

TEKNOLOGI PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK

UNTUK MATERIAL KONSTRUKSI BERKELANJUTAN



Zures Gustiabani, B.Eng., M.Sc.
Edi Kusmawan, S.T., M.T.
Nadia Khaira Ardi, S.T., M.T.

TEKNOLOGI PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK UNTUK MATERIAL KONSTRUKSI BERKELANJUTAN

Penulis:

Zures Gustiabani, B.Eng., M.Sc.

Edi Kusmawan, S.T., M.T.

Nadia Khaira Ardi, S.T., M.T.



METRO PRESS INDONESIA

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
3. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

TEKNOLOGI PEMANFAATAN LIMBAH PLASTIK UNTUK MATERIAL KONSTRUKSI BERKELANJUTAN

Penulis:

Zures Gustiabani, B.Eng., M.Sc.

Edi Kusmawan, S.T., M.T.

Nadia Khaira Ardi, S.T., M.T.

Kontributor:

Meri Susanti

Friska Maharani Siregar

Chyka Anastasya

Hak cipta dilindungi undang-undang

Diterbitkan pertama kali oleh Metro Press Indonesia

Anggota IKAPI No. 027/RAU/2025

ISBN: 978-634-7757-96-8

Editor: Weni Yuliani, S.Si., M.M., C.Ed.

Penyunting: Helmi Della Eka Putri, S.TP.

Desain Sampul dan Tata Letak: Khairul Wahidi, S.AP.

Alamat: Jalan Enau, Desa/Kelurahan Gabung Makmur, Kec. Kerinci
Kanan, Kab. Siak, Provinsi Riau, Kode Pos: 28655

Website: <http://www.metropress.id>

Email: metropressindonesia@gmail.com

Cetakan Pertama, September 2026

Dilarang keras mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam
bentuk dan dengan cara apapun tanpa izin sah dari penerbit.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku yang berjudul **"Teknologi Pemanfaatan Limbah Plastik untuk Material Konstruksi Berkelanjutan"** dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai salah satu bentuk kontribusi dalam memperkaya referensi mengenai pemanfaatan limbah plastik sebagai material alternatif yang memiliki nilai guna dalam bidang konstruksi.

Perkembangan sektor konstruksi yang terus meningkat diikuti dengan kebutuhan material yang semakin besar. Di sisi lain, akumulasi limbah plastik menjadi tantangan lingkungan yang memerlukan solusi yang inovatif, efektif, dan berkelanjutan. Kondisi tersebut mendorong lahirnya berbagai upaya untuk memanfaatkan limbah plastik menjadi material konstruksi yang tidak hanya bernilai ekonomis, tetapi juga memiliki potensi mendukung pembangunan yang lebih ramah lingkungan.

Buku ini membahas berbagai aspek yang berkaitan dengan teknologi pemanfaatan limbah plastik, mulai dari konsep material konstruksi berkelanjutan, karakteristik dan pengelolaan limbah plastik, teknologi material komposit berbasis plastik, proses pembuatan *eco paving block*, pengendalian mutu, perencanaan dan penerapannya, hingga peluang pengembangan material konstruksi berbasis limbah plastik pada masa mendatang. Penyajian materi disusun secara sistematis agar pembaca memperoleh pemahaman yang utuh mengenai konsep, karakteristik, serta penerapan teknologi tersebut dalam bidang konstruksi.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa, pendidik, peneliti, praktisi, maupun masyarakat umum yang memiliki perhatian terhadap pengembangan material konstruksi berkelanjutan serta pengelolaan limbah plastik yang lebih bernilai guna.

Pekanbaru, September 2026

Penulis

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku **"Teknologi Pemanfaatan Limbah Plastik untuk Material Konstruksi Berkelanjutan"** dapat tersusun dan hadir sebagai salah satu referensi dalam bidang material konstruksi ramah lingkungan.

Pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi merupakan salah satu bentuk inovasi yang berkembang seiring meningkatnya kebutuhan akan pembangunan yang berkelanjutan. Melalui pendekatan yang tepat, limbah plastik tidak hanya dipandang sebagai permasalahan lingkungan, tetapi juga sebagai sumber daya yang memiliki potensi untuk diolah menjadi material alternatif dengan karakteristik yang sesuai untuk berbagai kebutuhan konstruksi.

Buku ini disusun untuk memberikan gambaran yang komprehensif mengenai konsep, teknologi, dan penerapan pemanfaatan limbah plastik dalam bidang konstruksi. Pembahasan diawali dengan pengenalan material konstruksi berkelanjutan dan karakteristik limbah plastik, kemudian dilanjutkan dengan teknologi material komposit berbasis plastik, proses pembuatan *eco paving block*, pengendalian mutu, prinsip-prinsip penerapan, hingga berbagai peluang pengembangan material konstruksi berbasis limbah plastik pada masa depan. Dengan susunan tersebut, diharapkan pembaca dapat memahami keterkaitan antara aspek material, teknologi, mutu, serta implementasinya secara terpadu.

Penyusunan buku ini mengacu pada berbagai referensi ilmiah, standar teknis, dan perkembangan teknologi yang relevan sehingga materi yang disajikan memiliki landasan keilmuan yang

kuat sekaligus mudah dipahami. Penyajian setiap bab juga dirancang secara sistematis agar dapat digunakan sebagai bahan pembelajaran, referensi akademik, maupun sumber informasi bagi berbagai kalangan yang berkepentingan dengan pengembangan material konstruksi berkelanjutan.

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, serta inspirasi selama proses penyusunan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat, memperluas wawasan, dan menjadi salah satu referensi yang mendukung pengembangan teknologi material konstruksi yang inovatif, berdaya guna, dan berkelanjutan.

Pekanbaru, September 2026

Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
BAB 1 PENGANTAR MATERIAL KONSTRUKSI	
BERKELANJUTAN	1
A. Permasalahan Limbah Plastik dan Tantangan Lingkungan	1
B. Konsep Material Konstruksi Ramah Lingkungan.....	7
C. Limbah sebagai Sumber Material Alternatif.....	13
D. Peluang Pemanfaatan Limbah Plastik dalam Industri Konstruksi.....	17
E. Prospek Pengembangan Material Berkelanjutan.....	21
BAB 2 KARAKTERISTIK DAN PENGELOLAAN LIMBAH	
PLASTIK.....	29
A. Pengertian dan Karakteristik Limbah Plastik.....	29
B. Klasifikasi Jenis Plastik.....	33
C. Karakteristik Fisik, Kimia, dan Termal Plastik	37
D. Teknologi Pengelolaan Limbah Plastik.....	44

BAB 3 TEKNOLOGI MATERIAL KONSTRUKSI BERBASIS	
LIMBAH PLASTIK	51
A. Konsep Material Komposit.....	51
B. Limbah Plastik sebagai Bahan Pengikat.....	54
C. Limbah Plastik sebagai Bahan Substitusi	56
D. Material Pendukung.....	60
E. Karakteristik Material Komposit Berbasis Plastik.....	63
BAB 4 PEMBUATAN <i>ECO PAVING BLOCK</i>	69
A. Konsep dan Karakteristik <i>Eco Paving Block</i>	69
B. Persyaratan Material Penyusun.....	72
C. Peralatan Produksi.....	75
D. Tahapan Pembuatan <i>Eco Paving Block</i>	79
E. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kualitas Produk.....	84
F. Keselamatan dan Kesehatan Kerja dalam Produksi.....	87
BAB 5 PENGENDALIAN MUTU <i>ECO PAVING BLOCK</i>.....	91
A. Standar Mutu <i>Paving Block</i>	91
B. Karakteristik Material Penyusun <i>Eco Paving Block</i>	94
C. Karakteristik Teknis <i>Eco Paving Block</i>	97
D. Evaluasi Karakteristik dan Mutu <i>Eco Paving Block</i>	102
E. Pengendalian Kualitas Selama Produksi.....	107
BAB 6 PERENCANAAN DAN PENERAPAN <i>ECO PAVING BLOCK</i>	
.....	111
A. Prinsip Perencanaan Penerapan <i>Eco Paving Block</i>	111
B. Kondisi Dasar untuk Penerapan <i>Eco Paving Block</i>	115

C. Komponen Pendukung Penerapan <i>Eco Paving Block</i>	118
D. Tahapan Penerapan <i>Eco Paving Block</i>	121
E. Keberlanjutan <i>Eco Paving Block</i>	123
F. Contoh Penerapan pada Berbagai Infrastruktur	126
BAB 7 PENGEMBANGAN DAN MASA DEPAN MATERIAL	
KONSTRUKSI BERBASIS LIMBAH PLASTIK.....	129
A. Manfaat Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi.....	129
B. Analisis Efisiensi Material	131
C. Peluang Pengembangan Produk Berbasis Limbah Plastik.....	133
D. Inovasi Teknologi Material Ramah Lingkungan	140
E. Tantangan Implementasi dalam Industri Konstruksi.....	144
DAFTAR PUSTAKA	148
BIOGRAFI PENULIS.....	155
QR CODE MATERI BUKU	158

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Timbunan Sampah Plastik.....	2
Gambar 2. 1 Klasifikasi Jenis Plastik.....	33
Gambar 3. 1 Ilustrasi Konsep Material Komposit Berbasis Limbah Plastik sebagai Matriks (Binder) dan Agregat Mineral.....	51
Gambar 3. 2 Pasir Tongkang.....	59
Gambar 4. 1 Alat Pembakaran <i>Paving Blok</i>	76
Gambar 4. 2 Mesin Press <i>Paving Blok</i>	77
Gambar 4. 3 Cetakan <i>Eco Paving Blok</i>	78
Gambar 4. 4 Proses Pelelehan Plastik.....	81
Gambar 4. 5 Proses Pencampuran Material	81
Gambar 4. 6 Proses Pencetakan <i>Eco Paving Blok</i>	82
Gambar 4. 7 Proses Pemadatan <i>Eco Paving Blok</i> menggunakan Mesin Press.....	83
Gambar 5. 1 Ilustrasi Daya Serap <i>Eco Paving Block</i>	99
Gambar 6. 1 Contoh Penerapan pada Berbagai Infrastruktur..	126
Gambar 7. 1 Contoh Bata Berbahan Limbah Plastik.....	135
Gambar 7. 2 Contoh Panel Bangunan Berbahan Plastik Daur Ulang.....	137
Gambar 7. 3 Perkerasan Berbahan Plastik Daur Ulang	138

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik Fisik Utama Plastik.....	38
Tabel 2. 2 Parameter Penting Karakteristik Termal.....	42
Tabel 2. 3 Perbandingan Titik Leleh Beberapa Jenis Plastik.....	43
Tabel 3. 1 Komponen Penyusun Material Komposit Berbasis Plastik.....	53
Tabel 3. 2 Karakteristik Beberapa Jenis Plastik sebagai Bahan Pengikat.....	56
Tabel 3. 3 Bentuk Pemanfaatan Limbah Plastik sebagai Material Substitusi	59
Tabel 3. 4 Fungsi Material Pendukung pada Material Komposit Berbasis Plastik.....	62
Tabel 4. 1 Karakteristik Utama <i>Eco Paving Block</i>	71
Tabel 4. 2 Persyaratan Material Penyusun <i>Eco Paving Block</i>	74
Tabel 4. 3 Peralatan Utama Produksi <i>Eco Paving Block</i>	78
Tabel 4. 4 Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Produksi <i>Eco Paving Block</i>	89
Tabel 5. 1 Klasifikasi Mutu Paving Block Berdasarkan SNI 03-0691-1996.....	92
Tabel 5. 2 Tujuan Analisis Saringan.....	95
Tabel 5. 3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Karakteristik <i>Eco Paving Block</i>	105
Tabel 5. 4 Pengendalian Kualitas pada Setiap Tahap Produksi	108

Tabel 6. 1 Aspek yang Dipertimbangkan dalam Perencanaan Penerapan <i>Eco Paving Block</i>	112
Tabel 6. 2 Komponen Persiapan Lahan.....	115
Tabel 6. 3 Peralatan Pendukung dalam Penerapan <i>Eco Paving Block</i>	119
Tabel 6. 4 Material Pendukung dalam Sistem Perkerasan <i>Eco Paving Block</i>	120
Tabel 6. 5 Kondisi Perkerasan dan Bentuk Penanganan	125
Tabel 6. 6 Contoh Penerapan <i>Eco Paving Block</i> pada Berbagai Infrastruktur.....	128
Tabel 7. 1 Perbandingan Efisiensi <i>Eco Paving Block</i> dan <i>Paving Block</i> Konvensional.....	133
Tabel 7. 2 Perbandingan Bata Konvensional dan Bata Berbasis Limbah Plastik.....	135
Tabel 7. 3 Peluang Pengembangan Komponen Perkerasan	138
Tabel 7. 4 Contoh Produk Konstruksi Berbasis Limbah Plastik	139
Tabel 7. 5 Contoh Material Komposit Berbasis Limbah.....	142
Tabel 7. 6 Tantangan Standarisasi Produk.....	145

BAB 1

PENGANTAR MATERIAL KONSTRUKSI BERKELANJUTAN

A. Permasalahan Limbah Plastik dan Tantangan Lingkungan

1. Timbulan Limbah Plastik

Plastik telah menjadi salah satu material yang paling banyak dimanfaatkan dalam berbagai aktivitas karena memiliki sifat ringan, kuat, tahan terhadap korosi, mudah dibentuk, serta biaya produksi yang relatif rendah. Karakteristik tersebut menjadikan plastik sebagai bahan utama untuk kemasan pangan, peralatan rumah tangga, perlengkapan kesehatan, komponen otomotif, perangkat elektronik, hingga material konstruksi. Di balik berbagai keunggulan tersebut, penggunaan plastik yang terus meningkat menghasilkan timbulan limbah dalam jumlah yang semakin besar sehingga menjadi salah satu tantangan utama dalam pengelolaan lingkungan modern (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

Peningkatan timbulan limbah plastik tidak hanya dipengaruhi oleh pertumbuhan jumlah penduduk, tetapi juga oleh perubahan pola konsumsi masyarakat yang semakin mengandalkan produk sekali pakai. Kemasan makanan, botol

minuman, kantong belanja, wadah makanan, pembungkus produk, hingga berbagai perlengkapan berbahan plastik digunakan dalam waktu yang relatif singkat sebelum akhirnya dibuang. Akibatnya, volume limbah plastik terus bertambah dari tahun ke tahun dan sering kali melampaui kapasitas sistem pengelolaan sampah yang tersedia (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2022).



Gambar 1. 1 Timbunan Sampah Plastik

Salah satu karakteristik utama plastik adalah daya tahannya terhadap proses degradasi alami. Sebagian besar jenis plastik memerlukan waktu puluhan hingga ratusan tahun untuk terurai secara sempurna. Selama proses tersebut berlangsung, plastik akan mengalami fragmentasi menjadi potongan-potongan yang semakin kecil tanpa benar-benar hilang dari lingkungan. Potongan berukuran sangat kecil yang dikenal sebagai mikroplastik bahkan dapat memasuki tanah, perairan, udara, maupun rantai makanan sehingga menjadi perhatian global karena dampaknya terhadap ekosistem dan kesehatan manusia (UNEP, 2023).

Besarnya timbunan limbah plastik juga dipengaruhi oleh beragam jenis polimer yang digunakan dalam industri. Setiap jenis plastik memiliki karakteristik fisik, ketahanan panas, serta potensi daur ulang yang berbeda. Beberapa jenis plastik relatif

mudah didaur ulang, sedangkan jenis lainnya memerlukan proses yang lebih kompleks karena mengandung campuran berbagai bahan tambahan seperti pewarna, penguat, atau lapisan pelindung. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan proses pemilahan menjadi tahapan yang sangat penting sebelum limbah dapat dimanfaatkan kembali.

Jenis plastik yang umum dijumpai dalam kehidupan sehari-hari meliputi *Polyethylene Terephthalate* (PET), *High Density Polyethylene* (HDPE), *Polyvinyl Chloride* (PVC), *Low Density Polyethylene* (LDPE), *Polypropylene* (PP), dan *Polystyrene* (PS). Di antara berbagai jenis tersebut, PET merupakan salah satu material yang paling banyak dimanfaatkan sebagai botol minuman dan wadah makanan karena memiliki kekuatan mekanis yang baik serta relatif mudah didaur ulang dibandingkan beberapa jenis plastik lainnya (ASTM International, 2023). Selain berasal dari aktivitas rumah tangga, limbah plastik juga dihasilkan oleh sektor perdagangan, industri, pertanian, kesehatan, dan konstruksi. Pada sektor konstruksi sendiri, plastik digunakan sebagai pipa, pelapis kabel, lembaran kedap air, komponen interior, hingga kemasan material bangunan. Setelah masa pakainya berakhir, material tersebut akan menjadi limbah konstruksi yang volumenya terus meningkat apabila tidak dikelola secara tepat.

Persoalan timbulan limbah plastik bukan hanya berkaitan dengan besarnya jumlah sampah, tetapi juga dengan pola pengelolaan setelah produk selesai digunakan. Sebagian limbah masih memiliki nilai ekonomi yang tinggi apabila dipilah dan diolah kembali, namun banyak pula yang berakhir di tempat pembuangan karena tercampur dengan sampah organik atau terkontaminasi oleh bahan lain. Kondisi ini menyebabkan potensi

pemanfaatan kembali menjadi berkurang, sementara kebutuhan terhadap bahan baku baru terus meningkat. Dalam konsep pembangunan berkelanjutan, limbah plastik tidak lagi dipandang semata-mata sebagai material sisa yang harus dibuang. Sebaliknya, limbah tersebut mulai diposisikan sebagai sumber daya sekunder (*secondary resources*) yang dapat dimanfaatkan kembali menjadi berbagai produk bernilai tambah. Perubahan cara pandang ini menjadi dasar berkembangnya berbagai inovasi pemanfaatan limbah plastik, termasuk sebagai bahan baku alternatif dalam industri konstruksi.

Pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi memberikan dua manfaat sekaligus. Di satu sisi, pendekatan ini membantu mengurangi jumlah limbah yang berakhir di lingkungan, sementara di sisi lain mampu mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan bahan baku alam yang jumlahnya semakin terbatas. Dengan demikian, pengelolaan limbah plastik tidak hanya menjadi solusi lingkungan, tetapi juga menjadi bagian dari strategi efisiensi sumber daya dalam pembangunan berkelanjutan.

2. Dampak terhadap Lingkungan

Akumulasi limbah plastik yang tidak tertangani dengan baik menimbulkan berbagai dampak terhadap lingkungan. Karena memiliki ketahanan yang tinggi terhadap proses pelapukan alami, plastik dapat bertahan dalam jangka waktu yang sangat lama sehingga terus menumpuk di daratan, saluran air, maupun kawasan pesisir. Penumpukan tersebut mengganggu keseimbangan ekosistem serta menurunkan kualitas lingkungan secara keseluruhan (UNEP, 2023). Salah satu dampak yang paling mudah diamati adalah berkurangnya kualitas estetika lingkungan. Sampah plastik yang berserakan pada ruang terbuka, saluran

drainase, maupun lahan kosong menciptakan kesan kumuh dan mengurangi kenyamanan lingkungan. Selain mengganggu keindahan, penumpukan plastik juga dapat menyumbat sistem drainase sehingga meningkatkan risiko genangan air ketika curah hujan tinggi.

Pada lingkungan perairan, plastik menjadi ancaman serius bagi berbagai organisme. Banyak hewan air yang tidak mampu membedakan plastik dengan makanan alami sehingga secara tidak sengaja menelannya. Kondisi tersebut dapat menyebabkan gangguan pencernaan, penurunan kemampuan mencari makan, bahkan kematian. Selain itu, tali plastik, jaring, maupun lembaran plastik juga dapat menyebabkan satwa terjerat sehingga menghambat pergerakan dan aktivitas hidupnya (UNEP, 2023). Dampak lain yang semakin mendapat perhatian adalah terbentuknya mikroplastik. Seiring waktu, paparan sinar matahari, perubahan suhu, gesekan mekanis, dan proses pelapukan menyebabkan plastik pecah menjadi partikel yang berukuran sangat kecil. Mikroplastik dapat tersebar melalui air, udara, maupun tanah, kemudian memasuki rantai makanan melalui organisme yang mengonsumsinya. Oleh karena itu, pencemaran plastik tidak lagi hanya menjadi persoalan sampah yang terlihat secara kasat mata, tetapi juga menjadi isu kualitas lingkungan yang bersifat jangka panjang (World Health Organization, 2022).

Pada ekosistem daratan, keberadaan plastik dapat menghambat infiltrasi air ke dalam tanah serta mengganggu aktivitas organisme yang berperan dalam menjaga kesuburan tanah. Sampah plastik yang menutupi permukaan tanah juga dapat menghambat pertumbuhan vegetasi karena mengurangi pertukaran udara dan air pada lapisan tanah bagian atas.

Pembakaran limbah plastik secara tidak terkendali juga menimbulkan persoalan tersendiri. Proses pembakaran yang tidak memenuhi standar dapat menghasilkan berbagai senyawa berbahaya yang mencemari udara dan berpotensi mengganggu kesehatan manusia. Oleh sebab itu, pengelolaan limbah plastik memerlukan teknologi yang tepat agar proses pemanfaatannya tetap memperhatikan aspek keselamatan dan perlindungan lingkungan.

Dari sudut pandang perubahan iklim, plastik juga memiliki hubungan erat dengan emisi gas rumah kaca. Sebagian besar plastik diproduksi menggunakan bahan baku berbasis minyak bumi dan gas alam. Seluruh siklus hidup plastik, mulai dari proses produksi, distribusi, penggunaan, hingga pembuangan, memerlukan energi yang berkontribusi terhadap emisi karbon. Oleh karena itu, peningkatan efisiensi penggunaan plastik dan optimalisasi daur ulang menjadi bagian penting dalam upaya menurunkan jejak karbon suatu produk (OECD, 2022). Dampak lingkungan tersebut menunjukkan bahwa persoalan limbah plastik tidak dapat diselesaikan hanya dengan meningkatkan kapasitas tempat pembuangan. Pendekatan yang lebih efektif adalah mengurangi timbulan limbah sejak awal, memperpanjang umur pemanfaatan material, serta mengembangkan teknologi yang mampu mengubah limbah menjadi produk baru yang memiliki nilai ekonomi.

Salah satu bentuk penerapan konsep tersebut adalah pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi. Plastik yang sebelumnya dianggap sebagai limbah dapat diolah menjadi bahan campuran pada produk seperti *paving block*, bata ringan, panel bangunan, campuran aspal, maupun material komposit lainnya. Selain membantu mengurangi volume limbah,

pendekatan ini juga mendukung pemanfaatan sumber daya secara lebih efisien karena material digunakan kembali dalam siklus produksi yang baru.

Transformasi limbah menjadi material konstruksi memberikan manfaat ganda. Di samping mengurangi pencemaran lingkungan, pendekatan ini mendorong terciptanya produk konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi memiliki karakteristik teknis yang baik apabila diproses sesuai standar mutu. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pemanfaatan limbah plastik menjadi salah satu langkah penting dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

B. Konsep Material Konstruksi Ramah Lingkungan

1. *Green Construction*

Perkembangan sektor konstruksi saat ini tidak lagi hanya berorientasi pada kekuatan struktur, kecepatan pembangunan, dan efisiensi biaya. Aspek lingkungan telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dalam setiap tahapan pembangunan, mulai dari perencanaan, pemilihan material, proses pelaksanaan, hingga pemeliharaan bangunan. Pendekatan tersebut dikenal sebagai *green construction*, yaitu konsep pembangunan yang bertujuan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya (ISO, 2017).

Konsep *green construction* menempatkan material sebagai salah satu komponen yang sangat menentukan keberhasilan pembangunan berkelanjutan. Material konstruksi tidak hanya dinilai berdasarkan kekuatan mekanisnya, tetapi juga mempertimbangkan asal bahan baku, kebutuhan energi selama

proses produksi, umur layanan, kemudahan perawatan, potensi penggunaan kembali, serta dampaknya terhadap lingkungan setelah masa pakainya berakhir. Dalam penerapan *green construction*, penggunaan material hasil daur ulang memperoleh perhatian yang semakin besar. Material hasil pemanfaatan kembali mampu mengurangi kebutuhan terhadap eksploitasi sumber daya alam sekaligus menekan jumlah limbah yang harus dibuang. Dengan demikian, satu jenis material dapat memberikan manfaat lebih panjang melalui beberapa siklus penggunaan.

Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan konstruksi merupakan salah satu contoh nyata penerapan prinsip tersebut. Limbah yang sebelumnya hanya menjadi beban lingkungan diolah menjadi material bernilai tambah sehingga mampu menggantikan sebagian penggunaan bahan konvensional. Selain memberikan manfaat ekologis, pendekatan ini juga membuka peluang pengembangan teknologi material yang lebih inovatif dan efisien. Konsep *green construction* juga menekankan pentingnya efisiensi energi sepanjang siklus hidup bangunan (*life cycle*). Material yang memiliki umur pakai panjang, membutuhkan perawatan minimal, dan dapat digunakan kembali pada akhir masa layanannya akan memberikan dampak lingkungan yang lebih kecil dibandingkan material yang hanya digunakan sekali.

Penerapan *green construction* tidak selalu berarti mengganti seluruh material konvensional dengan material baru. Sebaliknya, pendekatan ini lebih menekankan pada penggunaan material secara bijaksana, peningkatan efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, serta optimalisasi teknologi agar pembangunan mampu memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Melalui konsep tersebut, limbah plastik memiliki

peluang besar untuk menjadi bagian dari material konstruksi modern. Inovasi pengolahan plastik menjadi *paving block*, bata, panel, maupun material komposit menunjukkan bahwa pengelolaan limbah dapat berjalan seiring dengan peningkatan kualitas produk konstruksi. Pendekatan ini menjadi salah satu fondasi penting dalam mewujudkan industri konstruksi yang lebih berkelanjutan, efisien, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

2. Circular Economy

Konsep *circular economy* merupakan pendekatan pengelolaan sumber daya yang bertujuan mempertahankan nilai material selama mungkin melalui penggunaan kembali, perbaikan, pemanfaatan ulang, dan daur ulang. Berbeda dengan sistem ekonomi linear yang mengikuti pola "ambil-buat-buang", *circular economy* mengubah limbah menjadi sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali dalam siklus produksi berikutnya (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Dalam sektor konstruksi, penerapan *circular economy* menjadi sangat penting karena industri ini mengonsumsi sumber daya alam dalam jumlah besar. Penggunaan agregat, pasir, batu, semen, baja, dan berbagai material lainnya memerlukan eksploitasi sumber daya yang terus meningkat. Melalui pendekatan sirkular, sebagian kebutuhan tersebut dapat dipenuhi dari material hasil pemanfaatan kembali tanpa mengurangi fungsi maupun kualitas produk akhir.

Limbah plastik merupakan salah satu material yang memiliki potensi besar dalam sistem ini. Setelah melalui proses pemilahan, pembersihan, pencacahan, atau pelelehan sesuai karakteristiknya, plastik dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku berbagai produk konstruksi. Dengan demikian, material yang semula dianggap sebagai limbah memperoleh siklus kehidupan

baru sehingga mengurangi kebutuhan bahan baku primer sekaligus menekan volume sampah yang dibuang ke lingkungan. Konsep *circular economy* juga mendorong perancangan produk agar lebih mudah diperbaiki, dipisahkan, dan didaur ulang setelah masa pakainya berakhir. Prinsip ini memungkinkan material tetap berada dalam rantai nilai ekonomi lebih lama sehingga efisiensi penggunaan sumber daya dapat terus ditingkatkan.

Bagi industri konstruksi, penerapan *circular economy* tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga membuka peluang ekonomi melalui pengembangan material alternatif, efisiensi biaya bahan baku, dan munculnya berbagai inovasi teknologi pengolahan limbah. Oleh karena itu, konsep ini menjadi salah satu pilar utama dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang mampu menjawab tantangan kebutuhan pembangunan masa depan.

3. Prinsip 3R dalam Konstruksi

Prinsip 3R (*Reduce, Reuse, dan Recycle*) merupakan salah satu konsep dasar dalam pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan. Penerapan prinsip ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan baku baru, memperpanjang umur pemanfaatan suatu material, serta meminimalkan jumlah limbah yang berakhir di tempat pembuangan. Dalam sektor konstruksi, prinsip 3R memiliki peranan yang sangat penting karena industri ini merupakan salah satu pengguna sumber daya alam terbesar sekaligus penghasil limbah dalam jumlah yang signifikan (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

Konsep 3R tidak hanya berfokus pada pengelolaan limbah setelah material digunakan, tetapi juga dimulai sejak tahap perencanaan proyek. Pada tahap perancangan, pemilihan

material yang tepat dapat mengurangi pemborosan, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, serta mempermudah proses pemanfaatan kembali setelah bangunan mencapai akhir masa layanannya. Dengan demikian, prinsip 3R menjadi bagian dari strategi pembangunan yang lebih efisien dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

Prinsip pertama, yaitu *Reduce*, berarti mengurangi penggunaan material dan energi tanpa mengurangi fungsi maupun kualitas bangunan. Dalam praktik konstruksi, upaya ini dapat dilakukan melalui desain yang lebih efisien, penggunaan material sesuai kebutuhan, serta pengendalian sisa material selama proses pembangunan. Pengurangan limbah sejak awal jauh lebih efektif dibandingkan menangani limbah setelah jumlahnya semakin besar. Penerapan *Reduce* juga dapat dilakukan dengan memilih material yang memiliki umur pakai panjang dan kebutuhan perawatan yang rendah. Material yang tahan lama akan mengurangi frekuensi penggantian sehingga konsumsi sumber daya selama siklus hidup bangunan menjadi lebih kecil. Selain itu, penggunaan teknologi konstruksi yang presisi mampu meminimalkan kesalahan pekerjaan yang sering menjadi penyebab meningkatnya limbah material.

Prinsip kedua adalah *Reuse*, yaitu menggunakan kembali material yang masih memiliki fungsi tanpa melalui proses pengolahan yang kompleks. Pada sektor konstruksi, berbagai komponen bangunan seperti baja, kayu, batu bata, pintu, jendela, maupun elemen struktur tertentu masih dapat dimanfaatkan kembali apabila kondisinya memenuhi persyaratan teknis. Pendekatan ini mampu mengurangi kebutuhan material baru sekaligus menekan biaya pembangunan. Dalam konteks limbah plastik, konsep *Reuse* dapat diterapkan pada penggunaan kembali

produk plastik yang masih layak, misalnya wadah penyimpanan material, pelindung permukaan kerja, atau komponen pendukung lainnya. Walaupun kontribusinya terhadap pengurangan limbah belum sebesar proses daur ulang, penggunaan kembali tetap memberikan manfaat karena mampu memperpanjang masa pakai suatu produk.

Prinsip ketiga, yaitu *Recycle*, merupakan proses mengolah kembali limbah menjadi bahan baku atau produk baru yang memiliki nilai guna. Pada industri konstruksi, proses ini menjadi salah satu pendekatan yang paling berkembang karena memungkinkan berbagai jenis limbah dimanfaatkan sebagai material alternatif. Beton bekas dapat dihancurkan menjadi agregat daur ulang, logam dilebur kembali menjadi bahan baku industri, sedangkan limbah plastik dapat diolah menjadi berbagai produk konstruksi seperti panel, papan komposit, campuran aspal, bata, hingga *paving block*.

Pemanfaatan limbah plastik melalui proses *Recycle* memberikan manfaat yang sangat luas. Selain mengurangi volume sampah, pendekatan ini juga mengurangi kebutuhan terhadap bahan baku primer yang berasal dari sumber daya alam. Dengan demikian, tekanan terhadap eksploitasi sumber daya dapat dikurangi, sementara nilai ekonomi limbah meningkat karena berubah menjadi produk yang memiliki fungsi baru. Penerapan prinsip 3R dalam konstruksi juga berkontribusi terhadap penurunan konsumsi energi dan emisi karbon. Produksi material baru umumnya membutuhkan energi yang lebih besar dibandingkan penggunaan material hasil daur ulang. Oleh karena itu, semakin banyak material yang dapat dimanfaatkan kembali, semakin kecil pula energi yang dibutuhkan dalam proses produksi secara keseluruhan (OECD, 2022).

Prinsip 3R tidak dapat berjalan secara optimal tanpa dukungan sistem pemilahan limbah yang baik. Material yang tercampur dengan berbagai jenis sampah lain akan lebih sulit dimanfaatkan kembali karena memerlukan proses pemisahan tambahan. Oleh sebab itu, pengelolaan limbah di lokasi konstruksi perlu dirancang agar setiap jenis material dapat dipisahkan sesuai karakteristiknya sejak awal.

Penerapan prinsip 3R juga mendorong berkembangnya inovasi teknologi material. Berbagai limbah yang sebelumnya dianggap tidak bernilai kini dapat diolah menjadi produk konstruksi dengan kualitas yang mampu memenuhi kebutuhan pembangunan. Salah satu contoh yang terus berkembang adalah pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan pengikat maupun bahan tambahan pada produk perkerasan seperti *paving block*. Inovasi tersebut menunjukkan bahwa konsep pengelolaan limbah tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga menciptakan peluang ekonomi melalui pengembangan material baru yang lebih efisien dan berkelanjutan.

C. Limbah sebagai Sumber Material Alternatif

Perkembangan teknologi material telah mengubah cara pandang terhadap limbah dari sekadar hasil buangan menjadi sumber daya yang masih memiliki nilai guna. Dalam pendekatan pembangunan berkelanjutan, limbah diposisikan sebagai bahan baku sekunder (*secondary raw materials*) yang dapat dimanfaatkan kembali melalui proses pengolahan yang sesuai. Paradigma ini didasarkan pada pemikiran bahwa setiap material pada dasarnya masih memiliki potensi untuk digunakan kembali selama karakteristik fisik, kimia, maupun mekanisnya masih dapat memenuhi kebutuhan tertentu. Dengan demikian, limbah tidak lagi

dipandang sebagai akhir dari suatu siklus penggunaan, melainkan sebagai awal dari siklus produksi berikutnya (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

Sektor konstruksi menjadi salah satu bidang yang memiliki peluang besar dalam memanfaatkan material hasil daur ulang. Industri ini membutuhkan bahan baku dalam jumlah yang sangat besar, mulai dari agregat, semen, baja, hingga material pelengkap lainnya. Di sisi lain, kegiatan konstruksi juga menghasilkan limbah dalam volume yang tinggi, baik selama proses pembangunan maupun setelah bangunan mencapai akhir masa layanannya. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah sebagai material alternatif menjadi langkah yang mampu menjawab dua tantangan sekaligus, yaitu mengurangi eksploitasi sumber daya alam dan menekan jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan (International Organization for Standardization [ISO], 2017).

Berbagai jenis limbah telah dimanfaatkan sebagai bahan penyusun material konstruksi. Limbah beton dapat dihancurkan menjadi agregat daur ulang untuk pekerjaan perkerasan dan beton nonstruktural. Limbah kaca dapat diolah menjadi agregat halus atau bahan tambahan dalam campuran beton. Abu hasil pembakaran biomassa dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen, sedangkan limbah logam dapat dilebur kembali menjadi bahan baku industri. Keberhasilan pemanfaatan berbagai jenis limbah tersebut menunjukkan bahwa inovasi material mampu menghasilkan produk yang tetap memiliki fungsi teknis sekaligus memberikan manfaat lingkungan.

Di antara berbagai jenis limbah yang tersedia, plastik menjadi salah satu material yang paling potensial untuk dikembangkan sebagai bahan konstruksi alternatif. Potensi tersebut didukung oleh beberapa karakteristik utama, yaitu bobot

yang ringan, ketahanan terhadap kelembapan, stabilitas terhadap korosi, serta kemampuan beberapa jenis plastik untuk melunak ketika dipanaskan dan mengeras kembali setelah didinginkan. Sifat ini memungkinkan plastik berfungsi sebagai bahan pengikat atau bahan penyusun komposit tanpa harus selalu bergantung pada semen sebagai satu-satunya perekat.

Material plastik terdiri atas berbagai jenis polimer yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda. *Polyethylene Terephthalate* (PET), *High Density Polyethylene* (HDPE), *Low Density Polyethylene* (LDPE), dan *Polypropylene* (PP) merupakan beberapa jenis plastik yang paling banyak dimanfaatkan kembali karena memiliki sifat mekanis yang cukup baik dan relatif mudah diproses. Pemilihan jenis plastik menjadi faktor penting karena setiap polimer memiliki titik leleh, kekuatan, dan tingkat kestabilan yang berbeda sehingga akan memengaruhi kualitas produk akhir (ASTM International, 2023).

Sebelum digunakan sebagai bahan konstruksi, limbah plastik harus melalui beberapa tahapan pengolahan. Tahap pertama adalah pemilahan berdasarkan jenis polimer untuk menghindari pencampuran material yang memiliki karakteristik berbeda. Setelah itu dilakukan proses pembersihan untuk menghilangkan kotoran, sisa makanan, minyak, atau bahan lain yang dapat memengaruhi kualitas produk. Plastik yang telah bersih kemudian dikeringkan agar kadar airnya rendah sehingga proses pengolahan berikutnya dapat berlangsung secara optimal.

Tahapan selanjutnya berupa pencacahan atau pelelehan sesuai dengan teknologi yang digunakan. Pada teknologi berbasis pencacahan, plastik dipotong menjadi ukuran tertentu agar mudah dicampurkan dengan material lain. Sementara itu, pada teknologi berbasis pelelehan, plastik dipanaskan hingga mencapai

kondisi lunak sehingga mampu menyelimuti butiran agregat dan membentuk ikatan setelah mengalami pendinginan. Proses ini banyak diterapkan pada pembuatan *paving block* berbasis limbah plastik karena menghasilkan struktur yang padat dan memiliki ketahanan yang baik terhadap air.

Pemanfaatan limbah sebagai material alternatif tidak hanya memberikan keuntungan dari sisi lingkungan, tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya. Setiap kilogram limbah yang berhasil dimanfaatkan kembali berarti mengurangi kebutuhan terhadap bahan baku baru. Dalam jangka panjang, pendekatan ini dapat memperpanjang umur ketersediaan sumber daya alam sekaligus mengurangi energi yang dibutuhkan untuk memproduksi material dari bahan baku primer (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2022).

Selain aspek lingkungan dan efisiensi sumber daya, penggunaan limbah sebagai material alternatif juga membuka peluang berkembangnya inovasi produk konstruksi. Berbagai material komposit yang memadukan limbah dengan bahan konvensional mampu menghasilkan karakteristik yang berbeda, seperti bobot yang lebih ringan, ketahanan terhadap kelembapan yang lebih baik, serta kemampuan menyerap air yang lebih rendah dibandingkan material tertentu. Karakteristik tersebut menjadi nilai tambah yang dapat dimanfaatkan sesuai kebutuhan aplikasi konstruksi.

Walaupun memiliki potensi yang besar, penggunaan limbah sebagai material konstruksi tetap harus memperhatikan persyaratan mutu. Setiap produk harus memenuhi standar teknis yang berkaitan dengan kekuatan, ketahanan, stabilitas dimensi, dan keamanan penggunaan. Pengendalian kualitas sejak proses

pemilahan bahan hingga produk akhir menjadi faktor yang menentukan keberhasilan pemanfaatan limbah sebagai material alternatif. Dengan semakin berkembangnya teknologi pengolahan material, limbah diperkirakan akan menjadi salah satu sumber bahan baku utama dalam industri konstruksi masa depan. Pemanfaatan limbah tidak hanya mendukung terciptanya bangunan yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga menjadi bagian dari transformasi menuju sistem produksi yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan.

D. Peluang Pemanfaatan Limbah Plastik dalam Industri Konstruksi

Meningkatnya kebutuhan terhadap material konstruksi yang efisien, tahan lama, dan ramah lingkungan mendorong berkembangnya berbagai inovasi dalam pemanfaatan limbah plastik. Material yang sebelumnya hanya dianggap sebagai sampah kini mulai dimanfaatkan sebagai bahan baku alternatif pada berbagai produk konstruksi. Perkembangan tersebut didukung oleh kemajuan teknologi pengolahan plastik yang mampu menghasilkan material dengan karakteristik mekanis yang sesuai untuk berbagai kebutuhan pembangunan (UNEP, 2023).

Salah satu peluang terbesar terdapat pada pembuatan *paving block*. Produk ini digunakan secara luas sebagai material perkerasan untuk jalur pejalan kaki, halaman, area parkir, taman, serta berbagai fasilitas luar ruang lainnya. Dibandingkan perkerasan beton monolitik, *paving block* memiliki keunggulan berupa kemudahan pemasangan, kemudahan perawatan, serta kemampuan mengganti unit yang rusak tanpa membongkar seluruh permukaan. Karakteristik tersebut menjadikan *paving*

block sebagai media yang sangat potensial untuk mengadopsi material hasil daur ulang.

Dalam proses pembuatannya, limbah plastik dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengikat setelah mengalami pelelehan. Plastik cair akan melapisi butiran agregat sehingga membentuk struktur yang kompak ketika mendingin. Apabila komposisi bahan dan proses pembentukan dilakukan secara tepat, produk yang dihasilkan mampu memiliki kepadatan yang baik, daya serap air yang rendah, serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan tertentu. Oleh karena itu, limbah plastik tidak hanya berfungsi sebagai bahan tambahan, tetapi juga dapat menggantikan sebagian penggunaan bahan pengikat konvensional pada aplikasi tertentu.

Selain *paving block*, limbah plastik juga mulai dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan bata konstruksi. Bata berbasis plastik umumnya dibuat melalui proses pencampuran plastik dengan agregat halus atau bahan pengisi lainnya, kemudian dicetak menggunakan tekanan tertentu. Produk ini memiliki bobot yang relatif ringan, tidak mudah menyerap air, dan memiliki ketahanan terhadap pelapukan biologis. Meskipun penggunaannya masih lebih banyak untuk aplikasi nonstruktural, pengembangan teknologi terus dilakukan untuk meningkatkan performanya.

Peluang lainnya adalah pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan penyusun panel komposit. Panel ini dibuat dengan mengombinasikan plastik daur ulang bersama serat alam, serbuk kayu, atau material pengisi lainnya sehingga menghasilkan produk yang memiliki kekuatan, stabilitas dimensi, dan ketahanan terhadap kelembapan. Material komposit tersebut banyak dimanfaatkan sebagai pelapis dinding, plafon, partisi,

maupun elemen dekoratif karena memiliki tampilan yang menarik dan memerlukan perawatan yang relatif mudah.

Pada bidang perkerasan jalan, limbah plastik juga mulai digunakan sebagai bahan modifikasi campuran aspal. Plastik yang telah diproses akan meningkatkan stabilitas campuran serta membantu memperbaiki ketahanan terhadap deformasi akibat beban lalu lintas dan perubahan suhu. Pemanfaatan ini sekaligus mengurangi kebutuhan aspal konvensional sehingga memberikan manfaat dari sisi efisiensi penggunaan material (World Bank, 2022). Industri konstruksi juga mulai memanfaatkan limbah plastik sebagai bahan pelindung, geotekstil sintetis, saluran drainase, pipa, panel insulasi, hingga komponen modular yang diproduksi secara *prefabricated*. Fleksibilitas sifat plastik memungkinkan material ini dibentuk menjadi berbagai geometri sesuai kebutuhan tanpa memerlukan proses manufaktur yang terlalu kompleks.

Peluang pemanfaatan limbah plastik semakin besar seiring berkembangnya teknologi manufaktur digital. Penggunaan mesin pencetak otomatis, sistem kontrol suhu, serta proses pencampuran berbasis komputer memungkinkan kualitas produk menjadi lebih konsisten. Teknologi tersebut juga membantu meningkatkan efisiensi produksi sekaligus mengurangi variasi mutu yang sering menjadi kendala pada material hasil daur ulang.

Dari sisi ekonomi, pemanfaatan limbah plastik memberikan peluang terciptanya rantai nilai baru. Limbah yang sebelumnya tidak memiliki nilai jual dapat menjadi bahan baku industri dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi. Kondisi ini membuka peluang berkembangnya usaha pengumpulan, pemilahan, pengolahan, hingga produksi material konstruksi berbasis limbah. Selain meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya,

pendekatan tersebut juga mendukung berkembangnya ekonomi sirkular yang menempatkan limbah sebagai bagian dari sistem produksi.

Dari sisi lingkungan, penggunaan limbah plastik dalam industri konstruksi mampu memberikan manfaat yang signifikan. Semakin banyak limbah yang dimanfaatkan sebagai bahan baku, semakin sedikit volume sampah yang harus ditimbun atau berpotensi mencemari lingkungan. Pada saat yang sama, kebutuhan terhadap bahan baku primer juga berkurang sehingga tekanan terhadap eksploitasi sumber daya alam dapat ditekan. Walaupun peluangnya sangat besar, pemanfaatan limbah plastik tetap memerlukan pengendalian mutu yang ketat. Konsistensi jenis plastik, kualitas agregat, suhu pengolahan, komposisi campuran, serta proses pencetakan harus dikendalikan agar produk memenuhi standar teknis yang berlaku. Pengendalian tersebut penting untuk menjamin bahwa material hasil daur ulang memiliki performa yang stabil selama masa penggunaannya.

Perkembangan teknologi material menunjukkan bahwa limbah plastik tidak lagi dipandang sebagai masalah semata, melainkan sebagai sumber inovasi dalam industri konstruksi. Dengan dukungan teknologi pengolahan yang semakin baik, standar mutu yang jelas, serta meningkatnya kebutuhan terhadap material ramah lingkungan, limbah plastik memiliki prospek yang sangat besar untuk menjadi bagian penting dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan. Transformasi ini tidak hanya memberikan manfaat bagi lingkungan, tetapi juga mendorong efisiensi ekonomi dan memperkuat penerapan konsep konstruksi berkelanjutan di masa mendatang.

E. Prospek Pengembangan Material Berkelanjutan

1. Perkembangan Konsep Material Berkelanjutan

Perkembangan teknologi konstruksi menunjukkan bahwa keberhasilan pembangunan pada masa depan tidak lagi hanya diukur dari kecepatan pelaksanaan maupun kekuatan struktur yang dihasilkan, tetapi juga dari kemampuan suatu material dalam mendukung keberlanjutan lingkungan. Seiring meningkatnya kebutuhan pembangunan infrastruktur, kebutuhan terhadap bahan baku konstruksi juga terus bertambah. Kondisi tersebut mendorong munculnya berbagai inovasi material yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya alam sekaligus memanfaatkan limbah sebagai bahan baku alternatif. Oleh karena itu, pengembangan material berkelanjutan menjadi salah satu arah utama dalam transformasi industri konstruksi modern (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

Material berkelanjutan merupakan material yang dirancang dengan mempertimbangkan seluruh siklus hidupnya, mulai dari proses perolehan bahan baku, produksi, distribusi, penggunaan, hingga pengelolaan setelah masa pakainya berakhir. Pendekatan ini dikenal sebagai *life cycle thinking*, yaitu cara pandang yang mengevaluasi dampak lingkungan secara menyeluruh sehingga keputusan dalam memilih material tidak hanya didasarkan pada harga maupun kekuatan teknis, tetapi juga pada efisiensi energi, potensi penggunaan kembali, serta dampaknya terhadap lingkungan (International Organization for Standardization [ISO], 2017).

2. Pemanfaatan Material Daur Ulang sebagai Sumber Daya Baru

Dalam beberapa dekade terakhir, perhatian terhadap material hasil daur ulang mengalami peningkatan yang sangat signifikan. Berbagai negara mulai mendorong penggunaan material yang berasal dari limbah industri maupun limbah domestik sebagai bagian dari strategi pengurangan emisi karbon. Material seperti baja daur ulang, agregat hasil pembongkaran bangunan, kaca daur ulang, abu industri, hingga limbah plastik kini semakin banyak dimanfaatkan sebagai bahan penyusun berbagai produk konstruksi. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa limbah tidak lagi dipandang sebagai produk sisa, melainkan sebagai sumber daya yang masih memiliki nilai ekonomi dan teknis.

Salah satu faktor yang mendorong berkembangnya material berkelanjutan adalah meningkatnya kesadaran terhadap keterbatasan sumber daya alam. Material konstruksi konvensional, seperti pasir, batu pecah, kerikil, dan semen, diperoleh melalui proses eksploitasi sumber daya yang membutuhkan energi besar dan memberikan dampak terhadap lingkungan. Apabila kebutuhan material terus meningkat tanpa disertai upaya efisiensi maupun pemanfaatan kembali, maka tekanan terhadap ketersediaan sumber daya akan semakin besar. Oleh sebab itu, penggunaan material alternatif menjadi salah satu solusi untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan pembangunan dan pelestarian lingkungan.

3. Potensi Limbah Plastik sebagai Material Konstruksi Masa Depan

Limbah plastik merupakan salah satu material yang memiliki prospek sangat baik dalam mendukung konsep tersebut. Karakteristik plastik yang ringan, tahan terhadap kelembapan, memiliki stabilitas kimia yang baik, serta dapat diproses kembali melalui teknologi termal menjadikan material ini sangat potensial untuk dikembangkan menjadi berbagai produk konstruksi. Selain *paving block*, limbah plastik juga telah dimanfaatkan dalam pembuatan bata, panel komposit, *plastic lumber*, material insulasi, komponen modular, hingga campuran perkerasan jalan. Keragaman aplikasi tersebut menunjukkan bahwa plastik memiliki fleksibilitas yang tinggi dalam mendukung inovasi material masa depan.

4. Peran Teknologi dalam Pengembangan Material Berkelanjutan

Perkembangan teknologi manufaktur turut mempercepat pemanfaatan limbah plastik dalam industri konstruksi. Penggunaan mesin pencacah berkapasitas tinggi, sistem pelelehan dengan pengendalian suhu otomatis, teknologi pencetakan bertekanan, serta sistem pencampuran berbasis komputer mampu menghasilkan produk dengan mutu yang lebih konsisten dibandingkan proses konvensional. Teknologi tersebut tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi, tetapi juga mengurangi potensi cacat produk sehingga kualitas material hasil daur ulang semakin mendekati bahkan pada beberapa aplikasi mampu menyamai material konvensional.

Selain teknologi pengolahan, kemajuan pada bidang rekayasa material juga membuka peluang untuk menghasilkan material komposit yang memiliki performa lebih baik. Plastik daur ulang dapat dikombinasikan dengan serat alami, serat sintetis, abu mineral, maupun agregat halus sehingga menghasilkan material dengan sifat mekanis yang lebih optimal. Kombinasi tersebut memungkinkan peningkatan kekuatan tekan, kekuatan lentur, ketahanan terhadap benturan, hingga stabilitas dimensi sesuai kebutuhan penggunaannya. Dengan pendekatan ini, material hasil daur ulang tidak lagi hanya berfungsi sebagai pengganti bahan konvensional, tetapi juga mampu memberikan karakteristik baru yang menjadi nilai tambah.

5. Dukungan *Green Building* dan Ekonomi Sirkular

Prospek pengembangan material berkelanjutan juga didukung oleh semakin berkembangnya konsep *green building*. Dalam konsep ini, pemilihan material menjadi salah satu aspek utama dalam menilai tingkat keberlanjutan suatu bangunan. Material yang berasal dari sumber daya terbarukan, memiliki kandungan bahan daur ulang, membutuhkan energi produksi yang lebih rendah, serta dapat digunakan kembali setelah masa pakainya berakhir akan memberikan kontribusi positif terhadap penilaian keberlanjutan bangunan. Oleh karena itu, permintaan terhadap material ramah lingkungan diperkirakan akan terus meningkat seiring berkembangnya penerapan standar bangunan hijau di berbagai sektor pembangunan.

Konsep ekonomi sirkular (*circular economy*) juga memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap arah pengembangan material konstruksi. Dalam sistem ini, limbah dipandang sebagai bahan baku yang dapat terus dimanfaatkan melalui berbagai siklus penggunaan. Produk dirancang agar lebih

mudah diperbaiki, digunakan kembali, dan didaur ulang sehingga umur manfaat material menjadi lebih panjang. Penerapan konsep ini secara langsung mendukung pengembangan material berbasis limbah plastik karena mampu memperpanjang siklus hidup material sekaligus mengurangi jumlah sampah yang berakhir di tempat pembuangan (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

6. Peluang Ekonomi dan Efisiensi dalam Industri Konstruksi

Dari sisi ekonomi, material berkelanjutan menawarkan peluang yang sangat menjanjikan. Pemanfaatan limbah sebagai bahan baku mampu menekan biaya pengadaan material primer sekaligus membuka peluang munculnya berbagai usaha baru pada bidang pengumpulan, pemilahan, pengolahan, hingga produksi material konstruksi berbasis daur ulang. Aktivitas tersebut membentuk rantai nilai baru yang tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga meningkatkan nilai ekonomi limbah. Dengan demikian, pengembangan material berkelanjutan dapat menjadi salah satu penggerak pertumbuhan ekonomi berbasis sumber daya yang lebih efisien.

Di bidang konstruksi, penggunaan material berbasis limbah juga berpotensi meningkatkan efisiensi proyek. Material yang memiliki bobot lebih ringan dapat mempermudah proses transportasi dan pemasangan, sedangkan material dengan daya serap air yang rendah dapat meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan. Pada beberapa aplikasi, penggunaan material hasil daur ulang juga mampu mengurangi kebutuhan perawatan sehingga biaya selama masa pelayanan bangunan menjadi lebih rendah. Manfaat tersebut menunjukkan bahwa aspek keberlanjutan tidak selalu identik dengan peningkatan biaya, tetapi justru dapat menghasilkan efisiensi apabila dirancang dan diterapkan secara tepat.

7. Tantangan dalam Pengembangan Material Berkelanjutan

Meskipun prospeknya sangat besar, pengembangan material berkelanjutan tetap menghadapi beberapa tantangan. Salah satunya adalah konsistensi kualitas bahan baku limbah. Limbah plastik yang berasal dari berbagai sumber sering kali memiliki jenis polimer, tingkat kebersihan, dan karakteristik yang berbeda sehingga memerlukan proses pemilahan yang lebih teliti. Selain itu, proses produksi harus mampu menjaga suhu, komposisi campuran, dan teknik pencetakan agar mutu produk tetap stabil. Oleh karena itu, penerapan standar mutu menjadi faktor yang sangat penting dalam menjamin kualitas material hasil daur ulang.

Aspek lain yang perlu diperhatikan adalah penerimaan pengguna terhadap material baru. Sebagian masyarakat masih beranggapan bahwa material hasil daur ulang memiliki kualitas yang lebih rendah dibandingkan material konvensional. Padahal, dengan proses pengolahan yang tepat dan pengendalian mutu yang baik, berbagai material berbasis limbah mampu memenuhi persyaratan teknis sesuai standar yang berlaku. Edukasi mengenai manfaat, karakteristik, dan performa material berkelanjutan menjadi langkah penting untuk meningkatkan kepercayaan pengguna sekaligus memperluas penerapannya pada berbagai proyek konstruksi.

8. Inovasi Digital dan Arah Pengembangan Masa Depan

Perkembangan teknologi digital diperkirakan akan semakin mempercepat inovasi material konstruksi berkelanjutan. Pemanfaatan *Building Information Modeling* (BIM), kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), *Internet of Things* (IoT), hingga analisis data material memungkinkan proses perancangan dan produksi dilakukan secara lebih efisien. Teknologi tersebut dapat

membantu memilih komposisi material yang optimal, memprediksi performa produk, serta mengendalikan kualitas selama proses produksi. Dengan demikian, inovasi material berbasis limbah akan semakin mudah dikembangkan sesuai kebutuhan industri konstruksi masa depan.

Melihat berbagai perkembangan tersebut, pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi memiliki prospek yang sangat cerah. Ketersediaan bahan baku yang melimpah, kemajuan teknologi pengolahan, meningkatnya kebutuhan terhadap material ramah lingkungan, serta berkembangnya kebijakan pembangunan berkelanjutan menjadi faktor yang saling mendukung dalam memperluas penggunaan material berbasis limbah. Dalam jangka panjang, inovasi ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan pencemaran lingkungan, tetapi juga memperkuat ketahanan industri konstruksi melalui pemanfaatan sumber daya yang lebih efisien dan bertanggung jawab.

Dengan demikian, material berkelanjutan bukan sekadar alternatif terhadap material konvensional, melainkan menjadi bagian dari transformasi industri konstruksi menuju sistem pembangunan yang lebih adaptif, efisien, dan berwawasan lingkungan. Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan konstruksi merupakan salah satu bentuk nyata dari transformasi tersebut karena mampu menghubungkan aspek lingkungan, teknologi, dan ekonomi dalam satu kesatuan yang saling mendukung. Keberhasilan pengembangan material ini akan menjadi landasan penting dalam mewujudkan pembangunan infrastruktur yang lebih berkelanjutan bagi generasi mendatang.

BAB 2

KARAKTERISTIK DAN PENGELOLAAN LIMBAH PLASTIK

A. Pengertian dan Karakteristik Limbah Plastik

Plastik merupakan salah satu material sintetis yang telah menjadi bagian penting dalam kehidupan modern. Berbagai sektor, seperti industri pangan, kesehatan, transportasi, elektronik, pertanian, hingga konstruksi, memanfaatkan plastik karena memiliki karakteristik yang ringan, kuat, tahan terhadap korosi, mudah dibentuk, serta memiliki biaya produksi yang relatif rendah. Beragam keunggulan tersebut menjadikan plastik sebagai material yang sangat efisien untuk berbagai kebutuhan. Namun, di balik manfaatnya, penggunaan plastik yang terus meningkat juga menghasilkan limbah dalam jumlah yang besar sehingga menjadi salah satu tantangan utama dalam pengelolaan lingkungan global (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

Secara umum, limbah plastik dapat diartikan sebagai material sisa yang berasal dari produk berbahan dasar polimer sintetis yang telah selesai digunakan dan tidak lagi dimanfaatkan sesuai fungsi awalnya. Limbah tersebut dapat berasal dari aktivitas rumah tangga, perdagangan, industri, pertanian, pelayanan kesehatan, maupun kegiatan konstruksi. Menurut

Surono (2013), limbah plastik merupakan material sisa berbahan polimer sintetis yang telah kehilangan nilai guna bagi pengguna, namun masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali melalui berbagai proses pengolahan.

Dari sudut pandang ilmu material, plastik tersusun atas rantai molekul panjang (*macromolecules*) yang terbentuk melalui proses polimerisasi. Rantai molekul tersebut tersusun dari unit-unit kecil yang disebut monomer. Struktur kimia yang kuat menyebabkan sebagian besar plastik memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap proses degradasi alami. Karakteristik inilah yang membedakan plastik dari limbah organik yang relatif mudah diuraikan oleh mikroorganisme. Ikatan kimia pada plastik memerlukan waktu puluhan hingga ratusan tahun untuk terdegradasi secara alami sehingga akumulasinya di lingkungan terus meningkat apabila tidak dikelola dengan baik (Karuniastuti, 2013).

Kumar et al. (2017) menjelaskan bahwa limbah plastik merupakan akumulasi berbagai produk berbahan plastik yang berada di lingkungan dan dapat mengganggu keseimbangan ekosistem, mengancam kehidupan satwa, serta berpotensi memberikan dampak terhadap kesehatan manusia. Pengertian tersebut menunjukkan bahwa persoalan limbah plastik tidak hanya berkaitan dengan jumlah sampah yang dihasilkan, tetapi juga menyangkut dampaknya terhadap kualitas lingkungan secara menyeluruh.

Dalam bidang konstruksi, limbah plastik tidak lagi dipandang semata-mata sebagai material buangan. Berbagai perkembangan teknologi menunjukkan bahwa plastik memiliki karakteristik termoplastik yang memungkinkan material tersebut dilunakkan kembali melalui proses pemanasan, kemudian

dibentuk ulang menjadi produk baru setelah mengalami pendinginan. Sifat ini membuka peluang pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan pengikat (*binder*), agregat sintetis, maupun bahan penyusun material komposit pada berbagai produk konstruksi, seperti *paving block*, panel bangunan, bata, hingga campuran perkerasan jalan (Hopewell et al., 2009).

Karakteristik utama limbah plastik sangat dipengaruhi oleh jenis polimer penyusunnya. Beberapa jenis plastik memiliki tingkat kekuatan yang tinggi, sementara jenis lainnya lebih fleksibel. Ada plastik yang tahan terhadap suhu tinggi, tetapi terdapat pula jenis yang mudah mengalami deformasi apabila dipanaskan. Oleh karena itu, identifikasi jenis plastik menjadi langkah awal yang sangat penting sebelum material dimanfaatkan kembali.

Karakteristik limbah plastik, yaitu sebagai berikut:

1. Ketahanan terhadap air dan kelembapan. Berbeda dengan material organik yang mudah menyerap air dan mengalami pembusukan, plastik memiliki kemampuan menahan penetrasi air sehingga tidak mudah mengalami kerusakan akibat kelembapan. Karakteristik ini menjadi salah satu alasan mengapa plastik banyak digunakan sebagai kemasan maupun material pelindung.
2. Ketahanan kimia yang baik terhadap berbagai jenis asam, basa, minyak, maupun pelarut tertentu. Tingkat ketahanan tersebut berbeda pada setiap jenis polimer, namun secara umum lebih baik dibandingkan beberapa material konvensional. Dalam aplikasi konstruksi, sifat ini memberikan keuntungan karena material menjadi lebih tahan terhadap lingkungan yang bersifat korosif.

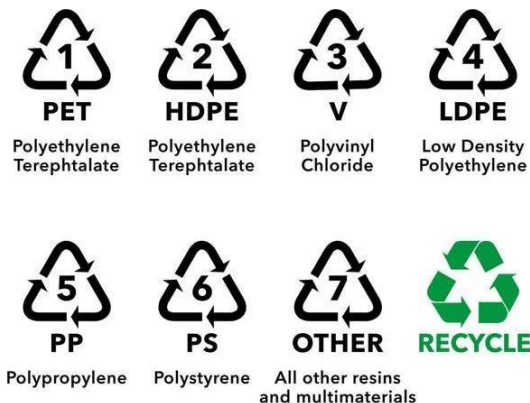
3. Massa jenis yang relatif rendah. Dibandingkan logam maupun beton, plastik memiliki bobot yang jauh lebih ringan sehingga mempermudah proses transportasi, penyimpanan, dan pemasangan. Pada material komposit, penggunaan plastik dapat membantu menghasilkan produk yang lebih ringan tanpa mengurangi fungsi utamanya.

Dari aspek mekanis, plastik memiliki sifat yang beragam, mulai dari sangat fleksibel hingga sangat kaku. Variasi tersebut dipengaruhi oleh struktur molekul masing-masing polimer. Misalnya, LDPE memiliki sifat lentur yang tinggi, sedangkan HDPE lebih kaku dan memiliki kekuatan tarik yang lebih baik. PET dikenal memiliki kekuatan mekanis yang tinggi serta stabil terhadap perubahan bentuk, sementara PP memiliki ketahanan yang baik terhadap pembebanan berulang. Karakteristik termal juga menjadi faktor yang menentukan pemanfaatan limbah plastik. Sebagian besar plastik yang digunakan dalam industri konstruksi termasuk kelompok termoplastik, yaitu material yang dapat dilelehkan kembali ketika dipanaskan dan mengeras setelah mengalami pendinginan. Kemampuan ini memungkinkan plastik digunakan berulang kali melalui proses pembentukan ulang tanpa mengalami perubahan struktur kimia secara signifikan (Awaja & Pavel, 2005).

Di sisi lain, limbah plastik juga memiliki beberapa keterbatasan. Plastik rentan mengalami degradasi akibat paparan sinar ultraviolet dalam jangka waktu lama. Beberapa jenis plastik juga memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi yang terbatas sehingga perlu dipilih sesuai dengan kondisi penggunaannya. Selain itu, pencampuran berbagai jenis plastik tanpa proses pemilahan dapat menurunkan kualitas produk hasil daur ulang.

Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, karakteristik limbah plastik justru memberikan peluang yang sangat besar untuk dimanfaatkan sebagai material alternatif. Ketahanan terhadap air, sifat termoplastik, bobot ringan, serta stabilitas kimia menjadi modal utama dalam pengembangan berbagai produk konstruksi berbasis limbah. Dengan pengolahan yang tepat, limbah plastik tidak lagi menjadi sumber pencemaran, melainkan berubah menjadi sumber daya yang memiliki nilai tambah dan mampu mendukung efisiensi penggunaan material.

B. Klasifikasi Jenis Plastik



Gambar 2. 1 Klasifikasi Jenis Plastik

Plastik yang beredar di masyarakat memiliki komposisi dan karakteristik yang sangat beragam. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh jenis polimer penyusun, bahan tambahan yang digunakan selama proses produksi, serta tujuan pemanfaatannya. Untuk mempermudah proses identifikasi dan pengelolaan limbah, industri plastik menggunakan sistem *Resin Identification Code* (RIC) yang dikembangkan oleh *Society of the Plastics Industry*

(SPI). Sistem ini membagi plastik ke dalam tujuh kelompok berdasarkan jenis resin penyusunnya sehingga memudahkan proses pemilahan, penggunaan kembali, dan daur ulang (ASTM International, 2023).

1. *Polyethylene Terephthalate (PET)*

PET merupakan salah satu jenis plastik yang paling banyak digunakan sebagai kemasan minuman, wadah makanan, serta serat poliester. Material ini memiliki kejernihan yang tinggi, kekuatan mekanis yang baik, serta mampu memberikan perlindungan terhadap udara dan kelembapan sehingga sangat sesuai digunakan sebagai kemasan pangan (Welle, 2011). Secara kimia, PET merupakan poliester semi-kristalin yang terbentuk melalui reaksi antara asam tereftalat dan etilen glikol (Awaja & Pavel, 2005). Material ini memiliki titik leleh sekitar 250–260°C dengan suhu transisi kaca sekitar 70°C sehingga dapat diproses kembali melalui teknologi pelelehan maupun ekstrusi.

PET menjadi salah satu plastik yang paling banyak didaur ulang karena memiliki kualitas hasil daur ulang yang relatif tinggi. Setelah melalui proses pemilahan, pencucian, pencacahan, dan pelelehan, PET dapat dimanfaatkan kembali menjadi serat tekstil, kemasan nonpangan, panel komposit, maupun bahan pengikat pada material konstruksi. Dalam bidang konstruksi, PET banyak dimanfaatkan sebagai bahan penyusun *paving block*, agregat sintesis, dan material komposit karena memiliki kekuatan yang baik serta daya serap air yang rendah.

2. *High-Density Polyethylene (HDPE)*

HDPE merupakan plastik berkepadatan tinggi yang memiliki struktur molekul lebih rapat dibandingkan LDPE. Kepadatan tersebut menghasilkan material yang lebih kuat, lebih kaku, dan

memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap bahan kimia maupun kelembapan. HDPE banyak digunakan sebagai bahan baku pipa air, jeriken, galon, wadah deterjen, drum kimia, dan berbagai produk industri lainnya. Material ini memiliki titik leleh sekitar 120–130°C, mudah diproses kembali, serta memiliki ketahanan yang baik terhadap benturan. Dalam industri konstruksi, HDPE banyak dimanfaatkan sebagai bahan pipa, geomembran, tangki air, serta berbagai komponen yang membutuhkan ketahanan terhadap korosi. Limbah HDPE juga dapat diolah menjadi papan komposit maupun campuran produk beton nonstruktural.

3. *Polyvinyl Chloride (PVC)*

PVC merupakan salah satu plastik yang paling banyak digunakan dalam sektor konstruksi karena memiliki kekuatan yang baik, tahan terhadap korosi, serta mudah dibentuk menjadi berbagai produk. Material ini digunakan sebagai pipa, kusen pintu dan jendela, penutup lantai, pelapis kabel listrik, hingga membran kedap air. Dengan penambahan *plasticizer*, PVC dapat dibuat lebih fleksibel sehingga sesuai untuk aplikasi tertentu. Walaupun memiliki daya tahan yang tinggi, proses pengolahan PVC memerlukan perhatian khusus karena mengandung unsur klorin yang memerlukan pengendalian pada saat pemrosesan maupun daur ulang.

4. *Low-Density Polyethylene (LDPE)*

LDPE memiliki struktur molekul bercabang sehingga menghasilkan material yang lebih lentur dibandingkan HDPE. Plastik ini banyak digunakan sebagai kantong belanja, plastik pembungkus makanan, kantong sampah, botol lunak, dan pelapis kabel. LDPE memiliki titik leleh sekitar 105–115°C, tahan

terhadap air serta berbagai bahan kimia ringan. Walaupun kekuatan mekanisnya lebih rendah dibandingkan HDPE, sifat fleksibelnya menjadikan LDPE sangat sesuai untuk produk yang membutuhkan elastisitas tinggi.

5. *Polypropylene* (PP)

PP merupakan salah satu plastik komersial dengan massa jenis paling rendah, namun memiliki kekuatan mekanis dan ketahanan panas yang sangat baik. Material ini memiliki titik leleh sekitar 160–170°C, tahan terhadap kelelahan akibat pembebanan berulang, serta memiliki ketahanan kimia yang sangat baik (Maddah, 2016). PP banyak digunakan sebagai wadah makanan, tutup botol, peralatan rumah tangga, komponen otomotif, hingga serat sintetis. Dalam bidang konstruksi, PP dimanfaatkan sebagai serat penguat beton (*fiber reinforcement*), panel komposit, maupun berbagai komponen bangunan berbasis plastik.

6. *Polystyrene* (PS)

PS merupakan plastik yang memiliki tingkat kekakuan tinggi namun relatif rapuh. Material ini diproduksi dalam beberapa bentuk, yaitu GPPS, HIPS, dan EPS (*Expanded Polystyrene*). Bentuk EPS lebih dikenal sebagai busa ringan yang banyak dimanfaatkan sebagai kemasan pelindung maupun material insulasi. PS memiliki sifat isolasi termal yang baik, tetapi ketahanan panasnya relatif rendah. Karena volumenya besar dan bobotnya ringan, proses pengumpulan dan daur ulang PS memerlukan teknologi pemadatan agar lebih efisien (Poletto, 2017).

7. Jenis Plastik Lainnya

Kelompok terakhir mencakup berbagai jenis plastik yang tidak termasuk dalam enam kelompok sebelumnya, seperti *Polycarbonate* (PC), *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS),

Polyamide (PA/nylon), *Polylactic Acid* (PLA), serta berbagai material komposit. Masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda sesuai dengan kebutuhan aplikasinya. Beberapa di antaranya digunakan sebagai komponen elektronik, perlengkapan otomotif, peralatan medis, hingga material teknik. Dalam industri konstruksi, kelompok ini mulai dimanfaatkan sebagai panel komposit, komponen cetak tiga dimensi (*3D printing*), serta material struktural ringan.

Perbedaan karakteristik setiap jenis plastik menunjukkan bahwa proses pemanfaatan limbah tidak dapat dilakukan secara seragam. Pemilahan berdasarkan jenis resin menjadi tahapan yang sangat penting agar proses daur ulang menghasilkan material dengan kualitas yang konsisten. Oleh karena itu, pemahaman mengenai klasifikasi plastik menjadi dasar utama dalam pengembangan teknologi pemanfaatan limbah plastik untuk material konstruksi berkelanjutan.

C. Karakteristik Fisik, Kimia, dan Termal Plastik

Pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi tidak dapat dilepaskan dari pemahaman mengenai karakteristik material tersebut. Setiap jenis plastik memiliki sifat fisik, kimia, dan termal yang berbeda sehingga memberikan respons yang berbeda pula ketika diproses maupun digunakan sebagai bahan penyusun produk konstruksi. Karakteristik tersebut menentukan metode pengolahan, jenis aplikasi, kualitas produk akhir, hingga umur layan material. Oleh karena itu, pemahaman mengenai sifat dasar plastik menjadi landasan penting dalam pengembangan teknologi pemanfaatan limbah plastik secara berkelanjutan (Callister & Rethwisch, 2020).

1. Karakteristik Fisik Plastik

Karakteristik fisik berkaitan dengan sifat material yang dapat diamati atau diukur tanpa mengubah komposisi kimianya. Pada plastik, karakteristik tersebut meliputi massa jenis (*density*), kekuatan mekanis, kekakuan, fleksibilitas, ketahanan terhadap benturan, daya serap air, serta ketahanan terhadap abrasi. Karakteristik-karakteristik ini menjadi dasar dalam menentukan kesesuaian plastik untuk berbagai aplikasi, termasuk sebagai bahan penyusun material konstruksi.

Tabel 2. 1 Karakteristik Fisik Utama Plastik

Karakteristik	Penjelasan
Massa jenis rendah	Sebagian besar plastik memiliki massa jenis sekitar 0,90–1,40 g/cm ³ , lebih rendah dibandingkan logam maupun beton. Bobot yang ringan mempermudah proses transportasi, penanganan, dan pemasangan. Pada <i>paving block</i> berbasis plastik, karakteristik ini juga membantu mengurangi beban terhadap lapisan tanah dasar.
Rasio kekuatan terhadap berat tinggi	Meskipun ringan, beberapa jenis plastik mampu menahan beban yang cukup besar. Oleh karena itu, plastik banyak digunakan sebagai matriks pada material komposit yang mengikat agregat maupun serat sehingga menghasilkan material yang kuat tetapi tetap ringan.
Sifat mekanis beragam	Struktur molekul setiap jenis plastik menghasilkan karakteristik mekanis yang berbeda. HDPE dan PP memiliki tingkat

Karakteristik	Penjelasan
	kekakuan lebih tinggi dibandingkan LDPE yang lebih lentur. PET memiliki kekuatan tarik tinggi sehingga sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan stabilitas dimensi, sedangkan PS bersifat kaku tetapi relatif rapuh terhadap benturan.
Daya serap air rendah	Hampir seluruh plastik memiliki sifat hidrofobik sehingga tidak mudah menyerap air, mengalami pembengkakan, maupun rusak akibat kelembapan. Karakteristik ini menjadikan limbah plastik sesuai digunakan sebagai bahan penyusun <i>paving block</i> , panel bangunan, dan berbagai material komposit luar ruangan.
Ketahanan abrasi	Beberapa jenis plastik memiliki ketahanan yang baik terhadap gesekan sehingga bentuk permukaan tetap terjaga dalam jangka waktu lama. Pada material perkerasan, sifat ini membantu meningkatkan umur pakai ketika menerima beban lalu lintas ringan hingga sedang.

Sumber: (Ashby, 2011)

Keterbatasan Karakteristik Fisik

Di samping berbagai keunggulannya, plastik juga memiliki beberapa keterbatasan. Dibandingkan logam maupun beton, sebagian besar plastik mempunyai modulus elastisitas yang lebih rendah sehingga lebih mudah mengalami deformasi apabila menerima beban besar dalam waktu yang lama. Oleh karena itu, dalam aplikasi konstruksi plastik umumnya dikombinasikan

dengan agregat mineral atau bahan penguat lainnya untuk meningkatkan kekuatan mekanis sekaligus memperbaiki stabilitas strukturnya.

2. Karakteristik Kimia Plastik

Karakteristik kimia menggambarkan perilaku plastik ketika berinteraksi dengan berbagai zat kimia maupun lingkungan sekitarnya. Salah satu keunggulan utama plastik adalah stabilitas kimianya yang tinggi, sehingga sebagian besar jenis plastik tidak mudah bereaksi dengan air, garam, minyak, maupun berbagai senyawa kimia lainnya. Karakteristik tersebut memberikan ketahanan korosi yang sangat baik (Harper, 2002).

Keunggulan Karakteristik Kimia Plastik

Beberapa keunggulan utama karakteristik kimia plastik antara lain sebagai berikut.

- a. Tahan terhadap korosi. Berbeda dengan logam yang mudah mengalami oksidasi, plastik relatif stabil ketika berada pada lingkungan lembap maupun lingkungan yang mengandung bahan kimia sehingga biaya perawatannya menjadi lebih rendah.
- b. Banyak dimanfaatkan pada berbagai produk. Ketahanan kimia tersebut menyebabkan plastik digunakan secara luas sebagai pipa distribusi air, tangki penyimpanan bahan kimia, pelapis kabel listrik, hingga berbagai komponen konstruksi.
- c. Tahan terhadap mikroorganisme. Jamur, bakteri, maupun organisme pembusuk tidak mampu menguraikan sebagian besar plastik secara cepat karena struktur molekulnya sangat stabil. Sifat ini menyebabkan limbah plastik dapat bertahan

sangat lama di lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik (Andrady & Neal, 2009).

Tantangan Akibat Stabilitas Kimia

Di balik keunggulan tersebut, stabilitas kimia plastik juga menimbulkan tantangan dalam pengelolaan limbah. Karena sulit terurai secara alami, diperlukan berbagai teknologi pengolahan agar plastik dapat dimanfaatkan kembali, antara lain:

- a. Daur ulang mekanis, yaitu pengolahan kembali plastik melalui pencacahan, pencucian, dan peleburan.
- b. Daur ulang kimia, yaitu mengembalikan polimer menjadi senyawa kimia penyusunnya.
- c. Konversi energi, yaitu memanfaatkan limbah plastik sebagai sumber energi melalui proses termal tertentu.

Peran Bahan Tambahan (*Additives*)

Karakteristik kimia plastik juga dipengaruhi oleh bahan tambahan (*additives*) yang digunakan selama proses produksi. Beberapa jenis bahan tambahan yang umum digunakan meliputi:

- a. *Plasticizer* untuk meningkatkan fleksibilitas.
- b. *Stabilizer* untuk menjaga kestabilan material.
- c. Antioksidan untuk menghambat degradasi akibat oksidasi.
- d. Pigmen sebagai pewarna.
- e. Bahan tahan api (*flame retardant*) untuk meningkatkan ketahanan terhadap kebakaran.

Keberadaan bahan tambahan tersebut perlu diperhatikan selama proses daur ulang karena dapat memengaruhi kualitas produk akhir yang dihasilkan.

3. Karakteristik Termal Plastik

Karakteristik termal merupakan salah satu aspek yang paling menentukan dalam pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi. Sifat ini berkaitan dengan respons plastik terhadap perubahan suhu, termasuk kemampuan material untuk melunak, meleleh, mengeras kembali, maupun mempertahankan bentuknya ketika menerima panas.

Sebagian besar plastik yang dimanfaatkan dalam industri konstruksi termasuk kelompok termoplastik. Material termoplastik memiliki kemampuan melunak ketika dipanaskan hingga mencapai titik leleh, kemudian mengeras kembali setelah mengalami pendinginan tanpa mengalami perubahan struktur kimia utama. Karakteristik tersebut memungkinkan plastik diproses berulang kali sehingga sangat sesuai untuk kegiatan daur ulang (Callister & Rethwisch, 2020).

Tabel 2. 2 Parameter Penting Karakteristik Termal

Parameter	Penjelasan
Titik leleh (<i>melting point</i>)	Menentukan suhu ketika plastik mulai meleleh sehingga dapat diproses.
Suhu transisi kaca (<i>glass transition temperature</i> atau <i>Tg</i>)	Menunjukkan perubahan plastik dari kondisi kaku menjadi lebih lentur.
Konduktivitas termal	Menggambarkan kemampuan plastik menghantarkan panas. Sebagian besar plastik memiliki konduktivitas termal rendah sehingga berfungsi sebagai isolator panas.

Tabel 2. 3 Perbandingan Titik Leleh Beberapa Jenis Plastik

Jenis Plastik	Titik Leleh
LDPE	±105–115°C
HDPE	±120–130°C
PP	±160–170°C
PET	±250–260°C

Perbedaan titik leleh tersebut menjadi dasar dalam menentukan suhu pengolahan sehingga plastik dapat meleleh secara optimal tanpa mengalami degradasi termal.

Selain memiliki kemampuan untuk diproses ulang, plastik juga mempunyai konduktivitas termal yang rendah sehingga banyak dimanfaatkan sebagai material insulasi pada panel bangunan maupun berbagai komponen konstruksi yang memerlukan penghambatan perpindahan panas. Dibandingkan logam, plastik menghantarkan panas lebih lambat sehingga dapat membantu meningkatkan efisiensi energi bangunan. Namun demikian, paparan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi termal. Pada kondisi tersebut, rantai polimer mulai mengalami kerusakan sehingga sifat mekanis material menurun. Oleh karena itu, pengendalian suhu selama proses pengolahan limbah plastik menjadi faktor yang sangat penting agar tidak melebihi batas stabilitas masing-masing jenis polimer.

Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan pengikat (*binder*) dalam pembuatan *paving block* berlangsung melalui beberapa tahapan berikut.

- a. Plastik dipanaskan hingga mencapai kondisi lunak atau meleleh.

- b. Plastik cair melapisi butiran agregat secara merata.
- c. Campuran dicetak sesuai bentuk yang diinginkan.
- d. Material didinginkan sehingga plastik mengeras kembali.
- e. Plastik yang telah mengeras membentuk ikatan kuat antaragregat sehingga menghasilkan *paving block* dengan struktur yang kompak.

Mekanisme tersebut menjadi dasar pemanfaatan limbah plastik sebagai *binder* alternatif pada berbagai produk konstruksi sekaligus mendukung upaya pemanfaatan kembali limbah plastik menjadi material yang bernilai guna tinggi. Karakteristik fisik, kimia, dan termal yang dimiliki plastik menunjukkan bahwa material ini memiliki potensi yang sangat besar untuk dimanfaatkan kembali. Dengan pengendalian proses yang tepat, limbah plastik mampu menghasilkan produk konstruksi yang memiliki kekuatan, ketahanan, dan stabilitas yang baik sekaligus mendukung pengurangan limbah serta efisiensi penggunaan sumber daya.

D. Teknologi Pengelolaan Limbah Plastik

Peningkatan penggunaan plastik dalam berbagai sektor kehidupan membawa konsekuensi berupa bertambahnya volume limbah yang harus dikelola secara berkelanjutan. Pengelolaan limbah plastik tidak lagi sekadar berfokus pada proses pembuangan, tetapi diarahkan pada upaya mempertahankan nilai guna material selama mungkin melalui pemanfaatan kembali, pengolahan, dan pemulihan sumber daya. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *circular economy*, yaitu sistem yang mengupayakan agar material tetap berada dalam siklus penggunaan sehingga kebutuhan terhadap bahan baku baru dapat

dikurangi (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

Dalam praktiknya, teknologi pengelolaan limbah plastik berkembang menjadi berbagai metode yang saling melengkapi. Pendekatan yang paling banyak diterapkan dikenal sebagai prinsip 4R, yaitu *Reduce*, *Reuse*, *Recycle*, dan *Recovery*. Keempat pendekatan tersebut membentuk suatu hierarki pengelolaan limbah yang mengutamakan pencegahan timbunan sampah sebelum dilakukan pengolahan lebih lanjut (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2022).

1. *Reduce* (Mengurangi)

Reduce merupakan langkah pertama sekaligus paling efektif dalam pengelolaan limbah plastik. Prinsip ini menekankan upaya mengurangi penggunaan produk berbahan plastik sejak awal sehingga jumlah limbah yang dihasilkan dapat ditekan secara signifikan. Berbeda dengan proses daur ulang yang dilakukan setelah limbah terbentuk, *reduce* berupaya mencegah terbentuknya limbah melalui perubahan pola produksi maupun pola konsumsi. Penerapan prinsip *reduce* dapat dilakukan melalui berbagai cara, seperti mengurangi penggunaan kemasan sekali pakai, memilih produk dengan kemasan yang lebih sederhana, memanfaatkan wadah yang dapat digunakan berulang kali, serta mengganti plastik sekali pakai dengan material yang memiliki umur pakai lebih panjang. Di sektor industri, strategi ini juga diterapkan melalui desain produk yang lebih efisien sehingga penggunaan bahan baku plastik menjadi lebih sedikit tanpa mengurangi fungsi produk.

Dalam industri konstruksi, konsep *reduce* diwujudkan melalui optimalisasi penggunaan material selama proses pembangunan. Perencanaan kebutuhan material yang lebih akurat mampu mengurangi sisa material konstruksi yang berpotensi menjadi limbah. Selain itu, penggunaan material hasil daur ulang juga mengurangi kebutuhan terhadap bahan baku baru sehingga konsumsi sumber daya alam dapat ditekan. Keuntungan utama dari pendekatan *reduce* adalah kemampuannya menekan beban sistem pengelolaan limbah secara keseluruhan. Semakin sedikit limbah yang dihasilkan, semakin kecil pula kebutuhan energi, biaya, maupun infrastruktur yang diperlukan untuk mengolahnya. Oleh karena itu, *reduce* selalu ditempatkan sebagai prioritas utama dalam hierarki pengelolaan limbah.

2. Reuse (Menggunakan Kembali)

Tahapan berikutnya adalah *reuse*, yaitu memanfaatkan kembali produk plastik tanpa melalui perubahan bentuk maupun proses pengolahan yang kompleks. Pendekatan ini bertujuan memperpanjang umur pakai suatu produk sehingga tidak langsung menjadi limbah setelah digunakan satu kali. Banyak produk plastik yang sebenarnya masih memiliki kondisi fisik yang baik meskipun fungsi awalnya telah selesai. Botol plastik, wadah penyimpanan, ember, kotak kemasan, maupun kontainer dapat digunakan kembali untuk berbagai keperluan selama masih memenuhi persyaratan keamanan dan kebersihan.

Dalam dunia konstruksi, prinsip *reuse* juga diterapkan melalui pemanfaatan kembali berbagai komponen berbahan plastik, seperti cetakan beton (*formwork*), pelindung material, pembatas area kerja, maupun wadah penyimpanan peralatan. Dengan memperpanjang masa penggunaan suatu produk,

kebutuhan produksi barang baru dapat dikurangi sehingga konsumsi energi dan bahan baku menjadi lebih efisien. Namun demikian, penggunaan kembali harus mempertimbangkan kondisi material. Produk plastik yang telah mengalami kerusakan, retak, atau penurunan kualitas tidak lagi layak digunakan untuk fungsi yang membutuhkan tingkat keamanan tertentu. Oleh karena itu, proses inspeksi menjadi bagian penting sebelum suatu produk digunakan kembali.

Selain memberikan manfaat lingkungan, *reuse* juga memberikan keuntungan ekonomi karena dapat mengurangi biaya pembelian produk baru. Semakin panjang umur pakai suatu produk, semakin tinggi pula efisiensi pemanfaatan sumber daya yang telah digunakan selama proses produksinya.

3. *Recycle* (Daur Ulang)

Recycle merupakan proses mengolah limbah plastik menjadi bahan baku atau produk baru yang masih memiliki nilai guna. Dibandingkan metode lainnya, daur ulang menjadi pendekatan yang paling banyak diterapkan karena mampu mengurangi volume limbah sekaligus menghasilkan material yang dapat dimanfaatkan kembali dalam berbagai sektor industri (Hopewell et al., 2009). Keberhasilan proses daur ulang sangat bergantung pada kualitas pemilahan limbah. Plastik yang telah dipisahkan berdasarkan jenis resin akan menghasilkan produk daur ulang dengan mutu yang lebih baik dibandingkan limbah yang tercampur. Oleh karena itu, identifikasi menggunakan *Resin Identification Code* (RIC) menjadi tahapan awal yang sangat penting.

Secara umum, proses daur ulang mekanis meliputi beberapa tahapan, yaitu pemilahan berdasarkan jenis plastik; pencucian untuk menghilangkan kontaminan; pencacahan menjadi serpihan (*flakes*); pengeringan; pelelehan (*melting*); ekstrusi menjadi pelet (*pelletizing*); dan pembentukan produk baru. Pada limbah PET, proses tersebut menghasilkan *recycled PET (rPET)* yang dapat dimanfaatkan kembali sebagai serat tekstil, kemasan, panel komposit, hingga bahan penyusun material konstruksi. Sementara itu, HDPE dan PP hasil daur ulang banyak digunakan sebagai bahan baku pipa, papan plastik, furnitur luar ruang, serta komponen bangunan.

Selain daur ulang mekanis, berkembang pula daur ulang kimia (*chemical recycling*). Teknologi ini memecah rantai polimer menjadi senyawa penyusunnya melalui proses seperti glikolisis, hidrolisis, maupun metanolisis. Hasil akhirnya berupa monomer yang memiliki kualitas mendekati bahan baku murni sehingga dapat digunakan kembali untuk memproduksi plastik baru (Awaja & Pavel, 2005). Dalam industri konstruksi, hasil daur ulang plastik semakin banyak dimanfaatkan sebagai bahan campuran beton, agregat sintetis, panel komposit, bata ringan, material insulasi, aspal modifikasi, serta *paving block*. Penggunaan material daur ulang tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga mengurangi eksploitasi sumber daya alam yang digunakan sebagai bahan konstruksi konvensional.

4. Recovery (Pemulihan Energi)

Apabila limbah plastik sudah tidak memungkinkan untuk digunakan kembali maupun didaur ulang karena mengalami pencemaran berat atau penurunan kualitas material, pendekatan yang dapat diterapkan adalah *recovery*. Prinsip ini bertujuan memperoleh kembali nilai energi yang masih terkandung di

dalam limbah plastik sehingga material tetap memberikan manfaat sebelum akhirnya dibuang. Sebagian besar plastik memiliki nilai kalor yang cukup tinggi karena berasal dari senyawa hidrokarbon. Nilai kalor beberapa jenis plastik bahkan mendekati bahan bakar fosil sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif pada berbagai instalasi industri (Ignatyev et al., 2014).

Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah pirolisis, yaitu proses pemanasan plastik pada kondisi minim oksigen. Melalui proses tersebut, rantai polimer terurai menjadi minyak pirolisis, gas, dan residu karbon. Produk yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif maupun bahan baku industri petrokimia. Teknologi lain yang juga berkembang adalah gasifikasi, yaitu proses konversi limbah plastik menjadi gas sintetis (*syngas*) yang mengandung karbon monoksida dan hidrogen. Gas tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar maupun bahan baku berbagai proses industri.

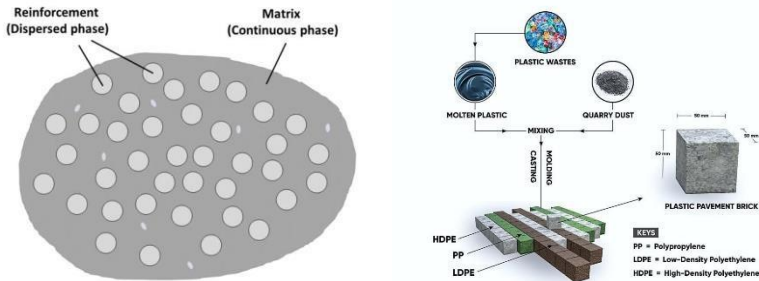
Selain itu, limbah plastik juga dimanfaatkan sebagai *Refuse Derived Fuel* (RDF). Pada teknologi ini, limbah yang memiliki nilai kalor tinggi diproses menjadi bahan bakar alternatif untuk industri yang membutuhkan energi termal dalam jumlah besar. Pendekatan tersebut mampu mengurangi konsumsi bahan bakar fosil sekaligus mengurangi volume limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir. Meskipun memberikan manfaat energi, *recovery* ditempatkan setelah *recycle* dalam hierarki pengelolaan limbah. Hal ini disebabkan proses pemulihan energi tidak mempertahankan material sebagai sumber daya, melainkan mengubahnya menjadi energi. Oleh karena itu, *recovery* dipilih

apabila penggunaan kembali maupun daur ulang sudah tidak memungkinkan dilakukan.

BAB 3

TEKNOLOGI MATERIAL KONSTRUKSI BERBASIS LIMBAH PLASTIK

A. Konsep Material Komposit



Gambar 3. 1 Ilustrasi Konsep Material Komposit Berbasis Limbah Plastik sebagai Matriks (Binder) dan Agregat Mineral

Material komposit merupakan material yang terbentuk dari penggabungan dua atau lebih bahan yang memiliki karakteristik berbeda sehingga menghasilkan sifat baru yang lebih baik dibandingkan masing-masing penyusunnya. Dalam bidang konstruksi, konsep material komposit berkembang sebagai solusi untuk menghasilkan material yang memiliki kekuatan tinggi, berat yang relatif ringan, ketahanan terhadap lingkungan, serta

umur pakai yang lebih panjang. Penggabungan beberapa material tersebut tidak hanya bertujuan meningkatkan performa mekanis, tetapi juga mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya dan mengurangi penggunaan bahan baku konvensional (Callister & Rethwisch, 2020).

Pada material komposit, setiap komponen memiliki fungsi yang berbeda. Komponen utama dikenal sebagai matriks (*matrix*), yaitu bahan yang berfungsi mengikat seluruh penyusun menjadi satu kesatuan. Komponen lainnya disebut penguat (*reinforcement*) atau pengisi (*filler*) yang berperan meningkatkan kekuatan, kekakuan, stabilitas dimensi, maupun ketahanan terhadap beban. Interaksi yang baik antara matriks dan penguat akan menghasilkan material dengan sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan apabila kedua material digunakan secara terpisah (Mallick, 2007).

Dalam teknologi pemanfaatan limbah plastik untuk material konstruksi, plastik termoplastik seperti *Polyethylene Terephthalate* (PET), *High-Density Polyethylene* (HDPE), maupun *Polypropylene* (PP) dapat berfungsi sebagai matriks. Ketika dipanaskan hingga mencapai titik lelehnya, plastik akan berubah menjadi cairan kental yang mampu menyelimuti butiran agregat. Setelah mengalami pendinginan, plastik kembali mengeras sehingga membentuk ikatan yang kuat antarpartikel agregat. Proses inilah yang membedakan material komposit berbasis plastik dengan beton konvensional yang menggunakan reaksi hidrasi semen sebagai mekanisme pengikat utama (Taha et al., 2018).

Keunggulan utama material komposit berbasis plastik terletak pada kemampuannya mengombinasikan karakteristik plastik yang kedap air, tahan terhadap korosi, dan cukup lentur

dengan kekuatan agregat mineral yang memiliki kekerasan tinggi. Hasilnya adalah material yang memiliki daya tahan terhadap kelembapan, ketahanan benturan yang baik, serta tingkat penyerapan air yang rendah. Kombinasi tersebut sangat sesuai untuk berbagai aplikasi perkerasan seperti *paving block*, jalur pejalan kaki, halaman, maupun area parkir ringan hingga menengah (Siddique et al., 2008).

Selain meningkatkan kualitas material, konsep komposit juga mendukung penerapan konstruksi berkelanjutan. Limbah plastik yang sebelumnya tidak memiliki nilai guna dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku, sehingga mengurangi volume limbah sekaligus menekan penggunaan semen yang diketahui memiliki jejak karbon cukup tinggi selama proses produksinya. Dengan demikian, teknologi material komposit tidak hanya memberikan keuntungan dari sisi teknis, tetapi juga memberikan manfaat terhadap efisiensi sumber daya dan pelestarian lingkungan (European Commission, 2020).

Tabel 3. 1 Komponen Penyusun Material Komposit Berbasis Plastik

Komponen	Fungsi	Contoh Material
Matriks (<i>Binder</i>)	Mengikat seluruh material penyusun	PET, HDPE, PP, LDPE
Agregat	Memberikan kekuatan tekan dan stabilitas	Pasir, abu batu
<i>Filler</i>	Mengisi rongga dan meningkatkan kepadatan	<i>Fly ash</i> , serbuk batu, abu sekam
<i>Additive</i>	Memperbaiki karakteristik tertentu	Pigmen, <i>stabilizer</i> UV, antioksidan

B. Limbah Plastik sebagai Bahan Pengikat

Dalam pembuatan *eco paving block*, limbah plastik tidak hanya dimanfaatkan sebagai bahan tambahan, tetapi juga dapat berfungsi sebagai bahan pengikat (*binder*) yang menggantikan sebagian bahkan seluruh penggunaan semen. Fungsi tersebut dimungkinkan karena sebagian besar plastik yang digunakan merupakan kelompok termoplastik, yaitu polimer yang dapat melunak ketika dipanaskan dan kembali mengeras setelah mengalami pendinginan tanpa kehilangan karakteristik utamanya (Awaja & Pavel, 2005).

Prinsip kerja limbah plastik sebagai bahan pengikat berbeda dengan semen Portland. Pada beton konvensional, ikatan antarpartikel terbentuk melalui reaksi kimia antara semen dan air yang menghasilkan produk hidrasi. Sebaliknya, pada material komposit berbasis plastik, ikatan terbentuk secara fisik melalui proses pelelehan. Plastik yang telah mencair akan menyelimuti seluruh permukaan agregat sehingga terbentuk lapisan matriks yang mampu mengikat butiran pasir menjadi struktur yang padat setelah mengalami pendinginan (Gurunathan et al., 2021). Jenis plastik yang paling banyak dimanfaatkan sebagai *binder* adalah PET, HDPE, PP, dan LDPE. Masing-masing memiliki karakteristik yang berbeda sehingga perlu disesuaikan dengan proses produksi. PET memiliki kekuatan mekanis yang tinggi, HDPE memiliki ketahanan terhadap bahan kimia, PP memiliki stabilitas termal yang baik, sedangkan LDPE lebih fleksibel sehingga dapat meningkatkan kelenturan material komposit (Hopewell et al., 2009).

Kualitas ikatan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain suhu pelelehan, ukuran cacahan plastik, kadar air agregat, homogenitas pencampuran, serta rasio antara plastik dan agregat. Apabila suhu terlalu rendah, plastik belum mencair secara sempurna sehingga tidak mampu melapisi agregat secara merata. Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi polimer yang mengurangi kualitas material serta menghasilkan emisi yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pengendalian suhu selama proses produksi menjadi salah satu aspek penting dalam memperoleh produk dengan kualitas yang konsisten (Taha et al., 2018).

Penggunaan limbah plastik sebagai *binder* memberikan beberapa keuntungan dibandingkan semen. Material menjadi lebih ringan, memiliki daya serap air yang rendah, lebih tahan terhadap korosi, serta memiliki ketahanan benturan yang lebih baik karena sifat plastis polimer. Selain itu, karena plastik bersifat hidrofobik, air sulit masuk ke dalam struktur material sehingga risiko kerusakan akibat kelembapan dapat dikurangi secara signifikan (Siddique et al., 2008). Meskipun demikian, penggunaan plastik sebagai bahan pengikat memerlukan pengendalian mutu yang baik. Limbah plastik harus dipilah berdasarkan jenis resin agar memiliki titik leleh yang seragam. Campuran berbagai jenis plastik dengan karakteristik termal yang berbeda dapat menghasilkan matriks yang tidak homogen sehingga memengaruhi kekuatan produk akhir. Oleh sebab itu, proses sortasi bahan baku merupakan bagian penting dalam teknologi produksi *eco paving block*.

Tabel 3. 2 Karakteristik Beberapa Jenis Plastik sebagai Bahan Pengikat

Jenis Plastik	Kisaran Titik Leleh	Karakteristik Utama	Potensi sebagai Binder
PET	250–260°C	Kuat, keras, tahan kimia	Sangat baik
HDPE	120–135°C	Tahan benturan dan korosi	Sangat baik
LDPE	105–115°C	Lentur dan mudah diproses	Baik
PP	160–171°C	Stabil terhadap panas dan bahan kimia	Sangat baik

Melalui pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan pengikat, konsep material komposit mampu menghadirkan alternatif material konstruksi yang lebih efisien dalam penggunaan sumber daya sekaligus memberikan nilai tambah terhadap limbah yang sebelumnya tidak termanfaatkan. Pendekatan ini menjadi salah satu bentuk penerapan teknologi material modern yang menggabungkan performa teknis dengan prinsip keberlanjutan sehingga berpotensi mendukung pengembangan berbagai produk konstruksi ramah lingkungan di masa mendatang (European Commission, 2020; Gurunathan et al., 2021).

C. Limbah Plastik sebagai Bahan Substitusi

Selain dimanfaatkan sebagai bahan pengikat (*binder*), limbah plastik juga dapat digunakan sebagai bahan substitusi (*substitute material*), yaitu menggantikan sebagian material konvensional yang umum digunakan dalam pembuatan produk konstruksi. Konsep substitusi bertujuan mengurangi konsumsi sumber daya alam sekaligus meningkatkan pemanfaatan limbah yang masih

memiliki nilai guna. Dalam teknologi material konstruksi modern, limbah plastik dapat menggantikan sebagian agregat halus, agregat kasar, maupun sebagian bahan pengisi (*filler*) sesuai dengan karakteristik produk yang akan dihasilkan (Siddique et al., 2008).

Penggunaan limbah plastik sebagai material substitusi didasarkan pada sifat fisiknya yang ringan, tahan terhadap air, tidak mudah mengalami korosi, serta memiliki stabilitas kimia yang baik. Karakteristik tersebut memberikan keuntungan berupa penurunan berat material tanpa mengurangi fungsi utama sebagai bahan perkerasan. Pada *eco paving block*, substitusi sebagian agregat menggunakan plastik dapat menghasilkan produk yang lebih ringan sehingga mempermudah proses transportasi, pemasangan, maupun pemeliharaan (Taha et al., 2018).

Prinsip substitusi dilakukan dengan mengganti sebagian volume agregat menggunakan cacahan plastik yang telah dipersiapkan sesuai ukuran tertentu. Pada beberapa proses produksi, plastik digunakan dalam bentuk serpihan (*flakes*), butiran (*pellets*), maupun hasil pencacahan (*plastic chips*). Seluruh material dicampurkan secara homogen sehingga distribusi plastik di dalam matriks berlangsung merata. Keceragaman pencampuran sangat menentukan kualitas material yang dihasilkan karena distribusi yang tidak merata dapat membentuk rongga (*void*) yang menurunkan kekuatan produk (Gurunathan et al., 2021).

Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan substitusi juga memberikan pengaruh terhadap karakteristik fisik material. Massa jenis produk menjadi lebih rendah dibandingkan *paving block* konvensional karena densitas plastik lebih kecil daripada

agregat mineral. Penurunan massa jenis tersebut memberikan keuntungan pada konstruksi yang memerlukan material ringan tanpa mengurangi stabilitas struktur. Selain itu, sifat hidrofobik plastik turut menurunkan tingkat penyerapan air sehingga meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan pelapukan (Callister & Rethwisch, 2020).

Dari sisi lingkungan, konsep substitusi memberikan manfaat yang cukup besar karena mampu mengurangi eksploitasi material alam, khususnya pasir dan batu pecah yang selama ini menjadi bahan utama dalam industri konstruksi. Penggunaan limbah plastik juga mendukung penerapan konsep *circular economy*, yaitu menjaga material tetap berada dalam siklus pemanfaatan selama mungkin sehingga jumlah limbah yang berakhir di tempat pembuangan dapat ditekan (European Commission, 2020).

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, proporsi penggunaan limbah plastik sebagai bahan substitusi perlu disesuaikan dengan kebutuhan produk. Penggunaan plastik dalam jumlah yang terlalu besar dapat mengurangi kekakuan material dan menurunkan daya dukung terhadap beban tekan. Oleh karena itu, komposisi campuran harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan mekanis, berat material, daya tahan, serta kemudahan proses produksi sehingga diperoleh produk dengan kualitas yang optimal (Taha et al., 2018).

Tabel 3. 3 Bentuk Pemanfaatan Limbah Plastik sebagai Material Substitusi

Bentuk Substitusi	Material yang Digantikan	Tujuan Pemanfaatan
Agregat halus	Sebagian pasir	Mengurangi penggunaan material alam
Agregat kasar	Batu pecah tertentu	Mengurangi berat material
<i>Filler</i>	Serbuk mineral	Mengisi rongga dan meningkatkan kepadatan
Bahan komposit	Campuran material konstruksi	Meningkatkan efisiensi penggunaan limbah

Penggunaan limbah plastik sebagai bahan substitusi memperlihatkan bahwa limbah tidak lagi dipandang sebagai material buangan, melainkan sebagai sumber daya alternatif yang mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan baku. Pendekatan ini menjadi salah satu strategi penting dalam pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan, ekonomis, dan berkelanjutan.



Gambar 3. 2 Pasir Tongkang

D. Material Pendukung

Keberhasilan pembuatan material komposit berbasis limbah plastik tidak hanya ditentukan oleh kualitas plastik yang digunakan sebagai matriks maupun bahan substitusi, tetapi juga dipengaruhi oleh material pendukung yang menyusun keseluruhan campuran. Material pendukung berfungsi meningkatkan kekuatan, kepadatan, kestabilan dimensi, serta ketahanan material terhadap berbagai kondisi lingkungan. Pemilihan material pendukung yang tepat akan menghasilkan produk dengan karakteristik fisik dan mekanis yang lebih baik sehingga mampu memenuhi kebutuhan aplikasi konstruksi (Neville, 2011).

1. Agregat Halus

Agregat halus merupakan material berbutir halus yang berfungsi sebagai pengisi utama dalam campuran material komposit. Material ini umumnya berupa pasir alami maupun pasir hasil pemecahan batu yang memiliki ukuran partikel relatif kecil. Dalam *eco paving block* berbasis plastik, agregat halus menjadi komponen dengan jumlah terbesar karena berfungsi sebagai penyusun utama struktur material. Kualitas agregat halus sangat memengaruhi kekuatan produk. Agregat yang bersih, memiliki gradasi yang baik, serta kadar air yang rendah akan menghasilkan ikatan yang lebih kuat dengan matriks plastik. Sebaliknya, pasir yang mengandung lumpur atau kadar air tinggi dapat menghambat proses pelapisan plastik sehingga mengurangi kualitas produk akhir (Neville, 2011).

2. Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan material berukuran lebih besar yang digunakan untuk meningkatkan daya dukung dan kekuatan terhadap beban tekan. Pada beberapa jenis material komposit berbasis plastik, agregat kasar digunakan untuk menghasilkan produk yang membutuhkan kapasitas beban lebih tinggi, seperti blok perkerasan atau elemen konstruksi tertentu. Keberadaan agregat kasar membantu mendistribusikan beban secara lebih merata sehingga material menjadi lebih stabil. Selain itu, agregat kasar juga berfungsi mengurangi penyusutan material selama proses pendinginan karena memiliki stabilitas dimensi yang tinggi (Mehta & Monteiro, 2014).

3. Bahan Tambahan (*Additive*)

Bahan tambahan merupakan material yang digunakan dalam jumlah relatif kecil untuk memperbaiki karakteristik tertentu pada material komposit. Penambahan *additive* dapat meningkatkan ketahanan terhadap sinar ultraviolet, memperbaiki stabilitas termal, mempercepat proses pencampuran, maupun meningkatkan warna dan penampilan produk. Beberapa jenis *additive* yang umum digunakan antara lain antioksidan, *UV stabilizer*, pigmen warna, serta bahan peningkat stabilitas termal. Penggunaan bahan tambahan harus disesuaikan dengan kebutuhan agar tidak mengganggu keseimbangan karakteristik mekanis material (Mallick, 2007).

4. Bahan Pengisi (*Filler*)

Bahan pengisi (*filler*) merupakan material berukuran sangat halus yang ditambahkan untuk mengisi rongga-rongga kecil di antara agregat sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat. Penggunaan *filler* mampu meningkatkan kepadatan,

mengurangi porositas, serta memperbaiki kekuatan material komposit. Beberapa material yang sering digunakan sebagai *filler* antara lain abu batu, serbuk batu kapur, abu sekam padi, abu terbang (*fly ash*), maupun serbuk mineral lainnya. Selain meningkatkan kualitas produk, pemanfaatan *filler* berbasis limbah juga mendukung efisiensi penggunaan sumber daya dan memperluas pemanfaatan material sisa dari berbagai proses industri (Mehta & Monteiro, 2014).

Tabel 3. 4 Fungsi Material Pendukung pada Material Komposit Berbasis Plastik

Material Pendukung	Fungsi Utama	Kontribusi terhadap Produk
Agregat halus	Penyusun utama campuran	Meningkatkan kekuatan dan kepadatan
Agregat kasar	Menahan beban tekan	Meningkatkan stabilitas struktur
<i>Additive</i>	Memperbaiki sifat tertentu	Meningkatkan ketahanan dan kemudahan proses
<i>Filler</i>	Mengisi rongga antarpartikel	Mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan

Seluruh material pendukung tersebut bekerja secara sinergis dengan matriks plastik untuk membentuk material komposit yang memiliki performa lebih baik dibandingkan apabila setiap komponen digunakan secara terpisah. Oleh karena itu, keberhasilan teknologi material konstruksi berbasis limbah plastik tidak hanya bergantung pada kualitas plastik, tetapi juga

pada pemilihan agregat, *additive*, dan *filler* yang sesuai dengan karakteristik produk yang diinginkan.

E. Karakteristik Material Komposit Berbasis Plastik

Material komposit berbasis limbah plastik merupakan hasil perpaduan antara polimer termoplastik sebagai matriks dengan agregat mineral serta bahan pendukung lainnya. Kombinasi tersebut menghasilkan material yang memiliki karakteristik berbeda dengan beton konvensional. Sifat plastik yang ringan, kedap air, tahan terhadap korosi, dan cukup lentur berpadu dengan kekuatan agregat sehingga menghasilkan material konstruksi yang memiliki keseimbangan antara kekuatan mekanis, ketahanan lingkungan, dan efisiensi penggunaan sumber daya (Callister & Rethwisch, 2020).

Karakteristik material komposit tidak hanya ditentukan oleh jenis plastik yang digunakan, tetapi juga dipengaruhi oleh komposisi campuran, ukuran agregat, proses pencampuran, suhu pelelehan, tingkat pemadatan, serta proses pendinginan. Seluruh tahapan tersebut berpengaruh terhadap kualitas ikatan antara matriks plastik dan agregat sehingga menentukan performa produk akhir (Mallick, 2007).

1. Karakteristik Fisik

Dari aspek fisik, material komposit berbasis plastik memiliki massa jenis yang lebih rendah dibandingkan material berbasis semen. Penggunaan plastik sebagai matriks menghasilkan produk yang lebih ringan sehingga memudahkan proses pengangkutan, pemasangan, maupun penanganan di lapangan. Bobot yang lebih ringan juga memberikan keuntungan berupa berkurangnya

beban mati (*dead load*) pada sistem perkerasan tanpa mengurangi fungsi utama material sebagai penahan beban permukaan (Siddique et al., 2008).

Karakteristik lain yang sangat menonjol adalah rendahnya tingkat penyerapan air. Plastik merupakan material hidrofobik yang tidak mudah menyerap air sehingga pori-pori di dalam material menjadi lebih sedikit. Kondisi tersebut membuat air sulit masuk ke dalam struktur komposit sehingga risiko pelapukan akibat kelembapan, pertumbuhan mikroorganisme, maupun kerusakan karena perubahan kadar air dapat diminimalkan. Nilai penyerapan air yang rendah juga mendukung peningkatan umur pakai material, terutama pada area yang sering mengalami paparan air hujan maupun genangan (Taha et al., 2018).

Permukaan material komposit berbasis plastik juga relatif lebih padat dibandingkan produk konvensional. Struktur yang padat menghasilkan ketahanan yang lebih baik terhadap abrasi atau keausan akibat gesekan kendaraan maupun aktivitas pejalan kaki. Oleh karena itu, material ini sesuai digunakan pada berbagai jenis perkerasan yang memerlukan ketahanan terhadap penggunaan secara terus-menerus.

2. Karakteristik Mekanis

Karakteristik mekanis merupakan salah satu aspek utama yang menentukan kelayakan suatu material konstruksi. Pada material komposit berbasis plastik, kekuatan tekan dipengaruhi oleh kualitas ikatan antara plastik cair dengan agregat. Semakin homogen proses pencampuran dan semakin baik proses pemadatan, maka semakin tinggi pula kemampuan material dalam menahan beban tekan (Gurunathan et al., 2021).

Selain memiliki kuat tekan yang baik, material komposit berbasis plastik juga memiliki ketangguhan benturan (*impact strength*) yang lebih tinggi dibandingkan material berbasis semen. Rantai panjang molekul polimer mampu menyerap sebagian energi benturan sehingga material tidak mudah mengalami retak atau pecah ketika menerima beban kejut. Karakteristik tersebut menjadi salah satu keunggulan utama material komposit karena mampu meningkatkan ketahanan terhadap beban dinamis yang terjadi selama masa penggunaan (Callister & Rethwisch, 2020).

Material komposit juga memiliki tingkat kelenturan (*ductility*) yang lebih baik. Berbeda dengan beton yang cenderung bersifat getas (*brittle*), keberadaan matriks plastik memberikan kemampuan deformasi dalam batas tertentu sebelum material mengalami kerusakan. Sifat ini membantu mengurangi risiko keretakan akibat perubahan temperatur maupun penurunan tanah yang terjadi secara bertahap.

3. Karakteristik Kimia

Dari sisi kimia, material komposit berbasis plastik memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap berbagai zat korosif. Plastik merupakan material yang relatif inert sehingga tidak mudah bereaksi dengan larutan asam ringan, garam, maupun berbagai bahan kimia lain yang sering dijumpai pada lingkungan konstruksi. Ketahanan tersebut membuat material mampu mempertahankan kualitasnya meskipun digunakan pada lingkungan yang memiliki tingkat kelembapan tinggi atau terpapar bahan kimia dalam jangka waktu lama (Taha et al., 2018). Sifat kimia yang stabil juga membantu mengurangi risiko degradasi material akibat reaksi dengan lingkungan. Hal ini menjadi salah satu alasan mengapa material komposit berbasis plastik banyak dikembangkan sebagai alternatif untuk aplikasi

luar ruang yang membutuhkan daya tahan tinggi terhadap cuaca dan kondisi lingkungan.

4. Karakteristik Termal

Karakteristik termal berkaitan dengan kemampuan material dalam menerima, menyimpan, dan melepaskan panas. Plastik termoplastik memiliki titik leleh yang berbeda-beda sesuai jenis resin yang digunakan. Selama digunakan pada kondisi lingkungan normal, suhu permukaan perkerasan masih berada jauh di bawah titik leleh plastik sehingga material tetap stabil dan mampu mempertahankan bentuknya (Awaja & Pavel, 2005). Konduktivitas termal material komposit berbasis plastik juga lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Kondisi ini menyebabkan perpindahan panas berlangsung lebih lambat sehingga perubahan suhu di dalam material terjadi secara bertahap. Karakteristik tersebut dapat membantu mengurangi tegangan termal akibat perubahan suhu yang terjadi secara tiba-tiba.

5. Karakteristik Keberlanjutan

Selain memiliki performa teknis yang baik, material komposit berbasis plastik juga menawarkan karakteristik keberlanjutan yang menjadi salah satu alasan utama pengembangannya. Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan baku mampu mengurangi volume limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir sekaligus menekan kebutuhan terhadap bahan baku alam. Di sisi lain, penggunaan plastik sebagai pengganti sebagian semen juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksi semen, sehingga mendukung penerapan konsep *green construction* dan *circular economy* (European Commission, 2020).

Pemanfaatan kembali limbah plastik menjadi produk konstruksi bernilai tambah menunjukkan bahwa limbah dapat diubah menjadi sumber daya yang produktif. Pendekatan tersebut mendukung pengelolaan material secara lebih efisien sekaligus memperpanjang siklus pemanfaatan suatu produk sebelum akhirnya menjadi limbah. Material komposit berbasis limbah plastik memiliki kombinasi karakteristik yang menjadikannya sebagai alternatif material konstruksi yang kompetitif. Keseimbangan antara sifat fisik, mekanis, kimia, dan termal menghasilkan material yang mampu memenuhi kebutuhan aplikasi perkerasan sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Dengan pengendalian kualitas bahan baku dan proses produksi yang baik, material komposit berbasis plastik berpotensi menjadi salah satu solusi inovatif dalam pengembangan material konstruksi masa depan yang lebih efisien, tahan lama, dan ramah lingkungan (Siddique et al., 2008; Gurunathan et al., 2021).

BAB 4

PEMBUATAN *ECO PAVING BLOCK*

A. Konsep dan Karakteristik *Eco Paving Block*

Eco paving block merupakan inovasi material konstruksi yang memanfaatkan limbah plastik sebagai salah satu komponen utama penyusun paving block. Berbeda dengan paving block konvensional yang menggunakan semen sebagai bahan pengikat utama, *eco paving block* memanfaatkan sifat termoplastik dari beberapa jenis plastik, seperti *Polyethylene Terephthalate* (PET), *High-Density Polyethylene* (HDPE), *Low-Density Polyethylene* (LDPE), dan *Polypropylene* (PP), yang dapat melunak ketika dipanaskan kemudian mengeras kembali setelah mengalami pendinginan. Karakteristik tersebut memungkinkan plastik berfungsi sebagai matriks atau bahan pengikat yang menyelimuti agregat sehingga terbentuk material komposit yang padat dan memiliki kekuatan mekanis yang baik (Siddique et al., 2008; Taha et al., 2018).

Konsep utama *eco paving block* tidak hanya berorientasi pada pengurangan limbah plastik, tetapi juga pada peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya dalam industri konstruksi. Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan baku memberikan nilai tambah terhadap material yang sebelumnya tidak memiliki nilai ekonomis. Dengan demikian, limbah plastik tidak lagi dipandang sebagai produk buangan, melainkan sebagai sumber

daya sekunder yang dapat dimanfaatkan kembali menjadi produk konstruksi yang memiliki umur pakai panjang.

Pada proses produksinya, limbah plastik dibersihkan, dicacah, kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu pelelehannya. Setelah berubah menjadi lelehan homogen, plastik dicampurkan dengan agregat halus atau bahan pengisi lainnya. Campuran tersebut kemudian dicetak dan dipadatkan hingga memperoleh bentuk yang diinginkan. Setelah mengalami proses pendinginan, plastik kembali mengeras dan membentuk ikatan yang kuat dengan agregat sehingga menghasilkan paving block yang siap digunakan (Gurunathan et al., 2021). Salah satu karakteristik utama *eco paving block* adalah tingkat penyerapan air yang sangat rendah. Hal ini disebabkan oleh sifat hidrofobik plastik yang tidak mudah menyerap air sehingga pori-pori material menjadi lebih sedikit dibandingkan paving block berbasis semen. Rendahnya penyerapan air memberikan keuntungan berupa meningkatnya ketahanan terhadap kelembapan, pelapukan, serta kerusakan akibat siklus basah dan kering.

Selain memiliki ketahanan terhadap air, *eco paving block* juga menunjukkan ketahanan yang baik terhadap berbagai zat kimia, seperti garam, asam ringan, maupun alkali. Plastik sebagai matriks memiliki sifat inert sehingga tidak mudah mengalami korosi maupun degradasi akibat paparan lingkungan yang agresif. Karakteristik tersebut menjadikan material ini sesuai digunakan pada lingkungan yang memiliki tingkat kelembapan tinggi maupun paparan bahan kimia tertentu. Dari aspek mekanis, kekuatan *eco paving block* dipengaruhi oleh kualitas ikatan antara matriks plastik dan agregat. Apabila proses pencampuran berlangsung homogen dan pemadatan dilakukan secara optimal,

maka material mampu menghasilkan kuat tekan yang memenuhi persyaratan mutu paving block sesuai standar yang berlaku (BSN, 1996). Selain kuat tekan, material ini juga memiliki ketangguhan benturan (*impact strength*) yang lebih baik dibandingkan material berbasis semen karena sifat polimer yang lebih lentur dan tidak mudah retak.

Karakteristik lain yang menjadi keunggulan adalah bobot produk yang relatif lebih ringan dibandingkan paving block konvensional. Massa jenis plastik yang lebih rendah dibandingkan semen menyebabkan berat keseluruhan produk menjadi lebih kecil sehingga memudahkan proses pengangkutan, penyimpanan, maupun pemasangan di lapangan. Kondisi tersebut juga dapat mengurangi beban mati (*dead load*) pada konstruksi perkerasan.

Tabel 4. 1 Karakteristik Utama *Eco Paving Block*

Karakteristik	Keterangan
Bahan pengikat	Limbah plastik termoplastik (PET, HDPE, LDPE, PP)
Penyerapan air	Sangat rendah karena sifat hidrofobik plastik
Ketahanan kimia	Tahan terhadap garam, asam ringan, dan korosi
Bobot	Lebih ringan dibanding paving block berbasis semen
Ketahanan benturan	Lebih baik karena sifat polimer yang lebih lentur
Umur pakai	Relatif panjang apabila diproduksi dengan proses yang tepat
Manfaat lingkungan	Mengurangi limbah plastik dan penggunaan bahan baku konvensional

Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan *eco paving block* sebagai salah satu alternatif material perkerasan yang tidak hanya memenuhi kebutuhan teknis, tetapi juga mendukung penerapan konstruksi berkelanjutan. Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan baku memberikan manfaat lingkungan sekaligus membuka peluang pengembangan material konstruksi yang lebih efisien dan bernilai tambah.

B. Persyaratan Material Penyusun

Keberhasilan proses pembuatan *eco paving block* sangat dipengaruhi oleh kualitas material penyusun yang digunakan. Material yang memenuhi persyaratan akan menghasilkan campuran yang homogen, mudah diproses, serta mampu membentuk ikatan yang kuat setelah mengalami proses pencetakan dan pendinginan. Sebaliknya, material yang tidak memenuhi persyaratan dapat menurunkan kualitas produk, baik dari aspek kekuatan, stabilitas dimensi, maupun ketahanannya selama masa penggunaan.

Komponen utama penyusun *eco paving block* terdiri atas limbah plastik sebagai bahan pengikat, agregat halus sebagai bahan pengisi utama, bahan pengisi tambahan (*filler*), serta bahan aditif apabila diperlukan. Masing-masing material memiliki fungsi yang berbeda sehingga kualitas setiap komponen harus diperhatikan sejak tahap persiapan. Limbah plastik yang digunakan sebaiknya berasal dari jenis plastik termoplastik yang memiliki kemampuan meleleh dan mengeras kembali tanpa mengalami perubahan sifat secara signifikan. Jenis plastik seperti PET, HDPE, LDPE, dan PP merupakan material yang umum dimanfaatkan karena memiliki stabilitas termal yang baik serta

mampu membentuk matriks yang kuat ketika dicampurkan dengan agregat (Awaja & Pavel, 2005).

Sebelum digunakan, limbah plastik harus dibersihkan dari berbagai kontaminan, seperti tanah, debu, minyak, label, perekat, maupun sisa bahan organik. Kontaminan tersebut dapat mengganggu proses pelelehan dan mengurangi kualitas ikatan antara plastik dengan agregat. Setelah dibersihkan, plastik dikeringkan untuk menghilangkan kadar air yang dapat menyebabkan terbentuknya rongga udara (*void*) selama proses pencampuran. Ukuran cacahan plastik juga perlu diperhatikan. Potongan plastik yang terlalu besar memerlukan waktu pelelehan lebih lama dan berpotensi menghasilkan campuran yang tidak homogen. Sebaliknya, ukuran yang terlalu kecil dapat mempercepat degradasi apabila suhu pemanasan tidak dikendalikan dengan baik. Oleh karena itu, ukuran cacahan yang seragam akan mempermudah proses pelelehan dan pencampuran.

Agregat halus umumnya berupa pasir yang memiliki gradasi baik, bersih, serta bebas dari lumpur maupun bahan organik. Agregat berfungsi sebagai rangka utama yang menerima beban tekan, sedangkan plastik berfungsi mengikat butiran agregat tersebut. Pasir dengan distribusi ukuran butiran yang seimbang akan menghasilkan kepadatan campuran yang lebih tinggi sehingga rongga antarbutir menjadi lebih sedikit. Selain pasir, beberapa formulasi *eco paving block* juga memanfaatkan bahan pengisi (*filler*) seperti abu batu, serbuk batu, atau material mineral halus lainnya. Fungsi *filler* adalah mengisi ruang kosong di antara agregat sehingga struktur material menjadi lebih rapat dan meningkatkan kekuatan mekanis produk.

Dalam beberapa formulasi tertentu, bahan aditif juga dapat ditambahkan untuk meningkatkan karakteristik produk. Penambahan aditif disesuaikan dengan tujuan penggunaan, misalnya meningkatkan stabilitas termal, memperbaiki proses pencampuran, atau meningkatkan ketahanan terhadap sinar ultraviolet. Namun, penggunaan bahan tambahan harus tetap mempertimbangkan kompatibilitasnya dengan matriks plastik agar tidak menurunkan mutu produk akhir.

Tabel 4. 2 Persyaratan Material Penyusun *Eco Paving Block*

Material	Persyaratan Utama	Fungsi
Limbah plastik	Bersih, kering, dipilah berdasarkan jenis, mudah dilelehkan	Bahan pengikat (<i>binder</i>)
Agregat halus	Bersih, gradasi baik, bebas lumpur	Menahan beban dan membentuk struktur
<i>Filler</i>	Berukuran halus, kering, homogen	Mengurangi rongga dan meningkatkan kepadatan
Bahan aditif	Stabil dan kompatibel dengan plastik	Memperbaiki sifat tertentu sesuai kebutuhan

Selain kualitas material, penyimpanan bahan baku juga perlu diperhatikan. Plastik sebaiknya disimpan pada tempat yang kering dan terlindung dari paparan sinar matahari secara langsung untuk menghindari degradasi akibat radiasi ultraviolet. Agregat juga harus ditempatkan pada area yang terlindung dari air hujan agar kadar airnya tetap stabil sebelum digunakan dalam proses produksi. Dengan memenuhi seluruh persyaratan tersebut, proses pembuatan *eco paving block* dapat berlangsung lebih efektif, menghasilkan campuran yang homogen, serta

memberikan produk dengan kualitas yang lebih konsisten. Kualitas bahan baku merupakan fondasi utama yang menentukan keberhasilan setiap tahapan produksi berikutnya, mulai dari proses pelelehan hingga produk siap digunakan sebagai material konstruksi.

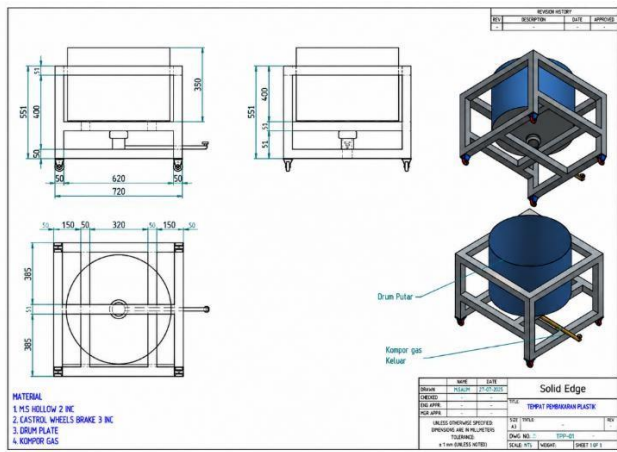
C. Peralatan Produksi

Produksi *eco paving block* memerlukan peralatan yang mampu mendukung setiap tahapan proses, mulai dari persiapan bahan baku hingga produk siap digunakan. Pemilihan peralatan yang sesuai akan memengaruhi efisiensi proses, kualitas produk, keamanan kerja, serta konsistensi dimensi dan kekuatan paving block yang dihasilkan. Pada skala produksi kecil maupun industri, prinsip dasar peralatan yang digunakan relatif sama, yaitu menyiapkan bahan, melelehkan plastik, mencampurkan material, membentuk produk, dan melakukan pemadatan.

Tahap awal diawali dengan proses persiapan limbah plastik. Plastik yang telah dipilah dibersihkan kemudian dipotong menjadi ukuran yang lebih kecil menggunakan mesin pencacah (*plastic shredder*). Pencacahan bertujuan mempercepat proses pelelehan karena luas permukaan plastik menjadi lebih besar sehingga panas dapat merata ke seluruh bagian material. Selain mempercepat pelelehan, ukuran cacahan yang seragam juga menghasilkan campuran yang lebih homogen.

Setelah proses pencacahan, limbah plastik dilelehkan menggunakan tungku pemanas (*melting furnace*) atau reaktor peleleh yang mampu mempertahankan suhu sesuai titik leleh masing-masing jenis plastik. Pengendalian suhu menjadi aspek penting karena suhu yang terlalu rendah menyebabkan plastik tidak meleleh sempurna, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat

menyebabkan degradasi termal yang menurunkan kualitas matriks plastik serta menghasilkan asap yang tidak diinginkan (Awaja & Pavel, 2005).



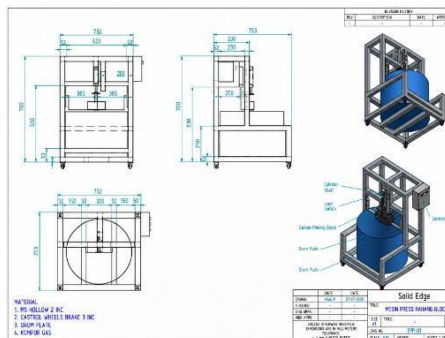
Gambar 4. 1 Alat Pembakaran Paving Blok

Pada tahap pencampuran digunakan wadah pencampur yang tahan panas dan dilengkapi alat pengaduk mekanis apabila kapasitas produksi cukup besar. Pengadukan yang merata memungkinkan seluruh permukaan agregat terselimuti oleh lelehan plastik sehingga terbentuk komposit dengan distribusi matriks yang seragam. Campuran yang homogen akan menghasilkan kekuatan mekanis yang lebih baik dibandingkan campuran yang masih mengandung gumpalan plastik.

Setelah pencampuran selesai, material dimasukkan ke dalam cetakan (*mold*) yang umumnya terbuat dari baja karena memiliki kekuatan tinggi serta mampu menahan temperatur campuran yang masih panas. Cetakan menentukan bentuk, ukuran, dan ketelitian dimensi produk sehingga harus dibuat

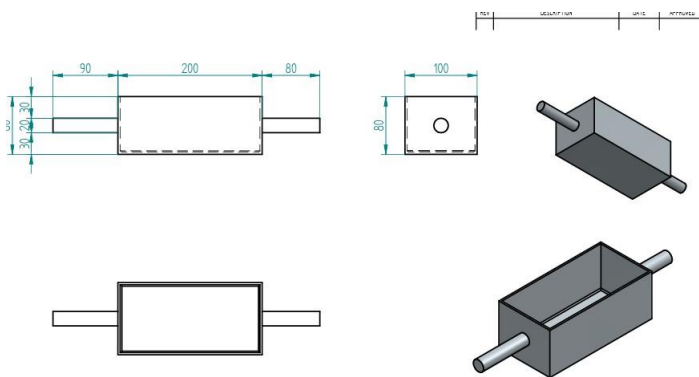
dengan presisi agar setiap paving block memiliki ukuran yang seragam.

Tahap berikutnya menggunakan mesin press hidrolik atau mesin press mekanis untuk memberikan tekanan pada campuran di dalam cetakan. Pemadatan bertujuan mengurangi rongga udara, meningkatkan kepadatan material, serta memperkuat ikatan antara plastik dan agregat. Semakin baik proses pemadatan, semakin tinggi pula kualitas fisik dan mekanis paving block yang dihasilkan (Taha et al., 2018).



Gambar 4. 2 Mesin Press *Paving Blok*

Setelah proses pencetakan selesai, produk didinginkan hingga plastik kembali mengeras. Pendinginan dapat dilakukan secara alami pada suhu ruang atau menggunakan media pendingin yang dikendalikan sesuai kebutuhan produksi. Tahap ini menentukan stabilitas dimensi produk sebelum dikeluarkan dari cetakan.



Gambar 4.3 Cetakan Eco Paving Blok

Selain peralatan utama, proses produksi juga memerlukan berbagai peralatan pendukung seperti timbangan digital untuk memastikan komposisi campuran tetap konsisten, termometer atau *temperature controller* untuk mengontrol suhu pelelehan, sekop logam, wadah pencampur, alat ukur dimensi, serta alat pelindung diri (*Personal Protective Equipment/PPE*) bagi operator.

Tabel 4.3 Peralatan Utama Produksi Eco Paving Block

Peralatan	Fungsi
Mesin pencacah (<i>plastic shredder</i>)	Memperkecil ukuran limbah plastik
Tungku peleleh (<i>melting furnace</i>)	Melelehkan plastik pada suhu tertentu

Peralatan	Fungsi
Wadah pencampur	Mencampurkan plastik cair dan agregat
Pengaduk mekanis	Menghasilkan campuran homogen
Cetakan baja (<i>steel mold</i>)	Membentuk dimensi paving block
Mesin press hidrolik	Memadatkan campuran
Timbangan digital	Mengontrol komposisi material
Termometer/ <i>temperature controller</i>	Mengendalikan suhu pelelehan
Alat ukur dimensi	Memeriksa ukuran produk
<i>Personal Protective Equipment</i> (PPE)	Melindungi operator selama produksi

Penggunaan peralatan yang tepat tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga menghasilkan *eco paving block* dengan kualitas yang lebih konsisten. Oleh karena itu, setiap peralatan harus dipelihara secara berkala agar tetap bekerja dengan optimal dan menghasilkan produk yang memenuhi spesifikasi teknis.

D. Tahapan Pembuatan *Eco Paving Block*

Proses pembuatan *eco paving block* merupakan rangkaian kegiatan yang saling berkaitan. Setiap tahapan memiliki pengaruh langsung terhadap kualitas produk akhir sehingga harus dilakukan secara sistematis. Kesalahan pada satu tahap dapat menyebabkan penurunan kekuatan, munculnya rongga, perubahan dimensi, maupun cacat permukaan. Oleh karena itu,

setiap proses memerlukan pengendalian mutu yang baik mulai dari persiapan bahan hingga penyimpanan produk.

1. Persiapan Bahan

Tahapan pertama adalah mempersiapkan seluruh bahan baku yang akan digunakan. Limbah plastik dipilah berdasarkan jenis resin agar memiliki karakteristik pelelehan yang seragam. Selanjutnya plastik dibersihkan dari berbagai kotoran, seperti label, logam, tanah, minyak, maupun sisa bahan organik. Setelah bersih, plastik dikeringkan dan dicacah menjadi potongan berukuran relatif seragam sehingga proses pelelehan berlangsung lebih cepat dan merata. Pada saat yang sama, agregat halus seperti pasir juga harus dipersiapkan dengan baik. Pasir diayak apabila diperlukan untuk memperoleh gradasi yang seragam dan dikeringkan agar kadar airnya rendah. Agregat yang bersih akan menghasilkan ikatan yang lebih baik dengan matriks plastik.

2. Pelelehan Plastik

Plastik yang telah dicacah dimasukkan ke dalam tungku peleleh kemudian dipanaskan hingga mencapai suhu lelehnya. Suhu pelelehan disesuaikan dengan jenis plastik yang digunakan sehingga diperoleh lelehan yang homogen tanpa mengalami degradasi termal. Selama proses ini operator harus mengontrol temperatur secara terus-menerus agar kualitas plastik tetap terjaga (Awaja & Pavel, 2005).



Gambar 4. 4 Proses Pelelehan Plastik

3. Pencampuran Material

Setelah plastik berubah menjadi cairan homogen, agregat halus dimasukkan secara bertahap sambil dilakukan pengadukan. Tujuan pencampuran adalah memastikan seluruh butiran agregat terselimuti oleh matriks plastik secara merata. Campuran yang homogen akan menghasilkan distribusi beban yang lebih baik sehingga meningkatkan kuat tekan dan ketahanan produk. Apabila digunakan *filler* atau bahan tambahan lainnya, material tersebut dimasukkan sesuai urutan yang telah ditentukan agar seluruh komponen dapat tercampur secara merata.



Gambar 4. 5 Proses Pencampuran Material

4. Pencetakan

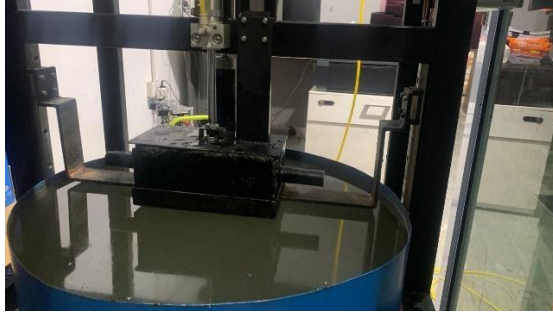
Campuran yang masih berada dalam kondisi plastis segera dipindahkan ke dalam cetakan baja. Pengisian cetakan harus dilakukan secara merata agar seluruh bagian cetakan terisi penuh tanpa menyisakan rongga udara. Ketelitian pada tahap ini akan menentukan keseragaman dimensi produk.



Gambar 4. 6 Proses Pencetakan *Eco Paving Blok*

5. Pemadatan

Setelah cetakan terisi penuh, dilakukan proses pemadatan menggunakan mesin press hidrolik atau alat pemadat mekanis. Tekanan yang diberikan bertujuan mengurangi rongga udara, meningkatkan kepadatan material, dan memperkuat ikatan antara plastik dengan agregat. Tahap ini merupakan salah satu faktor utama yang menentukan kuat tekan *eco paving block* (Taha et al., 2018).



Gambar 4. 7 Proses Pemadatan Eco Paving Blok menggunakan Mesin Press

6. Pendinginan

Produk yang telah dipadatkan dibiarkan mengalami pendinginan hingga plastik kembali mengeras. Pendinginan dilakukan secara bertahap agar perubahan temperatur tidak terlalu drastis sehingga mengurangi risiko retak akibat tegangan termal. Setelah suhu produk stabil, paving block dapat dilepaskan dari cetakan.

7. Penyimpanan Produk

Tahap terakhir adalah penyimpanan produk pada tempat yang bersih, rata, dan terlindung dari panas berlebih maupun benturan. Penyusunan dilakukan secara rapi agar tidak terjadi deformasi selama proses penyimpanan. Sebelum digunakan, setiap produk sebaiknya melalui pemeriksaan visual dan pengujian mutu sesuai spesifikasi yang ditetapkan.

Penerapan tahapan produksi secara sistematis menghasilkan *eco paving block* yang memiliki dimensi seragam, ikatan antarpartikel yang kuat, daya serap air rendah, serta kekuatan mekanis yang sesuai dengan persyaratan mutu. Oleh karena itu, setiap tahapan harus dilaksanakan secara konsisten dengan pengendalian proses yang baik agar kualitas produk tetap stabil pada setiap siklus produksi.

E. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Kualitas Produk

Kualitas *eco paving block* tidak hanya ditentukan oleh jenis bahan baku yang digunakan, tetapi juga dipengaruhi oleh seluruh tahapan proses produksi. Hubungan antara material, proses, dan pengendalian mutu sangat menentukan karakteristik fisik maupun mekanis produk akhir. Apabila salah satu faktor tidak dikendalikan dengan baik, kualitas paving block dapat menurun, seperti berkurangnya kuat tekan, munculnya retakan, meningkatkan porositas, atau berubahnya dimensi produk.

1. Faktor pertama yang sangat menentukan adalah kualitas limbah plastik. Limbah plastik yang digunakan sebaiknya berasal dari jenis resin yang sama atau memiliki karakteristik pelelehan yang serupa. Pencampuran berbagai jenis plastik dengan titik leleh yang berbeda dapat menyebabkan proses pelelehan berlangsung tidak merata sehingga menghasilkan ikatan yang kurang sempurna antara plastik dan agregat. Selain itu, limbah plastik harus bebas dari kotoran, minyak, logam, maupun bahan organik karena kontaminan dapat mengganggu proses pencampuran serta menurunkan kualitas produk (Awaja & Pavel, 2005).
2. Faktor berikutnya adalah kualitas agregat halus. Agregat berfungsi sebagai rangka utama yang menerima beban tekan sehingga kebersihan, ukuran butiran, dan distribusi gradasinya harus diperhatikan. Pasir yang mengandung lumpur atau bahan organik dapat mengurangi daya lekat antara matriks plastik dengan agregat. Sebaliknya, agregat yang memiliki gradasi baik mampu menghasilkan susunan

butiran yang lebih rapat sehingga meningkatkan kepadatan material.

3. Komposisi campuran juga menjadi faktor yang sangat penting. Rasio antara plastik dan agregat harus disesuaikan dengan karakteristik produk yang diinginkan. Apabila jumlah plastik terlalu sedikit, ikatan antarbutiran agregat menjadi lemah sehingga kuat tekan menurun. Sebaliknya, apabila plastik digunakan secara berlebihan, material menjadi lebih lunak dan dapat mengalami deformasi ketika menerima beban. Oleh karena itu, penentuan komposisi campuran harus dilakukan secara konsisten agar kualitas produk tetap seragam.
4. Selain komposisi material, suhu pelelehan merupakan parameter yang harus dikendalikan dengan baik. Setiap jenis plastik memiliki rentang suhu pelelehan yang berbeda. Pemanasan yang terlalu rendah menyebabkan plastik tidak meleleh sempurna sehingga pencampuran menjadi tidak homogen. Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi termal yang mengurangi sifat mekanis plastik serta menghasilkan asap yang tidak diinginkan (Siddique et al., 2008).
5. Homogenitas pencampuran turut menentukan kualitas *eco paving block*. Campuran yang diaduk secara merata akan menghasilkan distribusi plastik yang menyelimuti seluruh permukaan agregat. Sebaliknya, pencampuran yang kurang sempurna akan menghasilkan bagian tertentu yang kaya plastik maupun bagian yang kekurangan plastik sehingga kekuatan produk menjadi tidak merata.

6. Faktor berikutnya adalah tekanan pemadatan. Proses pemadatan bertujuan mengurangi rongga udara (*void*) di dalam campuran. Tekanan yang memadai akan meningkatkan kepadatan material sehingga kuat tekan dan ketahanan aus produk menjadi lebih baik. Sebaliknya, tekanan yang terlalu rendah menyebabkan banyak rongga yang tersisa sehingga produk menjadi lebih rapuh dan mudah menyerap air (Taha et al., 2018).
7. Proses pendinginan juga memengaruhi kualitas produk akhir. Pendinginan yang berlangsung secara bertahap memungkinkan matriks plastik mengeras secara merata sehingga mengurangi risiko terjadinya retak akibat perubahan temperatur yang terlalu cepat. Pendinginan yang terlalu cepat dapat menimbulkan tegangan termal yang menyebabkan deformasi maupun keretakan pada permukaan produk.
8. Faktor lain yang tidak kalah penting adalah pengendalian mutu selama produksi. Pemeriksaan terhadap dimensi, berat, penampilan permukaan, serta kondisi cetakan perlu dilakukan secara berkala agar setiap produk memiliki kualitas yang konsisten. Pengujian kuat tekan, penyerapan air, dan ketahanan aus juga menjadi bagian penting dalam memastikan bahwa produk memenuhi persyaratan teknis yang berlaku.

Dengan mengendalikan seluruh faktor tersebut secara konsisten, *eco paving block* dapat diproduksi dengan mutu yang stabil, memiliki daya tahan tinggi, serta memenuhi kebutuhan sebagai material perkerasan yang ramah lingkungan.

F. Keselamatan dan Kesehatan Kerja dalam Produksi

Produksi *eco paving block* melibatkan berbagai aktivitas yang berpotensi menimbulkan risiko terhadap keselamatan dan kesehatan pekerja. Risiko tersebut berasal dari penggunaan suhu tinggi, peralatan mekanis, material yang memiliki permukaan tajam, serta proses pemadatan yang menggunakan tekanan besar. Oleh karena itu, penerapan keselamatan dan kesehatan kerja (*Occupational Safety and Health*) merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari proses produksi.

Tahap yang memiliki potensi bahaya paling tinggi adalah proses pelelehan plastik. Pada tahap ini material dipanaskan hingga mencapai suhu tertentu sehingga terdapat risiko terkena panas, percikan plastik cair, maupun paparan asap apabila suhu tidak dikendalikan dengan baik. Oleh sebab itu, operator harus memastikan bahwa proses pelelehan berlangsung pada rentang suhu yang sesuai dengan karakteristik plastik yang digunakan agar tidak terjadi degradasi material maupun pembentukan asap yang berlebihan.

Seluruh pekerja harus menggunakan alat pelindung diri (*Personal Protective Equipment/PPE*) sesuai dengan jenis pekerjaan yang dilakukan. Sarung tangan tahan panas digunakan untuk melindungi tangan dari kontak langsung dengan peralatan maupun plastik cair. Kacamata pelindung atau *face shield* berfungsi melindungi mata dari percikan material panas. Masker digunakan untuk mengurangi paparan partikel debu maupun uap selama proses produksi, sedangkan sepatu keselamatan membantu melindungi kaki dari benda berat maupun permukaan yang panas.

Lingkungan kerja juga harus memiliki sistem ventilasi yang baik agar sirkulasi udara tetap lancar selama proses pelelehan plastik berlangsung. Ventilasi yang memadai membantu mengurangi akumulasi panas dan menjaga kenyamanan pekerja. Pada fasilitas produksi berskala lebih besar, sistem ventilasi mekanis atau *exhaust system* sering digunakan untuk mempercepat pembuangan udara panas dari area kerja. Aspek keselamatan berikutnya berkaitan dengan penggunaan mesin produksi. Mesin pencacah, mesin press, dan peralatan mekanis lainnya harus dilengkapi pelindung (*machine guard*) untuk mencegah kontak langsung antara operator dan bagian mesin yang bergerak. Sebelum mesin dioperasikan, seluruh komponen perlu diperiksa untuk memastikan tidak terdapat kerusakan yang dapat menimbulkan kecelakaan kerja.

Area kerja juga harus dijaga agar tetap bersih dan tertata. Tumpukan material yang tidak teratur dapat menghambat pergerakan pekerja serta meningkatkan risiko terpeleset atau tersandung. Jalur perpindahan material sebaiknya dirancang agar tidak saling bersinggungan dengan area kerja operator sehingga aktivitas produksi dapat berlangsung lebih aman dan efisien. Setiap pekerja perlu memperoleh pelatihan mengenai prosedur pengoperasian mesin, penggunaan alat pelindung diri, penanganan keadaan darurat, serta teknik pertolongan pertama. Pengetahuan tersebut membantu pekerja mengenali potensi bahaya sejak dini dan mengambil tindakan yang tepat apabila terjadi kondisi darurat.

Selain keselamatan pekerja, aspek kesehatan kerja juga harus diperhatikan melalui pengaturan waktu kerja yang seimbang, penyediaan area istirahat, serta pemeriksaan kondisi peralatan secara berkala. Lingkungan kerja yang nyaman akan

meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi risiko kelelahan yang dapat menyebabkan kesalahan dalam proses produksi.

Tabel 4. 4 Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja pada Produksi *Eco Paving Block*

Aspek	Penerapan
Alat pelindung diri	Sarung tangan tahan panas, masker, <i>face shield</i> , sepatu keselamatan
Pengendalian suhu	Menghindari pelelehan berlebihan dan degradasi plastik
Ventilasi	Menjaga kualitas udara dan mengurangi panas
Keamanan mesin	Pemeriksaan rutin dan penggunaan pelindung mesin
Kebersihan area kerja	Mengurangi risiko kecelakaan kerja
Pelatihan pekerja	Pengoperasian mesin dan prosedur keadaan darurat
Pengendalian mutu	Pemeriksaan berkala terhadap proses dan peralatan

Penerapan keselamatan dan kesehatan kerja secara konsisten memberikan manfaat yang besar bagi seluruh proses produksi. Selain melindungi pekerja dari risiko kecelakaan, lingkungan kerja yang aman mampu meningkatkan efisiensi, menjaga kualitas produk, memperpanjang umur peralatan, serta mendukung keberlanjutan proses produksi *eco paving block* sebagai material konstruksi yang ramah lingkungan.

BAB 5

PENGENDALIAN MUTU *ECO* *PAVING BLOCK*

A. Standar Mutu *Paving Block*

Pengendalian mutu merupakan bagian yang tidak dapat dipisahkan dari proses produksi *eco paving block*. Tujuan utama pengendalian mutu adalah memastikan setiap produk memiliki karakteristik fisik dan mekanis yang sesuai dengan persyaratan teknis sehingga aman, awet, dan mampu digunakan sesuai fungsi perkerasannya. Pada *eco paving block* berbahan limbah plastik, pengendalian mutu menjadi semakin penting karena material penyusunnya berasal dari bahan daur ulang yang memiliki karakteristik lebih bervariasi dibandingkan material konvensional. Oleh karena itu, setiap tahapan produksi, mulai dari pemilihan bahan baku hingga pengujian produk akhir, perlu dilakukan secara konsisten agar kualitas produk tetap terjaga (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 1996; Siddique et al., 2008).

Standar mutu berfungsi sebagai acuan untuk menilai apakah suatu produk telah memenuhi persyaratan teknis tertentu. Dengan adanya standar, produsen dapat menjaga keseragaman kualitas produk, sedangkan pengguna memperoleh jaminan bahwa material yang digunakan memiliki tingkat keamanan dan ketahanan yang memadai. Selain itu, standar mutu juga

memudahkan proses evaluasi apabila terjadi penurunan kualitas selama proses produksi maupun penggunaan.

Hingga saat ini belum terdapat Standar Nasional Indonesia (SNI) yang secara khusus mengatur *eco paving block* berbahan limbah plastik. Oleh karena itu, pengujian mutu umumnya masih mengacu pada SNI 03-0691-1996 tentang Bata Beton (*Paving Block*). Meskipun standar tersebut disusun untuk paving block berbasis semen, parameter pengujiannya masih relevan digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kualitas *eco paving block*, terutama pada aspek kuat tekan, daya serap air, ketahanan aus, serta keseragaman dimensi (BSN, 1996).

Standar tersebut membagi mutu paving block ke dalam beberapa kelas berdasarkan kemampuan material menahan beban tekan. Semakin tinggi nilai kuat tekan yang dimiliki, semakin berat pula jenis beban yang dapat ditahan. Pengelompokan mutu ini memudahkan penentuan lokasi penggunaan paving block sehingga material yang dipasang sesuai dengan kebutuhan lapangan.

Tabel 5. 1 Klasifikasi Mutu Paving Block Berdasarkan SNI 03-0691-1996

Mutu	Kuat Tekan Minimum	Penggunaan
A	≥ 40 MPa	Jalan dengan lalu lintas berat
B	≥ 20 MPa	Area parkir kendaraan
C	≥ 15 MPa	Trotoar dan jalur pejalan kaki
D	≥ 10 MPa	Taman dan area dengan beban ringan

Selain kuat tekan, standar juga menetapkan batas maksimum penyerapan air. Nilai penyerapan air yang rendah menunjukkan bahwa struktur material memiliki porositas kecil sehingga lebih tahan terhadap kelembapan, pelapukan, maupun perubahan cuaca. Pada *eco paving block*, karakteristik ini umumnya diperoleh dari sifat plastik yang bersifat hidrofobik sehingga mampu mengurangi masuknya air ke dalam struktur material (Taha et al., 2018). Pengendalian mutu tidak hanya dilakukan setelah produk selesai dibuat, tetapi juga sejak tahap pemilihan bahan baku. Pasir harus memiliki gradasi yang baik, bersih dari lumpur dan bahan organik, sedangkan limbah plastik harus dipilah berdasarkan jenis resin agar proses pelelehan berlangsung merata. Keceragaman bahan baku akan menghasilkan campuran yang homogen sehingga kualitas produk lebih konsisten.

Dalam praktik produksi, standar mutu juga menjadi dasar dalam melakukan pengawasan proses. Suhu pelelehan plastik, waktu pencampuran, tekanan pemadatan, serta proses pendinginan harus dikendalikan agar tidak menimbulkan rongga udara (*void*), segregasi material, maupun cacat permukaan yang dapat menurunkan kekuatan produk. Dengan demikian, standar mutu bukan hanya menjadi acuan pada tahap pengujian akhir, tetapi juga menjadi pedoman dalam seluruh proses produksi. Penerapan standar mutu secara konsisten memberikan berbagai manfaat, antara lain meningkatkan keandalan produk, memperpanjang umur layanan, mengurangi risiko kerusakan dini, serta meningkatkan kepercayaan pengguna terhadap *eco paving block* sebagai material konstruksi berkelanjutan. Standar mutu juga menjadi dasar dalam pengembangan teknologi produksi sehingga kualitas produk dapat terus ditingkatkan seiring berkembangnya inovasi material berbahan limbah plastik.

B. Karakteristik Material Penyusun *Eco Paving Block*

Sebelum diproses menjadi *eco paving block*, seluruh material penyusun harus dipastikan memenuhi persyaratan kualitas tertentu. Pengujian material bertujuan mengetahui karakteristik agregat dan bahan penyusun sehingga campuran yang dihasilkan memiliki sifat fisik dan mekanis yang seragam. Material yang tidak memenuhi persyaratan dapat menyebabkan penurunan kuat tekan, meningkatnya porositas, hingga berkurangnya daya tahan produk terhadap lingkungan. Pada *eco paving block* berbahan limbah plastik, agregat halus merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai pengisi (*filler*) sekaligus penahan beban, sedangkan plastik berfungsi sebagai bahan pengikat (*binder*). Oleh karena itu, kualitas agregat menjadi salah satu faktor yang sangat menentukan keberhasilan proses produksi.

1. Analisis Saringan

Analisis saringan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran agregat (*grading*). Pengujian ini bertujuan memastikan agregat memiliki gradasi yang baik sehingga rongga antarbutir menjadi lebih sedikit dan plastik cair mampu mengisi celah secara optimal. Agregat dengan ukuran butiran yang beragam akan menghasilkan kepadatan lebih tinggi dibandingkan agregat yang memiliki ukuran seragam. Kepadatan yang baik akan meningkatkan kuat tekan sekaligus mengurangi daya serap air pada produk akhir. Sebaliknya, apabila gradasi agregat kurang baik, akan terbentuk banyak rongga sehingga kekuatan material menjadi lebih rendah. Proses analisis dilakukan menggunakan satu set ayakan (*sieve*) dengan ukuran bertingkat. Sampel agregat digetarkan sehingga butiran akan tertahan sesuai ukuran masing-

masing. Persentase agregat yang tertahan pada setiap ayakan kemudian dihitung untuk mengetahui kurva gradasinya.

Tabel 5. 2 Tujuan Analisis Saringan

Parameter	Fungsi
Distribusi ukuran butir	Menentukan gradasi agregat
Kepadatan campuran	Mengurangi rongga udara
Homogenitas campuran	Meningkatkan kualitas produk
Efisiensi penggunaan plastik	Membantu penyelimutan agregat secara merata

2. Kadar Air

Kadar air merupakan jumlah air yang masih terkandung di dalam agregat sebelum proses pencampuran. Pengujian ini penting karena air yang berlebihan dapat mengganggu proses pelelehan plastik dan menyebabkan terbentuknya gelembung udara di dalam campuran. Pengukuran kadar air dilakukan dengan membandingkan berat agregat sebelum dan sesudah dikeringkan menggunakan oven pada suhu tertentu hingga mencapai berat konstan. Selisih kedua nilai tersebut menunjukkan kadar air agregat. Agregat dengan kadar air rendah akan menghasilkan pencampuran yang lebih baik karena plastik cair dapat melapisi seluruh permukaan agregat secara merata. Sebaliknya, agregat yang masih basah dapat menghasilkan rongga (*void*), menurunkan kepadatan, serta mengurangi kekuatan mekanis *eco paving block*.

3. Berat Jenis

Berat jenis (*specific gravity*) menunjukkan perbandingan massa agregat terhadap massa air pada volume yang sama. Nilai ini digunakan untuk menghitung proporsi campuran serta memperkirakan kepadatan material yang akan dihasilkan. Semakin tinggi berat jenis agregat, umumnya semakin tinggi pula kepadatan campuran yang dapat dicapai. Informasi ini sangat membantu dalam menentukan komposisi plastik dan agregat sehingga produk memiliki kekuatan yang optimal tanpa menggunakan plastik secara berlebihan. Pengujian berat jenis biasanya dilakukan menggunakan piknometer atau metode lain yang sesuai dengan standar pengujian agregat.

4. Kebersihan Agregat

Kebersihan agregat menjadi salah satu syarat penting dalam menghasilkan *eco paving block* berkualitas. Agregat yang tercampur lumpur, tanah, debu, atau bahan organik akan menghambat proses perlekatan antara plastik cair dengan permukaan butiran agregat. Material pengotor juga dapat meningkatkan porositas campuran sehingga kekuatan produk menjadi lebih rendah. Oleh sebab itu, agregat perlu dicuci dan dikeringkan sebelum digunakan dalam proses produksi. Pemeriksaan kebersihan dilakukan secara visual maupun melalui pengujian kadar lumpur apabila diperlukan. Agregat yang memenuhi persyaratan akan menghasilkan ikatan yang lebih baik dengan plastik sehingga struktur material menjadi lebih padat, homogen, dan memiliki daya tahan yang lebih tinggi.

Pengujian material penyusun merupakan tahap awal dalam sistem pengendalian mutu *eco paving block*. Analisis saringan, kadar air, berat jenis, dan kebersihan agregat saling melengkapi

dalam memastikan bahwa bahan baku yang digunakan mampu menghasilkan produk dengan kualitas yang konsisten. Melalui pengendalian material sejak awal, potensi cacat produksi dapat dikurangi, efisiensi penggunaan bahan meningkat, serta mutu *eco paving block* dapat dipertahankan sesuai standar teknis yang berlaku (BSN, 1996; Taha et al., 2018; Siddique et al., 2008).

C. Karakteristik Teknis *Eco Paving Block*

Setelah proses produksi selesai, *eco paving block* perlu melalui serangkaian pengujian produk untuk memastikan bahwa material telah memenuhi persyaratan mutu yang diharapkan. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi kemampuan produk dalam menahan berbagai kondisi pembebanan dan pengaruh lingkungan selama masa penggunaannya. Hasil pengujian menjadi dasar untuk menentukan kelayakan *eco paving block* sebagai material perkerasan sekaligus sebagai bahan evaluasi dalam meningkatkan kualitas proses produksi. Pada *eco paving block* berbahan limbah plastik, parameter yang umum digunakan meliputi kuat tekan, daya serap air, ketahanan aus, ketahanan benturan, dan ketahanan terhadap cuaca. Masing-masing parameter memberikan informasi mengenai kemampuan material dalam menahan beban, mempertahankan bentuk, serta menjaga kinerja selama masa pemakaian (BSN, 1996; Siddique et al., 2008; Taha et al., 2018).

1. Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan salah satu parameter utama dalam menilai mutu *eco paving block*. Parameter ini menunjukkan kemampuan material menahan beban tekan hingga mencapai batas kerusakan sehingga menjadi indikator penting dalam menentukan kesesuaian produk untuk berbagai jenis perkerasan (BSN, 1996).

Pengujian kuat tekan umumnya dilakukan menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). Sebelum pengujian, benda uji diperiksa untuk memastikan kondisinya baik serta diukur dimensinya guna memperoleh luas bidang tekan. Selanjutnya, beban diberikan secara bertahap hingga benda uji mengalami kerusakan. Beban maksimum yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung nilai kuat tekan.

Persamaan kuat tekan adalah sebagai berikut.

$$f_c = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

- F_c = kuat tekan (MPa)
- P = beban maksimum (N)
- A = luas bidang tekan (mm^2)

Secara umum, nilai kuat tekan dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain komposisi campuran, kualitas agregat, karakteristik plastik sebagai bahan pengikat, homogenitas pencampuran, tingkat kepadatan material, serta proses pencetakan dan pendinginan. Struktur internal yang lebih rapat dengan ikatan yang baik antara plastik dan agregat umumnya menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi karena mampu mendistribusikan beban secara lebih merata.

Dalam penerapannya, nilai kuat tekan *eco paving block* perlu disesuaikan dengan persyaratan yang ditetapkan dalam standar yang berlaku, seperti SNI 03-0691-1996, agar produk memenuhi klasifikasi mutu sesuai dengan peruntukannya (BSN, 1996).

2. Daya Serap Air



Gambar 5. 1 Ilustrasi Daya Serap *Eco Paving Block*

Daya serap air menunjukkan kemampuan *eco paving block* menyerap air setelah direndam dalam jangka waktu tertentu. Parameter ini berkaitan erat dengan porositas material karena semakin kecil jumlah air yang diserap, semakin rapat struktur internal yang dimiliki. Pengujian dilakukan dengan menimbang berat kering benda uji, kemudian merendamnya di dalam air selama periode tertentu. Setelah perendaman selesai, benda uji ditimbang kembali untuk memperoleh berat basah. Selisih kedua nilai tersebut digunakan untuk menghitung persentase penyerapan air.

Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\text{Penyerapan Air} = \frac{A - B}{B} \times 100\%$$

Keterangan:

- A = berat basah
- B = berat kering

Besarnya daya serap air dipengaruhi oleh tingkat kepadatan material, jumlah pori yang terbentuk, homogenitas pencampuran, serta kemampuan plastik melapisi agregat. Karena plastik memiliki sifat hidrofobik, keberadaannya dapat membantu mengurangi jumlah pori terbuka sehingga air lebih sulit memasuki struktur material. Daya serap air yang rendah memberikan berbagai keuntungan, antara lain meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan, mengurangi potensi pelapukan, menghambat pertumbuhan lumut, serta memperpanjang umur layanan material. Oleh karena itu, parameter ini menjadi salah satu indikator penting dalam menilai kualitas *eco paving block* sesuai dengan ketentuan SNI 03-0691-1996 (BSN, 1996).

3. Ketahanan Aus

Ketahanan aus menggambarkan kemampuan permukaan *eco paving block* dalam menahan gesekan yang terjadi akibat aktivitas pejalan kaki maupun lalu lintas kendaraan. Semakin tinggi ketahanan aus suatu material, semakin kecil tingkat keausan yang terjadi sehingga umur pakainya menjadi lebih panjang. Pengujian ketahanan aus dilakukan menggunakan alat uji abrasi dengan memberikan gaya gesek pada permukaan benda uji sesuai prosedur yang berlaku. Setelah pengujian selesai, kehilangan ketebalan atau massa material diukur untuk mengetahui tingkat keausannya. Ketahanan aus dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kepadatan struktur material; kualitas agregat; homogenitas pencampuran; kekuatan ikatan antara plastik dan agregat; serta kualitas proses pencetakan. Material yang memiliki struktur lebih padat umumnya menunjukkan ketahanan aus yang lebih baik karena partikel agregat terikat secara kuat oleh matriks plastik sehingga tidak mudah terlepas akibat gesekan (Siddique et al., 2008).

4. Ketahanan Benturan

Ketahanan benturan merupakan kemampuan *eco paving block* menerima beban kejut tanpa mengalami retak maupun pecah. Parameter ini penting untuk mengetahui kemampuan material dalam menghadapi benturan yang dapat terjadi selama proses penggunaan. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban benturan pada benda uji sesuai metode yang digunakan. Hasil pengujian menunjukkan tingkat ketahanan material terhadap energi benturan yang diterima.

Kemampuan material dalam menahan benturan dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya:

- a. sifat mekanis plastik sebagai bahan pengikat;
- b. kualitas ikatan antara plastik dan agregat;
- c. homogenitas campuran; dan
- d. kepadatan struktur internal.

Plastik pada umumnya memiliki sifat yang lebih ulet (*ductile*) dibandingkan material yang bersifat getas sehingga mampu menyerap sebagian energi benturan dan membantu mengurangi konsentrasi tegangan pada material. Karakteristik tersebut berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan *eco paving block* terhadap kerusakan akibat beban kejut (Callister & Rethwisch, 2020).

5. Ketahanan terhadap Cuaca

Ketahanan terhadap cuaca menunjukkan kemampuan *eco paving block* mempertahankan kualitas dan kinerjanya ketika terpapar berbagai kondisi lingkungan selama masa penggunaan. Faktor lingkungan yang umumnya memengaruhi ketahanan material

meliputi paparan sinar matahari; perubahan suhu; kelembapan udara; curah hujan; serta siklus basah–kering. Karena plastik memiliki sifat kedap air, *eco paving block* umumnya memiliki ketahanan yang baik terhadap pengaruh kelembapan. Namun demikian, paparan sinar ultraviolet (*ultraviolet/UV*) dalam jangka panjang dapat memengaruhi stabilitas beberapa jenis polimer apabila tidak dilengkapi dengan bahan penstabil (*stabilizer*). Oleh sebab itu, pemilihan jenis plastik dan penggunaan bahan tambahan yang sesuai menjadi salah satu faktor penting dalam menjaga ketahanan material terhadap cuaca (Harper, 2002).

Pengujian kuat tekan, daya serap air, ketahanan aus, ketahanan benturan, dan ketahanan terhadap cuaca merupakan bagian penting dalam evaluasi mutu *eco paving block*. Masing-masing parameter memberikan informasi mengenai kemampuan material dalam menahan beban, mempertahankan stabilitas, serta menghadapi pengaruh lingkungan selama masa penggunaan. Hasil pengujian tersebut menjadi dasar dalam memastikan bahwa produk memiliki kualitas yang memadai dan sesuai dengan persyaratan teknis yang berlaku (BSN, 1996; Siddique et al., 2008; Taha et al., 2018).

D. Evaluasi Karakteristik dan Mutu *Eco Paving Block*

Evaluasi karakteristik dan mutu *eco paving block* merupakan bagian penting dalam memastikan bahwa produk memiliki kualitas yang sesuai untuk digunakan sebagai material perkerasan. Evaluasi ini dilakukan dengan meninjau berbagai parameter teknis yang menggambarkan kemampuan material dalam menahan beban, mempertahankan stabilitas bentuk, serta menghadapi pengaruh lingkungan selama masa penggunaan.

Selain digunakan sebagai acuan dalam pengendalian mutu, evaluasi juga memberikan dasar dalam melakukan penyempurnaan terhadap komposisi bahan maupun proses produksi. Penilaian mutu umumnya mengacu pada standar teknis yang berlaku, seperti SNI 03-0691-1996 tentang bata beton untuk lantai (Badan Standardisasi Nasional, 1996).

Pada *eco paving block* berbahan limbah plastik, beberapa parameter yang sering digunakan untuk mengevaluasi kualitas material meliputi kuat tekan, daya serap air, ketahanan aus, ketahanan benturan, dan ketahanan terhadap cuaca. Masing-masing parameter saling melengkapi dalam memberikan gambaran mengenai karakteristik mekanis maupun daya tahan produk terhadap berbagai kondisi penggunaan (Siddique et al., 2008; Taha et al., 2018).

1. Hubungan Antara Kuat Tekan dan Daya Serap Air

Di antara berbagai parameter tersebut, kuat tekan dan daya serap air merupakan dua indikator yang paling sering digunakan untuk menilai kualitas *eco paving block*. Kuat tekan menunjukkan kemampuan material menahan beban mekanis, sedangkan daya serap air mencerminkan tingkat kepadatan struktur internal material. Secara umum, kedua parameter tersebut memiliki hubungan yang erat. Struktur material yang lebih padat biasanya memiliki jumlah pori yang lebih sedikit sehingga air lebih sulit masuk ke dalam material. Kondisi tersebut tidak hanya menghasilkan nilai daya serap air yang lebih rendah, tetapi juga mendukung peningkatan kemampuan material dalam menahan beban tekan. Sebaliknya, struktur yang masih memiliki banyak rongga cenderung lebih mudah menyerap air dan memiliki kekuatan mekanis yang lebih rendah (Siddique et al., 2008).

2. Evaluasi Berdasarkan Persyaratan Teknis

Penilaian mutu *eco paving block* tidak hanya dilakukan dengan melihat nilai masing-masing parameter secara terpisah, tetapi juga melalui perbandingan dengan persyaratan teknis yang telah ditetapkan dalam standar. Standar tersebut memberikan batasan mengenai karakteristik minimum yang harus dipenuhi agar produk dapat digunakan sesuai dengan fungsi dan tingkat pembebanannya (Badan Standardisasi Nasional, 1996).

Beberapa aspek yang umumnya menjadi perhatian dalam evaluasi meliputi kemampuan material menahan beban tekan; tingkat penyerapan air; ketahanan terhadap keausan; ketahanan terhadap benturan; serta ketahanan terhadap pengaruh cuaca. Evaluasi terhadap seluruh parameter tersebut memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai kualitas *eco paving block*, karena setiap karakteristik saling memengaruhi dalam menentukan performa material selama masa penggunaan.

3. Keterkaitan Antarparameter Mutu

Karakteristik mutu *eco paving block* tidak dapat dinilai hanya berdasarkan satu parameter. Material yang memiliki daya serap air rendah belum tentu memiliki kuat tekan yang tinggi apabila ikatan antarpartikel belum terbentuk secara optimal. Sebaliknya, material dengan kuat tekan yang baik tetap memerlukan daya serap air yang rendah agar lebih tahan terhadap pengaruh kelembapan dan perubahan lingkungan.

Oleh karena itu, evaluasi mutu dilakukan secara terpadu sehingga setiap parameter dapat saling melengkapi dalam menggambarkan kinerja material secara keseluruhan. Pendekatan ini memberikan dasar yang lebih komprehensif dalam menilai kelayakan *eco paving block* sebagai material

konstruksi sekaligus mendukung upaya peningkatan kualitas produk melalui pengendalian proses produksi dan pemilihan bahan baku yang sesuai (Badan Standardisasi Nasional, 1996; Siddique et al., 2008).

4. Faktor-Faktor yang Memengaruhi Karakteristik *Eco Paving Block*

Karakteristik dan mutu *eco paving block* dipengaruhi oleh berbagai faktor yang berkaitan dengan bahan penyusun maupun proses produksinya. Faktor-faktor tersebut menentukan kualitas ikatan antarpartikel, kepadatan struktur, serta kemampuan material dalam mempertahankan kinerjanya selama masa penggunaan.

Tabel 5. 3 Faktor-Faktor yang Memengaruhi Karakteristik *Eco Paving Block*

Faktor	Pengaruh terhadap Karakteristik Material
Komposisi plastik dan agregat	Menentukan keseimbangan antara fungsi plastik sebagai bahan pengikat (<i>binder</i>) dan agregat sebagai penahan beban sehingga memengaruhi kekuatan serta kepadatan material.
Suhu pelelehan plastik	Suhu yang sesuai membantu plastik meleleh secara optimal dan melapisi agregat secara merata, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi polimer (Callister & Rethwisch, 2020).
Homogenitas campuran	Campuran yang merata menghasilkan distribusi plastik yang lebih seragam sehingga ikatan antarpartikel menjadi lebih baik.

Faktor	Pengaruh terhadap Karakteristik Material
Proses pemadatan	Pemadatan yang optimal mengurangi jumlah rongga udara sehingga meningkatkan kepadatan dan kualitas struktur material.
Kualitas agregat	Agregat yang bersih dan memiliki gradasi yang baik membantu membentuk struktur yang lebih rapat dan stabil.
Proses pendinginan	Pendinginan yang berlangsung secara terkendali membantu mempertahankan bentuk material serta mengurangi potensi tegangan internal.

Secara umum, kualitas *eco paving block* dipengaruhi oleh keterpaduan antara karakteristik bahan penyusun, komposisi campuran, serta proses produksi yang diterapkan. Pengendalian terhadap setiap tahapan tersebut berperan penting dalam menghasilkan material yang memiliki kekuatan, kepadatan, dan ketahanan yang baik sehingga mampu memenuhi persyaratan teknis sesuai standar yang berlaku. Dengan demikian, evaluasi karakteristik tidak hanya berfungsi sebagai dasar penilaian mutu, tetapi juga sebagai acuan dalam mengoptimalkan proses produksi dan meningkatkan kinerja *eco paving block* sebagai salah satu alternatif material konstruksi yang lebih berkelanjutan (Badan Standardisasi Nasional, 1996; Siddique et al., 2008; Taha et al., 2018; Gurunathan et al., 2021).

E. Pengendalian Kualitas Selama Produksi

Pengendalian kualitas selama proses produksi merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk memastikan bahwa setiap tahapan pembuatan *eco paving block* berlangsung sesuai dengan prosedur yang telah ditetapkan. Pengendalian ini bertujuan menghasilkan produk yang memiliki dimensi seragam, kekuatan yang konsisten, daya serap air rendah, serta mampu memenuhi persyaratan mutu yang ditetapkan dalam standar teknis (Badan Standardisasi Nasional, 1996). Pengendalian kualitas dimulai sejak penerimaan bahan baku. Limbah plastik yang akan digunakan harus dipilah berdasarkan jenisnya agar memiliki karakteristik pelelehan yang seragam. Pencampuran berbagai jenis plastik dengan titik leleh yang berbeda dapat menghasilkan matriks yang tidak homogen sehingga menurunkan kualitas produk. Selain itu, agregat harus dipastikan bersih dari tanah, debu, maupun bahan organik karena kotoran dapat mengurangi daya ikat antara plastik dan agregat (Siddique et al., 2008).

Tahap berikutnya adalah pengendalian proses pelelehan plastik. Suhu harus dijaga tetap stabil sesuai karakteristik plastik yang digunakan sehingga plastik dapat meleleh secara sempurna tanpa mengalami degradasi. Lelehan plastik yang terlalu kental akan menyulitkan pencampuran, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan sifat mekanis material akibat kerusakan struktur polimer (Gurunathan et al., 2021). Pada proses pencampuran, seluruh agregat harus terlapisi secara merata oleh plastik cair sehingga terbentuk campuran homogen. Campuran yang tidak merata akan menghasilkan bagian tertentu yang lebih lemah karena terdapat rongga udara atau distribusi plastik yang tidak seimbang. Setelah pencampuran selesai, proses

pencetakan dan pemadatan harus segera dilakukan sebelum plastik mulai mengeras.

Tahap pemadatan memiliki peranan yang sangat penting karena menentukan tingkat kepadatan produk. Tekanan yang cukup akan mengurangi rongga udara di dalam material sehingga menghasilkan *eco paving block* dengan kuat tekan lebih tinggi dan daya serap air lebih rendah. Sebaliknya, pemadatan yang kurang optimal menyebabkan banyak rongga udara yang akhirnya menurunkan kekuatan produk. Setelah proses pencetakan selesai, produk harus didinginkan secara bertahap hingga mencapai suhu ruang. Pendinginan yang terlalu cepat dapat menimbulkan tegangan dalam material sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya retak halus pada permukaan. Produk yang telah dingin kemudian disimpan pada tempat yang bersih dan terlindung hingga siap dilakukan pemeriksaan mutu akhir.

Tabel 5. 4 Pengendalian Kualitas pada Setiap Tahap Produksi

Tahap Produksi	Pengendalian yang Dilakukan	Tujuan
Persiapan bahan	Memilah dan membersihkan bahan	Menjamin kualitas bahan baku
Pelelehan plastik	Mengontrol suhu pelelehan	Menghasilkan lelehan yang stabil
Pencampuran	Mengaduk hingga homogen	Memastikan seluruh agregat terlapisi plastik
Pencetakan	Mengisi cetakan secara merata	Menjaga dimensi produk
Pemadatan	Memberikan tekanan yang cukup	Mengurangi rongga udara

Tahap Produksi	Pengendalian yang Dilakukan	Tujuan
Pendinginan	Pendinginan bertahap	Mencegah retak akibat perubahan suhu
Pemeriksaan akhir	Pemeriksaan visual dan dimensi	Menjamin kualitas produk siap digunakan

Selain pengendalian pada setiap tahapan produksi, pemeriksaan terhadap produk jadi juga perlu dilakukan secara berkala. Pemeriksaan meliputi dimensi, bentuk, kerataan permukaan, adanya retak, cacat cetakan, maupun perubahan warna akibat proses pelelehan. Produk yang tidak memenuhi spesifikasi sebaiknya dipisahkan agar tidak tercampur dengan produk yang memenuhi standar mutu.

Penerapan pengendalian kualitas secara menyeluruh memberikan banyak manfaat, antara lain menghasilkan mutu produk yang lebih konsisten, mengurangi jumlah produk cacat, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku, serta memperpanjang umur pakai *eco paving block*. Dengan proses produksi yang terkendali, pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi tidak hanya memberikan manfaat bagi lingkungan, tetapi juga mampu menghasilkan produk yang memiliki kualitas teknis yang lebih baik dan lebih andal.

BAB 6

PERENCANAAN DAN PENERAPAN *ECO PAVING BLOCK*

A. Prinsip Perencanaan Penerapan *Eco Paving Block*

Perencanaan merupakan tahapan yang sangat penting dalam penerapan *eco paving block* sebagai material perkerasan. Tahap ini bertujuan untuk memastikan bahwa penggunaan material sesuai dengan kondisi lokasi, kebutuhan konstruksi, serta fungsi area yang akan dilayani. Perencanaan yang dilakukan secara sistematis berperan dalam mendukung efisiensi penggunaan material, kelancaran proses pelaksanaan, serta tercapainya kualitas perkerasan yang memenuhi persyaratan teknis (Badan Standardisasi Nasional, 1996).

Dalam penerapannya, perencanaan diawali dengan memahami karakteristik lokasi yang akan dipasang *eco paving block*. Informasi mengenai kondisi tanah, bentuk dan luas area, elevasi permukaan, sistem drainase, serta jenis aktivitas yang akan berlangsung menjadi dasar dalam menentukan spesifikasi konstruksi yang sesuai. Setiap lokasi memiliki karakteristik yang berbeda sehingga memerlukan pendekatan perencanaan yang disesuaikan dengan kondisi lapangan.

Tabel 6. 1 Aspek yang Dipertimbangkan dalam Perencanaan Penerapan *Eco Paving Block*

Aspek	Tujuan
Pengukuran area	Menentukan kebutuhan <i>eco paving block</i> dan material pendukung.
Kondisi tanah	Menentukan kebutuhan persiapan tanah dasar dan lapisan pondasi.
Sistem drainase	Mengurangi potensi genangan air pada permukaan perkerasan.
Fungsi area	Menentukan spesifikasi <i>eco paving block</i> dan sistem pemasangan yang sesuai.
Elevasi dan kemiringan lahan	Mendukung kelancaran aliran air serta menjaga stabilitas permukaan.

Masing-masing aspek tersebut saling memengaruhi dalam menentukan keberhasilan penerapan *eco paving block*. Oleh karena itu, seluruh komponen perlu dipertimbangkan secara terpadu agar sistem perkerasan mampu memberikan kinerja yang optimal selama masa penggunaannya.

Penyesuaian terhadap Fungsi Area

Salah satu prinsip utama dalam perencanaan adalah menyesuaikan spesifikasi perkerasan dengan fungsi area. Setiap jenis penggunaan memiliki karakteristik pembebanan yang berbeda sehingga memerlukan desain konstruksi yang berbeda pula. Sebagai contoh, area pejalan kaki umumnya memerlukan struktur perkerasan yang berbeda dibandingkan area parkir, jalur kendaraan, maupun ruang terbuka publik. Perbedaan tersebut memengaruhi beberapa aspek, antara lain ketebalan lapisan pondasi; jenis dan dimensi *eco paving block*; pola pemasangan; serta tingkat kepadatan lapisan pendukung. Dengan demikian,

perencanaan tidak hanya mempertimbangkan aspek visual, tetapi juga memperhatikan kemampuan struktur dalam menerima beban sesuai dengan fungsi area (Interlocking Concrete Pavement Institute [ICPI], 2020).

Perencanaan Kebutuhan Material

Perencanaan kebutuhan material dilakukan untuk memastikan bahwa jumlah material yang digunakan sesuai dengan luas area dan spesifikasi konstruksi yang direncanakan. Perhitungan tersebut meliputi kebutuhan *eco paving block* sebagai material utama serta berbagai material pendukung yang digunakan selama proses pemasangan. Beberapa material yang umumnya diperhitungkan meliputi *eco paving block*; pasir alas (*bedding sand*); agregat untuk lapisan pondasi; pasir pengisi nat (*jointing sand*); dan material pendukung lainnya sesuai kebutuhan. Dalam praktiknya, penyediaan material biasanya disertai cadangan dalam jumlah tertentu untuk mengantisipasi penyesuaian ukuran, pemotongan, maupun kemungkinan kerusakan selama proses pemasangan.

Pemilihan Pola Pemasangan

Pola pemasangan merupakan bagian penting dalam perencanaan karena berpengaruh terhadap distribusi beban, stabilitas perkerasan, serta tampilan akhir konstruksi. Pemilihan pola disesuaikan dengan fungsi area dan karakteristik pembebanan yang akan diterima. Beberapa pola pemasangan yang umum digunakan meliputi:

- a. *Herringbone*, memiliki kemampuan *interlocking* yang baik sehingga sesuai untuk area dengan pembebanan relatif tinggi.
- b. *Basket weave*, memberikan nilai estetika sekaligus cukup baik untuk area dengan pembebanan ringan hingga sedang.

- c. Pola lurus (*running bond*), lebih sederhana dalam pemasangan dan banyak diterapkan pada jalur pejalan kaki maupun area dengan beban yang relatif ringan.

Pemilihan pola yang tepat membantu mendistribusikan beban secara lebih merata sekaligus meningkatkan kestabilan sistem perkerasan (ICPI, 2020).

Perencanaan Pelaksanaan

Selain memperhatikan aspek teknis, perencanaan juga mencakup pengaturan pelaksanaan pekerjaan agar seluruh tahapan dapat berlangsung secara efektif dan aman. Pengaturan tersebut meliputi penyiapan area kerja, penyimpanan material, penempatan peralatan, serta pengaturan alur pekerjaan sehingga setiap tahapan pemasangan dapat dilakukan secara sistematis. Penerapan prinsip keselamatan kerja juga menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari proses perencanaan. Area kerja yang tertata dengan baik akan mendukung kelancaran pelaksanaan sekaligus mengurangi potensi gangguan maupun risiko selama kegiatan pemasangan berlangsung.

Perencanaan merupakan fondasi utama dalam penerapan *eco paving block*. Perencanaan yang mempertimbangkan kondisi lokasi, fungsi area, kebutuhan material, pola pemasangan, serta pengaturan pelaksanaan akan menghasilkan sistem perkerasan yang lebih stabil, efisien, dan memiliki umur layanan yang lebih panjang. Dengan demikian, proses penerapan *eco paving block* tidak hanya memberikan manfaat dari sisi teknis, tetapi juga mendukung terciptanya konstruksi perkerasan yang memenuhi persyaratan mutu dan kinerja sesuai standar yang berlaku (Badan Standardisasi Nasional, 1996; ICPI, 2020).

B. Kondisi Dasar untuk Penerapan *Eco Paving Block*

Persiapan lahan merupakan salah satu tahapan fundamental dalam pembangunan sistem perkerasan menggunakan *eco paving block*. Tahap ini bertujuan menciptakan kondisi dasar yang mampu mendukung kestabilan konstruksi sehingga setiap lapisan perkerasan dapat bekerja secara optimal. Kualitas tanah dasar memiliki pengaruh yang besar terhadap kemampuan perkerasan dalam menerima beban, mempertahankan bentuk, serta menjaga kinerja selama masa layanannya. Oleh karena itu, persiapan lahan menjadi bagian yang tidak dapat dipisahkan dari keseluruhan sistem konstruksi perkerasan (Badan Standardisasi Nasional, 1996).

Secara umum, persiapan lahan dilakukan untuk memastikan bahwa kondisi lokasi telah memenuhi persyaratan teknis sebelum pemasangan *eco paving block*. Tahapan ini tidak hanya berfokus pada kondisi permukaan tanah, tetapi juga mencakup kesiapan lingkungan pemasangan, kesesuaian elevasi, serta dukungan terhadap sistem drainase. Persiapan yang dilakukan secara menyeluruh akan membantu membentuk struktur perkerasan yang lebih stabil dan memiliki umur layanan yang lebih panjang.

Tabel 6. 2 Komponen Persiapan Lahan

Komponen	Tujuan
Kondisi permukaan lahan	Menyediakan dasar yang stabil untuk sistem perkerasan.
Elevasi lahan	Menyesuaikan ketinggian konstruksi dengan lingkungan sekitar.

Komponen	Tujuan
Kemiringan permukaan	Mendukung pengaliran air menuju sistem drainase.
Kesiapan tanah dasar	Menjamin kemampuan tanah dalam mendukung lapisan perkerasan.
Kebersihan area	Mengurangi gangguan terhadap kualitas konstruksi.

1. Kesiapan Tanah Dasar

Tanah dasar (*subgrade*) merupakan lapisan yang secara langsung menopang seluruh struktur perkerasan. Oleh karena itu, kondisi tanah dasar perlu memiliki kestabilan yang memadai agar mampu mendistribusikan beban secara merata. Tanah yang tidak stabil berpotensi menyebabkan penurunan permukaan, deformasi, maupun kerusakan pada lapisan perkerasan. Selain kemampuan menahan beban, tanah dasar juga perlu memiliki kondisi yang relatif seragam sehingga lapisan-lapisan konstruksi di atasnya dapat dipasang dengan ketebalan yang konsisten. Keseragaman tersebut berkontribusi terhadap pemerataan distribusi beban dan meningkatkan stabilitas sistem perkerasan secara keseluruhan.

2. Pengaturan Elevasi dan Drainase

Pengaturan elevasi merupakan bagian penting dalam persiapan lahan karena menentukan hubungan antara permukaan perkerasan dengan lingkungan di sekitarnya. Elevasi yang direncanakan dengan baik membantu menjaga kenyamanan penggunaan sekaligus mendukung fungsi sistem drainase. Selain elevasi, kemiringan permukaan juga perlu direncanakan agar air dapat mengalir menuju saluran drainase tanpa menimbulkan genangan. Pengelolaan air permukaan

yang baik akan mengurangi potensi kerusakan akibat kelembapan yang berlebihan serta membantu mempertahankan kestabilan lapisan perkerasan selama masa penggunaannya (Interlocking Concrete Pavement Institute [ICPI], 2020).

3. Kebersihan dan Kondisi Area

Kondisi area pemasangan turut memengaruhi kualitas sistem perkerasan yang akan dibangun. Area yang bersih dari material organik, batu berukuran besar, maupun material lain yang berpotensi mengganggu konstruksi akan memberikan dasar yang lebih baik bagi pemasangan lapisan perkerasan. Selain itu, kondisi lingkungan yang tertata juga mendukung kelancaran proses pelaksanaan, mempermudah penempatan material, serta membantu menjaga konsistensi kualitas pekerjaan selama proses konstruksi berlangsung.

4. Peran Persiapan Lahan terhadap Kinerja Perkerasan

Persiapan lahan memiliki keterkaitan yang erat dengan kinerja *eco paving block* setelah digunakan. Tanah dasar yang stabil, sistem drainase yang baik, serta elevasi yang sesuai akan mendukung fungsi setiap lapisan perkerasan dalam menerima dan mendistribusikan beban. Sebaliknya, ketidaksesuaian pada tahap persiapan dapat memengaruhi kestabilan konstruksi meskipun material yang digunakan telah memenuhi persyaratan mutu. Dengan demikian, persiapan lahan tidak hanya dipandang sebagai tahapan awal dalam proses konstruksi, tetapi juga sebagai bagian dari upaya membangun sistem perkerasan yang memiliki kinerja, daya tahan, dan umur layanan yang optimal. Penerapan prinsip-prinsip persiapan lahan yang sesuai akan mendukung keberhasilan penggunaan *eco paving block* sebagai alternatif

material perkerasan yang memenuhi persyaratan teknis dan berkelanjutan (Badan Standardisasi Nasional, 1996; ICPI, 2020).

C. Komponen Pendukung Penerapan *Eco Paving Block*

Keberhasilan penerapan *eco paving block* tidak hanya ditentukan oleh kualitas material utama, tetapi juga dipengaruhi oleh ketersediaan komponen pendukung yang berperan dalam membentuk sistem perkerasan secara menyeluruh. Komponen tersebut meliputi peralatan, material pendukung, serta perlengkapan yang digunakan untuk mendukung proses pemasangan sehingga setiap lapisan konstruksi dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya. Kesesuaian antara material, peralatan, dan metode pelaksanaan akan memberikan kontribusi terhadap kualitas, stabilitas, dan umur layanan perkerasan (Interlocking Concrete Pavement Institute [ICPI], 2020).

Secara umum, komponen pendukung dalam penerapan *eco paving block* dapat dikelompokkan menjadi dua bagian utama, yaitu peralatan kerja dan material pendukung. Meskipun memiliki fungsi yang berbeda, kedua kelompok tersebut saling melengkapi dalam mendukung terbentuknya sistem perkerasan yang memenuhi persyaratan teknis.

1. Peralatan Pendukung

Peralatan digunakan untuk membantu berbagai kegiatan dalam penerapan *eco paving block*, mulai dari pengukuran, penyiapan lapisan konstruksi, pengaturan posisi paving, hingga proses pemadatan. Pemilihan peralatan yang sesuai akan mempermudah

pelaksanaan pekerjaan, meningkatkan ketelitian, serta membantu menghasilkan kualitas pemasangan yang lebih baik.

Tabel 6.3 Peralatan Pendukung dalam Penerapan *Eco Paving Block*

Peralatan	Fungsi
Meteran	Mengukur dimensi area dan kebutuhan pemasangan.
Cangkul	Membantu penyiapan dan perataan tanah dasar.
Sekop	Memindahkan pasir dan agregat.
Papan perata	Meratakan lapisan pasir alas.
Palu karet	Menyesuaikan posisi <i>eco paving block</i> tanpa merusak permukaannya.
<i>Waterpass</i>	Memeriksa kerataan dan elevasi permukaan.
Sapu	Membersihkan permukaan serta membantu penyebaran pasir pengisi sambungan.
<i>Plate compactor</i>	Memadatkan susunan <i>eco paving block</i> sehingga terbentuk sistem <i>interlocking</i> yang stabil.

Selain peralatan utama tersebut, penggunaan perlengkapan pendukung lain dapat disesuaikan dengan kebutuhan pekerjaan, kondisi lokasi, maupun metode pemasangan yang diterapkan.

2. Material Pendukung

Selain *eco paving block* sebagai material utama, sistem perkerasan memerlukan beberapa material pendukung yang memiliki fungsi berbeda pada setiap lapisan konstruksi. Masing-masing material berkontribusi dalam menjaga kestabilan struktur, mendistribusikan beban, serta mempertahankan posisi *eco paving block* selama masa penggunaannya.

Tabel 6. 4 Material Pendukung dalam Sistem Perkerasan *Eco Paving Block*

Material	Fungsi
<i>Eco paving block</i>	Material utama pembentuk permukaan perkerasan.
Agregat pondasi	Menyebarkan beban menuju tanah dasar dan meningkatkan stabilitas konstruksi.
Pasir alas (<i>bedding sand</i>)	Membentuk lapisan perata sekaligus membantu penyesuaian posisi <i>eco paving block</i> .
Pasir pengisi sambungan (<i>jointing sand</i>)	Mengisi celah antarblok, meningkatkan sistem <i>interlocking</i> , dan membantu menjaga kestabilan susunan paving.

Karakteristik setiap material perlu disesuaikan dengan persyaratan teknis agar mampu mendukung kinerja sistem perkerasan secara optimal. Kualitas material pendukung akan memengaruhi kemampuan perkerasan dalam menerima beban, mempertahankan bentuk, serta menghadapi pengaruh lingkungan selama masa penggunaannya.

3. Keterpaduan Komponen Pendukung

Peralatan dan material pendukung merupakan bagian yang saling melengkapi dalam penerapan *eco paving block*. Penggunaan material yang memenuhi spesifikasi perlu didukung oleh pemanfaatan peralatan yang sesuai sehingga setiap tahapan konstruksi dapat dilaksanakan secara tepat. Keterpaduan tersebut berperan dalam menghasilkan sistem perkerasan yang memiliki permukaan rata, susunan yang stabil, serta kemampuan mendistribusikan beban secara merata.

Dengan demikian, komponen pendukung tidak hanya berfungsi sebagai pelengkap proses penerapan *eco paving block*, tetapi juga menjadi bagian penting dalam mendukung kualitas konstruksi secara keseluruhan. Pemilihan material dan peralatan yang sesuai akan membantu menghasilkan sistem perkerasan yang memenuhi persyaratan teknis serta memiliki umur layanan yang lebih panjang (Interlocking Concrete Pavement Institute [ICPI], 2020).

D. Tahapan Penerapan *Eco Paving Block*

Penerapan *eco paving block* pada sistem perkerasan dilakukan melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan sehingga setiap lapisan konstruksi dapat berfungsi secara optimal. Setiap tahapan memiliki peran dalam membentuk struktur perkerasan yang stabil, mampu mendistribusikan beban secara merata, memiliki sistem drainase yang baik, serta mendukung umur layanan yang lebih panjang. Secara umum, tahapan penerapan meliputi penyiapan tanah dasar, penyediaan lapisan pondasi, penyusunan *eco paving block*, pengisian sambungan, pemadatan, dan evaluasi kondisi perkerasan (ICPI, 2020; Badan Standardisasi Nasional, 1996).

1. Tanah Dasar

Tanah dasar (*subgrade*) merupakan lapisan yang menjadi penopang utama seluruh sistem perkerasan. Oleh karena itu, lapisan ini perlu memiliki kondisi yang stabil, relatif rata, dan mampu mendukung beban yang akan diterima. Kualitas tanah dasar berpengaruh terhadap kestabilan lapisan di atasnya serta terhadap kinerja perkerasan selama masa penggunaannya.

2. Lapisan Pondasi

Di atas tanah dasar terdapat lapisan pondasi yang umumnya menggunakan agregat bergradasi baik. Lapisan ini berfungsi mendistribusikan beban menuju tanah dasar sehingga tekanan yang diterima menjadi lebih merata. Selain itu, lapisan pondasi juga berperan dalam meningkatkan kestabilan konstruksi serta menjadi dasar bagi lapisan pasir yang berfungsi sebagai alas *eco paving block*.

3. Pola Penyusunan *Eco Paving Block*

Eco paving block dapat disusun menggunakan berbagai pola, seperti *herringbone*, *stretcher bond*, atau *basket weave*. Pemilihan pola disesuaikan dengan kebutuhan fungsional maupun estetika, serta mempertimbangkan kemampuan pola tersebut dalam membentuk sistem *interlocking* yang baik. Keceragaman susunan dan sambungan antarblok merupakan salah satu faktor yang mendukung kestabilan sistem perkerasan.

4. Pengisian Sambungan

Sambungan antarblok umumnya diisi menggunakan pasir halus kering yang berfungsi memperkuat sistem *interlocking*. Material pengisi tersebut membantu menjaga posisi masing-masing unit *eco paving block*, mengurangi potensi pergeseran, serta meningkatkan kestabilan permukaan perkerasan ketika menerima beban.

5. Pemadatan Perkerasan

Pemadatan merupakan bagian dari proses pembentukan sistem perkerasan yang bertujuan meningkatkan kontak antarunit *eco paving block*, lapisan pasir, dan material pendukung lainnya. Proses ini membantu memperkuat sistem *interlocking*, meningkatkan kestabilan susunan, serta

memastikan material pengisi sambungan terdistribusi secara lebih merata.

6. Evaluasi Kondisi Perkerasan

Tahap akhir dilakukan melalui evaluasi terhadap kondisi perkerasan secara menyeluruh. Evaluasi meliputi kesesuaian kerataan permukaan, keseragaman sambungan, kestabilan susunan *eco paving block*, serta kondisi umum area perkerasan. Kegiatan ini bertujuan memastikan bahwa sistem perkerasan telah memenuhi persyaratan teknis dan mampu berfungsi sesuai dengan peruntukannya (ICPI, 2020; Badan Standardisasi Nasional, 1996).

E. Keberlanjutan *Eco Paving Block*

Penanganan kondisi perkerasan merupakan bagian penting dalam menjaga kinerja *eco paving block* agar tetap berfungsi secara optimal selama masa penggunaannya. Salah satu karakteristik sistem perkerasan berbasis paving block adalah kemudahan dalam melakukan penanganan pada bagian tertentu tanpa memengaruhi keseluruhan bidang perkerasan. Karakteristik tersebut memberikan kemudahan dalam menjaga kualitas perkerasan sekaligus mendukung efisiensi pemeliharaan (Interlocking Concrete Pavement Institute [ICPI], 2022).

Secara umum, kondisi perkerasan dapat mengalami perubahan sebagai akibat dari berbagai faktor, seperti beban operasional, kondisi tanah dasar, kualitas lapisan pendukung, maupun pengaruh lingkungan. Perubahan tersebut dapat berupa retak, pergeseran, ketidakrataan permukaan, atau berkurangnya kestabilan sambungan antarblok. Oleh karena itu, identifikasi terhadap kondisi perkerasan menjadi langkah penting untuk

menentukan bentuk penanganan yang sesuai sehingga fungsi perkerasan tetap dapat dipertahankan (Shackel, 2019).

Penanganan kondisi perkerasan pada prinsipnya dilakukan dengan mengembalikan fungsi setiap komponen penyusun sistem perkerasan. Kegiatan ini dapat mencakup penyesuaian posisi unit *eco paving block*, pemulihan kondisi lapisan pendukung, pengisian kembali material pada sambungan antarblok, maupun penggantian unit yang sudah tidak memenuhi fungsi teknisnya. Pendekatan tersebut bertujuan mempertahankan kestabilan struktur, menjaga kerataan permukaan, serta memastikan sistem *interlocking* tetap bekerja secara optimal (ICPI, 2022).

Selain kondisi permukaan, lapisan pendukung juga perlu menjadi perhatian karena berperan dalam menopang seluruh sistem perkerasan. Apabila terjadi perubahan pada lapisan dasar atau lapisan pondasi, kondisi tersebut dapat memengaruhi kestabilan permukaan *eco paving block*. Oleh karena itu, penanganan tidak hanya berfokus pada bagian yang tampak mengalami perubahan, tetapi juga mempertimbangkan kondisi lapisan pendukung yang memengaruhi kinerja perkerasan secara keseluruhan.

Evaluasi terhadap hasil penanganan juga diperlukan untuk memastikan bahwa permukaan perkerasan kembali memiliki kondisi yang stabil, rata, serta mampu mendukung fungsi pelayanan sebagaimana mestinya. Penanganan yang dilakukan secara tepat akan membantu mempertahankan kualitas struktural maupun visual perkerasan, memperpanjang umur layanan, serta mendukung keamanan dan kenyamanan pengguna (BSI, 2023).

Tabel 6. 5 Kondisi Perkerasan dan Bentuk Penanganan

Kondisi Perkerasan	Faktor yang Memengaruhi	Bentuk Penanganan
Retak atau pecah	Beban operasional, benturan, atau penurunan kualitas material	Penggantian unit yang tidak lagi memenuhi fungsi teknis.
Permukaan bergelombang	Perubahan kondisi lapisan pendukung	Penyesuaian kembali lapisan pendukung dan susunan perkerasan.
Sambungan antarblok berubah	Berkurangnya material pengisi sambungan	Penambahan kembali material pengisi sambungan sesuai kebutuhan.
Pergeseran unit	Berkurangnya efektivitas sistem <i>interlocking</i>	Penataan kembali susunan <i>eco paving block</i> agar stabil.
Permukaan kurang rata	Perubahan kondisi lapisan alas	Penyesuaian lapisan alas dan penyusunan kembali unit perkerasan.

Penanganan kondisi perkerasan merupakan bagian dari upaya menjaga keberlanjutan fungsi *eco paving block* sebagai sistem perkerasan. Melalui identifikasi kondisi secara berkala dan penanganan yang sesuai, kualitas, stabilitas, serta umur layanan perkerasan dapat dipertahankan sehingga tetap memenuhi

kebutuhan teknis dan operasional (Interlocking Concrete Pavement Institute [ICPI], 2022; Shackel, 2019).

F. Contoh Penerapan pada Berbagai Infrastruktur



Gambar 6. 1 Contoh Penerapan pada Berbagai Infrastruktur

Eco paving block telah banyak digunakan sebagai material perkerasan pada berbagai jenis infrastruktur karena memiliki karakteristik yang ringan, mudah dipasang, mudah diperbaiki, serta mendukung pengelolaan limbah plastik. Selain memberikan fungsi struktural sebagai lapisan perkerasan, penggunaannya juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan melalui pemanfaatan material daur ulang dan pengurangan konsumsi bahan baku konvensional (UNEP, 2023). Salah satu penerapan yang paling umum adalah pada jalur pejalan kaki dan trotoar. Pada fasilitas ini, *eco paving block* mampu menghasilkan permukaan yang rata, nyaman, dan aman bagi pengguna. Sistem pemasangan yang menggunakan sambungan antarblok juga mempermudah pekerjaan pemeliharaan utilitas bawah tanah

karena paving dapat dilepas dan dipasang kembali tanpa merusak keseluruhan perkerasan (ICPI, 2022).

Area parkir kendaraan ringan juga merupakan lokasi yang sesuai untuk penggunaan *eco paving block*. Permukaan yang memiliki daya dukung memadai mampu mendistribusikan beban kendaraan secara merata. Selain itu, apabila menggunakan tipe permeabel, air hujan dapat lebih mudah meresap ke dalam tanah sehingga membantu mengurangi limpasan permukaan dan mendukung sistem drainase kawasan (CROW, 2021). Pada kawasan permukiman, *eco paving block* banyak dimanfaatkan sebagai perkerasan jalan lingkungan, halaman rumah, jalur sepeda, maupun ruang terbuka hijau. Material ini memberikan tampilan yang lebih menarik dibandingkan perkerasan beton monolitik karena tersedia dalam berbagai bentuk, ukuran, dan pola pemasangan. Kemudahan penggantian unit yang rusak juga menjadikan biaya pemeliharaan relatif lebih rendah.

Fasilitas publik seperti taman, kawasan wisata, halaman perkantoran, area pendidikan, dan pusat kegiatan masyarakat juga merupakan contoh penerapan *eco paving block*. Pada area tersebut, penggunaan material berbasis limbah plastik tidak hanya berfungsi sebagai elemen konstruksi, tetapi juga menjadi media edukasi mengenai pentingnya pengelolaan limbah dan penerapan ekonomi sirkular dalam pembangunan infrastruktur (UNEP, 2023). Dalam kawasan industri maupun pergudangan, *eco paving block* dapat diterapkan pada jalur servis, area penyimpanan terbuka, maupun akses kendaraan ringan hingga sedang dengan tetap menyesuaikan spesifikasi mutu produk terhadap beban yang akan diterima. Pemilihan mutu paving, ketebalan lapisan pondasi, serta kualitas pemasangan menjadi

faktor utama yang menentukan keberhasilan aplikasi pada berbagai kondisi lapangan.

Tabel 6. 6 Contoh Penerapan Eco Paving Block pada Berbagai Infrastruktur

Jenis Infrastruktur	Fungsi <i>Eco Paving Block</i>	Manfaat Utama
Trotoar dan jalur pejalan kaki	Perkerasan jalur <i>pedestrian</i>	Nyaman, aman, mudah diperbaiki
Area parkir	Perkerasan kendaraan ringan	Stabil, tahan beban, mudah dipelihara
Jalan lingkungan	Perkerasan akses permukiman	Pemasangan cepat dan ekonomis
Taman dan ruang terbuka	Jalur pejalan kaki dan area rekreasi	Estetis dan ramah lingkungan
Halaman perkantoran dan sekolah	Area aktivitas luar ruang	Permukaan rapi dan mudah dirawat
Kawasan komersial	Area akses dan plaza	Nilai estetika tinggi serta mudah dimodifikasi

BAB 7

PENGEMBANGAN DAN MASA DEPAN MATERIAL KONSTRUKSI BERBASIS LIMBAH PLASTIK

A. Manfaat Lingkungan, Sosial, dan Ekonomi

Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan baku material konstruksi merupakan salah satu bentuk penerapan prinsip pembangunan berkelanjutan yang mengintegrasikan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi. Selama ini limbah plastik dikenal sebagai salah satu jenis sampah yang sulit terurai secara alami sehingga keberadaannya sering menimbulkan berbagai permasalahan, mulai dari pencemaran tanah, saluran air, hingga ekosistem perairan. Dengan mengolah limbah tersebut menjadi *eco paving block* dan berbagai material konstruksi lainnya, plastik tidak lagi dipandang sebagai limbah, tetapi sebagai sumber daya yang masih memiliki nilai guna tinggi. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *circular economy*, yaitu memanfaatkan kembali material agar tetap berada dalam siklus penggunaan selama mungkin (Ellen MacArthur Foundation, 2019; UNEP, 2023).

Salah satu manfaat terbesar dari penggunaan limbah plastik adalah berkurangnya volume sampah yang berakhir di tempat pembuangan akhir. Plastik yang sebelumnya hanya menjadi

beban lingkungan dapat dimanfaatkan kembali menjadi produk konstruksi yang memiliki umur pakai relatif panjang. Selain membantu mengurangi pencemaran, langkah ini juga mengurangi kebutuhan eksploitasi bahan baku alam, seperti pasir dan batuan, yang selama ini digunakan secara luas dalam industri konstruksi. Pengurangan penggunaan material baru memberikan dampak positif terhadap konservasi sumber daya alam sekaligus menjaga keseimbangan lingkungan (UNEP, 2023).

Di samping itu, penggunaan limbah plastik sebagai bahan pengikat maupun bahan campuran mampu mendukung upaya penurunan emisi karbon. Produksi semen merupakan salah satu kegiatan industri yang menghasilkan emisi karbon cukup besar karena melibatkan proses pembakaran pada suhu tinggi. Ketika sebagian fungsi semen dapat digantikan oleh material hasil daur ulang, maka kebutuhan produksi semen dapat ditekan sehingga emisi karbon yang dihasilkan juga ikut berkurang. Dengan demikian, *eco paving block* menjadi salah satu alternatif material yang mendukung pembangunan rendah karbon (*low-carbon construction*) (Scrivener et al., 2018).

Dari sisi sosial, pengembangan material konstruksi berbasis limbah plastik mampu meningkatkan kesadaran masyarakat mengenai pentingnya pengelolaan sampah secara bertanggung jawab. Limbah yang sebelumnya dianggap tidak bernilai dapat diubah menjadi produk yang bermanfaat melalui proses pengolahan yang tepat. Kondisi ini mendorong tumbuhnya budaya memilah sampah, meningkatkan partisipasi masyarakat dalam kegiatan daur ulang, serta memperkuat kolaborasi antara masyarakat, pelaku usaha, dan pemerintah dalam menciptakan lingkungan yang lebih bersih.

Manfaat ekonomi juga tidak kalah penting. Limbah plastik yang sebelumnya tidak memiliki nilai jual dapat menjadi bahan baku industri konstruksi dengan nilai tambah yang lebih tinggi. Kegiatan pengumpulan, pemilahan, pencacahan, hingga proses produksi membuka peluang usaha baru bagi masyarakat serta meningkatkan pendapatan sektor ekonomi berbasis daur ulang. Selain itu, penggunaan material alternatif juga berpotensi mengurangi biaya produksi apabila sistem pengelolaan limbah telah berjalan secara efisien.

B. Analisis Efisiensi Material

Efisiensi material merupakan salah satu pertimbangan utama dalam pengembangan material konstruksi modern. Efisiensi tidak hanya diukur dari jumlah bahan baku yang digunakan, tetapi juga mencakup kemudahan proses produksi, umur pakai, kebutuhan perawatan, serta dampaknya terhadap lingkungan. Pada *eco paving block*, efisiensi diperoleh melalui pemanfaatan limbah plastik yang menggantikan sebagian fungsi material konvensional sehingga menghasilkan produk yang tetap memiliki kinerja baik dengan penggunaan sumber daya yang lebih optimal (Taha et al., 2018). Dari sisi penggunaan bahan baku, limbah plastik yang telah melalui proses pembersihan dan pelelehan mampu berfungsi sebagai bahan pengikat agregat. Pemanfaatan material daur ulang tersebut membantu mengurangi kebutuhan semen maupun bahan baku baru. Selain menghemat sumber daya alam, langkah ini juga mendukung penggunaan material yang sebelumnya belum termanfaatkan secara optimal.

Efisiensi juga terlihat pada proses pemasangan. *Eco paving block* memiliki bobot yang relatif lebih ringan dibandingkan paving block konvensional sehingga memudahkan proses pengangkutan, penanganan, dan pemasangan di lapangan. Berat yang lebih ringan mengurangi kebutuhan tenaga kerja dalam proses distribusi sekaligus mempercepat waktu pelaksanaan pekerjaan. Dari aspek pemeliharaan, karakteristik plastik yang bersifat hidrofobik menyebabkan material memiliki daya serap air yang rendah. Kondisi tersebut membuat permukaan lebih tahan terhadap kelembapan, mengurangi risiko kerusakan akibat genangan air, serta memperpanjang umur pelayanan material. Akibatnya, biaya pemeliharaan dalam jangka panjang dapat ditekan.

Walaupun demikian, efisiensi material tetap dipengaruhi oleh kualitas bahan baku yang digunakan. Plastik harus dipilah berdasarkan jenisnya agar proses pelelehan berlangsung secara homogen. Pengendalian suhu selama proses produksi juga menjadi faktor penting untuk menjaga kualitas material sehingga diperoleh produk yang memiliki sifat fisik dan mekanis yang beragam. Efisiensi *eco paving block* tidak hanya berasal dari penghematan penggunaan bahan baku, tetapi juga dari kemudahan produksi, pemasangan, serta umur pakai yang relatif panjang. Oleh karena itu, material ini memiliki prospek yang baik sebagai alternatif perkerasan yang mampu memenuhi kebutuhan pembangunan sekaligus mendukung prinsip keberlanjutan.

Tabel 7. 1 Perbandingan Efisiensi *Eco Paving Block* dan *Paving Block* Konvensional

Parameter	<i>Eco Paving Block</i>	<i>Paving Block</i> Konvensional
Pemanfaatan limbah	Sangat tinggi	Tidak memanfaatkan limbah plastik
Penggunaan semen	Lebih rendah atau tanpa semen	Menggunakan semen sebagai bahan utama
Bobot material	Lebih ringan	Lebih berat
Penyerapan air	Sangat rendah	Relatif lebih tinggi
Kemudahan pemasangan	Tinggi	Tinggi
Potensi umur layanan	Baik dengan pemeliharaan yang tepat	Baik sesuai mutu material
Kontribusi terhadap lingkungan	Tinggi	Relatif lebih rendah

C. Peluang Pengembangan Produk Berbasis Limbah Plastik

Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan baku material konstruksi terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan akan bahan bangunan yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan memiliki nilai ekonomi. Jika pada tahap awal limbah plastik lebih banyak dimanfaatkan sebagai bahan campuran atau pengganti sebagian semen dalam pembuatan *eco paving block*, perkembangan teknologi menunjukkan bahwa material ini juga dapat diolah menjadi berbagai produk konstruksi lainnya. Karakteristik plastik yang ringan, tahan terhadap kelembapan, memiliki ketahanan kimia yang baik, serta mudah dibentuk

melalui proses pemanasan menjadikannya sebagai salah satu material alternatif yang potensial dalam mendukung pembangunan berkelanjutan (Siddique et al., 2008; Taha et al., 2018).

Pengembangan produk berbasis limbah plastik tidak hanya berorientasi pada pengurangan jumlah sampah, tetapi juga bertujuan menciptakan material yang mampu memenuhi kebutuhan konstruksi modern. Dengan proses produksi yang semakin baik, berbagai produk hasil daur ulang plastik kini mampu memberikan performa teknis yang memadai untuk berbagai aplikasi nonstruktural, bahkan pada beberapa kondisi dapat digunakan untuk kebutuhan semi-struktural. Selain itu, pemanfaatan limbah plastik juga sejalan dengan konsep *circular economy*, yaitu memanfaatkan kembali material yang telah digunakan agar tetap memiliki nilai guna dalam siklus produksi berikutnya (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023).

1. Bata

Salah satu produk yang memiliki peluang besar untuk dikembangkan adalah bata berbahan limbah plastik. Bata jenis ini dibuat dengan memanfaatkan plastik sebagai bahan pengikat yang dipadukan dengan agregat halus seperti pasir, abu batu, atau bahan mineral lainnya. Setelah dipanaskan hingga meleleh, plastik akan membungkus agregat dan membentuk ikatan yang kuat setelah mengalami proses pendinginan.

Dibandingkan bata konvensional, bata berbasis limbah plastik memiliki beberapa keunggulan, antara lain bobot yang lebih ringan, daya serap air yang rendah, serta ketahanan yang baik terhadap kelembapan dan bahan kimia. Sifat tersebut

menjadikan bata lebih tahan terhadap kerusakan akibat perubahan cuaca maupun paparan air dalam waktu lama. Selain itu, proses produksinya tidak memerlukan pembakaran bata seperti pada bata tanah liat sehingga dapat mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon selama proses manufaktur (Taha et al., 2018).



Gambar 7.1 Contoh Bata Berbahan Limbah Plastik

Bata berbahan limbah plastik sangat sesuai digunakan sebagai dinding pembatas, pagar, bangunan sederhana, ruang utilitas, maupun elemen arsitektur nonstruktural lainnya. Penggunaannya mampu memberikan alternatif material yang lebih ramah lingkungan sekaligus membantu mengurangi pemanfaatan tanah liat sebagai bahan baku utama bata konvensional.

Tabel 7.2 Perbandingan Bata Konvensional dan Bata Berbasis Limbah Plastik

Aspek	Bata Konvensional	Bata Berbasis Limbah Plastik
Bahan utama	Tanah liat atau semen	Plastik daur ulang dan agregat
Berat	Relatif lebih berat	Lebih ringan
Penyerapan air	Sedang hingga tinggi	Rendah

Aspek	Bata Konvensional	Bata Berbasis Limbah Plastik
Ketahanan kelembapan	Cukup	Sangat baik
Pemanfaatan limbah	Tidak ada	Sangat tinggi
Dampak lingkungan	Lebih besar	Lebih rendah

2. Panel Bangunan

Selain bata, limbah plastik juga berpotensi dikembangkan menjadi panel bangunan. Panel merupakan elemen konstruksi berbentuk lembaran yang digunakan sebagai dinding, partisi, plafon, pagar, hingga pelapis fasad bangunan. Penggunaan panel memungkinkan proses pembangunan berlangsung lebih cepat karena sebagian besar komponen telah diproduksi sebelumnya dan hanya memerlukan proses pemasangan di lapangan. Panel berbahan limbah plastik umumnya dibuat melalui proses pencetakan (*molding*) atau ekstrusi (*extrusion*) sehingga menghasilkan dimensi yang seragam dan permukaan yang relatif halus. Pada beberapa produk, plastik dikombinasikan dengan serat alami, serbuk kayu, abu terbang (*fly ash*), atau serat kaca untuk meningkatkan kekakuan dan kekuatan mekanisnya (Gurunathan et al., 2021).

Keunggulan utama panel berbasis limbah plastik adalah bobotnya yang ringan sehingga mempermudah proses transportasi dan pemasangan. Selain itu, material ini tidak mudah lapuk akibat kelembapan, tahan terhadap serangan rayap, serta memiliki umur pakai yang relatif panjang. Perawatannya juga lebih sederhana karena permukaan panel mudah dibersihkan dan tidak memerlukan perlakuan khusus seperti pengecatan berulang.

Dalam penerapannya, panel berbasis limbah plastik dapat dimanfaatkan pada berbagai jenis bangunan, seperti rumah tinggal, bangunan modular, gudang, fasilitas pendidikan, ruang pameran, maupun bangunan sementara. Penggunaan panel juga mendukung sistem konstruksi modern yang mengutamakan efisiensi waktu pelaksanaan serta pengurangan limbah konstruksi di lapangan.



Gambar 7. 2 Contoh Panel Bangunan Berbahan Plastik Daur Ulang

3. Komponen Perkerasan

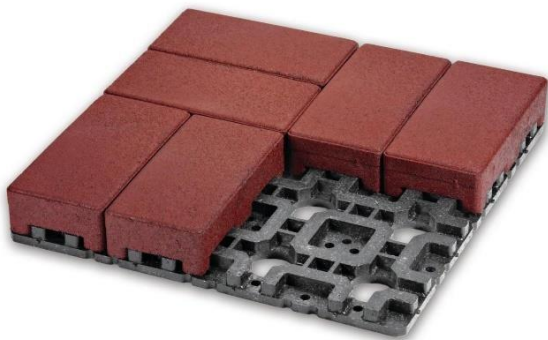
Selain *eco paving block*, limbah plastik memiliki peluang besar untuk dikembangkan menjadi berbagai komponen perkerasan lainnya. Material plastik dapat dimanfaatkan sebagai bahan penyusun *grass block*, *kerb* (kanstin), pembatas jalan, ubin luar ruang, hingga elemen pelengkap sistem drainase. Penggunaan limbah plastik pada komponen perkerasan memberikan beberapa keuntungan, yaitu ketahanan terhadap kelembapan, stabilitas dimensi yang baik, serta bobot yang lebih ringan dibandingkan

produk berbasis beton. Selain itu, karakteristik plastik yang tidak mudah menyerap air membantu mengurangi risiko kerusakan akibat siklus basah dan kering maupun perubahan suhu lingkungan.

Komponen perkerasan berbasis limbah plastik juga mendukung pembangunan kawasan yang lebih berkelanjutan karena mampu mengurangi penggunaan bahan baku alam sekaligus memanfaatkan limbah yang sebelumnya tidak bernilai. Produk-produk tersebut berpotensi diterapkan pada trotoar, taman, kawasan permukiman, area parkir, jalur sepeda, serta ruang terbuka hijau.

Tabel 7. 3 Peluang Pengembangan Komponen Perkerasan

Produk	Fungsi Utama
<i>Eco paving block</i>	Perkerasan pejalan kaki dan halaman
<i>Grass block</i>	Area resapan air
Kanstin (<i>kerb</i>)	Pembatas jalan dan trotoar
Ubin luar ruang	Jalur pedestrian
Saluran drainase modular	Pengelolaan aliran air permukaan



Gambar 7. 3 Perkerasan Berbahan Plastik Daur Ulang

4. Produk Konstruksi Lainnya

Peluang pemanfaatan limbah plastik tidak berhenti pada bata, panel, maupun komponen perkerasan. Perkembangan teknologi material memungkinkan limbah plastik diolah menjadi berbagai produk konstruksi lain yang memiliki nilai tambah tinggi. Produk tersebut antara lain papan komposit, balok ringan, pagar, furnitur luar ruang, papan penutup saluran, *decking*, papan jalur pejalan kaki, hingga elemen lanskap. Pengembangan produk-produk tersebut didukung oleh karakteristik plastik yang mudah dibentuk melalui proses pencetakan maupun ekstrusi sehingga mampu menghasilkan berbagai bentuk sesuai kebutuhan desain. Dengan penambahan bahan penguat seperti serat alami atau serat sintetis, kekuatan produk juga dapat ditingkatkan sehingga mampu digunakan pada lingkungan dengan intensitas penggunaan yang lebih tinggi.

Di masa mendatang, pemanfaatan limbah plastik diperkirakan akan semakin berkembang melalui integrasi teknologi manufaktur modern, seperti sistem pencetakan otomatis, mesin ekstrusi berkapasitas tinggi, hingga teknologi *3D printing* berbasis material daur ulang. Perkembangan tersebut diharapkan mampu menghasilkan produk konstruksi yang lebih presisi, efisien, dan memiliki kualitas yang semakin baik.

Tabel 7. 4 Contoh Produk Konstruksi Berbasis Limbah Plastik

Produk	Bidang Pemanfaatan
Papan komposit	Dinding dan pelapis bangunan
Balok ringan	Struktur ringan nonstruktural
Furnitur luar ruang	Taman dan ruang publik

Pagar	Kawasan permukiman dan fasilitas umum
<i>Decking</i>	Jalur pejalan kaki dan area rekreasi
Penutup saluran	Sistem drainase

D. Inovasi Teknologi Material Ramah Lingkungan

Perkembangan teknologi konstruksi saat ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan kekuatan dan efisiensi material, tetapi juga mengedepankan aspek keberlanjutan. Salah satu arah pengembangan yang semakin mendapat perhatian adalah pemanfaatan limbah sebagai bahan baku alternatif untuk menghasilkan material konstruksi yang memiliki dampak lingkungan lebih rendah. Dalam konteks ini, limbah plastik menjadi salah satu material yang memiliki potensi besar karena jumlahnya yang melimpah, sifatnya yang tahan lama, serta dapat diproses kembali menjadi berbagai produk konstruksi bernilai tambah. Inovasi tersebut mendukung penerapan prinsip *green construction* dan *circular economy*, yaitu memanfaatkan kembali sumber daya yang telah digunakan agar tetap berada dalam siklus produksi (UNEP, 2023).

Pemanfaatan limbah plastik sebagai material konstruksi tidak lagi terbatas pada *eco paving block*. Berbagai perkembangan teknologi memungkinkan plastik daur ulang digunakan sebagai bahan penyusun panel bangunan, bata komposit, komponen jalan, papan komposit, hingga berbagai produk modular. Hal ini menunjukkan bahwa limbah plastik bukan lagi dipandang sebagai sampah, melainkan sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali melalui proses manufaktur yang tepat.

1. Pengembangan Teknologi Pengolahan Plastik

Kemajuan teknologi pengolahan limbah plastik memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan kualitas material konstruksi. Saat ini proses pengolahan tidak lagi dilakukan secara sederhana, tetapi telah memanfaatkan peralatan yang mampu menghasilkan suhu pemanasan lebih stabil, sistem pencampuran yang homogen, serta proses pencetakan dengan tingkat presisi yang lebih tinggi.

Penggunaan mesin pencacah (*shredder*), tungku peleleh dengan pengaturan temperatur otomatis, *mixer* mekanis, serta mesin *hydraulic press* mampu menghasilkan produk yang memiliki dimensi seragam dan kualitas yang lebih konsisten. Pengendalian suhu menjadi faktor penting karena setiap jenis plastik memiliki titik leleh yang berbeda. Suhu yang terlalu rendah menyebabkan plastik tidak meleleh secara sempurna, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan kualitas polimer sehingga memengaruhi kekuatan produk akhir (Gurunathan et al., 2021). Selain meningkatkan kualitas produk, penggunaan teknologi modern juga mempercepat kapasitas produksi sehingga lebih sesuai untuk memenuhi kebutuhan industri konstruksi dalam skala besar.

2. Material Komposit Berbasis Limbah

Salah satu inovasi yang berkembang pesat adalah penggunaan material komposit. Material komposit merupakan gabungan dua atau lebih material berbeda yang dirancang untuk menghasilkan karakteristik yang lebih baik dibandingkan apabila masing-masing material digunakan secara terpisah. Dalam produk berbasis limbah plastik, plastik berfungsi sebagai matriks (*binder*), sedangkan pasir, abu batu, serat alam, atau limbah mineral

lainnya berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*). Kombinasi tersebut menghasilkan material yang memiliki kekuatan, kekakuan, dan ketahanan terhadap lingkungan yang lebih baik dibandingkan penggunaan plastik murni.

Selain meningkatkan performa mekanis, penggunaan material komposit juga memperluas jenis limbah yang dapat dimanfaatkan sehingga semakin banyak material yang dapat didaur ulang menjadi produk konstruksi bernilai ekonomi.

Tabel 7. 5 Contoh Material Komposit Berbasis Limbah

Matriks	Bahan Pengisi	Produk yang Dihasilkan
Plastik PET	Pasir	<i>Eco paving block</i>
Plastik HDPE	Abu batu	Bata komposit
Plastik PP	Serat alami	Panel bangunan
Plastik daur ulang	<i>Fly ash</i>	Produk perkerasan

3. Otomatisasi Proses Produksi

Transformasi menuju industri modern mendorong penggunaan sistem produksi yang semakin otomatis. Mesin pencetak otomatis, sistem pemadatan hidrolik, serta pengendalian suhu berbasis sensor mampu menghasilkan produk dengan kualitas yang lebih seragam dibandingkan proses manual. Otomatisasi memberikan beberapa keuntungan, antara lain meningkatkan produktivitas, mengurangi kesalahan produksi, mempercepat waktu manufaktur, serta menghasilkan dimensi produk yang lebih presisi. Selain itu, penggunaan mesin otomatis juga membantu menekan pemborosan bahan baku sehingga proses produksi menjadi lebih efisien. Dalam jangka panjang, penerapan teknologi otomatis memungkinkan industri memproduksi *eco paving block*

maupun material konstruksi lainnya dalam jumlah besar dengan kualitas yang tetap terjaga.

4. Integrasi dengan Konsep Bangunan Berkelanjutan

Perkembangan material berbasis limbah plastik juga sejalan dengan konsep bangunan berkelanjutan (*sustainable building*). Pada konsep ini, pemilihan material mempertimbangkan seluruh siklus hidup produk mulai dari bahan baku, proses produksi, penggunaan, hingga potensi daur ulang setelah masa pakainya berakhir. Material hasil daur ulang memiliki beberapa keuntungan, antara lain mengurangi eksploitasi sumber daya alam, menurunkan kebutuhan bahan baku baru, mengurangi emisi karbon, serta memperpanjang umur pemanfaatan limbah yang sebelumnya tidak bernilai. Oleh karena itu, penggunaan material berbasis limbah plastik menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung pembangunan yang lebih berkelanjutan (UNEP, 2023).

5. Prospek Inovasi pada Masa Mendatang

Perkembangan teknologi diperkirakan akan menghasilkan berbagai inovasi baru dalam pemanfaatan limbah plastik. Beberapa di antaranya meliputi penggunaan teknologi *3D printing* berbasis plastik daur ulang, sistem produksi berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), pengendalian mutu secara digital, hingga integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) dalam proses manufaktur. Teknologi tersebut memungkinkan proses produksi menjadi lebih cepat, lebih akurat, serta menghasilkan material yang memiliki kualitas semakin tinggi. Dengan dukungan inovasi tersebut, limbah plastik berpotensi menjadi salah satu bahan baku utama dalam industri konstruksi masa depan.

E. Tantangan Implementasi dalam Industri Konstruksi

Meskipun material konstruksi berbasis limbah plastik menunjukkan perkembangan yang sangat menjanjikan, penerapannya dalam industri konstruksi masih menghadapi berbagai tantangan. Tantangan tersebut tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis, tetapi juga mencakup ketersediaan bahan baku, standar mutu, kesiapan industri, hingga penerimaan masyarakat terhadap material alternatif. Oleh karena itu, pengembangan material berbasis limbah plastik memerlukan sinergi antara dunia industri, pemerintah, akademisi, dan masyarakat agar implementasinya dapat berjalan secara optimal.

1. Ketersediaan dan Kualitas Bahan Baku

Salah satu tantangan utama adalah menjaga kontinuitas pasokan limbah plastik dengan kualitas yang sesuai. Limbah plastik yang berasal dari berbagai sumber memiliki jenis, ukuran, tingkat kebersihan, dan karakteristik yang berbeda-beda sehingga memerlukan proses pemilahan sebelum digunakan. Apabila bahan baku tidak dipilah dengan baik, kualitas produk yang dihasilkan dapat menjadi tidak seragam. Oleh karena itu, sistem pengumpulan, pemilahan, dan pengolahan limbah menjadi bagian penting dalam mendukung keberhasilan produksi material konstruksi berbasis plastik.

2. Standarisasi Produk

Hingga saat ini, standar yang secara khusus mengatur produk konstruksi berbasis limbah plastik masih terus berkembang. Sebagian besar pengujian masih mengacu pada standar material konvensional, seperti SNI 03-0691-1996 untuk paving block beton. Kondisi tersebut menyebabkan setiap

produsen dapat menggunakan komposisi campuran maupun metode produksi yang berbeda sehingga kualitas produk berpotensi bervariasi. Oleh sebab itu, diperlukan pengembangan standar teknis yang lebih spesifik agar produk berbasis limbah plastik memiliki acuan mutu yang seragam.

Tabel 7. 6 Tantangan Standarisasi Produk

Aspek	Kondisi Saat Ini	Upaya Pengembangan
Standar mutu	Masih mengacu pada standar umum	Penyusunan standar khusus
Komposisi campuran	Beragam	Pedoman formulasi material
Metode produksi	Belum seragam	Standardisasi proses manufaktur
Pengujian	Mengikuti standar material konvensional	Pengembangan metode uji khusus

3. Investasi Teknologi Produksi

Produksi material berbasis limbah plastik membutuhkan peralatan tertentu, seperti mesin pencacah, tungku peleleh, mesin pencampur, dan mesin pencetak. Investasi awal tersebut relatif lebih besar dibandingkan produksi paving konvensional berskala kecil. Meskipun demikian, peningkatan kapasitas produksi dan efisiensi penggunaan bahan baku dalam jangka panjang berpotensi memberikan keuntungan ekonomi yang lebih baik. Oleh karena itu, investasi teknologi perlu dipandang sebagai bagian dari strategi pengembangan industri yang berorientasi pada keberlanjutan.

4. Penerimaan Pasar

Tantangan berikutnya adalah meningkatkan kepercayaan masyarakat terhadap material hasil daur ulang. Sebagian pengguna masih beranggapan bahwa material berbasis limbah memiliki kualitas yang lebih rendah dibandingkan material konvensional. Padahal, apabila diproduksi dengan prosedur yang tepat dan memenuhi persyaratan teknis, material berbasis limbah plastik mampu memberikan performa yang baik pada berbagai aplikasi nonstruktural. Edukasi kepada masyarakat serta penyediaan informasi mengenai karakteristik dan keunggulan produk menjadi langkah penting dalam meningkatkan penerimaan pasar.

5. Aspek Keberlanjutan

Implementasi material berbasis limbah plastik juga harus memperhatikan keberlanjutan proses produksi. Penggunaan energi, pengendalian emisi selama proses pelelehan, efisiensi pemanfaatan bahan baku, serta pengelolaan sisa produksi merupakan aspek yang perlu diperhatikan agar manfaat lingkungan benar-benar dapat dicapai. Pendekatan ini memastikan bahwa pemanfaatan limbah plastik tidak hanya mengurangi jumlah sampah, tetapi juga menghasilkan proses produksi yang efisien, aman, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan.

Berbagai tantangan tersebut bukan merupakan hambatan yang tidak dapat diatasi, melainkan peluang untuk terus melakukan penyempurnaan teknologi, peningkatan kualitas produk, serta pengembangan sistem produksi yang lebih efisien. Dengan dukungan inovasi teknologi, penguatan standar mutu, pengelolaan limbah yang baik, dan meningkatnya kesadaran terhadap pembangunan berkelanjutan, material konstruksi

berbasis limbah plastik memiliki prospek yang sangat besar untuk menjadi bagian penting dari industri konstruksi modern pada masa mendatang (UNEP, 2023; Gurunathan et al., 2021; Taha et al., 2018).

DAFTAR PUSTAKA

- Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1977–1984.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>
- Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- ASTM International. (2022). *ASTM C140/C140M-22: Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units*. ASTM International.
- ASTM International. (2022). *ASTM C936/C936M-22: Standard specification for solid concrete interlocking paving units*. ASTM International.
- ASTM International. (2023). *ASTM C936/C936M-23: Standard specification for solid concrete interlocking paving units*. ASTM International.
- ASTM International. (2023). *ASTM C1781/C1781M-23: Standard test method for surface infiltration rate of permeable unit pavement systems*. ASTM International.
- ASTM International. (2023). *ASTM D883-23: Standard terminology relating to plastics*. ASTM International.
<https://doi.org/10.1520/D0883-23>
- Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453–1477.
<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2005.02.005>

- Badan Standardisasi Nasional. (1996). *SNI 03-0691-1996: Bata beton (paving block)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1970:2011: Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 2417:2016: Cara uji keausan agregat dengan mesin Los Angeles*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI ASTM C136:2017: Metode uji analisis saringan agregat halus dan agregat kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 03-2834-2019: Tata cara pembuatan campuran beton normal*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 1725:2020: Pembebanan untuk jembatan*. Badan Standardisasi Nasional.
- British Standards Institution. (2023). *BS 7533-101: Pavements constructed with clay, natural stone or concrete pavers—Code of practice for the structural design of trafficked pavements constructed using modular paving units*. BSI Standards Limited.
- Callister, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials science and engineering: An introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- CROW. (2021). *Design and construction of permeable pavements*. CROW Knowledge Centre.

- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation.
<https://ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture>
- European Commission. (2020). *A new circular economy action plan: For a cleaner and more competitive Europe*. Publications Office of the European Union.
- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2021). Sustainable polymer composites and recycled plastic materials for construction applications. *Journal of Building Engineering*, 43, 102823. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102823>
- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2021). Sustainable utilization of recycled plastic waste in construction materials: A review. *Materials Today: Proceedings*, 46, 10514–10521.
- Harper, C. A. (2002). *Handbook of plastics, elastomers, and composites* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115–2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
- Ignatyev, I. A., Thielemans, W., & Vander Beke, B. (2014). Recycling of polymers: A review. *ChemSusChem*, 7(6), 1579–1593. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300898>
- Interlocking Concrete Pavement Institute. (2022). *ICPI construction guide for interlocking concrete pavement* (11th ed.). Interlocking Concrete Pavement Institute.
-

- Interlocking Concrete Pavement Institute. (2022). *Permeable interlocking concrete pavements manual* (8th ed.). Interlocking Concrete Pavement Institute.
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 21930:2017 Sustainability in buildings and civil engineering works—Core rules for environmental product declarations of construction products and services*. ISO.
- Karuniastuti, N. (2013). Bahaya plastik terhadap kesehatan dan lingkungan. *Forum Teknologi*, 3(1), 6–14.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2016). *Design and control of concrete mixtures* (16th ed.). Portland Cement Association.
- Kumar, S., Panda, A. K., & Singh, R. K. (2011). A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 893–910.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.005>
- Maddah, H. A. (2016). Polypropylene as a promising plastic: A review. *American Journal of Polymer Science*, 6(1), 1–11.
<https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.01>
- Maier, C., & Calafut, T. (1998). *Polypropylene: The definitive user's guide and databook*. William Andrew Publishing.
- Mallick, P. K. (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design* (3rd ed.). CRC Press.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
-

- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2022). *Global plastics outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- Poletto, M. (Ed.). (2017). *Polystyrene: Synthesis, production and applications*. Nova Science Publishers.
- Scheirs, J., & Priddy, D. B. (Eds.). (2003). *Modern styrenic polymers: Polystyrenes and styrenic copolymers*. John Wiley & Sons.
- Shackel, B. (2019). *The design and construction of interlocking concrete block pavements* (3rd ed.). CRC Press.
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835–1852. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.011>
- Siddiqui, M. N., Redhwi, H. H., Achilias, D. S., & Bikiaris, D. N. (2008). Chemical recycling of PET by glycolysis. *Macromolecular Materials and Engineering*, 293(11), 849–857.
- Surono, U. B. (2013). Berbagai metode konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak. *Jurnal Teknik*, 3(1), 32–40.
- Taha, B., Nounu, G., Al-Harthy, A., & Al-Jabri, K. (2018). Recycling of reclaimed plastic pavement materials in the production of paving blocks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(9), 04018217. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002422)
- Taha, B., Nounu, G., & Al-Waked, R. (2018). Recycling waste plastic into construction materials: A sustainable approach for paving block production. *Construction and Building Materials*, 172, 728–738.

- Taha, B., Nounu, G., Al-Jabri, K., & Al-Harthi, A. (2018). Recycling of waste plastic as a construction material for sustainable development. *Construction and Building Materials*, 180, 1–12.
- Taha, B., Nounu, G., Al-Jabri, K., & Al-Harthi, A. (2018). Recycling of waste polyethylene terephthalate (PET) as aggregate in construction materials. *Construction and Building Materials*, 179, 273–287.
- Tripathi, D. (2002). *Practical guide to polypropylene*. Smithers Rapra Press.
- United Nations Environment Programme. (2023). *Global waste management outlook 2024*. United Nations Environment Programme.
- United Nations Environment Programme. (2023). *Turning off the tap: How the world can end plastic pollution and create a circular economy*. United Nations Environment Programme.
- Welle, F. (2011). Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 865–875.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.04.009>
- World Bank. (2022). *Squaring the circle: Policies from Europe's circular economy transition*. World Bank.
<https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1753-8>
- World Bank. (2022). *What a waste 2.0: Trends in solid waste management*. World Bank.

- World Green Building Council. (2019). *Bringing embodied carbon upfront: Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon*. World Green Building Council. <https://www.worldgbc.org>
- World Health Organization. (2022). *Dietary and inhalation exposure to nano- and microplastic particles and potential implications for human health*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240054608>
- Wünsch, J. R. (2000). *Polystyrene: Synthesis, production and applications*. Rapra Technology Limited.

BIOGRAFI PENULIS



Zures Gustiabani, B.Eng., M.Sc., merupakan akademisi di bidang teknik sipil yang memiliki perhatian terhadap pengembangan ilmu konstruksi dan pengelolaan teknologi konstruksi. Penulis memiliki pengalaman dalam bidang pendidikan tinggi serta pengembangan keilmuan yang berkaitan dengan inovasi, manajemen, dan keberlanjutan dalam sektor konstruksi.

Penulis aktif sebagai dosen tetap pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Riau Kepulauan dan memiliki peran dalam mendukung pengembangan akademik serta pengelolaan program studi. Melalui aktivitas tersebut, penulis terlibat dalam berbagai kegiatan pendidikan, pengembangan kurikulum, koordinasi akademik, serta pembinaan mahasiswa untuk meningkatkan kompetensi di bidang teknik sipil.

Dengan latar belakang akademik dan pengalaman profesional yang dimiliki, penulis berkomitmen untuk terus berkontribusi dalam pengembangan teknologi konstruksi yang adaptif dan berkelanjutan. Penulis juga berupaya mendorong lahirnya generasi teknik sipil yang kompeten, inovatif, dan berintegritas dalam menghadapi perkembangan industri konstruksi di Indonesia.

BIOGRAFI PENULIS



Edi Kusmawan, S.T., M.T., merupakan akademisi dan praktisi di bidang teknik sipil dengan keahlian pada bidang struktur bangunan dan teknologi konstruksi. Penulis memiliki pengalaman dalam pengembangan keilmuan teknik sipil, khususnya yang berkaitan dengan perencanaan, analisis, dan penerapan sistem struktur pada berbagai jenis konstruksi.

Selain aktif dalam dunia pendidikan tinggi sebagai dosen pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Riau Kepulauan, penulis juga berkiprah sebagai konsultan struktur bangunan, khususnya pada sektor konstruksi migas dan bangunan sipil. Pengalaman profesional tersebut memberikan wawasan yang luas mengenai penerapan prinsip-prinsip rekayasa struktur, perencanaan konstruksi, serta pengembangan solusi teknis yang sesuai dengan kebutuhan industri. Melalui aktivitas akademik dan profesionalnya, penulis berkomitmen untuk terus mengembangkan inovasi dalam bidang teknik sipil, memperkuat keterkaitan antara ilmu pengetahuan dan praktik konstruksi, serta berkontribusi dalam mencetak sumber daya manusia yang kompeten dan berintegritas. Penulis juga memiliki perhatian terhadap pengembangan konstruksi berkelanjutan sebagai bagian dari upaya mendukung kemajuan sektor infrastruktur di Indonesia.

BIOGRAFI PENULIS



Nadia Khaira Ardi, S.T., M.T., lahir di Padang pada tanggal 15 Februari 1978. Penulis menyelesaikan pendidikan S1-nya pada program studi Teknik Sipil Universitas Andalas pada tahun 1999, dan pendidikan S2-nya di Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung pada tahun 2002. Bergabung di Universitas Riau Kepulauan sebagai dosen tetap pada program studi Teknik Sipil pada tahun 2006 dan pernah menjabat sebagai Dekan Fakultas Teknik periode 2007-2010, bidang pengutamaan yang ditekuni penulis adalah Rekayasa Transportasi termasuk didalamnya Lalulintas dan Perkerasan Jalan. Saat ini, penulis aktif mengajar dan membimbing mahasiswa dengan status sebagai dosen khusus karena berstatus sebagai ASN Kementerian PU.

QR CODE MATERI BUKU



**DAPATKAN BUKU INI MELALUI
WEBSITE DAN E-COMMERCE
METRO PRESS INDONESIA**

Produk: <https://www.metropress.id/product/teknologi-pemanfaatan-limbah-plastik-untuk-material-konstruksi-berkelanjutan/>

Shopee: <https://id.shp.ee/s4WPGuT8>