol. 1, Issue 1).
- Fazri, R. (2014). *Strategi Pengembangan Mixed-Use Sebagai Penunjang Kegiatan Industri Kota Cilegon*.

- Fikri, E. (2021). Menilai Dampak Lingkungan dengan Analisa Daur Hidup (LCA). Bandung: Pustaka Setia.
- Firmawan, F. (2012). *Karakteristik dan Komposisi Limbah (Construction Waste)*.
- Fistcar, W. A. (2020). Implementasi Life Cycle Assessment (LCA) Pada Pemilihan Perkerasan Kaku dan Lentur Kontruksi Jalan Tol Balikpapan-Samarinda. <https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v18i2.6005>
- Giunta, M. (2020). Assessment of the impact of co, nox and pm10 on air quality during road construction and operation phases. *Sustainability (Switzerland)*, 12(24), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su122410549>
- Intermax. (2024). *Material Safety Data Sheet (MSDSS)*.
- Judijanto, L., Karina Putri, V., & Ansori, T. (2023). Analisis Dampak Penggunaan Energi Terbarukan, Efisiensi Energi, dan Teknologi Hijau pada Pengurangan Emisi Karbon di Industri Manufaktur Kota Tangerang. In *Jurnal Multidisiplin West Science* (Vol. 02, Issue 12).
- Karisma, D. A., Nursandah, F., & Rahmawaty, F. (2023). *Life Cycle Assessment (LCA) Pavin Block Tanpa Semen Menggunakan Limbah Botol Plastik*.
- Kurnia W., A., Handayani, F. S., & Setyawan, A. (2022). Analisis Emisi GRK dengan metode LCA pada Pekerjaan Konstruksi Jembatan Simpang Susun Rangkasbitung. *Matriks Teknik Sipil*, 10(3), 203. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i3.61215>
- Maisarah, & Dian, R. (2024). Metode Life Cycle Assessment (LCA) Dalam Penilaian Dampak Lingkungan Industri Kelapa Sawit Untuk Kelapa Sawit Berkelanjutan. *Tabela Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 2(1), 15–23. <https://doi.org/10.56211/tabela.v2i1.452>
- Madjid, K., & Medtry. (2021). *Kajian Pengembangan Kawasan Campuran (Mixed Use) di Perkotaan Study of Mixed-Use Developmen in Urban Areas*.
- Mas Pertiwi, I., Surya Herlambang, F., Sri Kristinayanti, W., & Teknik Sipil Politeknik Negeri Bali, J. (2019). Analisis Waste Material Konstruksi Pada Proyek Gedung (Studi Kasus pada Proyek Gedung Di Kabupaten Badung). 9(1).
- Muthmainah, P. A., & Nursin, A. (2022). Analisis Produktivitas Pekerjaan Finishing pada Proyek Transit Oriented Development (TOD) Pondok Cina Kota Depok. In *Maret* (Vol. 4, Issue 1).
- Muniandy, R., Husna Ismail, D., & Hassim, S. (2019). Performance of Recycled Ceramic Waste as Aggregates in Asphalt Mixtures. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(6). <https://doi.org/10.17265/2328-2142/2019.06.001>
- Nawawi, M., Muttaqin, M., & Afifuddin, M. (2021). Faktor-faktor Penyebab Timbulnya Waste Materials Dalam pelaksanaan Proyek Konstruksi gedung Di Kota banda Aceh. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 295. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i2.479>
- Niosh. (2010). *Best Practices for Dust Control in Metal/Nonmetal Mining*. www.cdc.gov/niosh.
- Park, Y. S., Egilmez, G., & Kucukvar, M. (2017). *Cradle-to-gate Life Cycle Analysis of Agricultural and Food Production in the US: A TRACI Impact Assessment*.
- PRé. (2020). *SimaPro Database Manual Methods Library Title: SimaPro Database Manual Methods Library*.
- Putra, I. G. P. A. S., Damayanti, G. A. P. C., & Dewi, A. A. D. P. (2018). Penanganan waste material pada proyek konstruksi gedung bertingkat. *Jurnal Spektran*, 6(2), 176–185.
- Rahmayanti, H., Maulida, E., & Kamayana, E. (2019). The Role of Sustainable Urban Building in Industry 4.0. *Journal of Physics: Conference Series*, 1387(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1387/1/012050>

- Roflin, E., Liberty, I. A. & Pariyana (2021). Populasi, Sampel, Variabel. Pekalongan: Nasya *Expanding Management*.
- Sarkar, S., Ahmed, M., Chowdhury, M. A. H., & Melton, G. (2022). *Life Cycle Assessment (LCA) Results of MIG and TIG Welding Technologies Using the IMPACT 2002+ Methodology*. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 11(8), 564–568. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.11.8.564-568>
- Shobari, E., Affandi, K., & Galupamudia, N. (2022). *Mixed-Use Building Design Apartments And Commercial Building*.
- Sugiyarto, Hartono, W., & Prakoso, I. T. (2017). Analisis dan Identifikasi Sisa Material Konstruksi dalam Proyek Pembangunan dan Peningkatan Jalan Solo-Gemolong-Geyer Bts, Kab. Sragen. *e-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 070, 1077.
- Suhariyanto, T. T., Asih, H. M., Ichwanuddin, A., & Rasyid, M. I. (2023). Penerapan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA) pada Proses Produksi Downlight Aluminium (studi kasus di UPT Logam Yogyakarta). *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri (JITMI)*, 6(1).
- Sulistio, W. M. (2021). Kerugian Kontraktor Akibat Waste Material Proyek Konstruksi Gedung Bertingkat. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 10(1), 84–98. <https://doi.org/10.22225/pd.10.1.2385.84-98>
- Tambuwun, E. M., Walangitan, D. R. O., & Masuara, I. (2024). Evaluasi sisa material konstruksi menggunakan metode *Pareto* dan *Fishbone Diagram* pada proyek pembangunan ruko Kawanua Emerald City. *Tahun*, 22(88).
- Thoengsal, J. (2020). Pengelolaan Sisa Material pada Proyek Konstruksi. *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/publication/361597957>
- TUTAR ÖKSÜZ, S. (2022). *Life Cycle Assessment of Microbial Electrolysis Cells for Hydrogen Generation Using TRACI Methodology*. *Sakarya University Journal of Science*, 26(3), 620–632. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.1005044>
- Verbitsky, O., & Pushkar, S. (2018). *Eco-Indicator 99, ReCiPe, and ANOVA for Evaluating Building Technologies Under LCA Uncertainties* (Vol. 17, Issue 11). <http://www.eemj.icpm.tuiasi.ro/>; <http://www.eemj.eu>
- Wibowo, K. (2018). Analisa dan evaluasi: Akar Penyebab dan Biaya Sisa Material Konstruksi Proyek Pembangunan Kantor Kelurahan di Kota Solo, sekolah, dan Pasar Menggunakan *Root Cause Analysis* (RCA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA).
- Wijaya, M. I. R., & Huda, M. (2020). *Analisis Penyebab Terjadinya Sisa Material Proyek Gedung Di Surabaya*. 8(2), 149–158.
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). *Life Cycle Assessment of Building Materials: Comparative Analysis of Energy and Environmental Impacts and Evaluation of The Eco-Efficiency Improvement Potential*. *Building and Environment*, 46(5), 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- Zajac, P., Dragasius, E., & Roik, T. (2021). Energy consumption when transporting pallet loads using a forklift with an anti slip pad preventing damage. *Energies*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/en14248423>