

TUGAS AKHIR

PENGARUH PENAMBAHAN WATERPROOFING DAMDEX PADA BETON AGREGAT KASAR LIMBAH BETON TERHADAP KUAT TEKAN DAN ABSORPSI *(THE EFFECT OF DAMDEX WATERPROOFING ADDITION ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND ABSORPTION OF CONCRETE USING RECYCLED COARSE AGGREGATE)*

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**Renaldi Dimas Kurniawan
19511136**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2025**

TUGAS AKHIR

PENGARUH PENAMBAHAN *WATERPROOFING* DAMDEX PADA BETON AGREGAT KASAR LIMBAH BETON TERHADAP KUAT TEKAN DAN ABSORPSI (*THE EFFECT OF DAMDEX WATERPROOFING ADDITION ON THE COMPRESSIVE STRENGTH AND ABSORPTION OF CONCRETE USING RECYCLED COARSE AGGREGATE*)

Disusun oleh

Renaldi Dimas Kurniawan

19511136

Telah diterima sebagai salah satu syarat persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal

Oleh Dewan Penguji

Penguji I

Penguji II

Pembimbing

Jafar, S.T., M.T., MURP

NIK: 185111305

Anggit Mas Arifudin S.T., M.T.

NIK: 185111304

Maik Mushthofa S.T., M.Eng

NIK: 185111302

Mengesahkan

Ketua Prodi Studi Teknik Sipil



Ar. Yunalia Muntafi S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM.

NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa Tugas Akhir ini saya susun sebagai salah satu syarat kelulusan pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, dan sepenuhnya merupakan hasil karya saya sendiri. Bagian-bagian tertentu yang mengambil kutipan dari karya pihak lain telah dicantumkan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah yang berlaku. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa sebagian atau seluruh isi Tugas Akhir ini bukan hasil kerja saya sendiri atau ditemukan adanya unsur plagiasi, maka saya bersedia menerima segala konsekuensi, termasuk pencabutan gelar akademik, sesuai dengan ketentuan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 16 Oktober 2025

Yang membuat pernyataan,



Renaldi Dimas Kurniawan
(19511136)

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmannirrahiim.

Assalamualaikum warahmatullah wabarakatuh.

Alhamdulillahirabbil'alamiin, segala puji dan syukur atas kehadiran Allah *Subhanahu wa ta'ala* yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah *Waterproofing* Damdex dan Agregat Limbah Terhadap Kuat Tekan Dan Absorpsi Beton” dengan maksimal. Sholawat serta salam selalu dilimpahkan kepada *Rasulullah* Muhammad *Shallallahu 'alaihi wasallam*, keluarga, sahabat dan pengikut beliau hingga akhir zaman.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan pada jenjang Strata Satu (S1) di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penulis menyadari bahwa proses penyusunan Tugas Akhir ini tidak akan berjalan dengan baik tanpa bantuan, arahan, bimbingan, serta masukan dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
2. Ir. Helmy Akbar Bale, M.T. selaku Dosen Pembimbing Proposal Tugas Akhir, terima kasih atas bimbingan, nasihat, saran dan dorongan yang diberikan kepada saya selama penyusunan Proposal Tugas Akhir ini.
3. Jafar, S.T., M.T., MURP selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, terima kasih atas bimbingan, nasihat, saran dan dorongan yang diberikan kepada saya selama penyusunan Tugas Akhir ini.
4. M. Zakki Rizal, Suwarno dan Darussalam, selaku laboran di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT) yang telah membantu penulis selama proses pengumpulan data penelitian.

5. Ibu Suparti dan Bapak Djumadi Nurhadi, ibu dan bapak penulis yang senantiasa memberikan dukungan dan pengorbanan baik secara material maupun spiritual hingga selesainya Tugas Akhir ini.
6. Sri Wedyoko, Trya Kurniawati, Ardhi Setiawan, dan Pravita Kurniasari, kakak-kakak penulis yang selalu memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis.
7. Adinda Syifa Nurazizah, yang selalu memberikan bantuan, menjadi tempat berkeluh kesah, serta menjadi motivasi untuk terus memperjuangkan masa depan. Semoga yang kita cita-citakan terwujud.
8. Raihan Prasetyawan A. selaku teman seperjuangan yang membantu dan membimbing penulis.
9. Hashfi Prasetyo W. S., Hanif Adi H. A., M. Falakh Al-Akbar, Galang Gumilang, M. Mahisal Sofyan dan teman-teman Temanggung atas bantuannya dan menjadi tempat berkeluh kesah untuk penulis.

Akhirnya Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Wassalamualaikum warahmatullah wabarakatuh.

Yogyakarta, 16 Oktober 2025

Penulis,



Renaldi Dimas Kurniawan

19511136

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xv
ABSTRAK	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tinjauan Umum	7
2.2 Penelitian Terdahulu	7
BAB III LANDASAN TEORI	15
3.1 Beton	15
3.2 Bahan Penyusun Beton	15
3.2.1 Agregat	16
3.2.2 Semen <i>Portland</i>	18
3.2.3 Air	20

3.2.4 Bahan Tambah (<i>Admixture</i>)	21
3.3 <i>Waterproofing</i> Damdex	24
3.4 Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	24
3.5 Kuat Tekan Beton	34
3.6 Absorpsi	34
3.7 Umur Beton	35
3.8 Koefisien Korelasi	35
BAB IV METODE PENELITIAN	37
4.1 Umum	37
4.2 Variabel Penelitian	37
4.3 Lokasi Penelitian	38
4.4 Bahan Pembuatan Benda Uji	38
4.5 Alat yang Digunakan	39
4.6 Benda Uji	41
4.7 Persiapan	43
4.7.1 Persiapan Studi Literatur	43
4.7.2 Persiapan Laboratorium	43
4.7.3 Persiapan Alat dan Bahan	44
4.8 Pengujian Agregat	45
4.8.1 Pengujian Agregat Halus	45
4.8.2 Pengujian Agregat Kasar Asli	48
4.8.3 Pengujian Agregat Kasar Limbah Beton	50
4.9 Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	53
4.10 Pembuatan Benda Uji	53
4.11 Pengujian <i>Slump</i>	55
4.12 Perawatan Benda Uji	56
4.13 Pembuatan dan Pengujian Benda Uji <i>Trial</i>	56
4.14 Pengujian Benda Uji	57
4.14.1 Pengujian Kuat Tekan Beton	57

4.14.2 Pengujian Absorpsi Beton	58
4.15 Analisis Hasil	59
4.16 Pembahasan	59
4.17 Kesimpulan dan Saran	59
4.18 Diagram Alir Penelitian	59
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	61
5.1 Hasil Pengujian Agregat	61
5.1.1 Agregat Halus	61
5.1.2 Agregat Kasar Asli	70
5.1.3 Agregat Kasar Limbah Beton	79
5.2 Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	88
5.3 Hasil Pengujian Benda Uji <i>Trial</i>	103
5.4 Hasil Pengujian <i>Slump</i>	104
5.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	107
5.5.1 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Variasi Penambahan Damdex	116
5.5.2 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Umur Beton	120
5.6 Hasil Pengujian Absorpsi Beton	126
5.6.1 Hubungan Absorpsi Beton dengan Variasi Penambahan Damdex	129
5.6.2 Hubungan Absorpsi Beton dengan Umur Uji	133
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	135
6.1 Kesimpulan	135
6.2 Saran	136
DAFTAR PUSTAKA	138
LAMPIRAN	141

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang	13
Tabel 3. 1	Faktor Pengali untuk Deviasi Standar	25
Tabel 3. 2	Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Jenis Semen dan Agregat Kasar yang Digunakan	27
Tabel 3. 3	Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m³) yang Dibutuhkan Untuk Beberapa Tingkat Kemudahan Pengerjaan Adukan Beton	28
Tabel 3. 4	Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan dalam Lingkungan Khusus	29
Tabel 3. 5	Angka Konversi Umur Benda Uji	35
Tabel 3. 6	Pedoman Interpretasi Koefisien Korelasi	36
Tabel 4. 1	Rincian Benda Uji	42
Tabel 5. 1	Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus	62
Tabel 5. 2	Analisa Saringan Agregat Halus	65
Tabel 5. 3	Batas Daerah Gradasi Agregat Halus	66
Tabel 5. 4	Berat Volume Gembur Agregat Halus	69
Tabel 5. 5	Berat Volume Padat Agregat Halus	69
Tabel 5. 6	Lolos Saringan No.200	70
Tabel 5. 7	Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Asli	72
Tabel 5. 8	Analisa Saringan Agregat Kasar Asli	75
Tabel 5. 9	Batas Daerah Gradasi Agregat Kasar	75
Tabel 5. 10	Berat Volume Gembur Agregat Kasar Asli	78
Tabel 5. 11	Berat Volume Padat Agregat Kasar Asli	79
Tabel 5. 12	Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Limbah	80
Tabel 5. 13	Analisa Saringan Agregat Kasar Limbah Beton	84
Tabel 5. 14	Berat Volume Gembur Agregat Kasar Limbah	87
Tabel 5. 15	Berat Volume Padat Agregat Kasar Limbah	88

Tabel 5. 16 Faktor Pengali untuk Deviasi Standar Bila Data Hasil Uji Tersedia Kurang dari 30	89
Tabel 5. 17 Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Jenis Semen dan Agregat Kasar yang Digunakan	90
Tabel 5. 18 Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m³) yang Dibutuhkan Untuk Beberapa Tingkat Kemudahan Pengerjaan Adukan Beton	92
Tabel 5. 19 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan dalam Lingkungan Khusus	93
Tabel 5. 20 Perencanaan Campuran Beton	98
Tabel 5. 21 Volume Beton Normal Setiap Variasi	100
Tabel 5. 22 Proporsi Campuran Beton Normal	101
Tabel 5. 23 Proporsi Campuran Beton dengan Bahan Tambah Damdex <i>Mixing</i> Pertama	103
Tabel 5. 24 Proporsi Campuran Beton dengan Bahan Tambah Damdex <i>Mixing</i> Kedua	103
Tabel 5. 25 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton <i>Trial</i> Terkonversi	104
Tabel 5. 26 Nilai <i>Slump</i> Beton Dengan Agregat Kasar Asli	105
Tabel 5. 27 Nilai <i>Slump</i> Beton dengan Agregat Kasar Limbah Beton	106
Tabel 5. 28 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	110
Tabel 5. 29 Persentase Penurunan Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah Variasi 100% Terhadap Beton Agregat Kasar Asli	115
Tabel 5. 30 Perbandingan Persentase Penurunan Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah Penulis dengan Penelitian Sebelumnya	115
Tabel 5. 31 Persentase Kenaikan Kuat Tekan Beton Penambahan Damdex Terhadap Beton Tanpa Damdex Pada Agregat Kasar Asli	119
Tabel 5. 32 Perbandingan Persentase Kenaikkan Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Asli dengan Variasi Damdex 8% Penulis dan Penelitian Sebelumnya	119
Tabel 5. 33 Persentase Kenaikan Kuat Tekan Beton Penambahan Damdex Terhadap Beton Tanpa Damdex Pada Agregat Kasar Limbah	120

Tabel 5. 34 Persentase Kuat Tekan Beton Agregat kasar Asli Berdasarkan Umur Beton	123
Tabel 5. 35 Persentase Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah Berdasarkan Umur Beton	123
Tabel 5. 36 Selisih Persentase Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Asli pada Umur 7 dan 14 Hari	125
Tabel 5. 37 Selisih Persentase Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah pada Umur 7 dan 14 Hari	125
Tabel 5. 38 Hasil Pengujian Absorpsi Beton	127
Tabel 5. 39 Persentase Penurunan Absorpsi Beton dengan Penambahan Damdex terhadap Beton Dengan Agregat Kasar Asli	131
Tabel 5. 40 Persentase Penurunan Absorpsi Beton dengan Penambahan Damdex terhadap Beton Dengan Agregat Kasar Limbah	132
Tabel 5. 41 Perbedaan Persentase Penurunan Absorpsi Beton Dengan Agregat Kasar Asli Penulis dengan Penelitian Terdahulu	132

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1	Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen	27
Gambar 3. 2	Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm	30
Gambar 3. 3	Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm	31
Gambar 3. 4	Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm	31
Gambar 3. 5	Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Didapatkan	32
Gambar 4. 1	Diagram Alir Penelitian	60
Gambar 5. 1	Kurva Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 1	66
Gambar 5. 2	Kurva Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 2	67
Gambar 5. 3	Kurva Gradasi Agregat Kasar Asli Maksimum 40 mm Sampel 1	76
Gambar 5. 4	Kurva Gradasi Agregat Kasar Asli Maksimum 40 mm Sampel 2	76
Gambar 5. 5	Kurva Gradasi Agregat Kasar Limbah Maksimum 40 mm Sampel 1	85
Gambar 5. 6	Kurva Gradasi Agregat Kasar Limbah Maksimum 40 mm Sampel 2	85
Gambar 5. 7	Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen untuk Benda Uji Silinder Diameter 150 mm, Tinggi 300 mm	91
Gambar 5. 8	Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm	95
Gambar 5. 9	Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan	96
Gambar 5. 10	Hubungan Nilai Slump dengan Variasi Kadar Damdex pada Campuran Beton Agregat Kasar Asli	105

Gambar 5. 11 Hubungan Nilai <i>Slump</i> dengan Variasi Kadar Damdex pada Campuran Beton Agregat KasarLimbah Beton	106
Gambar 5. 12 Hubungan Kuat Tekan Beton Terkonversi dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 7 Hari	116
Gambar 5. 13 Hubungan Kuat Tekan Beton Terkonversi dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 14 Hari	117
Gambar 5. 14 Hubungan Kuat Tekan Beton Terkonversi dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 28 Hari	117
Gambar 5. 15 Hubungan Nilai Kuat Tekan Beton dengan Umur Beton pada Berbagai Variasi Kadar Damdex	121
Gambar 5. 16 Persentase Kuat Tekan Beton Berdasarkan Umur Beton	124
Gambar 5. 17 Hubungan Absorpsi Beton dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 7 Hari	129
Gambar 5. 18 Hubungan Absorpsi Beton dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 14 Hari	130
Gambar 5. 19 Hubungan Absorpsi Beton dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 28 Hari	130
Gambar 5. 20 Hubungan Absorpsi Beton dengan Umur Beton	133

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Izin Penggunaan Laboratorium	142
Lampiran 2 Surat Keterangan Bebas Tanggungan Laboratorium	143
Lampiran 3 Laporan Sementara Hasil Pemeriksaan Agregat	144
Lampiran 4 Laporan Sementara Hasil Perencanaan Campuran	168
Lampiran 5 Laporan Sementara Hasil Pengujian Benda Uji <i>Trial</i>	169
Lampiran 6 Laporan Sementara Hasil Pengujian Kuat Tekan	170
Lampiran 7 Laporan Sementara Hasil Pengujian Absorpsi Beton	174
Lampiran 8 Dokumentasi Peralatan dan Bahan Penelitian	176
Lampiran 9 Dokumentasi Proses Penelitian	192

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

SNI	= Standar Nasional Indonesia
PBI	= Peraturan Beton Indonesia
f'_c	= Kuat tekan beton (MPa)
Mpa	= Megapascal
M	= Nilai Tambah
S_r	= Deviasi standar
f'_{cr}	= Kuat tekan beton rerata yang ditargetkan
w	= Kadar air bebas (kg/m^3)
W_h	= Perkiraan jumlah air untuk agregat halus (kg/m^3)
W_k	= Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar (kg/m^3)
c	= Jumlah semen (kg/m^3)
fas	= Faktor air semen
BJ_{gab}	= Berat jenis gabungan agregat
$BJ_{Ag. Halus}$	= Berat jenis agregat halus
$BJ_{Ag. Kasar}$	= Berat jenis agregat kasar
%Ag. Halus	= Persentase agregat halus (%)
%Ag. Kasar	= Persentase agregat kasar (%)
$W_{Ag. Halus}$	= Kadar agregat halus (kg/m^3)
$W_{Ag. Kasar}$	= Kadar agregat kasar (kg/m^3)
$W_{Ag. Gab}$	= Kadar agregat gabungan (kg/m^3)
P	= Beban maksimum (N)
A	= Luas penampang benda (mm^2)
PA	= Absorpsi beton (%)
B	= Massa contoh uji kering permukaan (gram)
A	= Massa contoh uji kering oven (gram)
mm	= Milimeter
cm	= Centimeter

d	= Diameter tabung silinder (mm)
kg	= Kilogram
m	= Meter
SSD	= <i>Saturated surface dry</i>
R ²	= Koefisien korelasi

ABSTRAK

Tingginya aktivitas konstruksi di Indonesia meningkatkan kebutuhan akan bahan konstruksi, terutama beton. Namun, hal ini juga menyebabkan peningkatan limbah beton. Salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar dalam campuran beton. Namun, penggunaan agregat limbah beton cenderung menurunkan kuat tekan dan meningkatkan absorpsi beton. Oleh karena itu, diperlukan bahan tambah (*admixture*) untuk mengatasi permasalahan tersebut. Bahan tambah *waterproofing* Damdex diketahui dapat meningkatkan kuat tekan beton dan mengurangi absorpsi. Penelitian ini menggunakan Damdex sebanyak 8%, 9%, dan 10% dari berat semen terhadap beton dengan 100% agregat kasar limbah beton. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kuat tekan beton, akselerasi peningkatan kuat tekan, dan absorpsi pada umur 7, 14, dan 28 hari. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen. Perencanaan campuran beton mengacu pada SNI 2834-2000 dengan kuat tekan rencana 25 MPa.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan Damdex mampu meningkatkan kuat tekan beton, terutama pada penambahan 10%. Kuat tekan terkonversi beton agregat kasar limbah beton dengan Damdex 10% pada umur 7, 14, dan 28 hari berturut-turut sebesar 28,844 MPa; 28,759 MPa; dan 28,521 MPa, meningkat 3,808%; 3,824%; dan 2,774% dibandingkan beton agregat kasar asli tanpa Damdex. Akselerasi peningkatan kuat tekan tertinggi terjadi pada beton agregat kasar limbah beton dengan penambahan Damdex 8% dengan kenaikan 1,368% pada umur 7 dan penambahan Damdex 10% dengan kenaikan 1,488% pada umur 14 hari. Hasil pengujian absorpsi menunjukkan bahwa beton agregat kasar limbah beton dengan Damdex 10% mengalami penurunan absorpsi berturut-turut sebesar 46,802%; 48,023% dan 48,013% dibandingkan beton agregat kasar limbah beton tanpa Damdex. Dengan demikian, penggunaan Damdex dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan menurunkan nilai absorpsi pada beton penggunaan agregat kasar limbah beton.

Kata kunci: Beton, Agregat Kasar Limbah Beton, Damdex, Kuat Tekan, Absorpsi,

ABSTRACT

The high level of construction activity in Indonesia increases the demand for construction materials, particularly concrete, while also generating a significant amount of concrete waste. One potential solution is the utilization of recycled concrete waste as a substitute for coarse aggregate in concrete mixtures. However, the use of recycled coarse aggregate tends to reduce compressive strength and increase water absorption. Therefore, the use of admixtures is required to improve concrete performance. Damdex waterproofing admixture is known to enhance compressive strength and reduce water absorption. This study investigated the use of Damdex at dosages of 8%, 9%, and 10% by weight of cement in concrete containing 100% recycled coarse aggregate. Tests were conducted to evaluate compressive strength, acceleration of strength development, and water absorption at curing ages of 7, 14, and 28 days. An experimental method was applied, and the concrete mix design was based on SNI 2834-2000 with a target compressive strength of 25 MPa.

The results indicate that the addition of Damdex improves the compressive strength of concrete, particularly at a dosage of 10%. The converted compressive strengths of recycled coarse aggregate concrete with 10% Damdex at 7, 14, and 28 days were 28.844 MPa, 28.759 MPa, and 28.521 MPa, respectively, representing increases of 3.808%, 3.824%, and 2.774% compared to control concrete with natural coarse aggregate without Damdex. The highest acceleration of strength development occurred at 7 days with 8% Damdex, showing an increase of 1.368%, and at 14 days with 10% Damdex, showing an increase of 1.488%. The water absorption test results show that recycled coarse aggregate concrete with 10% Damdex experienced reductions in water absorption of 46.802%, 48.023%, and 48.013% compared to recycled aggregate concrete without Damdex. Therefore, the use of Damdex waterproofing admixture is effective in improving compressive strength and reducing water absorption in concrete incorporating recycled coarse aggregate.

Keywords: Concrete, Recycled Coarse Aggregate, Damdex, Compressive Strength, Absorption

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di Indonesia konstruksi bangunan seperti gedung, jembatan, dan dermaga dibangun paling banyak menggunakan bahan bangunan dari beton, sehingga menyebabkan peningkatan kebutuhan akan material beton. Peningkatan penggunaan bahan bangunan di Indonesia bisa dilihat dari struktur anggaran di RAPBN 2022, di mana infrastruktur menempati urutan ke-3 dengan besar anggaran mencapai Rp 384,8 triliun (Artada, 2023). Banyaknya jumlah penggunaan beton dalam konstruksi bangunan mengakibatkan peningkatan kebutuhan material penyusun beton salah satunya agregat. Padahal penambangan batuan sebagai salah satu bahan campuran pembuatan beton tersebut secara besar-besaran dapat menyebabkan turunnya jumlah sumber daya alam yang tersedia (Patah & Dasar, 2022).

Meskipun bahan-bahan yang digunakan dalam beton ekonomis, agregat yang dipakai masih dianggap sebagai sumber daya yang tidak dapat diperbaharui. Selain itu, peningkatan kebutuhan agregat umumnya juga meningkatkan harga jual dari material tersebut. Oleh karena itu, diperlukan solusi untuk mengatasi permasalahan kebutuhan agregat tersebut. Di sisi lain, meningkatnya jumlah dari pekerjaan konstruksi meningkatkan limbah konstruksi. Meningkatnya limbah konstruksi ini dihasilkan dari pembongkaran bangunan lama atau pembongkaran karena salah dalam proses pekerjaan, sehingga menghasilkan sisa-sisa pembongkaran beton. Limbah konstruksi tersebut umumnya hanya digunakan sebagai material urugan. Di luar penggunaan tersebut, material limbah konstruksi hanya dibuang begitu saja dan berpotensi memberikan dampak negatif bagi lingkungan.

Untuk mengurangi dampak negatif pada lingkungan dan memperpanjang sumber daya alam yang terbatas, muncul ide untuk memanfaatkan limbah beton menjadi salah satu alternatif sebagai bahan material pengganti agregat. Namun,

penggunaan agregat dari limbah beton dalam campuran beton juga dapat menyebabkan penurunan pada nilai kuat tekan beton. Menurut Kusumawardhana (2018), Penggunaan limbah beton sebagai pengisi campuran beton yaitu agregat kasar pada kadar tertinggi dapat menurunkan nilai kuat tekan. Beton pada variasi campuran limbah beton 100% mengalami penurunan kuat tekan hingga 8,86%. sehingga perlu digunakan bahan tambah *admixture* pada beton untuk meningkatkan kuat tekannya.

Selain itu, pemanfaatan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar juga berpotensi meningkatkan absorpsi pada beton. Nilai absorpsi beton pada agregat limbah variasi 100% mengalami peningkatan dari beton normal sebesar 27,27%. Sehingga dibutuhkan bahan tambah *admixture* untuk dapat menurunkan nilai absorpsi tersebut. Penggunaan bahan tambah *admixture* salah satunya adalah *waterproofing* (Ardiansyah, 2023). *Waterproofing* merupakan suatu metode dengan menambahkan suatu bahan tambah atau bahan kimia yang bersifat cair ke dalam beton segar, sehingga ketika beton telah menjadi keras beton bisa menjadi lebih kedap air dan dapat memperpanjang masa pakai struktur beton dengan mengurangi risiko korosi dan kerusakan akibat kelembapan.

Salah satu bahan *waterproofing* yang banyak beredar di pasaran adalah Damdex. Damdex merupakan jenis bahan tambah yang mampu meningkatkan kuat tekan beton serta menurunkan nilai absorpsi pada beton. Menurut Akbar (2021), penambahan Damdex dengan berbagai kadar pada umur uji 7, 14, dan 28 hari menunjukkan peningkatan kuat tekan beton, terutama pada usia 7 dan 14 hari. Peningkatan paling signifikan terlihat pada beton dengan kadar Damdex tertinggi, di mana nilai kuat tekan mengalami peningkatan secara konsisten dari usia 7 hari hingga 28 hari. Pada hasil penelitian tersebut bahwa penambahan Damdex dapat mempercepat akselerasi peningkatan kuat tekan pada beton hingga hampir 50% pada usia 14 hari. Dengan penambahan bahan tambah *admixture* Damdex, kuat tekan rencana beton dapat tercapai lebih cepat sebelum umur 28 hari. Selain itu, penggunaan bahan tambah *admixture waterproofing* Damdex juga mampu menurunkan nilai absorpsi, khususnya pada penggunaan kadar 8%, yaitu hingga sebesar 43,71% dibandingkan beton normal.

Pada proyek konstruksi khususnya konstruksi bangunan beton bertulang bertingkat, semakin cepat beton mencapai kuat tekan rencananya maka proyek tersebut akan semakin cepat. Konstruksi beton bertulang juga sangat memerlukan kekedapan yang tinggi. Karena jika beton tidak kedap maka dikhawatirkan baja tulangan akan mengalami korosi dan mengakibatkan penurunan kinerja dari beton bertulang tersebut.

Berdasarkan penjelasan sebelumnya dapat disimpulkan untuk penggunaan beton limbah sebagai pengganti agregat pada beton dapat menurunkan kuat tekan dan meningkatkan absorpsi pada beton. Belum ada penelitian terkait penggunaan *waterproofing* Damdex di atas kadar 8%, serta dugaan pengaruhnya pada pengembangan kuat tekan beton pada usia muda, menjadi dasar latar belakang pada penelitian. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menguji pemanfaatan agregat limbah beton dengan mutu K-350 dan penambahan Damdex di atas 8%, melalui pengujian kuat tekan dan absorpsi beton. Penelitian ini bertujuan untuk membuktikan klaim Damdex sebagai bahan anti bocor sekaligus mengevaluasi kemampuannya dalam meningkatkan kuat tekan, akselerasi kuat tekan, serta mengurangi absorpsi beton.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan pada bagian latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka permasalahan dapat dirumuskan sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh penggunaan agregat kasar limbah beton dengan *waterproofing* Damdex dengan kadar 8%, 9%, 10% terhadap kuat tekan dan absorpsi beton?
2. Berapakah kadar penggunaan bahan tambah *waterproofing* Damdex dengan agregat kasar limbah beton pada campuran beton yang menghasilkan peresentase peningkatan kuat tekan beton tertinggi?
3. Berapakah kadar penggunaan bahan tambah *waterproofing* Damdex dengan agregat kasar limbah beton pada campuran beton yang menghasilkan nilai absorpsi terkecil?

4. Bagaimana pengaruh penggunaan agregat kasar limbah beton dengan bahan tambah *waterproofing* Damdex terhadap pengembangan kekuatan beton terkait umur beton?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang dibuat oleh penulis adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh penggunaan agregat kasar limbah beton dengan *waterproofing* Damdex dengan kadar 8%, 9%, 10% terhadap kuat tekan dan absorpsi beton.
2. Mengetahui kadar penggunaan bahan tambah *waterproofing* Damdex dengan agregat kasar limbah beton pada campuran beton yang menghasilkan peresentase peningkatan kuat tekan beton tertinggi.
3. Mengetahui kadar penggunaan bahan tambah *waterproofing* Damdex dengan agregat kasar limbah beton pada campuran beton yang menghasilkan nilai absorpsi terkecil.
4. Mengetahui pengaruh penggunaan agregat kasar limbah beton dengan bahan tambah *waterproofing* Damdex terhadap pengembangan kekuatan beton terkait umur beton.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh melalui penelitian yang dilakukan penulis adalah sebagai berikut.

1. Memberikan informasi tentang penggunaan agregat kasar limbah beton dengan penambahan bahan tambah *waterproofing* Damdex dalam meningkatkan kuat tekan beton dan menjadikan beton lebih kedap air.
2. Memberikan kontribusi pada dunia konstruksi berupa informasi tentang bahan tambah *waterproofing* Damdex dalam mempercepat pengembangan kekuatan beton pada usia muda yang dapat mempersingkat durasi pekerjaan di lapangan.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dibuat agar pada penelitian yang dilakukan oleh penulis tidak menyimpang dari tujuan penelitian. Batasan penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat sebagai berikut.

1. Perencanaan campuran beton berdasarkan SNI 03-2834-2000.
2. Kuat tekan rencana (f'_c) adalah 25 MPa.
3. Semen yang digunakan adalah semen tipe I jenis PCC dengan merek Tiga Roda.
4. Bahan tambah yang digunakan adalah bahan tambah *waterproofing* dengan merek Damdex.
5. Variasi bahan tambah *waterproofing* Damdex 0%, 8%, 9%, 10% terhadap berat semen.
6. Nilai *slump* 10 ± 2 cm.
7. Variasi agregat limbah beton 0% dan 100% terhadap berat agregat kasar.
8. Agregat kasar yang digunakan berukuran maksimum 40 mm.
9. Agregat kasar yang digunakan adalah agregat asli dari Clereng dan agregat kasar dari limbah beton.
10. Agregat kasar dari limbah beton yang digunakan berasal dari bongkaran kolom dan jalan pada Gedung *Main Hall* Gubernur Akademi Militer Magelang dengan mutu rencana K-350.
11. Agregat kasar limbah beton yang digunakan berupa campuran kerikil dan pasta.
12. Agregat halus yang digunakan berasal dari Progo.
13. Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
14. Tidak dilakukan penelitian mengenai kandungan yang terdapat pada bahan tambah kimia *waterproofing* bermerek Damdex.
15. Benda uji yang digunakan terdiri dari benda uji silinder yang berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm dan benda uji kubus yang berukuran 15 x 15 x 15 cm.

16. Pengujian beton dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari.
17. Pengujian agregat kasar limbah beton dilakukan sesuai dengan prosedur pengujian agregat kasar asli.
18. Macam-macam pengujian yang akan dilakukan oleh penulis adalah sebagai berikut.
 - a. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus berdasarkan SNI 1970-2016.
 - b. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar berdasarkan SNI 1969-2016.
 - c. Pengujian analisa saringan agregat halus berdasarkan SNI 03-1968-1990.
 - d. Pengujian analisa saringan agregat kasar berdasarkan SNI 03-1968-1990.
 - e. Pengujian berat volume gembur dan berat volume padat agregat halus yang dilakukan berdasarkan SNI 03-4804-1998.
 - f. Pengujian berat volume gembur dan berat volume padat agregat kasar yang dilakukan berdasarkan SNI 03-4804-1998.
 - g. Pengujian butiran lolos ayakan no. 200 (uji kandungan lumpur dalam pasir) yang dilakukan berdasarkan SNI 03-4142-1996.
 - h. Pengujian slump beton berdasarkan SNI 1972-2008.
 - i. Pengujian kuat tekan beton yang dilakukan berdasarkan SNI 1974-2011.
 - j. Pengujian absorpsi beton menggunakan SNI 6433-2016.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Beton merupakan campuran antara semen, agregat kasar, agregat halus, dan air dengan menggunakan bahan tambah atau tidak yang membentuk massa yang padat yang sering digunakan sebagai bahan untuk konstruksi struktur pada bangunan. Beton merupakan material komposit yang kompleks, faktor yang menjadikan proses pembuatan beton cukup kompleks adalah karena diperlukan ketelitian yang tinggi dalam tahap perencanaan maupun pengolahannya. Komposisi material penyusun beton harus dijaga dengan baik, terutama rasio antara air dan pasta semen yang dalam perencanaan dikenal sebagai faktor air semen (FAS). Selain itu, proses pencampuran (*mixing*) dan pemadatan perlu dilakukan secara tepat agar beton yang dihasilkan memiliki kepadatan dan kekuatan yang optimal. (Ardiansyah, 2023).

Bahan tambah yang digunakan bisa berupa bahan kimia dan lain sebagainya dengan perbandingan tertentu. Yang dimaksud dengan bahan tambah adalah zat kimia tambahan yang berfungsi sebagai bahan pendukung dalam proses pembuatan beton. Zat ini ditambahkan ke dalam campuran beton baik sebelum maupun selama proses pengecoran berlangsung. Bahan ini merupakan bahan tambah yang bukan merupakan komponen wajib untuk beton. Salah satu contoh bahan tambah *admixture* yang digunakan adalah Damdex karena dapat menurunkan absorpsi dan meningkatkan kuat tekan pada beton.

2.2 Penelitian Terdahulu

Berikut ini merupakan perbandingan dari beberapa penelitian terdahulu dengan penelitian yang akan dilakukan oleh penulis.

1. Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Beton Normal Terhadap Kuat Tekan Dan Modulus Elastisitas

Pada penelitian yang dilakukan Soelarso (2016), perencanaan campuran beton dilakukan sesuai dengan SNI 03-2834-2000. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penggunaan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar pada kuat tekan beton normal, modulus elastisitas, kadar paling optimum limbah beton yang digunakan sebagai pengganti agregat kasar. Benda Uji yang digunakan adalah silinder 15 cm x 30 cm. Pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari. Kuat tekan rencana f'_c 25 MPa. Kadar Penggunaan limbah beton bervariasi antara 25%, 50%, 75%, hingga 100% dari total berat agregat kasar alami. Ukuran Agregat kasar maksimum yang digunakan berukuran 40 mm. Hasil pengujian pada usia 28 hari menunjukkan variasi agregat limbah 25% mengalami penurunan kuat tekan terhadap beton normal teoritis yaitu 45,39%. Untuk variasi agregat limbah beton 50% mengalami penurunan kuat tekan terhadap beton normal teoritis yaitu 56,99%. Untuk variasi agregat limbah beton 75% juga mengalami penurunan kuat tekan terhadap beton normal teoritis yaitu 61,65%. Sedangkan untuk penggunaan variasi agregat limbah beton tertinggi yaitu 100% juga mengalami penurunan kuat tekan terhadap beton normal teoritis sebesar 66,62%. Dari hasil penelitian tersebut, semakin bertambah variasi agregat limbah beton yang digunakan dapat mempengaruhi kuat tekan yang terjadi. Hal ini disebabkan agregat daur ulang memiliki beberapa kualitas, sifat fisik dan kimia. Variabilitas kualitas ini mengakibatkan perbedaan sifat-sifat material beton yang dihasilkan dan cenderung menurunkan kuat tekan beton.

2. Pengaruh Penggunaan Agregat Kasar Beton Limbah Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Normal

Pada penelitian yang dilakukan Kusumawardhana dan Teguh (2018), perencanaan campuran beton dilakukan sesuai dengan standar SNI 03-2834-2000. Penelitian ini menggunakan kuat tekan rencana 25 MPa. Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa silinder dengan 15 cm x 30 cm. Pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari. Agregat kasar limbah yang digunakan berasal dari beton dengan mutu 45 MPa. Ukuran agregat kasar

maskimum yang digunakan berukuran 40 mm. Persentase penggunaan limbah beton bervariasi mulai dari 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100%. Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa pada variasi campuran sebesar 10% dan 20%, nilai kuat tekan beton belum mencapai kuat tekan rencana yaitu 25 MPa. Peningkatan kuat tekan beton mulai terlihat pada variasi campuran 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80% jika dibandingkan dengan beton kontrol. Namun demikian, pada variasi campuran 90% dan 100%, nilai kuat tekan beton mengalami penurunan. Hasil ini menunjukkan bahwa campuran yang baik digunakan untuk agregat kasar limbah adalah pada variasi sebesar 40%. Sedangkan beton dengan variasi campuran limbah beton 100% mengalami penurunan kuat tekan dari kuat tekan kontrol hingga 8,86%. Pengganti sebagian atau keseluruhan agregat kasar limbah beton dengan nilai faktor air semen (FAS) tetap terbukti mempengaruhi nilai slump dan kekuatan beton. Hal ini dipengaruhi oleh besarnya nilai penyerapan air pada agregat kasar limbah beton yang lebih besar hampir $\pm 2x$ lipat dengan penyerapan air agregat kasar alami. Pada variasi 90% dan 100% nilai kuat tekan beton menurun, hal ini disebabkan material yang digunakan keseluruhan agregat kasar dari beton limbah, sehingga air banyak terserap oleh pasta pada agregat kasar beton limbah dan menyebabkan penurunan kualitas kuat tekan beton.

3. Pengaruh Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Kekuatan Beton

Pada penelitian yang dilakukan Patah & Dasar (2022), menggunakan benda uji kuat tekan rencana 25 MPa. Persentase penggunaan limbah beton bervariasi mulai dari 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% dari berat total agregat kasar alami. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 7 dan 28 hari. Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa silinder dengan 10 cm x 20 cm. Agregat kasar limbah yang digunakan berasal dari beton dengan mutu K-300. Ukuran agregat kasar maskimum yang digunakan berukuran 20–30 mm. Dari hasil penelitian, limbah beton dapat digunakan dalam campuran beton ditinjau pada peningkatan kekuatan dan pemanfaatan limbah beton.

Kekuatan beton meningkat dengan penggunaan limbah beton dengan variasi optimum penggantian agregat kasar sebesar 10% dengan kuat tekan mencapai 40,03 MPa pada umur 28 hari dengan persentase kenaikan 16,4% dari beton normal. Kemudian, campuran beton yang mengandung agregat limbah beton variasi 40% hanya dapat mencapai tingkat kekuatan 93,7% dari beton normal yaitu sebesar 32,22 MPa atau mengalami penurunan sebesar 6,30% dari kuat tekan beton normal 34,39 MPa. Kuat tekan beton meningkat pada penggunaan limbah beton variasi 10%, hal ini terjadi karena sisa-sisa semen lama yang tidak terdehidrasi pada permukaan partikel agregat limbah beton yang bereaksi dengan air sehingga meningkatkan laju pengembangan kekuatan. Sedangkan untuk penggunaan agregat limbah beton 20-40% mengalami sedikit penurunan kurang lebih 1,5%-6,3% dari beton normal, hal ini dikarenakan dengan kehadiran dua jenis zona transisi antarmuka (ITZ).

4. Pengaruh Variasi Kadar Bahan Tambah *Waterproofing* Damdex Terhadap Kuat Tekan Dan Absorpsi Beton

Pada penelitian yang dilakukan Akbar (2021), perencanaan campuran beton menggunakan SNI 03- 2834-2000. Kuat tekan rencana yang digunakan 25 Mpa. Benda uji yang digunakan silinder 15 cm x 30 cm dan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Ukuran agregat kasar maksimum yang digunakan berukuran 20 mm. Persentase variasi penggunaan *waterproofing* Damdex 0%, 5%, 6%, 7%, dan 8% terhadap berat semen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tekan beton, laju peningkatan kuat tekan, serta nilai absorpsi beton pada umur 7, 14, dan 28 hari. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa terjadi peningkatan kuat tekan yang cukup signifikan pada beton berumur 7 dan 14 hari. Persentase kuat tekan pada beton dengan bahan tambah *waterproofing* Damdex variasi 8% pada usia 7 hari terjadi peningkatan sebesar 67,12% dan pada usia 14 hari sebesar 90,62%. Selain itu, penggunaan bahan tambah *waterproofing* Damdex juga mengakibatkan penurunan absorpsi pada beton. Penurunan absorpsi dengan nilai terkecil pada penggunaan *waterproofing* Damdex pada usia 28 terjadi pada variasi 8% sebesar 2,247%. Dari hasil pengujian tersebut didapatkan bahwa semakin

besar kadar *waterproofing* Damdex dapat meningkatkan kuat tekan pada beton dan menurunkan absorpsi pada beton. Peningkatan kuat tekan beton tersebut disebabkan oleh peran Damdex yang berfungsi mengisi pori-pori dalam beton serta mengurangi kandungan udara di dalamnya. Selain itu, Damdex juga berperan sebagai *accelerator*, yaitu bahan yang mempercepat proses pengerasan beton. Penurunan nilai absorpsi terjadi karena pada berat volume beton yang relatif sama, pori-pori pada beton normal terisi penuh oleh air, sedangkan pada beton dengan tambahan Damdex sebagian air tersebut tergantikan oleh cairan Damdex yang berfungsi sebagai pengisi pori. Hasil ini sejalan dengan klaim Damdex yang berperan sebagai bahan anti bocor.

5. Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah *Waterproofing* Damdex Dan Agregat Limbah Beton Terhadap Kuat Tekan Dan Absorpsi Beton

Pada penelitian yang dilakukan Ardiansyah (2023), perencanaan campuran beton dilakukan sesuai dengan SNI 03- 2834-2000. Penelitian ini menggunakan kuat tekan rencana 25 MPa. Benda uji yang digunakan adalah silinder 15 cm x 30 cm dan kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm. Kadar penggunaan limbah beton adalah 0% dan 100% dari berat total agregat kasar alami. Ukuran maksimum agregat yang digunakan berukuran 20 mm. Agregat Limbah beton yang digunakan berasal dari sampel hasil pengujian kuat tekan rencana 20 MPa. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Variasi kadar bahan tambah *waterproofing* Damdex yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar 0%, 4%, 5%, dan 6% dari berat total semen. Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, penggunaan beton limbah sebagai pengganti agregat kasar variasi 100% dengan *waterproofing* Damdex variasi 0% pada usia 28 hari menurunkan kuat tekan hingga 23,03% dari beton kontrol dan meningkatkan absorpsi 27,27% dari beton kontrol. Untuk penggunaan agregat limbah variasi 100% dengan tambahan bahan tambah *waterproofing* Damdex yang memiliki nilai kuat tekan tinggi dan absorpsi terendah adalah pada variasi *waterproofing* Damdex 6%, kuat tekan meningkat hingga 1,55% terhadap beton kontrol dan menurunkan absorpsi hingga 21,77% dari beton kontrol. Pada hal ini disebabkan oleh peningkatan

kuat tekan beton yang menggunakan agregat limbah, yang cenderung naik seiring dengan bertambahnya ukuran agregat yang digunakan. Hal tersebut dikarenakan agregat limbah berukuran lebih besar memiliki kandungan mortar yang melekat pada ukuran agregat yang lebih besar juga dan berlaku sebaliknya. Selain itu menggunakan ukuran agregat maksimum 40 mm dan menggunakan limbah beton produksi 30-40 MPa dapat meningkatkan 7% kuat tekan beton dengan agregat limbah dibandingkan dengan agregat limbah yang diproduksi dari beton dengan kuat tekan 20-30 MPa pada tingkat penggantian yang sama.

Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian sebelumnya, penulis melakukan studi lanjutan dengan pendekatan yang berbeda. Penelitian ini dilakukan dengan menambahkan bahan tambah *waterproofing* Damdex pada campuran beton dengan variasi kadar 0%, 8%, 9%, dan 10% dari berat semen. Pada penelitian sebelumnya menggunakan bahan tambah *waterproofing* Damdex dengan variasi 4% hingga 8% dapat menurunkan absorpsi dan meningkatkan nilai kuat tekan pada beton, masih belum diketahui nilai kuat tekan optimum, sehingga penulis bereksperimen menggunakan bahan tambah *waterproofing* Damdex dengan kadar variasi 0%, 8%, 9% dan 10% untuk mengetahui nilai kuat tekan optimum pada beton. Kemudian dibuat dengan menggunakan agregat limbah beton yang divariasikan sebesar 0% dan 100%. Mutu beton rencana yang digunakan sebesar 25 MPa. Pengujian yang dilakukan meliputi kuat tekan dan absorpsi beton. Benda uji yang digunakan untuk pengujian kuat tekan silinder berdiameter 15 cm dengan tinggi 30 cm, sedangkan untuk pengujian absorpsi digunakan benda uji berbentuk kubus berukuran 15 cm × 15 cm × 15 cm. Pengujian dilakukan pada umur beton 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Sementara itu, pada penelitian sebelumnya, variasi penggunaan agregat limbah beton berkisar antara 0% hingga 100%, dengan mutu beton rencana 25 MPa dan ukuran maksimum agregat kasar limbah beton berkisar antara 20–30 mm. Sedangkan penulis menggunakan variasi 0% dan 100% dengan mutu beton rencana 25 MPa dengan ukuran agregat kasar maksimum berukuran 40 mm. Berdasarkan penjelasan tersebut, penelitian yang dilaksanakan dapat dinyatakan memiliki tingkat keaslian yang dapat dipertanggungjawabkan.

Tabel 2. 1 Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang

Peneliti	Soelarso dkk (2016)	Kusumawardhana dkk (2018)	Akbar (2021)	Patah dkk (2022)	Ardiansyah (2022)	Penulis
Judul Penelitian	Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Beton Normal Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas	Pengaruh Penggunaan Agregat Kasar Beton Limbah Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Normal	Pengaruh Variasi Kadar Bahan Tambah <i>Waterproofing</i> Damdex Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton	Pengaruh Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar pada Kekuatan Beton	Pengaruh Penggunaan bahan Tambah <i>Waterproofing</i> Damdex dan Agregat Limbah Beton Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton	Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Dengan Penambahan <i>Waterproofing</i> Damdex Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton
Tujuan Penelitian	Mengetahui nilai kuat tekan dan modulus elastisitas pada penggunaan limbah beton sebagai pengganti agregat kasar	Mengetahui nilai kuat tekan dan kuat tarik beton dengan penggunaan agregat limbah beton	Mengetahui kuat tekan beton, laju peningkatan kuat tekan, serta nilai absorpsi beton pada umur 7, 14, dan 28 hari.	Mengetahui nilai kekuatan beton dengan penggunaan agregat limbah beton	Mengetahui kuat tekan dan absorpsi beton dengan agregat limbah beton dengan penambahan bahan tambah <i>waterproofing</i> Damdex.	Mengetahui kuat tekan dan absorpsi, akselerasi peningkatan kuat tekan dan absorpsi beton pada umurr 7, 14, dan 28 hari
Kuat Tekan Rencana	25 MPa	25 MPa	25 MPa	25 MPa	25 MPa	25 MPa
Kadar Agregat Limbah Beton	25%, 50%, 75%, dan 100%	0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100%	-	0%, 10%, 20%, 30%, dan 40%	0% dan 100%	0% dan 100%
Mutu Limbah Beton	(tidak diketahui)	45 MPa	-	K-300	20 MPa	K-350
Ukuran Maksimum Agregat Kasar Limbah	40 mm	40 mm	20 mm	20 mm - 30 mm	20 mm	40 mm
Kadar <i>Waterproofing</i>	-	-	5%, 6%, 7% dan 8%	-	0%, 4%, 5% dan 6%	0%, 8%, 9%, dan 10%,
Jenis Pengujian	Kuat tekan dan modulus elastisitas	Kuat tekan dan kuat tarik	Kuat tekan dan absorpsi beton	Kuat tekan dan modulus elastistas	Kuat tekan dan absorpsi beton	Kuat tekan dan absorpsi beton
Benda Uji	Silinder 15 cm x 30 cm	Silinder 15 cm x 30 cm	Silinder 15 cm x 30 cm dan Kubus 15 cmx 15 cm x 15 cm	Silinder 100 mm x 200 mm	Silinder 15 cm x 30 cm dan Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm	Silinder 15 cm x 30 cm dan Kubus 15 cm x 15 cm x 15 cm
Umur Beton	7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari	28 hari	7 hari, 14 hari, dan 28 hari	7 hari dan 28 hari	7 hari, 14 hari, dan 28 hari	7 hari, 14 hari, dan 28 hari

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbedaan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Sekarang

Peneliti	Soelarso dkk (2016)	Kusumawardhana dkk (2018)	Akbar (2021)	Patah dkk (2022)	Ardiansyah (2022)	Penulis
Hasil Pengujian	Pada penggunaan agregat limbah, kuat tekan cenderung menurun seiring dengan bertambahnya persentase agregat limbah dengan rata-rata penurunan terendah terjadi pada agregat limbah beton variasi 25% sebesar 45,39%, agregat limbah beton variasi 50% sebesar 56,99%, lalu agregat limbah beton variasi 75% sebesar 61,65% dan penurunan terbesar pada agregat limbah beton variasi 100% sebesar 66,62%. Dari hasil kuat tekan, variasi agregat limbah beton 25% adalah kadar paling optimum sebagai pengganti agregat kasar.	Pada variasi campuran 10% dan 20%, kuat tekan beton belum mencapai target kuat tekan rencana sebesar 25 MPa. Peningkatan kuat tekan pada beton dengan agregat limbah dibandingkan beton kontrol terjadi pada variasi campuran 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, dan 80%. Namun, pada variasi 90% dan 100%, kuat tekan beton kembali mengalami penurunan. Adapun hasil optimum untuk penggunaan agregat kasar limbah beton diperoleh pada variasi 40%.	- Penggunaan Damdex pada campuran beton menunjukkan peningkatan kuat tekan yang signifikan pada umur 7 dan 14 hari, dengan kenaikan pada umur 14 hari yang lebih tinggi dibandingkan umur 7 hari. Kadar Damdex optimum diperoleh pada variasi 5%, dengan persentase peningkatan kuat tekan sebesar 68,36% pada umur 7 hari dan 91,78% pada umur 14 hari. - Nilai absorpsi beton dengan penambahan Damdex menunjukkan kecenderungan menurun. Pada umur 7 dan 14 hari, hasil pengujian berturut-turut menunjukkan bahwa pada variasi 0% Damdex diperoleh nilai sebesar 4,298% dan 4,046%; pada variasi 5% sebesar 2,736% dan 2,740%; pada variasi 6% sebesar 2,687% dan 2,553%; pada variasi 7% sebesar 2,586% dan 2,553%; serta pada variasi 8% sebesar 2,560% dan 2,411%.	Terjadi peningkatan kekuatan pada beton dengan penggunaan agregat limbah beton dengan variasi optimum penggantian agregat kasar sebesar 10% dengan kuat tekan mencapai 40,03 MPa pada umur 28 hari dengan persentase kenaikan 16,4% dari beton normal. Kemudian, campuran beton yang mengandung agregat limbah hingga 40% hanya dapat mencapai tingkat kekuatan antara 93,7% hingga 98,5% mendekati dengan kuat tekan beton normal 34,39 MPa	- Terjadi penurunan kuat tekan pada penggunaan agregat limbah beton variasi 100% dan kadar Damdex 0% pada usia 28 hari didapatkan presentase penurunan sebesar 23,04% terhadap beton kontrol. Sedangkan peningkatan kuat tekan tertinggi terjadi pada penggunaan agregat limbah variasi 100% dengan variasi Damdex 6% pada usia 28 hari terjadi peningkatan sebesar 1,53% dari beton kontrol. - Peningkatan absorpsi tertinggi terjadi pada penggunaan agregat limbah variasi 100% dengan variasi Damdex 0% pada usia 28 hari didapatkan presentase peningkatan 27,27%. Penurunan absorpsi terendah terjadi pada penggunaan agregat limbah variasi 100% terjadi pada variasi 6% Damdex dengan presentase 21,77% dari beton kontrol.	- Terjadi penurunan kuat tekan pada penggunaan agregat kasar limbah beton variasi 100% dengan Damdex variasi 0% pada usia 28 hari didapatkan persentase penurunan sebesar 15,603% terhadap beton kontrol. Sedangkan penggunaan beton agregat kasar limbah peningkatan kuat tekan paling tinggi terjadi pada penambahan Damdex variasi 10% pada usia 28 hari terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 21,775%. - Absorpsi tertingi terjadi pada penggunaan agregat kasar limbah variasi 100% tanpa Damdex pada usia 7 hari, 14 hari, dan 28 hari secara berturut-turut adalah sebesar 6,26%, 6,10%, dan 5,97%. Penurunan absorpsi terendah terjadi pada penggunaan agregat kasar limbah variasi 100% terjadi pada Damdex variasi 10% dengan persentase penurunan pada 7 hari, 14 hari, dan 28 hari secara berturut-turut sebesar 46,80%, 48,02%, 48,01%.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Beton

Beton adalah campuran antara semen *portland* atau semen hidraulik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air dengan atau tanpa bahan tambah membentuk massa padat (SNI 03-2834, 2000). Mutu pada beton dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya mutu material penyusun, proses perencanaan, pengolahan, serta pengangkutannya. Untuk mencapai mutu beton yang diinginkan, setiap material penyusun harus memenuhi standar yang telah ditetapkan. Dalam tahap perencanaan, proporsi pencampuran material perlu disesuaikan dengan mutu yang ditargetkan. Selanjutnya, proses pencampuran dan pengadukan harus dilakukan secara tepat dan merata agar diperoleh beton dengan kualitas yang baik. Setelah mutu beton tercapai, tahap pengangkutan juga perlu diperhatikan untuk mencegah terjadinya kerusakan. Meskipun beton tergolong material yang mudah dibuat, diperlukan ketelitian dan perhatian khusus guna memastikan serta mempertahankan kualitasnya (Ardiansyah, 2023).

Beton normal memiliki berat volume ± 2400 kg/m, beton ini adalah yang paling umum digunakan. Untuk keperluan struktural, mutu beton diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu sebagai berikut. Beton mutu rendah, memiliki kuat tekan karakteristik $F'_c < 20$ MPa. Beton normal (beton biasa) memiliki kuat tekan karakteristik $20 \leq F'_c \leq 40$ MPa. Beton mutu tinggi memiliki kuat tekan karakteristik $F'_c > 40$ MPa (Maryoto, 2018).

3.2 Bahan Penyusun Beton

Beton terdiri atas tiga komponen utama, yaitu semen *portland*, agregat, dan air. Penambahan bahan tambah (*admixture*) digunakan sebagai alternatif untuk memberikan sifat-sifat khusus pada campuran beton yang akan diproduksi. Setiap bahan penyusun memiliki fungsi dan proporsi tertentu yang mengacu pada standar

perencanaan pembuatan beton. Beton dikategorikan berkualitas baik apabila setiap butiran agregat tertutup sempurna oleh mortar (campuran semen, air, dan agregat halus), serta seluruh rongga antar agregat terisi dengan baik oleh mortar. Dengan demikian, mutu mortar sangat berpengaruh terhadap mutu keseluruhan beton (Nurchahyo, 2023).

3.2.1 Agregat

Pada campuran beton terbagi atas agregat halus dan agregat kasar. Agregat akan mengisi 70-80% dari seluruh volume beton, sehingga sifat agregat akan sangat mempengaruhi kekuatan beton yang diperoleh. Salah satu sifat agregat yang akan mempengaruhi kuat tekan beton adalah kekuatan agregat itu sendiri. Secara fungsional, agregat berperan sebagai bahan pengisi dalam campuran beton, namun karena proporsinya yang cukup dominan, karakteristik agregat tersebut sangat memengaruhi sifat dan mutu beton yang dihasilkan. (Maryoto, 2018). Penjelasan mengenai agregat halus dan agregat kasar dapat dilihat sebagai berikut.

1. Agregat Halus

Menurut SNI 03-2834 (2000), agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil pecahan alami dari batu atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 5,0 mm. Menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia PBI (1971), persyaratan agregat halus untuk campuran beton adalah sebagai berikut.

- a. Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam sebagai hasil dari desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu.
- b. Agregat halus merupakan butiran yang keras dan tajam serta tidak mudah hancur akibat pengaruh cuaca.
- c. Kandungan lumpur dalam agregat halus tidak boleh melebihi 5% dari berat agregat kering. Jika melebihi batas tersebut, agregat halus harus dicuci terlebih dahulu sebelum digunakan.
- d. Agregat halus tidak diperkenankan mengandung bahan organik dalam jumlah berlebihan.

- e. Agregat halus terdiri atas butiran dengan ukuran bervariasi dan harus memenuhi ketentuan hasil pengayakan sebagai berikut:
 - 1) Sisa pada ayakan 4 mm minimal 2% dari berat agregat.
 - 2) Sisa pada ayakan 1 mm minimal 10% dari berat agregat.
 - 3) Sisa pada ayakan 0,25 mm berada pada kisaran 80%–90% dari berat agregat.
- f. Pasir laut tidak disarankan digunakan pada semua mutu beton, kecuali apabila terdapat rekomendasi resmi dari lembaga pengujian bahan yang berwenang.

2. Agregat Kasar Asli

Menurut SNI 03-2834 (2000), agregat kasar adalah material berupa kerikil alami hasil pelapukan batuan atau batu pecah yang diperoleh dari proses pemecahan batu secara mekanis, dengan ukuran butir berkisar antara 5 mm hingga 40 mm. Menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia PBI (1971), persyaratan agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton adalah sebagai berikut.

- a. Agregat kasar dapat berupa kerikil hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh melalui proses pemecahan batu. Secara umum, agregat kasar merupakan material dengan ukuran butir lebih dari 5 mm.
- b. Agregat kasar harus terdiri atas butiran yang keras, padat, dan tidak berpori. Penggunaan butiran pipih diperbolehkan apabila jumlahnya tidak melebihi 20% dari total berat agregat. Selain itu, agregat kasar tidak boleh mudah pecah atau hancur akibat pengaruh cuaca.
- c. Kandungan lumpur dalam agregat kasar tidak boleh melebihi 1%. Jika kadar lumpur melampaui batas tersebut, maka agregat harus dicuci terlebih dahulu sebelum digunakan.
- d. Agregat kasar tidak diperkenankan mengandung zat-zat yang dapat merusak beton.
- e. Tingkat kekerasan butir agregat kasar diuji menggunakan mesin Los Angeles, dengan batas kehilangan berat maksimum sebesar 50%.

- f. Agregat kasar harus memiliki gradasi butiran yang bervariasi dan memenuhi ketentuan berikut:
 - 1) Sisa di atas ayakan 31,5 mm harus 0% dari total berat agregat.
 - 2) Sisa di atas ayakan 4 mm harus berada dalam kisaran 90%–98% dari total berat agregat.
 - 3) Selisih antara sisa kumulatif pada dua ayakan berurutan harus berada antara 10% hingga 60% dari total berat agregat.
- g. Ukuran maksimum butir agregat tidak boleh melebihi seperlima jarak terkecil antara sisi cetakan, sepertiga tebal pelat, atau tiga perempat jarak bersih minimum antar tulangan atau bekas tulangan.

3. Agregat Kasar Limbah Beton

Limbah beton merupakan material hasil olahan dari beton bekas yang dihancurkan menggunakan mesin *stone crusher* hingga mencapai ukuran maksimum sekitar 2–4 cm, sesuai kebutuhan. Limbah beton yang telah diolah dengan ukuran tersebut dapat dimanfaatkan kembali sebagai agregat kasar dalam pembuatan beton baru. Agar layak digunakan, agregat kasar dari limbah beton harus memenuhi ukuran standar 2–4 cm serta memenuhi persyaratan teknis tertentu agar kualitas dan kinerja beton yang dihasilkan tetap sesuai dengan standar yang diharapkan (Tjokrodimuljo, 1996).

- a. Memiliki butiran yang tajam, kuat, dan keras untuk menghasilkan beton dengan tingkat kekerasan yang baik.
- b. Tidak berpori, karena agregat kasar yang berpori dapat menyebabkan beton menjadi kurang kedap air.
- c. Butirannya harus bersifat kekal, artinya tidak mudah pecah atau hancur akibat perubahan kondisi cuaca.
- d. Kadar lumpur yang terkandung tidak boleh melebihi 1% dari total berat agregat.

3.2.2 Semen *Portland*

Semen *portland* merupakan semen hidrolis yang diperoleh melalui proses penggilingan terak semen *portland*, yang pada dasarnya tersusun atas kalsium silikat bersifat hidrolis, kemudian digiling bersama bahan tambahan berupa satu

atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat, serta dapat pula dicampurkan bahan tambah lainnya (SNI 2049, 2015). Semen merupakan salah satu komponen utama penyusun beton yang berfungsi merekatkan butiran agregat serta mengisi rongga di antara butiran tersebut. Secara umum, beton mengandung sekitar 10% semen dan memiliki pasta semen (campuran semen dan air) sebesar 25%–40%. Secara umum, semen dibedakan menjadi dua jenis, yaitu semen non-hidrolik dan semen hidrolik. Semen non-hidrolik adalah semen yang tidak dapat mengikat maupun mengeras di dalam air, namun dapat mengeras ketika berada di udara. Sementara itu, semen hidrolik adalah semen yang mampu mengikat dan mengeras meskipun berada dalam air. Semen *portland* termasuk ke dalam jenis semen hidrolik dan merupakan tipe semen yang paling banyak digunakan dalam pembuatan beton. Semen *portland* digunakan secara luas karena beton yang dihasilkan memiliki sifat yang sangat serbaguna sebagai material konstruksi (Ardiansyah, 2023).

Menurut SNI 2049 (2015), semen *portland* terbagi menjadi lima jenis berdasarkan penggunaannya, yaitu sebagai berikut.

1. Jenis I

Semen *portland* jenis I adalah semen *portland* yang penggunaannya tidak membutuhkan syarat atau karakteristik khusus.

2. Jenis II

Semen *portland* jenis II adalah semen *portland* yang dalam aplikasinya memerlukan ketahanan terhadap serangan sulfat atau memiliki kalor hidrasi yang sedang.

3. Jenis III

Semen *portland* jenis III adalah semen *portland* yang penggunaannya membutuhkan perkembangan kekuatan yang tinggi pada tahap awal setelah proses pengikatan berlangsung.

4. Jenis IV

Semen *portland* jenis IV adalah semen *portland* yang dalam penerapannya memerlukan tingkat kalor hidrasi yang rendah.

5. Jenis V

Semen *portland* jenis V adalah semen *portland* yang digunakan pada kondisi yang memerlukan ketahanan sangat tinggi terhadap serangan sulfat.

3.2.3 Air

Air yang dipakai dalam proses pembuatan maupun perawatan beton tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat merusak beton ataupun baja tulangan, seperti asam, minyak, garam, alkali, serta bahan organik. Air yang digunakan sebaiknya dalam kondisi bersih dan layak konsumsi (Peraturan Beton Bertulang Indonesia PBI, 1971). Air merupakan komponen yang sangat penting dalam proses pencampuran beton. Ketika air dicampurkan dengan semen, akan terbentuk pasta semen (Nurchahyo, 2023). Jumlah air dalam campuran beton menjadi aspek yang harus diperhatikan karena berkaitan dengan perbandingan air dan semen. Hal ini berhubungan dengan pembentukan pasta semen yang merupakan hasil dari reaksi kimia antara air dan semen. Kelebihan air dapat menimbulkan gelembung air setelah hidrasi berakhir, sementara kekurangan air dapat menghambat proses hidrasi sehingga tidak berlangsung secara sempurna (Ardiansyah, 2023).

Menurut SNI 7974 (2018), Persyaratan air yang digunakan untuk campuran beton dengan semen hidraulis adalah sebagai berikut.

1. Air pencampur dapat meliputi air sebagai berikut.
 - a. Air untuk pengadukan (air yang ditimbang atau diukur di *batching plant*)
 - b. Es
 - c. Air yang ditambahkan oleh operator truk
 - d. Air bebas pada agregat-agregat
 - e. Air yang masuk dalam bentuk bahan-bahan tambahan, apabila air ini dapat meningkatkan rasio air semen lebih dari 0,01
2. Air minum boleh digunakan sebagai air pencampur beton tanpa diuji
3. Air yang merupakan campuran antara air yang dapat diminum dengan yang tidak dapat diminum atau air yang tidak dapat diminum atau campuran antara air yang tidak dapat diminum harus memenuhi persyaratan SNI 7974-2018 untuk dapat digunakan.

3.2.4 Bahan Tambah (*Admixture*)

Menurut SNI 2495 (1991), bahan tambah adalah suatu bahan berupa bubuhan atau cairan yang dibubuhkan kedalam campuran beton selama pengadukan dalam jumlah tertentu untuk merubah beberapa sifatnya. Menurut Ardiansyah (2023), *admixture* merupakan bahan tambahan yang dicampurkan ke dalam adukan beton baik sebelum, selama, maupun setelah proses pengadukan berlangsung. Tujuan penambahan *admixture* adalah untuk memodifikasi sifat dan karakteristik beton agar diperoleh beton dengan kualitas dan performa tertentu. Namun demikian, penggunaannya perlu diawasi secara cermat karena dosis yang berlebihan dapat menurunkan mutu beton yang dihasilkan.

Menurut Mulyono T. (2015), menyatakan alasan penambahan bahan tambah *admixture* sebagai berikut.

1. Memodifikasi beton segar, mortar dan *grouting*

Adapun bentuk modifikasi yang dapat dilakukan pada beton segar, mortar, dan *grouting* adalah sebagai berikut.

- a. Meningkatkan kemudahan dalam pengerjaan tanpa menambah kadar air atau mengurangi kadar air dengan tetap mempertahankan kemudahan pengerjaan yang sama.
- b. Mengatur waktu pengikatan awal beton, baik dengan mempercepat maupun memperlambat proses tersebut.
- c. Mengurangi atau mencegah terjadinya perubahan volume atau penyusutan pada beton.
- d. Meminimalkan terjadinya segregasi pada campuran.
- e. Meningkatkan sifat alir, daya penetrasi, dan kemampuan pemompaan beton segar.
- f. Mengurangi kehilangan nilai *slump* selama proses pengerjaan.

2. Memodifikasi beton keras, mortar dan *grouting*

Adapun bentuk modifikasi yang dapat dilakukan pada beton keras, mortar, dan *grouting* adalah sebagai berikut.

- a. Mengurangi atau menahan laju evolusi panas pada tahap pengerasan awal (beton muda).

- b. Mempercepat perkembangan kekuatan beton pada umur awal.
- c. Meningkatkan kekuatan beton, baik kuat tekan, kuat lentur, maupun kuat geser.
- d. Meningkatkan keawetan beton terhadap pengaruh lingkungan, termasuk serangan garam sulfat.
- e. Mengurangi kapilaritas air dalam beton.
- f. Menurunkan tingkat permeabilitas beton.
- g. Mengendalikan pengembangan akibat reaksi alkali dari agregat.
- h. Menghasilkan struktur beton dengan kualitas yang lebih baik.
- i. Meningkatkan kekuatan ikatan antara beton dan tulangan baja.
- j. Meningkatkan ketahanan terhadap gaya benturan (*impact*) berulang dan abrasi.
- k. Mencegah terjadinya korosi pada baja tulangan (*embedded metal*).
- l. Memberikan variasi warna tertentu pada beton atau mortar sesuai kebutuhan estetika.

Menurut SNI 2495 (1991), Jenis bahan tambah dikelompokkan menjadi dua dapat dilihat sebagai berikut.

1. Bahan tambah kimia (*Chemical Admixture*)

Berdasarkan SNI 2495 (1991), bahan tambah kimia dapat dikelompokkan menjadi tujuh tipe yaitu sebagai berikut.

a. Tipe A (*Water Reducing Admixtures*)

Water reducing admixtures merupakan bahan tambah yang berfungsi menurunkan kebutuhan air pencampur untuk memperoleh beton dengan tingkat kelecakan tertentu.

b. Tipe B (*Retarding Admixtures*)

Retarding admixtures merupakan bahan tambah yang digunakan untuk memperlambat waktu ikat beton, sehingga proses pengerasan awal terjadi lebih lambat.

c. Tipe C (*Accelerating Admixtures*)

Accelerating admixtures merupakan bahan tambah yang berperan mempercepat waktu pengikatan serta meningkatkan kekuatan awal beton.

d. Tipe D (*Water Reducing and Retarding Admixtures*)

Water reducing and retarding admixtures merupakan bahan tambah dengan dua fungsi, yaitu mengurangi kebutuhan air pencampur dan sekaligus memperlambat pengikatan awal beton.

e. Tipe E (*Water Reducing and Accelerating Admixtures*)

Water reducing and accelerating admixtures merupakan bahan tambah yang mampu menurunkan kebutuhan air serta mempercepat pengikatan awal beton.

f. Tipe F (*Water Reducing, High Range Admixtures*)

Water reducing, high range admixtures merupakan bahan tambah yang dapat mengurangi air pencampur dalam jumlah besar (12% atau lebih) untuk mencapai tingkat kelecakan beton tertentu.

g. Tipe G (*Water Reducing, High Range Retarding Admixtures*)

Water reducing, high range retarding admixtures merupakan Bahan tambah yang mampu mengurangi air pencampur sebesar 12% atau lebih dan sekaligus memperlambat proses pengikatan beton.

2. Bahan tambah mineral (*Additive*)

Bahan tambah mineral (*mineral additive*) merupakan material tambahan yang digunakan dengan tujuan meningkatkan performa beton. Jenis bahan tambah ini umumnya berfungsi untuk memperbaiki kekuatan tekan beton karena memiliki sifat yang menyerupai bahan penyemen. Beberapa contoh bahan tambah mineral yang sering digunakan antara lain *pozzolan*, *fly ash*, *slag*, dan *silica fume*.

3.3 Waterproofing Damdex

Waterproofing merupakan bahan tambahan yang berfungsi untuk meningkatkan kedap air pada beton. Penerapannya dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu sebagai pelapis eksternal pada permukaan beton atau dengan menambahkannya langsung ke dalam campuran beton. Damdex adalah salah satu merek bahan tambah *waterproofing* yang umum digunakan di pasaran, memiliki warna kecoklatan, dan berfungsi untuk mengurangi porositas serta meningkatkan daya tahan beton terhadap penetrasi air. Menurut Damdex Indonesia, (2024), Penggunaan Damdex pada beton tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan kedap air, tetapi juga dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik beton hingga sekitar 35%, serta mempercepat proses pengerasan beton hingga mencapai 50% dibandingkan dengan beton tanpa bahan tambahan tersebut.

3.4 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Perencanaan campuran beton (*mix design*) adalah proses perhitungan teoritis yang dilakukan untuk menetapkan proporsi masing-masing material yang akan digunakan dalam campuran beton. Pada penelitian ini, perencanaan campuran beton mengacu SNI 03-2834-2000, dengan tahapan sebagai berikut.

1. Menetapkan nilai kuat tekan beton yang direncanakan (F'_c) pada umur pengujian tertentu.
2. Menghitung deviasi standar

Menghitung deviasi standar, yaitu nilai yang diperoleh berdasarkan data pengalaman produksi beton di lapangan, yang dihitung menggunakan persamaan 3.1 sebagai berikut.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.1)$$

Dengan:

s = deviasi standar

x_i = kuat tekan beton yang didapat dari masing masing benda uji

$\bar{x}$ = adalah kuat tekan beton rata-rata menurut rumus sebagai berikut.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Dengan:

n merupakan jumlah hasil uji, dengan ketentuan minimal sebanyak 30 data (satu hasil uji merupakan nilai rata-rata dari dua benda uji). Dua kelompok hasil uji yang digunakan untuk menghitung deviasi standar harus memenuhi ketentuan sebagai berikut.

- Mewakili jenis material, prosedur pengendalian mutu, serta kondisi produksi yang sebanding dengan pekerjaan yang direncanakan.
- Mencerminkan nilai kuat tekan beton yang disyaratkan F_c dengan nilai yang berada dalam batas 7 MPa dari nilai F_{cr} yang ditentukan.
- Memiliki sedikitnya 30 hasil uji berturut-turut, atau dua kelompok hasil uji yang diperoleh dari proses produksi dalam kurun waktu minimal 45 hari.
- Apabila produksi beton tidak menyediakan dua kelompok hasil uji yang memenuhi ketentuan tersebut, namun hanya memiliki 15 hingga 29 hasil uji berurutan, maka deviasi standar dihitung dari data yang tersedia dengan faktor pengali sesuai Tabel 3.1 sebagai berikut.

Tabel 3. 1 Faktor Pengali untuk Deviasi Standar

Jumlah Pengujian	Faktor Pengali Deviasi Standar
Kurang dari 15	Berdasarkan 5)
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 atau lebih	1,0

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

- Apabila data hasil uji lapangan yang memenuhi persyaratan untuk perhitungan deviasi standar tidak tersedia, maka nilai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan F_{cr} harus ditetapkan paling sedikit sebesar $(F'_c + 12 \text{ MPa})$.

3. Menghitung nilai tambah

Nilai tambah ditentukan menggunakan persamaan 3. 2 sebagai berikut.

$$M = 1,64 \times s_r \quad (3.2)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

M = Nilai tambah

1,64 = Tetapan statistik yang nilainya tergantung pada persentase kegagalan hasil uji sebesar maksimum 5%

s_r = Deviasi standar rencana

4. Menghitung kuat tekan beton rata-rata yang ditargetkan (F_{cr})

Kuat tekan rata-rata yang direncanakan ditentukan berdasarkan persamaan 3.3 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} F_{cr} &= F'_c + M \\ F_{cr} &= F'_c + 1,64 s_r \end{aligned} \quad (3.3)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

F_{cr} = Kuat tekan beton rerata yang ditargetkan (MPa)

F'_c = Kuat tekan beton rencana (MPa)

M = Nilai tambah

s_r = Deviasi standar

5. Menetapkan jenis semen yang akan digunakan.

6. Menentukan jenis agregat, baik agregat halus maupun agregat kasar.

7. Menentukan faktor air semen

Faktor air semen ditentukan dengan tahap sebagai berikut.

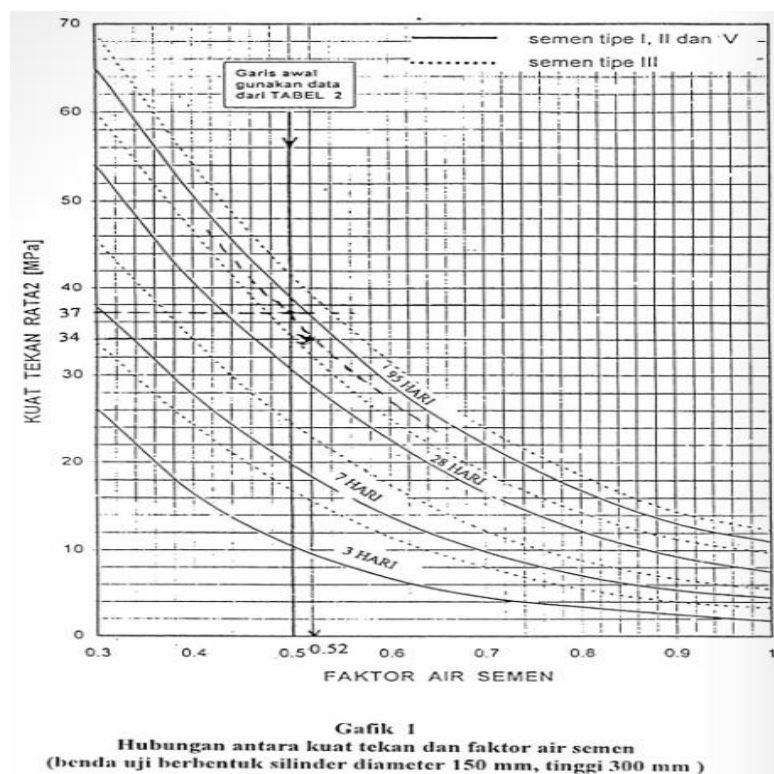
- a. Menentukan nilai kuat tekan pada umur 28 hari berdasarkan jenis semen dan agregat yang digunakan menggunakan Tabel 3.2 sebagai berikut

Tabel 3. 2 Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Jenis Semen dan Agregat Kasar yang Digunakan

Jenis Semen	Jenis Agregat Kasar	Kekuatan Tekan (MPa)				
		Pada Umur (hari)				Bentuk
		3	7	28	29	Bentuk Uji
Semen Portland Tipe I	Batu tak dipecah	17	23	33	40	Silinder
	Batu pecah	19	27	37	45	
Semen tahan sulfat Tipe II, V	Batu tak dipecah	20	28	40	48	Kubus
	Batu pecah	23	32	45	54	
Semen Portland Tipe III	Batu tak dipecah	21	28	38	44	Silinder
	Batu pecah	25	33	44	48	
	Batu tak dipecah	25	31	46	53	Kubus
	Batu pecah	30	40	53	60	

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

- b. Menentukan kurva lengkung baru dengan menghubungkan nilai kuat tekan yang diperoleh pada poin 7a dengan faktor air semen sebesar 0,5, sesuai ilustrasi pada Gambar 3.1 sebagai berikut.



Gambar 3. 1 Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen

(Sumber: SNI 2834, 2000)

- c. Menentukan faktor air semen yang dibutuhkan dengan menghubungkan kuat tekan beton rencana yang diperoleh pada poin 4 dengan kurva lengkung baru yang telah dibuat pada poin 7b.
8. Menetapkan faktor air semen maksimum
Menentukan faktor air semen maksimum yang kemudian diambil nilai faktor air semen terkecil antara perhitungan poin 7 dengan poin 8.
9. Menetapkan nilai *slump*.
10. Menetapkan ukuran agregat maksimum
Ukuran agregat maksimum ditetapkan berdasarkan hasil pengujian sifat (*properties*) agregat.
11. Menentukan nilai kadar air bebas
Kadar air bebas ditentukan dengan menggunakan Tabel 3.3 serta dihitung berdasarkan persamaan 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3. 3 Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m^3) yang Dibutuhkan Untuk Beberapa Tingkat Kemudahan Pengerjaan Adukan Beton

<i>Slump</i> (mm)		0-10	10-30	30-60	60-180
Ukuran Besar Butir Agregat Maksimum (mm)	Jenis Agregat				
10	Batu tak dipecah	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecah	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecah	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

$$w = \frac{2}{3}W_h + \frac{2}{3}W_k \quad (3.4)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

w = Kadar air bebas (kg/m^3)

W_h = Perkiraan jumlah air untuk agregat halus (kg/m^3)

W_k = Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar (kg/m^3)

12. Menghitung jumlah semen

Menentukan jumlah semen yang diperlukan ditentukan menggunakan persamaan 3.5 sebagai berikut.

$$c = \frac{w}{fas} \quad (3.5)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

c = Jumlah semen (kg/m³)

w = Kadar air bebas (kg/m³)

fas = Faktor air semen

13. Menentukan jumlah semen semimum mungkin

Jumlah semen minimum ditetapkan berdasarkan lokasi penggunaan beton rencana, dengan mengacu pada Tabel 3.4 sebagai berikut.

Tabel 3. 4 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan dalam Lingkungan Khusus

Lokasi	Jumlah Semen Minimum Per m ³ beton (Kg)	Nilai Faktor Air-Semen Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan:		
a. Keadaan keliling non-korosif	275	0,60
b. Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325	0,52
Beton di luar ruangan bangunan:		
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
Beton masuk ke dalam tanah:		
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		Lihat Tabel 5
Beton yang kontinu berhubungan:		
a. Air tawar		Lihat Tabel 6
b. Air lau		

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

14. Menentukan jumlah semen yang digunakan

Jumlah semen yang digunakan ditentukan dengan memilih nilai terbesar dari hasil perhitungan, nilai maksimum (jika ditetapkan), dan nilai minimum yang disyaratkan.

15. Menentukan faktor air semen yang disesuaikan

Faktor air semen yang telah disesuaikan ditetapkan apabila terjadi perubahan jumlah semen dari hasil perhitungan pada poin 12 menjadi nilai maksimum atau minimum.

16. Menentukan susunan butir agregat halus

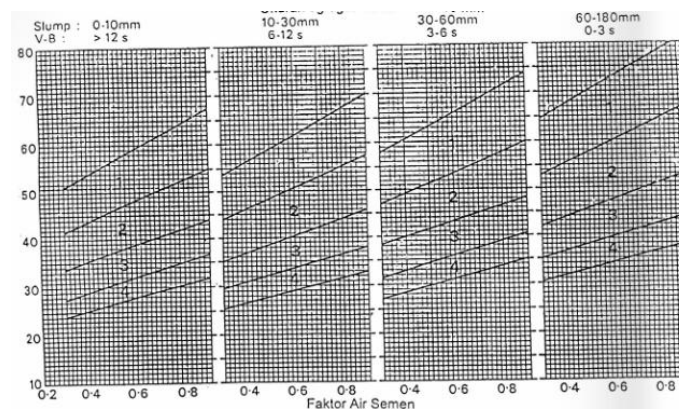
Susunan butir agregat halus ditentukan berdasarkan hasil analisis saringan agregat halus.

17. Menentukan susunan agregat kasar

Susunan butir agregat kasar ditentukan berdasarkan hasil analisis saringan agregat kasar.

18. Menentukan persentase agregat halus

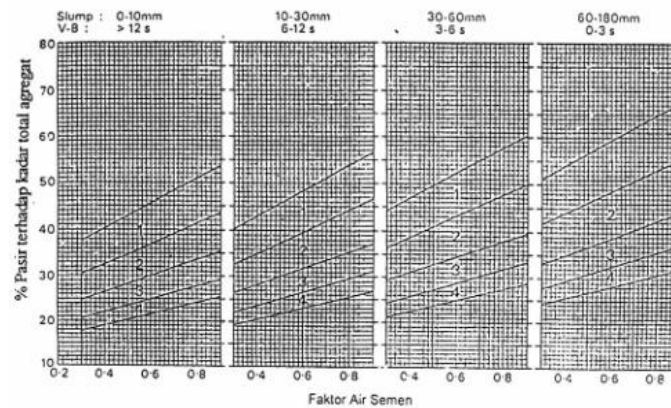
Persentase agregat halus ditetapkan dengan menggunakan Gambar 3.2 hingga Gambar 3.4, yang pemilihannya disesuaikan dengan ukuran butir maksimum agregat kasar serta gradasi agregat halus.



Grafik 13
Persen pasir terhadap kadar total agregat yang dianjurkan
untuk ukuran butir maksimum 10 mm

Gambar 3. 2 Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm

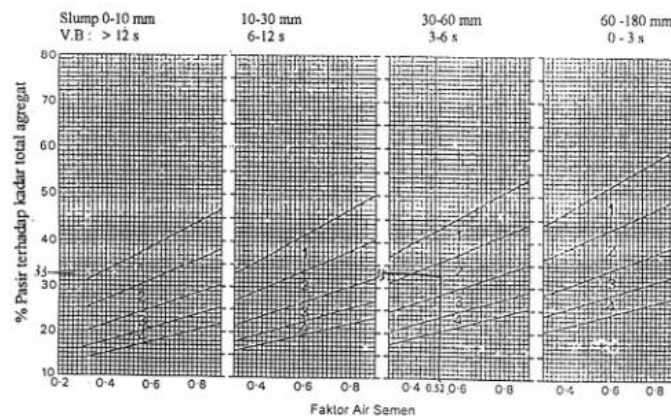
Sumber: SNI 03-2834 (2000)



Grafik 14
Persen pasir terhadap kadar total agregat yang dianjurkan
untuk ukuran butir maksimum 20 mm

Gambar 3. 3 Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm

Sumber: SNI 03-2834 (2000)



Grafik 15
Persen pasir terhadap kadar total agregat yang dianjurkan
untuk ukuran butir maksimum 40mm

Gambar 3. 4 Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

19. Menghitung berat jenis relatif agregat

Berat jenis relatif agregat dihitung menggunakan persamaan 3.6 sebagai berikut.

$$BJ_{gab} = \%Ag. halus \times BJ_{Ag. halus} + \%Ag. kasar \times BJ_{Ag. kasar} \quad (3.6)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

BJ_{gab} = Berat jenis relatif/gabungan agregat %

%Ag. halus = Persentase agregat halus (%)

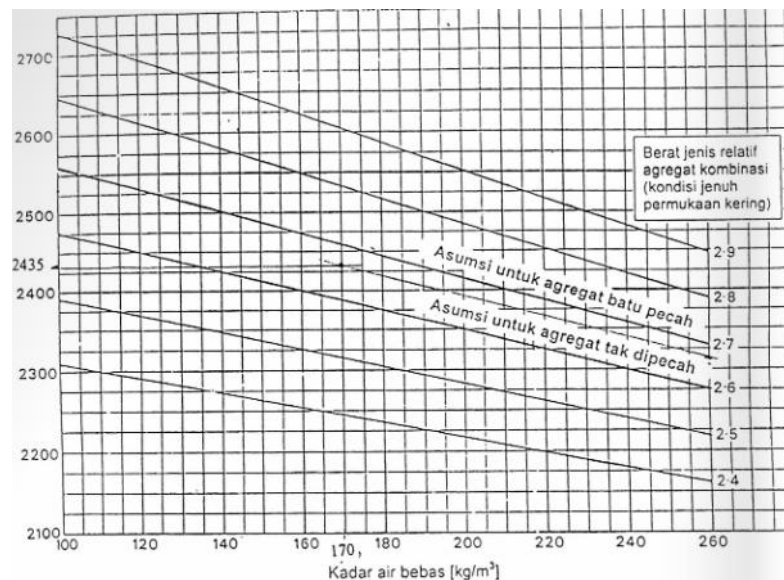
%Ag. kasar = Persentase agregat kasar (%)

$BJ_{Ag.halus}$ = Berat jenis agregat halus

$BJ_{Ag.kasar}$ = Berat jenis agregat kasar

20. Menentukan berat isi beton

Berat isi beton ditetapkan berdasarkan kadar air bebas serta berat jenis relatif atau gabungan agregat, dengan mengacu pada Gambar 3.5 sebagai berikut.



Grafik 16
Perkiraan berat isi beton basah yang telah selesai dipadatkan

Gambar 3. 5 Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Didapatkan

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

21. Menghitung kadar agregat gabungan

Kadar agregat gabungan dihitung menggunakan persamaan 3.7 sebagai berikut.

$$W_{Ag.gab} = W_{beton} - W_{semen} - w \quad (3.7)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

$W_{Ag.gab}$ = Kadar agregat gabungan (kg/m^3)

W_{beton} = Berat isi beton (kg/m^3)

W_{semen} = Kadar semen (kg/m^3)

w = Kadar air bebas (kg/m^3)

22. Menghitung kadar agregat halus

Kadar agregat halus ditentukan menggunakan persamaan 3.8 sebagai berikut.

$$W_{Ag.halus} = \%Ag.halus - W_{Ag.gab} \quad (3.8)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

$W_{Ag.halus}$ = Kadar agregat halus (kg/m^3)

$\%Ag.halus$ = Persentase agregat halus (%)

$W_{Ag.gab}$ = Kadar agregat gabungan (kg/m^3)

23. Menghitung kadar agregat kasar

Kadar agregat kasar dihitung berdasarkan persamaan 3.9 sebagai berikut.

$$W_{Ag.kasar} = W_{Ag.gab} - W_{Ag.halus} \quad (3.9)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

$W_{Ag.kasar}$ = Kadar agregat kasar (kg/m^3)

$W_{Ag.halus}$ = Kadar agregat halus (kg/m^3)

$W_{Ag.gab}$ = Kadar agregat gabungan (kg/m^3)

24. Menentukan proporsi campuran

Proporsi campuran ditentukan untuk setiap 1 m^3 beton dengan asumsi agregat berada dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD). Proporsi campuran untuk pengujian kemudian dihitung dengan mengalikan proporsi per 1 m^3 beton dengan volume total benda uji.

25. Menghitung koreksi proporsi campuran

Koreksi proporsi campuran diperlukan apabila agregat tidak berada dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD). Penyesuaian dilakukan terhadap kandungan air pada agregat untuk memperoleh komposisi campuran yang sesuai.

3.5 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton merupakan kemampuan beton keras untuk menahan gaya tekan aksial per satuan luas. Nilai kuat tekan tersebut diperoleh melalui pengujian menggunakan mesin uji tekan (*compression testing machine*), yaitu dengan mengukur besarnya gaya tekan aksial per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton mengalami kehancuran (Ardiansyah, 2023). Berdasarkan SNI 1974 (2011), kuat tekan beton dihitung dengan persamaan 3.10 sebagai berikut.

$$\text{Kuat tekan beton} = \frac{P}{A} \quad (3.10)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

Kuat tekan beton = Diuji menggunakan benda uji silinder (MPa atau N/mm²)

P = Gaya tekan aksial (N)

A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

3.6 Absorpsi

Penyerapan air pada beton, atau yang dikenal sebagai absorpsi beton, terjadi ketika air meresap melalui pori-pori halus pada permukaan beton. Jumlah serta ukuran pori-pori tersebut sangat memengaruhi tingkat penyerapan air. Semakin besar atau banyak pori-pori yang terdapat di dalam beton, maka semakin tinggi pula kemampuan beton dalam menyerap air, sehingga dapat menurunkan ketahanan beton terhadap pengaruh air (Akbar, 2021). Sesuai dengan standar SNI 6433 (2016), nilai absorpsi dalam beton dapat dihitung menggunakan persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$P_A = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (3.11)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

P_A = Absorpsi atau penyerapan air (%)

B = Massa contoh uji kering permukaan di udara setelah perendaman (gram)

A = Massa contoh uji kering oven di udara (gram)

3.7 Umur Beton

Kuat tekan beton akan meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton. Laju peningkatan kekuatan ini dipengaruhi oleh faktor air-semen (FAS) dan suhu selama proses perawatan. Semakin tinggi nilai FAS, maka laju peningkatan kekuatan beton akan semakin lambat, sedangkan semakin tinggi suhu perawatan, maka proses peningkatan kekuatan beton akan berlangsung lebih cepat. Umumnya, beton mengalami pertambahan kekuatan yang signifikan hingga mencapai umur 28 hari, dan setelah itu peningkatannya berlangsung lebih lambat. Pengujian kuat tekan dapat dilakukan pada umur beton 3, 7, 14, atau 21 hari dengan hasil yang kemudian dikonversi ke umur 28 hari. Namun, pengujian pada umur 28 hari tetap menjadi standar untuk memperoleh nilai kuat tekan maksimum beton (Tjokrodinuljo K, 1996). Adapun menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia PBI (1971), angka konversi umur benda uji pada beton tersebut dapat dilihat pada Tabel 3. 5 sebagai berikut.

Tabel 3. 5 Angka Konversi Umur Benda Uji

Umur Benda Uji	Angka Konversi Penggunaan Semen <i>Portland Biasa</i>
3 hari	0,40
7 hari	0,65
14 hari	0,88
21 hari	0,95
28 hari	1,0

Sumber: PBI (1971)

3.8 Koefisien Korelasi

Koefisien korelasi merupakan keluaran dari analisis regresi yang digunakan untuk menilai sejauh mana hubungan antara dua variabel atau lebih (Sugiyono, 2013). Koefisien korelasi dapat diinterpretasikan dengan mengacu pada panduan yang tercantum dalam Tabel 3. 6 sebagai berikut.

Tabel 3. 6 Pedoman Interpretasi Koefisien Korelasi

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,000	Sangat Kuat

Sumber: Sugiyono (2013)

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Umum

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen di laboratorium dengan tujuan mengetahui hubungan sebab akibat antara satu atau lebih variabel terikat melalui pengubahan variabel bebas dalam kondisi yang terkontrol, yang dipertahankan oleh variabel kontrol. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), yang merupakan bagian dari Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia

Bahan uji yang digunakan merupakan beton mutu normal, di mana limbah beton dimanfaatkan sebagai substitusi agregat kasar dengan proporsi campuran antara 0% hingga 100%. Selain itu, penelitian ini juga melibatkan penambahan bahan tambah *waterproofing* Damdex ke dalam campuran beton dengan variasi kadar 0%, 8%, 9%, dan 10%. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi dosis bahan tambah *waterproofing* Damdex terhadap beton yang memakai limbah beton sebagai pengganti agregat kasar.

4.2 Variabel Penelitian

Adapun variabel yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Variabel bebas
2. Variabel bebas pada penelitian ini meliputi persentase agregat limbah beton serta kadar bahan tambah *waterproofing* Damdex.
3. Variabel terikat
Variabel terikat dalam penelitian ini mencakup kuat tekan beton, akselerasi kuat tekan beton, serta nilai absorpsi beton.
4. Variabel kontrol
Variabel kontrol pada penelitian ini terdiri atas bentuk benda uji, ukuran benda uji, dan kuat tekan beton rencana (F'_c).

4.3 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Kegiatan penelitian meliputi tahapan persiapan material, pengujian sifat-sifat material (*properties*), pembuatan serta pengujian benda uji percobaan (*trial*), diikuti dengan pembuatan dan pengujian benda uji, proses perendaman, serta pengujian kuat tekan dan absorpsi beton.

4.4 Bahan Pembuatan Benda Uji

Adapun material yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Semen *Portland*

Pada penelitian ini, semen yang dipakai adalah semen *portland* tipe I bermerek Tiga Roda dengan berat kemasan 40 kg.

2. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Sungai Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta.

3. Agregat Kasar

Pada penelitian ini agregat kasar yang digunakan berasal dari limbah beton bongkaran kolom dan jalan pada Gedung *Main Hall* Gubernur Akademi Militer Magelang dan agregat kasar asli dari Clereng, Daerah Istimewa Yogyakarta.

4. Air

Pada penelitian ini air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik (BKT), Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Air yang digunakan pada penelitian ini jernih dan tidak mengandung benda-benda lain yang dapat dilihat secara visual.

5. *Waterproofing* Damdex

Bahan tambah yang digunakan dalam penelitian ini adalah *waterproofing* bermerek Damdex. Pada penelitian ini, bahan tambah *waterproofing* Damdex

diterapkan dengan variasi sebesar 0%, 8%, 9%, dan 10% dari total berat semen.

4.5 Alat yang Digunakan

Peralatan yang digunakan selama pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Konus
Konus merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui apakah agregat halus telah dalam keadaan kering jenuh permukaan (SSD).
2. Set Saringan Agregat
Set saringan agregat digunakan untuk memisahkan agregat berdasarkan ukuran butirnya melalui proses pengayakan.
3. Timbangan
Timbangan digunakan untuk mengukur berat material yang akan digunakan dalam pembuatan beton sesuai dengan perhitungan pada perencanaan campuran (*mix design*).
4. Neraca *Ohaus*
Neraca *Ohaus* merupakan alat ukur massa dengan tingkat ketelitian lebih tinggi dibandingkan timbangan biasa, sehingga digunakan untuk menimbang material yang memerlukan akurasi lebih baik.
5. Jangka Sorong
Jangka sorong merupakan alat yang digunakan untuk mengukur dimensi benda uji beton seperti panjang, lebar, dan tinggi dengan tingkat ketelitian yang tinggi, umumnya hingga 0.1 mm.
6. Piknometer
Piknometer digunakan sebagai alat untuk menentukan massa jenis material, khususnya pada pengujian agregat halus.
7. Sekop
Sekop berfungsi sebagai alat bantu untuk memindahkan dan menuangkan beton segar ke dalam bekisting atau cetakan beton pada saat proses pengecoran benda uji.

8. Ember

Ember merupakan alat yang digunakan untuk menampung material seperti semen, agregat halus, dan agregat kasar.

9. Batang Penumbuk

Batang penumbuk merupakan alat yang digunakan untuk memadatkan atau meratakan campuran beton segar, biasanya selama pengisian pengujian *slump*, bekisting kubus, dan bekisting silinder untuk memastikan tidak ada rongga udara yang terjebak di dalam campuran.

10. Kerucut Abrams

Kerucut Abrams digunakan sebagai alat untuk melakukan pengujian slump pada beton segar guna mengetahui tingkat kelecakan (*workability*) campuran beton.

11. Bekisting Beton

Bekisting atau cetakan beton berfungsi sebagai wadah pembentuk benda uji sesuai dimensi yang diperlukan. Pada penelitian ini digunakan dua jenis bekisting, yaitu bekisting silinder berdiameter 15 cm dengan tinggi 30 cm, serta bekisting kubus berukuran 15 cm × 15 cm × 15 cm.

12. Alat *Capping*

Alat *capping* merupakan alat yang digunakan dalam pengujian kuat tekan beton, terutama untuk memastikan permukaan atas dan bawah benda uji beton seperti silinder dalam keadaan sejajar.

13. Mesin Pengguncang Agregat

Mesin pengguncang agregat digunakan untuk memisahkan dan mengklasifikasikan ukuran agregat kasar berdasarkan gradasinya.

14. Oven

Oven digunakan untuk mengeringkan agregat halus maupun agregat kasar. Selain itu, oven juga dimanfaatkan untuk proses pengeringan beton keras pada saat pengujian absorpsi beton.

15. *Concrete Mixer*

Concrete mixer merupakan alat yang berfungsi untuk mencampurkan seluruh material penyusun beton sesuai dengan proporsi yang telah ditetapkan dalam perencanaan campuran beton (*mix design*).

16. *Stone Crusher*

Stone crusher adalah peralatan yang berfungsi untuk menghancurkan bongkahan limbah beton hingga mencapai ukuran maksimum 40 mm.

17. Mesin Uji Tekan

Mesin uji tekan adalah alat yang digunakan untuk menentukan beban maksimum yang dapat ditahan oleh suatu benda uji sebelum mengalami kegagalan struktural.

4.6 Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini terdiri atas beton dengan dua jenis agregat kasar, yaitu agregat kasar asli dan agregat kasar limbah beton. Kedua jenis agregat tersebut diberi bahan tambahan waterproofing Damdex dengan variasi kadar 0%, 8%, 9%, dan 10%. Setiap variasi kadar kemudian diuji pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Benda uji dibuat dalam dua bentuk, yaitu silinder berdiameter 15 cm dengan tinggi 30 cm dan kubus berukuran 15 cm × 15 cm × 15 cm. Silinder digunakan pada pengujian kuat tekan beton, sedangkan kubus digunakan pada pengujian absorpsi beton. Menurut SNI 2847 (2019), jumlah minimum benda uji silinder untuk pengujian kuat tekan adalah lima sampel untuk setiap variasi. Sementara itu, standar untuk pengujian absorpsi tidak menetapkan jumlah minimum benda uji, sehingga penelitian ini menggunakan dua sampel untuk setiap variasi pengujian. Rincian lengkap mengenai jumlah dan jenis benda uji yang digunakan disajikan pada Tabel 4.1 adalah sebagai berikut.

Tabel 4. 1 Rincian Benda Uji

Pengujian	Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Benda Uji (hari)	Kode Benda Uji	Jumlah Sampel
Kuat Tekan	0%	0%	7	T-TL-0-7h	5
			14	T-TL-0-14h	5
			28	T-TL-0-28h	5
		8%	7	T-TL-8-7h	5
			14	T-TL-8-14h	5
			28	T-TL-8-28h	5
		9%	7	T-TL-9-7h	5
			14	T-TL-9-14h	5
			28	T-TL-9-28h	5
		10%	7	T-TL-10-7h	5
			14	T-TL-10-14h	5
			28	T-TL-10-28h	5
	100%	0%	7	T-L-0-7h	5
			14	Y-L-0-14h	5
			28	T-L-0-28h	5
		8%	7	T-L-8-7h	5
			14	T-L-8-14h	5
			28	T-L-8-28h	5
		9%	7	T-L-9-7h	5
			14	T-L-9-14h	5
			28	T-L-9-28h	5
		10%	7	T-L-10-7h	5
			14	T-L-10-14h	5
			28	T-L-10-28h	5
Absorpsi	0%	0%	7	A-TL-0-7h	2
			14	A-TL-0-14h	2
			28	A-TL-0-28h	2
		8%	7	A-TL-8-7h	2
			14	A-TL-8-14h	2
			28	A-TL-8-28h	2
		9%	7	A-TL-9-7h	2
			14	A-TL-9-14h	2
			28	A-TL-9-28h	2
		10%	7	A-TL-10-7h	2
			14	A-TL-10-14h	2
			28	A-TL-10-28h	2
	100%	0%	7	A-L-0-7h	2
			14	A-L-0-14h	2
			28	A-L-0-28h	2
		8%	7	A-L-8-7h	2
			14	A-L-8-14h	2
			28	A-L-8-28h	2
		9%	7	A-L-9-7h	2
			14	A-L-9-14h	2
			28	A-L-9-28h	2
		10%	7	A-L-10-7h	2
			14	A-L-10-14h	2
			28	A-L-10-28h	2

Dengan keterangan sebagai berikut.

T	= Uji Tekan
A	= Uji Absorpsi
TL	= Tanpa limbah beton
L	= Limbah beton 100%
0	= Kadar Damdex 0%
8	= Kadar Damdex 8%
9	= Kadar Damdex 9%
10	= Kadar Damdex 10%
7h	= Umur beton 7 hari
14h	= Umur beton 14 hari
28h	= Umur beton 28 hari

4.7 Persiapan

Tahapan persiapan yang dilakukan merupakan langkah awal sebelum memulai proses pelaksanaan penelitian. Pada tahap ini, peneliti melakukan beberapa kegiatan persiapan yang bertujuan untuk memastikan kelancaran dan keberhasilan penelitian. Adapun tahapan persiapan meliputi kegiatan sebagai berikut.

4.7.1 Persiapan Studi Literatur

Peneliti melakukan kajian terhadap berbagai sumber literatur yang relevan dengan topik penelitian. Hal yang dilakukan mencakup penelaahan jurnal ilmiah, buku, artikel, serta hasil penelitian sebelumnya guna memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai teori, konsep, dan perkembangan terkait. Studi literatur ini juga bertujuan untuk merumuskan latar belakang, tujuan, manfaat, rumusan masalah, landasan teori, serta metode yang akan digunakan dalam penelitian.

4.7.2 Persiapan Laboratorium

Hal yang dilakukan pada persiapan laboratorium adalah memastikan bahwa laboratorium yang akan digunakan sudah siap dan memenuhi standar yang diperlukan untuk penelitian ini. Langkah ini mencakup pengajuan perizinan pemakaian laboratorium sesuai prosedur yang berlaku pada Laboratorium Bahan

Konstruksi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, dan melakukan koordinasi dengan laboran terkait pelaksanaan penelitian. Hal termasuk pengaturan alat, pengaturan tata tertib, dan pengaturan area kerja sesuai dengan prosedur keamanan.

4.7.3 Persiapan Alat dan Bahan

Hal yang dilakukan pada persiapan alat dan bahan, peneliti melakukan inventarisasi terhadap seluruh kebutuhan penelitian. Langkah ini mencakup pengecekan ketersediaan dan kelayakan alat yang akan digunakan, memastikan semua alat dalam kondisi baik dan siap pakai. Selain itu, bahan yang digunakan juga harus memenuhi spesifikasi teknis yang telah direncanakan agar hasil penelitian valid. Dalam proses ini, peneliti juga mencari *supplier* yang dapat menyediakan bahan sesuai dengan standar yang dibutuhkan.

Terkecuali untuk bahan agregat kasar limbah beton sendiri masih berupa limbah beton yang masih dalam bentuk bongkahan beton. Oleh karena itu, sebelum digunakan dalam campuran beton, bongkahan tersebut perlu melalui tahap pemrosesan awal untuk dipecah menjadi ukuran agregat yang sesuai dengan standar. Proses ini dilakukan di lokasi pengolahan menggunakan alat pemecah batu *stone crusher* agar material limbah tersebut dapat dimanfaatkan kembali sebagai agregat kasar dalam campuran beton. Adapun proses persiapan agregat kasar limbah beton dilaksanakan sebagai berikut.

1. Proses dimulai dengan persiapan alat dan bahan, di mana mesin *stone crusher* dipastikan dalam kondisi siap pakai dan bongkahan beton dikumpulkan untuk dihancurkan.
2. Selanjutnya dilakukan pengumpanan batu ke dalam *hopper* mesin *stone crusher* secara bertahap untuk menghindari kelebihan beban pada mesin
3. Setelah batu masuk ke dalam mesin, proses pemecahan batu berlangsung, di mana batu akan dihancurkan oleh bagian *crusher* (seperti rahang pada *jaw crusher* atau rotor pada *impact crusher*) menjadi ukuran yang lebih kecil.
4. Material hasil pemecahan kemudian melalui proses penyaringan menggunakan *vibrating screen* untuk memisahkan agregat berdasarkan ukuran yang diinginkan.

5. Agregat yang telah dipisahkan dikumpulkan ke dalam karung yang berbeda sesuai ukurannya, dan siap untuk digunakan.
6. Setelah seluruh proses selesai, dilakukan pembersihan dan perawatan mesin untuk memastikan alat tetap berfungsi optimal dalam proses berikutnya.

Setelah tahap persiapan studi literatur, persiapan laboratorium, persiapan alat dan bahan selesai, kemudian dilakukan tahapan selanjutnya. Tahap selanjutnya merupakan tahap pengujian agregat.

4.8 Pengujian Agregat

Tahapan pengujian agregat adalah rangkaian prosedur yang dilakukan terhadap agregat halus maupun kasar untuk mengetahui sifat serta karakteristiknya sebelum digunakan dalam pembuatan beton. Data hasil pengujian tersebut menjadi acuan penting dalam perencanaan komposisi campuran beton (*mix design*).

4.8.1 Pengujian Agregat Halus

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 1970-2016. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dikeringkan dalam oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hingga beratnya konstan, melalui tiga kali proses penimbangan dan pemanasan masing-masing selama dua jam.
 - b. Benda uji direndam di dalam air selama (15–19) jam.
 - c. Air rendaman dibuang secara hati-hati tanpa kehilangan butiran agregat.
 - d. Benda uji ditebarkan pada talam, kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari dengan cara membalik-balikan benda uji hingga keadaan kering permukaan jenuh (SSD).
 - e. Kondisi SSD diperiksa menggunakan konus, dengan cara memasukkan benda uji ke dalam konus, dipadatkan 25 kali, dan diratakan. Kondisi SSD tercapai jika agregat runtuh tetapi masih mempertahankan bentuk cetakannya.

- f. Setelah kondisi SSD diperoleh, 500 gram benda uji dimasukkan ke dalam piknometer, diisi air suling hingga 90% volume, dan diguncang sampai tidak ada gelembung udara.
 - g. Piknometer direndam dalam air dan suhu air diukur untuk penyesuaian perhitungan terhadap suhu air standar 25°C, kemudian tambahkan air sampai mencapai tanda batas.
 - h. Piknometer yang berisi benda uji dan air ditimbang dengan ketelitian 0,1 (gram), (Bt).
 - i. Benda uji dikeluarkan dari piknometer, kemudian dikeringkan menggunakan oven dengan suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap lalu dinginkan benda uji, setelah benda uji dingin lalu ditimbang (gram), (Bk).
 - j. Piknometer diisi air penuh dan ditimbang (gram), (B).
2. Pengujian analisa saringan agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 03-1968-1990. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
- a. Agregat dikeringkan dalam oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hingga berat konstan, kemudian didinginkan selama 1–3 jam.
 - b. Benda uji yang telah dikeringkan dalam oven kemudian ditimbang sebanyak 2000 gram untuk masing-masing untuk kedua sampel.
 - c. Saringan disusun dari yang lubangnya paling besar dari atas kebawah jangan sampai terbalik dan masukkan benda uji, kemudian benda uji langsung diayak/saring dengan bantuan mesin penggoyang selama 10 - 15 menit.
 - d. Benda uji dikeluarkan pada masing-masing saringan dan masukkan dalam masing-masing talam, kemudian benda uji ditimbang dan dicatat berat benda uji yang tertahan pada masing-masing saringan (gram). Dalam pembersihan saringan menggunakan sikat untuk lubang kasar dan kuas untuk lubang yang halus.

3. Pengujian berat volume gembur dan berat volume padat agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 03-4804-1998. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dikeringkan pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ dalam oven hingga berat tetap.
 - b. Setelah dingin (1–3 jam), benda uji ditimbang dengan ketelitian 0,5 gram dengan kapasitas 10000 gram masing-masing untuk kedua sampel.
 - c. Berat silinder ditimbang (gram).
 - d. Tempatkan silinder pada permukaan datar. Kemudian pengujian dilakukan dalam dua kondisi yaitu volume gembur dan volume padat.
 - e. Pengujian berat volume gembur dilakukan dengan cara pengisian silinder menggunakan benda uji hingga penuh tanpa pemadatan, kemudian permukaannya diratakan. Setelah itu, silinder yang telah terisi benda uji ditimbang dalam satuan (gram).
 - f. Pengujian berat volume padat dilakukan dengan cara mengisi silinder dengan benda uji sebanyak 1/3 bagian, kemudian setiap lapisan dipadatkan dengan penumbukan sebanyak 25 kali secara merata dan diratakan. Proses ini diulangi hingga penuh volume silindernya, setelah itu silinder berisi benda uji ditimbang dalam satuan (gram).
 - g. Volume silinder dihitung (cm^3). Silinder yang sama digunakan untuk pemeriksaan berat volume gembur dan padat agregat halus.
4. Pengujian butiran lolos ayakan no. 200 (uji kandungan lumpur dalam pasir) yang dilakukan berdasarkan SNI 03-4142-1996. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dikeringkan dalam oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hingga mencapai berat konstan, kemudian ditimbang hingga ketelitian 0,1 (gram).
 - b. Setelah itu, benda uji ditempatkan diatas saringan dan dialiri air dari bagian atasnya.

- c. Dalam saringan, benda uji digosok secara perlahan pada saringan tersebut dengan aliran air, sehingga lumpur pada benda uji larut dalam air dan melewati saringan no. 200, sedangkan bagian kasar tetap tertahan pada saringan tersebut.
- d. Langkah pada poin c) diulangi terus menerus hingga air yang lolos melalui saringan No. 200 menjadi jernih.
- e. Benda uji yang tertinggal pada saringan no. 200 lalu masukkan ke dalam pan. Kemudian benda uji dikeringkan menggunakan oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap. Kemudian ditimbang hingga ketelitian 0,1 gram.

4.8.2 Pengujian Agregat Kasar Asli

1. Pengujian berat jenis dan serap air agregat kasar asli dilakukan sesuai dengan SNI 1969-2016. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dibersihkan untuk menyingkirkan debu atau zat lain yang menempel pada permukaannya.
 - b. Benda uji dikeringkan dalam oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ hingga berat konstan.
 - c. Setelah kering, benda uji didinginkan pada suhu kamar dalam 1-3 jam.
 - d. Benda uji direndam didalam air bersuhu kamar selama 15 hingga 19 jam.
 - e. Benda uji diangkat dari air, kemudian dikeringkan dengan kain penyerap hingga permukaannya bebas dari air, untuk partikel yang lebih besar dikeringkan satu persatu.
 - f. Setelah benda uji dipastikan sudah kering permukaan jenuh, lalu ditimbang benda uji dalam keadaan permukaan jenuh kering permukaan (SSD), (Bj). Ditentukan nilai $B_j = 5000$ gram pada masing-masing untuk kedua sampel.
 - g. Benda uji diletakkan dalam keranjang udara, keranjang berisi benda uji diguncangkan untuk mengeluarkan udara yang tertampung dan penempatan beratnya di dalam udara ditimbang (gram), (Ba).

- h. Benda uji dimasukkan kedalam pan dan dimasukkan ke dalam oven. Agregat kasar dikeringkan pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ selama (24 ± 4) jam menggunakan oven, selanjutnya benda ditimbang dengan tingkat ketelitian 0,5 (gram), (Bk).
- 2. Pengujian analisa saringan agregat kasar asli dilakukan berdasarkan SNI 03-1968-1990. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dikeringkan menggunakan oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap. Benda uji dikeluarkan dari oven dan dinginkan pada suhu kamar selama 1-3 jam.
 - b. Benda uji yang telah dikeringkan menggunakan oven kemudian ditimbang dengan ketelitian 0,5 gram. Berat benda uji ditetapkan sebanyak 5000 gram untuk masing-masing dari kedua sampel.
 - c. Saringan disusun dari yang lubangnya paling besar dari atas kebawah jangan sampai terbalik dan masukkan benda uji, kemudian benda uji langsung diayak/saring dengan bantuan mesin penggoyang selama 10 - 15 menit.
 - d. Benda uji dikeluarkan pada masing-masing saringan dan masukkan dalam masing-masing talam, kemudian benda uji ditimbang (gram) dan dicatat berat benda uji yang tertahan pada masing-masing saringan. Dalam pembersihan saringan menggunakan sikat untuk lubang kasar dan kuas untuk lubang yang halus.
- 3. Pengujian berat volume gembur dan berat volume padat pada agregat kasar asli dilakukan sesuai dengan SNI 03-4804-1998. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dikeringkan dalam oven dengan suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai mencapai berat konstan.
 - b. Setelah itu, benda uji dikeluarkan dan didinginkan selama 1-3 jam, kemudian ditimbang dengan ketelitian 0,5gram dan kapasitas 10000 gram masing-masing untuk kedua sampel.
 - c. Berat silinder ditimbang (gram).

- d. Silinder ditempatkan pada permukaan datar. Kemudian pengujian dilakukan dalam dua kondisi yaitu volume gembur dan volume padat.
- e. Pengujian berat volume gembur dilakukan dengan cara pengisian silinder menggunakan benda uji sampai penuh tanpa pemadatan, kemudian permukaannya diratakan. Setelah itu, silinder yang telah terisi benda uji ditimbang dalam satuan gram.
- f. Pengujian berat volume padat dilakukan dengan cara mengisi silinder dengan benda uji sebanyak $1/3$ bagian, kemudian setiap lapisan dipadatkan dengan penumbukan sebanyak 25 kali secara merata dan diratakan. Proses ini diulangi hingga penuh volume silindernya, setelah itu silinder berisi benda uji ditimbang dalam satuan gram.
- g. Volume silinder dihitung dalam satuan (cm^3). Silinder yang serupa digunakan untuk mengukur berat volume gembur dan padat agregat kasar pada kedua sampel.

4.8.3 Pengujian Agregat Kasar Limbah Beton

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar limbah beton dilakukan berdasarkan SNI 1969-2016. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dibersihkan untuk menyingkirkan debu atau zat lain yang menempel pada permukaannya.
 - b. Benda uji dikeringkan dalam oven pada suhu $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ hingga berat konstan.
 - c. Setelah kering, benda uji didinginkan pada suhu kamar dalam 1-3 jam.
 - d. Benda uji direndam didalam air bersuhu kamar selama 15 hingga 19 jam.
 - e. Benda uji diangkat dari air, kemudian dikeringkan dengan kain penyerap hingga permukaannya bebas dari air, untuk partikel yang lebih besar dikeringkan satu persatu.
 - f. Setelah benda uji dipastikan sudah kering permukaan jenuh, lalu ditimbang benda uji dalam keadaan keadaan jenuh kering permukaan

- (SSD), (Bj). Ditentukan nilai $B_j = 5000$ gram pada masing-masing untuk kedua sampel.
- g. Benda uji diletakkan dalam keranjang udara, keranjang berisi benda uji diguncangkan untuk mengeluarkan udara yang tertampung dan penempatan beratnya di dalam udaradan ditimbang (gram), (Ba).
 - h. Benda uji dimasukkan kedalam pan dan dimasukkan ke dalam oven. Agregat kasar dikeringkan pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ selama (24 ± 4) jam menggunakan oven, selanjutnya benda ditimbang dengan tingkat ketelitian 0,5 (gram), (Bk).
2. Pengujian analisa saringan agregat kasar limbah beton dilakukan berdasarkan SNI 03-1968-1990. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
- a. Benda uji dikeringkan menggunakan oven pada suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai berat tetap. Benda uji dikeluarkan dari oven dan dinginkan pada suhu kamar selama 1-3 jam.
 - b. Benda uji yang telah dikeringkan menggunakan oven kemudian ditimbang dengan ketelitian 0,5 gram. Berat benda uji ditetapkan sebanyak 5000 gram untuk masing-masing dari kedua sampel.
 - c. Saringan disusun dari yang lubangnya paling besar dari atas kebawah jangan sampai terbalik dan masukkan benda uji, kemudian benda uji langsung diayak/saring dengan bantuan mesin penggoyang selama 10 - 15 menit.
 - d. Benda uji dikeluarkan pada masing-masing saringan dan masukkan dalam masing-masing talam, kemudian benda uji ditimbang (gram) dan dicatat berat benda uji yang tertahan pada masing-masing saringan. Dalam pembersihan saringan menggunakan sikat untuk lubang kasar dan kuas untuk lubang yang halus.

3. Pengujian berat volume gembur dan berat volume padat agregat kasar limbah beton yang dilakukan berdasarkan SNI 03-4804-1998. Pelaksanaan pengujian tersebut dilakukan dengan prosedur sebagai berikut.
 - a. Benda uji dikeringkan dalam oven dengan suhu $(110 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ sampai mencapai berat konstan.
 - b. Setelah itu, benda uji dikeluarkan dan didinginkan selama 1-3 jam, kemudian ditimbang dengan ketelitian 0,5gram dan kapasitas 10000 gram masing-masing untuk kedua sampel.
 - c. Berat silinder ditimbang (gram).
 - d. Silinder ditempatkan pada permukaan datar. Kemudian pengujian dilakukan dalam dua kondisi yaitu volume gembur dan volume padat.
 - e. Pengujian berat volume gembur dilakukan dengan cara pengisian silinder menggunakan benda uji sampai penuh tanpa pemadatan, kemudian permukaannya diratakan. Setelah itu, silinder yang telah terisi benda uji ditimbang dalam satuan gram.
 - f. Pengujian berat volume padat dilakukan dengan cara mengisi silinder dengan benda uji sebanyak $1/3$ bagian, kemudian setiap lapisan dipadatkan dengan penumbukan sebanyak 25 kali secara merata dan diratakan. Proses ini diulangi hingga penuh volume silindernya, setelah itu silinder berisi benda uji ditimbang dalam satuan gram.
 - g. Volume silinder dihitung dalam satuan (cm^3). Silinder yang serupa digunakan untuk mengukur berat volume gembur dan padat agregat kasar pada kedua sampel.

Setelah seluruh pengujian terhadap agregat halus, agregat kasar asli, dan agregat kasar limbah beton selesai dilakukan, data hasil penimbangan dihitung menggunakan rumus sesuai dengan standar masing-masing pengujian. Tahap berikutnya adalah memverifikasi hasil terhadap kriteria mutu agregat yang berlaku. Apabila hasil pengujian menunjukkan bahwa karakteristik agregat memenuhi standar, maka penelitian dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya, yaitu perancangan campuran beton (*mix design*).

4.9 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Tahapan perencanaan campuran beton dilaksanakan berdasarkan hasil dari pengujian agregat. Perencanaan campuran beton pada penelitian ini mengacu SNI 03-2834-2000. Rincian perhitungannya dapat dilihat pada Bab V, bagian hasil dan pembahasan, pada subbab 5.2. Setelah proses perencanaan campuran beton (*mix design*) selesai, tahap selanjutnya adalah pembuatan benda uji.

4.10 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan serta perawatan benda uji dilakukan berdasarkan hasil perencanaan campuran beton. Material penyusun beton yang telah disesuaikan dengan komposisi perencanaan kemudian dicampurkan menggunakan alat *concrete mixer*. Proses pencampuran benda uji dilakukan untuk dua variasi campuran agregat limbah variasi 0% dan 100%, dengan penambahan bahan *waterproofing* Damdex pada variasi kadar 0%, 8%, 9%, dan 10%. Pengujian dilakukan pada benda uji dengan variasi umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari, dengan jumlah sampel masing-masing variasi dengan variasi umur uji sebanyak 5 sampel benda uji silinder dan 2 sampel benda uji kubus. Pelaksanaan pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia sesuai dengan prosedur sebagai berikut.

1. Persiapan Bahan
 - a. Agregat kasar asli, agregat kasar limbah beton, dan agregat halus dikondisikan dalam kondisi SSD (*saturated surface dry*) agar dalam pengerjaan pembuatan adukan beton tidak butuh menambah atau mereduksi penggunaan air.
 - b. Untuk agregat halus dikondisikan SSD (*saturated surface dry*) dengan cara penjemuran di bawah matahari yang sebelumnya telah didiamkan di dalam karung dengan kondisi jenuh air selama 48 jam.
 - c. Untuk agregat kasar dikondisikan SSD (*saturated surface dry*) dengan cara pendiaman di dalam karung selama 48 jam yang sebelumnya telah dibersihkan dari seluruh kotoran menggunakan ayakan pencuci dan air.

- d. Setiap bahan ditimbang sesuai dengan perhitungan campuran beton *mix design* serta ditambahkan 25% setiap bahan untukantisipasi bahan kurang akibat penempelan bahan pada *concrete mixer* dan lainnya.
2. Persiapan Alat
 - a. Seluruh kotoran yang berada di dalam *concrete mixer* dibersihkan menggunakan air, kemudian mesin pengaduk dibiarkan dengan kondisi permukaan yang lembab.
 - b. Setiap cetakan silinder dan kubus diolesi pelumas seperti oli agar benda uji tidak menempel pada bekisting.
3. Pencampuran Bahan dan Pengadukan
 - a. *Concrete mixer* dihidupkan.
 - b. Dalam kondisi mesin berputar agregat halus dan agregat kasar dimasukkan saat *concrete mixer* berputar sampai tercampur rata.
 - c. Setelah agregat kasar dan halus tercampur secara merata kemudian masukkan semen saat *concrete mixer* berputar sampai tercampur rata.
 - d. Setelah agregat halus, agregat kasar, dan semen tercampur secara merata, langkah selanjutnya masukan bahan tambah *waterproofing* Damdex ke dalam *concrete mixer* saat berputar sampai tercampur rata.
 - e. Air dituangkan sesuai volume yang telah direncanakan dengan mengurangi sejumlah berat setiap variasi bahan tambah *waterproofing* Damdex, kemudian air dimasukkan ke dalam *concrete mixer* secara bertahap.
 - f. Pengadukan dilaksanakan sampai pencampuran homogen.
 - g. Adukan beton dituangkan di pelat wadah adukan beton yang lembab dan segera dilaksanakan pengujian *slump*.
4. Pencetakan
 - a. Pengisian dilaksanakan setiap sepertiga bagian lalu ditumbuk 25 kali secara merata setiap bagiannya dan juga dipukul-pukul bagian dinding cetakan silinder dan kubus dengan palu karet agar beton menjadi padat sehingga tidak memiliki rongga udara.

- b. Permukaan beton diratakan dengan tongat penusuk atau dengan perata kayu dan diberi tanda setiap cetakannya.
- c. Setelah itu, cetakan silinder dan cetakan kubus yang berisi campuran beton segar disimpan di dalam ruangan dengan atap selama 24 ± 8 jam.
- d. Beton keras sebagai benda uji dikeluarkan dari cetakan silinder dan cetakan kubus, kemudian diberikan kode identitas dan dimasukkan ke dalam bak perendaman untuk proses perawatan beton selama 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.

4.11 Pengujian *Slump*

Tahapan pengujian nilai *slump* dilakukan berdasarkan SNI 1972-2008. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur *workability* atau kemudahan pengerjaan beton segar sebelum proses pengecoran dilakukan. Nilai *slump* yang diperoleh mencerminkan tingkat konsistensi dan kemampuan beton dalam mengalir, yang sangat penting untuk memastikan beton dapat dikerjakan dengan mudah di lapangan tanpa mengurangi kekuatan maupun kestabilan struktur yang dihasilkan. Adapun pengujian *slump* dilaksanakan adalah sebagai berikut.

1. Kerucut abrams dibasahi terlebih dahulu dan ditempatkan pada permukaan yang datar, kaku, tidak menyerap air, dan lembap. Operator menahan kerucut abrams dengan kokoh menggunakan kaki yang diinjakkan pada bagian pijakan kerucut selama proses pengisian beton segar.
2. Kerucut abrams diisi dengan beton segar sebanyak tiga lapisan, di mana setiap lapisan setara dengan sepertiga volume cetakan.
3. Setiap lapisan dipadatkan 25 kali dengan tusukan menggunakan batang penusuk. Penusukan dilakukan secara merata pada seluruh permukaan lapisan dan menembus hingga lapisan bawah. Untuk bagian miring kerucut abrams, penusukan dilakukan dengan arah miring.
4. Pada pengisian lapisan atas, adukan beton segar diisi hingga penuh, kemudian dipadatkan dengan 25 kali tusukan. Jika pemadatan menyebabkan permukaan beton segar turun di bawah tepi atas kerucut abrams, adukan beton ditambahkan hingga penuh

5. Permukaan beton segar pada bagian atas kerucut diratakan dengan cara menggulirkan batang penusuk di atasnya secara perlahan.
6. Kerucut abrams dilepaskan dari beton segar dengan hati-hati melalui pengangkatan vertikal dengan jarak 300 mm dalam waktu 5 ± 2 detik, tanpa melakukan gerakan lateral atau torsional. Seluruh proses pengujian *slump* harus diselesaikan dalam waktu kurang dari 2½ menit.
7. Setelah beton mengalami penurunan, tinggi permukaan beton diukur dan dibandingkan dengan tinggi kerucut abrams. Hasil pengukuran tersebut kemudian dicatat.

4.12 Perawatan Benda Uji

Tahapan perawatan benda uji dilakukan setelah beton mengeras, kemudian beton dikeluarkan dari cetakan silinder dan cetakan kubus. Perawatan benda uji adalah langkah penting untuk memastikan beton mencapai kekuatan dan durabilitas yang optimal. Perawatan benda uji bertujuan untuk menjaga kelembapan dan suhu yang sesuai pada benda uji selama periode pengikatan dan pengerasan. Perawatan benda uji dilakukan menggunakan metode perendaman hingga berumur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Metode perendaman dilakukan dengan cara merendam benda uji pada bak air yang tersedia di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

4.13 Pembuatan dan Pengujian Benda Uji *Trial*

Tahapan pembuatan dan pengujian benda uji *trial* untuk menilai kualitas campuran tersebut. Tujuan dari pembuatan dan pengujian ini adalah memastikan bahwa campuran beton sesuai dengan perencanaan yang telah ditetapkan. Penelitian akan diteruskan jika hasil pengujian benda uji *trial* menunjukkan kualitas yang memenuhi standar perencanaan. Pelaksanaan dilakukan sesuai dengan tahapan pembuatan benda uji, tahapan pengujian *slump*, dan tahapan perawatan benda uji yang dapat dilihat pada poin 4.10, 4.11, dan 4.12. Pada proses pembuatan benda uji *trial* dilakukan proses pengujian *slump* dan didapatkan nilai *slump*. Selanjutnya dilakukan proses pengecoran pada 3 buah bekisting silinder, kemudian

setelah 24 ± 8 jam dilakukan pembongkaran bekisting dan dilakukan perendaman benda uji *trial* untuk perawatan beton selama 3 hari guna menjaga beton dalam kondisi jenuh air, yang membantu perkembangan kekuatan beton secara optimal. Selanjutnya proses pengujian kuat tekan beton dilakukan sesuai poin 4.14.1. Pada tahap pengujian kuat tekan, dilakukan pengukuran diameter, tinggi, dan berat benda uji untuk menentukan luas penampang. Permukaan benda uji kemudian diratakan melalui proses *capping*. Setelah itu, dilakukan pengujian menggunakan mesin uji tekan untuk memperoleh nilai beban maksimum dengan satuan (kN). Data tersebut dihitung menjadi nilai kuat tekan dalam satuan MPa. Apabila nilai kuat tekan telah memenuhi mutu rencana, maka penelitian dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya.

4.14 Pengujian Benda Uji

Pengujian benda uji dilakukan setelah beton mencapai umur yang telah direncanakan. Jenis pengujian yang dilakukan meliputi pengujian kuat tekan beton serta pengujian absorpsi beton. Adapun tahapan pelaksanaan pengujiannya adalah sebagai berikut.

4.14.1 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan mengacu pada SNI 1974-2011. Pengujian kuat tekan pada sampel beton dilakukan dengan menggunakan variasi umur pengujian. Pengujian variasi umur hari dilakukan pada saat beton mencapai umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan pada lima sampel untuk setiap variasi hari, dengan total sebanyak 120 sampel berbentuk silinder. Sebelum pengujian, bagian atas benda uji dilapisi belerang melalui proses *capping* untuk meratakan permukaan agar beban dari mesin kompresi tersebar merata. Pengujian dilakukan hingga beton tidak mampu lagi menahan beban dan mengalami keretakan atau pecah. Adapun pengujian kuat tekan beton dilaksanakan sebagai berikut.

1. Benda uji diangkat dari bak perendaman saat telah memasuki usia pengujian.
2. Dimensi benda uji diukur (mm).
3. Berat benda uji ditimbang (gram/kg).
4. Benda uji dilakukan proses *capping* pada permukaan atas.

5. Benda uji ditempatkan pada landasan tekan bagian bawah dan dipastikan bahwa indikator beban berada pada posisi nol.
6. Mesin uji kuat tekan dijalankan dengan laju pembebanan antara 0,15 MPa/detik hingga 0,35 MPa/detik.
7. Pembebanan diteruskan sampai benda uji mengalami keruntuhan dan beban maksimum yang diterima benda uji dicatat.

Setelah didapatkan data yang dibutuhkan pada pengujian kuat tekan beton berupa beban maksimum pada setiap benda uji dalam satuan (kN). Dari data tersebut kemudian dilakukan perhitungan sesuai pengujian kuat tekan untuk mendapatkan hasil kuat tekan pada beton dengan satuan (MPa).

4.14.2 Pengujian Absorpsi Beton

Pengujian absorpsi beton dilakukan mengacu pada SNI 6433-2016. Pengujian absorpsi pada sampel beton dilakukan dengan menggunakan variasi umur pengujian. Pengujian variasi umur hari dilakukan pada saat beton mencapai umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Pengujian absorpsi dilakukan setiap variasi hari adalah 2 sampel pada masing-masing variasi yang lain, dengan total sampel pada pengujian ini sebanyak 48 sampel kubus. Adapun pengujian absorpsi beton dilakukan sebagai berikut.

1. Benda uji diangkat dari bak perendaman.
2. Benda uji dikeringkan menggunakan oven pada temperatur $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ selama minimal 24 jam.
3. Benda uji dikeluarkan dari oven dan dibiarkan hingga mencapai suhu ruang ($20^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$).
4. Berat benda uji ditimbang dalam keadaan kering oven (gram/kg).
5. Benda uji dalam keadaan kering oven kemudian direndam pada air selama tidak kurang dari 48 jam.
6. Benda uji diangkat dari bak perendaman dan permukaan benda uji dikeringkan menggunakan kain kering untuk menghilangkan kelembapan pada permukaannya.
7. Benda uji ditimbang setelah perendaman dalam keadaan kering permukaan (gram/kg).

Setelah didapatkan data yang dibutuhkan pada pengujian absorpsi beton berupa berat setelah dilakukan pengeringan menggunakan oven dan berat setelah dilakukan perendaman selama 48 jam pada setiap benda uji dalam satuan (gram/kg). Dari data tersebut kemudian dilakukan perhitungan sesuai dengan rumus pengujian absorpsi untuk mendapatkan hasil pengujian absorpsi pada beton dengan satuan (%).

4.15 Analisis Hasil

Analisis data merupakan tahapan proses mengolah data untuk mendapatkan informasi yang berguna, yang dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan. Pada tahap ini, parameter yang diperoleh dari hasil pengolahan data dibandingkan atau dicocokkan berdasarkan kelompok variabel tertentu guna mengetahui perbedaan nilai yang muncul.

4.16 Pembahasan

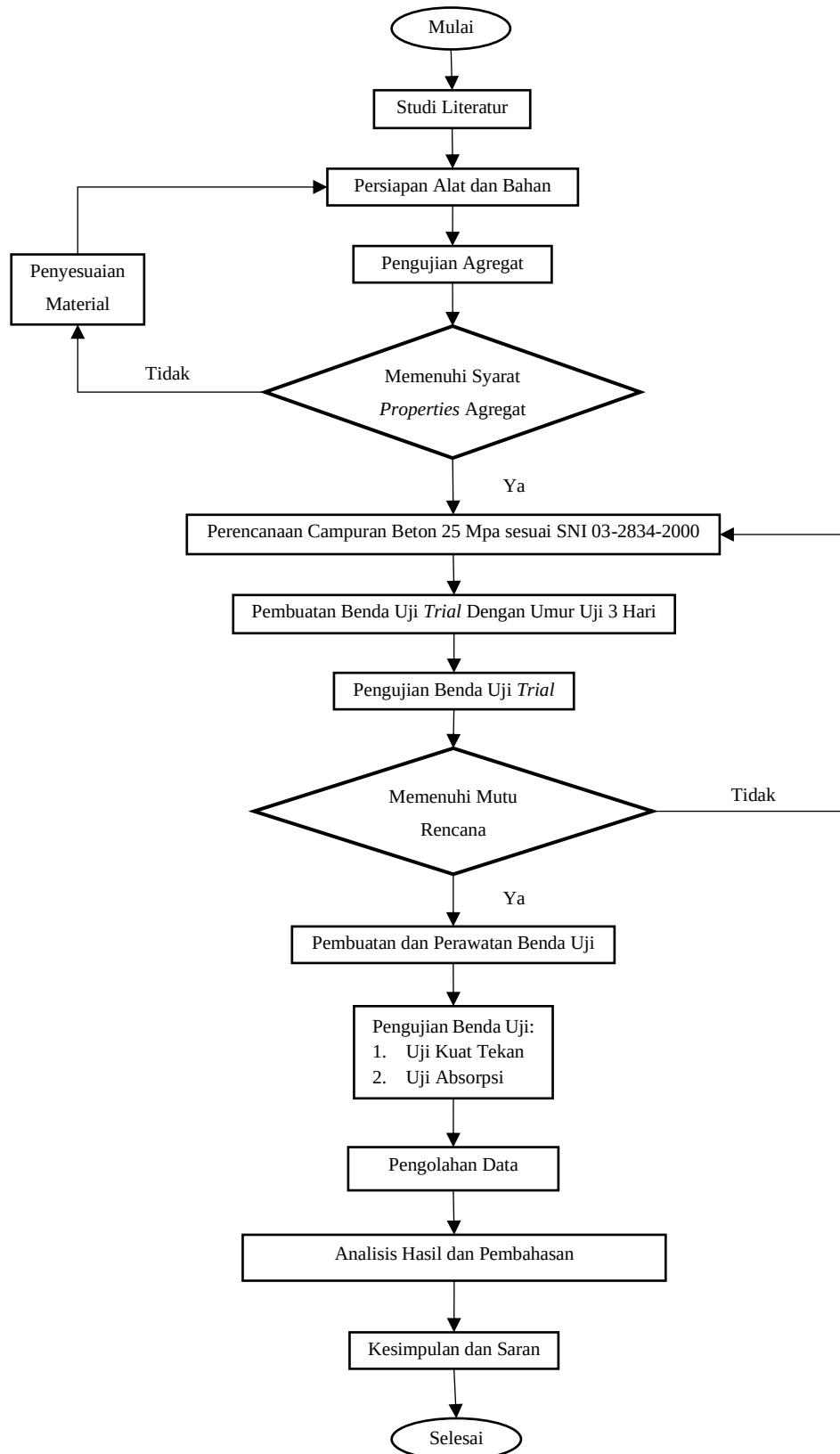
Pembahasan merupakan tahap yang memuat uraian mengenai pokok permasalahan berdasarkan hasil analisis data yang akan dibahas. Pada tahap ini, hasil analisis dijelaskan untuk memberikan jawaban serta interpretasi terhadap perbedaan-perbedaan nilai yang ditemukan pada proses analisis data.

4.17 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan dan saran merupakan tahap penarikan hasil dari analisis data serta pembahasan yang telah dilakukan. Tujuan penyusunan kesimpulan adalah untuk mengetahui capaian dari tujuan penelitian. Selain itu, pada tahap ini juga disusun saran bagi penelitian selanjutnya berdasarkan kesimpulan yang diperoleh.

4.18 Diagram Alir Penelitian

Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1 sebagai berikut



Gambar 4. 1 Diagram Alir Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil Pengujian Agregat

Pengujian agregat dilakukan untuk mengetahui sifat dan karakteristik agregat yang akan digunakan sebagai bahan penyusun beton. Sebelum dilakukan perencanaan campuran (*mix design*), agregat harus memenuhi beberapa persyaratan tertentu. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan terhadap agregat halus, agregat kasar alami, serta agregat kasar yang berasal dari limbah beton. Pengujian pada agregat kasar limbah beton dilakukan dengan prosedur yang sama seperti pada agregat kasar alami untuk menilai kelayakannya sebagai bahan penyusun beton. Disajikan hasil dan pembahasan dari pengujian karakteristik agregat halus dan agregat kasar, termasuk agregat kasar asli dan agregat kasar limbah beton. Berikut ini merupakan pembahasan mengenai hasil pengujian yang meliputi agregat halus, agregat kasar asli, serta agregat kasar limbah, untuk mengevaluasi kualitas dan kesesuaian masing-masing material.

5.1.1 Agregat Halus

Pengujian yang dilakukan terhadap agregat halus meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan air, analisis saringan, pengujian berat volume, serta pengujian kadar lumpur dengan metode lolos saringan No. 200. Adapun data dan hasil pembahasan mengenai pengujian agregat halus adalah sebagai berikut.

1. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 1970-2016. Pengujian ini dilaksanakan dengan menggunakan sampel agregat halus seberat 500 gram untuk setiap pengujian pada masing-masing sampel. Berdasarkan data yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai rumus pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus pada sampel 1 dapat dilihat sebagai berikut.

a. Berat Jenis Curah

$$= \frac{B_k}{(B+500-B_t)}$$

$$= \frac{488}{(704+500-1012)}$$

$$= 2,54$$

a. Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (SSD)

Berat Jenis SSD

$$= \frac{500}{(B+500-B_t)}$$

$$= \frac{500}{(704+500-1012)}$$

$$= 2,60$$

b. Berat Jenis Semu

Berat jenis semu

$$= \frac{B_k}{(B+B_k-B_t)}$$

$$= \frac{488}{(704+488-1012)}$$

$$= 2,71$$

c. Penyerapan Air

Penyerapan air

$$= \frac{(500-B_k)}{B_k} \times 100\%$$

$$= \frac{(500-488)}{488} \times 100\%$$

$$= 2,46\%$$

Selanjutnya langkah perhitungan yang sama dilakukan untuk menghitung berat jenis dan penyerapan air agregat halus pada sampel 2. Kemudian data dan hasil perhitungan menggunakan rumus pada sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Tabel 5.1 sebagai berikut.

Tabel 5. 1 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengujian		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat pasir kering mutlak, gram (B _k),	488	486,60	487,30
Berat pasir kondisi jenuh kering permukaan (SSD), gram	500	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (B _t)	1012	1010,40	1011,20
Berat piknometer berisi air, gram (B)	704	700,25	702,13
Berat jenis curah (B _k /(B+500-B _t))	2,54	2,56	2,55
Berat jenis jenuh kering permukaan (500/(B+500-B _t))	2,60	2,63	2,62
Berat jenis semu (B _k /(B+B _k -B _t))	2,71	2,76	2,73
Penyerapan air ((500-B _k)/(B _k x 100)), %	2,46	2,75	2,61

Dari hasil pengujian, diperoleh bahwa nilai rata-rata berat jenis agregat halus pada kondisi jenuh kering permukaan (*saturated surface dry*) adalah sebesar 2,62. Menurut SK SNI T-15-1990-1 (1990), berat jenis agregat halus dalam kondisi jenuh kering permukaan umumnya berada pada kisaran 2,5 – 2,7. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai rata-rata penyerapan air agregat halus sebesar 2,61%. Menurut SNI No. 1737-1989-F (1989), Berdasarkan ketentuan, nilai penyerapan air agregat tidak boleh melebihi 3%. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini tergolong sebagai agregat normal.

2. Analisa Saringan Agregat Halus

Pengujian analisa saringan agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 1968-1990. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan sampel agregat halus seberat 2000 gram untuk setiap pengujian. Selama proses pengujian, diperoleh data mengenai berat agregat yang tertahan pada tiap ukuran saringan. Berdasarkan data yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai rumus pengujian analisa saringan agregat halus pada sampel 1 dapat dilihat sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

$$\text{Persentase berat tertinggal} = \frac{\text{Berat Tertinggal}}{\sum \text{Berat tertinggal}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 4,8 mm} &= \frac{120}{1998} \times 100\% \\ &= 6,01\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 2,4 mm} &= \frac{174}{1998} \times 100\% \\ &= 8,71\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 1,2 mm} &= \frac{231}{1998} \times 100\% \\ &= 11,56\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,6 mm} &= \frac{636}{1998} \times 100\% \\ &= 31,83\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 0,3 mm} &= \frac{518}{1998} \times 100\% \\ &= 25,93\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 0,15 mm} &= \frac{269}{1998} \times 100\% \\ &= 13,46\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pan} &= \frac{50}{1998} \times 100\% \\ &= 2,50\%\end{aligned}$$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 4,8 mm} &= 0\% + 6,01\% \\ &= 6,01\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 2,4 mm} &= 6,01\% + 8,71\% \\ &= 14,71\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 1,2 mm} &= 14,71\% + 11,56\% \\ &= 26,28\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 0,6 mm} &= 26,28\% + 31,83\% \\ &= 58,11\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 0,3 mm} &= 58,11\% + 25,93\% \\ &= 84,03\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 0,15 mm} &= 84,03\% + 13,46\% \\ &= 97,50\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Pan} &= 97,50\% + 2,50\% \\ &= 100\%\end{aligned}$$

c. Persentase Lolos Kumulatif

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 4,8 mm} &= 100\% - 6,01\% \\ &= 93,99\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 2,4 mm} &= 100\% - 14,71\% \\ &= 85,29\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 1,2 mm} &= 100\% - 26,28\% \\ &= 73,72\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 0,6 mm} &= 100\% - 58,11\% \\ &= 41,89\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lubang ayakan 0,3 mm} &= 100\% - 84,03\% \\ &= 15,97\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Lubang ayakan 0,15 mm} &= 100\% - 97,50\% \\
 &= 2,50\% \\
 \text{Pan} &= 100\% - 100\% \\
 &= 0\%
 \end{aligned}$$

Langkah perhitungan yang sama kemudian diterapkan untuk analisis saringan agregat halus pada sampel 2. Selanjutnya, data dan hasil perhitungan menggunakan rumus yang relevan digunakan untuk memperoleh persentase berat tertinggal kumulatif dan persentase lolos kumulatif pada sampel 1 dan sampel 2. Nilai modulus halus butir (MHB) rata-rata yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.2 sebagai berikut.

Tabel 5. 2 Analisa Saringan Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)		Berat Tertinggal (%)		Berat Tertinggal Kumulatif (%)		Persen Lolos Kumulatif (%)	
	Sampel		Sampel		Sampel		Sampel	
	1	2	1	2	1	2	1	2
40	0	0	0	0	0	0	100	100
20	0	0	0	0	0	0	100	100
10	0	0	0	0	0	0	100	100
4,8	120	88	6,01	4,40	6,01	4,40	93,99	95,60
2,4	174	171	8,71	8,55	14,71	12,96	85,29	87,04
1,2	231	243	11,56	12,16	26,28	25,11	73,72	74,89
0,6	636	767	31,83	38,37	58,11	63,48	41,89	36,52
0,3	518	430	25,93	21,51	84,03	84,99	15,97	15,01
0,15	269	260	13,46	13,01	97,50	98,00	2,50	2
Pan	50	40	2,50	2	100	100	0	0
Jumlah	1998	1999	100	100	286,64	288,94	-	-
Rerata	1198,5		100		287,80		-	-

d. Modulus Halus Butir (MHB)

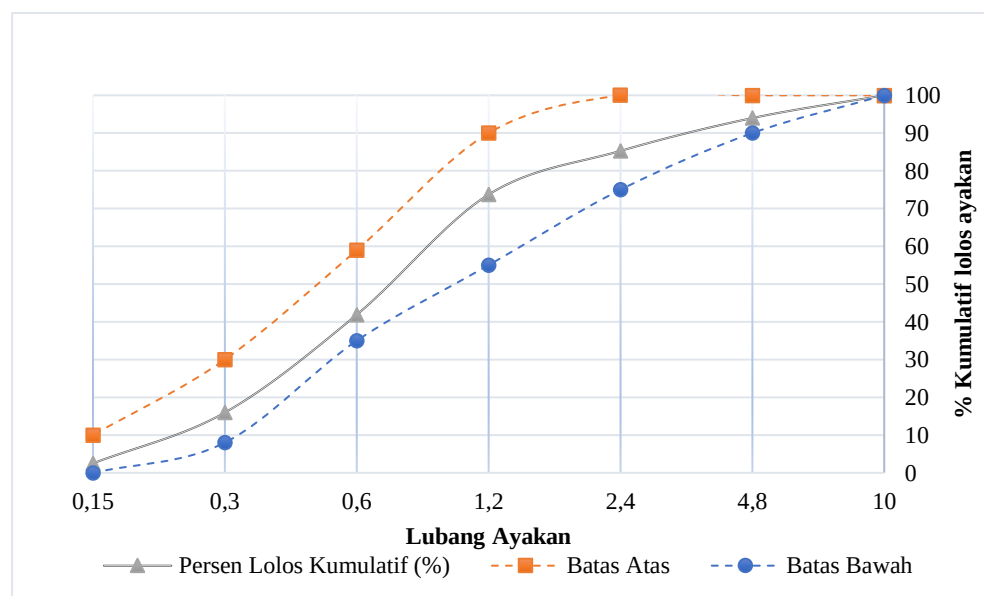
$$\begin{aligned}
 \text{MHB}_{\text{rata-rata}} &= \frac{\Sigma \text{Berat tertinggal kumulatif}_{\text{rata-rata}}}{100} \\
 &= \frac{287,80}{100} \\
 &= 2,88
 \end{aligned}$$

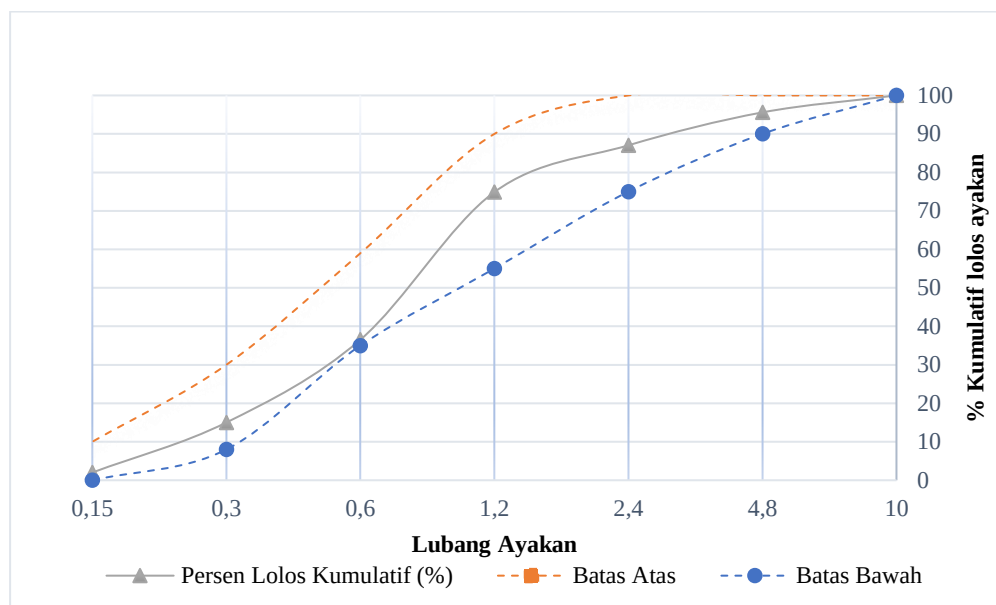
Tabel 5. 3 Batas Daerah Gradasi Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4.8	90-100	90-100	90-100	95-100
2.4	60-95	75-100	85-100	95-100
1.2	30-70	55-90	75-100	90-100
0.6	15-34	35-59	60-79	80-100
0.3	5-20	8-30	12-40	15-50
0.15	0-10	0-10	0-10	0-15

Sumber: SNI 2834 (2000)

Data modulus halus butir yang didapatkan pada Tabel 5.2 di atas digunakan untuk menentukan daerah gradasi terhadap agregat halus dengan menggunakan nilai persen lolos kumulatif. Batas daerah gradasi agregat halus menurut SNI 03-2834-2000 dapat dilihat pada Tabel 5.3 diatas. Berdasarkan pengujian, dapat ditentukan bahwa kedua sampel agregat halus masuk kedalam jenis gradasi daerah II. Kedua grafik dari gradasi agregat halus beserta batas gradasi yang dapat dilihat pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.2 sebagai berikut.

**Gambar 5. 1 Kurva Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 1**



Gambar 5. 2 Kurva Gradasi Agregat Halus Daerah II Sampel 2

Hasil perhitungan rata-rata modulus halus butir diketahui adalah sebesar 2,88. Menurut SK SNI S-04-1989-F, nilai modulus kehalusan agregat halus berada pada kisaran 1,5–3,8. Dengan demikian, nilai modulus halus butir agregat halus yang diperoleh pada pengujian ini telah memenuhi persyaratan tersebut. Dari nilai persen lolos kumulatif pada Tabel 5.2 tersebut didapatkan kurva gradasi yang sesuai untuk agregat halus dari kedua sampel pemeriksaan dapat dilihat pada Gambar 5.1 dan 5.2. Grafik tersebut menunjukkan bahwa persentase lolos kumulatif agregat halus berada di antara batas atas dan batas bawah gradasi II, yang termasuk kategori pasir agak kasar.

3. Berat Volume Gembur dan Padat Agregat Halus

Pengujian berat volume gembur dan padat agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 4804-1998. Berdasarkan data yang diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai dengan rumus pengujian berat volume gembur dan padat untuk agregat halus pada sampel 1, sebagaimana dapat dilihat sebagai berikut.

a. Berat Volume Gembur

$$\begin{aligned}
 1) \quad \text{Berat Agregat (W3)} &= W_2 - W_1 \\
 &= 18098 - 11234 \\
 &= 6864 \text{ gram} \\
 2) \quad \text{Volume Silinder} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,30^2 \times 29,70 \\
 &= 5460,46 \text{ cm}^3 \\
 3) \quad \text{Berat Volume Gembur} &= \frac{W_3}{V} \\
 &= \frac{6864}{5460,46} \\
 &= 1,26 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

b. Berat Volume Padat

$$\begin{aligned}
 1) \quad \text{Berat Agregat (W3)} &= W_2 - W_1 \\
 &= 19582 - 11234 \\
 &= 8348 \text{ gram} \\
 2) \quad \text{Volume Silinder} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,30^2 \times 29,70 \\
 &= 5460,46 \text{ cm}^3 \\
 3) \quad \text{Berat Volume Padat} &= \frac{W_3}{V} \\
 &= \frac{8348}{5460,46} \\
 &= 1,53 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Langkah perhitungan yang sama kemudian diterapkan untuk menentukan berat volume gembur dan berat volume padat agregat halus pada sampel 2. Selanjutnya, data serta hasil perhitungan berat volume gembur dan padat untuk agregat halus pada sampel 1 dan sampel 2, yang diperoleh melalui rumus pengujian, dapat dilihat pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5 sebagai berikut.

Tabel 5. 4 Berat Volume Gembur Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,30	15,30	15,30
Tinggi silinder (t), cm	29,70	29,70	29,70
Berat silinder (W1), gram	11234	11234	11234
Berat silinder + agregat SSD (W2), gram	18098	18105	18102
Berat agregat (W3), gram	6864	6871	6868
Volume silinder (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm ³	1,26	1,26	1,26

Tabel 5. 5 Berat Volume Padat Agregat Halus

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,30	15,30	15,30
Tinggi silinder (t), cm	29,70	29,70	29,70
Berat silinder (W1), gram	11234	11234	11234
Berat silinder + agregat SSD (W2), gram	19582	19626	19604
Berat agregat (W3), gram	8348	8392	8370
Volume silinder (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat volume padat (W3/V), gram/cm ³	1,53	1,54	1,53

Karakteristik fisik agregat halus sangat dipengaruhi oleh berat volume dalam kondisi gembur maupun padat. Berdasarkan pengujian, diperoleh berat volume gembur rata-rata agregat halus sebesar 1,26 gram/cm³. Sementara itu, berat volume padat agregat halus menunjukkan nilai rata-rata 1,53 gram/cm³. Perbedaan kedua nilai tersebut mengindikasikan variasi tingkat porositas dan kepadatan partikel agregat. Data ini menjadi acuan penting dalam perencanaan campuran beton untuk memastikan kekompakan dan kestabilan struktur sesuai standar yang berlaku.

4. Lolos Saringan No. 200 (Uji Kadar Lumpur dalam Pasir)

Pengujian lolos saringan no. 200 atau pengujian kadar lumpur agregat halus dilakukan berdasarkan SNI 4142-1996. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan sampel agregat halus seberat 500 gram untuk setiap sampel. Setelah data hasil pengujian diperoleh, selanjutnya dilakukan perhitungan menggunakan rumus pada pengujian butiran lolos ayakan No. 200 (uji

kandungan lumpur dalam pasir). Hasil perhitungan untuk agregat halus pada sampel 1 dapat dilihat sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Kadar lumpur dalam pasir} &= \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \\
 &= \frac{500 - 492}{500} \times 100\% \\
 &= 1,60 \%
 \end{aligned}$$

Langkah perhitungan yang sama kemudian diterapkan untuk menentukan butiran lolos ayakan No. 200 (uji kandungan lumpur dalam pasir) pada agregat halus sampel 2. Selanjutnya, data serta hasil perhitungan menggunakan rumus pengujian lolos saringan No. 200 untuk agregat halus pada sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Tabel 5.6 sebagai berikut.

Tabel 5. 6 Lolos Saringan No.200

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat agregat kering oven (W1), gram	500	500	500
Berat agregat kering oven setelah dicuci (W2), gram	492	493	492,3
Presentase yang lolos ayakan No. 200 $[(W_1 - W_2)/W_1] \times 100, \%$	1,60	1,48	1,54

Berdasarkan hasil dari olah data dapat dilihat pada Tabel 5.6, didapatkan hasil pengujian lolos saringan no.200 (uji kandungan lumpur) agregat halus rata-rata adalah sebesar 1.54%. Menurut Peraturan Beton Bertulang Indonesia (1971), pasir yang bisa digunakan untuk bahan bangunan jika kandungan lumpurnya tidak lebih dari 5% (lima persen). Sehingga, agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan tersebut.

5.1.2 Agregat Kasar Asli

Pengujian terhadap agregat kasar asli meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan air, analisis saringan, serta pengujian berat volume. Data serta hasil pembahasan dari seluruh pengujian tersebut dapat dilihat sebagai berikut.

1. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Asli

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar asli dilakukan berdasarkan SNI 1969-2016. Pengujian ini dilakukan menggunakan sampel agregat kasar asli dengan berat 5000 gram pada masing-masing sampel. Berdasarkan data yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai rumus pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar asli pada sampel 1 dapat dilihat sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{a. Berat Jenis Curah} &= \frac{B_k}{(B_j - B_a)} \\ &= \frac{4862}{(5000 - 3122)} \\ &= 2,59 \end{aligned}$$

b. Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (SSD)

$$\begin{aligned} \text{Berat Jenis SSD} &= \frac{B_j}{(B_j - B_a)} \\ &= \frac{5000}{(5000 - 3122)} \\ &= 2,66 \end{aligned}$$

c. Berat Jenis Semu

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu} &= \frac{B_k}{(B_k - B_a)} \\ &= \frac{4862}{(4862 - 3122)} \\ &= 2,79 \end{aligned}$$

d. Penyerapan Air

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan air} &= \frac{(B_j - B_k)}{B_k} \times 100\% \\ &= \frac{(5000 - 4862)}{4862} \times 100\% \\ &= 2,84 \% \end{aligned}$$

Perhitungan yang sama dilakukan pula pada sampel 2 untuk memperoleh nilai berat jenis dan penyerapan air agregat kasar asli. Hasil pengujian dan perhitungan untuk kedua sampel disajikan pada Tabel 5.7 dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 5. 7 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Asli

Uraian	Hasil Pengujian		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat Kerikil Kering Mutlak (Bk), gram	4862	4857,79	4859,89
Berat Kerikil Jenuh Kering Muka (Bj) gram	5000	5000	5000
Berat Kerikil Dalam Air (Ba) gram	3122	3081	3101,50
Berat Jenis Curah BK/(BJ-Ba)	2,59	2,53	2,56
Berat Jenis Jenuh Kering Muda (SSD) Bj/ (Bj-Ba)	2,66	2,61	2,63
Berat Jenis Semu Bk/(Bk-Ba)	2,79	2,73	2,76
Penyerapan Air (Bj-Bk)/Bk x 100%, %	2,84	2,93	2,88

Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis agregat kasar asli dalam kondisi jenuh kering permukaan *saturated surface dry* (SSD) memiliki nilai rata-rata adalah sebesar 2,63. Menurut SK SNI T-15-1990-1 (1990), kisaran berat jenis SSD untuk agregat normal berada antara 2,5 hingga 2,7. Selain itu, diperoleh nilai penyerapan air agregat kasar asli sebesar 2,88%. Menurut SNI No. 1737-1989-F (1989), batas maksimum penyerapan air agregat adalah $\leq 3\%$. Dengan demikian, agregat kasar asli yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi kriteria sebagai agregat normal.

2. Analisa Saringan Agregat Kasar Asli

Pengujian analisa saringan agregat kasar asli dilakukan berdasarkan SNI 1968- 1990. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan sampel agregat kasar asli seberat 5000 gram pada setiap sampel. Dari pengujian tersebut diperoleh data mengenai berat tertinggal pada masing-masing nomor saringan. Berdasarkan data yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai rumus pengujian analisa saringan agregat kasar asli pada sampel 1 dapat dilihat sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

$$\text{Persentase berat tertinggal} = \frac{\text{Berat Tertinggal}}{\Sigma \text{Berat tertinggal}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 40 mm} &= \frac{248}{5000} \times 100\% \\ &= 4,96\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayaksan 20 mm} &= \frac{2578}{5000} \times 100\% \\ &= 51,56\% \end{aligned}$$

Lubang ayakan 10 mm	$= \frac{1047}{5000} \times 100\%$
	$= 20,94\%$
Lubang ayakan 4,8 mm	$= \frac{904}{5000} \times 100\%$
	$= 18,08\%$
Lubang ayakan 2,4 mm	$= \frac{128}{5000} \times 100\%$
	$= 2,56\%$
Lubang ayakan 1,2 mm	$= \frac{6}{5000} \times 100\%$
	$= 0,12\%$
Lubang ayakan 0,6 mm	$= \frac{4}{5000} \times 100\%$
	$= 0,08\%$
Pan	$= \frac{85}{5000} \times 100\%$
	$= 1,70\%$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Lubang ayakan 40 mm	$= 4,96\%$
Lubang ayakan 20 mm	$= 4,96\% + 51,56\%$
	$= 56,52\%$
Lubang ayakan 10 mm	$= 56,52\% + 20,94\%$
	$= 77,46\%$
Lubang ayakan 4,8 mm	$= 77,46\% + 18,08\%$
	$= 95,54\%$
Lubang ayakan 2,4 mm	$= 95,54\% + 2,56\%$
	$= 98,10\%$
Lubang ayakan 1,2 mm	$= 98,10\% + 0,12\%$
	$= 98,22\%$
Lubang ayakan 0,6 mm	$= 98,22\% + 0,08\%$
	$= 98,30\%$
Pan	$= 98,30\% + 1,70\%$
	$= 100\%$

c. Persentase Lolos Kumulatif

Lubang ayakan 40 mm	= 100% – 4,96%
	= 95,04%
Lubang ayakan 20 mm	= 100% – 56,52%
	= 43,48%
Lubang ayakan 10 mm	= 100% – 77,46%
	= 22,54%
Lubang ayakan 4,8 mm	= 100% – 95,54%
	= 4,46%
Lubang ayakan 2,4 mm	= 100% – 98,10%
	= 1,90%
Lubang ayakan 1,2 mm	= 100% – 98,22%
	= 1,78%
Lubang ayakan 0,6 mm	= 100% – 98,30%
	= 1,70%
Pan	= 100% – 100%
	= 0%

Langkah perhitungan yang sama kemudian diterapkan untuk analisis saringan agregat kasar asli pada sampel 2. Selanjutnya, data dan hasil perhitungan menggunakan rumus yang relevan digunakan untuk memperoleh persentase berat tertinggal kumulatif dan persentase lolos kumulatif pada sampel 1 dan sampel 2. Nilai modulus halus butir (MHB) rata-rata yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.8 sebagai berikut.

Tabel 5. 8 Analisa Saringan Agregat Kasar Asli

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)		Berat Tertinggal (%)		Berat Tertinggal Kumulatif (%)		Persen Lolos Kumulatif (%)	
	Sampel		Sampel		Sampel		Sampel	
	1	2	1	2	1	2	1	2
40	248	234	4,96	4,68	4,96	4,68	95,04	95,32
20	2578	2602	51,56	52,04	56,52	56,72	43,48	43,28
10	1047	1075	20,94	21,50	77,46	78,22	22,54	21,78
4,8	904	873	18,08	17,46	95,54	95,68	4,46	4,32
2,4	128	103	2,56	2,06	98,10	97,74	1,90	2,26
1,2	6	6	0,12	0,12	98,22	97,86	1,78	2,14
0,6	4	5	0,08	0,10	98,30	97,96	1,70	2,04
0,3	0	0	0	0	98,30	97,96	1,70	2,04
0,15	0	0	0	0	98,30	97,96	1,70	2,04
Pan	85	102	1,70	2,04	100	100	0	0
Jumlah	5000	5000	100	100	725,70	724,78	-	-
Rerata	5000		100		725,24		-	-

d. Modulus Halus Butir (MHB)

$$\begin{aligned}
 MHB_{rata-rata} &= \frac{\Sigma \text{Berat tertinggal kumulatif}_{rata-rata}}{100} \\
 &= \frac{725,24}{100} \\
 &= 7,25
 \end{aligned}$$

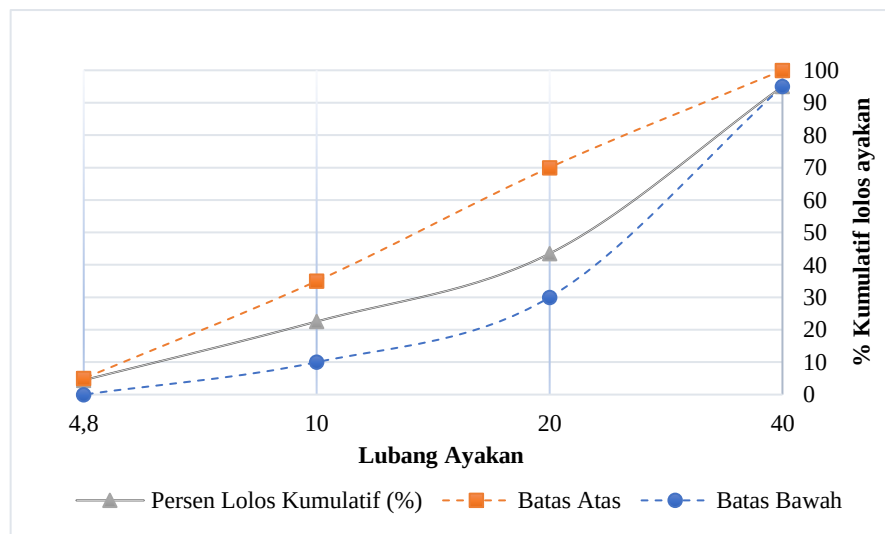
Tabel 5. 9 Batas Daerah Gradasi Agregat Kasar

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Ayakan/Besar Butiran Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95-100	100
20	30-70	95-100
10	10-35	25-55
4,8	0-5	0-10

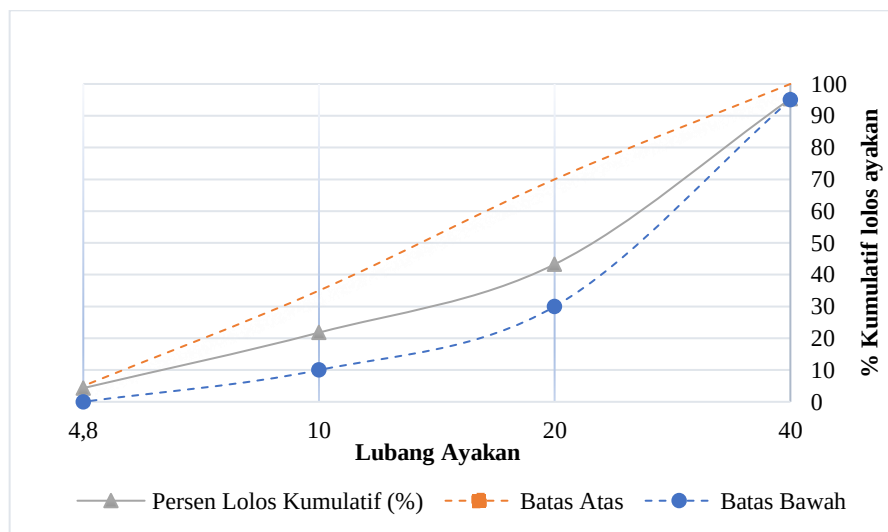
Sumber: SNI 2834 (2000)

Data modulus halus butir yang didapatkan pada Tabel.5.8 di atas digunakan untuk menentukan ukuran maksimum agregat kasar asli dengan menggunakan nilai persen lolos kumulatif. Penentuan ukuran maksimum

agregat kasar asli dilakukan berdasarkan persentase berat butir agregat yang lolos ayakan. Batas daerah gradasi agregat kasar menurut SNI 03-2834-2000 dapat dilihat pada Tabel 5.9 diatas. Berdasarkan pengujian, dapat ditentukan bahwa kedua sampel agregat kasar asli memiliki ukuran maksimum 40 mm. Kedua grafik dari gradasi ukuran maksimum agregat kasar asli beserta batas gradasi yang dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4 sebagai berikut.



Gambar 5. 3 Kurva Gradasi Agregat Kasar Asli Maksimum 40 mm Sampel 1



Gambar 5. 4 Kurva Gradasi Agregat Kasar Asli Maksimum 40 mm Sampel 2

Nilai modulus halus butir agregat kasar asli yang diperoleh memiliki rata-rata sebesar 7,25. Menurut SK SNI S-04-1989-F, rentang nilai modulus halus butir untuk agregat kasar berada antara 5 hingga 8. Dengan demikian, nilai modulus halus butir agregat kasar asli yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan tersebut. Dari nilai persen lolos kumulatif pada Tabel 5.8 tersebut didapatkan kurva gradasi yang sesuai untuk agregat kasar dari kedua sampel pemeriksaan, hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.3 dan Gambar 5.4. Kurva gradasi tersebut menggambarkan bahwa nilai persen lolos kumulatif pada agregat kasar asli berada di antara batas atas dan batas bawah gradasi butiran agregat kasar dengan ukuran maksimum 40 mm. Berdasarkan Gambar 5.3 dan Gambar 5.4, diketahui bahwa agregat kasar asli pada sampel 1 dan sampel 2 memiliki ukuran butir maksimum sebesar 40 mm.

3. Berat Volume Gembur dan Padat Agregat Kasar Asli

Pengujian berat volume gembur dan berat volume padat agregat kasar asli dilakukan mengacu pada SNI 4804-1998. Data hasil pengujian kemudian dihitung menggunakan rumus berat volume gembur dan padat pada sampel 1, sebagaimana dapat dilihat sebagai berikut.

a. Berat Volume Gembur

$$\begin{aligned}
 1) \quad \text{Berat Agregat (W3)} &= W2 - W1 \\
 &= 18791 - 11234 \\
 &= 7557 \text{ gram} \\
 2) \quad \text{Volume Silinder} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,30^2 \times 29,70 \\
 &= 5460,46 \text{ cm}^3 \\
 3) \quad \text{Berat Volume Gembur} &= \frac{W3}{V} \\
 &= \frac{7557}{5460,46} \\
 &= 1,38 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

b. Berat Volume Padat

$$\begin{aligned}
 1) \quad \text{Berat Agregat (W3)} &= W2 - W1 \\
 &= 19731 - 11234 \\
 &= 8497 \text{ gram} \\
 2) \quad \text{Volume Silinder} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,30^2 \times 29,70 \\
 &= 5460,46 \text{ cm}^3 \\
 3) \quad \text{Berat Volume Padat} &= \frac{W3}{V} \\
 &= \frac{8497}{5460,46} \\
 &= 1,56 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Langkah perhitungan yang sama kemudian diterapkan untuk menentukan berat volume gembur dan padat agregat kasar asli pada sampel 2. Kemudian data dan hasil perhitungan menggunakan rumus sesuai pengujian berat volume gembur dan padat agregat kasar asli pada sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Tabel 5.10 dan Tabel 5.11 sebagai berikut.

Tabel 5. 10 Berat Volume Gembur Agregat Kasar Asli

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,30	15,30	15,30
Tinggi silinder (t), cm	29,70	29,70	29,70
Berat silinder (W1), gram	11234	11234	11234
Berat silinder + agregat SSD (W2), gram	18791	18861	18826
Berat agregat (W3), gram	7557	7627	7592
Volume silinder (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm ³	1,38	1,40	1,39

Tabel 5. 11 Berat Volume Padat Agregat Kasar Asli

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,30	15,30	15,30
Tinggi silinder (t), cm	29,70	29,70	29,70
Berat silinder (W1), gram	11234	11234	11234
Berat silinder + agregat SSD (W2), gram	19731	19759	19745
Berat agregat (W3), gram	8497	8525	8511
Volume silinder (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat volume padat (W3/V), gram/cm ³	1,56	1,56	1,56

Karakteristik fisik agregat kasar asli sangat dipengaruhi oleh berat volume dalam kondisi gembur maupun padat. Berdasarkan pengujian, diperoleh berat volume gembur rata-rata agregat kasar asli sebesar 1,39 gram/cm³. Sementara itu, berat volume padat agregat kasar asli menunjukkan nilai rata-rata 1,56 gram/cm³. Perbedaan kedua nilai tersebut mengindikasikan variasi tingkat porositas dan kepadatan partikel agregat. Data ini menjadi acuan penting dalam perencanaan campuran beton untuk memastikan kekompakan dan kestabilan struktur sesuai standar yang berlaku.

5.1.3 Agregat Kasar Limbah Beton

Agregat kasar limbah beton diperlakukan dengan prosedur yang sama seperti agregat kasar asli. Oleh karena itu, dilakukan pengujian sifat-sifat (*properties*) agregat kasar limbah beton guna menilai kelayakannya sebagai material penyusun beton. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian berat jenis dan penyerapan air, analisis saringan, serta pengujian berat volume. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat sebagai berikut.

1. Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Limbah Beton

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar limbah beton dilakukan berdasarkan SNI 1969-2016. Pengujian ini dilakukan menggunakan sampel agregat kasar limbah beton 5000 gram pada masing-masing sampel. Berdasarkan data yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai rumus pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar limbah pada sampel 1 dapat dilihat sebagai berikut.

1. Berat Jenis Curah = $\frac{B_k}{(B_j - B_a)}$

$$= \frac{4607}{(5000 - 2769)}$$

$$= 2,06$$
2. Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (SSD)
 Berat Jenis SSD = $\frac{B_j}{(B_j - B_a)}$

$$= \frac{5000}{(5000 - 2769)}$$

$$= 2,24$$
3. Berat Jenis Semu
 Berat jenis semu = $\frac{B_k}{(B_k - B_a)}$

$$= \frac{4607}{(4607 - 2769)}$$

$$= 2,51$$
4. Penyerapan Air
 Penyerapan air = $\frac{(B_j - B_k)}{B_k} \times 100\%$

$$= \frac{(5000 - 4607)}{4607} \times 100\%$$

$$= 8,53 \%$$

Perhitungan yang sama dilakukan pula pada sampel 2 untuk memperoleh nilai berat jenis dan penyerapan air agregat kasar limbah beton. Hasil pengujian dan perhitungan untuk kedua sampel disajikan pada Tabel 5.12.

Tabel 5. 12 Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar Limbah

Uraian	Hasil Pengujian		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata - rata
Berat Kerikil Kering Mutlak (B _k), gram	4607	4610	4608,50
Berat Kerikil Jenuh Kering Muka (B _j), gram	5000	5000	5000
Berat Kerikil Dalam Air (B _a), gram	2769	2774	2771,50
Berat Jenis Curah B _k /(B _j -B _a)	2,06	2,07	2,07
Berat Jenis Jenuh Kering Muda (SSD) B _j / (B _j -B _a)	2,24	2,25	2,24
Berat Jenis Semu B _k /(B _k -B _a)	2,51	2,51	2,51
Penyerapan Air (B _j -B _k)/B _k x 100%, %	8,53	8,46	8,50

Diperoleh hasil bahwa berat jenis agregat kasar limbah beton dalam kondisi jenuh kering permukaan (*saturated surface dry*) memiliki nilai rata-rata sebesar 2,24. Mengacu pada SK SNI T-15-1990-1 (1990), rentang berat jenis jenuh kering permukaan untuk agregat normal adalah 2,5–2,7. Dengan demikian, agregat kasar limbah beton yang digunakan dalam penelitian ini tidak termasuk dalam kategori agregat normal. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai penyerapan air rata-rata agregat kasar limbah beton adalah sebesar 8,50%. Menurut SNI 1737-1989-F (1989), batas maksimum penyerapan air agregat adalah $\leq 3\%$. Oleh karena itu, agregat kasar limbah beton tersebut tidak memenuhi persyaratan penyerapan air yang ditetapkan. Menurut Parshotam (2019), penyerapan air pada agregat kasar limbah beton sebelum atau sesudah melalui *treatment* berkisar antara 3,96% - 9,7%. Menurut Shahidan (2017), penyerapan air yang terjadi pada agregat kasar limbah beton untuk ukuran agregat maksimum 37,5 mm berkisar antara 5,98% - 10,60%. Menurut Taboada dkk, (2016) penyerapan air pada agregat kasar limbah berkisar antara 1,65% hingga 13,1%, dengan nilai rata-rata sebesar 5,32%. Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, rentang tersebut masih sejalan dengan karakteristik penyerapan air agregat limbah yang umumnya dilaporkan, sehingga hasil pada penelitian ini dapat dikatakan konsisten dengan temuan sebelumnya. Menurut Vahidi et al. (2024), Beton agregat daur ulang biasanya menunjukkan penyusutan yang lebih tinggi daripada beton agregat alami, hal ini karena adanya sisa mortar yang menyebabkan penyerapan air yang lebih tinggi. Peningkatan nilai penyerapan air tersebut disebabkan oleh sifat agregat limbah yang memiliki porositas tinggi. Struktur pori yang lebih banyak dan lebih terbuka membuat agregat limbah lebih mudah menyerap air dibandingkan agregat normal. Mortar pada beton yang telah digunakan biasanya memiliki pori-pori mikroskopis yang terbentuk selama proses hidrasi semen. Pori-pori ini menjadi lebih jelas ketika beton dihancurkan untuk didaur ulang. Mortar yang melekat pada agregat ini meningkatkan total volume pori pada agregat daur ulang.

2. Analisa Saringan Agregat Kasar Limbah Beton

Pengujian analisa saringan agregat kasar limbah beton dilakukan mengacu pada SNI 1968-1990. Proses pengujian menggunakan sampel agregat limbah beton dengan berat 5000 gram. Berdasarkan data yang diperoleh selanjutnya dilakukan perhitungan sesuai rumus pengujian analisa saringan agregat kasar limbah beton pada sampel 1 dapat dilihat sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

$$\text{Persentase berat tertinggal} = \frac{\text{Berat Tertinggal}}{\Sigma \text{Berat tertinggal}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 40 mm} &= \frac{205}{5000} \times 100\% \\ &= 4,10\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayaksan 20 mm} &= \frac{2510}{5000} \times 100\% \\ &= 50,20\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 10 mm} &= \frac{1427}{5000} \times 100\% \\ &= 28,54\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 4,8 mm} &= \frac{627}{5000} \times 100\% \\ &= 12,54\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 2,4 mm} &= \frac{58}{5000} \times 100\% \\ &= 1,16\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 1,2 mm} &= \frac{49}{5000} \times 100\% \\ &= 0,98\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pan} &= \frac{124}{5000} \times 100\% \\ &= 2,48\% \end{aligned}$$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

$$\text{Lubang ayakan 40 mm} = 4,10\%$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 20 mm} &= 4,10\% + 50,20\% \\ &= 54,30\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lubang ayakan 10 mm} &= 54,30\% + 28,54\% \\ &= 82,84\% \end{aligned}$$

Lubang ayakan 4,8 mm	= 82,84% + 12,54%
	= 95,38%
Lubang ayakan 2,4 mm	= 95,38% + 1,16%
	= 96,54 %
Lubang ayakan 1,2 mm	= 96,54% + 0,98%
	= 97,52%
Pan	= 97,52 % + 2,48 %
	= 100 %

c. Persentase Lolos Kumulatif

Lubang ayakan 40 mm	= 100% – 4,10%
	= 95,90%
Lubang ayakan 20 mm	= 100% – 54,30%
	= 45,70%
Lubang ayakan 10 mm	= 100% – 82,84%
	= 17,16%
Lubang ayakan 4,8 mm	= 100% – 95,38%
	= 4,62%
Lubang ayakan 2,4 mm	= 100% – 96,54%
	= 3,46%
Lubang ayakan 1,2 mm	= 100% – 97,52%
	= 2,48%
Pan	= 100 % – 100 %
	= 0%

Langkah perhitungan yang sama kemudian diterapkan untuk analisis saringan agregat kasar limbah beton pada sampel 2. Selanjutnya, data dan hasil perhitungan menggunakan rumus yang relevan digunakan untuk memperoleh persentase berat tertinggal kumulatif dan persentase lolos kumulatif pada sampel 1 dan sampel 2. Nilai modulus halus butir (MHB) rata-rata yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 5.13 sebagai berikut.

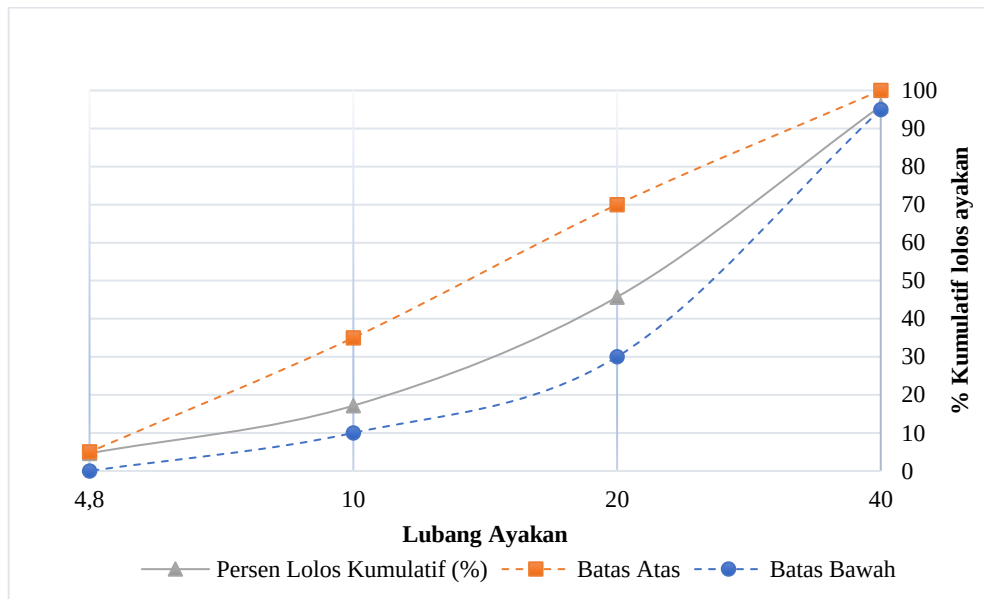
Tabel 5. 13 Analisa Saringan Agregat Kasar Limbah Beton

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)		Berat Tertinggal (%)		Berat Tertinggal Kumulatif (%)		Persen Lolos Kumulatif (%)	
	Sampel		Sampel		Sampel		Sampel	
	1	2	1	2	1	2	1	2
40	205	188	4,10	3,76	4,10	3,76	95,90	96,24
20	2510	2449	50,20	48,98	54,30	52,74	45,70	47,26
10	1427	1419	28,54	28,38	82,84	81,12	17,16	18,88
4,8	627	750	12,54	15,00	95,38	96,12	4,62	3,88
2,4	58	36	1,16	0,72	96,54	96,84	3,46	3,16
1,2	49	23	0,98	0,46	97,52	97,30	2,48	2,70
0,6	0	0	0	0	97,52	97,30	2,48	2,70
0,3	0	0	0	0	97,52	97,30	2,48	2,70
0,15	0	0	0	0	97,52	97,30	2,48	2,70
Pan	124	135	2,48	2,70	100	100	0	0
Jumlah	5000	5000	100	100	723,24	719,78	-	-
Rerata	5000		100		721,51		-	-

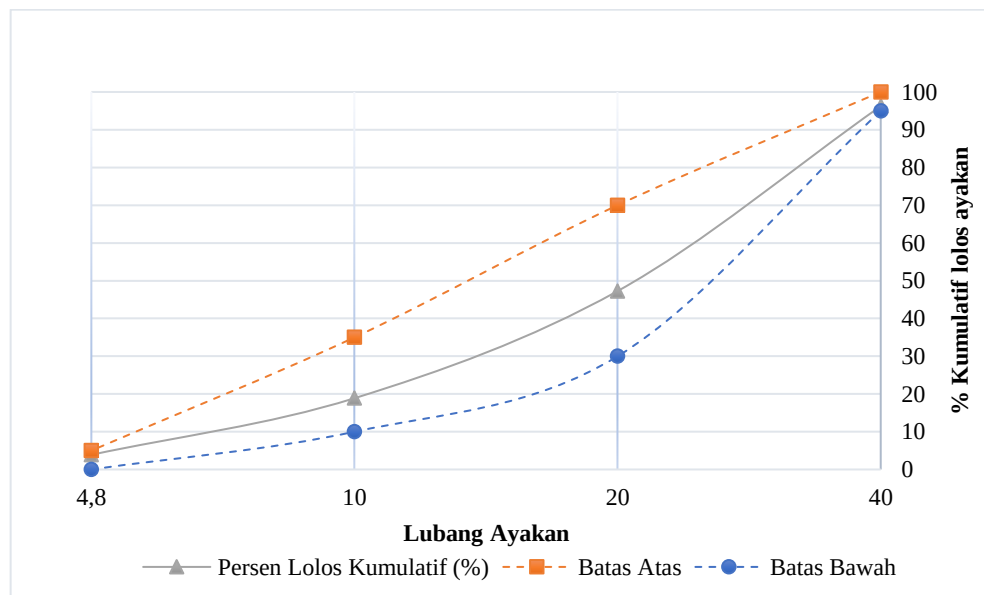
d. Modulus Halus Butir (MHB)

$$\begin{aligned}
 MHB_{rata-rata} &= \frac{\Sigma \text{Berat tertinggal kumulatif}_{rata-rata}}{100} \\
 &= \frac{721,51}{100} \\
 &= 7,22
 \end{aligned}$$

Data modulus halus butir yang didapatkan pada Tabel.5.13 di atas digunakan untuk menentukan ukuran maksimum agregat kasar limbah beton dengan menggunakan nilai persen lolos kumulatif. Penentuan ukuran maksimum agregat kasar limbah beton dilakukan berdasarkan persentase berat butir agregat yang lolos ayakan. Batas gradasi agregat kasar menurut SNI 03-2834-2000 dapat dilihat pada Tabel 5.9 diatas. Berdasarkan pengujian, dapat ditentukan bahwa kedua sampel agregat kasar limbah beton memiliki ukuran maksimum 40 mm. Kedua grafik dari gradasi ukuran maksimum agregat kasar limbah beton ukuran maksimum 40 mm beserta batas gradasi pada sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Gambar 5.5 dan Gambar 5.6 sebagai berikut.



Gambar 5. 5 Kurva Gradasi Agregat Kasar Limbah Maksimum 40 mm Sampel 1



Gambar 5. 6 Kurva Gradasi Agregat Kasar Limbah Maksimum 40 mm Sampel 2

Berdasarkan hasil perhitungan modulus halus butir, nilai modulus halus butir agregat kasar limbah beton pada sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Tabel 5.13. Dari perhitungan tersebut diperoleh nilai rata-rata sebesar 7,22. Menurut pada SK SNI S-04-1989-F, rentang nilai modulus halus butir yang disyaratkan untuk agregat kasar adalah 5–8. Dengan demikian, agregat kasar limbah beton yang digunakan dalam penelitian ini telah memenuhi persyaratan tersebut. Dari nilai persen lolos kumulatif pada Tabel 5.13 tersebut didapatkan kurva gradasi yang sesuai untuk agregat kasar dari kedua sampel pemeriksaan dapat dilihat pada Gambar 5.5 dan 5.6. Kurva gradasi tersebut menggambarkan bahwa nilai persen lolos kumulatif pada agregat kasar limbah beton berada di antara batas atas dan batas bawah gradasi butiran agregat kasar dengan ukuran maksimum 40 mm. Berdasarkan Gambar 5.5 dan Gambar 5.6, diketahui bahwa agregat kasar limbah beton pada sampel 1 dan sampel 2 memiliki ukuran butir maksimum sebesar 40 mm.

3. Berat Volume Gembur dan Padat Agregat Kasar Limbah Beton

Pengujian berat volume gembur dan padat agregat kasar limbah beton dilakukan mengacu pada SNI 03–4804-1998. Berdasarkan data hasil pengujian, selanjutnya dilakukan perhitungan menggunakan rumus sesuai standar untuk menentukan berat volume gembur dan padat agregat kasar limbah beton pada sampel 1, yang dapat dilihat sebagai berikut.

a. Berat Volume Gembur

$$\begin{aligned}
 1) \quad \text{Berat Agregat (W3)} &= W2 - W1 \\
 &= 17840 - 11234 \\
 &= 6606 \text{ gram} \\
 2) \quad \text{Volume Tabung} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,30^2 \times 29,70 \\
 &= 5460,46 \text{ cm}^3 \\
 3) \quad \text{Berat Volume Gembur} &= \frac{W3}{V} \\
 &= \frac{6606}{5460,46} \\
 &= 1,21 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

b. Berat Volume Padat

$$\begin{aligned}
 1) \quad \text{Berat Agregat (W3)} &= W2 - W1 \\
 &= 18740 - 11234 \\
 &= 7506 \text{ gram} \\
 2) \quad \text{Volume Tabung} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,30^2 \times 29,70 \\
 &= 5460,46 \text{ cm}^3 \\
 3) \quad \text{Berat Volume Padat} &= \frac{W3}{V} \\
 &= \frac{7506}{5460,46} \\
 &= 1,37 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Langkah perhitungan yang sama kemudian diterapkan untuk menentukan berat volume gembur dan padat agregat kasar limbah beton pada sampel 2. Kemudian data dan hasil perhitungan menggunakan rumus sesuai pengujian berat volume gembur dan padat agregat kasar limbah beton pada sampel 1 dan sampel 2 dapat dilihat pada Tabel 5.14 dan Tabel 5.15 sebagai berikut.

Tabel 5. 14 Berat Volume Gembur Agregat Kasar Limbah

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,30	15,30	15,30
Tinggi silinder (t), cm	29,70	29,70	29,70
Berat tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat tabung + agregat SSD (W2), gram	17840	17768	17804
Berat agregat (W3), gram	6606	6534	6570
Volume tabung (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat volume gembur (W3/V), gram/cm ³	1,21	1,20	1,20

Tabel 5. 15 Berat Volume Padat Agregat Kasar Limbah

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,30	15,30	15,30
Tinggi silinder (t), cm	29,70	29,70	29,70
Berat tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat tabung + agregat SSD (W2), gram	18740	19048	18894
Berat agregat (W3), gram	7506	7814	7660
Volume tabung (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat volume padat (W3/V), gram/cm ³	1,37	1,43	1,40

Karakteristik fisik agregat kasar limbah beton sangat dipengaruhi oleh berat volume dalam kondisi gembur maupun padat. Berdasarkan pengujian, diperoleh berat volume gembur rata-rata agregat kasar limbah beton sebesar 1,20 gram/cm³. Sementara itu, berat volume padat agregat kasar limbah beton menunjukkan nilai rata-rata 1,40 gram/cm³. Perbedaan kedua nilai tersebut mengindikasikan variasi tingkat porositas dan kepadatan partikel agregat. Data ini menjadi acuan penting dalam perencanaan campuran beton untuk memastikan kekompakan dan kestabilan struktur sesuai standar yang berlaku.

5.2 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Berdasarkan hasil pengujian terhadap agregat halus dan agregat kasar yang telah dilakukan, data yang diperoleh kemudian diolah dan digunakan sebagai dasar dalam perencanaan proporsi campuran beton sesuai dengan jumlah benda uji yang akan dibuat. Perencanaan campuran beton normal (*mix design*) ini mengacu pada SNI 03-2834-2000. Adapun perhitungan perencanaan campuran beton disajikan sebagai berikut.

1. Nilai kuat tekan beton rencana (f'_c) ditetapkan sebesar 25 MPa dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
2. Jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah Semen *Portland* Tipe I merek Tiga Roda dengan jenis PCC (*Portland Composite Cement*).

3. Berdasarkan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air, diperoleh nilai berat jenis rata-rata agregat halus sebesar 2,62, sedangkan agregat kasar sebesar 2,63.
4. Dari hasil analisis saringan agregat kasar, diketahui bahwa ukuran maksimum agregat yang digunakan adalah 40 mm.
5. Berdasarkan analisis saringan agregat halus, diperoleh bahwa distribusi butir agregat halus termasuk dalam gradasi daerah II.
6. Jumlah benda uji silinder yang digunakan sebanyak 5 buah, sehingga berdasarkan Tabel 5.16, nilai margin (M) yang digunakan adalah 12 MPa

Tabel 5. 16 Faktor Pengali untuk Deviasi Standar Bila Data Hasil Uji Tersedia Kurang dari 30

Jumlah Pengujian	Faktor Pengali Deviasi Standar
Kurang dari 15	*)
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 atau lebih	1,00

*) bila data uji lapangan untuk menghitung deviasi standar yang memenuhi persyaratan di atas tidak tersedia, maka kuat tekan rata-rata yang ditargetkan f'_{cr} harus diambil tidak kurang dari $(f'_c + 12 \text{ MPa})$.

Sumber: SNI 2834 (2000)

7. Menentukan kuat tekan beton rata-rata yang ditargetkan.

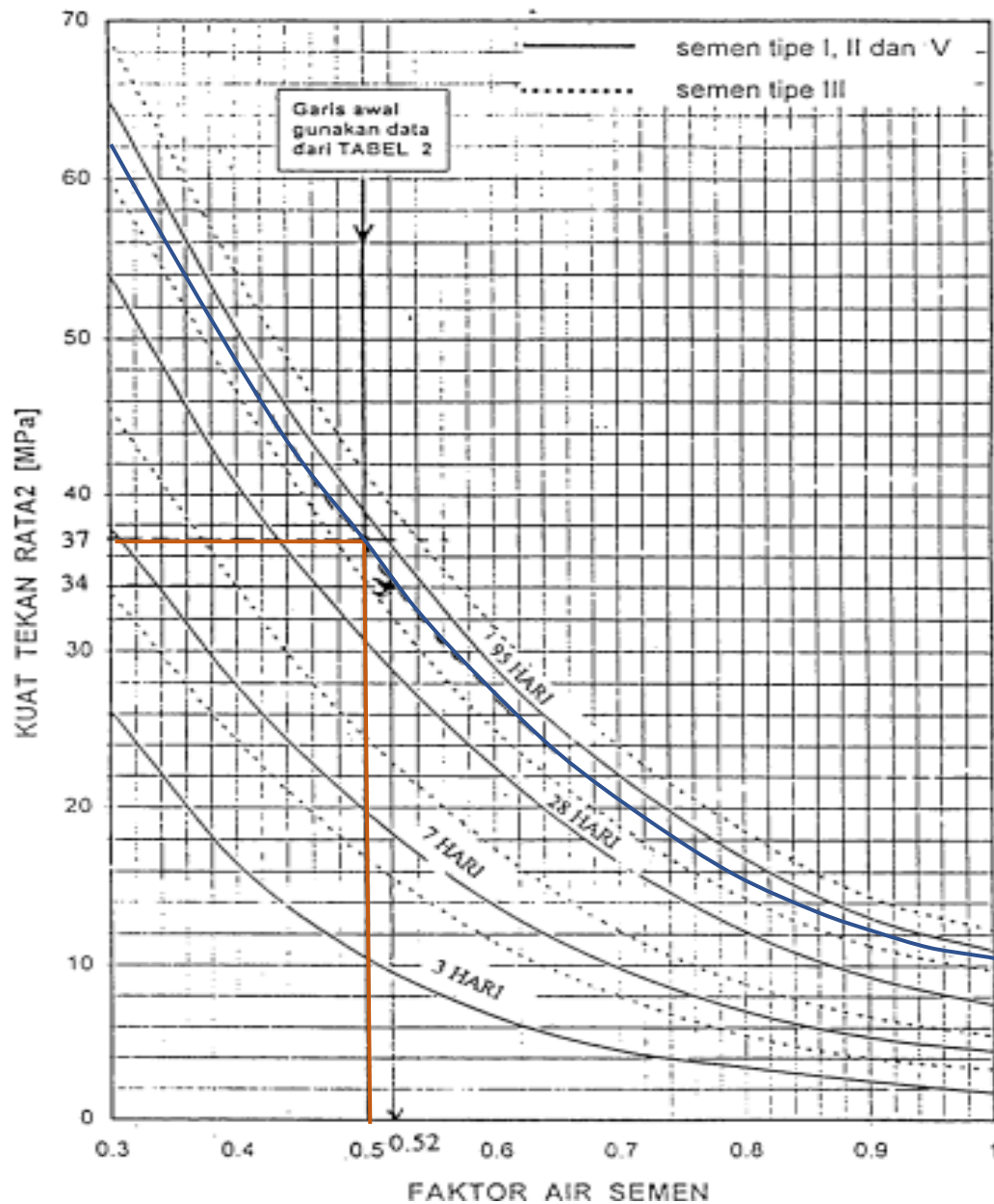
$$\begin{aligned}
 f'_{cr} &= f'_c + M \\
 &= 25 + 12 \\
 &= 37 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$
8. Menentukan nilai faktor air semen (fas) berdasarkan Tabel 5.17 dan Gambar 5.7 sebagai berikut.

Tabel 5. 17 Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Jenis Semen dan Agregat Kasar yang Digunakan

Jenis Semen	Jenis Agregat Kasar	Kekuatan Tekan (MPa)				
		Pada Umur (hari)				Bentuk
		3	7	28	91	Bentuk Uji
Semen Portland Tipe I	Batu tak dipecah	17	23	33	40	Silinder
	Batu pecah	19	27	37	45	
Semen tahan sulfat Tipe II, V	Batu tak dipecah	20	28	40	48	Kubus
	Batu pecah	23	32	45	54	
Semen Portland Tipe III	Batu tak dipecah	21	28	38	44	Silinder
	Batu pecah	25	33	44	48	
	Batu tak dipecah	25	31	46	53	Kubus
	Batu pecah	30	40	53	60	

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

- Jenis semen yang digunakan adalah Semen *Portland* Tipe I, dengan agregat kasar berupa batu pecah, serta menggunakan benda uji berbentuk silinder untuk mengukur kuat tekan beton pada umur 28 hari. Berdasarkan Tabel 5.17, diperoleh bahwa perkiraan kuat tekan beton dengan faktor air semen (FAS) sebesar 0,5 adalah 37 MPa.
- Mengacu pada Gambar 5.7, dilakukan penarikan garis vertikal ke atas dari nilai FAS 0,5 dan garis horizontal ke kanan dari nilai kuat tekan rata-rata 37 MPa sebagaimana tercantum pada Tabel 5.17, hingga kedua garis tersebut berpotongan.
- Dari hasil perpotongan pada poin b, dibuat kurva baru yang melewati titik tersebut.
- Selanjutnya, ditarik garis horizontal ke kanan dari nilai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f'_{cr}) sebesar 37 MPa hingga memotong kurva yang telah dibuat pada poin c.
- Dari titik potong pada poin d, dilakukan penarikan garis vertikal ke bawah, dan diperoleh nilai FAS sebesar 0,5.



Gambar 5. 7 Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen untuk Benda Uji Silinder Diameter 150 mm, Tinggi 300 mm

Sumber: SNI 2834 (2000)

9. Menentukan kadar air yang dibutuhkan

Kebutuhan kadar air dalam campuran beton ditetapkan mengacu pada Tabel 5.18 dengan ketentuan sebagai berikut:

- a. Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan agregat kasar, diperoleh bahwa ukuran butir maksimum agregat adalah 40 mm.

- b. Jenis agregat yang digunakan terdiri atas agregat halus berupa batu alami (tidak dipecah) dan agregat kasar berupa batu pecah.
- c. Nilai *slump* yang direncanakan adalah 10 ± 2 cm, sehingga termasuk dalam rentang slump antara 60 hingga 180 mm.

Tabel 5. 18 Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m^3) yang Dibutuhkan Untuk Beberapa Tingkat Kemudahan Pengerjaan Adukan Beton

Slump (mm)		0-10	10-30	30-60	60-180
Ukuran Besar Butir Agregat Maksimum	Jenis Agregat				
10	Batu tak dipecah	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecah	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecah	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

- d. Kadar air yang dibutuhkan dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 w &= \frac{2}{3} W_h + \frac{1}{3} W_k \\
 &= \frac{2}{3} 175 + \frac{1}{3} 205 \\
 &= 185 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

10. Menentukan jumlah semen minimum dan FAS maksimum

Jumlah semen minimum dan FAS maksimum ditentukan berdasarkan Tabel 5.19 sebagai berikut.

Tabel 5. 19 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan dalam Lingkungan Khusus

Lokasi	Jumlah Semen Minimum Per m^3 beton (Kg)	Nilai Faktor Air Semen Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan:		
a. Keadaan keliling non-korosif	275	0,6
b. Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325	0,52
Beton di luar ruangan bangunan:		
a. Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,6
b. Terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,6
Beton masuk ke dalam tanah:		
a. Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
b. Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		Lihat Tabel 5
Beton yang kontinu berhubungan:		
a. Air tawar		Lihat Tabel 6
b. Air laut		

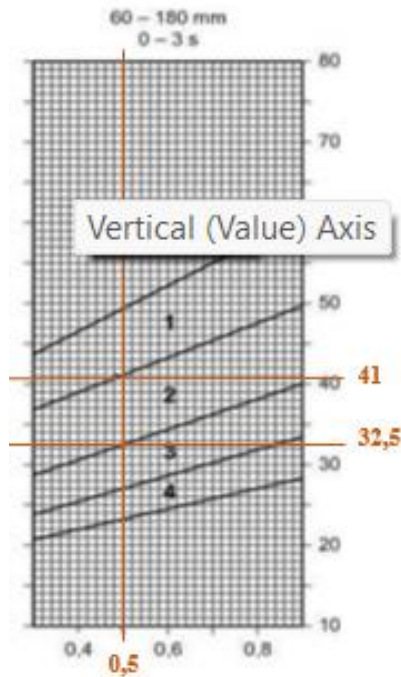
enis pekerjaan beton yang digunakan termasuk pembetonan di dalam ruangan bangunan dengan kondisi lingkungan tidak korosif. Berdasarkan Tabel 5.19, ditetapkan bahwa jumlah semen minimum yang dibutuhkan adalah 275 (kg/m^3) sedangkan nilai FAS maksimum yang diizinkan adalah 0,6.

11. Menentukan kadar semen yang digunakan

- a. Dari hasil pembacaan grafik diperoleh nilai FAS sebesar 0,5, sedangkan FAS maksimum berdasarkan jenis pembetonan adalah 0,6. Oleh karena itu, digunakan nilai FAS terkecil, yaitu 0,5.
- b. Perhitungan kadar semen dilakukan dengan menggunakan nilai FAS dan kadar air yang telah ditentukan, dengan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 c &= \frac{w}{fas} \\
 &= \frac{185}{0,5} \\
 &= 370 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

- c. Dengan demikian, diperoleh kadar semen hasil perhitungan sebesar 370 (kg/m³) sedangkan kadar semen minimum berdasarkan ketentuan jenis pembetonan adalah 275 (kg/m³), maka kadar semen yang digunakan dalam campuran beton ditetapkan sebesar 370 (kg/m³).
12. Menentukan presentase agregat halus dan agregat kasar
- Persentase agregat halus ditentukan dengan mengacu pada Gambar 5.8 sebagai berikut:
- Agregat yang digunakan memiliki ukuran maksimum 40 mm, dengan nilai *slump* yang direncanakan berada pada rentang 60–180 mm, FAS sebesar 0,5, serta gradasi agregat halus termasuk dalam gradasi II.
 - Dari nilai FAS 0,5, ditarik garis vertikal ke atas hingga memotong dua kurva yang menjadi batas area untuk gradasi II.
 - Selanjutnya, dari kedua titik potong pada poin b, ditarik garis horizontal ke kanan sehingga diperoleh batas atas dan batas bawah persentase agregat halus, masing-masing sebesar 41% dan 32,5%.



Gambar 5. 8 Grafik Persen Agregat Halus Terhadap Kadar Total yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm

(Sumber: SNI 2834, 2000)

- d. Nilai persentase agregat halus rata-rata dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\% \text{Ag. Halus} &= \frac{41 \% + 32,5 \%}{2} \\ &= 36,75\%\end{aligned}$$

- e. Nilai persentase agregat kasar dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\% \text{Ag. Kasar} &= 100\% - \% \text{Ag. Halus} \\ &= 100 \% - 36,75 \% \\ &= 63,25\%\end{aligned}$$

13. Menentukan berat jenis relatif agregat gabungan (kondisi SSD)

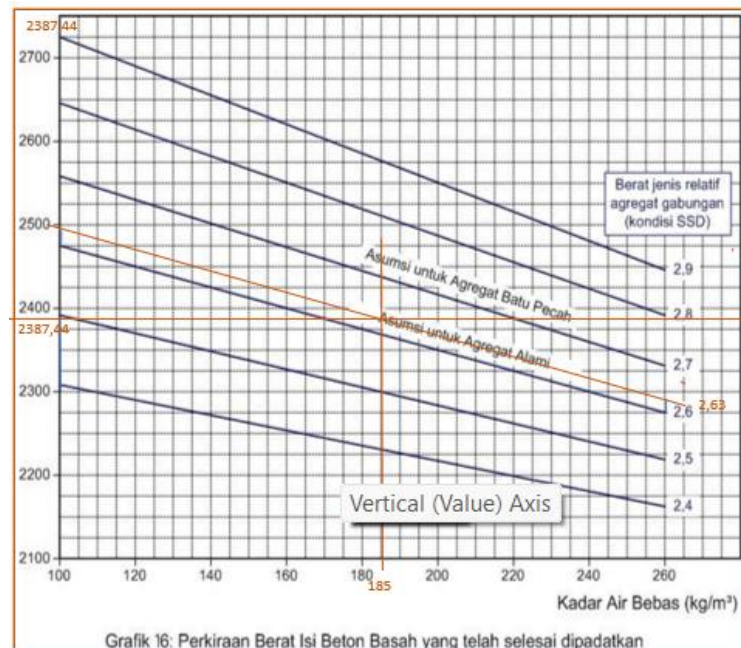
Berat jenis relatif gabungan dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}BJ_{gab} &= (\% \text{Ag. Halus} \times BJ_{\text{Ag.Halus}}) + (\% \text{Ag. Kasar} \times BJ_{\text{Ag.Kasar}}) \\ &= (36,75 \% \times 2,62) + (63,25 \% \times 2,63) \\ &= 2,63\end{aligned}$$

14. Menentukan berat isi beton

Berat isi beton dihitung dengan mengacu pada Gambar 5.9 sebagai berikut

- Dibuat kurva baru berdasarkan nilai berat jenis relatif agregat gabungan sebesar 2,63.
- Tarik garis vertikal ke atas dari nilai kadar air sebesar 185 kg/m³ sampai memotong kurva baru pada butir a.
- Dari titik perpotongan pada butir b. tarik garis horizontal ke kiri, sehingga diperoleh nilai perkiraan berat isi beton (W_{beton}) sebesar 2387,44 kg/m³.



Gambar 5. 9 Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Selesai Dipadatkan

(Sumber: SNI 2834, 2000)

15. Menentukan kadar agregat dalam campuran beton

Kadar agregat dalam campuran beton dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{Ag.gab}} &= W_{\text{beton}} - W_{\text{semen}} - w \\
 &= 2387,44 - 370 - 185 \\
 &= 1832,44 \text{ kg/m}^3.
 \end{aligned}$$

16. Menentukan kadar agregat halus dan agregat kasar dalam campuran beton
Kadar agregat halus dan agregat kasar dihitung sebagai berikut.

- a. Agregat halus

$$\begin{aligned} W_{\text{Ag.halus}} &= \% \text{Ag. halus} \times W_{\text{Ag.gab}} \\ &= 36,75 \times 1832,44 \\ &= 673,42 \text{ kg/m}^3. \end{aligned}$$

- b. Agregat kasar

$$\begin{aligned} W_{\text{Ag.kasar}} &= W_{\text{Ag.gab}} - W_{\text{Ag.halus}} \\ &= 1832 - 673,42 \\ &= 1159,02 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

17. Proporsi campuran per 1 m³ beton

Berdasarkan hasil perencanaan campuran beton diperoleh proporsi tiap material per 1 m³ beton adalah sebagai berikut.

- a. Semen = 370 kg
- b. Air = 185 kg
- c. Agregat halus = 673,42 kg
- d. Agregat kasar = 1159,02 kg

18. Proporsi campuran per 1 m³ beton dengan angka penyusutan

Pada penelitian ini digunakan faktor penyusutan sebesar 25%, sehingga proporsi setiap material untuk 1 m³ beton setelah memperhitungkan penyusutan tersebut diperoleh sebagai berikut.

- a. Semen = 462,50 kg
- b. Air = 231,25 kg
- c. Agregat halus = 841,78 kg
- d. Agregat kasar = 1448,77 kg

19. Hasil perencanaan campuran beton

Rekapitulasi hasil perhitungan perencanaan campuran beton secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 5.20 sebagai berikut.

Tabel 5. 20 Perencanaan Campuran Beton

<i>Mix Design</i>				
No	Uraian	Nilai	Satuan	Keterangan
1	Kuat tekan beton yang disyaratkan	25	MPa	-
2	Standar deviasi	-	-	Diabaikan
3	Nilai tambah / Margin (M)	12	MPa	-
4	Kuat tekan beton rerata yang ditargetkan	37	MPa	-
5	Jenis semen	Tipe I	-	Tiga Roda
6	Jenis agregat halus	Alami	-	Progo
7	Jenis agregat kasar	Batu Pecah	-	Clereng
8	Faktor air semen bebas (FAS)	0,5	-	-
9	Faktor air semen maksimum	0,6	-	-
10	FAS digunakan	0,5	-	-
11	<i>Slump</i>	60 – 180	mm	-
12	Ukuran agregat maksimum	40	mm	Pengujian Agregat
13	Kadar air bebas	185	kg/m ³	-
14	Kadar semen	370	kg/m ³	-
15	Kadar semen maksimum	-	kg/m ³	-
16	Kadar semen minimum	275	kg/m ³	-
17	Kadar semen digunakan	370	kg/m ³	-
18	FAS disesuaikan	-	-	-
19	Susunan besar butir agregat halus	Gradasi II	-	Pengujian Agregat
20	Berat jenis agregat halus (SSD)	2,62	-	Pengujian Agregat
21	Berat jenis agregat kasar (SSD)	2,63	-	Pengujian Agregat
22	Persentase agregat halus	36,75	%	-
23	Persentase agregat kasar	63,25	%	-
24	Berat jenis relatif agregat gabungan (SSD)	2,63	-	-
25	Berat isi beton	2387,44	kg/m ³	-
26	Kadar agregat gabungan	1832,44	kg/m ³	-
27	Kadar agregat halus	673,42	kg/m ³	-
28	Kadar agregat kasar	1159,02	kg/m ³	-
29	Kadar semen dengan angka penyusutan	462,50	kg/m ³	-
30	Kadar air dengan angka penyusutan	231,25	kg/m ³	-
31	Kadar agregat halus dengan angka penyusutan	841,78	kg/m ³	-
32	Kadar agregat kasar dengan angka penyusutan	1448,77	kg/m ³	-

20. Volume benda uji

Pada penelitian ini, setiap variasi menggunakan 15 benda uji berbentuk silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, serta 6 benda uji berbentuk kubus berukuran $150 \times 150 \times 150$ mm. Volume total benda uji dihitung berdasarkan jumlah sampel yang dibuat dalam satu kali proses pencampuran (*mixing*). Pembuatan benda uji untuk tiap variasi dilakukan sebanyak dua kali *mixing*, di mana *mixing* pertama terdiri atas 9 silinder dan 3 kubus, sedangkan *mixing* kedua terdiri atas 6 silinder dan 3 kubus. Dengan demikian, volume benda uji untuk setiap tahap *mixing* dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{a. Volume } \textit{mixing} 1 &= (9 \times V_{\text{silinder}}) + (3 \times V_{\text{kubus}}) \\
 &= \left(9 \times \frac{1}{4} \pi \times d^2 \times t\right) + (3 \times s \times s \times s) \\
 &= \left(9 \times \frac{1}{4} \pi \times 0,15^2 \times 0,3\right) + (3 \times 0,15 \times 0,15 \times 0,15) \\
 &= 0,058 \text{ m}^3 \\
 \text{b. Volume } \textit{mixing} 2 &= (6 \times V_{\text{silinder}}) + (3 \times V_{\text{kubus}}) \\
 &= \left(6 \times \frac{1}{4} \pi \times d^2 \times t\right) + (3 \times s \times s \times s) \\
 &= \left(6 \times \frac{1}{4} \pi \times 0,15^2 \times 0,3\right) + (3 \times 0,15 \times 0,15 \times 0,15) \\
 &= 0,042 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Perhitungan volume total beton silinder dan beton kubus pada *mixing* 1 dan *mixing* 2 pada setiap variasinya menghasilkan volume sebesar 0.058 m³ pada *mixing* 1 dan 0,042 m³ pada *mixing* 2. Adapun rekapitulasi perhitungan volume beton normal setiap variasi dapat dilihat pada Tabel 5.21 sebagai berikut.

Tabel 5. 21 Volume Beton Normal Setiap Variasi

Uraian	Nilai				Satuan
	Mixing 1		Mixing 2		
	Silinder	Kubus	Silinder	Kubus	
Diameter	0,15	-	0,15	-	m
Panjang	-	0,15	-	0,15	m
Tinggi	0,3	0,15	0,3	0,15	m
Volume	0,0053	0,0034	0,0053	0,0034	m ³
Jumlah Sekali Pengecoran	9	3	6	3	buah
Volume total	0,058		0,042		m ³

21. Proporsi campuran untuk tiap kali *mixing*]

Berdasarkan hasil perhitungan volume pada poin 18, dilakukan penentuan proporsi campuran untuk setiap tahap *mixing*. Rincian perhitungannya dapat dilihat sebagai berikut.

a. Proporsi campuran untuk *mixing* 1

- 1) Semen = 462,50 x 0,058 = 26,75 kg
- 2) Air = 231,25 x 0,058 = 13,38 kg
- 3) Agregat halus = 841,78 x 0,058 = 48,69 kg
- 4) Agregat kasar = 1448,77 x 0,058 = 83,79 kg

b. Proporsi campuran untuk *mixing* 2

- 1) Semen = 462,50 x 0,042 = 19,39 kg
- 2) Air = 231,25 x 0,042 = 9,70 kg
- 3) Agregat halus = 841,78 x 0,042 = 35,30 kg
- 4) Agregat kasar = 1448,77 x 0,042 = 60,75 kg

Setelah dilakukan perhitungan, proporsi campuran beton normal pada *mixing* 1 dan *mixing* 2 dapat diketahui, hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 5.22.

Tabel 5. 22 Proporsi Campuran Beton Normal

Proporsi Campuran	Semen (Kg)	Air (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Agregat Kasar (Kg)
Proporsi campuran teoritis agregat kondisi (SSD)				
Tiap m ³	370	185	673,42	1159,02
Proporsi campuran dengan angka penyusutan (25%)				
Tiap m ³	462,50	231,25	841,78	1448,77
Proporsi campuran untuk tiap <i>mixing</i>				
Tiap <i>Mixing</i> 1 (0,058 m ³)	26,75	13,38	48,69	83,79
Tiap <i>Mixing</i> 2 (0,042 m ³)	19,39	9,70	35,30	60,75

22. Proporsi *waterproofing* Damdex

Variasi *waterproofing* Damdex yang digunakan dalam penelitian ini adalah variasi 0%, 8%, 9%, dan 10%. Cara menentukan kebutuhan *waterproofing* Damdex dengan cara berat semen dikali dengan presentase variasi *waterproofing* Damdex. Berat semen yang digunakan sesuai dengan proporsi campuran pada *mixing* 1 dan *mixing* 2. Adapun perhitungan kebutuhan *waterproofing* Damdex adalah sebagai berikut.

a. Proporsi campuran untuk *mixing* 1

$$\text{Berat Damdex} = \text{Berat semen} \times \text{Presentase Damdex}$$

1) Variasi *waterproofing* Damdex 0%

$$\text{Berat Damdex} = 26,75 \text{ kg} \times 0\% = 0 \text{ kg}$$

2) Variasi *waterproofing* Damdex 8%

$$\text{Berat Damdex} = 26,75 \text{ kg} \times 8\% = 2,14 \text{ kg}$$

3) Variasi *waterproofing* Damdex 9%

$$\text{Berat Damdex} = 26,75 \text{ kg} \times 9\% = 2,41 \text{ kg}$$

4) Variasi *waterproofing* Damdex 10%

$$\text{Berat Damdex} = 26,75 \text{ kg} \times 10\% = 2,68 \text{ kg}$$

b. Proporsi campuran untuk *mixing* 2

1) Variasi *waterproofing* Damdex 0%

$$\text{Berat Damdex} = 19,39 \text{ kg} \times 0\% = 0 \text{ kg}$$

2) Variasi *waterproofing* Damdex 8%

$$\text{Berat Damdex} = 19,39 \text{ kg} \times 8\% = 1,55 \text{ kg}$$

3) Variasi *waterproofing* Damdex 9%

$$\text{Berat Damdex} = 19,39 \text{ kg} \times 9\% = 1,75 \text{ kg}$$

4) Variasi *waterproofing* Damdex 10%

$$\text{Berat Damdex} = 19,39 \text{ kg} \times 10\% = 1,94 \text{ kg}$$

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan 8 variasi benda uji. Untuk penggunaan agregat kasar limbah beton tetap sama menggunakan proporsi seperti agregat kasar asli. Sedangkan penggunaan bahan tambah *waterproofing* Damdex mengacu pada perbandingan dari berat total semen untuk setiap masing-masing variasi. Sedangkan untuk penggunaan air didapatkan setelah berat total air dari setiap *mixing* dikurangi oleh berat variasi bahan tambah *waterproofing* Damdex yaitu sebesar 0%, 8%, 9%, 10%. Menurut Ardiansyah (2023), pada proses pencampuran variasi beton yang menggunakan Damdex, penambahan bahan tersebut dilakukan dengan menggantikan sebagian air pencampuran. Tujuannya adalah untuk menjaga rentang *slump* sesuai dengan yang telah direncanakan. Sementara itu, apabila seluruh air campuran digantikan oleh Damdex, nilai *slump* yang dihasilkan menjadi lebih tinggi, namun kekuatan tekan beton justru menurun dibandingkan dengan beton yang Damdex-nya hanya menggantikan sebagian air campuran

Berdasarkan hasil perhitungan mix design, diperoleh proporsi campuran untuk setiap variasi pengujian dengan mempertimbangkan angka penyusutan sebesar 25%. Hasil perhitungan tersebut ditampilkan pada Tabel 5.23 untuk *mixing* pertama dan Tabel 5.24 untuk *mixing* kedua berikut ini

**Tabel 5. 23 Proporsi Campuran Beton dengan Bahan Tambah Damdex
Mixing Pertama**

Kadar Damdex	Semen (kg)	Air (kg)		Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Damdex (kg)
		Sebelum	Sesudah			
0%	26,75	13,38	13,38	48,69	83,79	0
8%	26,75	13,38	11,24	48,69	83,79	2,14
9%	26,75	13,38	10,97	48,69	83,79	2,41
10%	26,75	13,38	10,70	48,69	83,79	2,68
Jumlah	107,00	53,50	46,28	194,75	335,18	7,22

**Tabel 5. 24 Proporsi Campuran Beton dengan Bahan Tambah Damdex
Mixing Kedua**

Kadar Damdex	Semen (kg)	Air (kg)		Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Damdex (kg)
		Sebelum	Sesudah			
0%	19,39	9,70	9,70	35,30	60,75	0,00
8%	19,39	9,70	8,15	35,30	60,75	1,55
9%	19,39	9,70	7,95	35,30	60,75	1,75
10%	19,39	9,70	7,76	35,30	60,75	1,94
Jumlah	77,58	38,79	33,55	141,20	243,01	5,24

5.3 Hasil Pengujian Benda Uji Trial

Pengujian benda uji trial dilakukan untuk memperoleh nilai kuat tekan beton pada umur 3 hari, dengan tujuan memverifikasi kebenaran perencanaan campuran. Sampel yang diuji berupa 3 silinder, masing-masing permukaannya diratakan terlebih dahulu menggunakan lapisan *capping* sebelum pengujian. Karena pengujian dilaksanakan pada umur awal, hasil kuat tekan yang diperoleh harus dikonversi menggunakan faktor koreksi umur uji. Berikut disajikan data dan perhitungan kuat tekan untuk benda uji 1 pada umur 3 hari sebagai berikut.

1. Kuat tekan beton *trial* aktual umur uji 3 hari

$$\begin{aligned}
 f'_{\text{C aktual}} &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{206,62 \times 1000}{17801,29} \\
 &= 11,61 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

2. Kuat tekan beton *trial* terkonversi umur uji 3 hari

$$\begin{aligned}
 f'_{c_{\text{terkonversi}}} &= f'_{c_{\text{aktual}}} \times \frac{1}{\text{Angka Konversi}} \\
 &= 11,61 \times \frac{1}{0,4} \\
 &= 29,02 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan yang sama untuk menghitung kuat tekan pada benda uji 2 dan benda uji 3. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton pada tahap *trial mix* dapat dilihat pada Tabel 5.25 sebagai berikut.

Tabel 5. 25 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Trial* Terkonversi

Umur Uji (hari)	No. Sampel	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Angka Konversi Umur Uji	Kuat Tekan Konversi Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Konversi Umur Uji Rerata (MPa)
3	1	150,55	17801,29	206,62	11,61	0,4	29,02	28,64
3	2	151,10	17931,59	205,80	11,48	0,4	28,69	
3	3	149,80	17624,37	198,94	11,29	0,4	28,22	

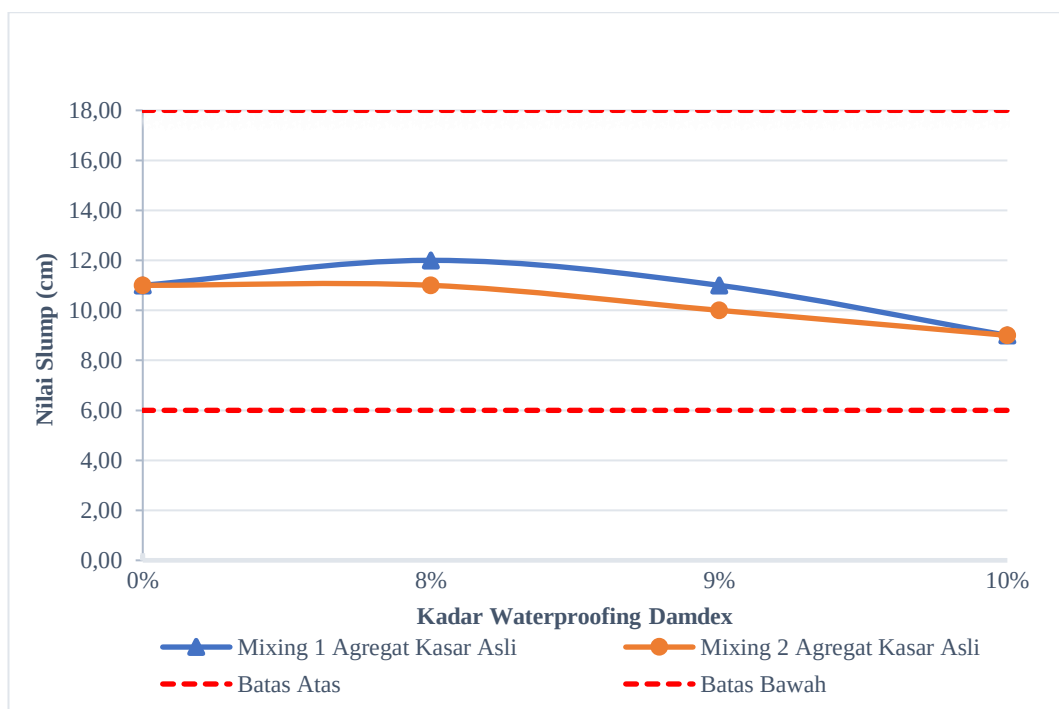
Berdasarkan Tabel 5.25 di atas, dapat dilihat bahwa hasil pengujian benda uji beton *trial* telah memenuhi mutu rencana yaitu 25 MPa. Menurut DPU Kab. Kulon Progo (2022), umur beton dengan usia 3 hari mengalami peningkatan kekuatan beton sebesar 40 %. Dari hasil pengujian kuat tekan beton *trial* diatas, didapatkan nilai rata-rata terkonversi sebesar 28,64 MPa. Dari hasil pengujian benda uji *trial* tersebut dapat dilihat pada hasil uji *trial* tersebut telah sesuai mutu rencana.

5.4 Hasil Pengujian *Slump*

Pengujian slump dilakukan pada beton segar untuk mengetahui tingkat kemudahan pengerjaannya (*workability*). Nilai slump yang lebih tinggi menunjukkan bahwa beton segar tersebut memiliki tingkat kemudahan pengerjaan yang lebih baik. Adapun hasil pengujian *slump* beton tanpa agregat limbah dan hubungannya dengan variasi kadar Damdex yang digunakan, dapat dilihat pada Tabel 5.26 dan Gambar 5.10

Tabel 5. 26 Nilai *Slump* Beton Dengan Agregat Kasar Asli

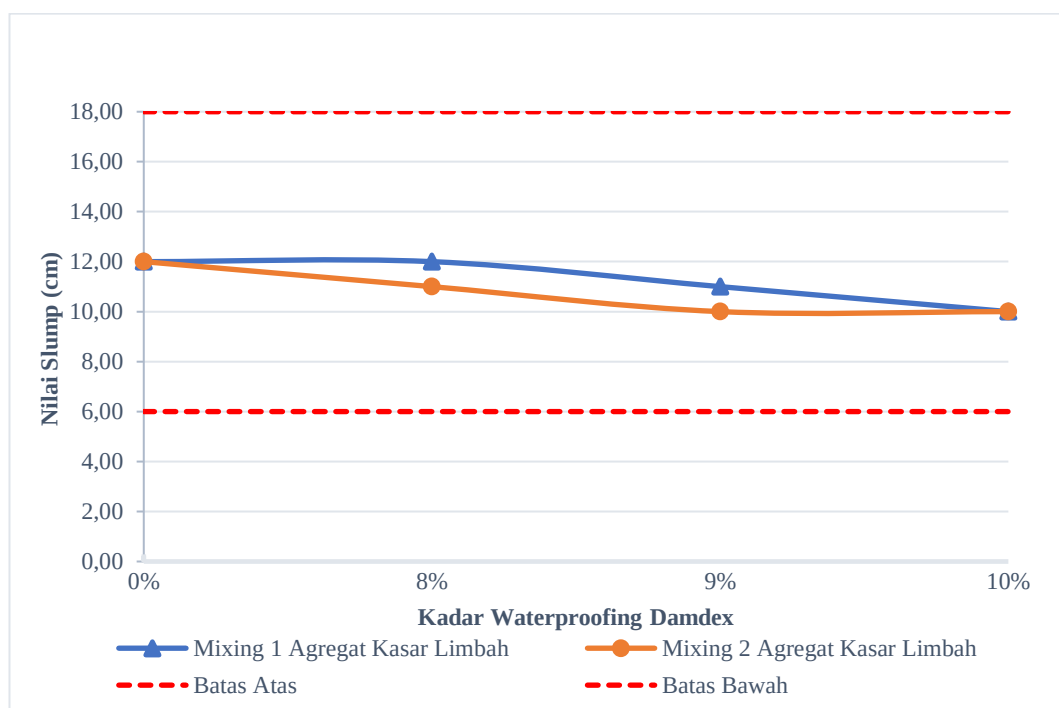
Variasi Kadar Damdex	<i>Slump</i> (cm)					
	<i>Mixing 1</i>			<i>Mixing 2</i>		
	Nilai <i>Slump</i> (cm)	Syarat <i>Slump</i> (60-180 mm)	Pesentase Perubahan (%)	Nilai <i>Slump</i> (cm)	Syarat <i>Slump</i> (60-180 mm)	Pesentase Perubahan (%)
0%	11,00	Memenuhi	10%	11,00	Memenuhi	10%
8%	12,00	Memenuhi	20%	11,00	Memenuhi	10%
9%	11,00	Memenuhi	10%	10,00	Memenuhi	0%
10%	9,00	Memenuhi	-10%	9,00	Memenuhi	-10%

**Gambar 5. 10 Hubungan Nilai *Slump* dengan Variasi Kadar Damdex pada Campuran Beton Agregat Kasar Asli**

Sedangkan, hasil pengujian *slump* dan hubungannya dengan variasi kadar *waterproofing* Damdex dengan agregat kasar limbah beton dapat dilihat pada Tabel 5.27 dan Gambar 5. 11 sebagai berikut.

Tabel 5. 27 Nilai *Slump* Beton dengan Agregat Kasar Limbah Beton

Variasi Kadar Damdex	<i>Slump</i> (cm)					
	<i>Mixing 1</i>			<i>Mixing 2</i>		
	Nilai <i>Slump</i> (cm)	Syarat <i>Slump</i> (60-180 mm)	Pesentase Perubahan (%)	Nilai <i>Slump</i> (cm)	Syarat <i>Slump</i> (60-180 mm)	Pesentase Perubahan (%)
0%	12,00	Memenuhi	20%	12,00	Memenuhi	20%
8%	12,00	Memenuhi	20%	11,00	Memenuhi	10%
9%	11,00	Memenuhi	10%	10,00	Memenuhi	0%
10%	10,00	Memenuhi	0%	10,00	Memenuhi	0%

**Gambar 5. 11 Hubungan Nilai *Slump* dengan Variasi Kadar Damdex pada Campuran Beton Agregat Kasar Limbah Beton**

Berdasarkan data pada Tabel 5.26 dan Gambar 5.10, terlihat bahwa campuran beton dengan agregat kasar asli memiliki nilai slump tertinggi sebesar 12 cm, yang diperoleh pada campuran dengan penambahan waterproofing Damdex sebesar 8% pada *mixing 1*. Nilai slump terendah tercatat sebesar 9 cm pada campuran dengan variasi Damdex 10% pada *mixing 1* dan *mixing 2*. Sementara itu, berdasarkan Tabel 5.27 dan Gambar 5.11, campuran beton menggunakan agregat limbah beton menunjukkan nilai slump maksimum sebesar 12 cm pada variasi Damdex 0% di

mixing 1 dan *mixing* 2, serta pada variasi 8% di *mixing* 1. Adapun nilai slump minimum sebesar 10 cm diperoleh pada variasi Damdex 9% di *mixing* 1 serta variasi 10% pada *mixing* 1 dan *mixing* 2.

Penggunaan agregat kasar asli dan agregat kasar limbah dalam penelitian ini telah melalui pengkondisian dalam keadaan *saturated surface dry* (SSD) yang sama, dengan variasi penambahan Damdex sebesar 0%, 8%, 9%, dan 10% pada setiap campuran. Dalam proses pencampuran, dilakukan penyesuaian terhadap kadar air, sebagaimana juga dilakukan pada penelitian sebelumnya, untuk mencapai nilai *slump* yang direncanakan. Perbedaan *slump* yang terjadi pada masing-masing campuran disebabkan oleh pengurangan kadar air pada *mix design* untuk menjaga rentang nilai *slump* sesuai rencana. Berdasarkan hasil tersebut, seluruh campuran yang menggunakan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah telah memenuhi nilai *slump* rencana, yaitu sebesar (10 ± 2) cm. Menurut Akbar (2021), penggunaan Damdex dalam campuran beton berfungsi sebagai *water reducer*, yaitu mampu menurunkan kebutuhan air tanpa mengurangi tingkat kemudahan pengerjaan *workability* beton. Semakin tinggi kadar Damdex yang ditambahkan ke dalam campuran, semakin besar pula pengurangan jumlah air yang dapat dicapai dengan tetap mempertahankan karakteristik beton normal.

5.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pada penelitian ini, pengujian kuat tekan beton dilaksanakan pada tiga interval umur beton, yaitu 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Pengujian dilakukan dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder standar berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm sesuai ketentuan pengujian kuat tekan beton. Total jumlah benda uji yang digunakan sebanyak 120 sampel, yang terdiri dari 60 sampel dengan campuran menggunakan agregat kasar asli dan 60 sampel dengan campuran agregat kasar limbah. Setiap variasi penambahan Damdex memiliki 15 benda uji. Sebelum proses pengujian dimulai, permukaan atas benda uji diberi lapisan *capping* yang berfungsi untuk meratakan bidang tekan. Bahan yang digunakan sebagai lapisan *capping* adalah belerang (sulfur). Pengujian dilakukan hingga benda uji mengalami kerusakan atau hancur, yang menandakan bahwa benda uji tersebut sudah tidak

mampu menahan beban dari mesin penguji. Perhitungan kuat tekan beton pada benda uji berumur 7 dan 14 hari dilakukan dengan membagi nilai kuat tekan hasil pengujian dengan faktor konversi umur. Langkah ini diperlukan agar nilai yang diperoleh dapat direpresentasikan sebagai kuat tekan setara pada umur rencana. Adapun rumus perhitungan kuat tekan beton digunakan sebagai berikut.

1. Kuat tekan beton agregat kasar asli dengan variasi Damdex 8% umur 7 hari sampel 1

$$\begin{aligned} f'_{c_{\text{aktual}}} &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{357,176 \times 1000}{17836,777} \\ &= 20,025 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f'_{c_{\text{terkonversi}}} &= f'_{c_{\text{aktual}}} \times \frac{1}{\text{Angka Konversi}} \\ &= 20,025 \times \frac{1}{0,65} \\ &= 30,807 \text{ MPa} \end{aligned}$$

2. Kuat tekan beton agregat kasar asli dengan variasi Damdex 8% umur 14 hari sampel 1

$$\begin{aligned} f'_{c_{\text{aktual}}} &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{468,386 \times 1000}{17789,465} \\ &= 26,328 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f'_{c_{\text{terkonversi}}} &= f'_{c_{\text{aktual}}} \times \frac{1}{\text{Angka Konversi}} \\ &= 26,328 \times \frac{1}{0,88} \\ &= 29,919 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3. Kuat tekan beton agregat kasar asli dengan variasi Damdex 8% umur 28 hari sampel 1

$$\begin{aligned} f'_{c_{\text{aktual}}} &= \frac{P}{A} \\ &= \frac{543,625 \times 1000}{17813,113} \\ &= 30,518 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f'_{c_{\text{terkonversi}}} &= f'_{c_{\text{aktual}}} \times \frac{1}{\text{Angka Konversi}} \\ &= 30,518 \times \frac{1}{1} \\ &= 30,518 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Dengan prosedur perhitungan yang sama, dilakukan pula perhitungan kuat tekan beton pada sampel dengan variasi campuran lainnya. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.28 sebagai berikut.

Tabel 5. 28 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
0 %	0 %	7 hari	T-TL-0-7h-1	150,20	17718,614	331,536	18,711	18,061	0,65	28,786	27,786
			T-TL-0-7h-2	151,95	18133,903	308,450	17,010		0,65	26,169	
			T-TL-0-7h-3	149,90	17647,905	329,696	18,682		0,65	28,741	
			T-TL-0-7h-4	151,10	17931,590	319,974	17,844		0,65	27,453	
			T-TL-0-7h-5	150,70	17836,777	322,087	18,057		0,65	27,781	
		14 hari	T-TL-0-14h-1	150,95	17896,006	465,795	26,028	24,376	0,88	29,577	27,700
			T-TL-0-14h-2	151,20	17955,333	430,060	23,952		0,88	27,218	
			T-TL-0-14h-3	149,90	17647,905	443,936	25,155		0,88	28,585	
			T-TL-0-14h-4	151,15	17943,460	396,640	22,105		0,88	25,119	
			T-TL-0-14h-5	150,25	17730,413	436,884	24,640		0,88	28,000	
		28 hari	T-TL-0-28h-1	152,00	18145,839	492,080	27,118	27,751	1	27,118	27,751
			T-TL-0-28h-2	150,25	17730,413	486,575	27,443		1	27,443	
			T-TL-0-28h-3	149,25	17495,186	506,875	28,972		1	28,972	
			T-TL-0-28h-4	150,05	17683,242	509,802	28,830		1	28,830	
			T-TL-0-28h-5	149,55	17565,589	463,627	26,394		1	26,394	
	8 %	7 hari	T-TL-8-7h-1	150,70	17836,777	357,176	20,025	20,005	0,65	30,807	30,777
			T-TL-8-7h-2	150,65	17824,943	338,485	18,989		0,65	29,214	
			T-TL-8-7h-3	150,90	17884,152	361,086	20,190		0,65	31,062	
			T-TL-8-7h-4	150,70	17836,777	362,777	20,339		0,65	31,290	
			T-TL-8-7h-5	151,10	17931,590	367,297	20,483		0,65	31,513	
		14 hari	T-TL-8-14h-1	150,50	17789,465	468,368	26,328	27,081	0,88	29,919	30,774
			T-TL-8-14h-2	152,15	18181,671	526,734	28,971		0,88	32,921	
			T-TL-8-14h-3	150,65	17824,943	497,117	27,889		0,88	31,692	
			T-TL-8-14h-4	150,85	17872,303	512,587	28,681		0,88	32,592	
			T-TL-8-14h-5	150,25	17730,413	417,354	23,539		0,88	26,749	
		28 hari	T-TL-8-28h-1	150,60	17813,113	543,625	30,518	30,650	1	30,518	30,650
			T-TL-8-28h-2	151,00	17907,864	570,148	31,838		1	31,838	
			T-TL-8-28h-3	149,95	17659,680	551,195	31,212		1	31,212	
			T-TL-8-28h-4	150,05	17683,242	509,927	28,837		1	28,837	
			T-TL-8-28h-5	150,35	17754,022	547,614	30,845		1	30,845	

Lanjutan Tabel 5.28 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
	9 %	7 hari	T-TL-9-7h-1	149,05	17448,329	375,435	21,517	20,463	0,65	33,103	31,482
			T-TL-9-7h-2	149,80	17624,366	334,568	18,983		0,65	29,205	
			T-TL-9-7h-3	150,60	17813,113	369,597	20,749		0,65	31,921	
			T-TL-9-7h-4	149,85	17636,133	361,893	20,520		0,65	31,569	
			T-TL-9-7h-5	149,10	17460,037	358,743	20,547		0,65	31,610	
		14 hari	T-TL-9-14h-1	150,50	17789,465	483,765	27,194	27,633	0,88	30,902	31,402
			T-TL-9-14h-2	150,30	17742,215	502,475	28,321		0,88	32,183	
			T-TL-9-14h-3	150,05	17683,242	486,842	27,531		0,88	31,286	
			T-TL-9-14h-4	149,95	17659,680	513,376	29,071		0,88	33,035	
			T-TL-9-14h-5	149,85	17636,133	459,438	26,051		0,88	29,603	
		28 hari	T-TL-9-28h-1	148,95	17424,924	576,742	33,099	31,340	1	33,099	31,340
			T-TL-9-28h-2	149,35	17518,638	547,783	31,269		1	31,269	
			T-TL-9-28h-3	149,75	17612,603	494,748	28,091		1	28,091	
			T-TL-9-28h-4	150,35	17754,022	571,568	32,194		1	32,194	
			T-TL-9-28h-5	150,95	17896,006	573,542	32,049		1	32,049	
	10 %	7 hari	T-TL-10-7h-1	149,05	17448,329	337,537	19,345	20,674	0,65	29,761	31,806
			T-TL-10-7h-2	149,80	17624,366	359,185	20,380		0,65	31,354	
			T-TL-10-7h-3	150,60	17813,113	383,788	21,545		0,65	33,147	
			T-TL-10-7h-4	149,85	17636,133	371,545	21,067		0,65	32,411	
			T-TL-10-7h-5	149,10	17460,037	367,247	21,034		0,65	32,359	
		14 hari	T-TL-10-14h-1	151,00	17907,864	501,056	27,980	27,936	0,88	31,795	31,745
			T-TL-10-14h-2	151,30	17979,091	511,360	28,442		0,88	32,320	
			T-TL-10-14h-3	151,60	18050,460	497,135	27,541		0,88	31,297	
			T-TL-10-14h-4	151,55	18038,556	538,736	29,866		0,88	33,938	
			T-TL-10-14h-5	151,50	18026,655	465,980	25,849		0,88	29,374	
		28 hari	T-TL-10-28h-1	148,70	17366,481	553,458	31,869	31,574	1	31,869	31,574
			T-TL-10-28h-2	149,20	17483,466	569,682	32,584		1	32,584	
			T-TL-10-28h-3	149,75	17612,603	563,115	31,972		1	31,972	
			T-TL-10-28h-4	149,85	17636,133	571,745	32,419		1	32,419	
			T-TL-10-28h-5	149,95	17659,680	512,575	29,025		1	29,025	

Lanjutan Tabel 5.28 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

gregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
100 %	0 %	7 hari	T-L-0-7h-1	150,25	17730,413	271,137	15,292	15,182	0,65	23,526	23,357
			T-L-0-7h-2	149,95	17659,680	283,587	16,058		0,65	24,705	
			T-L-0-7h-3	149,65	17589,088	259,354	14,745		0,65	22,685	
			T-L-0-7h-4	150,40	17765,832	248,656	13,996		0,65	21,533	
			T-L-0-7h-5	151,10	17931,590	283,647	15,818		0,65	24,336	
		14 hari	T-L-0-14h-1	150,35	17754,022	384,843	21,676	20,434	0,88	24,632	23,221
			T-L-0-14h-2	150,45	17777,646	365,358	20,552		0,88	23,354	
			T-L-0-14h-3	150,60	17813,113	316,275	17,755		0,88	20,176	
			T-L-0-14h-4	150,70	17836,777	378,580	21,225		0,88	24,119	
			T-L-0-14h-5	150,85	17872,303	374,652	20,963		0,88	23,821	
		28 hari	T-L-0-28h-1	148,65	17354,804	393,763	22,689	23,421	1	22,689	23,421
			T-L-0-28h-2	150,30	17742,215	367,659	20,722		1	20,722	
			T-L-0-28h-3	149,95	17659,680	436,850	24,737		1	24,737	
			T-L-0-28h-4	150,90	17884,152	447,590	25,027		1	25,027	
			T-L-0-28h-5	149,85	17636,133	422,044	23,931		1	23,931	
	8 %	7 hari	T-L-8-7h-1	150,85	17872,303	299,294	16,746	16,968	0,65	25,763	26,105
			T-L-8-7h-2	151,10	17931,590	287,904	16,056		0,65	24,701	
			T-L-8-7h-3	151,35	17990,976	323,305	17,970		0,65	27,647	
			T-L-8-7h-4	151,60	18050,460	321,466	17,809		0,65	27,399	
			T-L-8-7h-5	151,85	18110,043	294,466	16,260		0,65	25,015	
		14 hari	T-L-8-14h-1	151,65	18062,369	363,963	20,150	22,728	0,88	22,898	25,827
			T-L-8-14h-2	151,38	17996,920	404,834	22,495		0,88	25,562	
			T-L-8-14h-3	151,10	17931,590	432,358	24,112		0,88	27,399	
			T-L-8-14h-4	150,65	17824,943	427,845	24,003		0,88	27,276	
			T-L-8-14h-5	150,20	17718,614	405,386	22,879		0,88	25,999	
		28 hari	T-L-8-28h-1	149,60	17577,337	484,634	27,572	25,636	1	27,572	25,636
			T-L-8-28h-2	149,20	17483,466	437,267	25,010		1	25,010	
			T-L-8-28h-3	148,80	17389,846	412,400	23,715		1	23,715	
			T-L-8-28h-4	149,90	17647,905	463,573	26,268		1	26,268	
			T-L-8-28h-5	151,00	17907,864	458,700	25,614		1	25,614	

Lanjutan Tabel 5.28 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
	9 %	7 hari	T-L-9-7h-1	150,65	17824,943	334,290	18,754	17,945	0,65	28,852	27,608
			T-L-9-7h-2	150,03	17677,350	316,895	17,927		0,65	27,579	
			T-L-9-7h-3	149,40	17530,370	294,924	16,824		0,65	25,882	
			T-L-9-7h-4	150,25	17730,413	307,835	17,362		0,65	26,711	
			T-L-9-7h-5	151,10	17931,590	338,193	18,860		0,65	29,016	
		14 hari	T-L-9-14h-1	149,80	17624,366	398,894	22,633	24,164	0,88	25,719	27,459
			T-L-9-14h-2	150,10	17695,028	428,903	24,239		0,88	27,544	
			T-L-9-14h-3	150,40	17765,832	440,910	24,818		0,88	28,202	
			T-L-9-14h-4	150,68	17830,860	423,954	23,776		0,88	27,019	
			T-L-9-14h-5	150,95	17896,006	453,736	25,354		0,88	28,811	
		28 hari	T-L-9-28h-1	150,75	17848,615	470,060	26,336	27,544	1	26,336	27,544
			T-L-9-28h-2	149,80	17624,366	508,934	28,877		1	28,877	
			T-L-9-28h-3	148,85	17401,535	456,434	26,230		1	26,230	
			T-L-9-28h-4	149,53	17559,717	497,386	28,325		1	28,325	
			T-L-9-28h-5	150,20	17718,614	495,246	27,951		1	27,951	
	10 %	7 hari	T-L-10-7h-1	150,45	17777,646	316,030	17,777	18,749	0,65	27,349	28,844
			T-L-10-7h-2	151,70	18074,282	321,788	17,804		0,65	27,390	
			T-L-10-7h-3	152,95	18373,371	357,356	19,450		0,65	29,923	
			T-L-10-7h-4	151,60	18050,460	328,377	18,192		0,65	27,988	
			T-L-10-7h-5	150,25	17730,413	363,842	20,521		0,65	31,570	
		14 hari	T-L-10-14h-1	150,70	17836,777	438,610	24,590	25,308	0,88	27,943	28,759
			T-L-10-14h-2	151,28	17973,150	481,562	26,793		0,88	30,447	
			T-L-10-14h-3	151,85	18110,043	465,603	25,710		0,88	29,216	
			T-L-10-14h-4	151,58	18044,508	450,295	24,955		0,88	28,358	
			T-L-10-14h-5	151,30	17979,091	440,360	24,493		0,88	27,833	
		28 hari	T-L-10-28h-1	151,20	17955,333	497,685	27,718	28,521	1	27,718	28,521
			T-L-10-28h-2	150,30	17742,215	543,894	30,655		1	30,655	
			T-L-10-28h-3	149,40	17530,370	499,040	28,467		1	28,467	
			T-L-10-28h-4	150,95	17896,006	521,356	29,133		1	29,133	
			T-L-10-28h-5	152,50	18265,416	486,473	26,634		1	26,634	

Berdasarkan Tabel 5.28, hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa penambahan bahan tambahan *waterproofing* Damdex memberikan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan kuat tekan beton, baik pada sampel dengan agregat kasar asli maupun pada sampel yang menggunakan agregat kasar limbah. Untuk beton dengan agregat kasar asli, kuat tekan rata-rata tertinggi diperoleh pada variasi Damdex 10% dengan nilai 31,806 MPa pada umur 7 hari, 31,745 MPa pada umur 14 hari, dan 31,574 MPa pada umur 28 hari. Nilai ini menunjukkan tren peningkatan seiring bertambahnya kadar *waterproofing* Damdex, meskipun peningkatan mulai melandai pada kadar tertinggi. Sementara itu, pada beton dengan agregat kasar limbah, kuat tekan juga menunjukkan peningkatan seiring bertambahnya kadar Damdex. Kuat tekan rata-rata tertinggi terjadi pada variasi Damdex 10%, yaitu sebesar 28,844 MPa pada umur 7 hari, 28,759 MPa pada umur 14 hari, dan 28,521 MPa pada umur 28 hari. Walaupun nilai kuat tekan beton dengan agregat limbah berada di bawah beton agregat asli, peningkatan yang konsisten pada setiap variasi Damdex menunjukkan bahwa penggunaan Damdex mampu meningkatkan performa beton limbah secara signifikan. Secara umum, umur beton juga berpengaruh terhadap peningkatan kuat tekan, dengan nilai yang cenderung meningkat seiring bertambahnya usia pengujian dari 7 hari hingga 28 hari. Dengan demikian, baik penggunaan Damdex maupun pemilihan jenis agregat berperan penting dalam menentukan performa kuat tekan beton yang optimal.

Berdasarkan Tabel 5.28, dapat dilihat bahwa penggunaan agregat kasar limbah dalam campuran beton menyebabkan penurunan nilai kuat tekan jika dibandingkan dengan beton yang menggunakan agregat kasar asli. Nilai persentase penurunan kuat tekan (tanpa penambahan Damdex) pada beton dengan agregat kasar limbah terhadap beton agregat asli untuk umur 7, 14, dan 28 hari dapat dilihat pada Tabel 5.29 sebagai berikut.

Tabel 5. 29 Persentase Penurunan Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah Variasi 100% Terhadap Beton Agregat Kasar Asli

Umur Beton	Kuat Tekan Beton Terkonversi Agregat Kasar Asli	Kuat Tekan Beton Terkonversi Agregat Kasar Limbah	Persentase Penurunan
(Hari)	(MPa)	(MPa)	(%)
7	27,786	23,357	15,939
14	27,700	23,221	16,171
28	27,751	23,421	15,603

Berdasarkan pada Tabel 5.29, penggunaan agregat kasar limbah dalam campuran beton terbukti menurunkan kuat tekan hingga 16,171% dibandingkan dengan beton normal. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilaporkan oleh Seid (2019), penggunaan agregat kasar limbah diatas variasi 50% cenderung menurunkan kuat tekan pada beton yang signifikan pada umur 28 hari. Hasil kuat tekan dengan agregat kasar limbah beton variasi 100% dapat menurun hingga 40% dibandingkan beton normal. Hal tersebut disebabkan oleh penggunaan agregat kasar limbah yang menyebabkan kekuatan dan ikatan antara agregat yang lebih kecil dan struktur agregat beton yang lebih berpori.

Perbandingan persentase penurunan kuat tekan beton dengan agregat kasar limbah pada umur 28 hari antara penelitian ini dan penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 5.30 sebagai berikut.

Tabel 5. 30 Perbandingan Persentase Penurunan Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah Penulis dengan Penelitian Sebelumnya

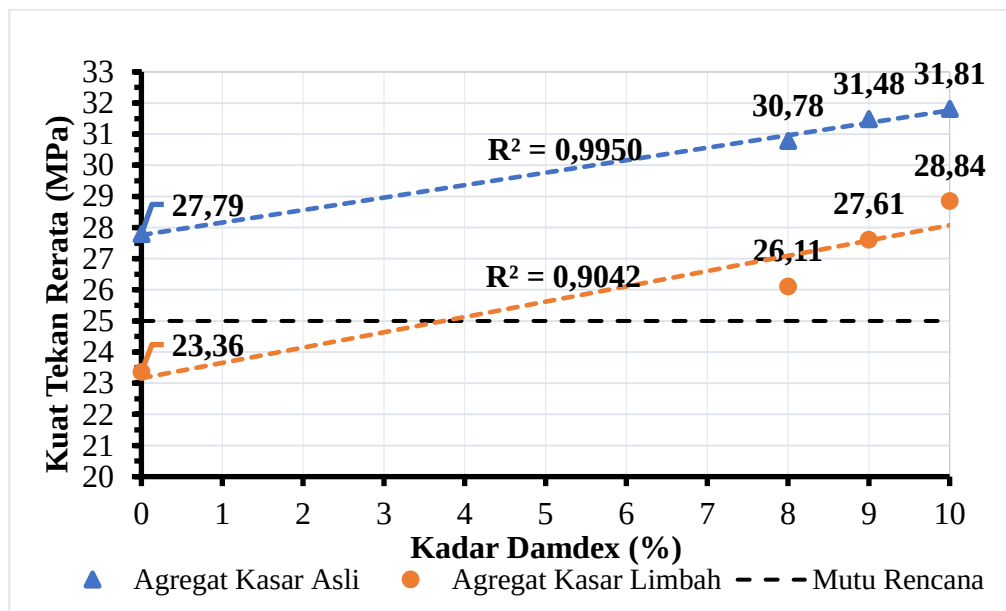
Peneliti	Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Asli	Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah	Persentase Penurunan
	(MPa)	(MPa)	(%)
Penulis	27,751	23,421	15,603
Kusumawardhana (2018)	25,620	23,350	8,860
Ardiansyah (2022)	26,771	20,603	23,040

Perbedaan persentase ini dikarenakan agregat limbah beton menggunakan mutu beton limbah yang berbeda. Selain itu, agregat kasar limbah yang digunakan

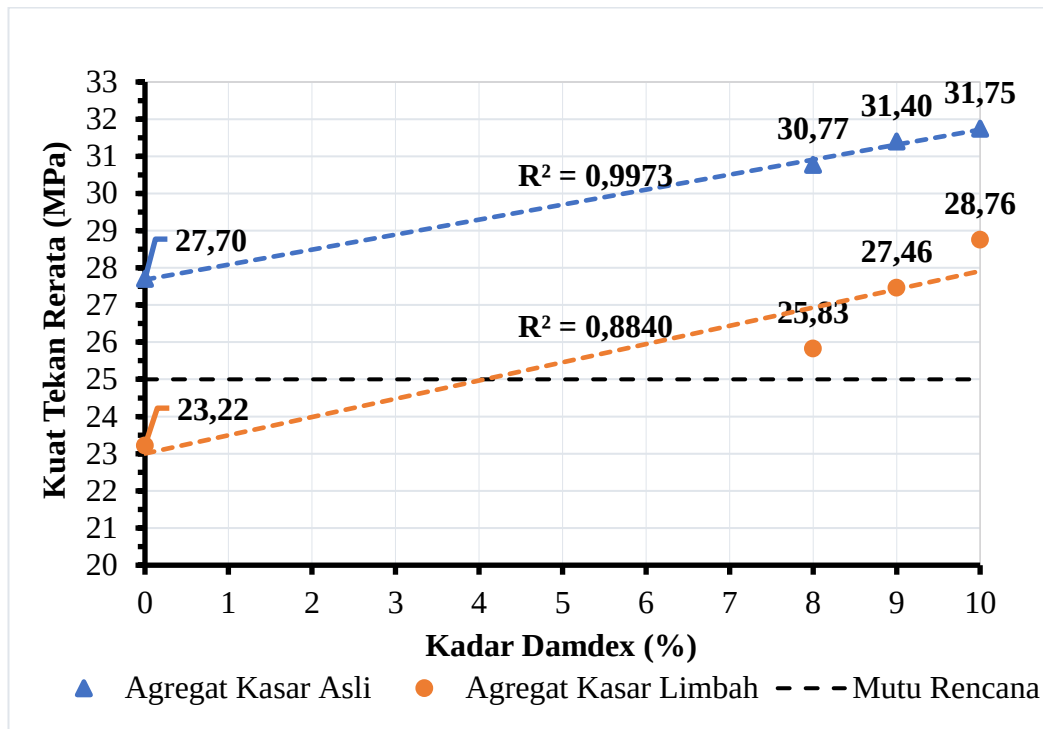
pada penelitian terdahulu memiliki mutu beton asal yang berbeda. Pada penelitian Kusumawardhana (2018), agregat limbah diperoleh dari beton dengan mutu rencana 45 MPa, sedangkan pada penelitian Ardiansyah (2023), agregat limbah berasal dari beton dengan mutu rencana 20 MPa. Adapun pada penelitian ini, agregat kasar limbah yang digunakan berasal dari beton dengan mutu rencana K-350 atau setara 29,05 MPa. Menurut Alsalman et al. (2022), penggunaan agregat kasar limbah 100% yang berasal dari beton 30-40 MPa dapat menyebabkan penurunan kuat tekan yang relatif lebih kecil dibandingkan penggunaan agregat kasar limbah yang diproduksi dari beton 20-30 MPa, selisih penurunan kuat tekan antara kedua jenis agregat limbah tersebut dapat mencapai 14%.

5.5.1 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Variasi Penambahan Damdex

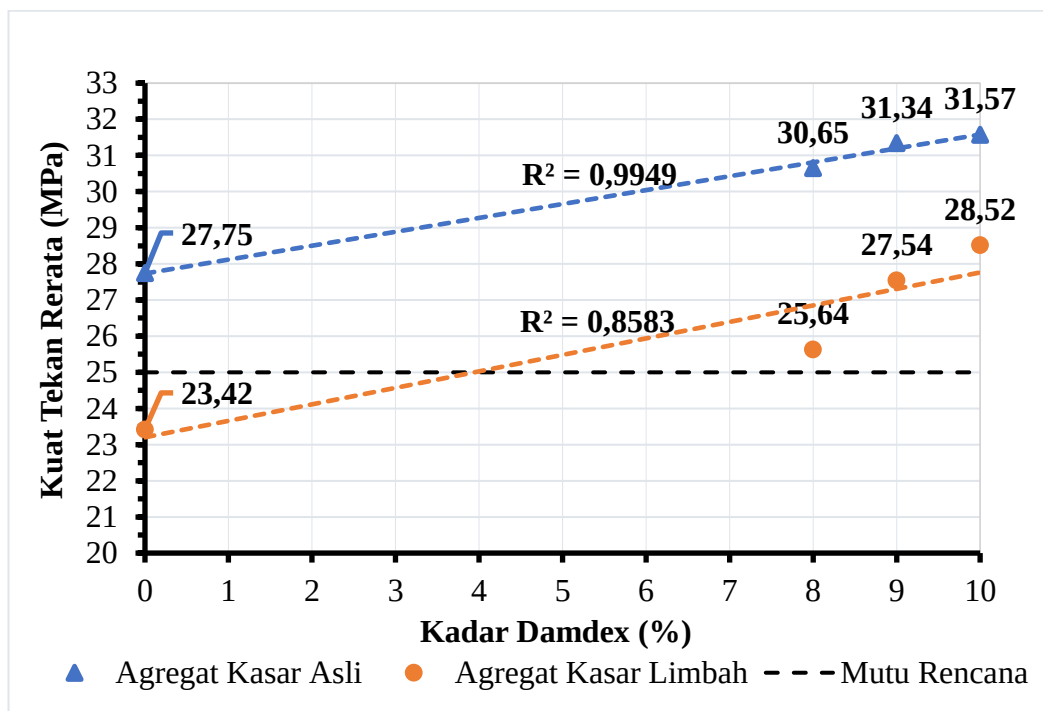
Nilai kuat tekan rata-rata beton dengan agregat kasar asli dan agregat kasar limbah pada Tabel 5.28 kemudian dianalisis lebih lanjut dengan memplot hubungan antara kuat tekan beton dan variasi kadar penambahan Damdex untuk setiap umur pengujian. Grafik hubungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.12, Gambar 5.13, dan Gambar 5.14 sebagai berikut.



Gambar 5. 12 Hubungan Kuat Tekan Beton Terkonversi dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 7 Hari



Gambar 5. 13 Hubungan Kuat Tekan Beton Terkonversi dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 14 Hari



Gambar 5. 14 Hubungan Kuat Tekan Beton Terkonversi dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 28 Hari

Berdasarkan Gambar 5.13, Gambar 5.14, dan Gambar 5.15, terlihat bahwa penambahan Damdex pada campuran beton dengan agregat kasar asli memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kuat tekan beton. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien korelasi pada umur beton 7 hari, 14 hari, dan 28 hari yang berturut-turut sebesar 0,9950; 0,9973; dan 0,9949. Mengacu pada Tabel 3.6, nilai koefisien tersebut berada pada interval 0,80–1,00 yang menunjukkan hubungan sangat kuat antara kadar penambahan Damdex dan peningkatan kuat tekan beton. Hasil ini sejalan dengan pendapat Akbar (2021), yang menyatakan bahwa penambahan Damdex mampu meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan beton tanpa bahan tambahan tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa Damdex berperan dalam memperbaiki struktur internal beton melalui mekanisme pengisian pori menghasilkan beton dengan daya dukung yang lebih tinggi.

Pada beton dengan agregat kasar limbah, nilai koefisien korelasi pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari masing-masing adalah 0,9042; 0,8840; dan 0,8583. Berdasarkan Tabel 3.6, nilai tersebut berada pada interval 0,80–1,00 sehingga menunjukkan bahwa hubungan antara penambahan Damdex dan peningkatan kuat tekan beton termasuk dalam kategori sangat kuat. Hasil ini sejalan dengan pendapat Ardiansyah (2023), yang melaporkan bahwa nilai koefisien korelasi kuat tekan beton agregat limbah dengan penambahan Damdex cenderung menurun seiring dengan bertambahnya umur beton, dari umur 7 hari hingga 28 hari. Meskipun demikian, penambahan Damdex pada beton dengan agregat kasar limbah tetap terbukti mampu meningkatkan kuat tekan dibandingkan beton agregat limbah tanpa penambahan Damdex. Hal ini menunjukkan bahwa Damdex tetap efektif dalam memperbaiki kinerja mekanis beton limbah melalui mekanisme peningkatan kepadatan mikrostruktur dan pengurangan porositas internal.

Adapun persentase kenaikan kuat tekan beton dengan penambahan Damdex terhadap beton tanpa Damdex pada penggunaan agregat kasar asli pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari dapat dilihat pada Tabel 5.31 sebagai berikut.

Tabel 5. 31 Persentase Kenaikan Kuat Tekan Beton Penambahan Damdex Terhadap Beton Tanpa Damdex Pada Agregat Kasar Asli

Variasi Kadar Damdex	Persentase Kenaikkan Kuat Tekan pada Umur Beton Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
8%	10,766	11,099	10,444
9%	13,301	13,363	12,931
10%	14,470	14,603	13,774

Berdasarkan Tabel 5.31, penambahan Damdex dengan variasi 8%, 9%, dan 10% dengan agregat kasar asli menunjukkan peningkatan kuat tekan beton yang signifikan terhadap beton tanpa Damdex pada seluruh umur beton, yaitu 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Peningkatan terbesar diperoleh pada variasi penambahan Damdex 10%, dengan persentase kenaikan kuat tekan mencapai 14,603% pada umur 14 hari. Kondisi ini dipengaruhi oleh karakteristik Damdex yang berfungsi mengurangi air bebas dalam campuran beton, sehingga mampu menghasilkan struktur yang lebih rapat dan meningkatkan efektivitas proses hidrasi semen. Selain itu, penggunaan agregat kasar asli yang memiliki karakteristik lebih stabil dan tidak menyerap air berlebih juga mendukung optimalisasi kinerja Damdex dalam campuran beton.

Perbandingan persentase peningkatan kuat tekan beton dengan agregat kasar asli pada penambahan Damdex sebesar 8% dalam penelitian ini dengan penelitian-penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 5.32 sebagai berikut.

Tabel 5. 32 Perbandingan Persentase Kenaikkan Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Asli dengan Variasi Damdex 8% Penulis dan Penelitian Sebelumnya

Variasi Kadar Damdex	Penulis			Akbar (2022)		
	Persentase Kenaikkan Kuat Tekan pada Umur Tertentu (%)			Persentase Kenaikkan Kuat tekan pada Umur Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari	7 Hari	14 Hari	28 Hari
8%	10,766	11,099	10,444	11,370	14,800	10,240

Berdasarkan Tabel 5.32, dapat dilihat bahwa penggunaan Damdex variasi 8% memberikan pengaruh terhadap peningkatan kuat tekan beton pada semua

umur pengujian pada penelitian penulis maupun penelitian Akbar (2022). Perbedaan persentase ini dapat disebabkan oleh kondisi material, perawatan beton (*curing*). Meskipun demikian, kedua penelitian menunjukkan tren yang serupa bahwa penambahan Damdex sebesar 8% secara umum efektif dalam meningkatkan kuat tekan beton pada penggunaan agregat kasar asli.

Sementara itu, persentase peningkatan kuat tekan beton dengan agregat kasar limbah sebesar 100% terhadap variasi penambahan Damdex pada umur beton 7, 14, dan 28 hari dapat dilihat pada Tabel 5.33 sebagai berikut.

Tabel 5. 33 Persentase Kenaikan Kuat Tekan Beton Penambahan Damdex Terhadap Beton Tanpa Damdex Pada Agregat Kasar Limbah

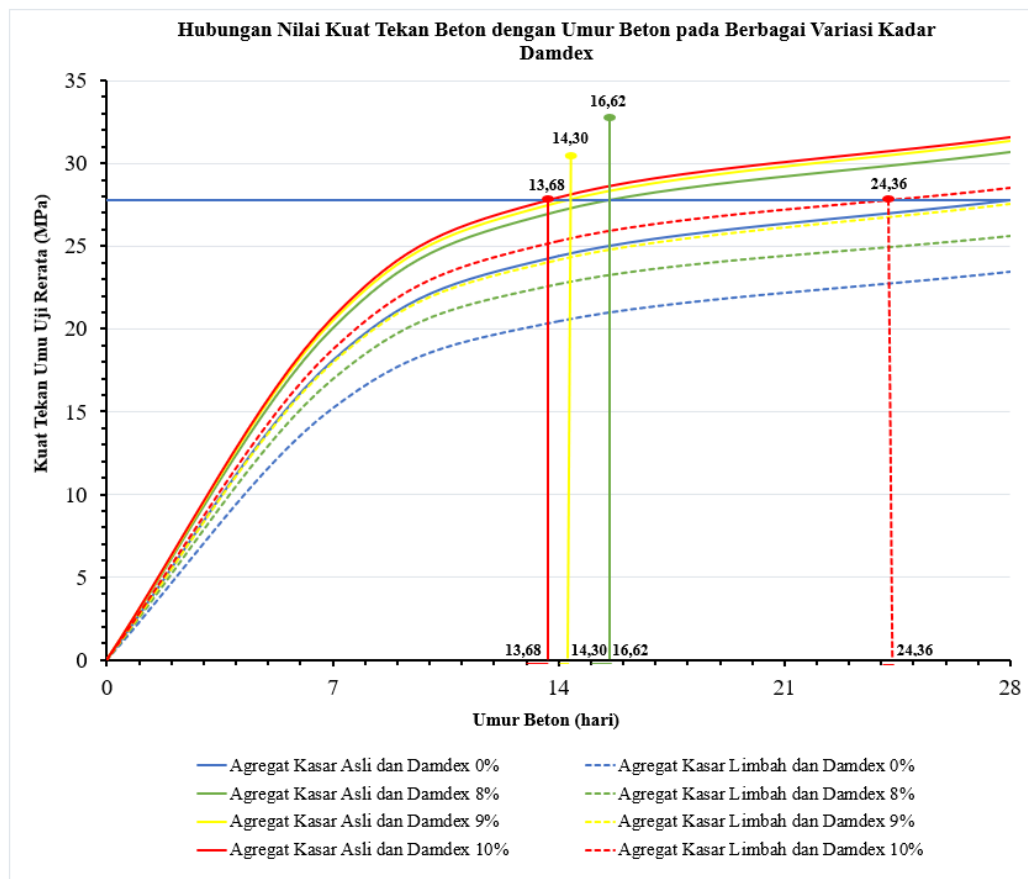
Variasi Kadar Damdex	Persentase Kenaikan Kuat Tekan pada Umur Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
8%	11,765	11,224	9,455
9%	18,201	18,253	17,601
10%	23,492	23,853	21,775

Berdasarkan Tabel 5.33, penambahan Damdex dengan variasi 8%, 9%, dan 10% dengan agregat kasar limbah menunjukkan peningkatan kuat tekan beton yang signifikan terhadap beton tanpa Damdex pada seluruh umur beton, yaitu 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Peningkatan tertinggi terjadi pada penambahan Damdex 10% dengan nilai kenaikan hingga 23,853% pada umur 14 hari. Perbedaan persentase kenaikan kuat tekan disebabkan oleh semakin efektifnya peran Damdex dalam meningkatkan performa beton agregat kasar limbah. Seiring bertambahnya kadar Damdex peningkatan kuat tekan beton juga semakin signifikan. Hal ini terjadi karena Damdex berkontribusi dalam mengatasi kelemahan agregat limbah serta memperbaiki struktur mikro beton melalui pengurangan pori-pori.

5.5.2 Hubungan Kuat Tekan Beton dengan Umur Beton

Nilai kuat tekan rata-rata pada masing-masing umur pengujian tanpa konversi pada beton dengan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah yang tercantum pada Tabel 5.28 dapat digunakan untuk menyusun grafik hubungan

antara kuat tekan dan umur beton pada setiap variasi penambahan Damdex. Grafik tersebut ditampilkan pada Gambar 5.15 sebagai berikut.



Gambar 5. 15 Hubungan Nilai Kuat Tekan Beton dengan Umur Beton pada Berbagai Variasi Kadar Damdex

Berdasarkan Gambar 5.15 diketahui nilai kuat tekan beton mengalami peningkatan seiring bertambahnya umur beton pada seluruh variasi kadar Damdex dan jenis agregat yang digunakan. Peningkatan kuat tekan ini disebabkan oleh proses hidrasi semen yang berlangsung secara bertahap, dengan laju kenaikan yang paling signifikan terjadi hingga umur 14 hari, kemudian melandai mendekati umur 28 hari karena reaksi hidrasi mulai mencapai titik jenuh. Penambahan Damdex memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan kuat tekan beton, terutama pada beton agregat kasar limbah. Hal ini karena Damdex berfungsi sebagai bahan tambah *waterproofing* dan *water reducer* yang mampu mengurangi

pori-pori kapiler, sehingga menghasilkan beton dengan struktur yang lebih padat dan homogen. Beton dengan agregat kasar asli menunjukkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan beton agregat kasar limbah, karena agregat kasar asli memiliki sifat karakteristik yang lebih baik.

Selain itu, dari grafik pada Gambar 5.15 terlihat bahwa setiap variasi penambahan Damdex memberikan nilai kuat tekan nominal pada umur pengujian tertentu tanpa memerlukan konversi, yang menunjukkan adanya peningkatan kekuatan beton seiring bertambahnya umur. Perbedaan nilai kuat tekan antara beton dengan agregat kasar asli dan agregat kasar limbah pada masing-masing kadar Damdex juga dapat menggambarkan lama waktu (hari) yang dibutuhkan setiap variasi untuk mencapai kuat tekan beton kontrol pada umur 28 hari dengan cara tarik garis horizontal pada Gambar 5.15 pada variasi beton agregat kasar asli dengan kadar Damdex 0% sebagai beton kontrol. Beton agregat kasar asli dengan kadar Damdex sebesar 8%, 9%, dan 10% berturut-turut memerlukan waktu 16,62 hari, 14,30 hari, dan 13,68 hari untuk mencapai kuat tekan beton kontrol tanpa Damdex pada umur 28 hari. Sedangkan beton agregat kasar limbah dengan kadar Damdex 10% memerlukan waktu 24,36 hari untuk mencapai tingkat kekuatan yang setara. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Ardiansyah (2023), yang mengemukakan bahwa peningkatan kadar Damdex dalam campuran beton berbanding lurus dengan percepatan waktu pencapaian kuat tekan rencana. Kondisi ini berlaku baik pada beton yang menggunakan agregat kasar konvensional maupun agregat limbah.

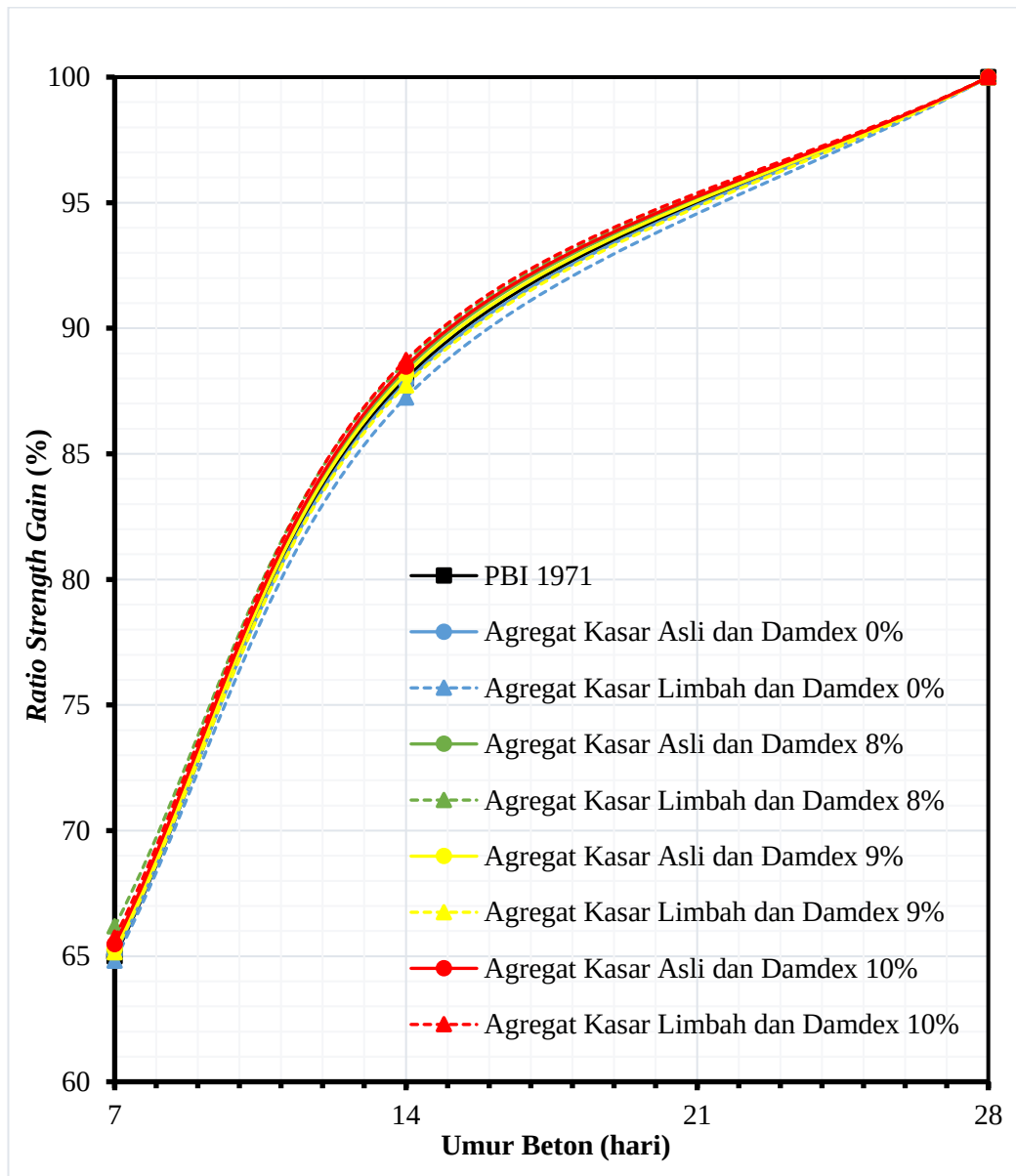
Besarnya akselerasi peningkatan kuat tekan beton dapat ditentukan berdasarkan hasil pengujian kuat tekan yang tercantum pada Tabel 5.28. Perhitungan akselerasi dilakukan dengan membandingkan kuat tekan aktual beton pada umur 7 hari dan 14 hari terhadap kuat tekan pada umur 28 hari. Persentase kuat tekan beton dengan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah pada setiap umur pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.34, Tabel 5.35, serta Gambar 5.16 berikut.

Tabel 5. 34 Persentase Kuat Tekan Beton Agregat kasar Asli Berdasarkan Umur Beton

Variasi Kadar Damdex	Persentase Kenaikan Kuat Tekan pada Umur Beton Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
PBI 1971	65	88	100
0%	65,081	87,837	100
8%	65,270	88,357	100
9%	65,294	88,173	100
10%	65,479	88,477	100

Tabel 5. 35 Persentase Kuat Tekan Beton Agergat Kasar Limbah Berdasarkan Umur Beton

Variasi Kadar Damdex	Persentase Kenaikan Kuat Tekan pada Umur Beton Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
PBI 1971	65	88	100
0%	64,822	87,246	100
8%	66,190	88,656	100
9%	65,152	87,730	100
10%	65,735	88,734	100



Gambar 5. 16 Persentase Kuat Tekan Beton Berdasarkan Umur Beton

Mengacu pada Tabel 5.34, Tabel 5.35, dan Gambar 5.16, dapat dilihat bahwa perkembangan kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari menunjukkan pola peningkatan yang konsisten, baik pada beton dengan agregat kasar asli maupun dengan agregat kasar limbah. Pada umur 7 hari, kuat tekan beton berkisar antara 65–67%, meningkat menjadi 87–89% pada umur 14 hari, dan mencapai 100% pada umur 28 hari. Nilai ini mengindikasikan bahwa proses hidrasi berkembang secara progresif seiring waktu dan nilai ini sesuai dengan acuan PBI

(1971). Penambahan Damdex terbukti membantu mempercepat peningkatan kekuatan awal beton. Sementara itu, perbandingan antara agregat kasar asli dan agregat kasar limbah menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda, menandakan bahwa agregat kasar limbah masih dapat digunakan sebagai substitusi tanpa mengurangi kualitas kuat tekan beton secara signifikan. Dengan demikian, penggunaan Damdex dan agregat kasar limbah dapat menjadi alternatif yang efektif dalam memperbaiki mutu beton, terutama dalam hal efisiensi waktu dan pemanfaatan material daur ulang.

Selisih persentase kuat tekan beton pada umur 7 hari dan 14 hari, baik pada beton dengan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah, berdasarkan acuan umur beton menurut PBI (1971), dapat dilihat pada Tabel 5.36 dan Tabel 5.37 sebagai berikut.

Tabel 5. 36 Selisih Persentase Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Asli pada Umur 7 dan 14 Hari

Variasi Kadar Damdex	Selisih Persentase Kuat Tekan pada Umur 7 Hari (%)		Selisih Persentase Kuat Tekan pada Umur 14 Hari (%)	
	PBI 19715	Tanpa Damdex	PBI 19715	Tanpa Damdex
0%	0,081	0	-0,163	0
8%	0,270	0,189	0,357	0,520
9%	0,294	0,213	0,173	0,336
10%	0,479	0,398	0,477	0,640

Tabel 5. 37 Selisih Persentase Kuat Tekan Beton Agregat Kasar Limbah pada Umur 7 dan 14 Hari

Variasi Kadar Damdex	Selisih Persentase Kuat Tekan pada Umur 7 Hari (%)		Selisih Persentase Kuat Tekan pada Umur 14 Hari (%)	
	PBI 19715	Tanpa Damdex	PBI 19715	Tanpa Damdex
0%	-0,178	0	-0,754	0
8%	1,190	1,368	0,656	1,410
9%	0,152	0,330	-0,270	0,484
10%	0,735	0,914	0,734	1,488

Berdasarkan Tabel 5.36 dan Tabel 5.37, peningkatan kuat tekan beton yang paling optimal pada umur 7 dan 14 hari untuk beton dengan agregat kasar asli dicapai pada penggunaan Damdex sebesar 10%. Sementara itu, untuk beton agregat kasar limbah, akselerasi optimum terjadi pada penambahan Damdex sebesar 8%. Hasil ini menunjukkan bahwa efektivitas Damdex dalam mempercepat perkembangan kuat tekan beton dapat bervariasi tergantung pada jenis agregat yang digunakan. Hasil analisis kuat tekan nominal serta akselerasi peningkatan kuat tekan beton pada setiap umur sejalan dengan temuan Akbar (2021), yang menyebutkan bahwa penggunaan Damdex mampu mempercepat proses pengerasan beton sehingga waktu pelaksanaan pekerjaan dapat dipersingkat secara efektif.

5.6 Hasil Pengujian Absorpsi Beton

Pengujian absorpsi dilakukan dengan terlebih dahulu mengeringkan benda uji berbentuk kubus di dalam oven selama 24 jam pada suhu $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Setelah proses pengeringan selesai, benda uji dikeluarkan dan ditimbang untuk mendapatkan berat dalam kondisi kering oven. Selanjutnya, benda uji direndam di dalam air selama 48 jam. Setelah waktu perendaman tercapai, benda uji diangkat dan bagian luarnya dikeringkan menggunakan kain agar tidak ada air yang menempel pada permukaannya. Dalam keadaan kering permukaan tersebut, benda uji kembali ditimbang. Perhitungan nilai absorpsi beton dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

1. Absorpsi beton tanpa limbah dan tanpa Damdex umur 7 hari sampel 1

$$\begin{aligned}
 P_A &= \frac{B-A}{A} \times 100 \\
 &= \frac{7,644 - 7,322}{7,322} \times 100 \\
 &= 4,40\%
 \end{aligned}$$

2. Absorpsi beton tanpa limbah dan tanpa Damdex umur 14 hari sampel 1

$$\begin{aligned}
 P_A &= \frac{B-A}{A} \times 100 \\
 &= \frac{8,081 - 7,747}{7,747} \times 100 \\
 &= 4,31\%
 \end{aligned}$$

3. Absorpsi beton tanpa limbah dan tanpa Damdex umur 28 hari sampel 1

$$\begin{aligned}
 P_A &= \frac{B-A}{A} \times 100 \\
 &= \frac{7,916 - 7,605}{7,605} \times 100 \\
 &= 4,10\%
 \end{aligned}$$

Dengan prosedur perhitungan yang sama, dilakukan pula penghitungan nilai absorpsi beton untuk sampel pada variasi lainnya. Rekapitulasi hasil pengujian absorpsi beton tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.38 sebagai berikut.

Tabel 5. 38 Hasil Pengujian Absorpsi Beton

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	No. Sampel	Berat Kering Oven (kg)	Berat Kering Permukaan (kg)	Absorpsi (%)	Absorpsi Rerata (%)
0 %	0 %	7 hari	A-TL-0-7h-1	1	7,322	7,644	4,398	4,28
			A-TL-0-7h-2	2	7,661	7,980	4,164	
		14 hari	A-TL-0-14h-1	1	7,747	8,081	4,311	4,16
			A-TL-0-14h-2	2	7,670	7,977	4,003	
		28 hari	A-TL-0-28h-1	1	7,605	7,916	4,089	4,02
			A-TL-0-28h-2	2	7,371	7,662	3,948	
	8 %	7 hari	A-TL-8-7h-1	1	7,376	7,564	2,549	2,67
			A-TL-8-7h-2	2	7,410	7,617	2,794	
		14 hari	A-TL-8-14h-1	1	7,225	7,419	2,685	2,56
			A-TL-8-14h-2	2	7,509	7,692	2,437	
		28 hari	A-TL-8-28h-1	1	7,572	7,762	2,509	2,50
			A-TL-8-28h-2	2	7,691	7,883	2,496	

Lanjutan Tabel 5. 38 Hasil Pengujian Absorpsi Beton

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	No. Sampel	Berat Kering Oven (kg)	Berat Kering Permukaan (kg)	Absorpsi (%)	Absorpsi Rerata (%)
	9 %	7 hari	A-TL-9-7h-1	1	7,563	7,743	2,380	2,35
			A-TL-9-7h-2	2	7,546	7,721	2,319	
		14 hari	A-TL-9-14h-1	1	7,466	7,63	2,197	2,18
			A-TL-9-14h-2	2	7,410	7,571	2,173	
		28 hari	A-TL-9-28h-1	1	7,137	7,289	2,130	2,16
			A-TL-9-28h-2	2	7,153	7,310	2,195	
	10 %	7 hari	A-TL-10-7h-1	1	7,397	7,564	2,258	2,21
			A-TL-10-7h-2	2	7,572	7,736	2,166	
		14 hari	A-TL-10-14h-1	1	7,697	7,867	2,209	2,12
			A-TL-10-14h-2	2	7,773	7,931	2,033	
		28 hari	A-TL-10-28h-1	1	8,050	8,207	1,950	2,06
			A-TL-10-28h-2	2	7,630	7,796	2,176	
100 %	0 %	7 hari	A-L-0-7h-1	1	7,111	7,529	5,878	6,26
			A-L-0-7h-2	2	7,007	7,472	6,636	
		14 hari	A-L-0-14h-1	1	7,145	7,589	6,214	6,10
			A-L-0-14h-2	2	7,188	7,618	5,982	
		28 hari	A-L-0-28h-1	1	7,429	7,863	5,842	5,97
			A-L-0-28h-2	2	7,363	7,812	6,098	
	8 %	7 hari	A-L-8-7h-1	1	7,352	7,723	5,046	4,89
			A-L-8-7h-2	2	7,105	7,441	4,729	
		14 hari	A-L-8-14h-1	1	7,250	7,599	4,814	4,65
			A-L-8-14h-2	2	7,054	7,371	4,494	
		28 hari	A-L-8-28h-1	1	7,604	7,943	4,458	4,52
			A-L-8-28h-2	2	7,515	7,859	4,578	
	9 %	7 hari	A-TL-9-7h-1	1	7,226	7,511	3,944	4,07
			A-TL-9-7h-2	2	7,135	7,435	4,205	
		14 hari	A-TL-9-14h-1	1	7,181	7,452	3,774	3,91
			A-TL-9-14h-2	2	7,055	7,341	4,054	
		28 hari	A-TL-9-28h-1	1	7,174	7,457	3,945	3,74
			A-TL-9-28h-2	2	7,173	7,426	3,527	
	10 %	7 hari	A-L-10-7h-1	1	7,300	7,539	3,274	3,33
			A-L-10-7h-2	2	7,123	7,364	3,383	
		14 hari	A-L-10-14h-1	1	7,279	7,495	2,967	3,17
			A-L-10-14h-2	2	7,177	7,419	3,372	
		28 hari	A-L-10-28h-1	1	7,370	7,595	3,053	3,10
			A-L-10-28h-2	2	7,133	7,358	3,154	

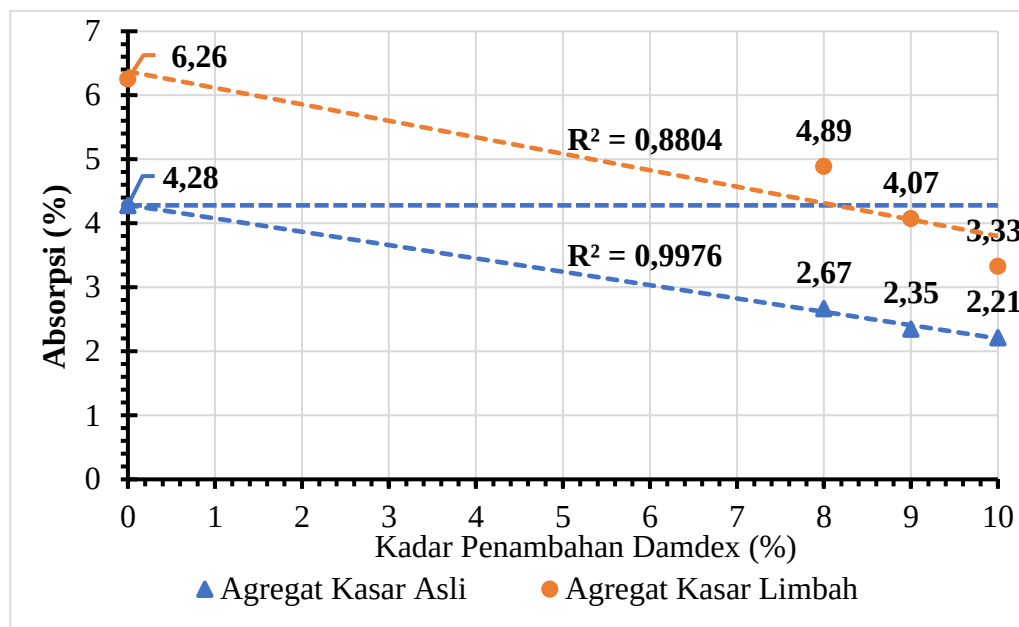
Dari Tabel 5.38 dapat dilihat bahwa pemanfaatan agregat kasar limbah menyebabkan meningkatnya nilai absorpsi dibandingkan beton yang menggunakan agregat kasar asli. Pada umur 28 hari, beton dengan agregat limbah tanpa tambahan Damdex memiliki nilai absorpsi sebesar 5,97%, yang jauh lebih tinggi daripada beton dengan agregat kasar asli pada umur sama yaitu 4,02%. Hal

ini menunjukkan bahwa agregat kasar limbah memiliki struktur yang lebih porous atau tidak sepadat agregat kasar asli, sehingga meningkatkan daya serap campuran beton.

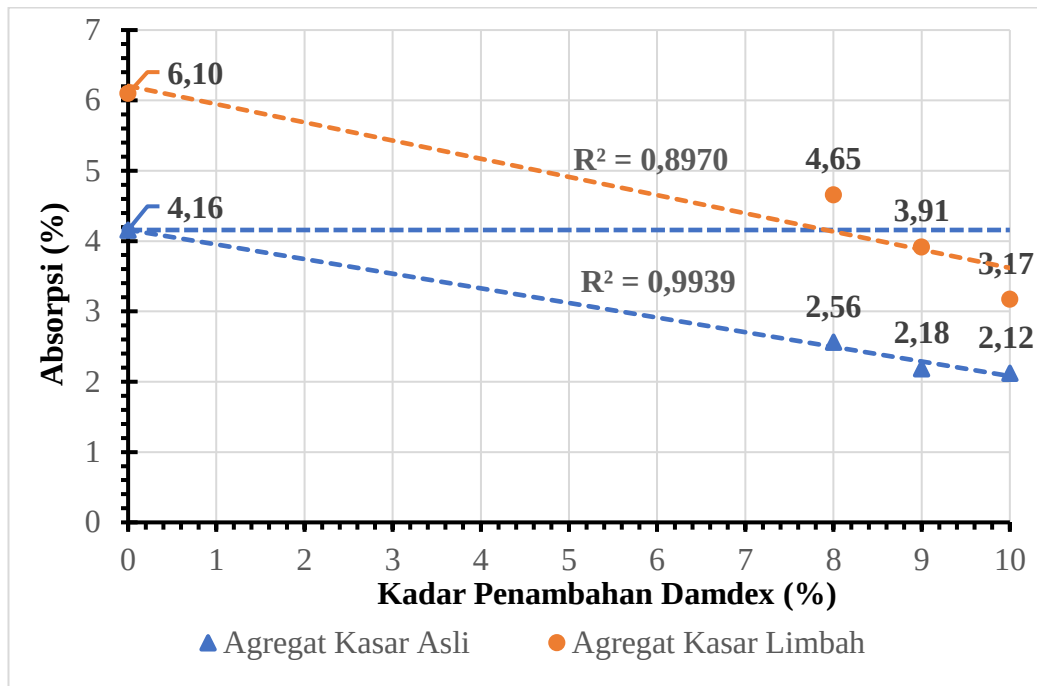
Penambahan Damdex pada beton agregat kasar limbah mampu menurunkan nilai absorpsi, meskipun tidak serendah beton agregat kasar asli. Pada umur 28 hari, beton dengan agregat kasar limbah yang diberi tambahan Damdex 10% menunjukkan nilai absorpsi sebesar 3,10%, lebih rendah dibandingkan campuran dengan agregat limbah tanpa penambahan Damdex yang mencapai 5,97%. Hal ini menunjukkan bahwa Damdex tetap memberikan kontribusi dalam memperbaiki karakteristik pada beton agregat kasar limbah, meskipun belum sepenuhnya mampu menghilangkan dampak negatif sepenuhnya yang ditimbulkan oleh penggunaan agregat kasar limbah.

5.6.1 Hubungan Absorpsi Beton dengan Variasi Penambahan Damdex

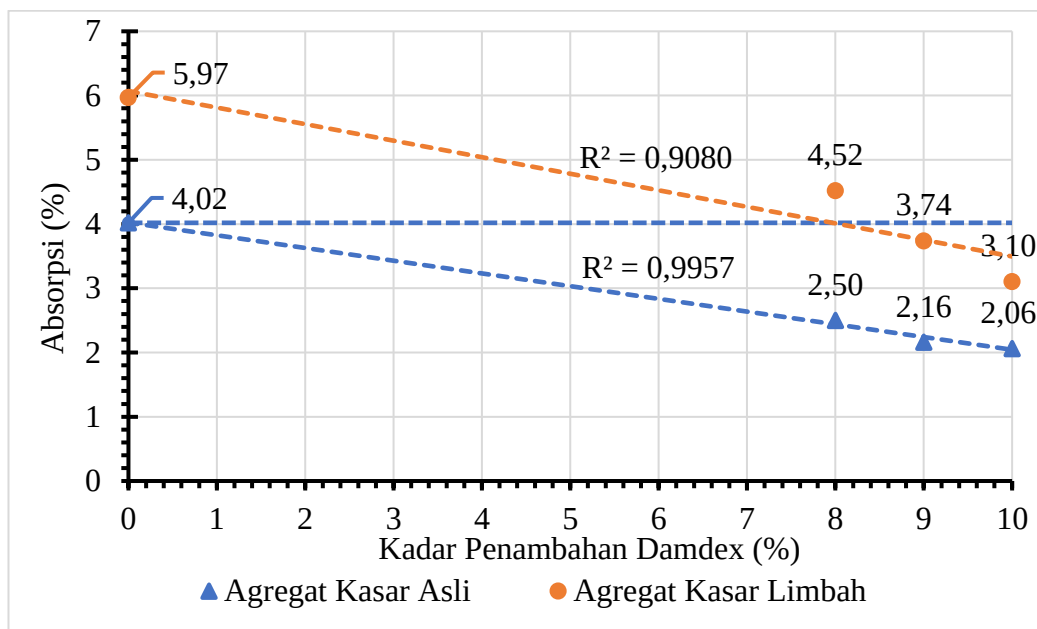
Grafik hubungan nilai absorpsi beton dengan agregat kasar asli serta beton yang menggunakan agregat kasar limbah pada berbagai kadar penambahan Damdex untuk setiap umur pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.17, Gambar 5.18, dan Gambar 5.19 sebagai berikut.



Gambar 5. 17 Hubungan Absorpsi Beton dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 7 Hari



Gambar 5. 18 Hubungan Absorpsi Beton dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 14 Hari



Gambar 5. 19 Hubungan Absorpsi Beton dengan Kadar Penambahan Damdex pada Umur Beton 28 Hari

Berdasarkan Gambar 5.17, Gambar 5.18, dan Gambar 5.19, terlihat bahwa penambahan Damdex dalam campuran beton, baik pada beton dengan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah, memberikan pengaruh terhadap nilai absorpsi beton. Nilai koefisien korelasi antara kadar Damdex dan absorpsi beton dengan agregat kasar asli pada umur 7, 14, dan 28 hari masing-masing sebesar 0,9976, 0,9939, dan 0,9957. Mengacu pada Tabel 3.6, nilai tersebut berada pada rentang 0,80–1,00 yang menunjukkan hubungan yang sangat kuat. Sementara itu, koefisien korelasi antara kadar penambahan Damdex dan absorpsi beton dengan agregat kasar limbah pada umur 7, 14, dan 28 hari berturut-turut adalah 0,8804, 0,8970, dan 0,9080. Berdasarkan Tabel 3.6, nilai tersebut juga berada pada interval 0,80–1,00 yang menandakan hubungan yang sangat kuat antara kedua variabel tersebut. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian Ardiansyah (2023), di mana hubungan antara kadar penambahan Damdex dan nilai absorpsi pada beton dengan agregat limbah pada umur 7, 14, dan 28 hari juga berada pada rentang 0,80–1,00 yang menunjukkan tingkat hubungan yang sangat kuat.

Nilai absorpsi pada beton dengan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah menunjukkan penurunan seiring bertambahnya kadar Damdex dalam campuran. Persentase penurunan absorpsi pada beton dengan agregat kasar asli dan agregat limbah untuk variasi Damdex 8%, 9%, dan 10% dapat dilihat secara berurutan pada Tabel 5.39 dan Tabel 5.40 sebagai berikut.

Tabel 5. 39 Persentase Penurunan Absorpsi Beton dengan Penambahan Damdex terhadap Beton Dengan Agregat Kasar Asli

Variasi Kadar Damdex	Persentase Penurunan Absorpsi Beton pada Umur Beton Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
8%	37,60	38,39	37,72
9%	45,11	47,45	46,19
10%	48,33	48,99	48,67

Tabel 5. 40 Persentase Penurunan Absorpsi Beton dengan Penambahan Damdex terhadap Beton Dengan Agregat Kasar Limbah

Variasi Kadar Damdex	Persentase Penurunan Absorpsi Beton pada Umur Beton Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
8%	21,89	23,68	24,32
9%	34,89	35,82	37,42
10%	46,80	48,02	48,01

Persentase penurunan nilai absorpsi beton akibat penambahan Damdex pada masing-masing beton dengan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah dapat dilihat pada Tabel 5.39 dan 5.40 di atas. Perhitungan persentase penurunan absorpsi beton dilakukan dengan menentukan persentase perubahan terhadap masing-masing agregat kasar asli dan agregat kasar limbah. Berdasarkan hasil pengujian, penurunan persentase absorpsi terbesar, baik pada beton dengan agregat kasar asli maupun agregat kasar limbah, terjadi pada penggunaan Damdex dengan variasi 10%. Hasil ini sesuai dengan penelitian oleh (Akbar, 2021), dimana pada beton normal, seluruh pori-porinya terisi oleh air, sedangkan pada beton yang diberi tambahan Damdex, sebagian air tersebut digantikan oleh cairan Damdex. Cairan Damdex berfungsi sebagai material pengisi pori-pori di dalam beton.

Perbandingan persentase penurunan nilai absorpsi beton akibat penambahan Damdex pada beton dengan agregat kasar asli pada penelitian ini dengan penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 5.41 sebagai berikut.

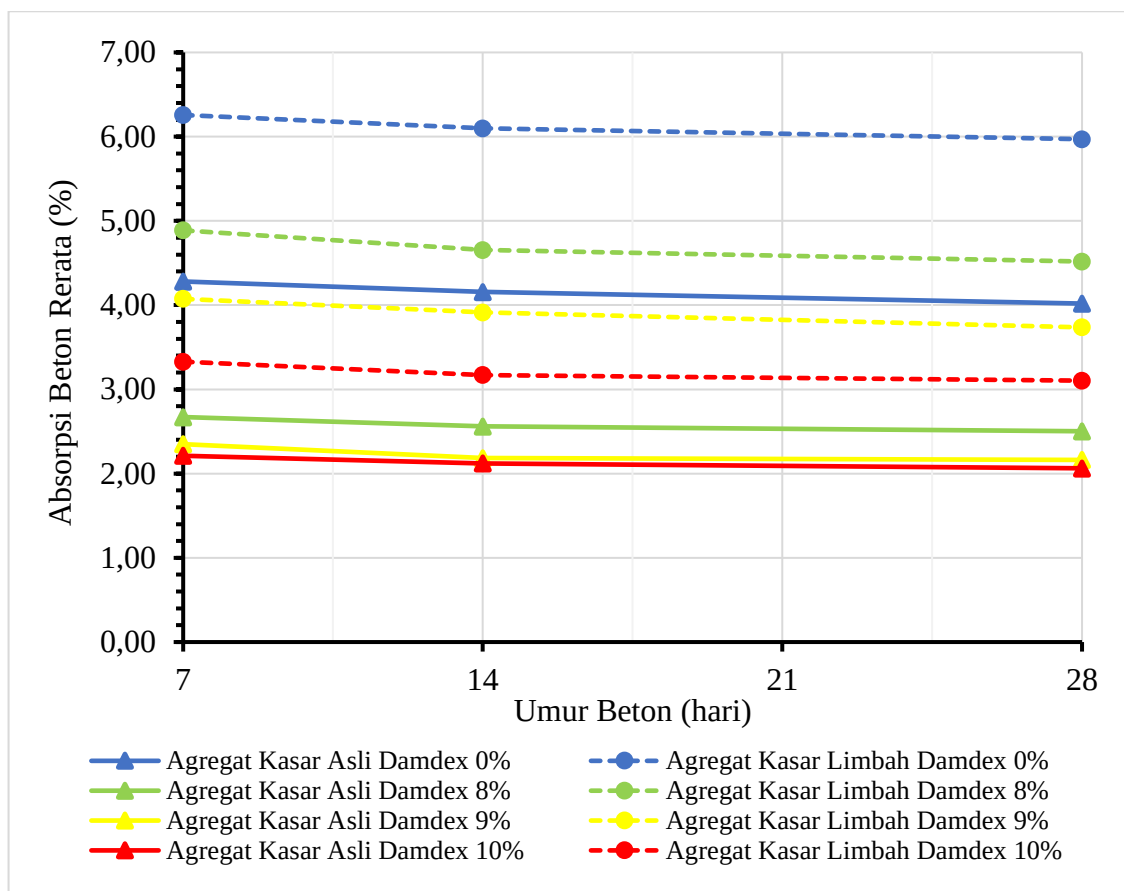
Tabel 5. 41 Perbedaan Persentase Penurunan Absorpsi Beton Dengan Agregat Kasar Asli Penulis dengan Penelitian Terdahulu

Variasi Kadar Damdex	Penulis			Akbar (2022)		
	Persentase Penurunan Absorpsi Beton pada Umur Beton Tertentu (%)			Persentase Penurunan Absorpsi Beton pada Umur Beton Tertentu (%)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari	7 Hari	14 Hari	28 Hari
8%	37,60	38,39	37,72	40,41	40,40	43,70

Berdasarkan Tabel 5.41 di atas, penggunaan Damdex sebesar 8% terbukti efektif dalam menurunkan nilai absorpsi beton, baik pada penelitian ini maupun pada penelitian yang dilakukan oleh Akbar (2022). Penurunan nilai absorpsi tersebut mengindikasikan adanya peningkatan kepadatan beton serta penurunan porositas seiring bertambahnya umur beton dari 7 hingga 28 hari. Tren penurunan yang konsisten pada kedua penelitian menunjukkan bahwa penambahan Damdex memiliki peran yang signifikan dalam memperbaiki struktur mikro beton. Dengan demikian, bahwa penggunaan Damdex berkontribusi positif dalam menurunkan absorpsi.

5.6.2 Hubungan Absorpsi Beton dengan Umur Uji

Grafik yang menunjukkan hubungan antara nilai absorpsi beton dan umur beton dapat dilihat pada Gambar 5.20 sebagai berikut.



Gambar 5. 20 Hubungan Absorpsi Beton dengan Umur Beton

Mengacu pada Gambar 5.20, sejalan dengan hasil penelitian Ardiansyah (2023), terlihat bahwa tidak terdapat perbedaan nilai absorpsi yang signifikan antara beton pada umur 14 hari dan 28 hari. Nilai absorpsi beton dari umur 14 hari hingga 28 hari cenderung stabil karena pada tahap ini laju hidrasi semen melambat, sebagian besar pori kapiler sudah tertutup saat hidrasi, dan pori yang tersisa berukuran sangat kecil sehingga sulit terisi. Mikrostruktur beton sudah relatif padat, sehingga penurunan absorpsi berjalan sangat lambat dan pengaruh penambahan Damdex maupun perbedaan jenis agregat lebih dominan pada tahap awal pengerasan.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis data dan pembahasan pada bab sebelumnya, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Penggunaan bahan tambah waterproofing Damdex dengan variasi 8%, 9%, dan 10% dari berat semen pada beton dengan agregat kasar limbah terbukti dapat meningkatkan kuat tekan dibandingkan dengan beton tanpa Damdex. Peningkatan kuat tekan pada umur 28 hari dengan penggunaan Damdex variasi 8% terjadi sebesar 9,455%, Damdex variasi 9% terjadi sebesar 17,601%, Damdex variasi 10% terjadi sebesar 21,775%. Selain itu, penggunaan Damdex juga berpengaruh dalam menurunkan nilai absorpsi beton pada beton agregat kasar limbah. Penurunan absorpsi pada umur 28 hari penggunaan Damdex variasi 8% terjadi sebesar 24,32%, Damdex variasi 9% terjadi sebesar 37,42%, Damdex variasi 10% terjadi sebesar 48,01%. Hal ini membuktikan bahwa Damdex efektif dalam mengurangi pori-pori kapiler sehingga beton menjadi lebih kedap air dan mampu meningkatkan kuat tekan beton.
2. Nilai persentase kuat tekan beton tertinggi penggunaan agregat kasar limbah terjadi pada penambahan *waterproofing* Damdex pada variasi 10% dari berat semen. Hasil persentase peningkatan kuat tekan beton agregat kasar limbah dengan penambahan *waterproofing* Damdex variasi 10% dari berat semen pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari secara berturut-turut sebesar 23,492%, 23,653%, dan 21,775% terhadap beton agregat kasar limbah tanpa *waterproofing* Damdex.
3. Nilai Absorpsi beton terkecil penggunaan beton agregat kasar limbah terjadi pada penambahan *waterproofing* Damdex pada variasi 10% dari berat semen. Hasil nilai absorpsi beton agregat kasar limbah dengan penambahan

waterproofing Damdex variasi 10% dari berat semen pada umur uji 7 hari, 14 hari, dan 28 hari secara berturut-turut sebesar 3,33%, 3,17%, dan 3,10% terhadap beton agregat kasar limbah tanpa *waterproofing* Damdex.

4. Penambahan *waterproofing* Damdex pada variasi 8%, 9%, dan 10% terhadap berat semen pada beton agregat kasar limbah mempengaruhi pengembangan kekuatan beton sesuai dengan umur beton. Persentase kuat tekan beton pada beton agregat kasar limbah tertinggi pada umur 7 hari diperoleh pada campuran dengan *waterproofing* Damdex 8% sebesar 66,19% atau 1,19% lebih tinggi dari acuan PBI 1971 dan 1,37% lebih tinggi dari persentase kuat tekan beton agregat kasar limbah tanpa *waterproofing* Damdex. Persentase kuat tekan beton tertinggi pada umur 14 hari diperoleh pada campuran dengan *waterproofing* Damdex 10% sebesar 88,73% atau 0,73% lebih tinggi dari acuan PBI 1971 dan 1,49% lebih tinggi dari persentase kuat tekan beton agregat kasar limbah tanpa *waterproofing* Damdex.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran yang dapat dijadikan acuan bagi pengembangan penelitian selanjutnya terkait pemanfaatan agregat kasar limbah beton dan bahan tambah *waterproofing* Damdex dalam campuran beton adalah sebagai berikut.

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai penggunaan limbah beton sebagai substitusi agregat kasar pada mutu rencana yang berbeda atau berdasarkan kuat tekan aktual hasil pengujian, sehingga pengaruhnya terhadap kinerja beton dapat dianalisis secara lebih menyeluruh.
2. Disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaatan limbah beton sebagai pengganti agregat halus, guna memperoleh gambaran yang lebih komprehensif terhadap karakteristik mekanis dan durabilitas beton yang dihasilkan.
3. Diperlukan kajian lebih mendalam terhadap kandungan kimia pada bahan tambah Damdex, untuk memahami mekanisme pengaruhnya terhadap proses hidrasi, pembentukan pori, serta struktur mikro pada beton.

4. Perlu dilakukan penelitian tambahan mengenai penambahan Damdex pada beton dengan agregat limbah melalui pengujian sifat mekanis dan sifat fisik lainnya, seperti kuat tarik belah, kuat lentur, serta parameter durabilitas beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, M.K., 2021. Pengaruh Variasi Kadar Bahan Tambah *Waterproofing* Damdex Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton (Tugas Akhir). Univeritas Isam Indonesia, Yogyakarta.
- Als Salman, A., Khudair, J., Kareem, R.S., Assi, L., Dang, C.N., Martí-Vargas, J.R., 2022. *Examining Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete*. ResearchGate 1, 1–20. <https://doi.org/10.4108/eai.7-9-2021.2314894>
- Ardiansyah, R.P., 2023. Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Waterproofing Damdex dan Agregat Limbah Beton Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton (Tugas Akhir). Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Damdex Indonesia, 2024. Damdex [WWW Document]. Damdex Indonesia. URL <https://www.damdexindonesia.com/id/products> (accessed 11.4.24).
- DPU Kab. Kulon Progo, 2022. Kuat Tekan Beton [WWW Document]. DPU Kab. Kulon Progo. URL <https://dpu.kulonprogokab.go.id/detil/671/kuat-tekan-beton> (accessed 10.16.24).
- González-Taboada, I. dkk. 2016. *Study of Recycled Concrete Aggregate Quality and its Relationship with Recycled Concrete Compressive Strength Using Database Analysis*. *Materiales de Construcción*. 66 (323).
- Kusumawardhana, I., 2018. Pengaruh Penggunaan Agregat Kasar Beton Limbah Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Normal (Tugas Akhir). Jurnal Publikasi. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
- Maryoto A., Ay Lie Han, Purwanto, 2018. Pengantar Teknologi Beton, 1st ed. Makrumi, Boyolali.
- Mulyono T., 2015. Teknologi Beton: Dari Teori Ke Praktek, 1st ed. Lembaga Pengembangan Pendidikan Universitas Negeri Jakarta, Jakarta.
- Nurchayyo, H.D., 2023. Pengaruh Penggunaan *Sikacim Concrete Additive* Terhadap Sifat Mekanis dan Sifat Fisik Beton Dengan Abu Serbuk Kayu Sonokeling Sebagai Substitusi Parsial Semen. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

- Parshotam, K.V., 2019. *Study of Mechanical Properties of Concrete with Fine and Coarse Recycled Aggregates* (Tugas Akhir). Gujarat Technological University, Ahmedabad.
- Patah, D., Dasar, A., 2022. Pengaruh Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Pada Kekuatan Beton. *Jurnal Teknologi Terpadu* 10, 1–6.
- Peraturan Beton Bertulang Indonesia, 1971. Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971, 7th ed. Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, Jakarta.
- Shahidan, S., Azmi, M.A.M., Kupusamy, K., Zuki, S.S.M., Ali, N., 2017. *Utilizing Construction and Demolition (C&D) Waste as Recycled Aggregates (RA) in Concrete*. *Procedia Eng* 174, 1028–1035. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.255>
- SNI 03-1968, 1990. Metode Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 03-2834, 2000. Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 03-4142, 1996. Metode Pengujian Jumlah Bahan Dalam Agregat yang Lolos Saringan Nomor 200 (0,0075 mm), Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 03-4804, 1998. Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara Dalam Agregat, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1969, 2016. Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1970, 2016. Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1972, 2008. Cara Uji Slump Beton, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 1974, 2011. Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 2049, 2015. Semen Portland, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 2495, 1991. Spesifikasi Bahan Tambahan Untuk Beton, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

- SNI 2847, 2019. Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD), Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- SNI 6433, 2016. Metode Uji Densitas, Penyerapan, dan Rongga Dalam Beton Keras, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta, Jakarta.
- SNI 7974, 2018. Spesifikasi Air Pencampur Untuk Produksi Beton Semen Hidraulis, Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Soelarso, Baehaki, Fatah, N.F., 2016. Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai pengganti Agregat Kasar Pada Beton Normal Terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas. *Jurnal Fondasi* 5, 22–29.
- Sugiyono, 2013. Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D, 19th ed. Alfabeta, Bandung.
- Tjokrodimuljo, K., 1996. Teknologi Beton, 1st ed. Nafiri, Yogyakarta.
- Vahidi, A., Mostaani, A., Teklay Gebremariam, A., Di Maio, F., Rem, P., 2024. *Feasibility of Utilizing Recycled Coarse Aggregates in Commercial Concrete Production*. *J Clean Prod* 474. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143578>
- Yessy Artada, 2023. Pertumbuhan Konstruksi Makin Pesat, Huni Siap Berperan Aktif Dalam Pembangunan [WWW Document]. JPNN. URL <https://m.jpnn.com/news/pertumbuhan-konstruksi-makin-pesat-huni-siap-berperan-aktif-dalam-pembangunan?page=2> (accessed 9.27.23).

LAMPIRAN

Lampiran 1 Surat Izin Penggunaan Laboratorium



No. 092

**FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN**

Gedung RII, 7th Floor, Huter
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14.5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 816444 ext 2200, 2201
F. (0274) 815330
E. dekanat@uii.ac.id
W. http://uii.ac.id

Nomor : 120/Sek. Prodi PSTS/20/TA/VII/2024
Hal : Permohonan Izin Peminjaman Laboratorium

Kepada Yth:
Ketua Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil Dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia

Assalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh,

Sehubungan dengan Penelitian untuk menyusun Tugas Akhir, maka melalui surat ini kami bermaksud mengajukan permohonan bantuan bagi mahasiswa Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta. Adapun nama mahasiswa tersebut adalah:

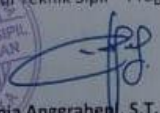
Nama : Renaldi Dimas Kurniawan
NIM : 19511136
No HP Mahasiswa : 0896 0813 4814
Judul Tugas Akhir : Pengaruh Penggunaan Limbah Beton Sebagai Pengganti Agregat Kasar Dengan Penambahan *Waterproofing* Damdex Terhadap Kuat Tekan Dan Absorpsi Pada Beton

Melalui surat ini, kami mohon bantuan untuk dapat mengajukan permohonan izin peminjaman Penggunaan Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Demikian permohonan ini kami sampaikan, atas bantuan dan kerjasamanya kami ucapkan banyak terima kasih.

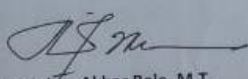
Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Sek. Prodi Teknik Sipil – Program Sarjana,



Dina Anggraheni, S.T., M. Eng

Yogyakarta, 21 Juli 2024
Dosen Pembimbing Tugas Akhir,



Ir. Helmy Akbar Bale, M.T.

ACC 
8 8 24

Lampiran 2 Surat Keterangan Bebas Tanggungan Laboratorium



FAKULTAS
TEKNIK SIPIL
& PERENCANAAN

Gedung KH. Moh. Natsir
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext 3200, 3201
F. (0274) 895330
E. dekanat.ftsp@uii.ac.id
W. ftsp.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN BEBAS TANGGUNGAN LABORATORIUM

Nomor : 47/Ka.Lab/60/LBKT/X/2025

Bismillahirrohmaanirrohiim

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK : 165111301
Jabatan Struktural : Kepala Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik JTS FTSP UII

Dengan ini menerangkan bahwa :

Nama : Renaldi Dimas Kurniawan
N I M : 19511136
Program Studi : S1 Teknik Sipil
Dosen Pembimbing TA : Jafar, S.T., M.T., MURP
Instansi : Universitas Islam Indonesia

Telah melaksanakan penelitian / Tugas Akhir di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia dengan judul Tugas Akhir "**Pengaruh Penambahan *Waterproofing* Damdex pada Beton Agregat Kasar Limbah Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi**" serta sudah menyelesaikan semua administrasinya".

Demikian surat keterangan ini dibuat semoga bisa digunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 23 Oktober 2025

Diperiksa oleh :
Kepala Laboratorium BKT,

Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.

Di data oleh :
PLP/Teknisi

Zahwa Imnahosa Puty Pramadi, S.Tr.T.

Lampiran 3 Laporan Sementara Hasil Pemeriksaan Agregat

PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR AGREGAT HALUS (SNI 1970-2016)

Asal Pasir	Progo
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat pasir kering mutlak, gram (Bk)	488	486,60	487,30
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD), gram	500	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air, gram (Bt)	1012	1010,40	1011,20
Berat piknometer berisi air, gram (B)	704	700,25	702,13
Berat Jenis Curah, $Bk / (B+500-Bt)$	2,54	2,56	2,55
Berat Jenis jenuh kering muka (SSD), $500 / (B+500-Bt)$	2,60	2,63	2,62
Berat Jenis semu, $Bk / (B+Bk-Bt)$	2,71	2,76	2,73
Penyerapan Air $(500-Bk) / Bk \times 100\%$	2,46	2,75	2,61

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA SARINGAN
AGREGAT HALUS
(SNI 03-1968-1990)**

Asal Pasir	Progo
Keperluan	Tugas Akhir
Sampel	1

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,8	120	6,01	6,01	93,99
2,4	174	8,71	14,71	85,29
1,2	231	11,56	26,28	73,72
0,6	636	31,83	58,11	41,89
0,3	518	25,93	84,03	15,97
0,15	269	13,46	97,50	2,50
Pan	50	2,50	100	0
Jumlah	1998	100	286,64	613,36

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus Halus Butir} &= \frac{\sum \text{Berat Tertinggal Komulatif}}{100} \\
 &= \frac{266,64}{100} \\
 &= 2,87
 \end{aligned}$$

GRADASI AGREGAT HALUS

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100
4,8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	0 – 10	1 – 10	1 – 10	0 – 15

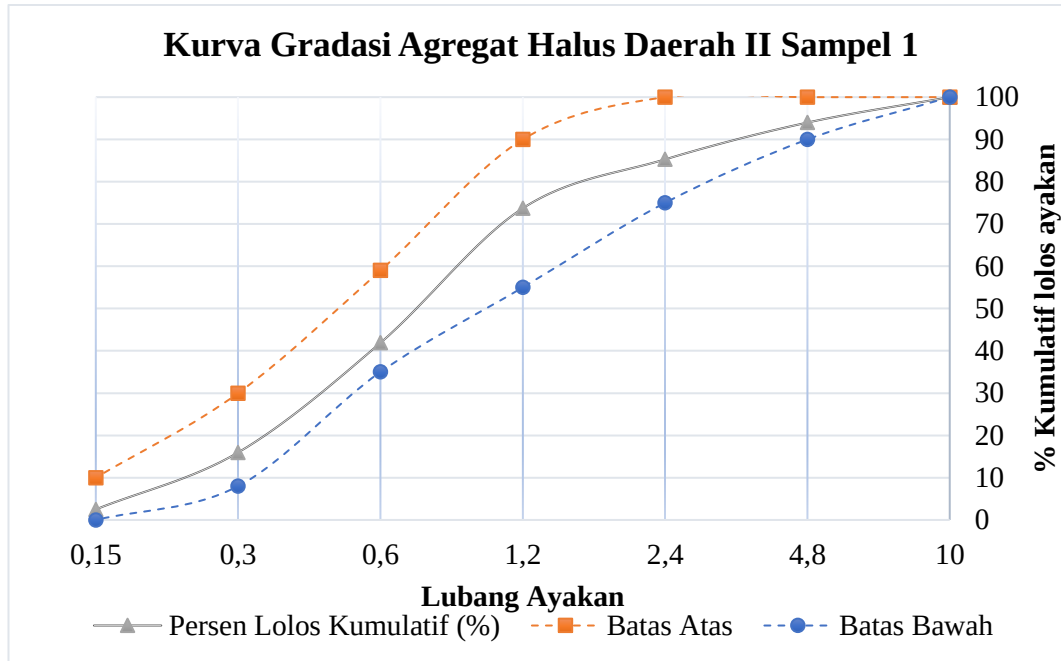
Keterangan :

Daerah I : Pasir Kasar
 Daerah II : Pasir Agak Kasar
 Daerah III : Pasir Agak Halus
 Daerah IV : Pasir Halus

Hasil Analisa Saringan :

Pasir Masuk Daerah : Daerah II
 Jenis Pasir : Pasir Agak Kasar

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS



Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA SARINGAN
AGREGAT HALUS
(SNI 03-1968-1990)**

Asal Pasir	Progo
Keperluan	Tugas Akhir
Sampel	2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	0	0	0	100
10	0	0	0	100
4,8	88	4,40	4,40	95,56
2,4	171	8,55	12,96	87,04
1,2	243	12,16	25,11	74,89
0,6	767	38,37	63,48	36,52
0,3	430	21,51	84,99	15,01
0,15	260	13,01	98	2
Pan	40	2	100	-
Jumlah	1999	100	288,94	-

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus Halus Butir} &= \frac{\sum \text{Berat Tertinggal Komulatif}}{100} \\
 &= \frac{288,94}{100} \\
 &= 2,89
 \end{aligned}$$

GRADASI AGREGAT HALUS

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100 – 100	100 – 100	100 – 100	100 – 100
4,8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	0 – 10	1 – 10	1 – 10	0 – 15

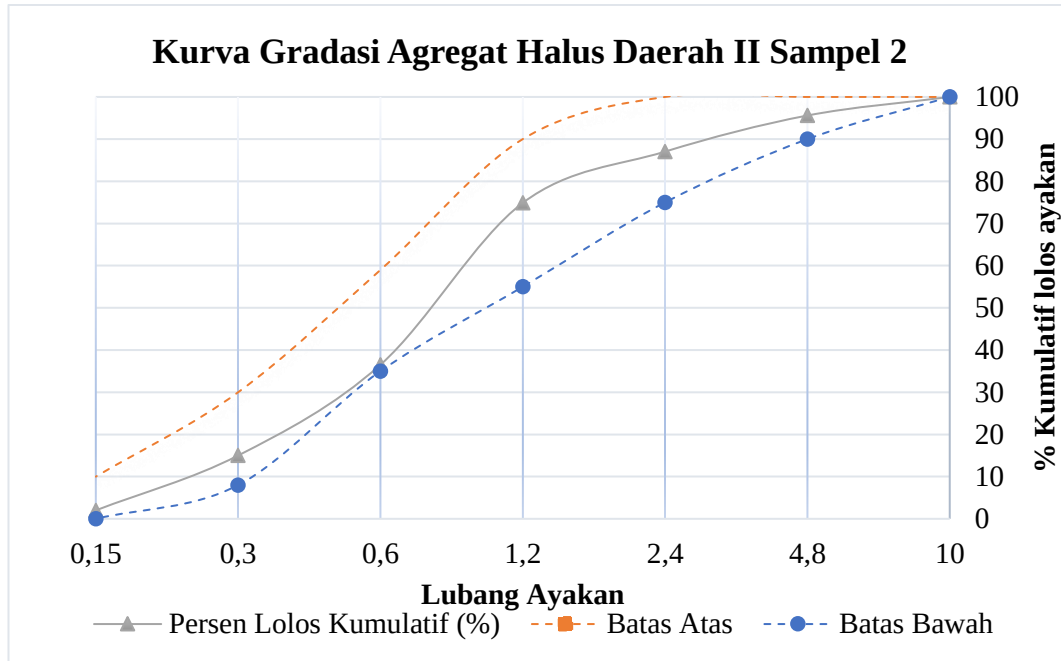
Keterangan :

Daerah I : Pasir Kasar
 Daerah II : Pasir Agak Kasar
 Daerah III : Pasir Agak Halus
 Daerah IV : Pasir Halus

Hasil Analisa Saringan :

Pasir Masuk Daerah : Daerah II
 Jenis Pasir : Pasir Agak Kasar

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT HALUS



Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME GEMBUR
AGREGAT HALUS
(SNI 03-4804-1998)**

Asal Pasir	Progo
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengukuran
Diameter Silinder	15,30 cm
Tinggi Silinder	29,70 cm

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat Tabung + Agregat kering tungku (W2), gram	18098	18105	18102
Berat Agregat (W3), gram	6864	6871	6868
Volume Tabung (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat Volume Gembur (W3/V), gram/cm ³	1,26	1,26	1,26

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Volume Gembur} &= \frac{\text{Berat Agregat}}{\text{Volume Tabung}} \\
 &= \frac{6868}{5460,46} \\
 &= 1,26 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

PEMERIKSAAN BERAT VOLUME PADAT
AGREGAT HALUS
(SNI 03-4804-1998)

Asal Pasir	Progo
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengukuran
Diameter Silinder	15,30 cm
Tinggi Silinder	29,70 cm

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat Tabung + Agregat kering tungku (W2), gram	19582	19626	19604
Berat Agregat (W3), gram	8348	8392	8370
Volume Tabung (V), cm3	5460,46	5460,46	5460,46
Berat Volume Gembur (W3/V), gram/cm ³	1,53	1,54	1,53

Berat Volume Padat $= \frac{\text{Berat Agregat}}{\text{Volume Tabung}}$

$= \frac{8348}{5460,46}$

$= 1,53 \text{ gram/cm}^3$

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN BUTIRAN YANG LOLOS AYAKAN NO. 200/UJI
KANDUNGAN LUMPUR DALAM PASIR
AGREGAT HALUS
(SNI 03-4142-1996)**

Asal Pasir	Progo
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Agregat Kering Oven (W1), gram	500	500	500
Berat Agregat Kering Oven setelah di cuci (W2), gram	492	493	492,3
Berat yang Lolos Ayakan No. 200 [(W1-W2/W1)]x100	1,60 %	1,48 %	1,54 %

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR
AGREGAT KASAR ASLI
(SNI 1969-2016)

Asal Kerikil	Clereng
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Kerikil kering mutlak (Bk)	4862	4857,79	4859,89
Berat kerikil Jenuh kering muka (Bj)	5000	5000	5000
Berat piknometer berisi pasir dan air (Ba)	3122	3081	3101,50
Berat Jenis Curah BK/(BJ-Ba)	2,59	2,53	2,56
Berat Jenis jenuh kering muda (SSD) Bj/ (Bj-Ba)	2,66	2,61	2,63
Berat Jenis semu Bk/(Bk-Ba)	2,79	2,73	2,76
Penyerapan Air (Bj-Bk)/Bk x 100%	2,84	2,93	2,88

Diperiksa oleh :
 Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
 Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA
SARINGAN AGREGAT KASAR ASLI
(SNI 03-1968-1990)**

Asal Kerikil	Clereng
Keperluan	Tugas Akhir
Sampel	1

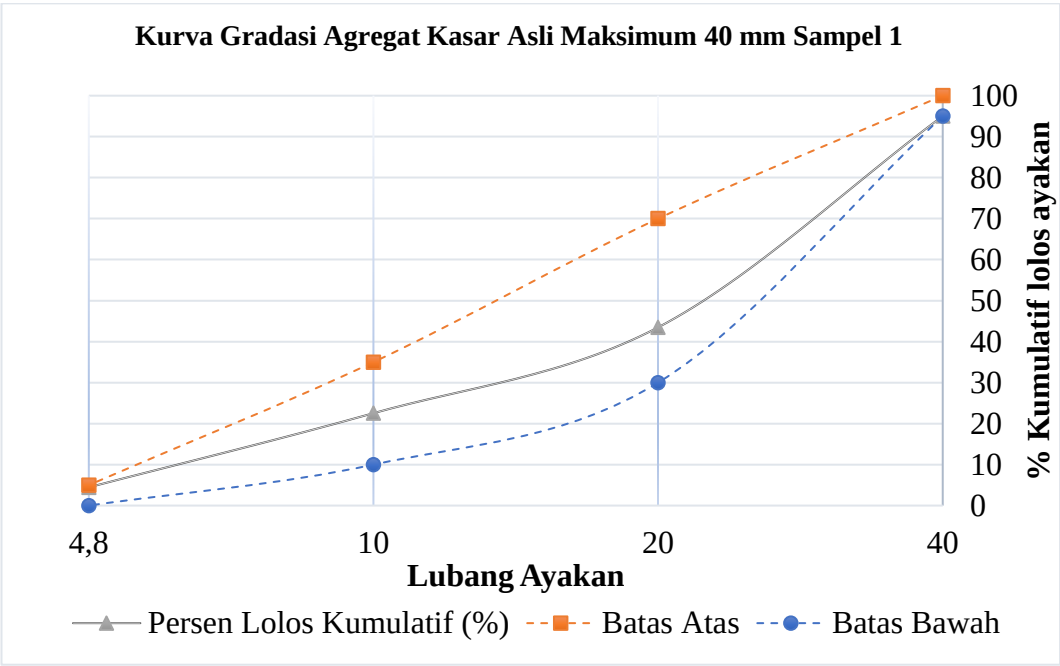
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	248	4,96	4,96	95,04
20	2578	51,56	56,52	43,48
10	1047	20,94	77,46	22,54
4,8	904	18,08	95,54	4,46
2,4	128	2,56	98,10	1,90
1,2	6	0,12	98,22	1,78
0,6	4	0,08	98,30	1,70
0,3	0	0	98,30	1,70
0,15	0	0	100,00	0,00
Pan	85	1,70	-	-
Jumlah	5000	100	725,70	172,60

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus Halus Butir} &= \frac{\sum \text{Berat Tertinggal Komulatif}}{100} \\
 &= \frac{725,70}{100} \\
 &= 7,26
 \end{aligned}$$

GRADASI AGREGAT KASAR

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan/Besar Butiran Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 – 100	100 – 100
20	30 – 70	95 – 100
10	10 – 35	25 – 55
4,8	0 – 5	0 – 10

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR ASLI



Yogyakarta, 16 Agustus 2024

Diperiksa oleh :
Laboran

Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA
SARINGAN AGREGAT KASAR ASLI
(SNI 03-1968-1990)**

Asal Kerikil	Clereng
Keperluan	Tugas Akhir
Sampel	2

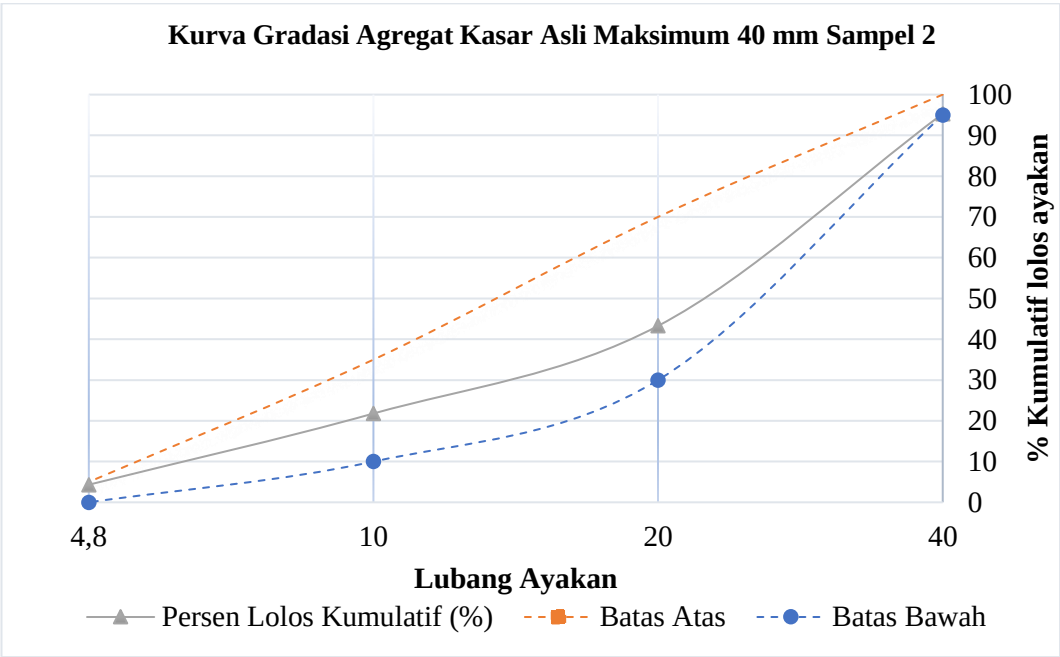
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	234	4,68	4,68	95,32
20	2602	52,04	56,72	43,28
10	1075	21,50	78,22	21,78
4,8	873	17,46	95,68	4,32
2,4	103	2,06	97,74	2,26
1,2	6	0,12	97,86	2,14
0,6	5	0,10	97,96	2,04
0,3	0	0	97,96	2,04
0,15	0	0	100	0
Pan	102	2,04	-	-
Jumlah	5000	100	724,80	173,18

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus Halus Butir} &= \frac{\sum \text{Berat Tertinggal Komulatif}}{100} \\
 &= \frac{724,80}{100} \\
 &= 7,25
 \end{aligned}$$

GRADASI AGREGAT KASAR

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan/Besar Butiran Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 – 100	100 – 100
20	30 – 70	95 – 100
10	10 – 35	25 – 55
4,8	0 – 5	0 – 10

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR ASLI



Yogyakarta, 16 Agustus 2024

Diperiksa oleh :
Laboran

Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME GEMBUR
AGREGAT KASAR ASLI
(SNI 03-4804-1998)**

Asal Kerikil	Clereng
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengukuran
Diameter Silinder	15,30 cm
Tinggi Silinder	29,70 cm

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat Tabung + Agregat kering tungku (W2), gram	18791	18861	18826
Berat Agregat (W3), gram	7557	7627	7592
Volume Tabung (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat Volume Gembur (W3/V), gram/cm ³	1,38	1,40	1,39

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Volume Gembur} &= \frac{\text{Berat Agregat}}{\text{Volume Tabung}} \\
 &= \frac{7592}{5460,46} \\
 &= 1,39 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME PADAT
AGREGAT KASAR ASLI
(SNI 03-4804-1998)**

Asal Kerikil	Clereng
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengukuran
Diameter Silinder	15,30 cm
Tinggi Silinder	29,70 cm

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat Tabung + Agregat kering tungku (W2), gram	19731	19759	19745
Berat Agregat (W3), gram	8497	8525	8511
Volume Tabung (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat Volume Gembur (W3/V), gram/cm ³	1,56	1,56	1,56

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Volume Padat} &= \frac{\text{Berat Agregat}}{\text{Volume Tabung}} \\
 &= \frac{8511}{5460,46} \\
 &= 1,56 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Yogyakarta, 16 Agustus 2024

Diperiksa oleh :
Laboran

Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN BERAT JENIS DAN PENYERAPAN AIR
AGREGAT KASAR LIMBAH
(SNI 1969-2016)**

Asal Kerikil	Bongkaran Kolom dan Jalan Gedung <i>Main Hall</i> Gubernur Akademi Militer Magelang
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Kerikil kering mutlak (Bk)	4607	4610	4608,50
Berat kerikil Jenuh kering muka (Bj)	5000	5000	5000
Berat piknometer berisi pasir dan air (Ba)	2769	2774	2771,50
Berat Jenis Curah BK/(BJ-Ba)	2,06	2,07	2,07
Berat Jenis jenuh kering muda (SSD) Bj/ (Bj-Ba)	2,24	2,25	2,24
Berat Jenis semu Bk/(Bk-Ba)	2,51	2,51	2,51
Penyerapan Air (Bj-Bk)/Bk x 100%	8,53	8,46	8,50

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA
SARINGAN AGREGAT KASAR LIMBAH
(SNI 03-1968-1990)**

Asal Kerikil	Bongkaran Kolom dan Jalan Gedung <i>Main Hall</i> Gubernur Akademi Militer Magelang
Keperluan	Tugas Akhir
Sampel	1

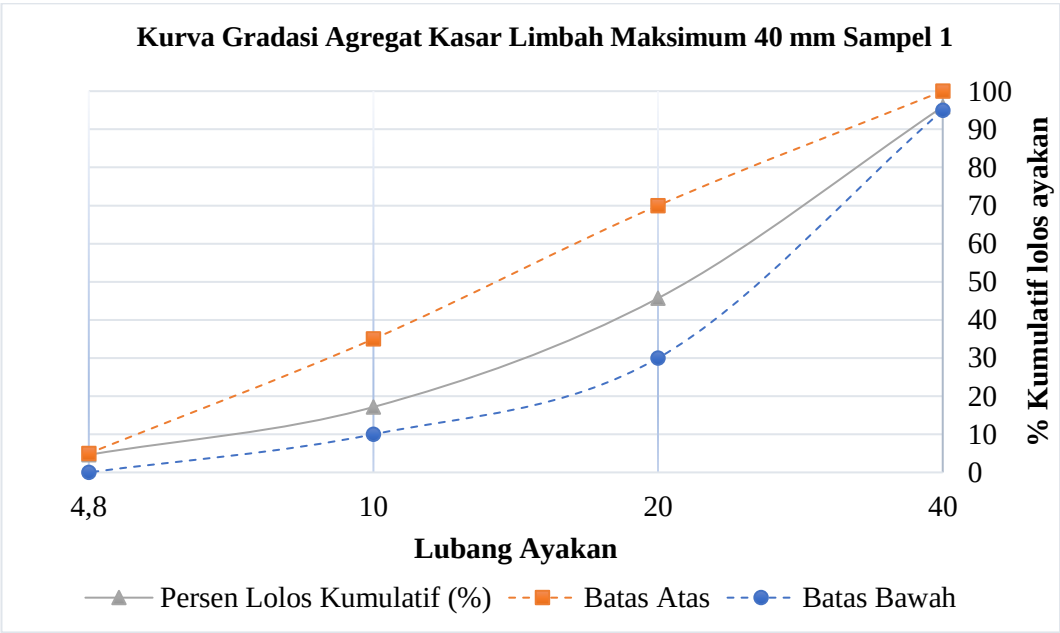
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	205	4,10	4,10	95,90
20	2510	50,20	54,30	45,70
10	1427	28,54	82,84	17,16
4,8	627	12,54	95,38	4,62
2,4	58	1,16	96,54	3,46
1,2	49	0,98	97,52	2,48
0,6	0	0	97,52	2,48
0,3	0	0	97,52	2,48
0,15	0	0	100	0
Pan	124	2,48	-	-
Jumlah	5000	100	723,24	174,28

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus Halus Butir} &= \frac{\sum \text{Berat Tertinggal Komulatif}}{100} \\
 &= \frac{723,24}{100} \\
 &= 7,23
 \end{aligned}$$

GRADASI AGREGAT KASAR

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan/Besar Butiran Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 – 100	100 – 100
20	30 – 70	95 – 100
10	10 – 35	25 – 55
4,8	0 – 5	0 – 10

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR LIMBAH



Yogyakarta, 16 Agustus 2024

Diperiksa oleh :
Laboran

Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN MODULUS HALUS BUTIR (MHB) / ANALISA
SARINGAN AGREGAT KASAR LIMBAH
(SNI 03-1968-1990)**

Asal Kerikil	Bongkaran Kolom dan Jalan Gedung <i>Main Hall</i> Gubernur Akademi Militer Magelang
Keperluan	Tugas Akhir
Sampel	2

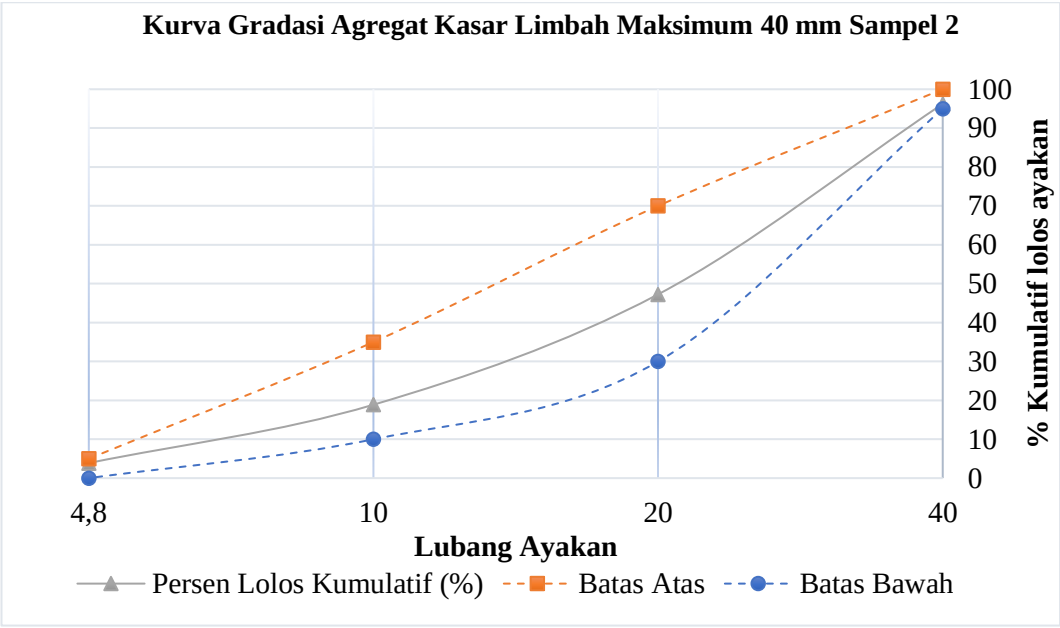
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40	188	3,76	3,76	96,24
20	2449	48,98	52,74	47,26
10	1419	28,38	81,12	18,88
4,8	750	15,00	96,12	3,88
2,4	36	0,72	96,84	3,16
1,2	23	0,46	97,30	2,70
0,6	0	0	97,30	2,70
0,3	0	0	97,30	2,70
0,15	0	0	100	0
Pan	135	2,70	-	-
Jumlah	5000	100	719,78	177,52

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus Halus Butir} &= \frac{\sum \text{Berat Tertinggal Komulatif}}{100} \\
 &= \frac{719,78}{100} \\
 &= 7,20
 \end{aligned}$$

GRADASI AGREGAT KASAR

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir Agregat yang Lolos Saringan/Besar Butiran Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 – 100	100 – 100
20	30 – 70	95 – 100
10	10 – 35	25 – 55
4,8	0 – 5	0 – 10

GAMBAR ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR LIMBAH



Yogyakarta, 16 Agustus 2024

Diperiksa oleh :
Laboran

Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME GEMBUR
AGREGAT KASAR LIMBAH
(SNI 03-4804-1998)**

Asal Kerikil	Bongkaran Kolom dan Jalan Gedung <i>Main Hall</i> Gubernur Akademi Militer Magelang
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengukuran
Diameter Silinder	15,30 cm
Tinggi Silinder	29,70 cm

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat Tabung + Agregat kering tungku (W2), gram	17840	17768	17804
Berat Agregat (W3), gram	6606	6534	6570
Volume Tabung (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat Volume Gembur (W3/V), gram/cm ³	1,21	1,20	1,20

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Volume Gembur} &= \frac{\text{Berat Agregat}}{\text{Volume Tabung}} \\
 &= \frac{6570}{5450,46} \\
 &= 1,20 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

**PEMERIKSAAN BERAT VOLUME PADAT
AGREGAT KASAR LIMBAH
(SNI 03-4804-1998)**

Asal Kerikil	Bongkaran Kolom dan Jalan Gedung <i>Main Hall</i> Gubernur Akademi Militer Magelang
Keperluan	Tugas Akhir

Uraian	Hasil Pengukuran
Diameter Silinder	15,30 cm
Tinggi Silinder	29,70 cm

Uraian	Hasil Pengamatan		
	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat Tabung (W1), gram	11234	11234	11234
Berat Tabung + Agregat kering tungku (W2), gram	18740	19048	18894
Berat Agregat (W3), gram	7506	7814	7660
Volume Tabung (V), cm ³	5460,46	5460,46	5460,46
Berat Volume Gembur (W3/V), gram/cm ³	1,37	1,43	1,40

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Volume Padat} &= \frac{\text{Berat Agregat}}{\text{Volume Tabung}} \\
 &= \frac{7660}{54,60,46} \\
 &= 1,40 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Diperiksa oleh :
Laboran

Yogyakarta, 16 Agustus 2024
Dikerjakan oleh :

(.....)

(Renaldi Dimas Kurniawan)

Lampiran 4 Laporan Sementara Hasil Perencanaan Campuran

Formulir Perencanaan Campuran Beton (SNI 2834-2000)			
No	Uraian	Nilai	Satuan
1	Kuat tekan beton yang disyaratkan	25	MPa
2	Standar deviasi	-	-
3	Nilai tambah / Margin (M)	12	MPa
4	Kuat tekan beton rerata yang ditargetkan	37	MPa
5	Jenis semen	Tipe I	-
6	Jenis agregat halus	Alami	-
7	Jenis agregat kasar	Batu Pecah	-
8	Faktor air semen bebas (FAS)	0,5	-
9	Faktor air semen maksimum	0,6	-
10	FAS digunakan	0,5	-
11	<i>Slump</i>	60 – 180	cm
12	Ukuran agregat maksimum	40	mm
13	Kadar air bebas	185	kg/m ³
14	Kadar semen	370	kg/m ³
15	Kadar semen maksimum	-	kg/m ³
16	Kadar semen minimum	275	kg/m ³
17	Kadar semen digunakan	370	kg/m ³
18	FAS disesuaikan	-	-
19	Susunan besar butir agregat halus	Gradasi II	-
20	Berat jenis agregat halus (SSD)	2,62	-
21	Berat jenis agregat kasar (SSD)	2,63	-
22	Persentase agregat halus	36,75	%
23	Persentase agregat kasar	63,25	%
24	Berat jenis relatif agregat gabungan (SSD)	2,63	-
25	Berat isi beton	2387,44	kg/m ³
26	Kadar agregat gabungan	1832,44	kg/m ³
27	Kadar agregat halus	673,42	kg/m ³
28	Kadar agregat kasar	1159,02	kg/m ³
29	Kadar semen dengan angka penyusutan	462,50	kg/m ³
30	Kadar air dengan angka penyusutan	231,25	kg/m ³
31	Kadar agregat halus dengan angka penyusutan	841,78	kg/m ³
32	Kadar agregat kasar dengan angka penyusutan	1448,77	kg/m ³

Lampiran 5 Laporan Sementara Hasil Pengujian Benda Uji *Trial*

Kode Benda Uji	Bentuk Benda Uji	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Luas Permukaan (mm ³)	Berat (kg)	Beban Maksimum (kN)	Mutu Realisasi (MPa)	Konversi 28 Hari (MPa)
							3 Hari	
TRL - 1	Silinder	150,55	297,25	17801,287	11904	206,620	11,607	29,018
TRL - 2	Silinder	151,10	301,70	17931,590	12170	205,800	11,477	28,692
TRL - 3	Silinder	149,80	301,10	17624,366	12158	198,940	11,288	28,219

Lampiran 6 Laporan Sementara Hasil Pengujian Kuat Tekan

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
0 %	0 %	7 hari	T-TL-0-7h-1	150,20	17718,614	331,536	18,711	18,061	0,65	28,786	27,786
			T-TL-0-7h-2	151,95	18133,903	308,450	17,010		0,65	26,169	
			T-TL-0-7h-3	149,90	17647,905	329,696	18,682		0,65	28,741	
			T-TL-0-7h-4	151,10	17931,590	319,974	17,844		0,65	27,453	
			T-TL-0-7h-5	150,70	17836,777	322,087	18,057		0,65	27,781	
		14 hari	T-TL-0-14h-1	150,95	17896,006	465,795	26,028	24,376	0,88	29,577	27,700
			T-TL-0-14h-2	151,20	17955,333	430,060	23,952		0,88	27,218	
			T-TL-0-14h-3	149,90	17647,905	443,936	25,155		0,88	28,585	
			T-TL-0-14h-4	151,15	17943,460	396,640	22,105		0,88	25,119	
			T-TL-0-14h-5	150,25	17730,413	436,884	24,640		0,88	28,000	
		28 hari	T-TL-0-28h-1	152,00	18145,839	492,080	27,118	27,751	1	27,118	27,751
			T-TL-0-28h-2	150,25	17730,413	486,575	27,443		1	27,443	
			T-TL-0-28h-3	149,25	17495,186	506,875	28,972		1	28,972	
			T-TL-0-28h-4	150,05	17683,242	509,802	28,830		1	28,830	
			T-TL-0-28h-5	149,55	17565,589	463,627	26,394		1	26,394	
	8 %	7 hari	T-TL-8-7h-1	150,70	17836,777	357,176	20,025	20,005	0,65	30,807	30,777
			T-TL-8-7h-2	150,65	17824,943	338,485	18,989		0,65	29,214	
			T-TL-8-7h-3	150,90	17884,152	361,086	20,190		0,65	31,062	
			T-TL-8-7h-4	150,70	17836,777	362,777	20,339		0,65	31,290	
			T-TL-8-7h-5	151,10	17931,590	367,297	20,483		0,65	31,513	
		14 hari	T-TL-8-14h-1	150,50	17789,465	468,368	26,328	27,081	0,88	29,919	30,774
			T-TL-8-14h-2	152,15	18181,671	526,734	28,971		0,88	32,921	
			T-TL-8-14h-3	150,65	17824,943	497,117	27,889		0,88	31,692	
			T-TL-8-14h-4	150,85	17872,303	512,587	28,681		0,88	32,592	
			T-TL-8-14h-5	150,25	17730,413	417,354	23,539		0,88	26,749	
		28 hari	T-TL-8-28h-1	150,60	17813,113	543,625	30,518	30,650	1	30,518	30,650
			T-TL-8-28h-2	151,00	17907,864	570,148	31,838		1	31,838	
			T-TL-8-28h-3	149,95	17659,680	551,195	31,212		1	31,212	
			T-TL-8-28h-4	150,05	17683,242	509,927	28,837		1	28,837	
			T-TL-8-28h-5	150,35	17754,022	547,614	30,845		1	30,845	

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
	9 %	7 hari	T-TL-9-7h-1	149,05	17448,329	375,435	21,517	20,463	0,65	33,103	31,482
			T-TL-9-7h-2	149,80	17624,366	334,568	18,983		0,65	29,205	
			T-TL-9-7h-3	150,60	17813,113	369,597	20,749		0,65	31,921	
			T-TL-9-7h-4	149,85	17636,133	361,893	20,520		0,65	31,569	
			T-TL-9-7h-5	149,10	17460,037	358,743	20,547		0,65	31,610	
		14 hari	T-TL-9-14h-1	150,50	17789,465	483,765	27,194	27,633	0,88	30,902	31,402
			T-TL-9-14h-2	150,30	17742,215	502,475	28,321		0,88	32,183	
			T-TL-9-14h-3	150,05	17683,242	486,842	27,531		0,88	31,286	
			T-TL-9-14h-4	149,95	17659,680	513,376	29,071		0,88	33,035	
			T-TL-9-14h-5	149,85	17636,133	459,438	26,051		0,88	29,603	
		28 hari	T-TL-9-28h-1	148,95	17424,924	576,742	33,099	31,340	1	33,099	31,340
			T-TL-9-28h-2	149,35	17518,638	547,783	31,269		1	31,269	
			T-TL-9-28h-3	149,75	17612,603	494,748	28,091		1	28,091	
			T-TL-9-28h-4	150,35	17754,022	571,568	32,194		1	32,194	
			T-TL-9-28h-5	150,95	17896,006	573,542	32,049		1	32,049	
	10 %	7 hari	T-TL-10-7h-1	149,05	17448,329	337,537	19,345	20,674	0,65	29,761	31,806
			T-TL-10-7h-2	149,80	17624,366	359,185	20,380		0,65	31,354	
			T-TL-10-7h-3	150,60	17813,113	383,788	21,545		0,65	33,147	
			T-TL-10-7h-4	149,85	17636,133	371,545	21,067		0,65	32,411	
			T-TL-10-7h-5	149,10	17460,037	367,247	21,034		0,65	32,359	
		14 hari	T-TL-10-14h-1	151,00	17907,864	501,056	27,980	27,936	0,88	31,795	31,745
			T-TL-10-14h-2	151,30	17979,091	511,360	28,442		0,88	32,320	
			T-TL-10-14h-3	151,60	18050,460	497,135	27,541		0,88	31,297	
			T-TL-10-14h-4	151,55	18038,556	538,736	29,866		0,88	33,938	
			T-TL-10-14h-5	151,50	18026,655	465,980	25,849		0,88	29,374	
		28 hari	T-TL-10-28h-1	148,70	17366,481	553,458	31,869	31,574	1	31,869	31,574
			T-TL-10-28h-2	149,20	17483,466	569,682	32,584		1	32,584	
			T-TL-10-28h-3	149,75	17612,603	563,115	31,972		1	31,972	
			T-TL-10-28h-4	149,85	17636,133	571,745	32,419		1	32,419	
			T-TL-10-28h-5	149,95	17659,680	512,575	29,025		1	29,025	

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
100 %	0 %	7 hari	T-L-0-7h-1	150,25	17730,413	271,137	15,292	15,182	0,65	23,526	23,357
			T-L-0-7h-2	149,95	17659,680	283,587	16,058		0,65	24,705	
			T-L-0-7h-3	149,65	17589,088	259,354	14,745		0,65	22,685	
			T-L-0-7h-4	150,40	17765,832	248,656	13,996		0,65	21,533	
			T-L-0-7h-5	151,10	17931,590	283,647	15,818		0,65	24,336	
		14 hari	T-L-0-14h-1	150,35	17754,022	384,843	21,676	20,434	0,88	24,632	23,221
			T-L-0-14h-2	150,45	17777,646	365,358	20,552		0,88	23,354	
			T-L-0-14h-3	150,60	17813,113	316,275	17,755		0,88	20,176	
			T-L-0-14h-4	150,70	17836,777	378,580	21,225		0,88	24,119	
			T-L-0-14h-5	150,85	17872,303	374,652	20,963		0,88	23,821	
		28 hari	T-L-0-28h-1	148,65	17354,804	393,763	22,689	23,421	1	22,689	23,421
			T-L-0-28h-2	150,30	17742,215	367,659	20,722		1	20,722	
			T-L-0-28h-3	149,95	17659,680	436,850	24,737		1	24,737	
			T-L-0-28h-4	150,90	17884,152	447,590	25,027		1	25,027	
			T-L-0-28h-5	149,85	17636,133	422,044	23,931		1	23,931	
	8 %	7 hari	T-L-8-7h-1	150,85	17872,303	299,294	16,746	16,968	0,65	25,763	26,105
			T-L-8-7h-2	151,10	17931,590	287,904	16,056		0,65	24,701	
			T-L-8-7h-3	151,35	17990,976	323,305	17,970		0,65	27,647	
			T-L-8-7h-4	151,60	18050,460	321,466	17,809		0,65	27,399	
			T-L-8-7h-5	151,85	18110,043	294,466	16,260		0,65	25,015	
		14 hari	T-L-8-14h-1	151,65	18062,369	363,963	20,150	22,728	0,88	22,898	25,827
			T-L-8-14h-2	151,38	17996,920	404,834	22,495		0,88	25,562	
			T-L-8-14h-3	151,10	17931,590	432,358	24,112		0,88	27,399	
			T-L-8-14h-4	150,65	17824,943	427,845	24,003		0,88	27,276	
			T-L-8-14h-5	150,20	17718,614	405,386	22,879		0,88	25,999	
		28 hari	T-L-8-28h-1	149,60	17577,337	484,634	27,572	25,636	1	27,572	25,636
			T-L-8-28h-2	149,20	17483,466	437,267	25,010		1	25,010	
			T-L-8-28h-3	148,80	17389,846	412,400	23,715		1	23,715	
			T-L-8-28h-4	149,90	17647,905	463,573	26,268		1	26,268	
			T-L-8-28h-5	151,00	17907,864	458,700	25,614		1	25,614	

Agregat Limbah	Kadar Damdex	Umur Uji	Kode Benda Uji	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ³)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan Umur Uji (MPa)	Kuat Tekan Umur Uji Rerata (MPa)	Angka Konversi	Kuat Tekan Terkonversi (MPa)	Kuat Tekan Terkonversi Rerata (MPa)
	9 %	7 hari	T-L-9-7h-1	150,65	17824,943	334,290	18,754	17,945	0,65	28,852	27,608
			T-L-9-7h-2	150,03	17677,350	316,895	17,927		0,65	27,579	
			T-L-9-7h-3	149,40	17530,370	294,924	16,824		0,65	25,882	
			T-L-9-7h-4	150,25	17730,413	307,835	17,362		0,65	26,711	
			T-L-9-7h-5	151,10	17931,590	338,193	18,860		0,65	29,016	
		14 hari	T-L-9-14h-1	149,80	17624,366	398,894	22,633	24,164	0,88	25,719	27,459
			T-L-9-14h-2	150,10	17695,028	428,903	24,239		0,88	27,544	
			T-L-9-14h-3	150,40	17765,832	440,910	24,818		0,88	28,202	
			T-L-9-14h-4	150,68	17830,860	423,954	23,776		0,88	27,019	
			T-L-9-14h-5	150,95	17896,006	453,736	25,354		0,88	28,811	
		28 hari	T-L-9-28h-1	150,75	17848,615	470,060	26,336	27,544	1	26,336	27,544
			T-L-9-28h-2	149,80	17624,366	508,934	28,877		1	28,877	
			T-L-9-28h-3	148,85	17401,535	456,434	26,230		1	26,230	
			T-L-9-28h-4	149,53	17559,717	497,386	28,325		1	28,325	
			T-L-9-28h-5	150,20	17718,614	495,246	27,951		1	27,951	
	10 %	7 hari	T-L-10-7h-1	150,45	17777,646	316,030	17,777	18,749	0,65	27,349	28,844
			T-L-10-7h-2	151,70	18074,282	321,788	17,804		0,65	27,390	
			T-L-10-7h-3	152,95	18373,371	357,356	19,450		0,65	29,923	
			T-L-10-7h-4	151,60	18050,460	328,377	18,192		0,65	27,988	
			T-L-10-7h-5	150,25	17730,413	363,842	20,521		0,65	31,570	
		14 hari	T-L-10-14h-1	150,70	17836,777	438,610	24,590	25,308	0,88	27,943	28,759
			T-L-10-14h-2	151,28	17973,150	481,562	26,793		0,88	30,447	
			T-L-10-14h-3	151,85	18110,043	465,603	25,710		0,88	29,216	
			T-L-10-14h-4	151,58	18044,508	450,295	24,955		0,88	28,358	
			T-L-10-14h-5	151,30	17979,091	440,360	24,493		0,88	27,833	
		28 hari	T-L-10-28h-1	151,20	17955,333	497,685	27,718	28,521	1	27,718	28,521
			T-L-10-28h-2	150,30	17742,215	543,894	30,655		1	30,655	
			T-L-10-28h-3	149,40	17530,370	499,040	28,467		1	28,467	
			T-L-10-28h-4	150,95	17896,006	521,356	29,133		1	29,133	
			T-L-10-28h-5	152,50	18265,416	486,473	26,634		1	26,634	

Lampiran 7 Laporan Sementara Hasil Pengujian Absorpsi Beton

Agregat Limbah	Kadar Damde x	Umur Uji	Kode Benda Uji	No. Sampel	Berat Kering Oven (kg)	Berat Kering Permukaan (kg)	Absorpsi (%)	Absorpsi Rerata (%)
0 %	0 %	7 hari	A-TL-0-7h-1	1	7,322	7,644	4,398	4,28
			A-TL-0-7h-2	2	7,661	7,980	4,164	
		14 hari	A-TL-0-14h-1	1	7,747	8,081	4,311	4,16
			A-TL-0-14h-2	2	7,670	7,977	4,003	
		28 hari	A-TL-0-28h-1	1	7,605	7,916	4,089	4,02
			A-TL-0-28h-2	2	7,371	7,662	3,948	
	8 %	7 hari	A-TL-8-7h-1	1	7,376	7,564	2,549	2,67
			A-TL-8-7h-2	2	7,410	7,617	2,794	
		14 hari	A-TL-8-14h-1	1	7,225	7,419	2,685	2,56
			A-TL-8-14h-2	2	7,509	7,692	2,437	
		28 hari	A-TL-8-28h-1	1	7,572	7,762	2,509	2,50
			A-TL-8-28h-2	2	7,691	7,883	2,496	
	9 %	7 hari	A-TL-9-7h-1	1	7,563	7,743	2,380	2,35
			A-TL-9-7h-2	2	7,546	7,721	2,319	
		14 hari	A-TL-9-14h-1	1	7,466	7,63	2,197	2,18
			A-TL-9-14h-2	2	7,410	7,571	2,173	
		28 hari	A-TL-9-28h-1	1	7,137	7,289	2,130	2,16
			A-TL-9-28h-2	2	7,153	7,31	2,195	
	10 %	7 hari	A-TL-10-7h-1	1	7,397	7,564	2,258	2,21
			A-TL-10-7h-2	2	7,572	7,736	2,166	
		14 hari	A-TL-10-14h-1	1	7,697	7,867	2,209	2,12
			A-TL-10-14h-2	2	7,773	7,931	2,033	
		28 hari	A-TL-10-28h-1	1	8,050	8,207	1,950	2,06
			A-TL-10-28h-2	2	7,630	7,796	2,176	
100 %	0 %	7 hari	A-L-0-7h-1	1	7,111	7,529	5,878	6,26
			A-L-0-7h-2	2	7,007	7,472	6,636	
		14 hari	A-L-0-14h-1	1	7,145	7,589	6,214	6,10
			A-L-0-14h-2	2	7,188	7,618	5,982	
		28 hari	A-L-0-28h-1	1	7,429	7,863	5,842	5,97
			A-L-0-28h-2	2	7,363	7,812	6,098	
	8 %	7 hari	A-L-8-7h-1	1	7,352	7,723	5,046	4,89
			A-L-8-7h-2	2	7,105	7,441	4,729	
		14 hari	A-L-8-14h-1	1	7,250	7,599	4,814	4,65
			A-L-8-14h-2	2	7,054	7,371	4,494	
		28 hari	A-L-8-28h-1	1	7,604	7,943	4,458	4,52
			A-L-8-28h-2	2	7,515	7,859	4,578	
	9 %	7 hari	A-TL-9-7h-1	1	7,226	7,511	3,944	4,07
			A-TL-9-7h-2	2	7,135	7,435	4,205	
		14 hari	A-TL-9-14h-1	1	7,181	7,452	3,774	3,91
			A-TL-9-14h-2	2	7,055	7,341	4,054	
		28 hari	A-TL-9-28h-1	1	7,174	7,457	3,945	3,74
			A-TL-9-28h-2	2	7,173	7,426	3,527	

Agregat Limbah	Kadar Damde x	Umur Uji	Kode Benda Uji	No. Sampel	Berat Kering Oven (kg)	Berat Kering Permukaan (kg)	Absorpsi (%)	Absorpsi Rerata (%)
	10 %	7 hari	A-L-10-7h-1	1	7,300	7,539	3,274	3,33
			A-L-10-7h-2	2	7,123	7,364	3,383	
		14 hari	A-L-10-14h-1	1	7,279	7,495	2,967	3,17
			A-L-10-14h-2	2	7,177	7,419	3,372	
		28 hari	A-L-10-28h-1	1	7,370	7,595	3,053	3,10
			A-L-10-28h-2	2	7,133	7,358	3,154	

Lampiran 8 Dokumentasi Peralatan dan Bahan Penelitian



Gambar L-7. 1 Sarung Tangan



Gambar L-7. 2 Sepatu Boots



Gambar L-7. 3 Neraca Ohaus



Gambar L-7. 4 Timbangan Digital



Gambar L-7. 5 Jangka Sorong



Gambar L-7. 6 Gelas Ukur



Gambar L-7. 7 Pan Properties



Gambar L-7. 8 Sekop Properties



Gambar L-7. 9 Sekop Concrete



Gambar L-7. 10 Piknometer



Gambar L-7. 11 Konus



Gambar L-7. 12 Saringan No. 200



Gambar L-7. 13 Set Saringan Agregat Halus



Gambar L-7. 14 Set Saringan Agregat Kasar



Gambar L-7. 15 Sikat Besi



Gambar L-7. 16 Batang Penumbuk



Gambar L-7. 17 Ember



Gambar L-7. 18 Alat Uji Slump (Kerucut Abrams)



Gambar L-7. 19 Bekisting Silinder 15 x 30 cm



Gambar L-7. 20 Bekisting Kubus 15 x 15 x 15 cm



Gambar L-7. 21 Alat Caping



Gambar L-7. 22 Pan Concrete



Gambar L-7. 23 Gerobak Sorong



Gambar L-7. 24 Troli



Gambar L-7. 25 Alat Uji Berat Jenis Agregat Kasar



Gambar L-7. 26 Mesin Pengguncang Agregat Halus



Gambar L-7. 27 Mesin Pengguncang Agregat Kasar



Gambar L-7. 28 Oven Heraeus



Gambar L-7. 29 Mini Concrete Mixer



Gambar L-7. 30 Mesin Crusher



Gambar L-7. 31 *Compression Testing Machine*

Lampiran 9 Dokumentasi Proses Penelitian



Gambar L-8. 1 Proses Persiapan Penimbangan Bahan



Gambar L-8. 2 Proses Persiapan Alat Bekisting



Gambar L-8. 3 Proses Pencampuran Bahan dan Pengadukan



Gambar L-8. 4 Proses Pencetakan Penumbukan pada Bekisting



Gambar L-8. 5 Proses Perawatan Benda Uji Beton



Gambar L-8. 6 Proses Persiapan *Capping* Sampel Beton Sebelum Pengujian



Gambar L-8. 7 Proses Pengujian Kuat Tekan Sampel Beton



Gambar L-8. 8 Proses Pengujian Absorpsi Pengeringan Benda Uji



Gambar L-8. 9 Proses Pengujian Absorpsi Penimbangan Benda Uji