

TESIS

**ANALISA KEKUATAN LENTUR DAN DAMPAK
LINGKUNGAN PADA BETON YANG TERBUAT DARI DAUR
ULANG LIMBAH PLASTIK *POLYPROPYLENE* SEBAGAI
AGREGAT HALUS**

*Analysis of Flexural Strength and Environmental Impact of
Concrete Made from Recycled Polypropylene Plastic Waste as Fine
Aggregate*

**JENRISARI DATU BAKKA’
D012222010**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

PENGAJUAN TESIS

**ANALISA KEKUATAN LENTUR DAN DAMPAK
LINGKUNGAN PADA BETON YANG TERBUAT DARI DAUR
ULANG LIMBAH PLASTIK *POLYPROPYLENE* SEBAGAI
AGREGAT HALUS**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

**JENRISARI DATU BAKKA’
D012222010**

Kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

TESIS

ANALISA KEKUATAN LENTUR DAN DAMPAK LINGKUNGAN PADA BETON YANG TERBUAT DARI DAUR ULANG LIMBAH PLASTIK *POLYPROPYLENE* SEBAGAI AGREGAT HALUS

JENRISARI DATU BAKKA'
D012222010

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 11 Juli 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr.Eng. Muhammad. Akbar Caronge, ST., M.Eng
NIP. 198604092019043001

Pembimbing Pendamping



Prof.Dr.Ir.H.M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng
NIP. 196805292002121002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng.Ir. Muhammad Isran Ramli, ST. MT,IPM
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil



Dr.Ir.M.Asad Abdurrahman, ST. M.Eng.PM,IPM
NIP. 197303061998021001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Jenrisari Datu Bakka'
Nomor mahasiswa : D012222010
Program studi : Magister Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Analisa Kekuatan Lentur dan Dampak Lingkungan pada Beton yang Terbuat dari Daur Ulang Limbah Plastik *Polypropylene* sebagai Agregat Halus” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng dan Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal (*Journal of Building Pathology and Rehabilitation, Volume 9, Number 118, doi.org/10.1007/s41024-024-00472-w*) sebagai artikel dengan judul “*Experimental Investigation on Flexural Strength and Environmental Performance of Concrete Prepared with Recycled Polypropylene Plastic as Fine Aggregate*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 17 Juli 2024

Yang menyatakan,



Jenrisari Datu Bakka'

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, kami ucapkan atas rahmat dan karunia-Nya yang melimpah, sehingga kami dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik dan tepat waktu. Tesis ini membahas “**ANALISA KEKUATAN LENTUR DAN DAMPAK LINGKUNGAN PADA BETON YANG TERBUAT DARI DAUR ULANG LIMBAH PLASTIK *POLYPROPYLENE* SEBAGAI AGREGAT HALUS**” sebagai syarat untuk menyelesaikan studi Magister di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan tesis ini, khususnya kepada:

1. **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc.**, selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT, IPM, ASEAN.Eng.** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku pembimbing II yang selalu memberikan arahan dan petunjuk dalam penyusunan Tesis ini.
4. **Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng** selaku pembimbing I yang telah meluangkan waktu dan pengarahan dalam proses penyusunan Tesis ini.
5. **Dr. M. Asad Abdurrahman, ST, MEng.PM, IPM** dan **Dr.Eng. Ir. Bambang Bakri, ST, MT, IPU** selaku penguji.
6. **Prof. Dr.Eng. Ir. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng.** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Mahasiswa S3 **Ade Okvianti Irlan, ST., M. Eng** dan **Muhammad Sofyan, ST., MT.**
9. **Teman-teman laboratorium riset *eco-material*** serta laboran laboratorium struktur & bahan.
10. Teman-teman **angkatan 2022-2** terkhusus magister KKD struktur yang telah memberikan dukungan dan dorongan selama masa studi.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Orang tua yang tercinta dan sangat kusayangi, dengan penghargaan tertinggi saya sebutkan dengan hormat nama kedua orang tua saya, yaitu **Simon Sari Datu Bakka’ dan Marthina Dasima**. Terima kasih banyak atas doa, kasih sayang, nasehat, dan segala dukungan yang tak ternilai telah diberikan.

2. Saudara-saudaraku yang terkasih **Siska Sari Datu Bakka', Inri Dwiwati Agung Sari, Tri Satria Prabowo, dan Cristian Renaldi Sari**. Terima kasih untuk dukungan, semangat, dan doa, Serta keponakan-keponakanku yang tersayang Maelona, Emanuela, Elicora, dan Natonnoran.
3. Kekasih dengan NIM B022231030, yang selalu memberikan semangat, kasih, dan pengertian selama masa penyusunan tesis ini.

Demikian tesis ini kami buat, semoga dapat memberikan manfaat bagi kita semua.

Makassar, 17 Juli 2024

Penulis,



Jenrisari Datu Bakka'

ABSTRAK

Jenrisari Datu Bakka', Analisa Kekuatan Lentur dan Dampak Lingkungan Pada Beton yang Terbuat dari Daur Ulang Limbah Plastik *Polypropylene* Sebagai Agregat Halus (dibimbing oleh **M. Akbar Caronge** dan **M. Wihardi Tjaronge**).

Dalam beberapa dekade terakhir, beton telah menjadi bahan bangunan utama di Indonesia, dengan kontribusi signifikan terhadap emisi CO₂. Limbah material, terutama plastik, adalah salah satu penyebab utama kerusakan ekosistem karena sulitnya mendaur ulang dan terbatasnya penggunaan kembali material. Inovasi seperti penggunaan sampah plastik *polypropylene* sebagai bahan penyusun beton memiliki potensi besar untuk mengurangi dampak lingkungan dan menangani krisis manajemen sampah plastik secara berkelanjutan. Penelitian ini menggambarkan studi yang dirancang untuk memverifikasi apakah beton yang disisipkan dengan daur ulang *Polypropylene* (PP) merespons kekuatan lentur dan mengestimasi dampak lingkungan seperti *Global Warming Potential* (GWP), *Abiotic Depletion Potential* (ADP), *Acidification Potential* (AP), and *Eutrophication Potential* (EP). Sebagai alternatif penggunaan agregat halus, butiran plastik PP disisipkan dengan volume 10%, 20%, dan 30%. Kekuatan lentur diuji setelah 28 hari perawatan. Penyisipan PP ke dalam campuran beton tradisional menyebabkan penurunan kekuatan lentur yang dapat diabaikan, dan beberapa temuan masih berada dalam batas yang dapat diterima. Ambang penurunan yang diizinkan adalah 25% sesuai yang ditentukan oleh SAI, sehingga penggunaan optimal PP adalah 10%, 20%, dan 30% pada rasio fas 0,45 serta 10% dan 20% pada rasio fas 0,55. Beton dengan pengujian *non-destructive* UPV mengalami penurunan akibat PP, hasil pengujian menunjukkan beton masih tergolong kualitas yang baik. Terjadi peningkatan dampak lingkungan dari penelitian ini yang menunjukkan pengaruh tidak signifikan pada beberapa variasi, sehingga menjadikannya material yang ramah lingkungan.

Kata kunci: Pelet *polypropylene* (PP), kekuatan lentur, dampak lingkungan, kinerja lingkungan.

ABSTRACT

Jenrisari Datu Bakka', Analysis of Flexural Strength and Environmental Impact of Concrete Made from Recycled Polypropylene Plastic Waste as Fine Aggregate (supervised by **M. Akbar Caronge** and **M. Wihardi Tjaronge**)

In recent decades, concrete has become a primary building material in Indonesia, significantly contributing to CO₂ emissions. Material waste, especially plastic, is a major cause of ecosystem degradation due to difficulties in recycling and limited material reuse. Innovations such as using recycled polypropylene plastic as an inserted component of concrete have the potential to reduce environmental impact and address the ongoing plastic waste management crisis. This study describes a research endeavor designed to verify whether concrete with inserted recycled polypropylene (PP) exhibits flexural strength and estimates environmental impacts such as global warming potential (GWP), abiotic depletion potential (ADP), acidification potential (AP), and eutrophication potential (EP). As an alternative to fine aggregate, PP plastic granules were inserted at volumes of 10%, 20%, and 30%. Flexural strength was tested after 28 days of curing. The insertion of PP in traditional concrete mixtures resulted in a negligible decrease in flexural strength, with some findings still within acceptable limits. The allowable reduction threshold was set at 25% as determined by SAI, indicating that the optimal use of PP is at 10%, 20%, and 30% at a w/c ratio of 0.45, and at 10% and 20% at a w/c ratio of 0.55. Concrete subjected to non-destructive UPV testing exhibited a decrease in performance due to the insertion of PP, yet the results indicated that the concrete remained of good quality. This study highlights an increase in environmental impact with insignificant effects on several variations, making it an environmentally friendly material.

Keywords: Recycled polypropylene (PP), flexural strength, environmental impact, environmental performance.

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERSETUJUAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Tujuan Penelitian	3
I.4 Manfaat Penelitian	3
I.5 Ruang Lingkup.....	3
I.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 Beton.....	6
II.2 Penyusun Beton	7
II.2.1 Semen Campuran (Blended Cement).....	7
II.2.2 Agregat.....	9
II.2.3 Agregat Kasar.....	9
II.2.4 Agregat Halus.....	10
II.2.5 Air	10
II.3 <i>Polypropylene</i>	11
II.4 Superplasticizer.....	13
II.5 Pengujian Kekuatan Tarik Menggunakan Balok Beton	14
II.6 SAI	16
II.7 Pengujian UPV Beton	17

II.8	Parameter Dampak Lingkungan.....	19
II.9	<i>Enviromental Performance</i>	21
II.10	Penelitian Terdahulu.....	22
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN	26
III.1	Tempat dan Waktu Penelitian	26
III.2	Jenis dan Sumber Penelitian.....	26
III.3	Tahapan Penelitian	26
III.4	Pengujian Karakteristik Agregat	28
III.5	Proporsi Campuran (Mix Design)	29
III.6	Alat dan Bahan.....	29
III.7	Pengujian Keleccakan (Slump Test).....	30
III.8	Pembuatan Benda Uji.....	31
III.9	Perawatan Benda Uji.....	32
III.10	Pengujian Benda Uji	32
	III.10.1 Pengujian Kuat Lentur Beton.....	32
	III.10.2 Pengujian UPV	33
	III.10.3 Environment Perfomance dari Beton	33
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
VI.1	Karakteristik Material	35
VI.2	Slump.....	36
VI.3	Berat Satuan	37
VI.4	Pengujian Kuat Lentur	38
VI.5	Pengujian UPV.....	40
VI.6	<i>Environment Impact/Performance</i>	41
	VI.6.1 Kinerja Semen Campuran dan Recycled PP.....	41
	VI.6.2 Dampak penggunaan <i>Polypropylene</i> terhadap GWP dan P_{GWP-fs}	43
	VI.6.3 Dampak penggunaan <i>Polypropylene</i> terhadap ADP dan P_{ADP-fs}	45
	VI.6.4 Dampak penggunaan <i>Polypropylene</i> terhadap AP dan P_{AP-fs}	46
	VI.6.5 Dampak penggunaan <i>Polypropylene</i> terhadap EP dan P_{EP-fs}	48
	VI.6.6 Pertimbangan Ekonomi.....	49

BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	51
V.1	Kesimpulan	51
V.2	Saran	51
DAFTAR PUSTAKA.....		52
LAMPIRAN.....		58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Simbol dan struktur kimia polypropylene	12
Gambar 2 Pelet PP	13
Gambar 3 Patah pada bentang 1/3 bentang tengah.....	14
Gambar 4 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang	15
Gambar 5 Skematik pengujian <i>ultrasonik pulse velocity</i> (UPV).....	18
Gambar 6 Flow chart penelitian	28
Gambar 7 Material Campuran Beton.....	30
Gambar 8 Pengujian slump beton.....	31
Gambar 9 Proses curing dalam bak perendaman	32
Gambar 10 Pengujian kuat lentur beton	33
Gambar 11 Pengujian UPV.....	33
Gambar 12 Nilai slump akibat penyisipan PP	36
Gambar 13 Berat satuan beton akibat penyisipan PP	37
Gambar 14 Kuat lentur	38
Gambar 15 Pengujian UPV pada presentase PP yang berbeda	41
Gambar 16 Hubungan GWP dan P_{GWP-fs} akibat penyisipan PP.....	43
Gambar 17 Hubungan ADP dan P_{ADP-fs} akibat penyisipan PP	45
Gambar 18 Hubungan AP dan P_{AP-fs} akibat penyisipan PP	47
Gambar 19 Hubungan EP dan P_{EP-fs} akibat penyisipan PP.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Syarat fisika	8
Tabel 2 Standar pengujian karakteristik agregat kasar	10
Tabel 3 Standar pengujian agregat halus	10
Tabel 4 Sifat fisik <i>polypropylene</i>	13
Tabel 5 Data dampak lingkungan dari produksi bahan beton	21
Tabel 6 Standar pengujian karakteristik agregat kasar	28
Tabel 7 Standar pengujian agregat halus	28
Tabel 8 Mix design	29
Tabel 9 Karakteristik agregat kasar	35
Tabel 10 Karakteristik agregat halus (pasir).....	35
Tabel 11 Klasifikasi kualitas beton berdasarkan nilai pulse velocity	40
Tabel 12 Dampak lingkungan PCC	42
Tabel 13 Analisa dampak lingkungan <i>recycled PP</i>	42
Tabel 14 Dampak lingkungan dari bahan penyusun beton.....	43

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan/symbol	Arti dan Keterangan
PP	= Pelet daur ulang limbah plastik <i>polypropylene</i>
GWP	= <i>Global warming potential</i> (kg/CO ₂)
ADP	= <i>Abiotic depletion potential</i> (kgSb)
AP	= <i>Acidification potential</i> (kgSO ₂)
EP	= <i>Eutrophication Potential</i> (kgPO ₄)
PCC	= <i>Portland composite cement</i>
R	= Kuat lentur (N/mm ²) atau (Mpa)
P	= Beban maksimum total (N)
L	= Panjang bentang (mm)
b	= Lebar bendauji (mm)
d	= Tebal benda uji (mm)
a	= Jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan diukur pada bagian tarik spesimen
SAI	= <i>Strength activity index</i>
V	= <i>Ultrasonic pulse velocity</i> (m/s) atau (km/s)
T	= Waktu tempuh (s)
L	= Jarak antara pusat permukaan transduser (m)
EP _{GWP-fs}	= Total nilai GWP _{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgCO ₂)
EP _{ADP-fs}	= Nilai total ADP _{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgSb)
EP _{AP-fs}	= Total nilai AP _{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgSO ₂)
EP _{EP-fs}	= Total nilai EP _{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgPO ₄)
ATC	= Beton tradisional fas 0,45
BTC	= Beton tradisional fas 0,55

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir beton telah menjadi salah satu bahan bangunan yang banyak dimanfaatkan di Indonesia dalam pembangunan gedung, jembatan, dermaga, dan infrastruktur lainnya. Beton didefinisikan sebagai campuran dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan hidrolis (*portland cement*), agregat kasar, agregat halus, dan air dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah (*admixture* atau *additive*). Agregat biasanya menempati 75% dari isi total beton, maka sifat-sifat agregat ini mempunyai pengaruh yang besar terhadap perilaku dari beton yang sudah mengeras. Sifat agregat bukan hanya mempengaruhi sifat beton, akan tetapi juga mempengaruhi durabilitas (daya tahan terhadap kemunduran mutu akibat siklus dari pembekuan-pencairan). Oleh karena agregat adalah lebih murah dari semen, maka adalah logis untuk menggunakannya dengan presentase yang setinggi mungkin. Wang, Chu-Kia & Salmon (1993) menyatakan, umumnya untuk kekuatan yang maksimum, ketahanan, dan ekonomi, agregat harus dipak dan disemen sepadat mungkin. Dengan demikian agregat biasanya diatur tingkatannya dengan berdasarkan ukuran dan suatu campuran yang layak telah menyatakan presentasi dari agregat yang halus dan kasar.

Secara global, material konstruksi yang paling banyak digunakan setelah air adalah beton semen portland (Gartner, 2012) yang menyumbang sekitar 5% emisi CO₂ antropogenik dan 12-15% penggunaan energi dari sektor industri (Thwe, Khatiwada and Gasparatos, 2021). Elemen lingkungan yang juga dipertimbangkan dalam termasuk pada potensi penipisan abiotik, potensi pengasaman serta potensi eutrofikasi yang sangat mempengaruhi lingkungan. Tingginya potensi risiko lingkungan yang terjadi dalam proses produksi semen menunjukkan adanya potensi yang signifikan untuk perbaikan pada dampak lingkungan. Beton sering dipandang sebagai tempat potensial untuk mendaur ulang produk sampah plastik. Peningkatan produksi sampah plastik yang terjadi akibat gaya hidup modern dan kemajuan teknologi turut memberikan kontribusi signifikan terhadap krisis manajemen sampah plastik. Oleh karena itu, pengelolaan bahan sampah plastik

telah menjadi fokus utama perhatian masyarakat global. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah dengan mendaur ulang produk sampah plastik agar dapat digunakan kembali sebagai bahan penyusun beton.

Polypropylene (PP) menjadi salah satu jenis plastik yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, seperti botol minuman, wadah makanan, dan produk kemasan sekali pakai. Sampah plastik *polypropylene* sebagai jenis plastik yang secara signifikan mendominasi penggunaannya dalam konteks bahan kemasan di wilayah Eropa, menyumbang sebanyak 19,8% dari 50,3 juta ton penggunaan plastik pada tahun 2021 di kawasan tersebut (PlasticEurope, 2022). Di Indonesia, terjadi peningkatan jumlah sampah plastik, terutama bahan plastik yang berasal dari kemasan makanan dan minuman instan seperti piring, mangkuk, sendok, dan gelas plastik sekali pakai. Berdasarkan laporan *World Bank* (2021) disebutkan Indonesia menghasilkan sekitar 7,8 juta ton sampah plastik setiap tahunnya dan terdapat 4,9 juta ton sampah plastik yang tidak dikelola dengan tepat. Menurut data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), (2022) Indonesia menghasilkan sampah plastik 18,7% dari 36,19 juta ton timbulan sampah. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI, bahwa Indonesia berkomitmen untuk mencapai pengendalian emisi gas rumah kaca sebesar 29% sampai 41% pada tahun 2030 dalam target *nationally determined contribution*. Maka diharapkan penyisipan *polypropylene* pada beton dan potensinya dapat memberikan kontribusi positif dalam mengatasi krisis manajemen sampah plastik dan menciptakan solusi yang lebih berkelanjutan untuk penggunaan beton serta memberikan dampak positif bagi lingkungan dan masyarakat secara keseluruhan.

Penggunaan agregat ringan sintetis pada beton akan mengurangi bobot beton dan emisi CO₂, karena material yang lebih ringan menghasilkan bagian elemen struktur yang lebih kecil, yang pada akhirnya membutuhkan lebih sedikit energi untuk mengangkutnya (Choi *et al.*, 2009). Selain itu, penggunaan agregat daur ulang sintetis pada beton dapat mengurangi pembuangan plastik di TPA dan menghemat sumber daya alam. Dengan memanfaatkan *polypropylene* sebagai substitusi untuk agregat halus atau sebagai bahan tambahan dalam pembuatan beton baru, sambil secara simultan mengestimasi dampak lingkungan, merupakan suatu

pendekatan untuk mengurangi limbah dan mencapai formulasi beton yang bersifat ramah lingkungan. Berdasarkan konteks tersebut, penulis memilih judul:

"ANALISA KEKUATAN LENTUR DAN DAMPAK LINGKUNGAN PADA BETON YANG TERBUAT DARI DAUR ULANG LIMBAH PLASTIK *POLYPROPYLENE* SEBAGAI AGREGAT HALUS"

I.2 Rumusan Masalah

Dengan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan yang akan diselesaikan beberapa rumusan masalah ialah:

1. Kekuatan lentur beton dan UPV yang mengandung butiran *polypropylene* sebagai agregat halus.
2. Dampak lingkungan dari beton yang menggunakan butiran *polypropylene* sebagai agregat halus.

I.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis kuat lentur dan UPV dengan jumlah kandungan butiran *polypropylene*.
2. Menganalisis dampak lingkungan beton yang menggunakan butiran *polypropylene*.

I.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini terletak pada pemahaman kuat lentur sekaligus menilai dampak lingkungan pada beton yang mengandung butiran *polypropylene* secara simultan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi positif dengan mengurangi ketergantungan pada material alami dalam campuran beton. Lebih lanjut, penelitian ini diarahkan untuk memanfaatkan kembali sampah plastik sebagai alternatif yang pada gilirannya diharapkan dapat mengurangi dampak pencemaran lingkungan yang diakibatkan oleh limbah plastik.

I.5 Ruang Lingkup

1. Jenis plastik yang digunakan adalah *polypropylene* dengan ukuran 3 mm.
2. Limbah plastik di daur ulang pada pabrik.
3. Variasi *polypropylene* yang digunakan sebagai agregat halus ialah 10%, 20%, 30% dari volume pasir.

4. Semen yang digunakan ialah jenis semen campuran (*blended cement*) yaitu semen Portland Komposit (PCC).
5. Untuk properti mekanis hanya menguji kuat lentur dan UPV dari beton dengan umur 28 hari.
6. Penilaian pada dampak lingkungan hanya untuk parameter GWP, ADP, AP, dan EP dengan menggunakan literatur-literatur terdahulu.
7. Pedoman yang digunakan sebagai dasar dalam penelitian ialah SNI dan jurnal-jurnal terdahulu yang berhubungan dengan topik penelitian.

I.6 Sistematika Penulisan

Sistematika pembahasan sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bagian ini terdapat analisis mengenai konteks permasalahan, perumusan permasalahan, tujuan penulisan, substansi pokok bahasan, serta pengaturan ruang lingkup permasalahan, dan tata cara penyusunan penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini mencakup tinjauan umum, komponen konstituen beton, dan teknik evaluasi beton, serta tinjauan literatur terkait penelitian sebelumnya mengenai penggunaan *polypropylene* dalam beton, termasuk pemeriksaan dampak lingkungan dari elemen tertentu yang dihasilkan dari produksi beton yang memanfaatkan *polypropylene* sebagai agregat halus.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Membahas tujuan umum penelitian, diuraikan metodologi penelitian, termasuk lokasi dan waktu penelitian, diagram alir penelitian, persiapan alat dan bahan, pemeriksaan karakteristik material, perencanaan campuran mix desain, dan metode pengujian yang dilaksanakan.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Membahas karakteristik material, kekuatan lentur beton, hubungan antara kekuatan lentur dengan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV),

hubungan antara kekuatan lentur parameter dampak lingkungan dari produksi beton.

BAB V : PENUTUP

Pada bab ini berisi simpulan perihal analisis yang didapatkan dan saran-saran yang diusulkan untuk menunjang penelitian lebih lanjut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Beton

Saat ini, semen merupakan material kedua setelah air yang paling banyak dikonsumsi, dengan tiga ton per tahun digunakan untuk setiap orang di dunia. Beton yang digunakan dalam konstruksi dua kali lebih banyak dibandingkan gabungan semua bahan bangunan lainnya. Tidak ada keraguan bahwa beton akan tetap digunakan sebagai bahan konstruksi di masa depan. Ketika semen dicampur dengan air, ia menjadi pasta semen, dan ketika pasir ditambahkan ke dalam pasta, ia menjadi mortar. Agregat besar yang ditambahkan ke mortar menghasilkan beton. Kekuatan beton berasal dari reaksi kimia yang terjadi ketika semen dan air bercampur, suatu proses yang dikenal sebagai hidrasi. SNI 2847:2019 beton (*concrete*) merupakan campuran antara semen portland atau semen hidrolik yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat. Adapun kelebihan dan kekurangan dari beton

1. Kelebihan Beton
 - a. Harga murah: Beton memiliki biaya relatif murah dibandingkan dengan beberapa bahan konstruksi lainnya.
 - b. Kuat tekan yang tinggi: Beton memiliki kekuatan yang sangat tinggi, memungkinkannya untuk menahan beban yang berat.
 - c. Beton segar mudah untuk dibentuk sesuai dengan keinginan: Beton dapat dibentuk menjadi berbagai bentuk dan ukuran yang diinginkan
 - d. Kombinasi dengan baja tulangan: Karena memiliki kuat tekan yang besar, beton bisa dikombinasikan dengan baja tulangan untuk struktur yang berat.
2. Kekurangan Beton
 - a. Kuat tarik yang rendah: Beton memiliki kuat tarik yang rendah sehingga cenderung mudah untuk retak
 - b. Pengembangan dan penyusutan: Beton yang keras mengembang dan menyusut akibat perubahan suhu, yang dapat memicu retak
 - c. Kedap air: Beton sulit untuk kedap air

- d. Sifat hidrolis: Semennya bersifat hidrolis, sehingga beton mudah untuk retak
- e. Getas (tidak ulet): Beton bersifat getas, sehingga harus diperhitungkan dan ditentukan secara cermat agar menjadi detail setelah dipadatkan dengan baja tulangan, terutama untuk struktur tahan gempa

II.2 Penyusun Beton

II.2.1 Semen Campuran (*Blended Cement*)

Salah satu material yang umum digolongkan sebagai semen adalah pozzolan, yaitu material alami atau buatan yang mengandung silika dalam bentuk reaktif. Definisi yang lebih formal dari ASTM 618-94a menggambarkan pozzolan sebagai bahan mengandung silika dan alumina yang memiliki sedikit atau tidak ada karakteristik semen, tetapi akan dalam bentuk yang halus dan dengan adanya uap air, akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida pada suhu biasa untuk membentuk senyawa yang mempunyai sifat semen. Pozzolan harus dalam keadaan halus karena hanya dengan cara itulah silika dapat bergabung dengan kalsium hidroksida (diproduksi oleh semen portland yang menghidrasi) dengan adanya air untuk membentuk kalsium silikat stabil yang memiliki sifat semen. Perlu diketahui bahwa silika harus berbentuk amorf, yaitu kaca, karena silika kristal memiliki reaktivitas yang sangat rendah.

Untuk penilaian aktivitas pozzolan dengan semen, ASTM C 311-94a menetapkan pengukuran indeks aktivitas kekuatan. Hal ini ditentukan dengan penentuan kekuatan mortar dengan penggantian semen tertentu dengan pozzolan. Hasil pengujian dipengaruhi oleh semen yang digunakan, terutama kehalusan dan kandungan alkalinya. Terdapat juga indeks aktivitas pozzolan dengan kapur, yang menentukan aktivitas total pozzolan. Pozzolanisitas semen pozzolan, yaitu semen yang mengandung antara 11 dan 55 persen pozzolan dan silika fume menurut ENV 197-1:1992, diuji menurut EN 196-5:1987. Diantara semen yang ada di Indonesia terdiri atas

1. Semen Portland Komposit

Bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik

tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6% -35% dari massa semen portland komposit. Selama sepuluh tahun terakhir di Indonesia, secara konsisten dipertimbangkan dalam konteks pelestarian lingkungan untuk mengurangi limbah, termasuk abu terbang, serta untuk mengurangi emisi CO₂ dan faktor-faktor terkait lainnya yang terkait dengan pembangunan infrastruktur berkelanjutan. Dalam konteks ini, terdapat suatu kecenderungan yang signifikan menuju pengembangan akumulasi alternatif dalam upaya pembuatan semen yang ramah lingkungan, salah satunya adalah penggunaan semen portland komposit (Hamdi dkk, 2021)

Penggunaan semen portland komposit dalam berbagai aplikasi konstruksi umum, seperti konstruksi beton, pemasangan bata, saluran air, jalan, dinding pagar, serta pembuatan elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, beton pratekan, panel beton, paving block, dan lain sebagainya. Dengan syarat mutu fisika

Tabel 1 Syarat fisika

NO.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1	Kehalusan dengan alat <i>Blaine</i>	m ² /kg	min. 280
2	Kekekalan bentuk dengan autoclave:		
	– pemuaian	%	maks. 0,80
	– penyusutan	%	maks. 0,20
3	Waktu pengikatan dengan alat vicat:		
	– pengikatan awal	menit	min 45
	– pengikatan akhir	menit	maks. 375
4	Kuat tekan:		
	– umur 3 hari	kg/cm ²	min. 130
	– umur 7 hari	kg/cm ²	min. 200
	– umur 28 hari	kg/cm ²	min. 280
5	Pengikatan semu:		
	– penetrasi akhir	%	min. 50
6	Kandungan udara dalam mortar	% volume	maks. 12

Sumber : SNI 7064:2014

2. Semen Portland Pozolan

Suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogeny antara semen portland dengan pozolan halus, yang di produksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozolan bersama-sama, atau mencampur secara merata bubuk semen portland dengan bubuk pozolan, atau gabungan antara menggiling dan mencampur, dimana kadar pozolan 6 % sampai dengan 40 % massa semen portland

pozzolan. Berdasarkan kegunaannya semen portland pozzolan terbagi menjadi 4 jenis :

- a. Jenis IP-U merupakan semen portland pozzolan yang cocok digunakan untuk berbagai keperluan pembuatan campuran beton.
- b. Jenis IP-K adalah semen portland pozzolan yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan pembuatan campuran beton, serta cocok untuk konstruksi yang membutuhkan ketahanan terhadap sulfat sedang dan panas hidrasi yang sedang.
- c. Jenis P-U merupakan semen portland pozzolan yang digunakan untuk pembuatan campuran beton di
- d. Jenis P-K adalah semen portland pozzolan yang digunakan untuk pembuatan campuran beton di mana kekuatan awal yang tinggi tidak diperlukan, serta cocok untuk konstruksi yang membutuhkan ketahanan terhadap sulfat sedang dan panas hidrasi yang rendah.

II.2.2 Agregat

Agregat adalah material-material granular yang digunakan dalam konstruksi, seperti kerikil, pasir, dan batuan hancur. Berdasarkan ukurannya agregat diklasifikasikan menjadi dua jenis: agregat kasar, yang mencakup partikel-partikel dengan ukuran lebih dari 4,75 mm, dan agregat halus, yang terdiri dari partikel-partikel yang lebih kecil. Material-material ini merupakan komponen-komponen penting dalam produksi beton, yang memengaruhi sifat-sifatnya, keketakannya, dan daya tahannya. Distribusi ukuran butiran didefinisikan sebagai proporsi agregat dalam suatu campuran beton (Mindess et al., 1996). Distribusi ukuran agregat diperoleh melalui prosedur analisis saringan sesuai dengan ASTM C 136-06 "*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine dan Coarse Agregat*". Standar ini memberikan batas-batas tertentu baik untuk agregat halus maupun agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton. Pengaruh proporsi agregat pada karakteristik mekanis suatu beton.

II.2.3 Agregat Kasar

Berdasarkan SNI 03-2847:2002 agregat kasar merupakan kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm

atau yang tertahan pada saringan no. 4. Ukuran maksimum nominal agregat kasar harus tidak melebihi:

- 1/5 jarak terkecil antara sisi-sisi cetakan, ataupun
- 1/3 ketebalan pelat lantai, ataupun
- 3/4 jarak bersih minimum antara tulangan-tulangan atau kawat-kawat, bundel tulangan, atau tendon-tendon prategang atau selongsong-selongsong.

Untuk pengujian karakteristik agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 2

Tabel 2 Standar pengujian karakteristik agregat kasar

No	Karakteristik Agregat	Spesifikasi SNI	Interval
1	Keausan	SNI 03-2417-1991	Maks 40%
2	Kadar air	SNI 03-1971-1990	0,5%-2%
3	Berat jenis spesifik SSD	SNI 03-1969-1990	1,6 - 3,2
4	Berat jenis spesifik semu	SNI 03-1969-1990	1,6 - 3,2
5	Berat jenis spesifik kering	SNI 03-1969-1990	1,6 - 3,2
6	Penyerapan air	SNI 03-1969-1990	Maks 4%
7	Modulus kehalusan	SNI 03-1968-1990	5,5-8,5

II.2.4 Agregat Halus

Agregat halus merupakan pasir alam sebagai hasil disintegrasi 'alami' batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5,0 mm

Tabel 3 Standar pengujian agregat halus

No	Karakteristik Agregat	Spesifikasi SNI	Interval
1	Kadar air	SNI 03-1971-1990	3,0%-5%
2	Penyerapan air	SNI 03-1970-1990	maks 2%
3	Berat jenis spesifik kering	SNI 03-1970-1990	1,6 - 3,3
4	Berat jenis spesifik semu	SNI 03-1970-1990	1,6 - 3,3
5	Berat jenis spesifik SSD	SNI 03-1970-1990	1,6 - 3,3
6	Modulus kehalusan	SNI 03-1968-1990	2,44 - 3,1

II.2.5 Air

Air sebagai komponen penyusun beton melibatkan peran dalam berbagai proses utama pembuatan beton, seperti reaksi kimiawi dengan semen, pelumas antara butir-butir agregat, dan perawatan beton. Reaksi kimiawi dengan semen: Air berfungsi sebagai reaktor ($\pm 25\%$ berat semen) semen dan pelumas antar butir-butir

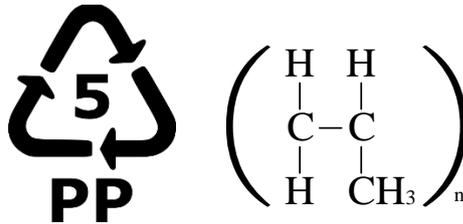
agregat. Air membantu dalam pelumas antara butir-butir agregat pada campuran beton, sehingga beton mudah dikerjakan, dipadatkan, dan diperawatan. Air digunakan dalam perawatan beton setelah mengeras untuk memastikan beton tetap dalam keadaan lembab dan proses hidrasi selanjutnya tidak mengalami gangguan. Jika proses hidrasi mengalami gangguan, beton mengalami keretakan akibat kehilangan air yang cepat. Pengaturan jumlah air dalam campuran beton sangat penting, kekurangan air dalam adukan beton dapat membuat proses pengerjaan menjadi sulit, sementara kelebihan air dapat membuat adukan menjadi terlalu encer yang berpotensi menyebabkan bleeding dan mengurangi kekuatan beton. Selain itu, air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya, bila dipakai dalam campuran beton akan menurunkan kekuatannya dan dapat juga mengubah sifat-sifat semen. Syarat-syarat air untuk mencampur beton, sebagaimana yang diatur dalam (SNI 03-6861.1-2002, 2002), adalah sebagai berikut:

1. Air yang digunakan harus memenuhi standar kebersihan dengan tidak mengandung lumpur, minyak, dan benda terapung lainnya yang dapat terlihat secara visual.
2. Air tidak boleh mengandung benda-benda tersuspensi dalam jumlah lebih dari 2 gram per liter.
3. Kandungan garam yang dapat larut dan berpotensi merusak beton, seperti asam-asam dan zat organik, tidak boleh melebihi 15 gram per liter.
4. Kandungan khlorida (Cl) harus kurang dari 0,50 gram per liter, dan senyawa sulfat (SO_3) tidak boleh melebihi 1 gram per liter.
5. Dibandingkan dengan kekuatan tekan campuran beton yang menggunakan air suling, penurunan kekuatan beton yang menggunakan air yang telah diperiksa tidak boleh melebihi 10%.
6. Khusus untuk beton pratekan, selain memenuhi persyaratan di atas, air yang digunakan tidak boleh mengandung klorida lebih dari 0,05 gram per liter.

II.3 Polypropylene

Asbhy and Jones, (1988) *Polypropylene* (PP) merupakan termoplastik yang dijelaskan sebagai polimer linear, yang berarti rantai-rantai tersebut tidak saling

terhubung (meskipun terkadang dapat bercabang). Itulah mengapa mereka melunak ketika dipanaskan: ikatan sekunder yang mengikat molekul satu sama lain meleleh sehingga polimer tersebut mengalir seperti cairan kental, memungkinkannya untuk dibentuk. Molekul dalam polimer linear memiliki rentang berat molekul, dan mereka saling berpakitan dalam berbagai konfigurasi. Beberapa seperti polistirena, bersifat amorf; yang lain, seperti polietilena, sebagian bersifat kristalin. Rentang berat molekul dan geometri pakitan ini memicu termoplastik tidak memiliki titik leleh yang tajam. Sebaliknya, viskositas mereka menurun dalam rentang suhu, mirip dengan kaca anorganik. Termoplastik dibuat dengan menambahkan ("polimerisasi") sub-unit ("monomer") bersama-sama untuk membentuk rantai panjang. Limbah *polypropylene* (PP) merupakan hasil dari monomer C_3H_6 yang merupakan hidrokarbon murni. Molekul polimer tersebut umumnya tersusun secara teratur, dengan tingkat kristalisasi yang tinggi, yang dikenal sebagai *isotactic polypropylene*. Pada plastik jenis ini tertera logo daur ulang dengan angka 5 ditengahnya, serta terdapat tulisan PP seperti pada Gambar 1.



Gambar 1 Simbol dan struktur kimia *polypropylene*

Ai-Tayyib, et al. (1988) menyebutkan sifat-sifat yang dapat diperbaiki dengan menggunakan limbah plastik PP dalam beton seperti kemudahan pemadatan (workability), retakan penyusutan plastik, penyusutan pengeringan, kekuatan tarik, serta kekuatan lentur. Perbaikan ini sangat bermanfaat di lingkungan dengan suhu udara tinggi dan angin kering, di mana retakan awal pada beton segar sering terjadi.



Gambar 2 Pelet PP

Tabel 4 Sifat fisik *polypropylene*

No	Jenis Pengujian	Hasil Uji	SNI-2461-2002
1	Berat Jenis	1.05	1.0-1.8
2	Penyerapan air	2.36%	Maks 20%
	Berat isi maksimum:		
3	-Gembur kering (kg/cm)	596	Maks 1120
	-padat kering (kg/cm)	662	Maks 1040
4	Nilai Presentase Volume Padat (%)	9.98%	9-14%
5	Ketahanan Aus	1.67%	Maka 10%
6	Kadar bagian yang terapung	0	Maks 5%
7	Kandungan Lumpur	0	<1

Sumber : (Pamudji, 2019)

II.4 Superplasticizer

Penggunaan *superplasticizer* dalam meningkatkan workability campuran beton mempengaruhi parameter seperti slump, *bleeding*, kandungan udara, dan kekuatan beton. Jenis-jenis *superplasticizer* yang umum digunakan berdasarkan bahan dasarnya melibatkan Nephthaline, Melamine, dan Polycarboxylate. Secara umum, pemanfaatan *superplasticizer* jenis Nephthaline cenderung menghasilkan penurunan kandungan udara dan peningkatan bleeding serta kekuatan beton. Efek ini dapat dicapai dengan mengurangi jumlah air dalam campuran beton. Di sisi lain, jenis Melamine memiliki dampak yang terbatas terhadap kandungan udara, kekuatan beton, dan cenderung mengurangi bleeding.

Adapun variasi *superplasticizer*, seperti viscocrete yang menggunakan *polycarboxylates* sebagai bahan dasar, merupakan teknologi inovatif dalam aditif beton. Jenis ini mampu menghasilkan beton yang sangat cair, mampu mengalir

sendiri tanpa perlu pematatan tambahan (*self-compacted*), dengan mutu yang sangat tinggi, sambil mengurangi penggunaan air hingga mencapai 30%.

II.5 Pengujian Kekuatan Tarik Menggunakan Balok Beton

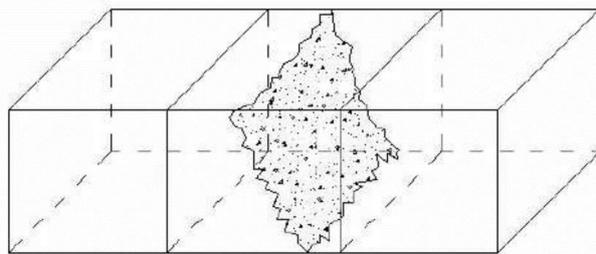
Menurut Neville (1995) ada tiga jenis pengujian kekuatan tarik: uji tegangan langsung, uji lentur, dan uji tegangan belah. Dalam pengujian tes kekuatan lentur, balok beton dikenai lentur dengan menggunakan pembebanan dua titik simetris hingga terjadi keruntuhan. Karena titik pembebanan ditempatkan pada sepertiga bentang, pengujian ini disebut pengujian pembebanan titik ketiga. Tegangan tarik maksimum teoritis yang dicapai pada serat bagian bawah balok uji dikenal sebagai modulus keruntuhan. Balok biasanya diuji pada sisinya sehubungan dengan posisi as-cast, tetapi asalkan beton tidak dipisahkan, posisi balok yang diuji relatif terhadap posisi as-cast tidak mempengaruhi modulus keruntuhan.

Kuat lentur beton menurut SNI 4431: 2011, kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji. Gaya tersebut diberikan kepada balok beton sampai benda uji menjadi patah. Hasil pengujian ini dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas.

Jarak titik belah balok beton sampai ujung balok beton sangat penting untuk menentukan rumus yang dipakai, yaitu:

- untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di daerah pusat (pada 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$



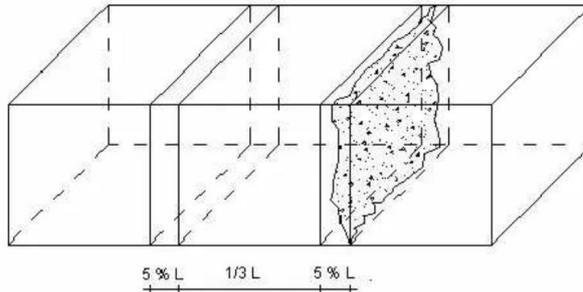
Sumber : SNI 4431-2011

Gambar 3 Patah pada bentang 1/3 bentang tengah

- untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada diluar pusat (di luar daerah 1/3 jarak titik perletakan) di bagian Tarik beton, dan jarak antara titik dan titik

patah kurang dari 5% dari panjang titik perletakan maka kuan lentur beton dihitung menggunakan persamaan:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (2)$$



Sumber : SNI 4431-2011

Gambar 4 Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang

Dimana:

R = kuat lentur (N/mm²)

P = beban maksimum total (N)

L = panjang bentang (mm)

b = lebar benda uji (mm)

d = tebal benda uji (mm)

a = jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik specimen.

British Standard BS 1881:Part 118:1983 menetapkan pembebanan titik ketiga pada balok berukuran 150 kali 150 kali 750 mm (6 kali 6 kali 30 inci) yang ditopang pada bentang 450 mm (18 inci) tetapi 100 kali 100 mm (4 sebesar 4 inci) balok juga dapat digunakan, asalkan sisi balok paling sedikit tiga kali ukuran maksimum agregat. Persyaratan ASTM C 78-94 serupa dengan persyaratan BS 1881:Part 118:1983.

Namun jika patah terjadi di luar titik beban, katakanlah, pada jarak a dari dekat tumpuan, a adalah jarak rata-rata yang diukur pada permukaan tegangan balok, tetapi tidak lebih dari 5 persen bentang, maka modulusnya adalah pecah diberikan oleh $3Pa/(bd^2)$. Artinya, tegangan tarik maksimum pada penampang kritis, dan bukan tegangan maksimum pada balok, yang diperhitungkan dalam

perhitungan. Pendekatan Inggris adalah dengan mengabaikan kegagalan di luar sepertiga tengah balok.

Terdapat juga pengujian kekuatan lentur pada pembebanan titik tengah, yang ditentukan dalam ASTM C 293-94, namun tidak lagi tercakup dalam Standar Inggris. Dalam pengujian ini, kegagalan terjadi apabila kuat tarik beton pada serat terluar yang berada tepat di bawah titik pembebanan telah habis. Sebaliknya, pada pembebanan titik ketiga, sepertiga panjang serat terluar pada balok terkena tegangan maksimum, sehingga retak kritis dapat timbul pada setiap bagian dalam sepertiga panjang balok. Karena kemungkinan suatu elemen lemah (dengan kekuatan tertentu) terkena tegangan kritis jauh lebih besar pada pembebanan dua titik dibandingkan dengan beban pusat, uji pembebanan titik pusat memberikan nilai modulus keruntuhan yang lebih tinggi, tetapi juga lebih bervariasi. Akibatnya, uji pembebanan titik pusat sangat jarang digunakan.

Persamaan modulus keruntuhan yang diberikan pada bagian ini, memenuhi syarat dengan istilah 'teoretis' karena didasarkan pada teori balok elastis, yang mana hubungan tegangan regangan diasumsikan linier, sehingga tegangan tarik pada balok diasumsikan sebanding dengan jarak dari sumbu netralnya. Namun demikian, terdapat peningkatan regangan secara bertahap dengan peningkatan tegangan di atas sekitar setengah kekuatan tarik. Bentuk blok tegangan sebenarnya di bawah beban yang mendekati keruntuhan adalah parabola, dan bukan segitiga. Modulus keruntuhan sehingga melebihi-lebihkan kekuatan tarik beton: Raphael menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik yang benar adalah kira-kira $\frac{1}{3}$ dari modulus keruntuhan teoretis.

II.6 SAI

Menurut spesifikasi ASTM C618-23, 75% dibutuhkan untuk memenuhi spesifikasi strength activity index 7 atau 28 hari dan berdasarkan ASTM C311 campuran harus mencapai 85% dari kekuatan campuran control pada umur 28 hari berdasarkan ASTM C311. Ambang batas penerimaan merujuk pada spesifikasi strength activity index (SAI). SAI telah banyak digunakan sebagai rujukan ambang batas penerimaan material yang bersifat pozzolan dalam pembuatan material berbasis semen. Diantaranya penelitian ini menggunakan prinsip yang digunakan untuk menghitung ambang batas penerimaan dari kuat lentur (ASTM C311 dan

ASTM C618). Penelitian oleh Donatello, Tyrer and Cheeseman, menggunakan SAI dari ASTM C618 sebagai ambang batas penerimaan untuk memeriksa keberhasilan penggunaan metacolin, silica, sand digunakan untuk pembuatan sustainable mortar. Penelitian oleh Sachdeva et.al. membahas campuran yang dimodifikasi harus mencapai 85% dari kekuatan campuran control pada umur 28 hari yang mengadopsi ASTM C311. Pourkhorshidi *et al.*, mengidentifikasi pozzolan yang memiliki aktivitas menguntungkan serta aktivitas paling rendah yang mengacu pada strength activity index ASTM C618, 28 hari mencapai persentase kontrol minimal 75.

II.7 Pengujian UPV Beton

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dilaksanakan sesuai dengan standar ASTM C597:2012, dengan menerapkan penyebaran gelombang longitudinal yang dihasilkan oleh transduser elektro akustik yang terkait dengan salah satu permukaan beton yang sedang diuji. Setelah menembus beton, perambatan gelombang ini diterima dan diubah menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang terletak pada jarak (L) dari transduser pemancar. Waktu tempuh (T) diukur secara elektronik. Kecepatan perambatan gelombang (V) dihitung dengan membagi L dengan T. Kecepatan perambatan gelombang ini, khususnya gelombang longitudinal dalam suatu massa beton, berkaitan dengan sifat elastisitas dan kerapatan, sesuai dengan persamaan berikut.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3)$$

Keterangan :

V = Ultrasonic Pulse Velocity (m/s)

L = Jarak antara pusat permukaan transduser (m)

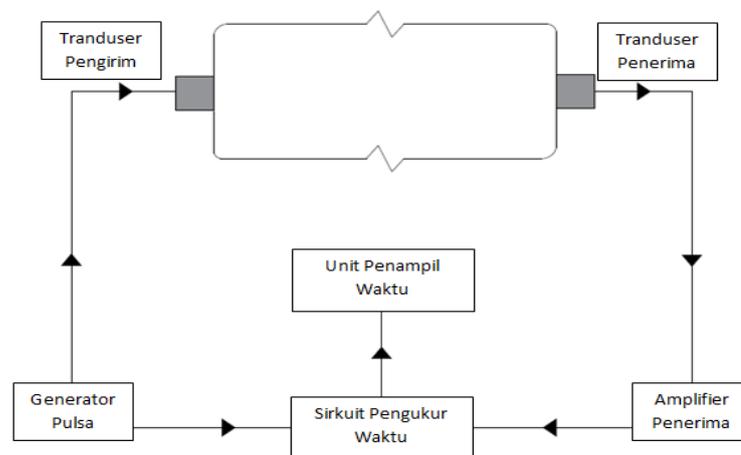
T = Waktu tempuh (s)

Pengujian kecepatan rambat gelombang melalui medium beton ini berguna dalam mengevaluasi keseragaman dan kualitas relatif beton, mendeteksi keberadaan rongga dan retakan, serta menilai efektivitas perbaikan retakan. Proses pengujian ini juga bermanfaat untuk memahami perubahan pada sifat-sifat beton, serta dapat diaplikasikan dalam pemeriksaan struktural untuk memperkirakan tingkat kerusakan atau retakan pada material beton. Pemakaian pengujian ini untuk memantau perubahan kondisi dalam suatu periode tertentu menunjukkan pentingnya memberikan penandaan

pada lokasi pengujian pada struktur, sehingga memastikan pengujian dapat diulang pada posisi yang sama.

Kejuhan beton menjadi faktor yang memengaruhi kecepatan perambatan gelombang, dan hal ini perlu dipertimbangkan dalam evaluasi hasil pengujian. Selain itu, kecepatan perambatan gelombang pada beton yang terjenuh air menunjukkan kurangnya sensitivitas terhadap variasi sifat beton. Kecepatan gelombang pada beton yang terjenuh air dapat mencapai peningkatan sebesar 5% dibandingkan dengan beton yang kering. Kecepatan perambatan gelombang tidak terkait dengan dimensi spesimen uji, dan pantulan gelombang dari permukaan benda uji. Ketepatan pengukuran bergantung pada ketrampilan operator dalam menentukan jarak yang tepat antara transduser pengirim dan penerima, serta kemampuan peralatan untuk mengukur waktu tempuh dengan akurat.

Ketepatan hasil pengukuran sinyal dan waktu tempuh dipengaruhi oleh penempatan yang tepat dari transduser pada permukaan beton. Penggunaan agen penghubung (*coupling agent*) dan penerapan tekanan yang memadai pada transduser diperlukan untuk menjamin stabilitas waktu tempuh. Kuat sinyal yang diterima juga dipengaruhi oleh jarak tempuh, serta adanya keretakan atau penurunan kualitas beton yang diuji. Peralatan pengujian, seperti yang dijelaskan secara skematis pada Gambar 5, melibatkan generator kecepatan perambatan gelombang, alat transduser (pengirim dan penerima) yang panjang, amplifier, sirkuit pengukuran waktu, unit tampilan waktu, dan kabel penghubung.



Gambar 5 Skematik pengujian *ultrasonik pulse velocity* (UPV)

II.8 Parameter Dampak Lingkungan

Beton memerlukan banyak sumber daya alam, termasuk pasir, batu, air, dan semen. Proses produksi beton dapat menghasilkan gas rumah kaca dan gas polutan yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Pada tahap awal produksi beton, proses penggalian bahan mentah akan mengganggu ekosistem sekitar dan memungkinkan terjadinya erosi tanah. Selain itu, pemanfaatan sumber daya alam dalam jumlah yang besar untuk memproduksi beton juga berdampak pada keberlangsungan lingkungan. Selama tahap pengadukan, pengangkutan, dan pengecoran beton, terdapat emisi gas polutan seperti karbon monoksida, nitrogen oksida, dan gas lainnya yang menjadi hasil dari proses pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan energi. Emisi gas ini berkontribusi pada polusi udara dan memberikan dampak negatif bagi kesehatan manusia dan lingkungan sekitarnya. Selain itu, penggunaan air pada proses produksi beton juga dapat memicu dampak lingkungan yang tidak diinginkan, seperti penurunan kualitas air dan degradasi habitat akuatik. Biasanya, air digunakan dalam jumlah besar untuk mencampur bahan mentah menjadi beton, dan air ini kemudian harus dibuang dengan memperhitungkan tingkat pencemaran dan sisa-sisa bahan kimia. Namun, ada beberapa usaha untuk mengurangi dampak lingkungan dari produksi beton, seperti penggunaan beton ramah lingkungan yang menggunakan bahan-bahan alternatif dan menggunakan *admixture*.

Menurut Kim, Tae and Chae, 2016; Abbe and Hamilton, 2017 adapun parameter yang umum untuk menganalisa dampak lingkungan antara lain *Global Warming Potential* (GWP), *Abiotic Depletion Potential* (ADP), *Acidification Potential* (AP), dan *Eutrophication Potential* (EP). GWP memiliki keterkaitan dengan seluruh gas rumah kaca, yang berasal dari emisi CO₂ dan metana, dapat memicu peningkatan suhu global dan dampak negatif pada ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. Perubahan iklim merujuk pada fluktuasi suhu global sebagai hasil dari efek rumah kaca. Gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂), yang dilepaskan oleh aktivitas manusia, tetap berada di atmosfer bumi dan menghalangi kehilangan panas bumi yang diperoleh dari matahari. Peningkatan suhu global ini berpotensi menimbulkan gangguan iklim, desertifikasi, peningkatan permukaan laut, dan penyebaran penyakit. Kesepakatan ilmiah yang substansial

menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas rumah kaca memiliki dampak yang signifikan terhadap iklim.

Kategori ADP menggambarkan pengurangan jumlah global bahan baku yang tidak dapat diperbaharui. Kategori dampak ini terkait dengan ekstraksi material abiotik murni, misalnya ekstraksi agregat, bijih logam, mineral, tanah, dll. Ekstraksi zat-zat tersebut dapat berarti bahwa kapasitas alami bumi terlampaui dan membuatnya tidak tersedia untuk digunakan oleh generasi mendatang. Kategori ini mengatasi kelangkaan unsur yang dipertimbangkan.

Dampak AP ini disebabkan oleh deposisi polutan yang bersifat asam pada tanah, air, organisme, ekosistem, dan bahan seperti sulfur dan nitrogen. Gas-gas asam seperti sulfur dioksida (SO_2) dan nitrogen oksida (NO_x) yang dilepaskan dalam pembakaran bahan bakar bereaksi dengan air di tanah atau di atmosfer (di mana ini membentuk "hujan asam"). Asam adalah zat kimia yang dapat menghasilkan ion hidrogen (H^+ , juga disebut 'proton') ketika bertemu air. Ion hidrogen sangat reaktif dan memicu zat lain mengubah komposisi dan sifat fisiknya. Deposisi asam oleh karena itu dapat merusak ekosistem dan mengikis bahan

Kategori EP ini mencakup semua dampak dari tingkat lingkungan yang tinggi dari makronutrien (fosfor dan nitrogen) yang memicu produksi biomassa tinggi di ekosistem akuatik dan darat. Contohnya, polutan udara, air limbah, dll. Nitrat dan fosfat penting untuk kehidupan, tetapi peningkatan konsentrasi mereka dalam air memicu eutrofikasi (over-nutrifikasi) yang dapat mendorong pertumbuhan alga berlebihan, mengurangi oksigen dalam air, dan merusak ekosistem. Sumbernya termasuk pupuk dan emisi nitrogen oksida (NO_x) dari pembakaran bahan bakar fosil.

(Kim, Tae and Chae, 2016; Wałach *et al.*, 2019) untuk mengestimasi nilai dari parameter dampak lingkungan, digunakan persamaan :

$$E = \sum_{n=1}^i N_i \cdot w_i \quad (5)$$

Dimana:

E = dampak lingkungan

N_i = standar dampak lingkungan untuk kategori ke-i

w_i = berat kategori ke-i (kg/m^3)

Inventarisasi parameter lingkungan ADP, GWP, AP, dan EP dilakukan dengan mengkaji literatur saintifik yang terpercaya. Tabel 5 memperlihatkan nilai-nilai ADP, GWP, AP, dan EP untuk material OPC, pasir, air, batu pecah, superplasticizer, FA, dan pellet PP yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur.

Tabel 5 Data dampak lingkungan dari produksi bahan beton

Sumber	Material (1kg)	ADP (kgSbeq)	GWP (kgCO ₂ eq)	AP (kgSO ₄ eq)	EP (kgPO ₄ eq)
(Ohemeng and Naghizadeh, 2023)	OPC	3,99.E-03	9,51.E-01	2,76.E-03	3,60.E-04
(Margarida <i>et al.</i> , 2015)	Pasir	3,34.E-10	9,87.E-03	4,58.E-05	1,08.E-05
(Margarida <i>et al.</i> , 2015)	Air	1,57.E-11	1,33.E-04	3,87.E-08	9,70.E-07
(Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), 2021)	Superplasticizer	1,10.E-06	1,88.E+00	2,92.E-03	1,03.E-03
(Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, 2017)	PP	3,74.E-07	-	2,94.E-03	4,00.E-04
(Galve <i>et al.</i> , 2022)	PP	-	2,50.E-01	-	-
(Majhi and Nayak, 2020)	Batu pecah	1,09.E-09	2,44.E-02	1,44.E-04	3,18.E-05
(Chen <i>et al.</i> , 2010)	Abu terbang	3,37.E-04	8,77.E-03	5,53.E-05	8,23.E-06

II.9 Enviromental Performance

Sangat penting untuk menilai kelayakan penyisipan PP tidak hanya pada hubungan berdasarkan satu parameter tunggal seperti jumlah PP dan kuat lentur, tapi assessment kelayakan mengadopsi dua faktor secara bersamaan. Beberapa penelitian yang memperhatikan secara simultan kuat tekan dan emisi CO₂ oleh (Vembu and Ammasi, 2023). Penelitian ini menyediakan beberapa faktor simultan yang mencakup kuat lentur dengan parameter lingkungan (GWP, ADP, AP, dan EP) seperti pada persamaan berikut

$$P_{i-fs} = \frac{f_s}{\text{total } i_{\text{mix}}} \quad (6)$$

Dimana:

P_{i-fs} = nilai total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan dibagi kuat lentur

Total $_{mix}$ = total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan

f_s = kuat lentur (MPa)

II.10 Penelitian Terdahulu

Dawood, et al (2021), melakukan penelitian tentang pemanfaatan limbah PET sebagai pengganti agregat halus dalam beton. Penelitian ini melakukan uji kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, modulus elastisitas, dan UPV. Hasil pengujian menunjukkan bahwa keberadaan partikel PET mengubah sifat fisik dan mekanik beton yang dihasilkan. Untuk sifat yang berkaitan dengan kekuatan, hasilnya menunjukkan bahwa spesimen yang mengandung rasio substitusi parsial berkisar antara 5%–12,5% menunjukkan peningkatan sebesar 26,8%–43,64%, 18,6%–26,9%, dan 18,1%–30,2% pada kuat tekan, tarik, dan lentur. Penggantian pasir dengan partikel limbah PET berdampak positif terhadap nilai kekuatan benda uji beton selama rasio pengantiannya kurang dari 15%.

Frigione, (2010), melakukan penelitian mengenai daur ulang limbah botol plastic PET sebagai pengganti agregat halus. Penelitian ini mencoba menggantikan 5% berat dari agregat halus (pasir alam) dalam beton dengan berat yang sama dari agregat PET yang diproduksi dari botol PET bekas yang belum dicuci. Partikel PET yang belum dicuci memiliki granulometri yang mirip dengan pasir yang digantikan. Spesimen dengan kandungan semen dan rasio air-semen yang berbeda diproduksi. Karakterisasi reologis pada beton segar dan uji mekanik pada usia 28 dan 365 hari dilakukan pada beton PET serta beton normal yang hanya mengandung agregat halus alam untuk menyelidiki pengaruh substitusi PET terhadap agregat halus dalam beton. Ditemukan bahwa beton PET menunjukkan karakteristik workability, kekuatan tekan, dan kekuatan tarik belah yang mirip, sedikit lebih rendah dibandingkan dengan beton normal, dan keuletan yang sedang lebih tinggi. dalam rentang kandungan beton yang diuji (dari 300 hingga 400 kg/m³) dan rasio air/semen (dari 0,45 hingga 0,55), substitusi 5% berat pasir silika dengan potongan WPET, yang diperoleh dari penggilingan blade mill limbah PET, meskipun tidak dicuci, memungkinkan untuk mencapai beton yang ditandai oleh workability yang sama dan tanpa segregasi dibandingkan dengan beton normal. Kekuatan tekan dan kekuatan tarik belah beton WPET 0,4–1,9% lebih rendah dari beton normal tetapi

dengan keuletan yang sedikit lebih tinggi. Dari sudut pandang ekologis, manfaat ekonomis dan konservasi energi mungkin tercapai dengan menggabungkan limbah PET, tanpa perlakuan khusus, dalam beton. Keuntungan utama dari daur ulang PET dalam beton adalah bahwa bahan plastik ini tidak perlu dibersihkan, dan penghilangan warna tidak diperlukan, seperti pada aplikasi daur ulang PET umum lainnya.

Alqahtani et al., (2016), melakukan penelitian tentang penggunaan daur ulang limbah plastik dalam industri konstruksi, khususnya dalam beton, yang menggunakan jumlah besar agregat. Sebuah agregat baru yaitu *recycled plastic aggregate* (RPA) yang terdiri dari plastik daur ulang dikembangkan. Agregat yang dihasilkan bersifat ringan, dengan kerapatan berkisar dari 510 hingga 750 kg/m³ dan daya serap antara 2,7 hingga 9,81%. Properti lainnya sebanding dengan agregat berkerapatan serupa. Berbagai komposisi agregat daur ulang digunakan dalam beton, dan properti hasil beton segar dan beton yang sudah matang diukur. Untuk rasio air semen tertentu, dapat dicapai slump antara 40 hingga 220 mm dan kerapatan segar antara 1.827 hingga 2.055 kg/m³. Selain itu, kekuatan pada usia 28 hari antara 14 hingga 18 MPa dapat dicapai. RPA dapat digunakan dalam beton sebagai pengganti total untuk *lightweight aggregates* (LWA). Pengurangan kekuatan lentur beton RPA kurang terlihat dibandingkan dengan pengurangan kekuatan tekan karena perilaku elastis dan duktil plastik dalam partikel RPA. Beton RPA dapat digunakan untuk struktur di mana beton dengan perilaku daktil dibutuhkan sebagai pengganti beton LWA. Mendaur ulang limbah plastik sebanyak 3 juta ton akan mengurangi emisi CO₂ sebanyak 3,8 juta ton.

Almeshal et al., (2020), melakukan penelitian mengenai penggunaan *polietilena tereftalat* (PET) sebagai pengganti sebagian pasir dalam beton. Plastik merupakan jenis limbah padat yang memiliki dampak lingkungan yang kuat. Sejumlah enam campuran beton yang mengandung PET disiapkan sebagai pengganti sebagian pasir dengan tingkat penggantian 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%. Dalam penggunaan PET dapat mengurangi berat sendiri beton dalam struktur dan membantu melestarikan sumber daya alam seperti pasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat lentur beton menurun seiring dengan peningkatan rasio penggantian PET, dengan penurunan sebesar 2,4% pada rasio

penggantian 10%, dan penurunan sebesar 58% dan 84,2% pada rasio penggantian 40% dan 50% setelah 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa UPV menurun seiring dengan peningkatan rasio penggantian PET, dengan penurunan sebesar 2,93% pada rasio penggantian 10%, dan penurunan sebesar 56,7% pada rasio penggantian 50% setelah 28 hari. Meskipun sifat mekanik beton menurun dengan peningkatan rasio penggantian PET, partikel plastik dapat diinkapsulasi dari bahan lain dan menghasilkan beton yang aman secara lingkungan.

(Ohemeng and Naghizadeh, 2023) melakukan penelitian untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi limbah beton dan *fly ash* (FA) terhadap kinerja mortar pasangan bata, beserta analisis biaya dan dampak lingkungan. Studi ini menemukan bahwa penggabungan FA dalam mortar semen WCP menghasilkan pengurangan biaya dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, mortar yang dihasilkan memenuhi persyaratan kekuatan untuk pekerjaan pasangan bata serta memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan.

(Vembu and Ammasi, 2023) melakukan penelitian dengan memanfaatkan limbah industri sebagai bahan konstruksi. Studi ini mengeksplorasi penggunaan limbah tambang magnesit sebagai pengganti semen dan agregat dalam beton yang dapat memadat sendiri, dengan fokus pada evaluasi dampak ekonomi dan lingkungan dari material tersebut. Penelitian ini mencakup analisis emisi CO₂ dan biaya yang dikeluarkan dalam produksi beton. Terjadi penurunan emisi CO₂ sebesar 48% ketika limbah tambang diganti dengan semen sedangkan penurunan emisi CO₂ sebesar 19% dicapai ketika limbah tambang diganti dengan agregat alam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah tambang magnesit dapat menjadi pengganti bahan bangunan konvensional yang cocok, dengan manfaat kekuatan tambahan serta pengurangan emisi CO₂ dan biaya. Efisiensi kekuatan lingkungan dari SCC campuran agregat dapat diamati bahwa efisiensi SCC campuran agregat limbah tambang meningkat seiring dengan penuaan beton yaitu efisiensi SCC campuran agregat limbah tambang lebih rendah dibandingkan SCC konvensional pada usia 7 hari sedangkan lebih tinggi pada 28 hari. Efisiensi kekuatan CO₂, peningkatan sekitar 11% diamati pada 7 hari dalam campuran dengan tingkat penggantian agregat kasar limbah tambang (30MWCA) sebesar 30% dengan nilai emisi tertinggi sebesar 0,08 MPa/kgCO₂. Peningkatan efisiensi kekuatan lingkungan dari

campuran SCC dengan penggantian limbah tambang dengan agregat kasar diamati seiring bertambahnya usia, serupa dengan efisiensi campuran SCC yang bahan pengikatnya diganti. Khususnya SCC dengan penggantian limbah tambang 30% (30MWCA) mencatat efisiensi tertinggi sebesar 0,126 MPa/kgCO₂ dengan peningkatan sekitar 36% dibandingkan dengan CC. Hal ini mungkin disebabkan oleh kekuatan yang lebih tinggi yang dicapai oleh agregat kasar yang menggantikan campuran SCC pada hari ke 28 dan penggunaan yang lebih sedikit yang berkontribusi terhadap efisiensi kekuatan lingkungan.