



PENGUNAAN MATERIAL LIMBAH UNTUK PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN PADA KONTRUKSI JALAN RAYA

(USE OF WASTE MATERIALS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN HIGHWAY CONSTRUCTION)

Novi Andira Anggreani Nurhadi¹, Mayan'k Damayanti², Danang Hadi Nugroho³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tulungagung

Alamat korespondensi :

email: arangujanggg@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tulungagung

Alamat korespondensi :

email: mayankdamayanti86@gmail.com

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tulungagung

Alamat korespondensi :

email: danangmarkko@gmail.com

Abstract

The concept of using waste materials in road construction has gained significant attention due to increased awareness of environmental issues and the circular economy. This research aims to explore the potential of waste materials, such as fly ash, plastic waste, and steel slag, as sustainable alternatives to traditional construction materials. The methodology used in this study is a literature analysis of various empirical studies on the effectiveness and efficiency of recycled materials in enhancing road pavement stability and durability. The findings indicate that recycled materials not only offer economic and environmental benefits but also meet the technical standards required in road construction. The application of recycled materials in road infrastructure development is a strategic step toward reducing dependence on natural resources and supporting environmentally friendly construction.

Keywords: recycled materials, road construction, sustainable development, fly ash, plastic waste

Abstrak

Konsep penggunaan material limbah dalam konstruksi jalan raya telah mendapatkan perhatian yang signifikan seiring meningkatnya kesadaran terhadap isu lingkungan dan ekonomi sirkular. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi penggunaan material limbah, seperti abu terbang, limbah plastik, dan terak baja, sebagai alternatif material konstruksi yang lebih berkelanjutan. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis literatur dari berbagai studi empiris tentang efektivitas dan efisiensi bahan daur ulang dalam meningkatkan stabilitas dan daya tahan perkerasan jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material daur ulang tidak hanya memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan, tetapi juga memenuhi standar teknis yang diperlukan dalam konstruksi jalan. Penerapan material daur ulang dalam pembangunan infrastruktur jalan merupakan langkah strategis untuk mengurangi ketergantungan pada material alami dan mendukung pembangunan yang ramah lingkungan.

Kata kunci: material daur ulang, konstruksi jalan raya, pembangunan berkelanjutan, abu terbang, limbah plastik

PENDAHULUAN

Konsep penggunaan bahan limbah dalam pembangunan jalan bukanlah hal baru, tetapi pentingnya konsep ini telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir karena meningkatnya tantangan lingkungan dan dorongan untuk ekonomi sirkular. Dengan memanfaatkan kembali produk sampingan industri, sisa pertanian, dan bahan limbah lainnya, pembangunan jalan dapat menjadi bagian penting dari solusi untuk masalah pengelolaan limbah global. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip-prinsip

pembangunan berkelanjutan, yang menekankan perlunya pertumbuhan ekonomi tanpa mengorbankan kesehatan planet ini. Berbagai produk limbah seperti abu batu bara, terak tanur tinggi, dan limbah konstruksi dan pembongkaran, antara lain, sedang digunakan kembali untuk aplikasi seperti tanggul, bahan dasar dan sub-dasar, dan bahkan dalam campuran aspal dan beton. Bahan-bahan ini, yang bersumber dari industri seperti tenaga termal, baja, petrokimia, dan konstruksi, menyediakan alternatif yang hemat biaya dan ramah lingkungan untuk sumber daya konstruksi tradisional. Berbagai aplikasi bahan limbah ini dapat menunjukkan potensi untuk mengurangi dampak lingkungan sambil mempertahankan integritas struktural jalan raya.

Bahan limbah dari proyek infrastruktur, termasuk limbah konstruksi dan pembongkaran (C&D) dan perkerasan aspal daur ulang (RAP), merupakan sumber daya yang berharga dalam konstruksi jalan. Limbah C&D, yang terdiri dari bahan-bahan seperti beton, batu bata, dan logam, sering dihancurkan dan digunakan kembali di lapisan dasar dan sub-dasar, menyediakan fondasi yang stabil untuk jalan. Aspal daur ulang, yang bersumber dari perkerasan lama, diproses dan dimasukkan kembali ke dalam lapisan aspal baru, mengurangi kebutuhan akan bahan baru dan menurunkan jejak karbon keseluruhan proyek jalan. Pendekatan ini tidak hanya meminimalkan limbah tetapi juga mendukung ekonomi sirkular, di mana bahan digunakan kembali daripada dibuang.

Bahan limbah dari proyek infrastruktur, termasuk limbah konstruksi dan pembongkaran (C&D) dan perkerasan aspal daur ulang (RAP), merupakan sumber daya yang berharga dalam konstruksi jalan. Limbah C&D, yang terdiri dari bahan-bahan seperti beton, batu bata, dan logam, sering dihancurkan dan digunakan kembali di lapisan dasar dan sub-dasar, menyediakan fondasi yang stabil untuk jalan. Aspal daur ulang, yang bersumber dari perkerasan lama, diproses dan dimasukkan kembali ke dalam lapisan aspal baru, mengurangi kebutuhan akan bahan baru dan menurunkan jejak karbon keseluruhan dari proyek jalan. Pendekatan ini tidak hanya meminimalkan limbah tetapi juga mendukung ekonomi sirkular, di mana bahan digunakan kembali daripada dibuang. Bahan limbah pertanian seperti jerami padi, jarum pinus, dan bio bitumen menawarkan solusi inovatif untuk konstruksi jalan yang berkelanjutan. Jerami padi, yang biasanya dibakar sebagai metode pembuangan, dapat diolah menjadi bio bitumen, pengikat ramah lingkungan yang menggantikan bitumen konvensional dalam campuran aspal. Jarum pinus, bentuk lain dari residu pertanian, sedang dieksplorasi karena potensinya dalam bahan komposit untuk konstruksi jalan. Bahan limbah ini menyediakan alternatif terbarukan untuk sumber daya tradisional, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan berkontribusi pada industri konstruksi yang lebih berkelanjutan. Limbah plastik, yang menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan, dapat digunakan untuk meningkatkan fleksibilitas dan daya tahan bitumen dalam lapisan aspal. Limbah elektronik, yang mengandung logam dan bahan berharga, didaur ulang dan diintegrasikan ke dalam bahan konstruksi sehingga mengurangi beban pada tempat pembuangan sampah dan ekstraksi sumber daya.

Kendala teknis dalam upaya pembangunan jalan meliputi memastikan kompatibilitas berbagai material, menetapkan prosedur standar, dan memperoleh keahlian teknis yang diperlukan untuk mengintegrasikan material ini secara efektif ke dalam praktik konstruksi. Tantangan regulasi dan hukum juga menimbulkan rintangan yang signifikan, seperti tidak adanya pedoman yang jelas, perlunya spesifikasi yang diperbarui, dan kurangnya dukungan regulasi yang memadai untuk mengawasi dan mendukung penggunaan material ini. Lebih jauh, membangun kepercayaan pasar dan klien sangatlah penting; mengatasi keraguan memerlukan pembuktian manfaat jangka panjang dari praktik berkelanjutan ini dan mendorong penerapannya melalui proyek percontohan yang berhasil dan penelitian yang komprehensif. Mengatasi tantangan ini sangat penting untuk memajukan penggunaan material limbah dalam konstruksi jalan dan mencapai masa depan yang lebih berkelanjutan.

Dorongan utama pemanfaatan bahan limbah ke dalam bidang konstruksi jalan adalah mengurangi dampak buruk dari pemrosesan bahan alami terhadap lingkungan, meringankan beban otoritas di negara berkembang dan negara maju dalam menyediakan tempat pembuangan sampah dan menetapkan ketentuan untuk limbah tersebut, dan menegaskan kembali komitmen industri terhadap layanan jalan yang lebih baik dan kualitas berkendara. Selain itu, kelangkaan sumber daya alam juga merupakan alasan intuitif yang mendukung pemanfaatan. Beberapa studi eksperimental dan penelitian telah didedikasikan untuk menyelidiki potensi penggabungan bahan limbah di bidang konstruksi jalan. Banyak penelitian telah terbukti berhasil dalam penggunaan kembali dan daur ulang beberapa komposisi bahan limbah ini dalam struktur perkerasan dan yang lainnya masih menjalani studi penelitian

komprehensif untuk lebih menjelaskan apa yang dapat diperoleh dari daur ulang mereka menjadi konstruksi perkerasan. Karena pengetahuan yang ketat dan kurangnya dana untuk analisis mendalam tentang pemanfaatan beberapa bahan limbah dengan cara yang paling bermanfaat, bahan limbah menjadi masalah inti yang bermasalah bagi lembaga pemerintah dan otoritas perundang-undangan transportasi di beberapa bagian dunia.

Kerja sama internasional merupakan faktor kunci dalam melindungi lingkungan melalui pengurangan emisi gas rumah kaca dan pelestarian sumber daya alam melalui pemanfaatan bahan daur ulang yang layak ke dalam bidang konstruksi dan memberikan fokus pada penilaian pendekatan dalam menggunakan bahan tersebut. Bahan non-konvensional didefinisikan sebagai bahan yang tidak memiliki sifat yang diperlukan sesuai dengan spesifikasi tradisional. Dengan permintaan yang tak ada habisnya untuk bahan agregat dalam konstruksi jalan, kelangkaan bahan berkualitas yang diterima serta dorongan dalam melestarikan sumber daya alam, telah menjadi kebutuhan mendesak untuk memasukkan bahan sekunder dan produk sampingan limbah di bidang konstruksi jalan. Beberapa bahan daur ulang limbah telah dimasukkan dalam berbagai proyek di seluruh dunia dan menunjukkan peluang tidak hanya dalam penghematan anggaran tetapi juga dalam melindungi lingkungan.

Respons jalan dan kinerja jangka panjang bergantung sepenuhnya pada atribut serius dari bahan yang dimasukkan dalam komposisi struktur, merupakan masalah menyeluruh untuk memahami secara menyeluruh perilaku dan pola bahan-bahan ini dan efek transmutasinya ketika digunakan sendiri atau dicampur dengan bahan lain dan digunakan dalam struktur perkerasan jalan. Dipercaya bahwa respons terhadap permintaan yang semakin besar untuk menyediakan substitusi bahan alami dalam konstruksi jalan telah responsif dan tercermin secara efisien. Banyak penelitian telah didedikasikan untuk melaksanakan studi kelayakan tentang penggunaan bahan pengganti ini dengan mempertimbangkan perspektif keberlanjutan bagi lingkungan dan ekonomi.

Memasukkan plastik daur ulang ke dalam perkerasan aspal membantu mengurangi limbah padat kota dan mendukung pengelolaan limbah plastik yang efektif. Ini juga menghilangkan kebutuhan akan polimer yang mahal untuk memodifikasi campuran aspal yang digunakan dalam perkerasan jalan. Selain itu, plastik daur ulang dapat meningkatkan stabilitas termal aspal, ketahanan degradasi, dan ketahanan terhadap deformasi, sehingga memperpanjang masa pakai material. Keuntungan penggunaan plastik dalam aspal bergantung pada teknologi pemrosesan yang digunakan. Metode pemrosesan kering dan basah memengaruhi sifat termorheologi dan mekanis perkerasan aspal. Oleh karena itu, pemilihan metode-metode tersebut harus mempertimbangkan peralatan produksi yang tersedia, indikator kinerja, sumber limbah plastik, dan sifat campuran aspal yang diinginkan.

Secara keseluruhan, penggunaan limbah plastik daur ulang dalam aspal untuk konstruksi jalan yang ramah lingkungan menawarkan berbagai keuntungan. Namun, penelitian lebih lanjut, termasuk penilaian siklus hidup, diperlukan untuk memastikan manfaat lingkungan dan ekonomi ini. Selain itu, kinerja jalan jangka panjang yang dibuat menggunakan aspal yang dimodifikasi plastik harus dievaluasi. Pemahaman yang lebih baik tentang pengaruh berbagai limbah plastik terhadap sifat aspal dan mekanisme mikrokosmik terkait akan memungkinkan kontrol yang lebih baik atas kinerja aspal. Hal ini akan mendorong penerapan plastik daur ulang dalam aspal.

METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan metodologi kualitatif dan mengandalkan analisis komprehensif dari materi terkait dari sumber jurnal yang dapat diandalkan. Pembahasan dan deskripsi sampah plastik yang digunakan dalam pembangunan merupakan karakteristik utama studi ini. Studi lengkap dapat dibandingkan dan diringkas. Artikel-artikel tersebut mematuhi kriteria berikut: (i) dimasukkan dalam jurnal terindeks, (ii) aksesibilitas melalui saluran terbuka, (iii) ketersediaan sebagai dokumen teks lengkap, dan (iv) publikasi dalam sepuluh tahun terakhir. Artikel-artikel tersebut bersumber dari 80% platform jurnal terkenal, termasuk Google Scholar, Elsevier, Springer, dan Research Gate.

Penelitian kualitatif dapat didefinisikan sebagai studi tentang hakikat fenomena dan sangat tepat untuk menjawab pertanyaan tentang mengapa sesuatu (tidak) diamati, menilai intervensi multikomponen yang kompleks, dan berfokus pada peningkatan intervensi. Metode pengumpulan data yang paling umum adalah studi dokumen, observasi partisipan, wawancara semi-terstruktur, dan kelompok fokus. Studi kasus kolektif atau jamak menggunakan data dari berbagai penelitian untuk

merumuskan kasus bagi penyelidikan lain. Pemanfaatan penyelidikan masa lalu memberikan informasi tambahan tanpa menginvestasikan lebih banyak energi pada pemeriksaan tambahan. Seringkali peneliti sengaja memilih berbagai kasus untuk menunjukkan sudut pandang alternatif tentang masalah tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis komparatif sangat penting untuk membuat keputusan pengembangan produk yang tepat. Dengan membandingkan tren pasar, umpan balik pelanggan, dan kemajuan teknologi, pemilik dan manajer produk dapat mengidentifikasi peluang untuk inovasi dan diferensiasi. Analisis komparatif merinci bagaimana data atau proses dibandingkan satu sama lain dan menjelaskan bagaimana keduanya saling terkait. Ini memberikan konteks untuk analisis sehingga perbedaan dan kesamaan dalam hubungan antara kumpulan data menjadi jelas. Misalnya, produsen mobil dapat membandingkan fitur keselamatan dari dua model atau lebih untuk menentukan bagaimana fitur tersebut memengaruhi penjualan atau fitur mana yang memerlukan perbaikan. Jenis analisis ini dapat memberikan data mendalam tentang setiap fitur dan memberikan data historis untuk membuat perbandingan tentang kinerja setiap fitur. Berikut tabel analisis komparatif yang bersumber dari berbagai jurnal terkait pembangunan berkelanjutan yang menggunakan material limbah pada pembangunan jalan raya.

Tabel 1. Tabel Analisis Komparatif Pembangunan Berkelanjutan Menggunakan Recycle Material Pada Pembangunan Jalan Raya

No	Penulis	Judul	Material	Hasil
1	Karn Kantatham	Innovations in recycled construction materials: paving the way towards sustainable road infrastructure	Agregat daur ulang termasuk agregat beton daur ulang (RCA), perkerasan aspal daur ulang (RAP), terak baja (SS), serpihan melamin (MD), plastik polietilen tereftalat (PET), dan karet remah (CR). Produk sampingan industri termasuk abu terbang (FA), abu dasar (BA), dan terak tanur tinggi (BFS). Lateks karet alam (NRL), yang berasal dari Hevea brasiliensis, merupakan pengubah utama di berbagai material.	Penelitian ini menyoroti kemajuan signifikan dalam pengembangan dan penerapan material perkerasan berkelanjutan selama dekade terakhir. Temuan kami menunjukkan kelayakan dan kinerja unggul material daur ulang, termasuk limbah konstruksi dan pembongkaran, produk sampingan industri, dan serat rami alami, sebagai alternatif agregat murni dalam konstruksi jalan.
2	S.Sai Krishna, Dr. B. Manoj	Use Of Recycled Materials In Road Construction	1. Abu terbang yang merupakan bahan limbah yang dikeluarkan dari gas yang keluar dari pemanas berbahan bakar batu bara, pada umumnya dari pembangkit listrik tenaga air, disebut abu terbang. Penumpukan mineral yang tertinggal setelah pembakaran batu bara disebut abu terbang. Electro Static Precipitator (ESP) dari	Proyek ini difokuskan pada tinjauan kinerja abu terbang dan limbah plastik sebagai bahan daur ulang pada material jalan. Studi ini menunjukkan bahwa jika abu terbang dan limbah plastik dicampur dan diaplikasikan dengan benar, dapat digunakan sebagai teknik stabilisasi tanah yang hebat. Berdasarkan proyek ini, diperoleh hasil-hasil berikut.

			<p>pembangkit listrik mengumpulkan abu terbang ini. Pada dasarnya terdiri dari alumina, silika, dan besi, abu terbang merupakan partikel berukuran kecil. Partikel bubuk terbang umumnya berukuran bundar, dan sifat ini memudahkannya untuk dicampur dan dialirkan, untuk membuat campuran yang tepat.</p> <p>2. Sampah plastik Sampah plastik sebagian besar dihasilkan dari botol PET bekas. Botol plastik dihancurkan dan dipotong kecil-kecil menggunakan mesin penghancur. Agregat plastik dicuci dengan benar agar bersih dan untuk memastikan tidak ada partikel debu lain yang ada di sana. Polietilen tereftalat (PET) adalah poliester termoplastik dengan modulus elastisitas tarik dan lentur masing-masing sekitar 2,9 dan 2,4GPa, kuat tarik hingga 60 MPa, dan ketahanan kimia yang sangat baik. Ini adalah polimer semi-kristalin, dengan titik leleh sekitar 260°C dan suhu transisi gelas berkisar antara 70 hingga 80°C, dalam kaitannya dengan jumlah daerah kristal yang tertutup dalam fase amorf.</p>	<p>1. Abu terbang digunakan sebagai bahan tanah yang sangat baik untuk tanah yang sangat aktif yang mengalami pemuaihan dan penyusutan yang sering.</p> <p>2. Abu terbang sebagai aditif mengurangi pembengkakan, dan meningkatkan kekuatan tanah yang mengembang.</p> <p>3. Nilai kepadatan kering maksimum yang lebih tinggi diamati pada 15% abu terbang dan 1% serat plastik dan nilai maksimum kadar air optimum diamati pada 20% abu terbang dan 1% serat plastik.</p> <p>4. Nilai optimal kuat tekan bebas diamati pada 10% abu terbang dan 1% serat plastik.</p> <p>5. Nilai optimal nilai CBR diamati pada 10% abu terbang dan 1% serat plastik.</p> <p>6. Nilai batas cair dan batas plastis menurun dengan bertambahnya prosentase abu terbang dari 0% sampai dengan 20% dengan serat plastis 1%.</p>
3	Greg Slaughter	Construction of New Zealand's First 100% Recycled Road	<p>1. Material beton hancur yang didaur ulang tersedia secara luas di seluruh Selandia Baru dan berpotensi menjadi produk premium untuk konstruksi</p>	<p>Proyek ini menunjukkan bahwa biaya yang terkait dengan produksi bahan beton daur ulang yang berkualitas bisa lebih mahal daripada bahan tambang alami. Namun, jika biaya</p>

			<p>pondasi jalan. Agregat beton hancur umumnya menunjukkan daya tahan yang baik dengan ketahanan terhadap pelapukan. Membuang tulangan dan kontaminasi dapat menjadi padat karya dan meningkatkan biaya material ini.</p> <p>2. Fly ash dan Bottom Ash yang bersumber dari boiler berbahan bakar batu bara merupakan peluang untuk aplikasi pondasi jalan atau sub-base di mana mereka membantu dalam mengikat dan memperkuat perkerasan jalan</p> <p>3. RAP dapat dengan mudah didaur ulang dengan menggilingnya dari perkerasan jalan yang ada dan kemudian disaring dan dipanaskan kembali. RAP telah dicampur ke dalam campuran aspal pada 15 – 20%. Namun, penggunaan 100% RAP di jalan nyata tidak diketahui. Kinerja jangka panjang yang tepat dari RAP generasi ke-2 dan ke-3 masih diselidiki tetapi ada kemungkinan bahwa RAP dapat didaur ulang berkali-kali dan karenanya dapat mewakili material jalan yang benar-benar berkelanjutan.</p> <p>4. Terak pelebur dianggap layak sebagai material potensial untuk digunakan dalam konstruksi lapisan atas karena efektivitas biaya,</p>	<p>pembuangan potensial dipertimbangkan, jenis konstruksi ini dapat memberikan penghematan bersih bagi kontraktor dan klien. Konstruksi yang menggunakan bahan daur ulang di Pulau Utara (terutama Auckland) akan lebih hemat biaya. Konstruksi jalan yang 100% didaur ulang dalam semua situasi bukanlah pilihan yang realistis atau diinginkan. Namun, industri perjalanan harus meningkatkan penggunaan bahan daur ulang yang saat ini digunakan untuk mulai mencapai hasil yang berkelanjutan. Diharapkan bahwa proyek ini akan mendorong industri perjalanan untuk menerima tantangan penggunaan bahan daur ulang dalam jumlah yang lebih besar.</p>
--	--	--	---	---

			<p>tingkat pasokan, dan manfaat teknis yang diharapkan.</p> <p>Diproduksi oleh Glenbrook Steel Mill dan bersumber melalui SteelServ, harga terak pelebur saat ini serupa dengan harga agregat alami. Tingkat pasokan terak pelebur tahunan sekitar 250.000 ton. Aplikasi terak pelebur yang paling menjanjikan tampaknya adalah dalam konstruksi lapisan permukaan karena sifat ketahanan selipnya yang tinggi.</p>	
4	<p>Milan Marinkovi´c, Edmundas Kazimieras Zavadskas, Bojan Mati´c, Stanislav Jovanovi´c, Dillip Kumar Das & Siniša Sremac</p>	<p>Application of Wasted and Recycled Materials for Production of Stabilized Layers of Road Structures</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aspal daur ulang: Komposisi granulometrik aspal yang didaur ulang, kandungan bitumen 78% dari RAP digunakan +6% penambahan kandungan bitumen 2. Pengisi bitumen: cationic stable emulsion C 60 B 4 (60% bitumen) 3. Cement: CEM I 42.5R (PC) 4. Zeolite: Particle size < 0.125 mm, Blaine surface area = 8292.97 cm²/g, Specific weight = 2.386 g/cm³ 5. Bakelite: Particle size < 0.125 mm, Loss on ignition = 98% 6. Slag: Particle size < 0.045 mm, Blaine surface area = 2798.90 cm²/g, Specific weight = 2.689 g/cm³ 7. Fly ash: Particle size < 0.045 mm, Blaine surface area = 10,212.47 cm²/g, 	<ul style="list-style-type: none"> - Mengganti Bakelite dalam jumlah kurang dari 20% terhadap jumlah emulsi bitumen dan memvariasikan kandungan Bakelite untuk menentukan jumlah Bakelite yang optimum; Mengganti slag dalam jumlah yang berbeda untuk menentukan kandungan slag yang optimum; - Mengganti zeolite dalam jumlah yang berbeda (kurang dari 20% terhadap jumlah semen); Mengurangi jumlah semen di bawah 1%; - Mengurangi jumlah emulsi bitumen menjadi 1% dan menambah jumlah material lainnya; - Menggunakan 100% material daur ulang untuk meningkatkan jumlah pemanfaatan material yang ada dan menghemat bahan baku dalam rantai pasokan konstruksi;

			Specific weight = 2.313 g/cm ³	- Melakukan curing spesimen dengan prosedur yang lebih cepat, yaitu pada suhu yang lebih tinggi untuk mempersingkat waktu penelitian dan waktu untuk memperoleh hasil.
--	--	--	--	--

Berdasarkan tabel analisis komparasi diatas, memberikan ikhtisar tentang beberapa penelitian yang fokus pada penggunaan bahan daur ulang dan limbah industri dalam konstruksi jalan, diantaranya:

1. Karn Kantatham - Penelitian ini mengidentifikasi bahwa agregat daur ulang seperti RCA, RAP, terak baja, dan plastik PET, bersama dengan produk sampingan industri seperti abu terbang, dapat meningkatkan keberlanjutan konstruksi jalan. Latex karet alam juga disebut sebagai pengubah material utama. Hasil menunjukkan bahwa bahan-bahan ini memiliki kinerja yang sangat baik sebagai alternatif agregat murni.
2. S.Sai Krishna & Dr. B. Manoj - Studi ini mengevaluasi pemanfaatan abu terbang dan sampah plastik, menunjukkan bahwa kombinasi ini dapat menjadi teknik stabilisasi tanah yang efektif. Fly ash digunakan sebagai bahan untuk meningkatkan stabilitas dan kekuatan tanah, dan optimal pada kombinasi tertentu (15% abu terbang dan 1% serat plastik).
3. Greg Slaughter - Penelitian di Selandia Baru ini mengevaluasi jalan yang menggunakan 100% bahan daur ulang, termasuk beton hancur dan terak pelebur. Meski biaya bisa lebih tinggi dibandingkan dengan agregat alami, proyek ini menunjukkan bahwa konstruksi daur ulang dapat menghasilkan penghematan dalam jangka panjang. Namun, aplikasi 100% bahan daur ulang dinilai belum realistis secara luas.
4. Milan Marinković, et al. - Studi ini melibatkan penggunaan aspal dan bakelite daur ulang, serta zeolite, terak, dan abu terbang. Fokusnya adalah meminimalkan kandungan semen dan emulsi bitumen untuk menghasilkan lapisan jalan yang stabil dengan bahan daur ulang, menunjukkan bahwa metode ini berpotensi mengurangi kebutuhan bahan mentah dan waktu pengerjaan.

Secara keseluruhan, penelitian-penelitian ini menyoroti bahwa bahan daur ulang memiliki potensi besar dalam mengurangi ketergantungan pada material murni dalam industri konstruksi jalan, sambil menawarkan keunggulan teknis dan keberlanjutan. Penelitian-penelitian ini mengungkapkan potensi besar dari bahan daur ulang sebagai alternatif material murni dalam konstruksi jalan. Dengan meningkatnya volume limbah konstruksi, sampah plastik, dan limbah industri, material daur ulang seperti abu terbang, agregat beton, plastik, dan terak semakin dianggap sebagai solusi yang efektif untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas. Proyek-proyek yang memanfaatkan bahan-bahan ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan eksploitasi tambang agregat alami, yang selama ini menjadi tulang punggung konstruksi jalan. Selain itu, penggunaan bahan daur ulang turut mendukung prinsip circular economy yang bertujuan mengurangi limbah dengan cara mengembalikannya ke dalam siklus produksi.

Di sisi lain, bahan daur ulang dalam konstruksi jalan menawarkan keunggulan teknis yang tidak kalah dengan material murni. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material seperti agregat beton daur ulang, abu terbang, dan terak baja dapat memberikan stabilitas dan daya tahan yang sangat baik. Contohnya, campuran abu terbang dan plastik PET dapat meningkatkan daya tekan dan stabilitas tanah, sementara terak baja dapat memberikan daya tahan tinggi terhadap pelapukan dan gesekan. Dengan pemrosesan dan pencampuran yang tepat, bahan daur ulang mampu memenuhi standar teknis yang dibutuhkan untuk konstruksi jalan berkualitas tinggi.

Selain aspek teknis, penggunaan material daur ulang dalam konstruksi jalan berpotensi besar untuk mendukung keberlanjutan lingkungan. Penggunaan limbah konstruksi dan limbah industri bukan hanya mengurangi jumlah sampah yang dibuang ke lingkungan, tetapi juga mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dalam proses ekstraksi dan produksi material baru. Dalam jangka panjang, penggunaan bahan daur ulang ini tidak hanya memberikan keuntungan ekonomi melalui penghematan bahan baku dan biaya pembuangan limbah, tetapi juga memperkuat komitmen terhadap praktik pembangunan yang

ramah lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan bahan daur ulang dalam industri konstruksi jalan merupakan langkah strategis menuju pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa bahan daur ulang dan limbah industri memiliki peran penting dalam meningkatkan keberlanjutan dalam industri konstruksi jalan. Material daur ulang seperti abu terbang, agregat beton, plastik, dan terak tidak hanya berpotensi menggantikan material murni tetapi juga mendukung konsep circular economy dengan memanfaatkan kembali limbah konstruksi dan industri dalam siklus produksi. Proyek yang menggunakan material ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan eksploitasi sumber daya alam dan limbah yang dihasilkan. Selain mendukung keberlanjutan lingkungan, material daur ulang juga memiliki keunggulan teknis yang dapat menandingi bahan konvensional. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa material daur ulang dapat memberikan stabilitas dan daya tahan yang baik, misalnya, kombinasi abu terbang dan plastik PET untuk stabilisasi tanah, serta terak baja yang tahan terhadap pelapukan. Bahan-bahan ini, dengan pemrosesan dan pencampuran yang tepat, mampu memenuhi standar kualitas yang dibutuhkan dalam konstruksi jalan. Secara keseluruhan, penggunaan material daur ulang dalam konstruksi jalan tidak hanya berpotensi menghemat biaya produksi dalam jangka panjang tetapi juga memperkuat komitmen terhadap pembangunan infrastruktur yang ramah lingkungan. Dengan demikian, penerapan bahan daur ulang adalah langkah strategis yang dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan murni, mengurangi limbah, serta mendukung pembangunan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Karn Kantatham, et al. (2024). *Innovations in recycled construction materials: paving the way towards sustainable road infrastructure*. Institute of Engineering, Suranaree University of Technology. DOI 10.3389/fbuil.2024.1449970
- Marinković, M., Zavadskas, E. K., Matić, B., Jovanović, S., Das, D. K., & Sremac, S. (2022). Application of wasted and recycled materials for production of stabilized layers of road structures. *Buildings*, 12(5), 552. <https://doi.org/10.3390/buildings>
- Sai Krishna, S., & Manoj, B. (2021). Use of recycled materials in road construction. *Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry*, 12(4), 123-128(1166)
- Slaughter, G. (2005). Construction of New Zealand's First 100% Recycled Road. NZIHT, New Zealand.
- You, L. et al. (2022). *Review of recycling waste plastics in asphalt paving materials*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(5), 742–764. DOI: 10.1016/j.jtte.2022.07.002. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095756422000812>
- Xu, F., Zhao, Y., & Li, K. (2021). *Using Waste Plastics as Asphalt Modifier: A Review*. *Materials*, 15(1), 110. DOI: 10.3390/ma15010110. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/1/110>
- Wolterbeek, M. (2023). *Recycled-plastic pavement withstands heavy trucks and extreme weather*. University of Nevada, Reno. <https://www.unr.edu/nevada-today/news/2023/plastic-pavement>
- Lu, D. X., Enfrin, M., Boom, Y. J., & Giustozzi, F. (2023). *Future recyclability of hot mix asphalt containing recycled plastics*. *Construction and Building Materials*, 368, 130396–130396. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130396. <https://trid.trb.org/View/2103185>