TUGAS AKHIR

ANALISIS ANGKA KONVERSI KUAT TEKAN TERHADAP UMUR BETON DENGAN SUBSTITUSI PARSIAL *FLY ASH* KELAS C SEBESAR 12% TERHADAP TOTAL BERAT SEMEN

(ANALYSIS OF COMPRESSIVE STRENGTH CONVERSION FACTORS WITH RESPECT TO CONCRETE AGE USING 12% PARTIAL SUBSTITUTION OF CLASS C FLY ASH BY TOTAL CEMENT WEIGHT)

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

MUHAMMAD IRWAN ARDIANSYAH
22511255

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK DESAIN INOVASI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026

TUGAS AKHIR

ANALISIS ANGKA KONVERSI KUAT TEKAN TERHADAP UMUR BETON DENGAN SUBSTITUSI PARSIAL *FLY ASH* KELAS C SEBESAR 12% TERHADAP TOTAL BERAT SEMEN

(ANALYSIS OF COMPRESSIVE STRENGTH CONVERSION FACTORS WITH RESPECT TO CONCRETE AGE USING 12% PARTIAL SUBSTITUTION OF CLASS C FLY ASH BY TOTAL CEMENT WEIGHT)

Disusun oleh

Muhammad Irwan Ardiansyah

22511255

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

Diuji pada tanggal 27 Agustus 2026
Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing :
Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK : 165111301
Tanggal : 31.08.2026

Penguji I :
Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM
NIK : 095110101
Tanggal : 31 Agustus 2026

Penguji II :
Anggit Mas Arifudin S.T., M.T
NIK : 185111304
Tanggal : 31 Ags 2026.

Mengesahkan
Ka. Ketua Program Studi Teknik Sipil

31/8-26

Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng.
NIK: 165110105

Dipindai dengan CamScanner

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan Program Sarjana pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia, sepenuhnya merupakan hasil karya saya sendiri. Setiap bagian dalam laporan Tugas Akhir ini yang bersumber atau dikutip dari karya pihak lain telah dicantumkan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah.

Apabila di kemudian hari terbukti bahwa sebagian atau seluruh isi laporan Tugas Akhir ini bukan merupakan hasil karya saya sendiri atau ditemukan adanya unsur plagiarisme pada bagian tertentu, saya bersedia menerima segala bentuk sanksi yang berlaku, termasuk pencabutan gelar akademik yang telah saya peroleh sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 26 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,



Muhammad Irwan Ardiansyah

22511255

Dipindai dengan CamScanner

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur penyusun haturkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat, kesehatan, dan kemudahan yang diberikan sehingga penyusunan Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Angka Konversi Kuat Tekan terhadap Umur Beton dengan Substitusi *Fly ash* 12%" ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabatnya.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Penelitian ini membahas perkembangan kuat tekan beton dengan substitusi *fly ash* kelas C sebesar 12% terhadap berat semen pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, kemudian menganalisis angka konversi kuat tekannya dan membandingkan hasil tersebut dengan angka konversi PBI-1971 serta hasil penelitian Nahak dkk. (2025). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam mengestimasi kuat tekan beton yang mengandung *fly ash* pada umur pengujian di bawah 28 hari.

Penyusun menyadari bahwa penyelesaian Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penyusun menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Dinia Anggraheni S.T., M.Eng. selaku Plt. Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia, atas arahan dan kemudahan administrasi selama proses penyusunan Tugas Akhir.
2. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, atas kesediaan waktu, kesabaran, ilmu, serta arahan yang sangat berharga sejak awal penyusunan hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM selaku Dosen Penguji I atas segala koreksi, masukan, dan saran yang membangun sehingga penulisan Tugas Akhir ini menjadi lebih baik.

4. Bapak Anggit Mas Arifudin S.T., M.T selaku Dosen Penguji II atas segala koreksi, masukan, dan saran yang membangun sehingga penulisan Tugas Akhir ini menjadi lebih baik.
5. Seluruh Dosen dan staf tenaga kependidikan Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, atas ilmu dan pelayanan yang diberikan selama penyusun menempuh pendidikan.
6. Kedua orang tua dan seluruh keluarga penyusun, atas doa, kasih sayang, serta dukungan yang tidak pernah berhenti diberikan.
7. Nabiilah Deasy Maharani, seseorang yang selalu memberi dukungan dan menemani selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia yang telah membantu, khususnya selama pelaksanaan pekerjaan di laboratorium, serta memberikan semangat kepada penyusun.
9. Semua pihak yang tidak dapat penyusun sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penyusun menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan, baik dalam jumlah benda uji, cakupan umur pengujian, maupun variasi kadar substitusi *fly ash* yang ditinjau, sehingga hasil yang diperoleh masih terbuka untuk dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penyusun harapkan demi perbaikan pada penelitian selanjutnya.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Yogyakarta, 26 Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Irwan Ardiansyah

22511255

Dipindai dengan CamScanner

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii
KATA PENGANTAR iv
DAFTAR ISI vi
DAFTAR TABEL x
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR LAMPIRAN xiii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xiv
ABSTRAK xvi
ABSTRACT xvii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan Penelitian 2
1.4 Manfaat Penelitian 3
1.5 Batasan Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Tinjauan Umum 5
2.2 Penelitian Terdahulu 5
2.3 Keaslian Penelitian 7
BAB III LANDASAN TEORI 12
3.1 Beton 12

3.1.1 Material Penyusun Beton 12
3.1.2 Perawatan Beton (*Curing*) 19
3.2 Kuat Tekan Beton 21
3.2.1 Pengujian Kuat Tekan Beton 21
3.2.2 Faktor yang Memengaruhi Perkembangan Kuat Tekan Beton 22
3.3 Perkembangan Kuat Tekan Beton terhadap Umur 23
3.4 *Fly ash* 24
3.4.1 Klasifikasi *Fly ash* 24
3.4.2 Reaksi Pozzolanik *Fly ash* 26
3.4.3 Pengaruh *Fly ash* 26
3.5 Angka Konversi Kuat Tekan Beton 28
3.6 Analisis Statistik Data Kuat Tekan 29
3.6.1 Kuat Tekan Rencana dan Kuat Tekan Rata-rata Target 30
3.6.2 Evaluasi Kelayakan *Batch* terhadap Kuat Tekan Rencana 32
3.6.3 Identifikasi Data Pencilan dengan Metode *Interquartile Range* 33
3.6.4 Kuat Tekan Rata-rata dan Standar Deviasi 34
3.6.5 Pemodelan Perkembangan Kuat Tekan terhadap Umur 36
3.6.6 Uji Signifikansi Perbedaan Angka Konversi 36
BAB IV METODE PENELITIAN 38
4.1 Tinjauan Umum 38
4.2 Waktu dan Lokasi Penelitian 38
4.3 Variabel Penelitian 39
4.4 Bahan Penelitian 39
4.5 Alat yang Digunakan 42
4.6 Benda Uji 47

4.7 Pelaksanaan Persiapan 48
4.7.1 Persiapan Alat dan Bahan 48
4.7.2 Pembuatan Benda Uji 49
4.7.3 Perawatan Benda Uji 50
4.8 Pelaksanaan Pengujian 50
4.8.1 Pengujian *Slump* 50
4.8.2 Pengujian Kuat Tekan Beton 51
4.9 Analisis Hasil Pengujian 52
4.10 Bagan Alir 54
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 56
5.1 Tinjauan Umum 56
5.2 Pengujian Agregat 56
5.2.1 Pengujian Agregat Halus 56
5.2.2 Pengujian Agregat Kasar 66
5.3 *Mix Design* 74
5.3.1 Dasar dan Parameter Perencanaan 75
5.3.2 Perhitungan Komposisi Campuran Beton 79
5.3.3 Kebutuhan Bahan untuk Benda Uji 83
5.3.4 Rekapitulasi Hasil *Mix Design* 84
5.4 *Slump* 86
5.5 Perawatan 87
5.6 Pengujian Kuat Tekan Beton 89
5.7 Penyaringan Data Hasil Pengujian 92
5.7.1 Evaluasi Kelayakan *Batch* terhadap Kuat Tekan Rencana 92

5.7.2 Identifikasi *Outlier* Menggunakan Metode *Interquartile Range* (*IQR*) 94
5.8 Analisis Angka Konversi 96
5.9 Perbandingan Angka Konversi 100
5.10 Uji Signifikansi dan Rekomendasi Penggunaan Angka Konversi 103
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 107
6.1 Kesimpulan 107
6.2 Saran 108
DAFTAR PUSTAKA 110
LAMPIRAN 113

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Ini Dengan Penelitian Terdahulu 9
Tabel 3. 1 Persyaratan Kimia SNI 2460:2014 25
Tabel 3. 2 Nilai Faktor Konversi Menurut PBI-1971 29
Tabel 3. 3 Nilai Faktor Konversi Berdasarkan Penelitian Nahak dkk. (2025) 29
Tabel 3. 4 Standar Pengendalian Mutu Beton Berdasarkan Standar Deviasi 36
Tabel 4. 1 Rincian Benda Uji 47
Tabel 5. 1 Uji Saringan 57
Tabel 5. 2 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 1 60
Tabel 5. 3 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 2 60
Tabel 5. 4 Batas Gradasi Agregat Halus 61
Tabel 5. 5 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 1 62
Tabel 5. 6 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 2 63
Tabel 5. 7 Rekapitulasi Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus 65
Tabel 5. 8 Uji Saringan Agregat Kasar 67
Tabel 5. 9 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 1 69
Tabel 5. 10 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 2 69
Tabel 5. 11 Batas Gradasi Agregat Kasar Ukuran Maksimum 20 mm 70
Tabel 5. 12 Kurva Gradasi Agregat Kasar Sampel 1 71
Tabel 5. 13 Kurva Gradasi Agregat Kasar Sampel 2 72
Tabel 5. 14 Rekapitulasi Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar 73
Tabel 5. 15 Faktor Pengali Deviasi Standar bila Data Hasil Uji Kurang dari 30 75
Tabel 5. 16 Perkiraan Kuat Tekan Beton pada Faktor Air-Semen 0,50 76
Tabel 5. 18 Persyaratan FAS Maksimum dan Minimum 78
Tabel 5. 19 Perkiraan Kebutuhan Air per Meter Kubik Beton 79
Tabel 5. 20 Rekapitulasi Perencanaan Campuran Beton 84
Tabel 5. 21 Kebutuhan Bahan Beton *Fly ash* 12% untuk Benda Uji 85
Tabel 5. 22 Hasil Pengujian *Slump* Beton Segar 86
Tabel 5. 23 Durasi Perawatan Benda Uji dengan Metode Perendaman 88

Tabel 5. 24 Hasil Pengujian Tekan 90
Tabel 5. 25 Hasil Pengujian dan Rata-Rata Kuat Tekan 91
Tabel 5. 26 Evaluasi Kelayakan *Batch* terhadap Kuat Tekan Rencana 92
Tabel 5. 27 Posisi Kuat Tekan *Batch* A terhadap Rata-rata Kelima *Batch* 93
Tabel 5. 28 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 3 Hari 95
Tabel 5. 29 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 7 Hari 95
Tabel 5. 30 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 14 Hari 95
Tabel 5. 31 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 21 Hari 95
Tabel 5. 32 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 28 Hari 96
Tabel 5. 33 Rekapitulasi Nilai f'c Setelah Proses *Outlier* 97
Tabel 5. 34 Angka Konversi Kuat Tekan Beton *Fly ash* Kelas C 12% 98
Tabel 5. 35 Perbandingan Angka Konversi Hasil Penelitian dengan PBI-1971 dan Nahak dkk. (2025) 101
Tabel 5. 36 Hasil Uji Signifikansi Kuat Tekan terhadap Kuat Tekan Prediksi Angka Konversi Acuan 105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Uji Kuat Tekan Beton 21
Gambar 4. 1 Semen Portland Tiga Roda 40
Gambar 4. 2 Agregat Kasar 40
Gambar 4. 3 Agregat Halus 41
Gambar 4. 4 Air 41
Gambar 4. 5 *Fly ash* Kelas C 42
Gambar 4. 6 Timbangan Digital 42
Gambar 4.7 Set Saringan Agregat 43
Gambar 4. 8 Sekop 43
Gambar 4. 9 Piknometer 44
Gambar 4. 10 Oven 44
Gambar 4. 11 *Concrete Mixer* 45
Gambar 4. 12 Kerucut Abrams 45
Gambar 4. 13 Bekisting Beton Silinder 46
Gambar 4. 14 Mesin Uji Tekan 47
Gambar 5. 1 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 1 63
Gambar 5. 2 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 2 64
Gambar 5. 3 Gradasi Agregat Kasar Sampel 1 71
Gambar 5. 4 Gradasi Agregat Kasar Sampel 2 72
Gambar 5. 5 Hubungan Kuat Tekan dan Faktor Air-Semen 77
Gambar 5. 6 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat untuk Ukuran Maksimum 20 mm 81
Gambar 5. 7 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Dipadatkan 82
Gambar 5. 8 Nilai *Slump* Beton Segar terhadap Batas *Slump* Rencana 87
Gambar 5. 9 Kurva Perkembangan Kuat Tekan Rerata terhadap Umur 99
Gambar 5. 10 Kurva Angka Konversi Kuat Tekan Hasil Penelitian 100
Gambar 5. 11 Perbandingan Angka Konversi Hasil Penelitian dengan PBI-1971 dan Nahak dkk. (2025) 101

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus 114
Lampiran 2 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar 115
Lampiran 3 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Halus Sampel 1 116
Lampiran 4 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 1 117
Lampiran 5 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Halus Sampel 2 118
Lampiran 6 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 2 119
Lampiran 7 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Kasar Sampel 1 120
Lampiran 8 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 1 121
Lampiran 9 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Kasar Sampel 2 122
Lampiran 10 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 2 123
Lampiran 11 Formulir Perencanaan Campuran Beton Metode SNI 2834-2000 124
Lampiran 12 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton 125

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

A	=	Luas bidang tekan benda uji (mm^2)
ACI	=	*American Concrete Institute*
ASTM	=	*American Society for Testing and Materials*
CaO	=	Kalsium oksida
$Ca(OH)_2$	=	Kalsium hidroksida
CTM	=	*Compression Testing Machine*
C-S-H	=	Kalsium silikat hidrat (*calcium silicate hydrate*)
d	=	Diameter benda uji silinder (mm)
FAS	=	Faktor air semen
f'c	=	Kuat tekan beton (MPa)
f'cr	=	Kuat tekan rata-rata perlu pada perencanaan campuran (MPa)
f'c(t)	=	Kuat tekan beton rata-rata pada umur t (MPa)
f'c(28)	=	Kuat tekan beton rata-rata pada umur 28 hari (MPa)
IQR	=	*Interquartile Range* (rentang antarkuartil)
k_t	=	Angka konversi kuat tekan beton pada umur t
ln	=	Logaritma natural
MHB	=	Modulus halus butir
MPa	=	Megapascal
n	=	Jumlah benda uji valid pada umur yang ditinjau (buah)
P	=	Beban maksimum yang bekerja pada benda uji (kN)
p	=	Nilai probabilitas hasil uji signifikansi (p-value)
PBI	=	Peraturan Beton Bertulang Indonesia
PCC	=	*Portland Composite Cement*
Q1	=	Kuartil bawah data kuat tekan (MPa)
Q3	=	Kuartil atas data kuat tekan (MPa)
R^2	=	Koefisien determinasi
s	=	Standar deviasi kuat tekan (MPa)
SE	=	Galat baku kuat tekan rata-rata (MPa)

SiO_2	=	Silikon dioksida (silika)
SK	=	Selang kepercayaan
SNI	=	Standar Nasional Indonesia
SSD	=	*Saturated Surface Dry* (kering permukaan jenuh)
t	=	Umur beton (hari)
t hitung	=	Nilai statistik uji-t hasil perhitungan
t_r	=	durasi perendaman
t_u	=	umur pengujian
tn	=	waktu benda uji berada di dalam cetakan, yaitu satu hari
t_k	=	waktu pengondisian di luar air sebelum pengujian, yaitu satu hari
XRF	=	*X-Ray Fluorescence*
π	=	Konstanta pi (3,1416)

ABSTRAK

Angka konversi kuat tekan beton dalam praktik di Indonesia umumnya mengacu pada PBI-1971 yang disusun untuk beton tanpa bahan tambah mineral, sedangkan beton masa kini banyak memanfaatkan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen. Penelitian ini bertujuan menentukan kuat tekan beton dengan substitusi parsial *fly ash* kelas C sebesar 12% terhadap total berat semen pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, menghitung angka konversinya terhadap kuat tekan umur 28 hari, serta membandingkannya dengan PBI-1971 dan Nahak dkk. (2025).

Perencanaan campuran mengacu pada SNI 03-2834-2000 dengan kuat tekan rencana 25 MPa, semen PCC Tipe I, dan faktor air semen 0,50. Benda uji berupa 25 silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm dari lima *batch* pengadukan dengan *slump* 86 mm sampai 102 mm. Perawatan dilakukan dengan perendaman. Data disaring melalui eliminasi *batch* yang tidak mencapai kuat tekan rencana dan metode *Interquartile Range*, kemudian perbedaannya diuji dengan uji t *T-Test* satu sampel.

Kuat tekan rata-rata benda uji valid sebesar 15,375 MPa, 22,009 MPa, 24,906 MPa, 27,456 MPa, dan 27,988 MPa dengan angka konversi 0,549, 0,786, 0,890, 0,981, dan 1,000. Hubungan kuat tekan terhadap umur mengikuti pola logaritmik $f'c(t) = 5{,}6525 \ln t + 9{,}9124$ dengan R^2 0,9768. Angka konversi hasil penelitian lebih tinggi 37,33% pada umur 3 hari dan 20,98% pada umur 7 hari daripada PBI-1971 dan berbeda signifikan ($p < 0{,}05$), sedangkan pada umur 14 dan 21 hari tidak signifikan. Angka konversi yang direkomendasikan 0,55, 0,79, 0,89, dan 0,98.

Kata kunci: Beton, *Fly ash* kelas C, Angka konversi, Kuat tekan, Umur beton

ABSTRACT

The compressive strength conversion factors for concrete commonly used in Indonesia generally refer to PBI-1971, which was developed for concrete without mineral admixtures, whereas modern concrete increasingly utilizes fly ash as a partial cement substitute. This study aims to determine the compressive strength of concrete with 12% Class C fly ash as a partial substitute for the total cement weight at the ages of 3, 7, 14, 21, and 28 days, calculate the corresponding conversion factors relative to the 28-day compressive strength, and compare them with those specified in PBI-1971 and reported by Nahak et al. (2025).

The mix design was based on SNI 03-2834-2000 with a target compressive strength of 25 MPa, Type I PCC cement, and a water-cement ratio of 0.50. The specimens consisted of 25 cylindrical specimens with a diameter of 150 mm and a height of 300 mm, produced from five mixing batches, with slump values ranging from 86 mm to 102 mm. Curing was conducted by water immersion. The data were screened by eliminating batches that did not achieve the target compressive strength and using the Interquartile Range method, followed by a one-sample t-test to assess the differences.

The mean compressive strengths of the valid specimens were 15.375 MPa, 22.009 MPa, 24.906 MPa, 27.456 MPa, and 27.988 MPa, with corresponding conversion factors of 0.549, 0.786, 0.890, 0.981, and 1.000. The relationship between compressive strength and concrete age followed a logarithmic pattern, expressed as $f'c(t) = 5.6525 \ln t + 9.9124$, with an R^2 value of 0.9768. The conversion factors obtained in this study were 37.33% higher at 3 days and 20.98% higher at 7 days than those specified in PBI-1971, with statistically significant differences ($p < 0.05$), while the differences at 14 and 21 days were not statistically significant. The recommended conversion factors are 0.55, 0.79, 0.89, and 0.98.

Keywords: *Concrete, Class C fly ash, Conversion factor, Compressive strength, Concrete age*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material konstruksi yang terdiri dari semen, agregat, dan air. Beton kerap digunakan untuk proyek konstruksi karena memiliki kuat tekan yang tinggi, awet, dan perawatan yang relatif mudah. Inovasi dalam dunia konstruksi terus hadir seiring dengan meningkatnya kebutuhan pembangunan. Inovasi tentang penggunaan material alternatif sebagai substitusi parsial semen menjadi perhatian penting, salah satunya adalah *fly ash* yang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara. Penggunaan *fly ash* sebagai bahan substitusi parsial semen diketahui dapat memberikan manfaat dalam mengurangi emisi CO_2 akibat proses produksi semen, menjadi solusi untuk menciptakan *green concrete* (Olii dkk., 2023). Selain itu, *fly ash* mengandung silika dan alumina yang melalui reaksi pozzolanik dapat meningkatkan kuat tekan beton pada kadar substitusi tertentu (Muhammady, 2022; Olii dkk., 2023) serta memperbaiki durabilitas beton (Neville, 2011). Meningkatnya penerapan *green concrete* tersebut menuntut ketelitian dalam mengestimasi kekuatan beton, sebab angka konversi kuat tekan yang digunakan di lapangan hingga saat ini masih mengacu pada beton tanpa bahan tambah mineral. Penggunaan angka konversi tersebut secara langsung pada beton dengan substitusi *fly ash* berpotensi menimbulkan kesalahan estimasi kuat tekan, sehingga diperlukan angka konversi yang lebih representatif bagi beton jenis ini.

Berdasarkan penelitian Nahak dkk. (2025), semen yang beredar seperti *Portland Composite Cement* (PCC) memiliki kandungan *fly ash* yang dapat memengaruhi perkembangan kuat tekan beton, terutama pada umur awal. Sehingga, angka konversi kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh jenis material penyusun beton. Standar PBI-1971 yang masih banyak digunakan memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan beton modern yang menggunakan bahan substitusi seperti *fly ash*. Sehingga perlu dilakukan perbandingan angka konversi kuat tekan beton

dengan substitusi *fly ash* sebesar 12% terhadap angka konversi beton tanpa *fly ash* yang diperoleh dari data sekunder, yaitu PBI-1971 dan hasil penelitian Nahak dkk. (2025). Sehingga pola perkembangan kekuatan beton tersebut dapat dipahami dengan baik. Dalam praktiknya, estimasi kuat tekan beton sering dilakukan menggunakan angka konversi empiris dari umur tertentu ke umur 28 hari. Angka konversi ini umumnya didasarkan pada beton normal tanpa bahan tambahan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara keduanya, sehingga dapat menjadi dasar dalam mengevaluasi keakuratan penggunaan angka konversi yang selama ini digunakan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton dengan substitusi *fly ash* sebesar 12% pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, menghitung serta menganalisis angka konversi kuat tekannya, kemudian membandingkannya dengan angka konversi beton tanpa *fly ash* menurut PBI-1971 dan hasil penelitian Nahak dkk. (2025), serta memberikan rekomendasi penyesuaian angka konversi yang lebih representatif untuk estimasi kuat tekan beton yang mengandung *fly ash*.

1.2 Rumusan Masalah

1. Berapa nilai kuat tekan beton dengan substitusi parsial *fly ash* 12% terhadap berat total semen pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari?
2. Bagaimana nilai angka konversi kuat tekan beton substitusi parsial *fly ash* 12% terhadap berat total semen?
3. Bagaimana signifikansi perbedaan angka konversi kuat tekan beton dengan substitusi parsial *fly ash* 12% terhadap berat total semen dan angka konversi beton tanpa *fly ash* terhadap PBI-1971 serta hasil penelitian Nahak dkk. (2025)?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan nilai kuat tekan beton dengan *fly ash* 12% pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari.
2. Menghitung dan menganalisis nilai angka konversi kuat tekan terhadap umur beton substitusi *fly ash* 12%.

3. Mengidentifikasi signifikansi perbedaan angka konversi kuat tekan beton dengan substitusi *fly ash* 12% serta memberikan bahan pertimbangan mengenai penyesuaian angka konversi yang lebih representatif untuk estimasi kuat tekan pada beton yang mengandung *fly ash*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Manfaat teoretis

   Menambah basis data mengenai angka konversi kuat tekan beton dengan substitusi *fly ash* kelas C yang belum diakomodasi oleh PBI-1971, serta memperkaya kajian mengenai pola perkembangan kuat tekan terhadap umur pada beton yang menggunakan bahan tambah mineral.
2. Manfaat praktis

   Memberikan referensi angka konversi bagi pelaksana konstruksi dan laboratorium pengujian sebagai bahan pertimbangan dalam mengestimasi kuat tekan beton yang mengandung *fly ash* pada umur pengujian di bawah 28 hari, sehingga evaluasi mutu beton dapat dilakukan lebih awal dan risiko kesalahan penilaian mutu beton dapat dikurangi.

1.5 Batasan Penelitian

1. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia.
2. Variasi campuran hanya terdiri dari beton dengan substitusi 12% dari total berat semen menggunakan *fly ash* kelas C tanpa bahan tambah lain
3. Benda uji yang digunakan adalah silinder untuk uji kuat tekan.
4. Pengujian kekuatan utama hanya dilakukan pada umur beton 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. dengan satu benda uji untuk setiap umur pada setiap *batch*, sehingga seluruhnya berjumlah 25 benda uji yang berasal dari lima *batch* pengadukan.
5. Angka konversi yang dianalisis adalah rasio antara kuat tekan rata-rata benda uji valid pada umur 3, 7, 14, dan 21 hari terhadap kuat tekan rata-rata benda uji valid pada umur 28 hari untuk beton dengan substitusi *fly ash* sebesar 12% dari berat semen.

6. Parameter yang ditinjau hanya kuat tekan beton. Sifat mekanis lain, seperti kuat tarik, modulus elastisitas, susut, dan durabilitas, tidak ditinjau karena acuan angka konversi pada PBI-1971 maupun hasil penelitian Nahak dkk. (2025) hanya tersedia untuk parameter kuat tekan, sehingga hanya parameter tersebut yang memiliki dasar pembanding.
7. Beton tanpa *fly ash* (0%) tidak dibuat sebagai benda uji, melainkan diwakili oleh data sekunder berupa angka konversi PBI-1971 dan hasil penelitian Nahak dkk. (2025) yang berfungsi sebagai pembanding.
8. Perawatan benda uji dilakukan dengan satu metode, yaitu perendaman penuh dalam air pada suhu ruang, sehingga metode dan bahan perawatan tidak menjadi variabel dalam penelitian ini.
9. Kriteria mutu yang digunakan sebagai dasar penilaian data hasil pengujian adalah kuat tekan rencana (f'c) sebesar 25 MPa pada umur 28 hari sesuai kriteria penerimaan pada SNI 2847:2019. Kuat tekan rata-rata target (f'cr) sebesar 37 MPa hanya berkedudukan sebagai target perencanaan campuran menurut SNI 03-2834-2000 dan tidak digunakan sebagai kriteria penerimaan maupun penolakan hasil pengujian.
10. Evaluasi kelayakan *batch* dilakukan pada tingkat kelompok pengadukan. Suatu *batch* dinyatakan tidak layak dan seluruh benda ujinya dikeluarkan dari analisis apabila *batch* tersebut tidak pernah mencapai kuat tekan rencana 25 MPa pada seluruh umur pengujian, termasuk pada umur 28 hari. Dengan demikian, benda uji yang digunakan dalam analisis angka konversi terbatas pada benda uji yang berasal dari *batch* yang mencapai kuat tekan rencana.
11. Identifikasi data pencilan menggunakan hasil pengujian kuat tekan yang telah melewati evaluasi kelayakan *batch* dan dilakukan menggunakan metode *Interquartile Range* (IQR).

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Kuat tekan beton merupakan parameter utama dalam menentukan kinerja beton sebagai material struktural, yang nilainya dipengaruhi oleh komposisi campuran serta umur beton. Seiring bertambahnya umur, kuat tekan beton mengalami peningkatan akibat proses hidrasi yang berlangsung secara bertahap. Penggunaan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen juga memengaruhi laju perkembangan kuat tekan beton, di mana terdapat kadar optimum yang dapat menghasilkan kuat tekan maksimum, sedangkan penggunaan berlebih justru dapat menurunkan kekuatan beton. Oleh karena itu, analisis hubungan antara umur beton dan kuat tekan beton menjadi penting, khususnya pada beton dengan campuran *fly ash*, untuk memahami pola perkembangan kekuatan beton secara lebih akurat.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai hubungan antara umur beton dan kuat tekan telah banyak dilakukan untuk memahami perkembangan kekuatan beton seiring waktu. Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton meningkat seiring bertambahnya umur akibat berlangsungnya proses hidrasi semen. Pola peningkatan ini menjadi dasar dalam evaluasi mutu beton serta dalam memperkirakan kuat tekan beton pada umur tertentu.

1. Penelitian oleh Muhammady (2022) mengkaji pengaruh penggunaan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen terhadap perkembangan kuat tekan beton berdasarkan umur beton. Variasi *fly ash* yang digunakan berkisar antara 0% hingga 15%, dengan pengujian kuat tekan pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton meningkat seiring bertambahnya umur beton akibat proses hidrasi yang terus berlangsung. Selain itu, diperoleh bahwa kadar optimum *fly ash* berada pada kisaran sekitar 12%, di mana beton mencapai kuat tekan maksimum serta menunjukkan percepatan pencapaian kuat tekan rencana.

2. Penelitian oleh Idris dkk. (2023) menganalisis pengaruh penambahan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen terhadap kuat tekan beton normal. Variasi yang digunakan adalah 0%, 15%, dan 30% dengan pengujian pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* cenderung menurunkan nilai kuat tekan beton dibandingkan dengan beton normal. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* harus mempertimbangkan proporsi yang tepat agar tidak menurunkan performa beton secara signifikan.
3. Penelitian oleh Olii dkk. (2023) meneliti beton dengan substitusi *fly ash* dalam variasi kecil yaitu 9% hingga 10.5%. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari untuk mengetahui pengaruh *fly ash* terhadap kuat tekan beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton meningkat pada variasi *fly ash* tertentu, khususnya pada kisaran 9% hingga 9.5%, namun mengalami penurunan pada kadar yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat kadar optimum *fly ash* yang sangat bergantung pada komposisi campuran beton secara keseluruhan.
4. Penelitian oleh Nahak dkk. (2025) mengevaluasi faktor konversi kuat tekan beton berdasarkan umur beton dengan menggunakan semen *Portland Composite Cement* (PCC) tipe I. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbedaan perkembangan kuat tekan beton PCC terhadap faktor konversi yang selama ini mengacu pada PBI-1971 berbasis *Ordinary Portland Cement* (OPC). Benda uji yang digunakan berupa silinder beton berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm dengan pengujian kuat tekan pada umur 3, 7, 14, 21, 28, 56, dan 90 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada umur beton di bawah 28 hari, nilai faktor konversi beton dengan PCC tipe I lebih rendah dibandingkan OPC, yang menandakan perkembangan kuat tekan beton PCC berlangsung lebih lambat pada umur awal. Nilai faktor konversi yang diperoleh secara berturut-turut pada umur 3, 7, 14, 21, 28, 56, dan 90 hari adalah 0,32; 0,51; 0,77; 0,84; 1,00; 1,08; dan 1,20. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa faktor konversi kuat tekan beton pada PBI-1971 sudah tidak sepenuhnya relevan digunakan untuk beton dengan semen PCC tipe I.

5. Penelitian oleh Hibatulloh (2024) mengkaji optimasi proporsi bahan substitusi dalam campuran beton terhadap kuat tekan menggunakan metode *Artificial Neural Network* (ANN). Penelitian ini menggunakan bahan substitusi berupa *fly ash*, *superplasticizer*, dan *blast furnace slag* untuk memprediksi serta menentukan proporsi optimum campuran beton berdasarkan umur beton 3, 7, 14, dan 28 hari. Model ANN yang dikembangkan menunjukkan performa prediksi yang baik dengan nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 8,53%, *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 3,98 MPa, dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,92. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proporsi optimum *fly ash* sebesar 18,9% pada umur 28 hari, sedangkan penggunaan *superplasticizer* sebesar 1% pada proporsi *fly ash* 24,1% mampu meningkatkan kuat tekan beton maksimum hingga 21,83%. Selain itu, proporsi optimum *blast furnace slag* diperoleh sebesar 22,8% dengan kuat tekan maksimum mencapai 43,29 MPa pada umur beton 28 hari. Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode ANN efektif digunakan untuk mengoptimalkan proporsi bahan substitusi guna memperoleh kuat tekan beton yang optimal secara lebih adaptif dan akurat dibandingkan metode konvensional.

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* memengaruhi pola perkembangan kuat tekan beton terhadap umur. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada perbandingan nilai kuat tekan pada umur tertentu tanpa secara khusus menganalisis hubungan tersebut dalam bentuk angka konversi. Hal ini menunjukkan bahwa masih terdapat peluang penelitian untuk menganalisis angka konversi kuat tekan terhadap umur beton, khususnya pada beton dengan campuran *fly ash*.

2.3 Keaslian Penelitian

Berdasarkan hasil kajian terhadap penelitian terdahulu, diketahui bahwa penggunaan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen telah banyak diteliti dan menunjukkan pengaruh terhadap kuat tekan beton. Penelitian yang dilakukan oleh Muhammady (2022) menunjukkan bahwa kuat tekan beton meningkat seiring

bertambahnya umur beton, serta terdapat kadar optimum *fly ash* yang menghasilkan kuat tekan maksimum. Sementara itu, penelitian oleh Idris dkk. (2023) menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* dalam jumlah tertentu dapat menurunkan kuat tekan beton apabila tidak berada pada kadar optimum. Selain itu, penelitian oleh Olii dkk. (2023) juga menunjukkan adanya kadar optimum *fly ash* dalam meningkatkan kuat tekan beton, di mana peningkatan terjadi pada variasi tertentu dan menurun pada kadar yang lebih tinggi.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut umumnya hanya membahas pengaruh variasi *fly ash* terhadap kuat tekan beton atau menunjukkan tren peningkatan kuat tekan terhadap umur beton. Belum ditemukan penelitian yang secara spesifik menganalisis hubungan konversi kuat tekan beton terhadap umur beton dalam bentuk faktor konversi atau hubungan matematis, khususnya pada beton dengan substitusi *fly ash* dalam persentase tertentu.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dinyatakan asli dan belum pernah dilakukan sebelumnya. Keaslian penelitian ini terletak pada empat hal, yaitu objek yang ditinjau berupa angka konversi kuat tekan terhadap umur beton dan bukan nilai kuat tekan pada umur tunggal sebagaimana penelitian terdahulu, penggunaan *fly ash* kelas C dengan kadar substitusi tunggal sebesar 12% terhadap berat pengikat, penggunaan semen *Portland Composite Cement* Tipe I, serta pengujian signifikansi statistik atas perbedaan angka konversi hasil penelitian terhadap PBI-1971 dan Nahak dkk. (2025). Kombinasi keempat hal tersebut belum ditemukan pada penelitian terdahulu yang dikaji.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis hubungan konversi kuat tekan beton terhadap umur beton pada campuran beton dengan substitusi *fly ash*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam bentuk nilai faktor konversi kuat tekan beton terhadap umur beton yang dapat digunakan sebagai acuan dalam evaluasi mutu beton tanpa harus menunggu umur 28 hari. Perbandingan penelitian dengan penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Ini Dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian Terdahulu						Penelitian Ini
Keterangan	**Muhammady (2022)**	**Idris dkk. (2023)**	**Olii dkk. (2023)**	**Hibatulloh (2024)**	**Nahak dkk. (2025)**	**Ardiansyah (2026)**
Judul Penelitian	Analisis Peningkatan Kuat Tekan Beton Terhadap Umur Beton Dengan Menggunakan *Fly ash* Sebagai Bahan Substitusi Parsial	Kuat Tekan Beton dengan Penambahan *Fly ash* Batu Bara sebagai Pengganti Sebagian Semen	Beton Hijau Menggunakan *Fly ash* sebagai Substitusi Parsial Semen	Optimasi Proporsi Bahan Substitusi Dalam Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan Menggunakan Metode *Artificial Neural Network*	Evaluasi Faktor Konversi Nilai Kuat Tekan Beton Berdasarkan Umur Beton dengan Menggunakan PCC Tipe I	Analisis Angka Konversi Kuat Tekan Terhadap Umur Beton Dengan Substitusi *Fly ash* 12%
Tujuan	Mengetahui proporsi penggantian semen dengan *fly ash* untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton yang optimum dan untuk mengetahui peningkatan nilai kuat tekan beton yang lebih cepat mencapai kuat tekan rencana. berdasarkan	Untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan limbah *fly ash* pada campuran beton. Sebagai bahan penganti sebagian semen.	Menemukan alternatif atau penggantian sebagian material beton hijau sehingga meminimalkan dampak lingkungan dari pembuatan beton dan meningkatkan kekuatan beton, salah satunya adalah *fly ash*.	Mengevaluasi keandalan dan kinerja model *Artificial Neural Network* (ANN) dalam memprediksi kuat tekan beton, menganalisis pengaruh variasi proporsi bahan substitusi terhadap kuat tekan beton, serta menentukan	Mengevaluasi faktor konversi kuat tekan beton berdasarkan umur beton, mengetahui perbedaan konversi antara Semen PCC tipe I dengan Standar lama PBI-1971 (berbasis OPC), dan memberikan acuan yang lebih akurat untuk estimasi kuat tekan	Menentukan nilai kuat tekan dan menganalisis angka konversi beton beton *fly ash* 12% pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, serta memberikan rekomendasi mengenai penyesuaian angka konversi

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Ini Dengan Penelitian Terdahulu

	Penelitian Terdahulu					Penelitian Ini
Keterangan	**Muhammady (2022)**	**Idris dkk. (2023)**	**Olii dkk. (2023)**	**Hibatulloh (2024)**	**Nahak dkk. (2025)**	**Ardiansyah (2026)**
	lamanya umur beton			proporsi optimal bahan substitusi yang menghasilkan kuat tekan beton maksimum.	beton di lapangan	yang lebih representatif untuk estimasi kuat tekan
Kuat Tekan Rencana	20 MPa	25 MPa	35 MPa	25 MPa	30 MPa	25 MPa
Metode Penelitian	Metode perhitungan *Mix Design* menggunakan SNI 7656-2012 dengan umur rencana 3, 7, 14, dan 28 hari. Pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan dengan penggantian *fly ash* sebesar 0%, 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, dan 15% daripada berat semen	Metode penetuan *mix design* menggunakan SNI 03-2834-2000 dengan nilai FAS yang digunakan sebesar 0,48. Pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan dengan penggantian *fly ash* sebesar 0%, 15%, dan 30% daripada berat semen	Metode pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium berdasarkan SNI 2493. Pembuatan benda uji beton silinder menggunakan lima variasi *fly ash* terhadap berat semen, yaitu: 9,0%; 9,5%; 10,0%; dan 10,5%.	Pemodelan *Artificial Neural Network* (ANN) berbasis dataset *UCI Machine Learning Repository* dengan tahapan *exploratory data analysis*, *data preprocessing*, pelatihan dan pengujian model, serta evaluasi kinerja menggunakan RMSE, R^2, dan MAPE untuk memprediksi dan mengoptimalkan kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari.	Metode eksperimen laboratorium dilakukan sebanyak 28 sampel untuk variasi umur 3, 7, 14, 21, 28, 56, dan 90 hari. Hasil pengujian kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan kriteria beton normal berdasarkan SNI 03-2834-2000.	Metode eksperimen laboratorium pengujian kuat tekan beton yang dilakukan pada usia yang berbeda; umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari untuk jenis beton *fly ash* 12 %, menggunakan mesin uji tekan sesuai SNI 1974:2023.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Ini Dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian Terdahulu						Penelitian Ini
Keterangan	**Muhammady (2022)**	**Idris dkk. (2023)**	**Olii dkk. (2023)**	**Hibatulloh (2024)**	**Nahak dkk. (2025)**	**Ardiansyah (2026)**
Hasil Penelitian	Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi *fly ash* optimum sebesar 12% menghasilkan kuat tekan tertinggi pada seluruh umur pengujian serta mampu mempercepat pencapaian kuat tekan rencana menjadi sekitar 16,35 hari atau lebih cepat 8,65 hari dibandingkan beton normal tanpa *fly ash*.	Beton tanpa *fly ash* memiliki kuat tekan sebesar 37,59 MPa, sedangkan pada variasi 15% dan 30% *fly ash* kuat tekan menurun menjadi 31,97 MPa dan 31,95 MPa.	Kuat tekan beton meningkat pada variasi 9% dan 9,5%, masing-masing sebesar 36,70 MPa dan 35,11 MPa, kemudian mengalami penurunan pada variasi 10% dan 10,5% menjadi 33,37 MPa dan 30,38 MPa.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa model ANN memiliki akurasi yang baik (MAPE 8,53%, RMSE 3,98 MPa, R^2 0,92) serta mampu menentukan proporsi optimal bahan substitusi, yaitu *fly ash* 18,9%, *superplasticizer* 1%, dan *blast furnace slag* 22,8%, dengan kuat tekan maksimum mencapai 43,29 MPa pada umur 28 hari.	Kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, 21, 28, 56, dan 90 hari secara berturut-turut adalah 9,55 MPa, 15,34 MPa, 23,13 MPa, 25,25 MPa, 30,06 MPa, 32,40 MPa, dan 35,93 MPa. Berdasarkan hasil tersebut, faktor konversi kuat tekan beton terhadap umur 28 hari berturut-turut adalah 0,32; 0,51; 0,77; 0,84; 1,00; 1,08; dan 1,20.	-

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Beton

Beton adalah material komposit yang terbentuk dari pencampuran semen, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambah. Pencampuran tersebut memicu reaksi hidrasi pada semen sehingga campuran yang semula bersifat plastis berangsur mengeras menjadi massa padat. Beton banyak dipilih dalam pekerjaan konstruksi karena mampu menahan beban tekan yang besar, mudah dibentuk sesuai kebutuhan, serta cukup awet menghadapi berbagai kondisi lingkungan (Neville, 2011).

3.1.1 Material Penyusun Beton

Sifat beton tidak ditentukan oleh satu material saja, melainkan oleh gabungan peran seluruh bahan penyusunnya. Antar material tersebut berlangsung interaksi fisik maupun kimia yang pada akhirnya menentukan kekuatan dan keawetan beton yang terbentuk. Bahan penyusun yang diuraikan pada bagian ini meliputi semen, agregat, air, dan bahan tambah.

1. Semen

   Semen merupakan bahan pengikat yang memiliki kemampuan mengeras baik di udara maupun di dalam air, sehingga menjadi bahan utama dalam pembuatan beton dan mortar. Karena sifat mekanisnya yang kuat dan stabil, semen Portland merupakan jenis semen yang paling umum digunakan dalam berbagai pekerjaan konstruksi. Dalam penggunaannya, semen harus memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam standar yang berlaku agar dapat menghasilkan beton dengan mutu yang diinginkan.

   Menurut SNI 15-2049-2004, semen Portland dibagi menjadi lima jenis berdasarkan tujuan penggunaannya, yaitu sebagai berikut:

   a. Semen Portland Tipe I, digunakan untuk keperluan umum tanpa persyaratan khusus.

b. Semen Portland Tipe II, digunakan pada kondisi yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat sedang dan panas hidrasi sedang.
c. Semen Portland Tipe III, digunakan pada kondisi yang memerlukan kekuatan awal tinggi.
d. Semen Portland Tipe IV, digunakan pada kondisi yang memerlukan panas hidrasi rendah.
e. Semen Portland Tipe V, digunakan pada kondisi yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Kelima jenis semen tersebut merupakan semen Portland murni. Selain itu, semen yang beredar luas di pasaran Indonesia sebagian besar merupakan semen campuran (*blended cement*), yaitu Semen Portland Pozzolan (PPC) dan Semen Portland Komposit (PCC). Kedua jenis semen tersebut diproduksi dengan menggiling klinker semen bersama bahan pozzolanik atau bahan pengisi, seperti *fly ash*, trass, dan batu kapur, sehingga sebagian kandungan klinker di dalamnya tergantikan oleh bahan tersebut.

Penggantian sebagian klinker menyebabkan kandungan trikalsium silikat (C_3S) per satuan berat semen campuran menjadi lebih rendah dibandingkan semen Portland murni. Akibatnya, panas hidrasi dan kuat tekan pada umur awal cenderung lebih rendah, namun kekuatan terus meningkat pada umur lanjut karena berlangsungnya reaksi pozzolanik. Perbedaan pola perkembangan kekuatan inilah yang menyebabkan angka konversi beton dengan semen campuran tidak selalu sama dengan angka konversi PBI-1971 yang disusun berdasarkan penggunaan semen Portland biasa.

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen Portland Komposit (PCC), sehingga beton yang diteliti mengandung dua sumber bahan pozzolanik, yaitu bahan pozzolanik yang telah terkandung di dalam PCC dan *fly ash* kelas C sebesar 12% yang disubstitusikan terhadap berat semen. Hal ini menjadi pertimbangan dalam menafsirkan hasil analisis angka konversi pada BAB V.

Selain berdasarkan jenisnya, kinerja semen dalam beton sangat dipengaruhi oleh komposisi senyawa kimianya, terutama trikalsium silikat (C_3S) dan

dikalsium silikat (C_2S). Kedua senyawa ini berperan dalam proses hidrasi semen yang menghasilkan senyawa pengikat utama dalam beton.

Reaksi hidrasi semen terjadi ketika semen bereaksi dengan air dan menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai produk utama serta kalsium hidroksida $Ca(OH)_2$ sebagai produk samping. Secara umum, reaksi tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \rightarrow (3CaO.2SiO_2.3H_2O) + 3Ca(OH)_2$$
$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \rightarrow (3CaO.2SiO_2.3H_2O) + Ca(OH)_2$$

Di antara produk hidrasi tersebut, C-S-H merupakan senyawa yang memberikan kekuatan pada beton, sedangkan $Ca(OH)_2$ hampir tidak berkontribusi terhadap kekuatan. Dengan demikian, seberapa jauh reaksi hidrasi telah berlangsung menjadi penentu utama besarnya kuat tekan yang dicapai beton pada suatu umur.

Laju reaksi hidrasi berbeda-beda bergantung pada komposisi senyawa di dalam semen. Semen yang kaya C_3S, misalnya tipe III, melepaskan kekuatan lebih cepat pada umur awal. Sebaliknya, semen dengan panas hidrasi rendah seperti tipe IV memperoleh kekuatannya secara lebih bertahap.

Berdasarkan hal tersebut, jenis dan karakteristik semen yang digunakan akan memengaruhi pola perkembangan kuat tekan beton terhadap umur. Hal ini menjadi penting dalam analisis hubungan antara umur beton dan kuat tekan, terutama pada beton dengan variasi campuran tertentu.

2. Agregat

Agregat merupakan material penyusun beton dengan proporsi terbesar, yaitu sekitar 60%–75% dari volume beton. Agregat berfungsi sebagai bahan pengisi yang memberikan stabilitas dimensi, kekuatan, serta mengurangi penyusutan pada beton. Oleh karena itu, kualitas agregat sangat berpengaruh terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton yang dihasilkan.

Berdasarkan ukuran butirannya, agregat dibedakan menjadi agregat halus dan agregat kasar. Agregat halus umumnya berupa pasir dengan ukuran butir maksimum 4,75 mm (No.4), sedangkan agregat kasar berupa kerikil atau batu

pecah dengan ukuran butir lebih besar dari 4,75 mm. Penggunaan kedua jenis agregat ini harus memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam standar agar menghasilkan beton dengan mutu yang baik.

a. Agregat Halus

Menurut SNI 1970:2016, agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dengan ukuran butir maksimum 4,75 mm. Agregat halus berperan penting dalam menentukan *workability*, kekuatan, dan keawetan beton.

Berdasarkan ASTM C33, agregat halus harus memenuhi beberapa persyaratan, antara lain:

1) Berasal dari material alami dengan kekasaran permukaan yang baik.
2) Butiran keras, tajam, dan tidak mudah hancur (*durable*).
3) Tidak mengandung bahan yang dapat mengganggu proses hidrasi semen.
4) Memiliki gradasi yang baik dan tidak termasuk dalam kategori *gap graded aggregate*.
5) Memiliki bentuk butiran yang mendukung kepadatan campuran beton.

Gradasi agregat halus merupakan salah satu faktor penting dalam campuran beton. Gradasi yang baik akan menghasilkan distribusi ukuran butiran yang merata sehingga rongga antar partikel dapat diminimalkan. Hal ini akan meningkatkan kepadatan beton dan mengurangi kebutuhan air serta semen dalam campuran.

Selain itu, karakteristik agregat halus juga dapat dinyatakan melalui modulus kehalusan (*fineness modulus*), yang menunjukkan distribusi ukuran butiran dalam agregat. Nilai modulus kehalusan yang sesuai akan menghasilkan beton dengan *workability* yang baik serta kekuatan yang optimal.

b. Agregat Kasar

Menurut SNI 03-2834-2000, agregat kasar adalah kerikil hasil disintegrasi alami batuan atau batu pecah yang diperoleh dari proses pemecahan batu dengan ukuran butir antara 5 mm sampai 40 mm. Agregat kasar berfungsi

sebagai kerangka utama dalam beton yang memberikan kekuatan dan kestabilan struktur.

Persyaratan agregat kasar dalam campuran beton antara lain:

1) Memiliki kekuatan yang cukup dan tahan terhadap pengaruh cuaca.
2) Tidak mengandung lumpur lebih dari 1%, dan harus dibersihkan jika melebihi batas tersebut.
3) Bebas dari bahan organik atau zat lain yang dapat mengganggu kualitas beton.
4) Memiliki ukuran maksimum yang sesuai dengan dimensi elemen beton dan jarak antar tulangan.
5) Memenuhi persyaratan gradasi yang telah ditentukan.

Ukuran maksimum agregat kasar berpengaruh terhadap *workability* dan kekuatan beton. Secara umum, ukuran maksimum agregat tidak boleh melebihi 1/5 dimensi terkecil cetakan, 1/3 ketebalan pelat, atau 3/4 jarak bersih antar tulangan. Pemilihan ukuran agregat yang tepat akan menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata dalam beton.

Gradasi agregat kasar memengaruhi kepadatan beton serta jumlah rongga yang terbentuk dalam campuran. Agregat kasar dengan gradasi yang baik akan menghasilkan beton dengan kuat tekan yang lebih tinggi karena distribusi beban yang lebih merata. Sebaliknya, gradasi yang buruk dapat menyebabkan konsentrasi tegangan dan menurunkan kekuatan beton.

Secara keseluruhan, agregat merupakan unsur utama dalam menentukan kuat tekan beton melalui pengaruhnya terhadap kepadatan, porositas, dan distribusi tegangan dalam beton. Gradasi yang baik serta kombinasi agregat halus dan kasar yang tepat akan menghasilkan beton dengan struktur yang lebih padat dan kuat.

Selain itu, karakteristik agregat juga memengaruhi kebutuhan air dalam campuran beton yang berkaitan langsung dengan rasio air semen. Rasio air semen yang optimal akan menghasilkan beton dengan perkembangan kuat tekan yang lebih baik terhadap umur. Oleh karena itu, pemilihan dan

pengendalian kualitas agregat menjadi faktor penting dalam analisis hubungan antara umur beton dan kuat tekan beton.

3. Air

Air merupakan salah satu komponen utama dalam campuran beton yang berfungsi sebagai media reaksi kimia dalam proses hidrasi semen serta sebagai faktor yang memengaruhi kemudahan pengerjaan (*workability*) beton. Tanpa adanya air yang cukup, reaksi hidrasi tidak dapat berlangsung secara optimal sehingga beton tidak dapat mencapai kekuatan yang direncanakan. Oleh karena itu, kualitas dan kuantitas air dalam campuran beton harus dikendalikan dengan baik.

Menurut ketentuan dalam SNI 2847:2019, air yang digunakan dalam campuran beton harus bersih dan bebas dari zat-zat yang dapat merugikan beton, seperti minyak, asam, alkali, garam, dan bahan organik dalam jumlah yang berlebihan. Secara umum, air yang layak untuk diminum dapat digunakan sebagai air pencampur beton. Penggunaan air yang tidak memenuhi persyaratan dapat mengganggu proses hidrasi semen serta menurunkan kekuatan dan durabilitas beton.

Selain kualitas, jumlah air dalam campuran beton juga menjadi faktor yang sangat penting. Air yang digunakan dalam beton tidak seluruhnya bereaksi dengan semen, melainkan sebagian akan menguap atau tertinggal dalam bentuk rongga kapiler setelah beton mengeras. Rongga ini akan meningkatkan porositas beton yang berpengaruh terhadap penurunan kuat tekan dan ketahanan beton terhadap lingkungan.

Rasio air terhadap semen *(water-cement ratio)* merupakan parameter utama dalam menentukan kuat tekan beton. Berdasarkan SNI 2847:2019, nilai rasio air semen tidak ditetapkan secara tunggal, melainkan dibatasi maksimum sesuai dengan kondisi lingkungan dan kebutuhan durabilitas. Semakin kecil nilai rasio air semen, maka kuat tekan beton yang dihasilkan akan semakin tinggi. Faktor air-semen pada penelitian ini ditetapkan sebesar 0,50 berdasarkan hasil penentuan kuat tekan rata-rata target menurut SNI 03-2834-

2000, dan nilai tersebut lebih kecil daripada batas maksimum 0,60 untuk beton di lingkungan non-korosif.

4. Bahan Aditif

Secara umum, bahan aditif dalam beton dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama, yaitu bahan aditif kimia dan bahan aditif mineral.

a. Bahan Aditif Kimia

Bahan aditif kimia digunakan untuk memodifikasi sifat beton pada kondisi segar maupun saat proses pengerasan berlangsung. Berdasarkan fungsinya, bahan aditif kimia terdiri dari beberapa jenis, antara lain:

1) *Water reducer*, berfungsi mengurangi kebutuhan air tanpa mengurangi *workability* beton.
2) *Superplasticizer*, meningkatkan *workability* secara signifikan tanpa menambah air.
3) *Accelerator*, mempercepat proses hidrasi dan waktu ikat beton.
4) *Retarder*, memperlambat waktu ikat beton untuk kondisi tertentu.
5) *Air entraining agent*, meningkatkan ketahanan beton terhadap siklus beku-cair.

Penggunaan bahan aditif kimia harus memperhatikan dosis yang tepat, karena penggunaan yang berlebihan dapat menyebabkan perubahan sifat beton yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pemakaian bahan aditif kimia harus mengacu pada rekomendasi pabrikan serta standar yang berlaku.

b. Bahan Aditif Mineral

Bahan aditif mineral merupakan material tambahan yang umumnya bersifat pozzolanik atau memiliki sifat semen tambahan. Bahan ini digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik serta durabilitas beton melalui reaksi kimia tambahan dalam beton. Contoh bahan aditif mineral antara lain *fly ash*, *silica fume*, dan *slag*.

Bahan aditif mineral bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa tambahan berupa kalsium silikat hidrat (C-S-H). Reaksi ini dikenal sebagai reaksi pozzolanik yang

berlangsung lebih lambat dibandingkan reaksi hidrasi utama. Oleh karena itu, penggunaan bahan aditif mineral dapat memengaruhi perkembangan kuat tekan beton terhadap umur.

Penggunaan bahan aditif dalam beton memiliki pengaruh langsung terhadap perkembangan kuat tekan beton. Bahan aditif kimia seperti *superplasticizer* dapat menurunkan rasio air semen sehingga meningkatkan kuat tekan beton, sedangkan *accelerator* dan *retarder* memengaruhi laju perkembangan kekuatan beton pada umur awal.

Sementara itu, bahan aditif mineral berperan dalam meningkatkan kekuatan beton pada umur lanjut melalui reaksi pozzolanik yang menghasilkan tambahan senyawa C-S-H. Hal ini menyebabkan beton dengan bahan aditif mineral umumnya memiliki kuat tekan awal yang lebih rendah, namun mengalami peningkatan yang signifikan pada umur lanjut.

Dari berbagai bahan tambah yang telah diuraikan di atas, bahan tambah yang digunakan dalam penelitian ini hanya bahan tambah mineral berupa *fly ash* kelas C sebesar 12% dari berat semen. Bahan tambah kimia, seperti *water reducer*, *superplasticizer*, *accelerator*, *retarder*, dan *air entraining agent*, serta bahan tambah mineral lain, seperti silica fume dan slag, tidak digunakan. Uraian mengenai bahan tambah tersebut disajikan sebagai dasar teori untuk menjelaskan kedudukan *fly ash* di antara jenis bahan tambah lainnya.

3.1.2 Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan beton (*curing*) merupakan tindakan menjaga ketersediaan air dan kestabilan suhu beton setelah pengecoran agar reaksi hidrasi semen dapat berlangsung secara berkelanjutan. Air yang hilang akibat penguapan menyebabkan reaksi hidrasi terhenti sebelum tuntas, sehingga pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berperan memberikan kekuatan pada beton menjadi tidak optimal. Oleh karena itu, perawatan beton merupakan salah satu faktor yang menentukan pola perkembangan kuat tekan beton terhadap umur, selain jenis semen dan proporsi campuran.

Metode perawatan beton yang umum digunakan meliputi perendaman penuh (*immersion curing*), penyiraman atau penggenangan permukaan, penutupan dengan bahan penahan penguapan seperti karung basah dan lembaran plastik, penggunaan bahan kimia pembentuk lapisan kedap (*curing compound*), serta perawatan dengan uap bertekanan (*steam curing*) yang umumnya digunakan pada produksi beton pracetak. Untuk benda uji di laboratorium, perawatan pada umumnya dilakukan dengan perendaman penuh dalam air agar kondisi kelembapan seluruh benda uji seragam sehingga hasil pengujian pada berbagai umur dapat dibandingkan secara setara.

Metode perawatan berpengaruh langsung terhadap kuat tekan beton. Perawatan yang tidak memadai menyebabkan porositas beton meningkat dan kuat tekan menurun, dengan penurunan yang paling terasa pada umur awal. Pada beton yang mengandung *fly ash*, pengaruh perawatan menjadi lebih besar karena reaksi pozzolanik antara silika pada *fly ash* dan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen berlangsung lebih lambat serta memerlukan ketersediaan air dalam jangka waktu yang lebih panjang dibandingkan reaksi hidrasi semen. Perawatan yang terhenti terlalu dini akan menghambat reaksi tersebut, sehingga pola perkembangan kuat tekan dan angka konversi yang dihasilkan dapat berubah.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, dalam penelitian ini metode perawatan tidak dijadikan variabel yang diubah, melainkan dijaga tetap untuk seluruh benda uji, yaitu perendaman penuh dalam air pada suhu ruang. Dengan demikian, perbedaan kuat tekan yang teramati antar umur pengujian dapat diasumsikan berasal dari perbedaan umur beton, bukan dari perbedaan cara perawatan. Durasi perendaman efektif dihitung dari waktu pembongkaran cetakan sampai satu hari sebelum umur pengujian. Jika pembongkaran cetakan dilakukan pada umur satu hari dan pengondisian di luar air dilakukan selama satu hari, durasi perendaman dapat dituliskan sebagai berikut.

$t_r = t_u - t_n - t_k$

Dengan:

t_r = durasi perendaman,

t_u = umur pengujian,

t_n = waktu benda uji berada di dalam cetakan, yaitu satu hari, dan

t_k = waktu pengondisian di luar air sebelum pengujian, yaitu satu hari.

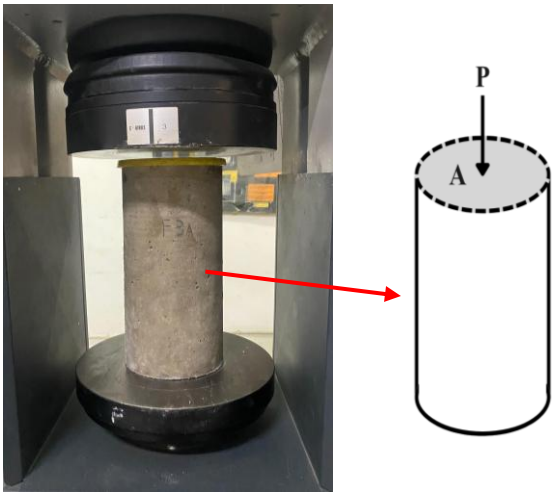
3.2 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah besarnya gaya tekan per satuan luas yang mampu ditahan beton sebelum mengalami keruntuhan. Parameter ini digunakan sebagai ukuran utama kinerja beton karena beton pada dasarnya direncanakan untuk memikul beban tekan. Oleh sebab itu, kuat tekan menjadi acuan baik pada tahap perencanaan maupun pada tahap evaluasi mutu struktur beton.

Pada perencanaan struktur, kekuatan tersebut dinyatakan dengan kuat tekan rencana (f'c) dan diverifikasi melalui pengujian benda uji pada umur 28 hari. Umur tersebut dipilih sebagai umur standar karena pada saat itu beton telah memperoleh sebagian besar kekuatannya, sehingga hasil pengujiannya dapat dipandang mewakili kekuatan jangka panjang beton.

3.2.1 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan membebani benda uji hingga runtuh sehingga nilai kuat tekan diperoleh secara langsung. Di Indonesia pengujian ini mengacu pada SNI, sedangkan pada tataran internasional digunakan ASTM C39/C39M. Alat uji tekan yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Uji Kuat Tekan Beton

Pengujian dilakukan dengan menggunakan benda uji berbentuk silinder, umumnya berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Benda uji yang telah mencapai umur tertentu kemudian diberikan beban tekan secara bertahap hingga mengalami keruntuhan. Nilai kuat tekan beton dihitung berdasarkan perbandingan antara beban maksimum yang diterima dengan luas penampang benda uji. Kuat tekan beton dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Dengan:

$f'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang (mm^2)

3.2.2 Faktor yang Memengaruhi Perkembangan Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berkaitan, antara lain:

1. Rasio air-semen (*w/c ratio*)

   Merupakan faktor utama yang memengaruhi kuat tekan beton. Semakin kecil rasio air semen, maka semakin tinggi kuat tekan beton yang dihasilkan.

2. Kualitas material penyusun

   Kualitas semen, agregat, dan air sangat menentukan kekuatan beton. Material yang tidak memenuhi standar dapat menurunkan kuat tekan beton.

3. Proses pencampuran dan pemadatan

   Pencampuran yang tidak homogen dan pemadatan yang kurang baik dapat menyebabkan rongga dalam beton yang menurunkan kekuatan.

4. Perawatan beton (*curing*)

   Proses *curing* yang baik akan memastikan reaksi hidrasi berlangsung optimal sehingga meningkatkan kuat tekan beton.

5. Umur beton

   Kuat tekan beton meningkat seiring bertambahnya umur akibat berlangsungnya reaksi hidrasi semen.

Seiring bertambahnya umur, kuat tekan beton mengalami peningkatan akibat berlangsungnya proses hidrasi semen secara bertahap. Pada umur awal, peningkatan kuat tekan terjadi secara cepat, kemudian melambat pada umur selanjutnya.

Perkembangan kuat tekan ini menunjukkan bahwa beton tidak langsung mencapai kekuatan maksimum pada saat awal, melainkan memerlukan waktu tertentu untuk mencapai kekuatan rencana. Oleh karena itu, hubungan antara umur beton dan kuat tekan menjadi aspek penting dalam analisis perilaku beton.

3.3 Perkembangan Kuat Tekan Beton terhadap Umur

Kuat tekan beton merupakan sifat mekanis utama yang berkembang seiring bertambahnya umur beton akibat berlangsungnya proses hidrasi antara semen dan air. Proses ini menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berperan sebagai pengikat utama dalam beton dan menentukan kekuatan beton secara keseluruhan.

Perkembangan kuat tekan beton terhadap umur tidak bersifat linear, melainkan mengikuti pola tertentu yang dipengaruhi oleh laju reaksi hidrasi. Pada umur awal, peningkatan kuat tekan berlangsung relatif cepat, kemudian melambat seiring berjalannya waktu.

Menurut American Concrete Institute melalui ACI 209R-92, perkembangan kuat tekan beton terhadap umur dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi empiris yang menggambarkan hubungan antara umur beton dan rasio kuat tekan terhadap umur 28 hari. Secara umum, perkembangan kuat tekan beton dapat dibagi menjadi beberapa tahap:

1. Umur awal (1–7 hari)

   Pada tahap ini, reaksi hidrasi berlangsung sangat cepat, terutama akibat dominasi senyawa trikalsium silikat (C_3S). Beton mulai memperoleh kekuatan awal yang signifikan, namun belum mencapai kekuatan rencana.

2. Umur menengah (7–28 hari)

   Peningkatan kuat tekan masih terjadi, tetapi dengan laju yang lebih lambat dibandingkan umur awal. Pada tahap ini, beton mendekati kekuatan rencana (f'c).

3. Umur lanjut (>28 hari)

   Reaksi hidrasi terus berlangsung, terutama oleh dikalsium silikat (C_2S), sehingga kuat tekan beton masih dapat meningkat meskipun dalam laju yang kecil.

Nilai angka konversi yang menggambarkan pola perkembangan kuat tekan beton normal menurut PBI-1971 disajikan pada Tabel 3.2. Pola perkembangan ini menunjukkan bahwa sebagian besar kekuatan beton telah terbentuk sebelum umur 28 hari, sehingga umur 28 hari digunakan sebagai standar dalam perencanaan dan evaluasi mutu beton.

Pola perkembangan kekuatan tersebut berlaku untuk beton normal. Apabila sebagian semen digantikan oleh bahan pozzolanik, pola tersebut berubah karena adanya reaksi tambahan yang berlangsung lebih lambat. Perubahan pola tersebut diuraikan lebih lanjut pada sub bab mengenai *fly ash* dan angka konversi kuat tekan beton.

3.4 *Fly ash*

Fly ash adalah abu halus yang terbawa gas buang pada pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan kemudian ditangkap oleh alat penyaring debu. Butirannya sangat halus serta banyak mengandung silika dioksida (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3). Kandungan inilah yang membuat *fly ash* bersifat pozzolanik, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) sisa hidrasi semen dan menghasilkan senyawa pengikat tambahan di dalam beton. Persyaratan mutu *fly ash* untuk campuran beton di Indonesia mengacu pada SNI 2460:2014. Standar tersebut mengelompokkan sekaligus menetapkan batasan mutu yang harus dipenuhi sebelum material tersebut digunakan dalam beton.

3.4.1 Klasifikasi *Fly ash*

Fly ash diklasifikasikan berdasarkan komposisi kimianya, terutama kandungan silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3). Klasifikasi *fly ash* berdasarkan SNI 2460:2014 dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Persyaratan Kimia SNI 2460:2014

Uraian	Kelas		
	N	F	C
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3, min, %	70	70	50
SO_3, maks, %	4	5	5
Kadar air, maks, %	3	3	3
Hilang pijar, maks, %	10	6	6

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2014)

1. *Fly ash* kelas N

   Fly ash kelas N merupakan pozzolan alami atau material mentah yang dapat mengalami proses kalsinasi untuk meningkatkan sifat reaktifnya. Material ini dapat berasal dari sumber alami seperti tanah diatom, batuan tuf, atau material vulkanik lainnya, serta material yang telah diproses seperti lempung atau serpih. *Fly ash* kelas N digunakan untuk memberikan sifat pozzolanik tertentu dalam campuran beton.

2. *Fly ash* kelas F

   Fly ash kelas F berasal dari pembakaran batu bara dengan kandungan kalsium yang relatif rendah sehingga sifatnya murni pozzolanik. Material ini tidak dapat mengeras dengan sendirinya apabila dicampur air, melainkan harus memperoleh kalsium hidroksida dari hidrasi semen terlebih dahulu agar dapat membentuk senyawa pengikat.

3. *Fly ash* kelas C

   Fly ash kelas C mengandung kalsium yang lebih tinggi sehingga selain pozzolanik juga bersifat sementisius. Material ini dapat bereaksi dengan air dan menghasilkan senyawa pengikat tanpa harus sepenuhnya menunggu kalsium hidroksida dari hidrasi semen, sehingga kontribusinya terhadap kekuatan dapat muncul lebih awal (Neville, 2011).

Perbedaan kandungan kalsium antara kelas F dan kelas C tersebut menyebabkan mekanisme pembentukan kekuatan pada keduanya tidak sama. Kelas F sepenuhnya bergantung pada ketersediaan kalsium hidroksida hasil hidrasi

semen, sedangkan kelas C tidak sepenuhnya bergantung pada senyawa tersebut. Perbedaan mekanisme inilah yang mendasari perbedaan pengaruh kedua kelas *fly ash* terhadap perkembangan kuat tekan beton.

3.4.2 Reaksi Pozzolanik *Fly ash*

Kontribusi *fly ash* terhadap kekuatan beton berlangsung melalui reaksi pozzolanik, yaitu reaksi antara silika dioksida (SiO_2) pada *fly ash* dan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen, yang menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) (Neville, 2011). Reaksi tersebut secara sederhana dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$SiO2+Ca(OH)_2+H_2O \rightarrow C\text{-}S\text{-}H$$

C-S-H yang dihasilkan reaksi pozzolanik menambah kekuatan sekaligus memadatkan struktur pori beton. Akan tetapi, reaksi ini berjalan lebih lambat daripada hidrasi semen sehingga pada umur awal beton dengan *fly ash* umumnya masih tertinggal kekuatannya. Ketertinggalan tersebut berangsur terkejar seiring bertambahnya umur beton, bahkan dapat terlampaui pada umur lanjut (Neville, 2011).

Ketertinggalan kekuatan pada umur awal tersebut berlaku bagi *fly ash* yang bersifat pozzolanik murni. Pada *fly ash* kelas C, sebagian kekuatan terbentuk melalui reaksi hidrasi senyawa kalsium yang terkandung di dalam *fly ash* itu sendiri, sehingga ketertinggalan kekuatan pada umur awal dapat berkurang atau bahkan tidak teramati.

3.4.3 Pengaruh *Fly ash*

Penggunaan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen memberikan pengaruh terhadap sifat beton serta perkembangan kuat tekan terhadap umur. Pengaruh tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengaruh terhadap beton segar

   Fly ash memiliki ukuran partikel yang halus dan bentuk yang relatif bulat sehingga dapat meningkatkan *workability* beton. Selain itu, penggunaan *fly ash* juga dapat mengurangi kebutuhan air dalam campuran, sehingga mempermudah proses pengerjaan dan pemadatan beton di lapangan.

2. Pengaruh terhadap beton keras

   Pada beton yang telah mengeras, *fly ash* berkontribusi dalam meningkatkan durabilitas beton. Reaksi pozzolanik menghasilkan senyawa tambahan berupa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang mengisi rongga dalam beton, sehingga mengurangi porositas dan permeabilitas serta meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan agresif.

3. Pengaruh terhadap kuat tekan umur awal

   Pengaruh *fly ash* terhadap kuat tekan umur awal tidak bersifat tunggal, melainkan bergantung pada kelas *fly ash* yang digunakan. Pada *fly ash* kelas F yang bersifat pozzolanik murni, penggunaannya cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan pada umur awal (3 sampai 7 hari) karena reaksi pozzolanik berlangsung lebih lambat dibandingkan reaksi hidrasi semen, sehingga pembentukan kekuatan beton belum optimal pada tahap awal (Neville, 2011). Kecenderungan serupa teramati pada beton yang menggunakan semen campuran seperti PCC, yang sebagian klinkernya telah tergantikan oleh bahan pozzolanik hasil penggilingan bersama, sebagaimana dilaporkan oleh Nahak dkk. (2025). Sebaliknya, *fly ash* kelas C memiliki kandungan kalsium oksida yang tinggi sehingga bersifat sementisius sekaligus pozzolanik, sebagaimana telah diuraikan pada subbab mengenai klasifikasi *fly ash*, sehingga kontribusinya terhadap kekuatan dapat muncul sejak umur awal tanpa sepenuhnya menunggu kalsium hidroksida hasil hidrasi semen. Oleh karena itu, penurunan kuat tekan pada umur awal tidak selalu terjadi pada beton dengan substitusi *fly ash* kelas C, dan pola yang sebenarnya terbentuk perlu diverifikasi melalui pengujian.

4. Pengaruh terhadap pola perkembangan kuat tekan.

   Seiring bertambahnya umur beton, reaksi pozzolanik mulai memberikan kontribusi terhadap peningkatan kuat tekan, sehingga beton dengan fly ash memiliki pola perkembangan kuat tekan yang berbeda dibandingkan beton normal. Pada fly ash yang bersifat pozzolanik murni, peningkatan kuat tekan pada umur awal berlangsung lebih lambat, kemudian pada umur lanjut (lebih dari 28 hari) kuat tekannya dapat menyamai atau bahkan melampaui beton

normal (Neville, 2011). Pada fly ash kelas C, kontribusi terhadap kekuatan telah muncul sejak umur awal sehingga pola perkembangannya tidak selalu memperlihatkan keterlambatan tersebut.

Fly ash yang digunakan pada penelitian adalah *fly ash* kelas C. *Fly ash* kelas C dapat dilihat pada sub bab 4.4 Gambar 4.5.

3.5 Angka Konversi Kuat Tekan Beton

Angka konversi kuat tekan beton merupakan faktor yang digunakan untuk memperkirakan nilai kuat tekan beton pada umur tertentu terhadap kuat tekan pada umur standar, yaitu 28 hari. Dalam praktik teknik sipil, penggunaan angka konversi sangat penting karena hasil pengujian kuat tekan beton seringkali dilakukan pada umur awal (3, 7, atau 14 hari), sementara kuat tekan rencana umumnya ditetapkan pada umur 28 hari.

Secara umum, angka konversi kuat tekan beton dinyatakan sebagai rasio antara kuat tekan beton pada umur tertentu terhadap kuat tekan beton pada umur 28 hari, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$k_t = \frac{f'c_{(t)}}{f'c_{(28)}}$$

Dengan:

k_t = Faktor konversi pada umur t

$f'c_{(t)}$ = kuat tekan beton pada umur t (MPa)

$f'c_{(28)}$ = Kuat tekan beton pada umur 28 hari (MPa)

Di Indonesia, acuan utama angka konversi kuat tekan beton adalah Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI-1971). Standar ini didasarkan pada beton dengan semen Portland biasa (*Ordinary Portland Cement*/OPC). Nilai faktor konversi menurut PBI-1971 dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3. 2 Nilai Faktor Konversi Menurut PBI-1971

Umur beton (hari)	3	7	14	21	28	90	365
Semen Portland biasa	0,40	0,65	0,88	0,95	1,00	1,20	1,35
Semen Portland dengan kekuatan awal yang tinggi	0,55	0,75	0,90	0,95	1,00	1,15	1,20

Sumber: Departemen Pekerjaan Umum (1971)

Meskipun PBI-1971 masih digunakan sebagai acuan di lapangan, standar ini memiliki keterbatasan karena:

1. Disusun berdasarkan beton dengan semen OPC.
2. Tidak mempertimbangkan penggunaan bahan tambahan.
3. Tidak mencerminkan perkembangan teknologi material beton saat ini.

Saat ini, penggunaan semen *Portland Composite Cement* (PCC) semakin umum digunakan dalam konstruksi modern. Material tersebut memiliki karakteristik reaksi yang berbeda dibandingkan OPC, sehingga memengaruhi pola perkembangan kuat tekan beton.

Berdasarkan penelitian oleh Nahak dkk. (2025), diperoleh nilai faktor konversi beton dengan semen PCC tipe I seperti pada Tabel 3.3 berikut:

Tabel 3. 3 Nilai Faktor Konversi Berdasarkan Penelitian Nahak dkk. (2025)

Umur (hari)	3	7	14	21	28	56	90
PCC Tipe 1	0,32	0,51	0,77	0,84	1,00	1,08	1,20

Sumber: Nahak dkk. (2025)

Perbedaan ini menunjukkan bahwa beton dengan PCC mengalami perkembangan kuat tekan yang lebih lambat dibandingkan beton dengan OPC tetapi pertumbuhan kuat tekannya lebih stabil hingga jangka panjang.

3.6 Analisis Statistik Data Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton merupakan data yang memiliki keragaman, baik karena keragaman material dan pelaksanaan pengadukan maupun karena keragaman pelaksanaan pengujian. ACI Committee 214 (2011) menyatakan bahwa keragaman hasil uji kuat tekan tidak dapat dihindari sehingga penafsirannya harus

dilakukan dengan prosedur statistik, dan Badan Standardisasi Nasional (2002) mengatur tata cara evaluasi hasil uji kekuatan beton dengan pendekatan yang sama. Oleh karena itu, sebelum digunakan untuk menghitung angka konversi, data kuat tekan perlu diolah secara statistik.

Pengolahan tersebut mencakup penetapan kriteria mutu yang digunakan sebagai acuan penilaian data, evaluasi kelayakan kelompok pengadukan (*batch*) terhadap kuat tekan rencana, penyaringan data pencilan pada tingkat benda uji tunggal, penentuan ukuran pemusatan dan sebaran data, pemodelan perkembangan kuat tekan terhadap umur, serta pengujian signifikansi perbedaan terhadap angka konversi acuan.

3.6.1 Kuat Tekan Rencana dan Kuat Tekan Rata-rata Target

Penilaian mutu beton hasil pengujian memerlukan kejelasan mengenai besaran mana yang berkedudukan sebagai kriteria penerimaan dan besaran mana yang hanya berkedudukan sebagai sasaran perencanaan. Terdapat dua besaran yang sering dipertukarkan, yaitu kuat tekan rencana atau kuat tekan yang disyaratkan (f'c) dan kuat tekan rata-rata perlu atau kuat tekan rata-rata target (f'cr). Kuat tekan rencana adalah nilai kuat tekan yang dijadikan dasar perhitungan kekuatan struktur dan sekaligus menjadi dasar penerimaan beton, sedangkan kuat tekan rata-rata target adalah nilai yang harus dijadikan sasaran pada tahap perencanaan campuran agar peluang beton yang diproduksi berada di bawah kuat tekan rencana cukup kecil (Badan Standardisasi Nasional, 2000; Badan Standardisasi Nasional, 2019).

SNI 03-2834-2000 menetapkan kuat tekan rata-rata target sebagai penjumlahan kuat tekan rencana dengan suatu nilai tambah atau margin, sebagaimana dinyatakan pada persamaan berikut.

$$f'cr = f'c + M$$

$$M = 1{,}64 \times s$$

Dengan:

f'cr = Kuat tekan rata-rata target pada perencanaan campuran (MPa)

f'c = Kuat tekan rencana atau kuat tekan yang disyaratkan (MPa)

M = Nilai tambah atau margin perencanaan campuran (MPa)

k = Faktor statistik, bernilai 1,64 untuk peluang kegagalan 5%

s = Deviasi standar rencana (MPa)

Tetapan 1,64 pada Persamaan 3.5 menunjukkan bahwa kuat tekan rata-rata yang ditargetkan ditetapkan agar peluang hasil uji berada di bawah kuat tekan rencana tidak lebih dari 5%. Besaran tersebut karena itu merupakan sasaran perencanaan campuran yang disusun untuk melindungi kuat tekan rencana, bukan mutu yang harus dicapai oleh beton yang telah mengeras.

Nilai deviasi standar rencana pada Persamaan 3.5 ditetapkan menurut ketersediaan data hasil uji terdahulu. Badan Standardisasi Nasional (2000) mengatur tiga keadaan berikut ini.

1. Apabila tersedia sekurang-kurangnya 30 hasil uji berurutan yang mewakili bahan, prosedur pengawasan mutu, dan kondisi produksi yang serupa, deviasi standar dihitung langsung dari data tersebut.
2. Apabila hanya tersedia 15 sampai 29 hasil uji berurutan, deviasi standar yang dihitung dari data tersebut dikalikan faktor pengali, yaitu 1,16 untuk 15 hasil uji, 1,08 untuk 20 hasil uji, 1,03 untuk 25 hasil uji, dan 1,00 untuk 30 hasil uji atau lebih.
3. Apabila data hasil uji belum tersedia, kuat tekan rata-rata yang ditargetkan diambil tidak kurang dari nilai pada Persamaan 3.6.

   $f'cr \geq f'c + 12$ MPa

Ketiga ketentuan tersebut memperlihatkan bahwa besarnya nilai tambah di atas kuat tekan rencana ditentukan oleh ketersediaan data hasil uji terdahulu, bukan oleh mutu beton yang dihasilkan. Faktor pengali pada keadaan kedua mengecil seiring bertambahnya jumlah data hingga bernilai satu, sehingga nilai tambah yang disyaratkan menyusut seiring bertambahnya pengetahuan mengenai keragaman produksi yang sebenarnya. Ketentuan pada Persamaan 3.6, yang berlaku ketika data hasil uji belum tersedia sama sekali, karena itu merupakan keadaan paling konservatif di antara ketiganya.

Penilaian mutu beton yang telah mengeras dilakukan terhadap kuat tekan rencana, yaitu kuat tekan rata-rata hasil uji tidak boleh kurang dari kuat tekan rencana (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Kriteria tersebut tidak mengacu pada kuat tekan rata-rata yang ditargetkan. Dengan demikian, kuat tekan rata-rata

hasil pengujian yang belum mencapai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan tetapi telah melampaui kuat tekan rencana tetap dinyatakan memenuhi mutu yang disyaratkan. Keadaan tersebut merupakan akibat langsung dari ketentuan konservatif yang berlaku ketika data hasil uji terdahulu belum tersedia, bukan indikasi kegagalan mutu.

3.6.2 Evaluasi Kelayakan *Batch* terhadap Kuat Tekan Rencana

Satu *batch* mewakili seluruh variasi umur, sehingga seluruh benda uji yang berasal darinya memiliki komposisi campuran, proses pencetakan, pemadatan, dan riwayat perawatan yang sama. Penyimpangan pelaksanaan pada satu *batch* karena itu tidak terbatas pada satu benda uji, melainkan terbawa pada seluruh benda uji *batch* tersebut di semua umur pengujian. ACI Committee 214 (2011) menyatakan bahwa hasil uji yang tidak mewakili beton yang sedang ditinjau tidak boleh disertakan dalam analisis statistik hasil uji. Oleh karena itu, kelompok pengadukan dievaluasi sebagai satu kesatuan sebelum data diolah pada tingkat benda uji tunggal.

Kelayakan suatu *batch* dinilai terhadap kuat tekan rencana, yaitu mutu yang menjadi sasaran seluruh benda uji dalam penelitian ini. Kuat tekan tertinggi yang dicapai suatu *batch* pada rentang umur yang ditinjau dinyatakan pada Persamaan 3.7, sedangkan kriteria kelayakannya dinyatakan pada Persamaan 3.8.

$f'_{c,maks} = maks\ f'_c(t)$

$f'_{c,maks} < f'_c$ rencana

dengan:

$f'_{c,maks}$ = kuat tekan tertinggi yang dicapai *batch* pada seluruh umur pengujian (MPa),

$f'_c(t)$ = kuat tekan *batch* pada umur t (MPa), dan

f'_c rencana = kuat tekan rencana pada umur 28 hari (MPa).

Suatu *batch* dinyatakan tidak layak apabila memenuhi Persamaan 3.8, yaitu tidak satu pun benda uji *batch* tersebut mencapai kuat tekan rencana pada seluruh umur pengujian. *Batch* yang demikian tidak mewakili beton yang direncanakan, sehingga seluruh benda ujinya dikeluarkan dari analisis. Eliminasi berlaku pada semua umur pengujian karena penyebab penyimpangan melekat pada pengadukannya dan bukan pada satu benda uji tertentu.

Guna memastikan bahwa penyimpangan tersebut bersifat sistematis dan bukan kebetulan, posisi kuat tekan *batch* terhadap kuat tekan rata-rata seluruh *batch* diperiksa pada setiap umur pengujian dengan Persamaan 3.9.

$$R(t) = \frac{f'c,batch(t)}{f'c,rerata(t)}$$

dengan:

R(t) = rasio kuat tekan *batch* terhadap kuat tekan rata-rata seluruh *batch* pada umur t,

$f'c,batch(t)$ = kuat tekan *batch* yang ditinjau pada umur t (MPa), dan

$f'c,rerata(t)$ = kuat tekan rata-rata seluruh *batch* pada umur t (MPa).

Rasio yang konsisten bernilai kurang dari satu pada seluruh umur pengujian menunjukkan bahwa penyimpangan melekat pada pelaksanaan pengadukan *batch* tersebut, misalnya pemadatan yang kurang sempurna, kelebihan kadar air pencampur, atau pencampuran yang belum merata (ACI Committee 214, 2011).

Evaluasi kelayakan *batch* dilaksanakan sebelum identifikasi data pencilan dan bukan merupakan bagian dari tahap tersebut. Unit peninjauannya berbeda, yaitu kelompok pengadukan dan benda uji tunggal, demikian pula tujuannya, yaitu memastikan data berasal dari beton yang memenuhi mutu rencana dan menyaring nilai ekstrem di dalam data tersebut. Urutan itu tidak dapat dibalik karena metode pencilan pada Subbab 3.6.3 mensyaratkan seluruh data berasal dari satu populasi yang sama.

3.6.3 Identifikasi Data Pencilan dengan Metode *Interquartile Range*

Data pencilan (*outlier*) adalah nilai yang menyimpang jauh dari kelompok data lainnya sehingga tidak mewakili perilaku yang sedang ditinjau (ASTM International, 2021b). Pada pengujian kuat tekan beton, pencilan dapat timbul karena pemadatan yang kurang sempurna, cacat pada benda uji, permukaan bidang tekan yang tidak rata, maupun kesalahan pada saat pembebanan. Montgomery dan Runger (2018) menyatakan bahwa pengaruh pencilan terhadap nilai rata-rata menjadi semakin besar apabila jumlah data sedikit. ASTM International (2021b) menegaskan bahwa data yang diduga sebagai pencilan tidak boleh dikeluarkan tanpa pengujian statistik terlebih dahulu, kecuali apabila terdapat penyebab fisik

yang dapat diidentifikasi sebagaimana diuraikan pada Subbab 3.6.2, sehingga pencilan perlu diidentifikasi dengan kriteria yang terukur sebelum data digunakan.

Identifikasi pencilan pada penelitian ini diterapkan pada tingkat benda uji tunggal dan dilaksanakan setelah tahap evaluasi kelayakan *batch* pada Subbab 3.6.2, yaitu hanya terhadap benda uji yang berasal dari *batch* yang dinyatakan layak. Penyaringan tersebut dilakukan dengan metode *Interquartile Range* (IQR) yang dikembangkan oleh Tukey (1977). Metode ini menggunakan kuartil sebagai dasar penentuan batas kendali sehingga bersifat *robust*, yaitu nilai kuartil tidak terpengaruh oleh keberadaan data ekstrem itu sendiri. Sifat tersebut menjadi keunggulan metode ini dibandingkan metode yang batasnya dihitung dari kuat tekan rata-rata dan standar deviasi, karena kedua besaran tersebut justru ikut terpengaruh oleh data pencilan yang hendak dideteksi (Montgomery dan Runger, 2018). Rentang antarkuartil dihitung dengan Persamaan 3.10.

$$IQR = Q3 - Q1$$

Batas bawah dan batas atas kendali selanjutnya ditentukan dengan Persamaan 3.11 dan Persamaan 3.12.

$$\text{Batas bawah} = Q1 - 1{,}5 \times IQR$$

$$\text{Batas atas} = Q3 + 1{,}5 \times IQR$$

Dengan:

IQR = Rentang antarkuartil (MPa)

Q1 = Kuartil pertama, yaitu nilai pada posisi 25% data terurut (MPa)

Q3 = Kuartil ketiga, yaitu nilai pada posisi 75% data terurut (MPa)

Suatu benda uji dinyatakan sebagai pencilan apabila nilai kuat tekannya berada di luar batas bawah atau batas atas tersebut. Faktor pengali sebesar 1,5 merupakan nilai yang umum digunakan karena setara dengan batas kendali pada sebaran normal, sehingga data yang masih wajar tidak ikut tereliminasi.

3.6.4 Kuat Tekan Rata-rata dan Standar Deviasi

1. Kuat tekan rata-rata

   Kuat tekan rata-rata merupakan ukuran pemusatan data yang mewakili kuat tekan beton pada umur yang ditinjau. Nilai tersebut dihitung dengan persamaan berikut.

$$f'c\ rata\text{-}rata = \frac{\Sigma f'c}{n}$$

Dengan:

f'c rata-rata = Kuat tekan rata-rata pada umur yang ditinjau (MPa)

f'c = Kuat tekan pada umur yang ditinjau (MPa)

Σ f'c = Jumlah kuat tekan seluruh benda uji pada umur tersebut (MPa)

n = Jumlah benda uji valid pada umur tersebut (buah)

2. Standar deviasi

Standar deviasi merupakan ukuran sebaran data yang menyatakan besarnya simpangan nilai kuat tekan setiap benda uji terhadap kuat tekan rata-rata. Standar deviasi dihitung dengan persamaan berikut.

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma\left(f'c - f'c_{rata\text{-}rata}\right)^2}{n\text{-}1}}$$

Dengan:

s = Standar deviasi kuat tekan pada umur yang ditinjau (MPa)

f'c = Kuat tekan pada umur yang ditinjau (MPa)

f'c rata-rata = Kuat tekan rata-rata pada umur yang ditinjau (MPa)

n = Jumlah benda uji valid pada umur tersebut (buah)

Semakin kecil standar deviasi, semakin seragam hasil pengujian pada umur tersebut. Sebaliknya, standar deviasi yang besar menunjukkan sebaran hasil yang lebar sehingga kuat tekan rata-rata pada umur tersebut kurang teliti dalam mewakili perilaku beton.

Batasan kuantitatif untuk menilai keragaman hasil pengujian diberikan oleh ACI Committee 214 (2011) dalam bentuk standar pengendalian mutu beton. Standar tersebut membedakan ukuran sebaran menurut mutu beton, yaitu standar deviasi untuk beton dengan kuat tekan tidak lebih dari 35 MPa, serta membedakan kelas pekerjaan antara pengujian konstruksi umum dan adukan percobaan laboratorium. Batasan tersebut disajikan pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3. 4 Standar Pengendalian Mutu Beton Berdasarkan Standar Deviasi

Kelas Pekerjaan	Memuaskan	Sangat baik	Baik	Cukup	Jelek
Pengujian konstruksi umum	< 2,8 MPa	2,8–3,4 MPa	3,4–4,1 MPa	4,1–4,8 MPa	> 4,8 MPa
Adukan percobaan laboratorium	< 1,4 MPa	1,4–1,7 MPa	1,7–2,1 MPa	2,1–2,4 MPa	> 2,4 MPa

Sumber: ACI Committee 214 (2011)

3.6.5 Pemodelan Perkembangan Kuat Tekan terhadap Umur

Perkembangan kuat tekan beton terhadap umur berlangsung cepat pada umur awal kemudian melandai seiring berkurangnya semen yang belum terhidrasi (Neville, 2011). American Concrete Institute (1992) memodelkan hubungan tersebut sebagai fungsi tak linear terhadap umur beton. Pada rentang umur pengujian penelitian ini, hubungan tersebut dapat didekati dengan model regresi logaritmik sebagaimana dinyatakan pada persamaan berikut.

$$f'c(t) = a \ln t + b$$

Dengan:

a = Koefisien kemiringan kurva logaritmik (MPa)

b = Konstanta regresi (MPa)

t = Umur beton (hari)

Ketepatan model dinilai dengan koefisien determinasi (R^2) yang menyatakan bagian keragaman kuat tekan yang dapat dijelaskan oleh perubahan umur beton. Nilai R^2 berkisar antara nol sampai satu, dan nilai yang semakin mendekati satu menunjukkan bahwa model semakin sesuai dengan data hasil pengujian.

3.6.6 Uji Signifikansi Perbedaan Angka Konversi

Selisih persentase antara angka konversi hasil pengujian dan angka konversi acuan baru menunjukkan besarnya perbedaan, belum menunjukkan apakah perbedaan tersebut nyata secara statistik atau masih dapat dijelaskan oleh sebaran

data. Walpole dkk. (2012) menyatakan bahwa persoalan tersebut dijawab melalui pengujian hipotesis, yaitu prosedur yang menilai apakah perbedaan antara nilai hasil pengamatan dan nilai acuan cukup besar dibandingkan keragaman datanya.

Pengujian dilakukan pada besaran kuat tekan, yaitu dengan membandingkan kuat tekan rata-rata hasil pengujian pada umur yang ditinjau terhadap kuat tekan yang diprediksi oleh angka konversi acuan. Kuat tekan prediksi dan galat baku kuat tekan rata-rata dihitung dengan persamaan berikut.

$$f'c\ prediksi = k\ acuan \times f'c(28)$$

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Dengan:

f'c prediksi = Kuat tekan prediksi menurut angka konversi acuan (MPa)

k acuan = Angka konversi acuan pada umur yang ditinjau

f'c(28) = Kuat tekan rata-rata umur 28 hari (MPa)

SE = Galat baku kuat tekan rata-rata (MPa)

Hipotesis nol menyatakan bahwa kuat tekan rata-rata hasil pengujian sama dengan kuat tekan prediksi angka konversi acuan, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan bahwa keduanya berbeda. Pengujian dilakukan dengan uji t satu sampel menggunakan persamaan berikut.

$$t\ hitung = \frac{f'c\ rata\text{-}rata - f'c\ prediksi}{SE}$$

Dengan:

t hitung = Nilai statistik uji t hasil perhitungan

Derajat kebebasan pengujian sebesar n dikurangi satu. Hipotesis nol ditolak apabila nilai t hitung lebih besar daripada nilai t kritis pada taraf nyata 5% atau apabila nilai p lebih kecil daripada 0,05. Penolakan hipotesis nol berarti kuat tekan hasil pengujian berbeda signifikan terhadap kuat tekan prediksi angka konversi acuan, sehingga angka konversi hasil pengujian juga berbeda signifikan terhadap angka konversi acuan.

BAB IV
METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian merupakan cara yang digunakan untuk mendapatkan data dengan tujuan dan kegunaan tertentu. Metode penelitian bertujuan untuk merencanakan rangkaian suatu penelitian mulai dari perumusan masalah, pengumpulan data, pembuatan sampel benda uji, pengujian, analisis data, dan kesimpulan serta saran. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia. Penelitian bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan angka konversi kuat tekan umur beton normal dan beton campuran *fly ash* 12%. Data kuat tekan untuk masing-masing umur beton didapatkan dengan melakukan uji kuat tekan beton pada setiap sampel silinder.

Seluruh tahapan pengujian dalam penelitian ini mengacu pada standar yang berlaku, yaitu analisis saringan agregat halus dan kasar (SNI 03-1968-1990), pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dan agregat kasar (SNI 1970:2016 dan SNI 1969:2016), perencanaan campuran beton normal (SNI 03-2834-2000), pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium (SNI 2493:2011), pengujian *slump* beton (SNI 1972:2022), serta pengujian kuat tekan beton silinder (SNI 1974:2023).

4.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Kegiatan penelitian meliputi pengujian material agregat, perencanaan campuran beton, pengadukan dan pembuatan benda uji, perawatan benda uji, serta pengujian kuat tekan pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Keseluruhan rangkaian kegiatan tersebut dilaksanakan pada 1 Juni 2026 sampai dengan 17 Juli 2026.

4.3 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut.

1. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

   Variabel bebas adalah variabel yang dapat memengaruhi nilai variabel lain. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah umur beton, yaitu 3, 7, 14, 21, dan 28 hari.

2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

   Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kuat tekan beton.

3. Variabel Kontrol (*Control Variable*)

   Variabel kontrol adalah variabel lainnya yang dijaga agar tetap konsisten, sehingga tidak memengaruhi hasil penelitian secara langsung. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah; ukuran dan bentuk benda uji (silinder Ø15 cm × 30 cm), kuat tekan beton rencana (f'cr), dan lingkungan pengujian di laboratorium. Selain itu, kadar substitusi *fly ash* sebesar 12% dari berat semen, jenis *fly ash* yang digunakan (kelas C), jenis semen, faktor air semen, dan metode perawatan benda uji juga dijaga tetap.

4.4 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Semen Portland Komposit (PCC)

   Pada penelitian ini menggunakan semen Portland Komposit (PCC) merek Tiga Roda dengan berat 40 kg seperti pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4. 1 Semen Portland Tiga Roda

2. Agregat Kasar

Pada penelitian ini menggunakan agregat kasar yang berasal dari Desa Clereng, Kecamatan Pengasih, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta yang dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut.

.



Gambar 4. 2 Agregat Kasar

3. Agregat Halus

Agregat halus pada penelitian ini menggunakan pasir alami yang berasal dari Desa Clereng, Kecamatan Pengasih, Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4. 3 Agregat Halus

4. Air

Pada penelitian ini menggunakan air yang berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia. Air yang digunakan bersih, jernih, dan tidak mengandung partikel atau zat lain yang tampak secara kasat mata. Air diberi wadah sementara berupa galon setelah ditimbang kebutuhan untuk memenuhi kebutuhan faktor air semen pada *mix design* seperti pada Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4. 4 Air

5. *Fly ash*

Pada penelitian ini menggunakan *fly ash* yang berasal dari PLTU Batang. *Fly ash* ini memiliki klasifikasi Kelas C berdasarkan SNI 2460:2014 yang dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut.



Gambar 4. 5 *Fly ash* Kelas C

4.5 Alat yang Digunakan

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Timbangan Digital.

   Timbangan digital digunakan untuk mengukur massa bahan penyusun beton, seperti semen, agregat halus, agregat kasar, dan bahan tambah dengan tingkat ketelitian yang tinggi. Alat ini berfungsi memastikan proporsi campuran beton sesuai dengan desain campuran (*mix design*). Timbangan digital dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4. 6 Timbangan Digital

2. Set Saringan Agregat.

   Set saringan agregat digunakan untuk melakukan analisis gradasi agregat dengan memisahkan butiran agregat berdasarkan ukuran. Hasil pengujian digunakan untuk menentukan distribusi ukuran butir agregat yang

mempengaruhi kualitas beton. Set saringan agregat dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut.



Gambar 4.7 Set Saringan Agregat

3. Sekop.

   Sekop digunakan untuk mengambil, memindahkan, dan mencampur material seperti pasir dan kerikil. Alat ini membantu proses penimbangan bahan di lapangan maupun laboratorium. Gambar sekop dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4. 8 Sekop

4. Piknometer.

   Piknometer digunakan untuk menentukan berat jenis dan penyerapan air agregat. Data yang diperoleh sangat penting dalam perencanaan campuran beton karena mempengaruhi perhitungan proporsi material. Gambar piknometer dapat dilihat pada Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4. 9 Piknometer

5. Oven.

   Oven digunakan untuk mengeringkan sampel agregat hingga mencapai kondisi berat kering. Pengeringan ini diperlukan untuk mengetahui kadar air agregat dan mendapatkan hasil pengujian yang akurat. Gambar oven dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4. 10 Oven

6. *Concrete Mixer.*

   Concrete mixer digunakan untuk mencampur semen, agregat, air, dan bahan tambah hingga diperoleh campuran beton yang homogen. Penggunaan alat ini

membantu menghasilkan mutu beton yang lebih seragam. Gambar *concrete mixer* dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4. 11 *Concrete Mixer*

7. Kerucut Abrams.

   Kerucut Abrams digunakan dalam pengujian *slump* untuk mengukur tingkat kelecakan (*workability*) beton segar. Nilai *slump* menunjukkan kemudahan pengerjaan beton saat proses pengecoran. Gambar kerucut abrams dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4. 12 Kerucut Abrams

8. Bekisting Beton Silinder.

   Bekisting beton silinder digunakan sebagai cetakan benda uji beton. Cetakan ini berfungsi menjaga bentuk dan dimensi benda uji selama proses pengerasan beton. Gambar bekisting beton silinder dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4. 13 Bekisting Beton Silinder

9. Mesin Uji Tekan Beton

   Mesin uji tekan beton digunakan untuk mengukur kuat tekan beton setelah mencapai umur tertentu seperti 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasil pengujian tekan akan digunakan untuk menentukan mutu dan kemampuan beton dalam menahan beban tekan. Gambar mesin uji tekan dapat dilihat pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4. 14 Mesin Uji Tekan

4.6 Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini terdiri dari beton dengan substitusi *fly ash* sebesar 12%. Benda uji berbentuk silinder beton dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian yang dilakukan adalah uji kuat tekan pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Jumlah sampel untuk masing-masing umur pengujian kuat tekan berjumlah 5 sampel beton *fly ash* kelas C. Rincian benda uji yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4. 1 Rincian Benda Uji

Kadar *Fly ash*	Umur Beton	Kode	Jumlah Sampel
12%	3	F3	5
	7	F7	5
	14	F14	5
	21	F21	5
	28	F28	5
Total Sampel		25	

4.7 Pelaksanaan Persiapan

Tahapan-tahapan penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi beberapa proses sebagai berikut.

4.7.1 Persiapan Alat dan Bahan

Tahap persiapan alat dan bahan menjadi bagian penting dalam penelitian karena kelancaran proses pengujian sangat dipengaruhi oleh kesiapan peralatan maupun material yang digunakan. Oleh sebab itu, seluruh alat dan bahan perlu dipersiapkan dengan baik sebelum penelitian dimulai. Adapun beberapa tahapan persiapan yang dilakukan meliputi hal-hal berikut.

1. Pembersihan alat dan bahan

   Pembersihan dilakukan untuk memastikan seluruh peralatan dan material berada dalam kondisi bersih sebelum digunakan. Debu, sisa material, maupun kotoran lain yang masih menempel pada alat dapat memengaruhi hasil pengujian dan menyebabkan data yang diperoleh menjadi kurang akurat. Oleh karena itu, seluruh alat dan bahan dibersihkan terlebih dahulu agar proses penelitian dapat berjalan dengan lebih optimal.

2. Pengujian Agregat

   Pengujian agregat dilakukan untuk mengetahui karakteristik serta kualitas agregat halus dan agregat kasar yang akan digunakan dalam campuran beton. Data hasil pengujian ini nantinya digunakan sebagai dasar dalam penyusunan rancangan campuran beton (*mix design*). Selain itu, pengujian agregat juga bertujuan untuk memastikan bahwa material yang digunakan telah memenuhi standar yang dipersyaratkan. Beberapa jenis pengujian agregat yang dilakukan mengacu pada standar SNI, yaitu 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 analisis saringan agregat halus berdasarkan SNI 03-1968-1990.
   d. Pengujian analisis saringan agregat kasar berdasarkan SNI 03-1968-1990.

e. Pengujian berat volume padat dan gembur agregat halus berdasarkan SNI 03-4804-1998.
f. Pengujian berat volume padat dan gembur agregat kasar berdasarkan SNI 03-4804-1998.
g. Pengujian butiran lolos saringan No. 200 atau kadar lumpur pasir berdasarkan SNI 03-4142-1996.

Setelah seluruh pengujian selesai dilakukan, hasil pengujian agregat kemudian dianalisis untuk memastikan bahwa agregat yang digunakan telah memenuhi ketentuan dan persyaratan yang berlaku sehingga layak digunakan dalam campuran beton.

4.7.2 Pembuatan Benda Uji

Tahapan pembuatan benda uji adalah sebagai berikut.

1. Menentukan takaran dan menimbang setiap bahan sesuai dengan kebutuhan campuran beton (*mix design)* yang mengacu pada SNI 2493:2011.
2. Menempatkan seluruh bahan yang telah ditakar ke dalam wadah terpisah untuk mempermudah proses pencampuran selama pengadukan berlangsung.
3. Melapisi bagian dalam bekisting silinder menggunakan oli agar beton tidak melekat pada cetakan, kemudian menimbang dan mencatat berat kosong bekisting tersebut.
4. Menyiapkan alat pencampur beton (*concrete mixer*) beserta wadah penampung untuk beton segar yang akan digunakan pada proses pengecoran.
5. Memasukkan agregat ke dalam *mixer* dan melakukan pengadukan hingga tercampur merata, kemudian menambahkan semen dan *fly ash* sesuai proporsi yang telah direncanakan.
6. Menambahkan air secara bertahap sambil campuran terus diaduk hingga diperoleh adukan beton yang homogen dan merata.
7. Memindahkan beton segar ke dalam wadah, kemudian melakukan pengujian *slump* untuk mengetahui tingkat konsistensi dan kemudahan pengerjaan campuran beton segar.

8. Menuangkan beton ke dalam bekisting silinder secara bertahap pada setiap sepertiga tinggi cetakan sambil dilakukan pemadatan, kemudian meratakan permukaan beton dan mencatat berat total benda uji yang telah dicetak.
9. Membuka bekisting setelah beton berumur 24 jam, kemudian melanjutkan proses perawatan (*curing*) terhadap benda uji sesuai prosedur yang telah ditentukan.

4.7.3 Perawatan Benda Uji

Benda uji beton yang telah dilepaskan dari cetakan setelah berumur 24 jam kemudian menjalani proses perawatan (*curing*) dengan menjaga kondisi beton tetap basah atau lembap hingga satu hari sebelum pengujian, misalnya pada umur 27 hari untuk pengujian kuat tekan umur 28 hari. Proses perawatan dilakukan dengan metode perendaman di dalam bak air agar kelembaban beton tetap terjaga sehingga proses hidrasi semen dapat berlangsung secara optimal. Ketersediaan air yang cukup selama proses pengerasan memungkinkan terbentuknya ikatan semen yang lebih baik, sehingga perkembangan kuat tekan beton dapat meningkat sesuai umur rencana. Selain meningkatkan kuat tekan, proses perawatan yang baik juga berperan dalam meningkatkan keawetan beton terhadap pengaruh lingkungan maupun serangan zat kimia.

4.8 Pelaksanaan Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa jenis pengujian yang dilaksanakan secara sistematis untuk memperoleh data yang akurat dan sesuai dengan tujuan penelitian. Adapun tahapan pengujian yang dilakukan dijelaskan sebagai berikut.

4.8.1 Pengujian *Slump*

Pengujian *slump* dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan (*workability*) campuran beton segar yang telah diproduksi. Pengujian ini dilaksanakan setelah proses pencampuran beton selesai dilakukan menggunakan *mixer*. Tahapan pengujian *slump* dilakukan sebagai berikut.

1. Menyiapkan seluruh peralatan pengujian yang meliputi kerucut Abrams, batang pemadat (*tamping rod*), alas datar berupa pelat baja atau kaca, sekop kecil, dan ember penampung adukan beton.

2. Membasahi bagian dalam kerucut Abrams beserta alasnya menggunakan air agar campuran beton tidak melekat pada permukaan alat selama pengujian berlangsung.
3. Meletakkan kerucut Abrams pada permukaan yang rata, keras, dan tidak menyerap air, kemudian menahan posisi kerucut dengan menginjak bagian penguncinya agar tetap stabil saat pengisian beton dilakukan.
4. Mengisi kerucut Abrams dengan adukan beton dalam tiga lapisan dengan tinggi yang relatif sama. Setiap lapisan dipadatkan sebanyak 25 tusukan menggunakan batang pemadat secara merata ke seluruh bagian campuran. Pada lapisan kedua dan ketiga, penusukan dilakukan hingga sedikit menembus lapisan sebelumnya agar antar lapisan menyatu dengan baik.
5. Setelah kerucut terisi penuh, permukaan beton diratakan menggunakan batang pemadat hingga sejajar dengan bagian atas cetakan dan didiamkan ±30 detik
6. Mengangkat kerucut Abrams secara perlahan dan tegak lurus ke atas dalam waktu sekitar 5–10 detik tanpa gerakan menyamping agar bentuk penurunan beton tidak terganggu.
7. Mengukur nilai penurunan beton (*slump*) dengan menghitung selisih tinggi antara cetakan dan permukaan tertinggi beton setelah mengalami penurunan menggunakan mistar ukur.
8. Mencatat hasil pengukuran sebagai nilai *slump* yang menunjukkan tingkat kelecakan campuran beton segar, kemudian seluruh peralatan dibersihkan agar dapat digunakan kembali pada pengujian berikutnya.

4.8.2 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan berdasarkan SNI 1974:2023 untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban tekan maksimum. Pengujian dilakukan pada benda uji silinder sesuai umur rencana yang telah ditentukan. Adapun prosedur pengujian kuat tekan beton dilakukan sebagai berikut.

1. Mengeluarkan benda uji dari bak *curing* kemudian membiarkannya pada kondisi ruang terbuka hingga permukaan benda uji berada dalam kondisi kering selama kurang lebih 24 jam sebelum pengujian dilakukan.

2. Mengukur dimensi benda uji, seperti diameter dan tinggi silinder beton, serta menimbang berat benda uji sebelum dilakukan pengujian kuat tekan.
3. Meletakkan benda uji secara tepat di tengah alas mesin uji tekan (*Compression Testing Machine*/ CTM) dan memastikan posisi benda uji tegak lurus serta jarum penunjuk beban berada pada posisi nol sebelum pembebanan dimulai.
4. Menjalankan mesin uji tekan dengan memberikan beban secara bertahap menggunakan kecepatan pembebanan berkisar antara 0,15 MPa/detik hingga 0,35 MPa/detik sesuai ketentuan standar pengujian.
5. Melanjutkan proses pembebanan hingga benda uji mengalami keruntuhan atau kerusakan total, kemudian mencatat nilai beban maksimum yang dicapai selama pengujian berlangsung sebagai dasar perhitungan kuat tekan beton.

4.9 Analisis Hasil Pengujian

Setelah data hasil pengujian diperoleh, data diolah menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Proses analisis data mengacu pada landasan teori analisis statistik data kuat tekan pada Sub Bab 3.6 dan dilaksanakan melalui tujuh tahap berikut.

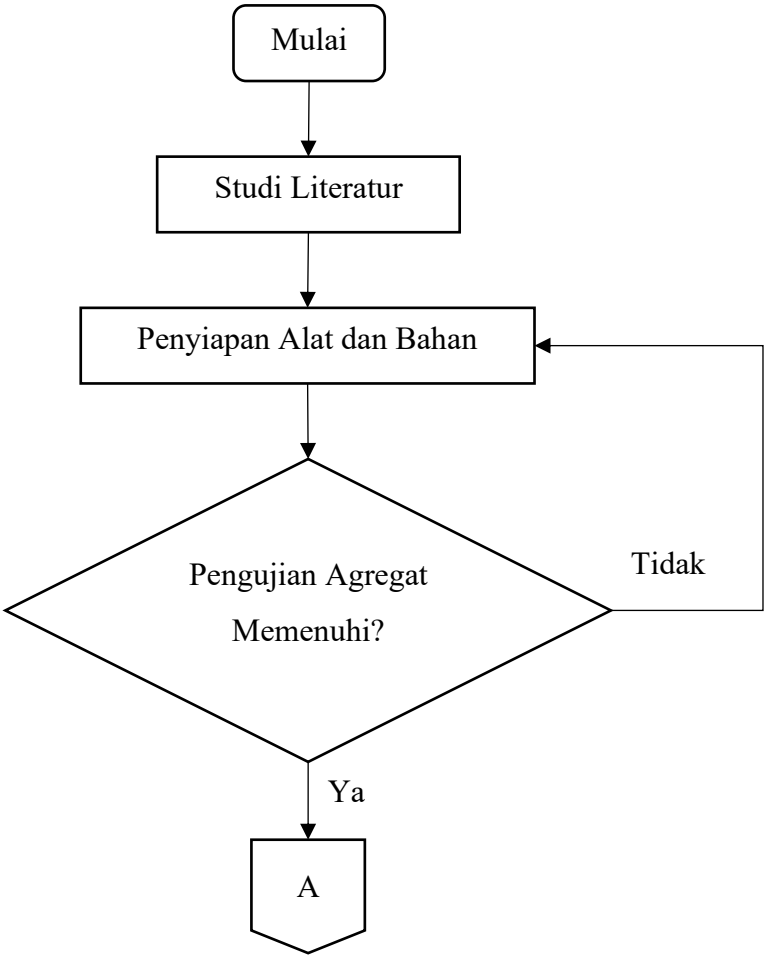
1. Tahap pertama adalah perhitungan kuat tekan setiap benda uji, yaitu beban maksimum dibagi luas bidang tekan sesuai persamaan pada Sub Bab 3.2.1.
2. Tahap kedua adalah evaluasi kelayakan setiap *batch* terhadap kuat tekan rencana. Suatu *batch* dinyatakan tidak layak dan seluruh benda ujinya dieliminasi apabila *batch* tersebut tidak pernah mencapai kuat tekan rencana pada seluruh umur pengujian, termasuk pada umur 28 hari, sesuai kriteria pada Sub Bab 3.6.2.
3. Tahap ketiga adalah identifikasi data pencilan (*outlier*) pada tingkat benda uji tunggal menggunakan metode Interquartile Range (IQR). Kuartil pertama, kuartil ketiga, rentang antarkuartil, batas bawah, dan batas atas dihitung untuk setiap umur pengujian secara terpisah dengan persamaan pada Sub Bab 3.6.3. Benda uji yang nilai kuat tekannya berada di luar kedua batas tersebut dikeluarkan dari perhitungan.

4. Tahap keempat adalah perhitungan kuat tekan rata-rata dan standar deviasi pada setiap umur pengujian dengan persamaan pada Sub Bab 3.6.4. Perhitungan hanya menggunakan data yang dinyatakan valid pada tahap kedua dan tahap ketiga.
5. Tahap kelima adalah perhitungan angka konversi setiap umur, yaitu perbandingan kuat tekan rata-rata pada umur yang ditinjau terhadap kuat tekan rata-rata umur 28 hari dengan persamaan pada Sub Bab 3.5, kemudian pemodelan perkembangan kuat tekan terhadap umur dengan regresi logaritmik beserta koefisien determinasinya sesuai Sub Bab 3.6.5.
6. Tahap keenam adalah perbandingan angka konversi hasil penelitian dengan angka konversi PBI-1971 dan hasil penelitian Nahak dkk. (2025). Perbandingan dinyatakan dalam bentuk selisih persentase pada setiap umur dan disajikan dalam bentuk kurva angka konversi terhadap umur beton.
7. Tahap ketujuh adalah pengujian signifikansi perbedaan dengan uji t satu sampel pada taraf nyata 5% sesuai Sub Bab 3.6.6. Hipotesis nol menyatakan bahwa kuat tekan rata-rata hasil pengujian sama dengan kuat tekan yang diprediksi oleh angka konversi acuan, sedangkan hipotesis alternatif menyatakan bahwa keduanya berbeda. Keputusan pengujian diambil berdasarkan perbandingan nilai t hitung terhadap nilai t kritis dan perbandingan nilai p terhadap taraf nyata 5%.
8. Hasil analisis tersebut berupa kuat tekan beton *fly ash* 12% pada masing-masing umur pengujian, angka konversi kuat tekan terhadap umur 28 hari, serta hasil pengujian signifikansi perbedaan angka konversi terhadap PBI-1971 dan hasil penelitian Nahak dkk. (2025).

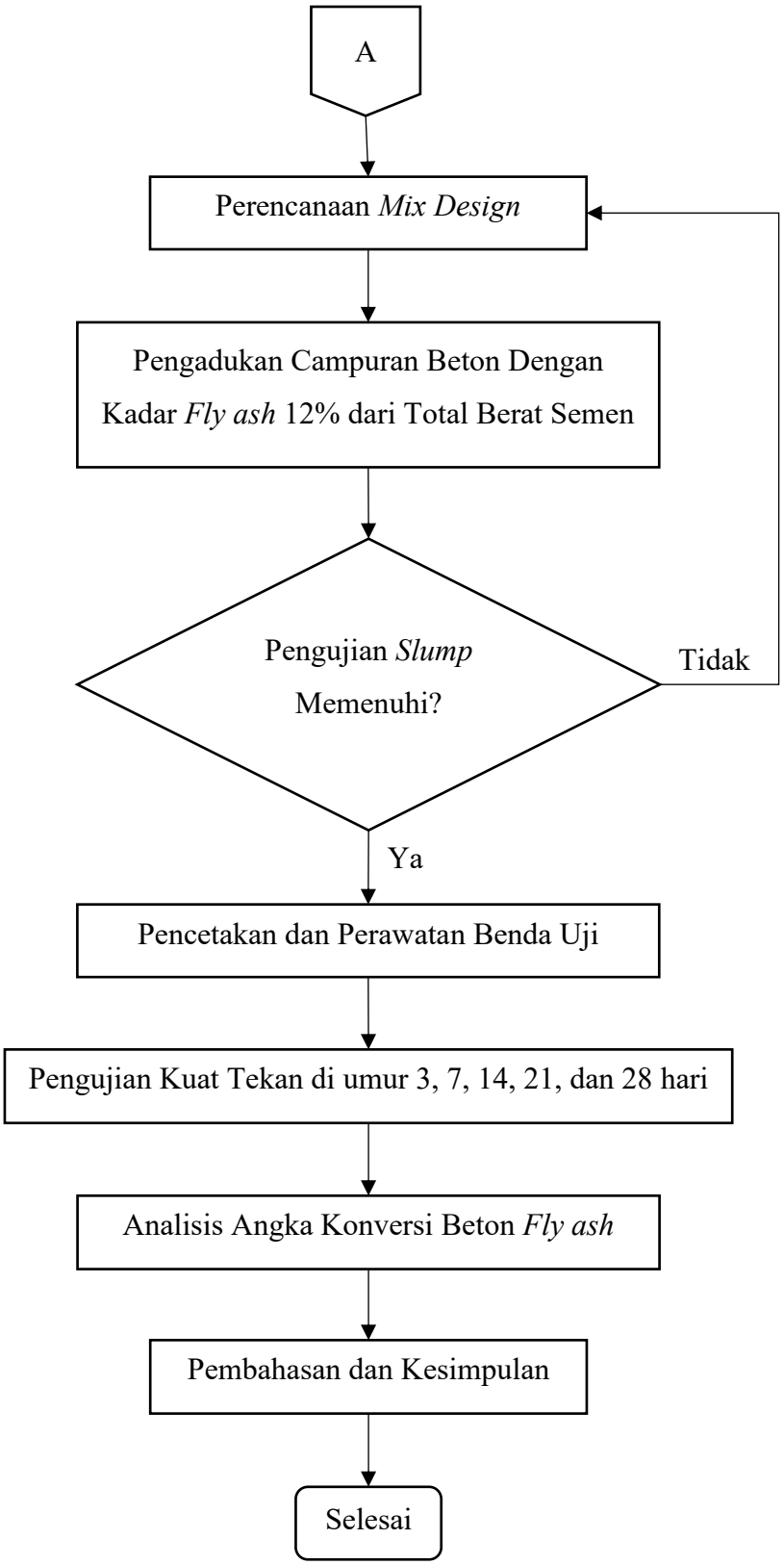
Setelah proses analisis data dilakukan, tahap selanjutnya adalah pembahasan hasil penelitian untuk menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan dalam penelitian.

4.10 Bagan Alir

Langkah-langkah pelaksanaan penelitian ini dapat ditampilkan dalam bentuk *flowchart* sebagai berikut.



Gambar 4.15 Bagan Alir Penelitian



Lanjutan Gambar 4.15 Bagan Alir Penelitian

BAB V
HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Tinjauan Umum

Bab ini menyajikan hasil penelitian dan pembahasan yang diperoleh dari seluruh rangkaian pengujian yang telah dilakukan. Data yang diperoleh meliputi hasil pengujian material penyusun beton, perencanaan campuran beton (*mix design*), pengujian *slump* beton segar, dan pengujian tekan beton *fly ash* sesuai variasi hari yang telah ditentukan. Seluruh data yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis untuk memperoleh angka konversi kuat tekan beton fly ash 12% terhadap umur 28 hari, serta untuk menguji perbedaan angka konversi tersebut terhadap angka konversi acuan PBI-1971 dan hasil penelitian Nahak dkk. (2025).

Seluruh pengujian dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi, Fakultas Teknik Desain Inovasi, Universitas Islam Indonesia. Hasil pengujian beton *fly ash* kemudian dibandingkan dengan beton normal sebagai acuan untuk mengevaluasi pengaruh material yang diteliti terhadap angka konversi umur kuat tekan beton.

5.2 Pengujian Agregat

Pengujian agregat dilakukan untuk mengetahui karakteristik serta sifat-sifat agregat yang digunakan dalam penelitian ini. Hal tersebut diperlukan karena agregat merupakan salah satu material utama penyusun beton yang harus memenuhi persyaratan tertentu agar menghasilkan beton dengan kualitas yang sesuai. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian analisis saringan, pengujian berat jenis & penyerapan agregat kasar dan halus. Pengujian agregat halus dilakukan terhadap dua sampel.

5.2.1 Pengujian Agregat Halus

1. Pengujian Analisis Saringan

   Pengujian analisis saringan agregat halus dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 03-1968-1990 untuk mengetahui distribusi ukuran butir agregat yang digunakan dalam penelitian. Pengujian dilakukan menggunakan dua sampel

agregat halus seberat 2000 gram yang disaring melalui serangkaian saringan berukuran 10 mm (3/8”), 4,80 mm (No. 4), 2,40 mm (No. 8), 1,20 mm (No. 16), 0,60 mm (No. 30), 0,30 mm (No. 50), 0,15 mm (No. 100), dan pan. Berat material yang tertahan pada setiap saringan kemudian dicatat dan digunakan sebagai dasar untuk menentukan gradasi agregat halus. Hasil uji saringan dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5. 1 Uji Saringan

No.	Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	
		Sampel 1	Sampel 2
1	40,00	0,00	0,00
2	20,00	0,00	0,00
3	10,00	0,00	0,00
4	4,80	15,00	6,00
5	2,40	122,00	74,00
6	1,20	188,00	290,00
7	0,60	558,00	949,00
8	0,30	544,00	470,00
9	0,15	399,00	180,00
10	Pan	174,00	31,00
11	Jumlah	2000,00	2000,00

Berdasarkan data uji saringan, maka dapat dilakukan perhitungan analisis saringan untuk sampel 1 sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

$$\text{Saringan 4,80 mm} = \frac{\textit{Berat Tertinggal (gr)}}{\sum \textit{Berat Tertinggal}} \times 100\% = \frac{6}{2000} \times 100\% = 0{,}300\ \%$$

$$\text{Saringan 2,40 mm} = \frac{\textit{Berat Tertinggal (gr)}}{\sum \textit{Berat Tertinggal}} \times 100\% = \frac{74}{2000} \times 100\%$$

$= \quad 3{,}700\ \%$

Saringan 1,20 mm $= \quad \frac{Berat\ Tertinggal\ (gr)}{\sum Berat\ Tertinggal} \times 100\%$

$= \quad \frac{290}{2000} \times 100\%$

$= \quad 14{,}500\ \%$

Saringan 0,60 mm $= \quad \frac{Berat\ Tertinggal\ (gr)}{\sum Berat\ Tertinggal} \times 100\%$

$= \quad \frac{949}{2000} \times 100\%$

$= \quad 47{,}450\ \%$

Saringan 0,30 mm $= \quad \frac{Berat\ Tertinggal\ (gr)}{\sum Berat\ Tertinggal} \times 100\%$

$= \quad \frac{470}{2000} \times 100\%$

$= \quad 23{,}500\ \%$

Saringan 0,15 mm $= \quad \frac{Berat\ Tertinggal\ (gr)}{\sum Berat\ Tertinggal} \times 100\%$

$= \quad \frac{180}{2000} \times 100\%$

$= \quad 9{,}000\ \%$

Pan $= \quad \frac{Berat\ Tertinggal\ (gr)}{\sum Berat\ Tertinggal} \times 100\%$

$= \quad \frac{31}{2000} \times 100\%$

$= \quad 1{,}550\ \%$

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Saringan 4,80 mm $= \quad 0\ \% + 0{,}300\ \%$

$= \quad 0{,}300\ \%$

Saringan 2,40 mm $= \quad 0{,}300\ \% + 3{,}700\ \%$

$= \quad 4{,}000\ \%$

Saringan 1,20 mm $= \quad 4{,}000\ \% + 14{,}500\ \%$

$= \quad 18{,}500\ \%$

Saringan 0,60 mm $= \quad 18{,}500\ \% + 47{,}450\ \%$

$= \quad 65{,}950\ \%$

Saringan 0,30 mm $= \quad 65{,}950\ \% + 23{,}500\ \%$

$= \quad 89{,}450\ \%$

Saringan 0,15 mm = 89,450 % + 9,000 %

= 98,450 %

Pan = 98,450 % + 1,550 %

= 100,000 %

c. Persentase Lolos Kumulatif

Saringan 4,80 mm = 100,000 % - 0,300 %

= 99,700 %

Saringan 2,40 mm = 100,000 % - 4,000 %

= 96,000 %

Saringan 1,20 mm = 100,000 % - 18,500 %

= 81,500 %

Saringan 0,60 mm = 100,000 % - 65,950 %

= 34,050 %

Saringan 0,30 mm = 100,000 % - 89,450 %

= 10,550 %

Saringan 0,15 mm = 100,000 % - 98,450 %

= 1,550 %

Pan = 100,000 % - 100,000 %

= 0,000 %

d. Modulus Halus Butir

$$\text{MHB} = \frac{\sum \textit{Persentase Berat Tertinggal Kumulatif}}{100}$$

$$= \frac{0{,}300 + 4{,}000 + 18{,}500 + 65{,}950 + 89{,}450 + 98{,}450}{100}$$

= 2,767

Sehingga rekapitulasi perhitungan analisis saringan agregat dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan 5.3 berikut.

Tabel 5. 2 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 1

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
4,80	6	0,300	0,300	99,700
2,40	74	3,700	4,000	96,000
1,20	290	14,500	18,500	81,500
0,60	949	47,450	65,950	34,050
0,30	470	23,500	89,450	10,550
0,15	180	9,000	98,450	1,550
Pan	31	1,550	100,000	0,000
Jumlah	2000	100	276,650	-
Modulus Halus Butir (MHB)			2,767	

Tabel 5. 3 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20,00	0,00	0,00	0,00	100,00
10,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4,80	15,00	0,75	0,75	99,25
2,40	122,00	6,10	6,85	93,15
1,20	188,00	9,40	16,25	83,75
0,60	558,00	27,90	44,15	55,85
0,30	544,00	27,20	71,35	28,65
0,15	399,00	19,95	91,30	8,70
Sisa	174,00	8,70	100,00	0,00
Jumlah	2000,00	100,00	230,65	0,00
Modulus Halus Butir (MHB)			2,307	

Berdasarkan hasil perhitungan analisis saringan, diperoleh nilai modulus halus butir (MHB) agregat halus sampel 1 dan 2 berturut-turut sebesar 2,767 dan 2,307. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan berada pada kategori pasir agak kasar sesuai dengan klasifikasi yang tercantum dalam SNI 03-1968-1990.

Mengacu pada SNI 03-2834-2000, gradasi agregat halus ditentukan berdasarkan batas atas dan batas bawah yang telah ditetapkan pada Tabel 5.4 di bawah ini.

Tabel 5. 4 Batas Gradasi Agregat Halus

Keterangan	Saringan	Batas Atas	Batas Bawah
Kurva Gradasi I	10,00	100	100
	4,80	100	90
	2,40	95	60
	1,20	70	30
	0,60	34	15
	0,30	20	5
	0,15	10	0
Kurva Gradasi II	10,00	100	100
	4,80	100	90
	2,40	100	75
	1,20	90	55
	0,60	59	35
	0,30	30	8
	0,15	10	0
	10,00	100	100
Kurva Gradasi III	10,00	100	100
	4,80	100	90
	2,40	100	85
	1,20	100	75

Lanjutan Tabel 5. 4 Batas Gradasi Agregat Halus

Keterangan	Saringan	Batas Atas	Batas Bawah
	0,60	79	60
	0,30	40	12
	0,15	10	0
Kurva Gradasi IV	10,00	100	100
	4,80	100	95
	2,40	100	95
	1,20	100	90
	0,60	100	80
	0,30	50	15
	0,15	15	0

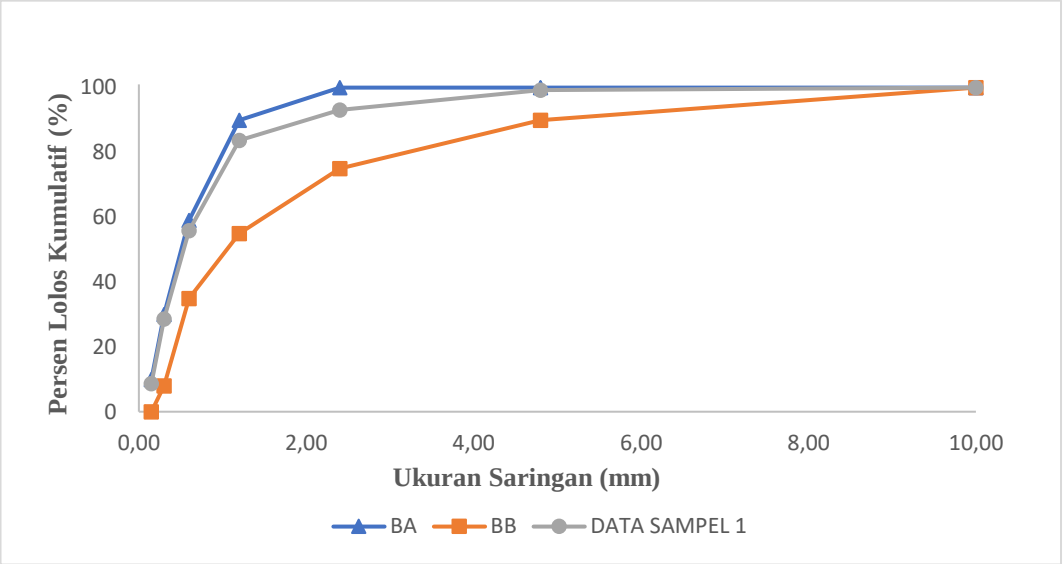
Berdasarkan data uji saringan yang telah diperoleh, berikut plot batas-batas gradasi dengan data pengujian.

a. Sampel 1

Gradasi agregat halus sampel 1 berada pada Gradasi II yang dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan grafik gradasi pada Gambar 5.1 berikut.

Tabel 5. 5 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 1

Saringan	BA	BB	Data Persen Lolos Kumulatif
10,00	100	100	100
4,80	100	90	99,25
2,40	100	75	93,15
1,20	90	55	83,75
0,60	59	35	55,85
0,30	30	8	28,65
0,15	10	0	8,7



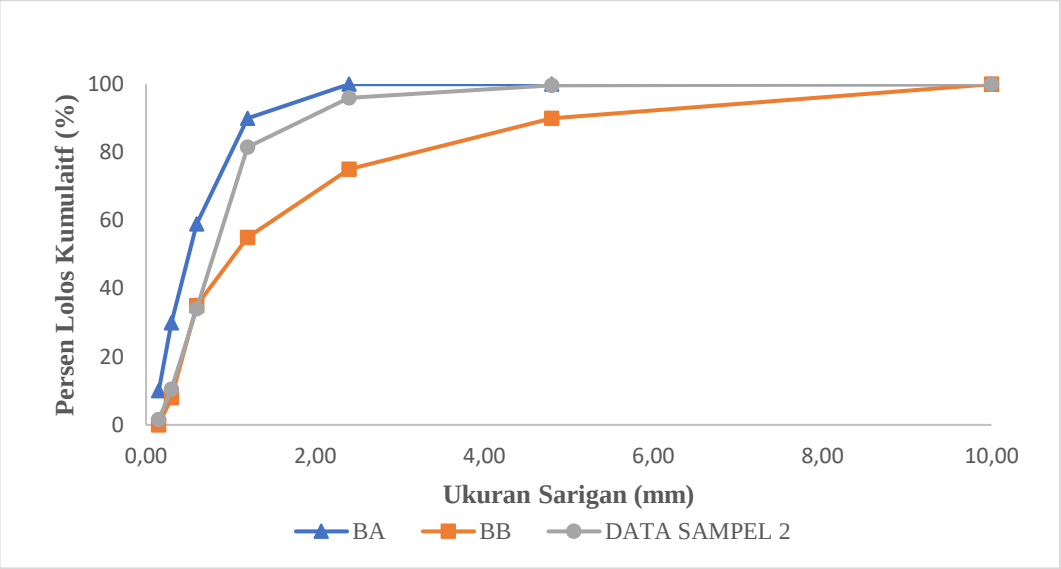
Gambar 5. 1 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 1

b. Sampel 2

Gradasi agregat halus sampel 2 berada pada Gradasi II yang dapat dilihat pada Tabel 5.6 dan grafik gradasi pada Gambar 5.2 berikut.

Tabel 5. 6 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 2

Saringan	BA	BB	Data Persen Lolos Kumulatif
10,00	100	100	100
4,80	100	90	99,25
2,40	100	75	93,15
1,20	90	55	83,75
0,60	59	35	55,85
0,30	30	8	28,65
0,15	10	0	8,7



Gambar 5. 2 Kurva Gradasi II Agregat Halus Sampel 2

2. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik agregat halus yang digunakan dalam penelitian. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus ini mengacu pada SNI 03-1970-2016. Parameter yang ditinjau meliputi berat jenis curah (*bulk specific gravity*), berat jenis jenuh kering permukaan (*Saturated Surface Dry specific gravity*), berat jenis semu (*apparent specific gravity*), serta nilai penyerapan air agregat. Parameter-parameter yang telah diketahui dari pengujian sampel 1 adalah sebagai berikut.

a. Berat Pasir Kering Mutlak (B_k) = 487 gram
b. Berat Pasir Kondisi Jenuh Kering Muka (SSD) = 500 gram
c. Berat Piknometer Berisi Pasir Dan Air (B_t) = 1020 gram
d. Berat Piknometer Berisi Air (B) = 706 gram

Sehingga dapat dilakukan perhitungan berat jenis dan penyerapan air sampel 1 sebagai berikut.

a. Berat Jenis Curah (*Bulk Specific Gravity*)

BJ Curah $= \frac{B_k}{B + 500 - B_t}$

$$= \frac{487}{706 + 500 - 1020}$$

$$= 2{,}618$$

b. Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (*SSD specific gravity*)

$$\text{BJ Jenuh Kering Permukaan} = \frac{500}{B + 500 - B_t}$$

$$= \frac{500}{706 + 500 - 1020}$$

$$= 2{,}688$$

c. Berat Jenis Semu (*Apparent specific gravity*)

$$\text{BJ Semu} = \frac{B_k}{B + B_k - B_t}$$

$$= \frac{487}{706 + 487 - 1020}$$

$$= 2{,}618$$

d. Penyerapan Air

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

$$= \frac{(500 - 487)}{487 \times 100\%}$$

$$= 2{,}669\ \%$$

Rekapitulasi perhitungan berat jenis agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.7 berikut.

Tabel 5. 7 Rekapitulasi Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rerata	Satuan
Berat pasir kering mutlak (Bk)	487	488,4	487,7	gram
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD)	500	500	500	gram
Berat piknometer berisi pasir dan air (Bt)	1020	1002	1011	gram

Lanjutan Tabel 5.7 Rekapitulasi Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rerata	Satuan
Berat piknometer berisi air (B)	706	697	701,5	gram
Berat Jenis Curah	2,618	2,505	2,561	
Berat Jenis jenuh kering permukaan (SSD)	2,688	2,564	2,626	
Berat Jenis semu	2,815	2,663	2,739	
Penyerapan Air	2,669	2,375	2,522	%

5.2.2 Pengujian Agregat Kasar

1. Pengujian Analisis Saringan

   Pengujian analisis saringan agregat kasar dilakukan berdasarkan SNI 03-1968-1990 untuk mengetahui distribusi ukuran butir agregat yang digunakan dalam penelitian. Pengujian dilakukan terhadap dua sampel, masing-masing seberat 5000 gram, menggunakan saringan berukuran 40 mm, 20 mm, 10 mm, 4,80 mm, 2,40 mm, 1,20 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, 0,15 mm, dan pan. Berat agregat yang tertahan pada setiap saringan dicatat sebagai dasar perhitungan persentase berat tertinggal, persentase kumulatif, persentase lolos kumulatif, dan modulus halus butir. Hasil penimbangan awal dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut.

Tabel 5. 8 Uji Saringan Agregat Kasar

No.	Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	
		Sampel 1	Sampel 2
1	40,00	0	0
2	20,00	64	0
3	10,00	3872	3950
4	4,80	988	951
5	2,40	25	32
6	1,20	3	2
7	0,60	0	0
8	0,30	0	0
9	0,15	0	0
10	Sisa	48	65
11	Jumlah	5000	5000

Berdasarkan data uji saringan tersebut, contoh perhitungan analisis saringan untuk sampel 1 dilakukan sebagai berikut.

a. Persentase Berat Tertinggal

Saringan 20 mm $= \frac{64}{5000}$ x 100%

$= 1{,}280\%$

Saringan 10 mm $= \frac{3872}{5000}$ x 100%

$= 77{,}440\%$

Saringan 4,80 mm $= \frac{988}{5000}$ x 100%

$= 19{,}760\%$

Saringan 2,40 mm $= \frac{25}{5000}$ x 100%

$= 0{,}500\%$

Saringan 1,20 mm $= \frac{3}{5000}$ x 100%

$= 0{,}060\%$

Pan $= \frac{48}{5000}$ x 100%

= 0,960%

Berat yang tertahan pada saringan 40 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, dan 0,15 mm adalah nol sehingga persentase berat tertinggal pada saringan tersebut sebesar 0,000%.

b. Persentase Berat Tertinggal Kumulatif

Saringan 20 mm = 0,000% + 1,280%
= 1,280%

Saringan 10 mm = 1,280% + 77,440%
= 78,720%

Saringan 4,80 mm = 78,720% + 19,760%
= 98,480%

Saringan 2,40 mm = 98,480% + 0,500%
= 98,980%

Saringan 1,20 mm = 98,980% + 0,060%
= 99,040%

Pan = 99,040% + 0,960%
= 100,000%

c. Persentase Lolos Kumulatif

Saringan 20 mm = 100,000% - 1,280%
= 98,720%

Saringan 10 mm = 100,000% - 78,720%
= 21,280%

Saringan 4,80 mm = 100,000% - 98,480%
= 1,520%

Saringan 2,40 mm = 100,000% - 98,980%
= 1,020%

Saringan 1,20 mm = 100,000% - 99,040%
= 0,960%

Pan = 100,000% - 100,000%
= 0,000%

d. Modulus Halus Butir

$$\text{MHB} = \frac{0{,}000 + 1{,}280 + 78{,}720 + 98{,}480 + 98{,}980 + 99{,}040 + 99{,}040 + 99{,}040 + 99{,}040}{100}$$

$$= 6{,}736$$

Rekapitulasi hasil analisis saringan agregat kasar untuk sampel 1 dan sampel 2 disajikan pada Tabel 5.9 dan Tabel 5.10.

Tabel 5. 9 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 1

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0,000	0,000	100,000
20,00	64	1,280	1,280	98,720
10,00	3872	77,440	78,720	21,280
4,80	988	19,760	98,480	1,520
2,40	25	0,500	98,980	1,020
1,20	3	0,060	99,040	0,960
0,60	0	0,000	99,040	0,960
0,30	0	0,000	99,040	0,960
0,15	0	0,000	99,040	0,960
Sisa	48	0,960	100,000	0,000
Jumlah	5000	100,000	673,620	-
Modulus Halus Butir (MHB)			6,736	

Tabel 5. 10 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
40,00	0	0,000	0,000	100,000
20,00	0	0,000	0,000	100,000
10,00	3950	79,000	79,000	21,000
4,80	951	19,020	98,020	1,980

Lanjutan Tabel 5.10 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 2

Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif (%)
2,40	32	0,640	98,660	1,340
1,20	2	0,040	98,700	1,300
0,60	0	0,000	98,700	1,300
0,30	0	0,000	98,700	1,300
0,15	0	0,000	98,700	1,300
Sisa	65	1,300	100,000	0,000
Jumlah	5000	100,000	670,480	-
Modulus Halus Butir (MHB)			6,705	

Hasil perhitungan menunjukkan nilai modulus halus butir agregat kasar sampel 1 dan sampel 2 masing-masing sebesar 6,736 dan 6,705. Selisih kedua nilai hanya 0,031 atau sekitar 0,47% terhadap nilai reratanya, sehingga distribusi ukuran butir kedua sampel relatif konsisten. Fraksi agregat terutama tertahan pada saringan 10 mm, yaitu 77,440% pada sampel 1 dan 79,000% pada sampel 2, kemudian diikuti saringan 4,80 mm sebesar 19,760% dan 19,020%.

Mengacu pada batas batas gradasi agregat kasar ukuran maksimum 20 mm menurut SNI 03-2834-2000, rentang persentase lolos kumulatif disajikan pada Tabel 5.11.

Tabel 5. 11 Batas Gradasi Agregat Kasar Ukuran Maksimum 20 mm

Saringan (mm)	Batas Atas (%)	Batas Bawah (%)
40,00	100	100
20,00	100	95
10,00	55	25
4,80	10	0

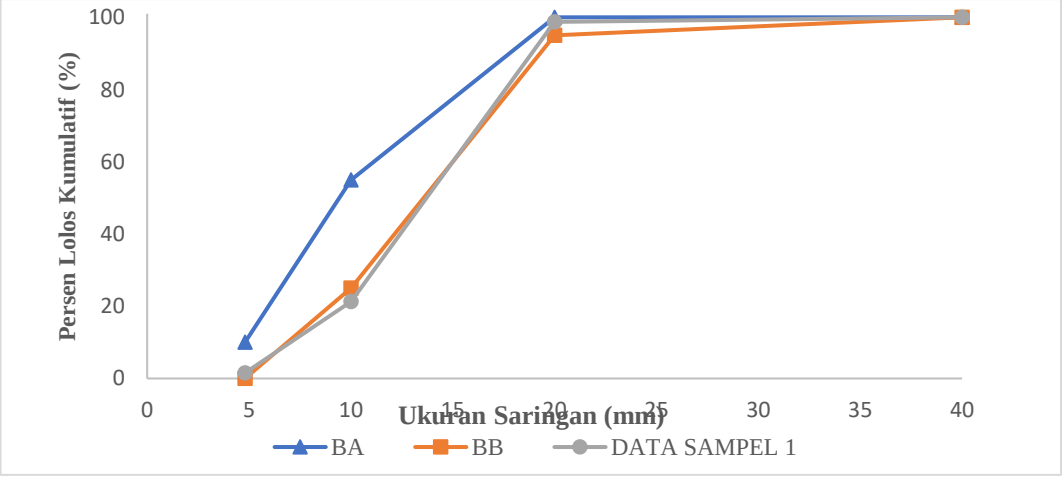
Berdasarkan pola persentase lolos, kedua sampel paling mendekati gradasi agregat kasar ukuran maksimum 20 mm. Namun, nilai lolos saringan 10 mm pada sampel 1 dan sampel 2 masing-masing hanya 21,280% dan 21,000%, sedangkan batas bawahnya 25%. Dengan demikian, gradasi kedua sampel belum seluruhnya berada di dalam amplop rencana dan cenderung sedikit lebih kasar pada fraksi tersebut. Selisih terhadap batas bawah adalah 3,720 poin persentase untuk sampel 1 dan 4,000 poin persentase untuk sampel 2.

a. Sampel 1

Perbandingan gradasi agregat kasar sampel 1 dengan batas ukuran maksimum 20 mm disajikan pada Tabel 5.12 dan Gambar 5.3.

Tabel 5. 12 Kurva Gradasi Agregat Kasar Sampel 1

Saringan	BA	BB	Data Persen Lolos Kumulatif
40,00	100	100	100,000
20,00	100	95	98,720
10,00	55	25	21,280
4,80	10	0	1,520



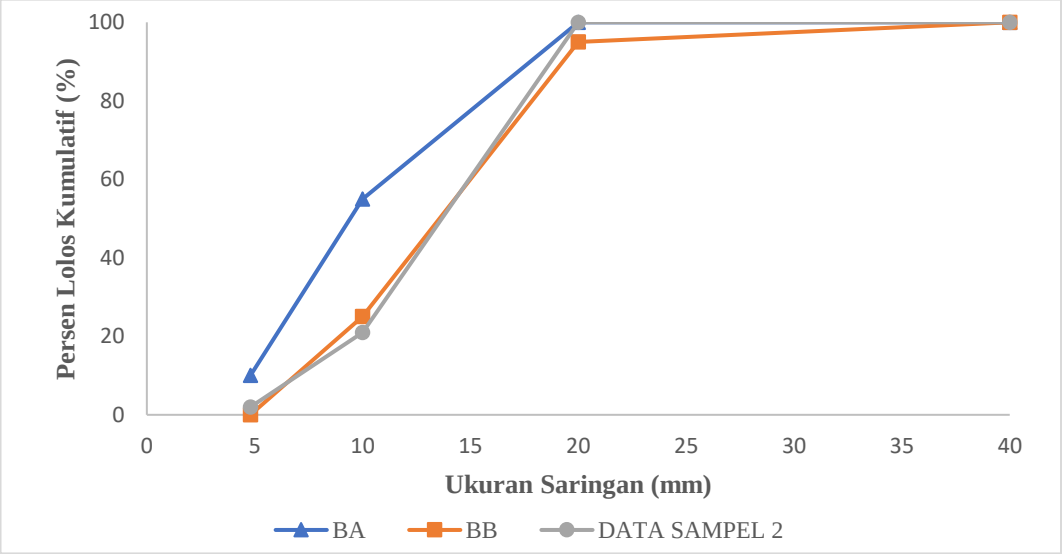
Gambar 5. 3 Gradasi Agregat Kasar Sampel 1

b. Sampel 2

Perbandingan gradasi agregat kasar sampel 2 dengan batas ukuran maksimum 20 mm disajikan pada Tabel 5.13 dan Gambar 5.4.

Tabel 5. 13 Kurva Gradasi Agregat Kasar Sampel 2

Saringan	BA	BB	Data Persen Lolos Kumulatif
40,00	100	100	100,000
20,00	100	95	100,000
10,00	55	25	21,000
4,80	10	0	1,980



Gambar 5. 4 Gradasi Agregat Kasar Sampel 2

2. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik agregat yang digunakan dalam penelitian. Pengujian ini mengacu pada SNI 1969:2016. Parameter yang dihitung meliputi berat jenis curah (*bulk specific gravity*), berat jenis jenuh kering permukaan (*Saturated Surface Dry specific gravity*), berat jenis semu (*apparent specific gravity*), dan penyerapan air. Data pengamatan sampel 1 adalah sebagai berikut.

a. Berat kerikil kering mutlak (Bk) = 4895 gram

b. Berat kerikil jenuh kering permukaan (Bj) = 5000 gram

c. Berat agregat dalam air (Ba) = 3152 gram

Berdasarkan parameter tersebut, perhitungan berat jenis dan penyerapan air sampel 1 adalah sebagai berikut.

a. Berat Jenis Curah (*Bulk Specific Gravity*)

$$\text{BJ curah} = \frac{4895}{5000 - 3152} = 2{,}649$$

b. Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (*SSD Specific Gravity*)

$$\text{BJ SSD} = \frac{5000}{5000 - 3152} = 2{,}706$$

c. Berat Jenis Semu (*Apparent Specific Gravity*)

$$\text{BJ semu} = \frac{4895}{4895 - 3152} = 2{,}808$$

d. Penyerapan Air

$$\text{Penyerapan air} = \frac{5000 - 4895}{4895} \times 100\% = 2{,}145\%$$

Rekapitulasi hasil perhitungan berat jenis dan penyerapan air agregat kasar disajikan pada Tabel 5.14.

Tabel 5. 14 Rekapitulasi Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rerata	Satuan
Berat kerikil kering mutlak (Bk)	4895	4904	4899,5	gram
Berat kerikil jenuh kering permukaan (Bj)	5000	5000	5000	gram
Berat agregat dalam air (Ba)	3152	3032	3092	gram

Lanjutan Tabel 5.14 Rekapitulasi Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rerata	Satuan
Berat Jenis Curah	2,649	2,492	2,570	-
Berat Jenis Jenuh Kering Permukaan (SSD)	2,706	2,541	2,623	-
Berat Jenis Semu	2,808	2,620	2,714	-
Penyerapan Air	2,145	1,958	2,051	%

Hasil pengujian menunjukkan rerata berat jenis curah sebesar 2,570, berat jenis jenuh kering permukaan sebesar 2,623, berat jenis semu sebesar 2,714, dan penyerapan air sebesar 2,051%. Berat jenis semu yang lebih tinggi daripada berat jenis curah konsisten dengan perbedaan volume yang diperhitungkan pada masing-masing kondisi pengujian. Nilai penyerapan air menunjukkan adanya pori yang dapat menyerap air, sehingga kondisi kelembapan agregat perlu diperhitungkan dalam koreksi kebutuhan air campuran agar rasio air-semen efektif tetap sesuai dengan rancangan.

5.3 *Mix Design*

Perencanaan campuran beton dilakukan berdasarkan SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal. Urutan perencanaan dimulai dari penetapan kuat tekan rencana, pemilihan faktor air-semen, penentuan kebutuhan air dan semen, penentuan proporsi agregat, hingga konversi komposisi untuk kebutuhan benda uji. Campuran dasar direncanakan untuk kuat tekan 25 MPa dengan semen PCC, agregat halus alami Gradasi II, agregat kasar batu pecah ukuran maksimum 20 mm, dan substitusi *fly ash* sebesar 12% terhadap massa total bahan pengikat.

5.3.1 Dasar dan Parameter Perencanaan

1. Menentukan Kuat Tekan Beton yang Disyaratkan

   Kuat tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari ditetapkan sebesar f'c = 25 MPa. Nilai ini menjadi dasar penentuan kuat tekan rata-rata target dan faktor air-semen campuran.

2. Menentukan Deviasi Standar

   Badan Standardisasi Nasional (2000) menetapkan deviasi standar rencana berdasarkan data hasil uji terdahulu dari sistem produksi beton yang serupa, dengan jumlah sekurang-kurangnya 30 hasil uji. Apabila jumlah data kurang dari 30, deviasi standar yang dihitung dari data tersebut dikalikan faktor pengali sebagaimana disajikan pada Tabel 5.15.

Tabel 5. 15 Faktor Pengali Deviasi Standar bila Data Hasil Uji Kurang dari 30

Jumlah Pengujian	Faktor Pengali Deviasi Standar
Kurang dari 15	Lihat butir 4.2.3.1 1) (5)
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 atau lebih	1,00

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (2000)

   Penelitian ini merupakan pengadukan pertama pada rancangan campuran yang ditinjau sehingga belum tersedia data hasil uji terdahulu. Keadaan tersebut termasuk baris pertama Tabel 5.15, yaitu jumlah pengujian kurang dari 15, sehingga deviasi standar rencana tidak dapat dihitung dan penetapan kuat tekan rata-rata yang ditargetkan mengikuti ketentuan butir 4.2.3.1 1) (5) pada standar tersebut.

3. Menghitung Nilai Tambah

   Karena data hasil uji terdahulu belum tersedia, nilai tambah tidak dihitung dari deviasi standar rencana melalui Persamaan 3.9, melainkan mengikuti

ketentuan butir 4.2.3.1 1) (5) pada SNI 03-2834-2000 sebagaimana diuraikan pada Subbab 3.6.1, yaitu kuat tekan rata-rata yang ditargetkan diambil tidak kurang dari kuat tekan rencana ditambah 12 MPa. Dengan demikian, nilai tambah yang digunakan adalah 12 MPa.

4. Menghitung Nilai Tambah atau Margin

   Nilai tambah dihitung dengan faktor statistik 1,64 untuk membatasi peluang hasil di bawah kuat tekan yang disyaratkan sebesar 5%.

   M = 1,64 x s

   M = 1,64 x 7 = 11,48 MPa ≈ 12 Mpa

   Dengan demikian, campuran ditargetkan untuk mencapai kuat tekan rata-rata 37 MPa pada umur 28 hari. Nilai tersebut berkedudukan sebagai target perencanaan campuran sebagaimana diuraikan pada Subbab 3.6.1, bukan sebagai kriteria penilaian mutu beton hasil pengujian.

5. Menentukan Kuat Tekan Beton Rata-Rata yang Ditargetkan

   f'cr = f'c + M

   f'cr = 25 + 12 = 37 MPa

   Dengan demikian, campuran ditargetkan untuk mencapai kuat tekan rata-rata 37 MPa pada umur 28 hari.

6. Menentukan Jenis Semen dan Agregat

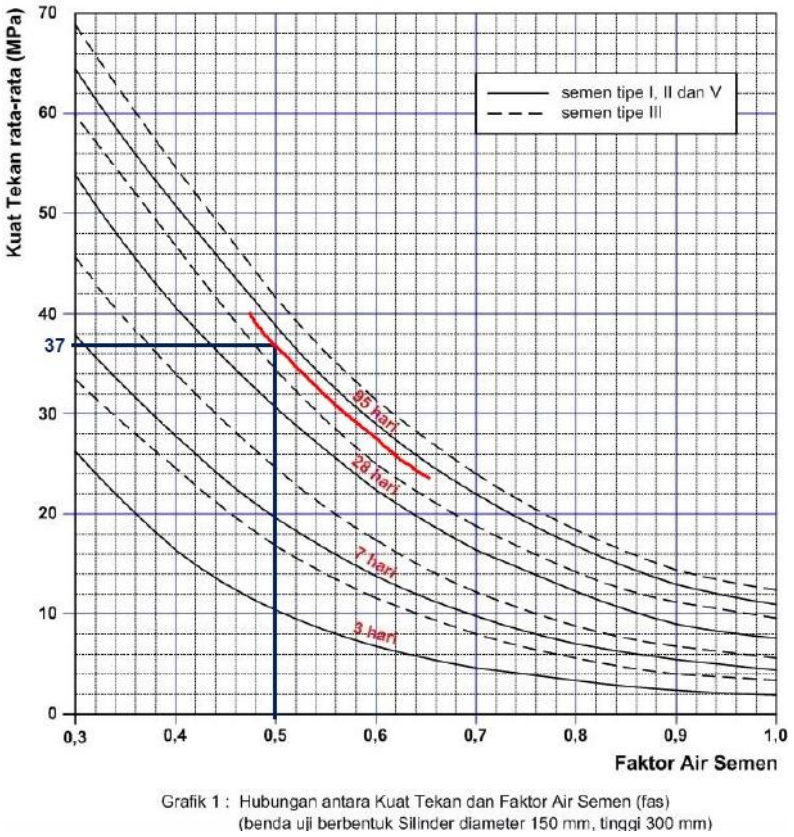
   Semen yang digunakan adalah semen PCC yang pada lembar perencanaan dikelompokkan sebagai semen Tipe I. Agregat halus berupa pasir alami, sedangkan agregat kasar berupa batu pecah. Nilai perkiraan kuat tekan beton pada faktor air-semen 0,50 untuk kombinasi semen Tipe I dan agregat kasar yang biasa digunakan ditunjukkan pada Tabel 5.16.

Tabel 5. 16 Perkiraan Kuat Tekan Beton pada Faktor Air-Semen 0,50

Jenis Semen	Jenis Agregat	3 Hari	7 Hari	28 Hari	91 Hari	Benda Uji
Semen Tipe I	Batu tak dipecah	17	23	33	40	Silinder
Semen Tipe I	Batu pecah	19	27	37	45	Silinder

7. Menentukan Faktor Air-Semen

Faktor air-semen ditentukan menggunakan grafik hubungan antara kuat tekan rata-rata dan faktor air-semen untuk benda uji silinder. Garis horizontal pada kuat tekan 37 MPa berpotongan dengan kurva semen Tipe I dan batu pecah pada faktor air-semen sekitar 0,50 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Hubungan Kuat Tekan dan Faktor Air-Semen

Dengan demikian, FAS berdasarkan persyaratan kuat tekan adalah 0,50.

8. Menentukan Faktor Air-Semen Maksimum dan Semen Minimum

   Selain ditentukan berdasarkan kuat tekan, faktor air-semen dan kadar semen harus memenuhi persyaratan durabilitas sesuai kondisi lingkungan. Ringkasan persyaratan untuk beberapa kondisi umum disajikan pada Tabel 5.17.

Tabel 5. 17 Persyaratan FAS Maksimum dan Minimum

Kondisi Beton	Semen Minimum (kg/m^3)	FAS Maksimum
Dalam ruang, lingkungan non-korosif	275	0,60
Dalam ruang, lingkungan korosif akibat kondensasi/uap	325	0,52
Luar ruang, tidak terlindung hujan dan matahari	325	0,60
Luar ruang, terlindung hujan dan matahari	275	0,60
Di dalam tanah, kondisi basah-kering bergantian	325	0,55
Terpengaruh sulfat, air tawar, payau, atau laut	Mengikuti ketentuan khusus	Mengikuti ketentuan khusus

Pembuatan benda uji dilakukan di laboratorium dengan lingkungan non-korosif. Oleh karena itu, faktor air-semen maksimum adalah 0,60 dan kadar semen minimum 275 kg/m^3. Faktor air-semen hasil penentuan kuat tekan sebesar 0,50 lebih kecil daripada batas maksimum 0,60, sehingga nilai yang digunakan adalah 0,50.

9. Menentukan Nilai *Slump*

   Dalam perencanaan campuran, *slump* ditempatkan pada kategori 60–180 mm sesuai klasifikasi pada SNI 03-2834-2000 untuk menentukan kebutuhan air bebas. Kategori tersebut digunakan sebagai parameter perhitungan *mix design*, bukan sebagai batas penerimaan berdasarkan jenis pekerjaan. Hasil pengujian *slump* seluruh *batch* berada dalam kategori tersebut.

10. Menentukan Ukuran Maksimum Agregat Kasar

    Ukuran maksimum agregat kasar yang digunakan adalah 20 mm. Ukuran tersebut lebih kecil daripada seperlima diameter cetakan silinder, yaitu 150/5 = 30 mm, sehingga memenuhi batas geometrik benda uji.

5.3.2 Perhitungan Komposisi Campuran Beton

1. Menentukan Kadar Air Bebas

Kebutuhan air dipilih berdasarkan ukuran agregat maksimum, jenis agregat, dan rentang *slump*. Nilai acuan untuk berbagai kondisi ditunjukkan pada Tabel 5.18.

Tabel 5. 18 Perkiraan Kebutuhan Air per Meter Kubik Beton

Ukuran Maksimum	**Jenis Agregat**	***Slump* 0–10 (Kg/m³)**	***Slump* 10–30 (Kg/m³)**	***Slump* 30–60 (Kg/m³)**	***Slump* 60–180 (Kg/m³)**
10 mm	Batu tak dipecah	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20 mm	Batu tak dipecah	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40 mm	Batu tak dipecah	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Untuk ukuran maksimum 20 mm dan *slump* 60–180 mm diperoleh Wh = 195 kg/m³ untuk agregat halus alami dan Wk = 225 kg/m³ untuk agregat kasar batu pecah. Karena jenis agregat halus dan kasar berbeda, kadar air bebas dihitung dengan pembobotan berikut.

$$W = \left(\frac{2}{3} \times Wh\right) + \left(\frac{1}{3} \times Wk\right)$$

$$= \left(\frac{2}{3} \times 195\right) + \left(\frac{1}{3} \times 225\right)$$

$$= 205 \text{ kg/m}^3$$

Catatan pada tabel SNI menyatakan bahwa untuk suhu di atas 25°C kebutuhan air dapat ditambah 5 liter/m³. Karena suhu perencanaan tidak dicatat dalam selama pelaksanaan penelitian, penambahan tersebut tidak diterapkan dan kadar air dasar tetap 205 kg/m³.

2. Menentukan Kadar Semen

Kadar semen berdasarkan FAS $= \frac{Kadar\ air\ bebas}{FAS}$

$= \frac{205}{0,5}$

$= 410$ kg/m³

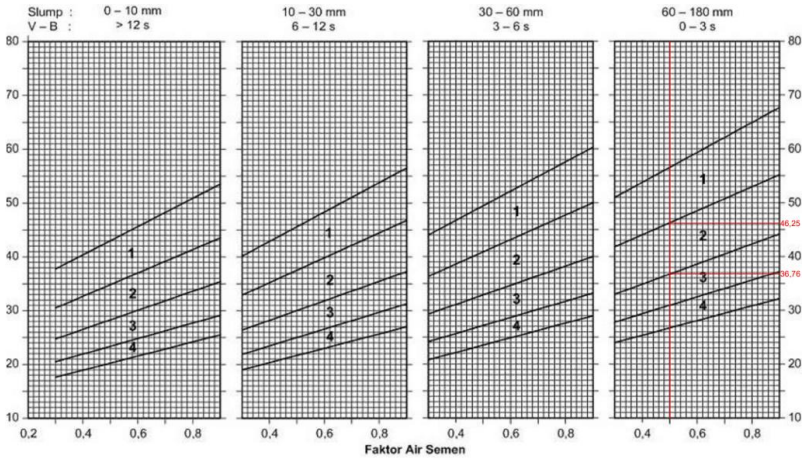
Kadar hasil perhitungan sebesar 410 kg/m³ lebih besar daripada kadar semen minimum 275 kg/m³. Oleh karena itu, kadar total bahan pengikat yang digunakan adalah 410 kg/m³ dan faktor air-semen tidak perlu disesuaikan kembali.

3. Menentukan Daerah Gradasi Agregat Halus

Berdasarkan hasil analisis saringan pada Sub Bab 5.2.1, kedua sampel agregat halus berada pada Gradasi II. Klasifikasi tersebut digunakan untuk menentukan persentase agregat halus terhadap agregat total.

4. Menentukan Persentase Agregat Halus dan Agregat Kasar

Persentase agregat halus ditentukan menggunakan grafik ukuran maksimum agregat 20 mm, rentang *slump* 60–180 mm, faktor air-semen 0,50, dan Gradasi II. Grafik acuan ditunjukkan pada Gambar 5.6.



Grafik 14 : Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan
Untuk ukuran butir maksimum 20 mm

Gambar 5. 6 Grafik Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat untuk Ukuran Maksimum 20 mm

Pada faktor air-semen 0,50 dan Gradasi II, batas persentase agregat halus yang dibaca dari grafik adalah 36,760% sampai 46,250%. Nilai yang digunakan adalah nilai tengah rentang tersebut.

Persentase agregat halus $= \frac{36{,}760\% + 46{,}250\%}{2}$

$= 41{,}505\%$

Persentase agregat kasar $= 100\% - 41{,}505\%$

$= 58{,}495\%$

5. Menentukan Berat Jenis Relatif Agregat Gabungan

Nilai berat jenis SSD diambil dari hasil pengujian pada Sub Bab 5.2, yaitu 2,626 untuk agregat halus dan 2,623 untuk agregat kasar. Berat jenis relatif agregat gabungan dihitung berdasarkan proporsi masing-masing agregat.

BJ gabungan $= (41{,}505\% \times 2{,}626137) + (58{,}495\% \times 2{,}623139)$

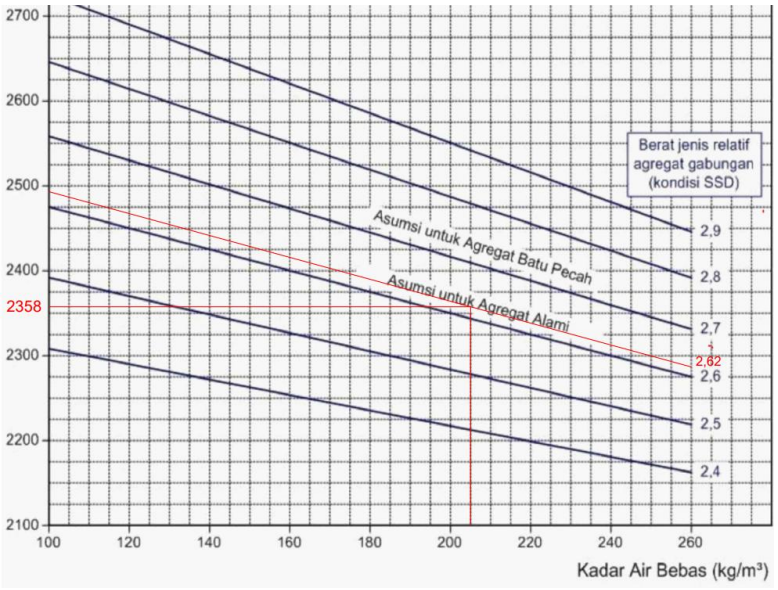
$= 2{,}624893$

$\approx 2{,}625$

6. Menentukan Berat Isi Beton Basah

Berat isi beton basah ditentukan dari grafik hubungan kadar air bebas dan berat jenis relatif agregat gabungan. Dengan kadar air bebas 205 kg/m^3 dan berat jenis agregat gabungan sekitar 2,57, pembacaan grafik menghasilkan

berat isi beton basah sebesar 2358,000 kg/m³ sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.7.



Gambar 5. 7 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Dipadatkan

7. Menentukan Kadar Agregat Gabungan

   Kadar agregat gabungan = berat isi beton - kadar semen - kadar air
   = 2358,000 - 410 - 205
   = 1743 kg/m³

8. Menentukan Kadar Agregat Halus dan Agregat Kasar

   Agregat halus = Persentase Agregat Halus x Kadar Agregat Gabungan
   = 41,505% x 1743
   = 723,43 kg/m³

   Agregat kasar = Persentase Agregat Kasar x Kadar Agregat Gabungan
   = 58,495% x 1743
   = 1019,57 kg/m³

9. Menentukan Substitusi *Fly ash* 12%

   Fly ash digunakan sebagai substitusi 12% terhadap massa total bahan pengikat 410 kg/m³. Substitusi dilakukan dengan mempertahankan jumlah total bahan pengikat dan faktor air-bahan pengikat sebesar 0,50.

   Fly ash = 12% x 410

= 49,200 kg/m³

Semen PCC = 410 - 49,200

= 360,800 kg/m³

5.3.3 Kebutuhan Bahan untuk Benda Uji

1. Menghitung Kebutuhan Bahan untuk Benda Uji

Benda uji berbentuk silinder berdiameter 0,15 m dan tinggi 0,30 m. Tambahan angka penyusutan volume sebesar 20% digunakan untuk mengantisipasi kehilangan campuran selama pengadukan, pemindahan, dan pemadatan. Faktor tambahan tersebut diterapkan pada volume pencetakan, bukan dengan mengubah komposisi teoritis per m³.

Volume silinder = 1/4 x π x 0,15² x 0,30

= 0,005301 m³

Volume rencana per silinder = 0,005301 x 120%

= 0,00636 m³

Setiap *batch* terdiri atas lima silinder untuk umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Penelitian menggunakan lima *batch*, sehingga jumlah benda uji keseluruhan adalah 25 silinder.

2. Menghitung Kebutuhan Setiap Bahan

Kebutuhan bahan dihitung menggunakan volume rencana satu silinder sebesar 0,00636 m³. Angka ini merupakan volume silinder 0,005301 m³ yang telah ditambah faktor penyusutan 20%. Kebutuhan satu *batch* dihitung untuk lima silinder dan kebutuhan keseluruhan dihitung untuk lima *batch.*

a. Semen PCC = 360,800 x 0,00636

= 2,295310

≈ 2,295 kg/silinder

b. *Fly ash* = 49,200 x 0,00636

= 0,312997

≈ 0,313 kg/silinder

c. Air = 205,000 x 0,00636

= 1,304154

≈ 1,304 kg/silinder

d. Agregat halus = 723,432 x 0,00636
= 4,602275
≈ 4,602 kg/silinder

e. Agregat kasar = 1.019,568 x 0,00636
= 6,486211
≈ 6,486 kg/silinder

5.3.4 Rekapitulasi Hasil *Mix Design*

Hasil pemilihan tabel, pembacaan grafik, dan perhitungan direkapitulasi pada Tabel 5.19. Rekapitulasi ditempatkan setelah seluruh tahapan agar asal setiap nilai dapat ditelusuri.

Tabel 5. 19 Rekapitulasi Perencanaan Campuran Beton

No.	Uraian	Nilai	Satuan/Sumber
1	Kuat tekan rencana (f'c)	25	MPa
2	Deviasi standar	7	MPa; Tabel 5.15
3	Nilai tambah	12	MPa
4	Kuat tekan rata-rata target (f'cr)	37	MPa
5	Jenis semen	PCC/Tipe I	Ditetapkan
6	Jenis agregat halus	Alami, Gradasi II	Hasil pengujian
7	Jenis agregat kasar	Batu pecah	maksimum 20 mm
8	FAS berdasarkan kuat tekan	0,50	Gambar 5.5
9	FAS maksimum	0,60	Tabel 5.17
10	FAS digunakan	0,50	Nilai terkecil
11	*Slump* rencana	60–180	mm
12	Kebutuhan air agregat alami (Wh)	195	kg/m³; Tabel 5.19
13	Kebutuhan air agregat pecah (Wk)	225	kg/m³; Tabel 5.19
14	Kadar air bebas	205	kg/m³
15	Semen minimum	275	kg/m³; Tabel 5.17
16	Total bahan pengikat	410	kg/m³
17	Agregat halus	41,505	%

Lanjutan Tabel 5.19 Rekapitulasi Perencanaan Campuran Beton

No.	Uraian	Nilai	Satuan/Sumber
18	Agregat kasar	58,495	%
19	BJ SSD agregat halus	2,623	Hasil pengujian
20	BJ SSD agregat kasar	2,626	Hasil pengujian
21	BJ relatif agregat gabungan	2,625	Perhitungan
22	Berat isi beton basah	2358	kg/m³; Gambar 5.7
23	Kadar agregat gabungan	1743	kg/m³
24	Kadar agregat halus	723,432	kg/m³
25	Kadar agregat kasar	1019,568	kg/m³
26	Semen PCC setelah substitusi	360,800	kg/m³
27	*Fly ash*	49,200	kg/m³
28	Angka penyusutan volume	20	%

Komposisi bahan per silinder, per *batch*, dan untuk seluruh benda uji disajikan pada Tabel 5.20. Nilai agregat pada tabel ini menggunakan berat isi beton hasil pembacaan grafik sebesar 2358 kg/m³.

Tabel 5. 20 Kebutuhan Bahan Beton *Fly ash* 12% untuk Benda Uji

Bahan	Komposisi (kg/m³)	1 Silinder + 20% (kg)	1 *Batch*/5 Silinder (kg)
Semen PCC	360,800	2,295	11,477
Fly ash	49,200	0,313	1,565
Air	205,000	1,304	6,521
Agregat halus	723,432	4,602	23,011
Agregat kasar	1011,348	6,486	32,431
Jumlah	2349,780	15,001	75,005

Komposisi pada Tabel 5.20 berlaku untuk agregat dalam kondisi SSD. Apabila kadar air agregat pada saat pengecoran berbeda dari kondisi SSD, massa

agregat basah dan air pencampur harus dikoreksi berdasarkan kadar air dan penyerapan masing-masing agregat agar rasio air-bahan pengikat efektif tetap 0,50.

5.4 *Slump*

Pengujian *slump* dilakukan untuk mengukur konsistensi dan tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) beton segar pada setiap kegiatan pengecoran. Pengujian mengacu pada SNI 1972:2022 tentang metode uji *slump* beton semen hidraulis. Data *slump* dalam penelitian ini terdiri atas tiga pengamatan yang mewakili lima *batch*, yaitu satu pengamatan untuk *Batch* A, satu pengamatan untuk *Batch* B dan C, serta satu pengamatan untuk *Batch* D dan E.

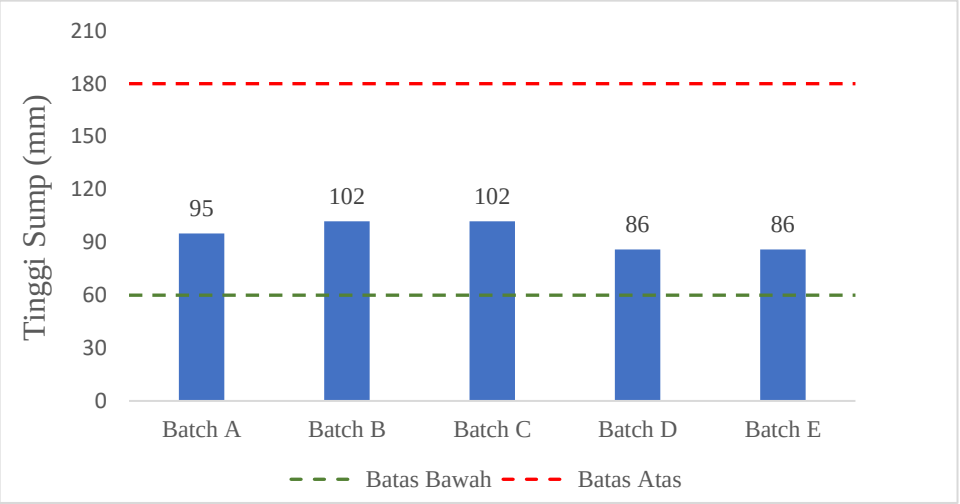
Hasil pengujian *slump* pada tiga kegiatan pengecoran disajikan pada Tabel 5.21. Rentang *slump* rencana sebesar 60–180 mm mengacu pada kelas *slump* yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan air pada *mix design*.

Tabel 5. 21 Hasil Pengujian *Slump* Beton Segar

No.	*Batch*	Pembacaan (mm)	*Slump* Rencana (mm)	Keterangan
1	A	95	60–180	Memenuhi
2	B	102	60–180	Memenuhi
3	C	102	60–180	Memenuhi
4	D	86	60–180	Memenuhi
5	E	86	60–180	Memenuhi

Perbedaan *slump* antar kegiatan pengecoran dapat dipengaruhi oleh kadar air aktual agregat, penyerapan agregat, lamanya pengadukan, jeda antara pencampuran dan pengujian, suhu lingkungan, serta konsistensi pelaksanaan pemadatan. Karena komposisi bahan pengikat dan faktor air-bahan pengikat direncanakan tetap, variasi tersebut lebih tepat dibaca sebagai variasi proses pengecoran daripada perubahan rancangan campuran.

Nilai *slump* pada Tabel 5.21 selanjutnya digambarkan bersama batas *slump* rencana agar posisi setiap kegiatan pengecoran terhadap rentang 60 mm sampai 180 mm dapat terlihat secara langsung, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.8.



Gambar 5. 8 Nilai *Slump* Beton Segar terhadap Batas *Slump* Rencana

Gambar 5.8 menunjukkan bahwa kelima nilai *slump* berada di dalam rentang *slump* rencana. Nilai terendah sebesar 86 mm terjadi pada pengecoran D dan E, yaitu 26 mm di atas batas bawah, sedangkan nilai tertinggi sebesar 102 mm pada pengecoran B dan C masih jauh di bawah batas atas. *Slump* rata-rata kelima kegiatan pengecoran sebesar 94,333 mm dengan rentang sebaran hanya 16 mm, sehingga konsistensi beton segar antarkegiatan pengecoran dapat dinyatakan seragam dan seluruh pengecoran memenuhi kelas *slump* yang digunakan dalam perhitungan kebutuhan air pada *mix design*

5.5 Perawatan

Perawatan benda uji pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode perendaman (*immersion curing*). Metode tersebut dipilih untuk mempertahankan ketersediaan air pada permukaan dan pori beton selama proses pengerasan. Pelaksanaan perawatan mengacu pada prinsip SNI 2493:2011 tentang tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium.

1. Pelaksanaan Perawatan

   Setelah pencetakan, benda uji silinder dibiarkan di dalam cetakan selama kurang lebih 24 jam. Cetakan kemudian dibuka secara hati-hati, setiap benda uji diberi identitas berdasarkan *batch* dan umur pengujian, lalu dimasukkan

ke dalam bak perendaman. Selama masa perawatan, seluruh permukaan benda uji dipertahankan terendam air untuk mengurangi kehilangan kelembapan.

Mengikuti prosedur yang telah dijelaskan pada Bab IV, benda uji dikeluarkan dari bak sekitar 24 jam sebelum waktu pengujian kuat tekan. Benda uji kemudian ditempatkan pada kondisi ruang agar air bebas pada permukaannya berkurang sebelum penimbangan, pengukuran dimensi, dan pengujian tekan. Dengan demikian, istilah immersion curing pada penelitian ini berlaku selama periode penyimpanan di dalam bak dan tidak mencakup 24 jam terakhir sebelum pengujian.

2. Jadwal Perawatan Benda Uji

Durasi relatif perawatan untuk setiap umur pengujian disajikan pada Tabel 5.22.

Tabel 5. 22 Durasi Perawatan Benda Uji dengan Metode Perendaman

No.	Umur Uji (hari)	Durasi Perendaman (hari)	Jumlah Benda Uji
1	3	1	5
2	7	5	5
3	14	12	5
4	21	19	5
5	28	26	5

Tabel 5.22 menunjukkan bahwa benda uji umur 3 hari mengalami perendaman efektif sekitar satu hari setelah pembongkaran cetakan. Durasi perendaman bertambah mengikuti umur pengujian, yaitu sekitar 5 hari untuk umur 7 hari, 12 hari untuk umur 14 hari, 19 hari untuk umur 21 hari, dan 26 hari untuk umur 28 hari. Setiap kelompok umur terdiri atas lima benda uji yang masing-masing berasal dari *Batch* A sampai *Batch* E.

3. Pembahasan Pelaksanaan Perawatan

Penerapan metode dan urutan perawatan yang sama pada seluruh *batch* diperlukan agar perbedaan kuat tekan lebih mencerminkan perkembangan

umur beton dan variasi proses pengecoran, bukan perbedaan cara perawatan. Perendaman membantu menjaga kelembapan beton selama sebagian besar periode pengerasan sehingga mendukung perkembangan mikrostruktur dan kuat tekan.

Meskipun demikian, pengeluaran benda uji 24 jam sebelum pengujian menyebabkan kondisi kelembapan saat pengujian berbeda dari benda uji yang diuji segera setelah dikeluarkan dari penyimpanan lembap. Perbedaan kondisi kelembapan dapat memengaruhi hasil kuat tekan. Karena prosedur tersebut diterapkan secara konsisten pada seluruh benda uji, perbandingan internal antarumur dan antar*batch* masih dapat dilakukan, tetapi perbandingan langsung dengan penelitian yang menggunakan perendaman terus-menerus sampai waktu pengujian harus dilakukan secara hati-hati.

Metode perendaman tidak dapat dinyatakan sebagai penyebab peningkatan kuat tekan dalam penelitian ini karena tidak tersedia kelompok pembanding dengan metode perawatan berbeda. Fungsi data perawatan adalah memastikan bahwa seluruh benda uji menerima prosedur penyimpanan yang seragam sebelum pengujian kuat tekan pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari.

5.6 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap 25 benda uji beton *fly ash* 12% yang terdiri atas lima *batch*. Setiap *batch* menyediakan masing-masing satu benda uji untuk umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Mesin *Compression Testing Machine* (CTM) yang digunakan bersifat digital dan pada saat pengujian seluruh benda uji dimasukkan dengan dimensi nominal silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm.

Nilai kuat tekan pada Tabel 5.23 dibaca langsung dari layar mesin uji tekan digital, yaitu hasil pembagian beban maksimum terhadap luas bidang tekan benda uji sesuai definisi kuat tekan pada Sub Bab 3.2. Sebagai contoh, benda uji F3B mencatat beban maksimum sebesar 292,91 kN dengan diameter 150,0 mm, sehingga perhitungannya adalah sebagai berikut.

$A = 0{,}25 \times \pi \times d^2$

$= 0{,}25 \times 3{,}1416 \times (150\ \text{mm})^2$

$= 17.671{,}459 \text{ mm}^2$

$f'c = \frac{P}{A}$

$= \frac{292{,}91 \text{ kN} \times 1000}{17.671{,}459}$

$= 16{,}576 \text{ MPa}$

Perhitungan dengan cara yang sama berlaku untuk seluruh benda uji lainnya. Hasil pengujian tekan menggunakan CTM atau mesin uji tekan dapat dilihat pada Tabel 5.23 berikut.

Tabel 5. 23 Hasil Pengujian Tekan

No.	Kode	Kuat Tekan, f'c (MPa)
1	F3A	11,921
2	F3B	16,576
3	F3C	13,824
4	F3D	15,066
5	F3E	16,032
6	F7A	14,954
7	F7B	20,921
8	F7C	21,963
9	F7D	22,676
10	F7E	22,476
11	F14A	18,643
12	F14B	25,685
13	F14C	19,338
14	F14D	24,304
15	F14E	30,297
16	F21A	20,689
17	F21B	27,502
18	F21C	27,818
19	F21D	32,956

Lanjutan Tabel 5.23 Hasil Pengujian Tekan

No.	Kode	Kuat Tekan, f'c (MPa)
20	F21E	27,047
21	F28A	22,336
22	F28B	17,5
23	F28C	28,327
24	F28D	26,415
25	F28E	29,221

Sehingga Rekapitulasi kuat tekan untuk setiap *batch* dan umur pengujian disajikan pada Tabel 5.24. Seluruh nilai dinyatakan dalam MPa dan belum dikurangi atau diganti berdasarkan hasil analisis *outlier*.

Tabel 5. 24 Hasil Pengujian dan Rata-Rata Kuat Tekan

Keterangan	3 Hari	7 Hari	14 Hari	21 hari	28 Hari
Batch A	11,921	14,954	18,643	20,689	22,336
Batch B	16,576	20,921	25,685	27,502	17,500
Batch C	13,824	21,963	19,338	27,818	28,327
Batch D	15,066	22,676	24,304	32,956	26,415
Batch E	16,032	22,476	30,297	27,047	29,221
Rata-Rata	14,684	20,598	23,653	27,202	24,760

Berdasarkan nilai mentah, kuat tekan rata-rata meningkat dari 14,684 MPa pada umur 3 hari menjadi 20,598 MPa pada umur 7 hari, 23,653 MPa pada umur 14 hari, dan 27,202 MPa pada umur 21 hari. Kenaikan berturut-turut sebesar 5,914 MPa (40,277%), 3,055 MPa (14,833%), dan 3,549 MPa (15,004%). Pola tersebut menunjukkan perkembangan kekuatan yang nyata hingga umur 21 hari.

Pada umur 28 hari, rata-rata mentah turun menjadi 24,760 MPa atau berkurang 2,443 MPa (8,979%) dari umur 21 hari. Penurunan tersebut terutama berkaitan dengan sebaran hasil antar*batch*; misalnya, *Batch* B umur 28 hari menghasilkan 17,500 MPa, sedangkan empat *batch* lainnya berada pada rentang 22,336-29,221 MPa. Nilai *Batch* D umur 21 hari sebesar 32,956 MPa juga

memperbesar rata-rata pada umur tersebut. Kedua pengamatan ini belum langsung dinyatakan sebagai *outlier* karena pengujiannya dibahas tersendiri pada Sub Bab 5.7.

Rata-rata mentah umur 28 hari sebesar 24,760 MPa berada 0,240 MPa atau 0,961% di bawah kuat tekan rencana 25 MPa. Selisih tersebut belum dapat digunakan sendiri untuk menetapkan penerimaan atau penolakan mutu beton, karena keputusan akhir harus mempertimbangkan validitas data, hasil pemeriksaan *outlier*, jumlah benda uji, dan kriteria penerimaan yang digunakan.

5.7 Penyaringan Data Hasil Pengujian

Pengolahan data kuat tekan dilakukan melalui dua tahap penyaringan sebelum angka konversi dihitung. Tahap pertama adalah eliminasi *batch* yang tidak memenuhi kuat tekan rencana, dan tahap kedua adalah identifikasi data pencilan (*outlier*) menggunakan metode *Interquartile Range* (*IQR*). Kedua tahap tersebut diperlukan agar nilai rata-rata kuat tekan pada setiap umur benar-benar mewakili perkembangan kuat tekan beton *fly ash* 12%, bukan mencerminkan penyimpangan pelaksanaan pengadukan maupun kesalahan pengujian.

5.7.1 Evaluasi Kelayakan *Batch* terhadap Kuat Tekan Rencana

Tahap pertama adalah evaluasi kelayakan *batch* terhadap kuat tekan rencana sebesar 25 MPa. Evaluasi dilakukan pada tingkat *batch* dan bukan pada tingkat benda uji tunggal mengikuti kriteria kelayakan *batch* pada Sub Bab 3.6.2. Hasil evaluasi kelima *batch* disajikan pada Tabel 5.26.

Tabel 5. 25 Evaluasi Kelayakan *Batch* terhadap Kuat Tekan Rencana

Batch	**f'c maksimum (MPa)**	**f'c rencana (MPa)**	**Keterangan**
Batch A	22,336	25	Tidak memenuhi
Batch B	27,502	25	Memenuhi
Batch C	28,327	25	Memenuhi
Batch D	32,956	25	Memenuhi
Batch E	30,297	25	Memenuhi

Tabel 5.25 menunjukkan bahwa *Batch* A memiliki kuat tekan maksimum sebesar 22,336 MPa yang dicapai pada umur 28 hari, sehingga *Batch* A tidak pernah mencapai kuat tekan rencana 25 MPa pada seluruh umur pengujian. Rata-rata kuat tekan *Batch* A hanya sebesar 17,709 MPa, sedangkan keempat *batch* lainnya, yaitu *Batch* B, C, D, dan E, telah mencapai kuat tekan rencana. Guna memastikan bahwa penyimpangan *Batch* A bersifat sistematis dan bukan kebetulan, dilakukan pemeriksaan posisi *Batch* A terhadap rata-rata kelima *batch* pada setiap umur pengujian sebagaimana disajikan pada Tabel 5.27.

Tabel 5. 26 Posisi Kuat Tekan *Batch* A terhadap Rata-rata Kelima *Batch*

Umur	f'c *Batch* A (MPa)	Rata-rata 5 *batch* (MPa)	Rasio	Selisih	Peringkat dalam umur
3 hari	11,921	14,684	0,8118	-18,82%	Terendah
7 hari	14,954	20,598	0,7260	-27,40%	Terendah
14 hari	18,643	23,653	0,7882	-21,18%	Terendah
21 hari	20,689	27,202	0,7606	-23,94%	Terendah
28 hari	22,336	24,760	0,9021	-9,79%	Bukan terendah

Tabel 5.26 menunjukkan bahwa *Batch* A berada di bawah rata-rata kelima *batch* pada seluruh umur pengujian, dengan defisit berkisar antara 9,79% dan 27,40%. *Batch* A juga menempati posisi terendah pada umur 3, 7, 14, dan 21 hari. Keteraturan tersebut menunjukkan bahwa penyimpangan *Batch* A bersifat sistematis sepanjang umur pengujian sehingga tidak dapat dijelaskan sebagai keragaman acak antarbenda uji. Penyebab yang paling mungkin adalah pemadatan yang kurang sempurna atau kelebihan kadar air pada saat pengadukan *Batch* A.

Penyertaan *Batch* A juga memengaruhi tahap penyaringan berikutnya. Apabila *Batch* A disertakan pada perhitungan kuartil umur 28 hari, nilai 22,336 MPa menempati kuartil pertama sehingga Q1 turun dari 24,186 MPa menjadi 22,336 MPa dan rentang antarkuartil membesar dari 4,364 MPa menjadi 5,991 MPa. Sesuai Persamaan 3.13, kedua perubahan tersebut menurunkan batas bawah kendali dari 17,640 MPa menjadi 13,349 MPa, sehingga benda uji F28B dengan

kuat tekan 17,500 MPa tidak lagi terdeteksi sebagai pencilan. Keadaan tersebut merupakan gejala penyamaran yang diuraikan pada Subbab 3.6.3.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, keseluruhan lima benda uji *Batch* A dieliminasi dari analisis angka konversi sesuai ketentuan pada Subbab 3.6.2. Eliminasi berlaku pada semua umur pengujian karena penyebab penyimpangan melekat pada pengadukannya, sehingga tahap analisis selanjutnya hanya menggunakan *Batch* B, C, D, dan E.

5.7.2 Identifikasi *Outlier* Menggunakan Metode *Interquartile Range* (*IQR*)

Tahap kedua adalah identifikasi *outlier* dengan metode Interquartile Range yang diterapkan pada empat *batch* tersisa untuk setiap umur pengujian secara terpisah menggunakan persamaan pada Sub Bab 3.6.3. Sebagai contoh perhitungan, batas kendali umur 3 hari ditentukan dari empat benda uji valid, yaitu F3B, F3C, F3D, dan F3E dengan kuat tekan berturut-turut sebesar 16,576 MPa, 13,824 MPa, 15,066 MPa, dan 16,032 MPa, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut.

Q1	= 14,756 MPa
Q3	= 16,168 MPa
IQR	= 16,168 − 14,756
	= 1,413 MPa
Batas bawah	= 14,756 − 1,5 × 1,413
	= 12,637 MPa
Batas atas	= 16,168 + 1,5 × 1,413
	= 18,287 MPa

Keempat nilai kuat tekan umur 3 hari berada di dalam kedua batas tersebut sehingga tidak terdapat *outlier* pada umur 3 hari. Perhitungan dengan cara yang sama diterapkan pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari, dengan hasil perhitungan batas kendali disajikan pada Tabel 5.27 hingga Tabel 5.31.

Tabel 5. 27 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 3 Hari

Batch	F'c	Q1	Q3	*IQR*	Upperbound	Lowerbound	*Outlier*
B	16,576	14,756	16,168	1,413	18,287	12,637	Bukan
C	13,824						Bukan
D	15,066						Bukan
E	16,032						Bukan

Tabel 5. 28 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 7 Hari

Batch	F'c	Q1	Q3	*IQR*	Upperbound	Lowerbound	*Outlier*
B	20,921	21,703	22,526	0,823	23,761	20,467	Bukan
C	21,963						Bukan
D	22,676						Bukan
E	22,476						Bukan

Tabel 5. 29 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 14 Hari

Batch	F'c	Q1	Q3	*IQR*	Upperbound	Lowerbound	*Outlier*
B	25,685	23,063	26,838	3,776	32,501	17,399	Bukan
C	19,338						Bukan
D	24,304						Bukan
E	30,297						Bukan

Tabel 5. 30 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 21 Hari

Batch	F'c	Q1	Q3	*IQR*	Upperbound	Lowerbound	*Outlier*
B	27,502	27,388	29,103	1,714	31,674	24,817	Bukan
C	27,818						Bukan
D	32,956						Iya
E	27,047						Bukan

Tabel 5. 31 Deteksi *Outlier* Menggunakan Metode *IQR* Umur 28 Hari

Batch	**F'c**	**Q1**	**Q3**	***IQR***	**Upperbound**	**Lowerbound**	***Outlier***
B	17,5	24,186	28,551	4,364	35,097	17,640	Iya
C	28,327						Bukan
D	26,415						Bukan
E	29,221						Bukan

Berdasarkan Tabel 5.27 hingga 5.31, terdapat dua benda uji yang teridentifikasi sebagai *outlier*. Benda uji pertama adalah F21D dengan kuat tekan 32,956 MPa yang melampaui batas atas umur 21 hari sebesar 31,674 MPa. Nilai tersebut bahkan lebih tinggi daripada seluruh benda uji umur 28 hari, sehingga tidak konsisten dengan pola perkembangan kuat tekan terhadap umur. Benda uji kedua adalah F28B dengan kuat tekan 17,500 MPa yang berada di bawah batas bawah umur 28 hari sebesar 17,640 MPa. Nilai F28B juga lebih rendah daripada benda uji F21B dari *batch* yang sama yang mencapai 27,502 MPa, yaitu mengalami penurunan sebesar 10,002 MPa atau 36,37%. Secara teori, kuat tekan beton yang dalam perawatan tidak mengalami penurunan seiring bertambahnya umur, sehingga penurunan tersebut mengindikasikan adanya cacat pada benda uji. Kedua benda uji tersebut dikeluarkan dari perhitungan rata-rata kuat tekan.

Pada umur 3, 7, dan 14 hari tidak ditemukan benda uji yang berada di luar batas bawah maupun batas atas, sehingga seluruh data pada ketiga umur tersebut dinyatakan valid. Dengan demikian, dari 25 benda uji yang diuji, sebanyak 5 benda uji dikeluarkan melalui eliminasi *Batch* A dan 2 benda uji dikeluarkan melalui metode *IQR*, yaitu F21D dan F28B. Jumlah data yang digunakan pada analisis angka konversi adalah 18 benda uji.

5.8 Analisis Angka Konversi

Analisis angka konversi dilakukan menggunakan data yang telah melalui kedua tahap penyaringan pada Sub Bab 5.7. Nilai kuat tekan seluruh *batch* pada setiap umur dirata-ratakan, kecuali *Batch* A yang telah dieliminasi serta benda uji

F21D dan F28B yang teridentifikasi sebagai *outlier*. Rekapitulasi kuat tekan rata-rata beserta ukuran sebarannya disajikan pada Tabel 5.32.

Tabel 5. 32 Rekapitulasi Nilai f'c Setelah Proses *Outlier*

Keterangan	Kuat Tekan, f'c (MPa)				
	3 Hari	**7 Hari**	**14 Hari**	**21 Hari**	**28 Hari**
***Batch* B**	16,576	20,921	25,685	27,502	*outlier*
***Batch* C**	13,824	21,963	19,338	27,818	28,327
***Batch* D**	15,066	22,676	24,304	*outlier*	26,415
***Batch* E**	16,032	22,476	30,297	27,047	29,221
***mean* (xbar)**	15,375	22,009	24,906	27,456	27,988

Tabel 5.32 menunjukkan bahwa kuat tekan rata-rata meningkat secara bertahap dari 15,37 MPa pada umur 3 hari menjadi 22,01 MPa pada umur 7 hari, 24,906 MPa pada umur 14 hari, 27,456 MPa pada umur 21 hari, dan 27,988 MPa pada umur 28 hari. Kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 27,988 MPa telah melampaui kuat tekan rencana 25 MPa, yaitu lebih tinggi 2,988 MPa atau 11,95%.

Kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 27,988 MPa tersebut belum mencapai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan sebesar 37 MPa pada perencanaan campuran di Subbab 5.3. Sebagaimana diuraikan pada Subbab 3.6.1, nilai tersebut ditetapkan menurut ketentuan yang berlaku ketika data hasil uji terdahulu belum tersedia, yaitu kuat tekan rencana ditambah 12 MPa, sehingga berkedudukan sebagai sasaran perencanaan campuran dan bukan sebagai kriteria penilaian mutu. Penilaian mutu dilakukan terhadap kuat tekan rencana sebesar 25 MPa, dan kriteria tersebut telah terpenuhi.

Angka konversi kuat tekan dihitung sebagai perbandingan antara kuat tekan rata-rata pada suatu umur terhadap kuat tekan rata-rata umur 28 hari menggunakan persamaan pada Sub Bab 3.5. Perhitungan menggunakan kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 27,988 MPa sebagai pembagi. Sebagai contoh, angka konversi pada umur 3 hari dihitung sebagai berikut.

$$k_t = \frac{f'c_{(t)}}{f'c_{(28)}}$$

$$= \frac{15{,}375}{27{,}988}$$

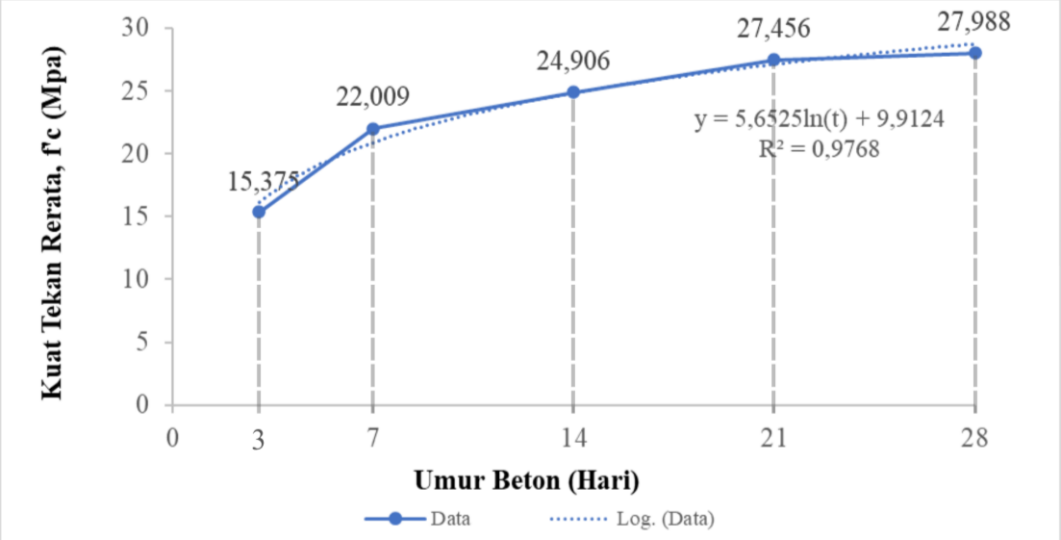
$$= 0{,}549$$

Cara yang sama diterapkan untuk umur 7, 14, dan 21 hari. Hasil perhitungan angka konversi disajikan pada Tabel 5.33.

Tabel 5. 33 Angka Konversi Kuat Tekan Beton *Fly ash* Kelas C 12%

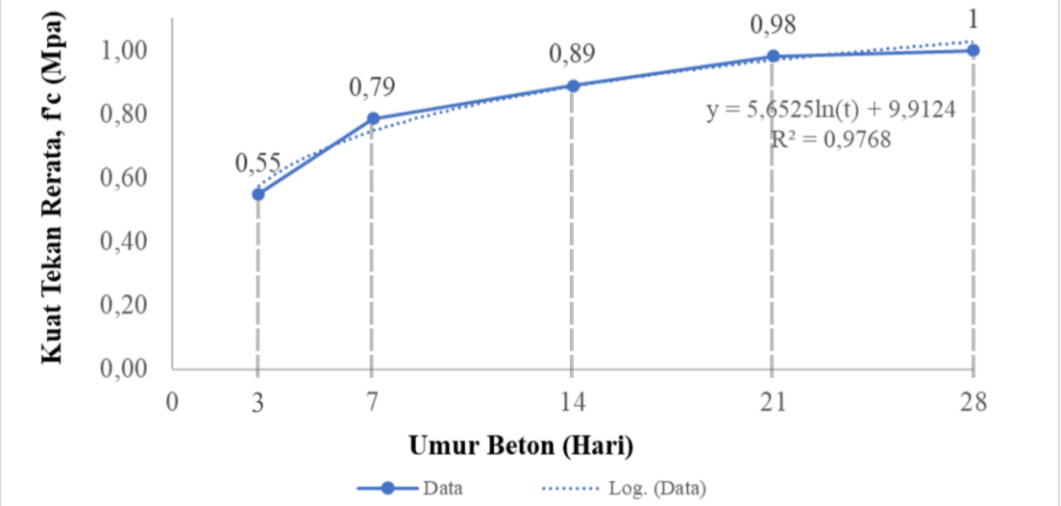
Umur	f'c rata-rata (MPa)	Angka konversi (k_t)
3 hari	15,375	0,55
7 hari	22,009	0,79
14 hari	24,906	0,89
21 hari	27,456	0,98
28 hari	27,988	1,00

Tabel 5.33 menunjukkan bahwa angka konversi meningkat secara bertahap seiring bertambahnya umur beton, yaitu 0,549 pada umur 3 hari, 0,786 pada umur 7 hari, 0,890 pada umur 14 hari, dan 0,981 pada umur 21 hari. Peningkatan terbesar terjadi pada rentang 3 hari ke 7 hari sebesar 0,237, kemudian melandai menjadi 0,104 pada rentang 7 hari ke 14 hari dan 0,091 pada rentang 14 hari ke 21 hari. Pola melandai tersebut sesuai dengan teori hidrasi semen, yaitu laju pembentukan kalsium silikat hidrat (C-S-H) berlangsung cepat pada umur awal kemudian melambat karena lapisan produk hidrasi menghambat difusi air menuju inti partikel semen yang belum bereaksi. Seluruh angka konversi juga bernilai kurang dari satu, termasuk pada umur 21 hari sebesar 0,981, sehingga hasil analisis telah konsisten dengan teori bahwa kuat tekan sebelum umur 28 hari tidak melampaui kuat tekan umur 28 hari. Perkembangan kuat tekan rata-rata terhadap umur beton beserta kurva regresinya ditampilkan pada Gambar 5.9.



Gambar 5. 9 Kurva Perkembangan Kuat Tekan Rerata terhadap Umur

Gambar 5.9 menunjukkan bahwa hubungan antara kuat tekan dan umur beton mengikuti pola logaritmik, yaitu meningkat tajam pada umur awal kemudian melandai menjelang umur 28 hari. Model regresi yang diperoleh adalah f'c(t) = 5,6525 ln(t) + 9,9124 dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9768. Nilai tersebut menunjukkan bahwa 97,68% variasi kuat tekan dapat dijelaskan oleh perubahan umur beton, sehingga bentuk logaritmik dinyatakan sesuai untuk menggambarkan perkembangan kuat tekan pada penelitian ini. Gambar 5. juga memperlihatkan bahwa kurva kuat tekan rerata melewati kuat tekan rencana 25 MPa pada umur sekitar 14 hari, yaitu lebih cepat daripada umur rencana 28 hari. Kurva angka konversi hasil penelitian ditampilkan pada Gambar 5.10.



Gambar 5. 10 Kurva Angka Konversi Kuat Tekan Hasil Penelitian

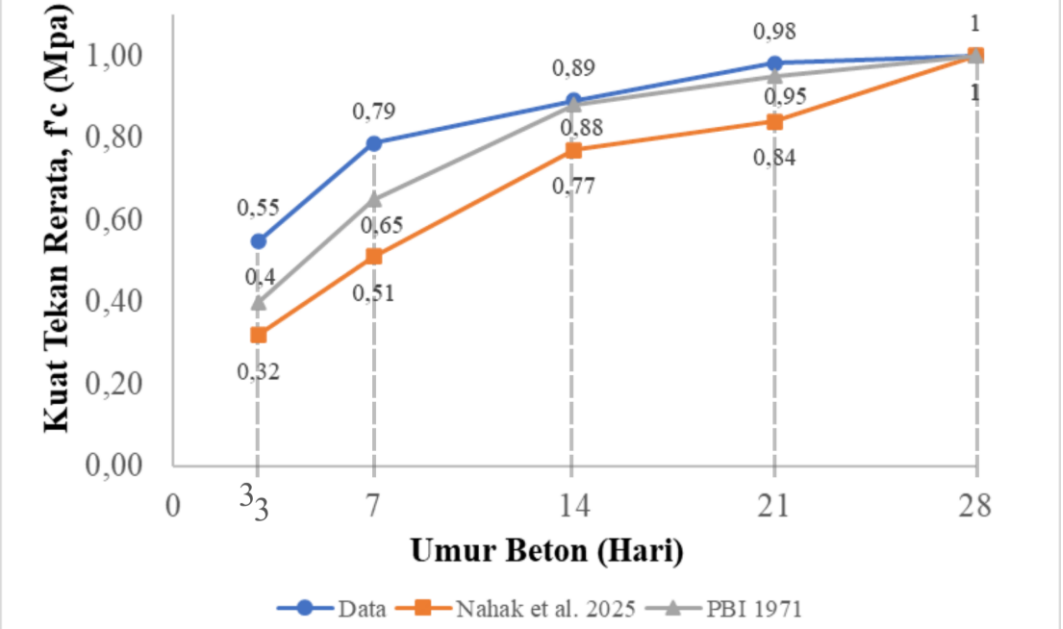
5.9 Perbandingan Angka Konversi

Angka konversi hasil penelitian selanjutnya dibandingkan dengan dua acuan pembanding, yaitu angka konversi PBI-1971 dan hasil penelitian Nahak dkk. (2025). PBI-1971 digunakan sebagai acuan normatif yang selama ini dipakai dalam praktik di Indonesia, sedangkan Nahak dkk. (2025) digunakan sebagai kelompok kontrol eksternal karena menggunakan semen PCC Tipe I, benda uji silinder berukuran 150 mm × 300 mm, dan umur pengujian yang sama, namun tanpa penambahan *fly ash*. PBI-1971 memuat dua baris angka konversi, yaitu untuk semen Portland biasa dan untuk semen Portland dengan kekuatan awal tinggi. Perbandingan pada penelitian ini hanya menggunakan baris semen Portland biasa karena semen yang dipakai adalah PCC Tipe I yang tergolong semen dengan laju pengerasan normal, bukan semen dengan kekuatan awal tinggi. Hasil perbandingan disajikan pada Tabel 5.34.

Tabel 5. 34 Perbandingan Angka Konversi Hasil Penelitian dengan PBI-1971 dan Nahak dkk. (2025)

Umur	PBI Portland Biasa (1971)	Nahak dkk. (2025)	Hasil penelitian
3 hari	0,40	0,32	0,55
7 hari	0,65	0,51	0,79
14 hari	0,88	0,77	0,89
21 hari	0,95	0,84	0,98
28 hari	1,00	1,00	1,005

Perbandingan ketiga kurva angka konversi ditampilkan pada Gambar 5.11



Gambar 5. 11 Perbandingan Angka Konversi Hasil Penelitian dengan PBI-1971 dan Nahak dkk. (2025)

Gambar 5.11 menunjukkan bahwa kurva hasil penelitian berada di atas kurva PBI-1971 pada umur awal, yaitu 37,33% lebih tinggi pada umur 3 hari dan 20,98% lebih tinggi pada umur 7 hari. Selisih tersebut menyusut menjadi 1,12% pada umur 14 hari, sehingga kedua kurva nyaris berpotongan pada umur tersebut. Terhadap hasil Nahak dkk. (2025), kurva hasil penelitian berada di atas pada seluruh umur dengan selisih terbesar 71,67% pada umur 3 hari.

Hasil tersebut dapat dijelaskan oleh jenis *fly ash* yang digunakan. *Fly ash* pada penelitian ini termasuk kelas C menurut SNI 2460:2014, yaitu memiliki kandungan kalsium oksida yang tinggi sehingga bersifat sementisius sekaligus pozzolanik. Sifat sementisius menyebabkan *fly ash* kelas C mampu bereaksi dengan air dan menyumbang kekuatan pada umur awal tanpa harus menunggu kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, berbeda dengan *fly ash* kelas F yang bersifat pozzolanik murni dan reaksinya berlangsung lambat. Naik dan Ramme (1990) menyatakan bahwa *fly ash* kelas C dapat digunakan untuk menghasilkan beton dengan kekuatan awal tinggi hingga kadar substitusi semen sekurang-kurangnya 30%. Hardjito dkk. (2018) melaporkan bahwa pada suhu ruang mortar dengan *fly ash* kelas C menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan kelas F karena kandungan kalsium yang tinggi memberikan reaksi hidrasi tambahan. Sebaliknya, Saha (2018) melaporkan bahwa beton dengan *fly ash* kelas F menunjukkan kuat tekan umur awal yang rendah dibandingkan beton kontrol dan baru meningkat secara bertahap seiring berlangsungnya reaksi pozzolanik.

Titik nyaris berpotongan kurva pada umur sekitar 14 hari sebagaimana ditandai pada Gambar 5.11 juga sejalan dengan hasil penelitian terdahulu. *Wisconsin Highway Research Program* (2014) melaporkan bahwa beton dengan *fly ash* kelas C telah mencapai kuat tekan setara beton tanpa *fly ash* pada umur sekitar 14 hari, sedangkan beton dengan *fly ash* kelas F baru mencapai kondisi setara pada umur sekitar 90 hari. Pada penelitian ini, angka konversi umur 14 hari sebesar 0,890 hanya berselisih 1,12% terhadap PBI-1971 baris Portland biasa sebesar 0,88, sehingga pengaruh sifat sementisius *fly ash* kelas C terhadap angka konversi praktis tidak lagi teramati setelah umur 14 hari.

Selain faktor jenis *fly ash*, perbedaan angka konversi juga dipengaruhi oleh efek normalisasi. Angka konversi merupakan rasio terhadap kuat tekan umur 28 hari, sehingga besarnya dipengaruhi oleh nilai kuat tekan umur 28 hari yang menjadi pembagi. Kuat tekan rata-rata umur 28 hari pada penelitian ini sebesar 27,988 MPa, sedangkan Nahak dkk. (2025) mencatat 30,06 MPa. Pembagi yang lebih kecil menyebabkan seluruh rasio pada umur sebelum 28 hari menjadi lebih besar. Oleh karena itu, selisih angka konversi pada Tabel 5.34 tidak dapat

sepenuhnya diatribusikan pada perilaku material, melainkan merupakan gabungan pengaruh sifat sementisius *fly ash* kelas C dan efek normalisasi tersebut.

5.10 Uji Signifikansi dan Rekomendasi Penggunaan Angka Konversi

Selisih persentase pada Sub Bab 5.9 baru menunjukkan besarnya perbedaan, sehingga perlu diuji apakah perbedaan tersebut nyata secara statistik. Pengujian dilakukan dengan uji t satu sampel pada taraf nyata 5% mengikuti persamaan dan kriteria keputusan pada Sub Bab 3.6.4, yaitu dengan membandingkan kuat tekan rata-rata pada setiap umur terhadap kuat tekan yang diprediksi oleh angka konversi acuan. Kuat tekan prediksi diperoleh dengan mengalikan angka konversi acuan dengan kuat tekan rata-rata umur 28 hari hasil penelitian.

Sebagai contoh perhitungan, langkah pengujian diuraikan untuk umur 3 hari terhadap angka konversi PBI-1971 sebesar 0,400. Pengujian dilakukan dalam empat langkah, yaitu penentuan kuat tekan rata-rata, penentuan standar deviasi, penentuan kuat tekan prediksi acuan beserta galat bakunya, dan pengujian statistik dengan uji t satu sampel.

1. Langkah pertama, kuat tekan rata-rata umur 3 hari dihitung dengan persamaan pada Sub Bab 3.6.2. Setelah *Batch* A dieliminasi, umur 3 hari diwakili oleh empat benda uji valid, yaitu F3B, F3C, F3D, dan F3E sebagaimana tercantum pada Tabel 5.32, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut.

$$\text{f'c rata-rata} = \frac{16{,}576 + 13{,}824 + 15{,}066 + 16{,}032}{4}$$
$$= \frac{61{,}498}{4}$$
$$= 15{,}375 \text{ MPa}$$

2. Langkah kedua, standar deviasi kuat tekan dihitung dengan persamaan pada Sub Bab 3.6.2. Dengan kuat tekan rata-rata sebesar 15,375 MPa, diperoleh hasil sebagai berikut.

$$s = \sqrt{\frac{(16{,}576 - 15{,}375)^2 + (13{,}824 - 15{,}375)^2 + (15{,}066 - 15{,}375)^2 + (16{,}032 - 15{,}375)^2}{4 - 1}}$$
$$= \sqrt{1{,}4584}$$
$$= 1{,}208 \text{ MPa}$$

3. Langkah ketiga, kuat tekan prediksi angka konversi acuan dan galat baku kuat tekan rata-rata dihitung dengan persamaan pada Sub Bab 3.6.4. Dengan angka konversi PBI-1971 umur 3 hari sebesar 0,400 dan kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 27,988 MPa, diperoleh hasil sebagai berikut..

   f'c prediksi = 0,400 × 27,988

   = 11,195 MPa

   $SE = \frac{1,208}{\sqrt{4}}$

   = 0,604 MPa

4. Langkah keempat, selisih antara kuat tekan hasil pengujian dan kuat tekan prediksi diuji dengan uji t satu sampel menggunakan persamaan pada Sub Bab 3.6.4. Substitusi nilai yang telah diperoleh menghasilkan perhitungan sebagai berikut.

   $t\ hitung = \frac{15,375 - 11,195}{0,604}$

   = 6,92

Derajat kebebasan pengujian sebesar n dikurangi satu, yaitu tiga, sehingga nilai t kritis pada taraf nyata 5% adalah 3,182. Nilai t hitung sebesar 6,92 lebih besar daripada t kritis sebesar 3,182, dan nilai p yang diperoleh sebesar 0,006 lebih kecil daripada 0,05, sehingga hipotesis nol ditolak. Kuat tekan hasil pengujian pada umur 3 hari karena itu berbeda signifikan terhadap kuat tekan yang diprediksi oleh angka konversi PBI-1971, sehingga angka konversi hasil penelitian juga berbeda signifikan terhadap PBI-1971.

Dengan cara yang sama, angka konversi Nahak dkk. (2025) umur 3 hari sebesar 0,320 menghasilkan kuat tekan prediksi sebesar 8,956 MPa, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut.

$t\ hitung = \frac{15,375 - 8,956}{0,604}$

= 10,63

Nilai p yang diperoleh sebesar 0,002 sehingga perbedaannya juga signifikan. Perhitungan dengan langkah yang sama diterapkan pada umur 7 hari, 14 hari, dan 21 hari, baik terhadap angka konversi PBI-1971 maupun terhadap angka konversi Nahak dkk. (2025). Hasil pengujian terhadap seluruh umur, baik terhadap angka

konversi PBI-1971 maupun terhadap angka konversi Nahak dkk. (2025), disajikan pada Tabel 5.35.

Tabel 5. 35 Hasil Uji Signifikansi Kuat Tekan terhadap Kuat Tekan Prediksi Angka Konversi Acuan

Umur	f'c rerata (MPa)	SE (MPa)	n (df)	Terhadap PBI-1971	Terhadap Nahak dkk. (2025)
3 hari	15,375	0,604	4 (3)	prediksi 11,195; t = 6,92; p = 0,006; berbeda signifikan	prediksi 8,956; t = 10,63; p = 0,002; berbeda signifikan
7 hari	22,009	0,393	4 (3)	prediksi 18,192; t = 9,72; p = 0,002; berbeda signifikan	prediksi 14,274; t = 19,71; p < 0,001; berbeda signifikan
14 hari	24,906	2,255	4 (3)	prediksi 24,629; t = 0,12; p = 0,910; tidak berbeda signifikan	prediksi 21,551; t = 1,49; p = 0,234; tidak berbeda signifikan
21 hari	27,456	0,224	3 (2)	prediksi 26,589; t = 3,88; p = 0,061; tidak berbeda signifikan	prediksi 23,510; t = 17,63; p = 0,003; berbeda signifikan

Tabel 5.35 menunjukkan bahwa pada umur 3 hari dan 7 hari kuat tekan hasil pengujian berbeda signifikan terhadap kuat tekan prediksi kedua acuan, dengan nilai p berturut-turut sebesar 0,006 dan 0,002 terhadap PBI-1971 serta 0,002 dan kurang dari 0,001 terhadap Nahak dkk. (2025). Perbedaan pada umur awal karena itu tidak dapat dijelaskan hanya oleh sebaran data, melainkan mencerminkan perilaku material yang berbeda.

Pada umur 14 hari perbedaan terhadap kedua acuan tidak signifikan. Hal tersebut sejalan dengan standar deviasi umur 14 hari yang mencapai 4,511 MPa sehingga galat baku kuat tekan rata-rata membesar menjadi 2,255 MPa dan selisih sebesar 0,277 MPa terhadap kuat tekan prediksi PBI-1971 menjadi tidak berarti secara statistik. Temuan ini justru memperkuat pengamatan pada Gambar 5.11 bahwa kurva hasil penelitian dan kurva PBI-1971 berpotongan pada umur sekitar 14 hari. Pada umur 21 hari kuat tekan hasil pengujian sudah setara dengan kuat tekan prediksi PBI-1971, tetapi masih berbeda signifikan terhadap kuat tekan prediksi Nahak dkk. (2025).

Berdasarkan hasil tersebut, penggunaan angka konversi PBI-1971 pada beton dengan substitusi *fly ash* kelas C sebesar 12% tidak dianjurkan untuk penilaian pada umur awal. Sebagai ilustrasi, perkiraan kuat tekan umur 28 hari dari hasil uji umur

3 hari dengan angka konversi PBI-1971 sebesar 0,40 menghasilkan 15,375/0,40 = 38,438 MPa, sedangkan kuat tekan umur 28 hari yang terukur hanya 27,988 MPa. Perkiraan tersebut terlalu tinggi sebesar 37,33% sehingga berpotensi menyesatkan dalam pengendalian mutu. Dengan angka konversi hasil penelitian sebesar 0,549 perkiraan tersebut kembali sesuai dengan nilai terukur.

Oleh karena itu direkomendasikan penggunaan angka konversi 0,55 untuk umur 3 hari, 0,79 untuk umur 7 hari, 0,89 untuk umur 14 hari, dan 0,98 untuk umur 21 hari pada beton dengan spesifikasi serupa, yaitu beton mutu 25 MPa dengan semen PCC Tipe I dan substitusi *fly ash* kelas C sebesar 12%. Angka konversi PBI-1971 masih dapat digunakan untuk umur 14 hari dan seterusnya karena pada umur tersebut perbedaannya tidak signifikan.

Rekomendasi tersebut bersifat indikatif. Setelah penyaringan data, setiap umur pengujian hanya diwakili oleh tiga sampai empat benda uji sehingga derajat kebebasan pengujian rendah, yaitu dua sampai tiga. Penerapan angka konversi ini pada pekerjaan konstruksi perlu didahului verifikasi dengan jumlah benda uji yang lebih banyak.

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah diuraikan pada Bab V, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Kuat tekan beton dengan substitusi *fly ash* 12% terhadap berat pengikat diperoleh sebesar 15,375 MPa pada umur 3 hari, 22,009 MPa pada umur 7 hari, 24,906 MPa pada umur 14 hari, 27,456 MPa pada umur 21 hari, dan 27,988 MPa pada umur 28 hari. Kuat tekan meningkat seiring bertambahnya umur beton dan telah melampaui kuat tekan rencana 25 MPa pada umur 28 hari, sehingga beton yang diteliti dinyatakan memenuhi mutu rencana. Pola perkembangan kuat tekan terhadap umur mengikuti hubungan logaritmik dengan tingkat kesesuaian model yang sangat baik, dan kuat tekan rencana telah terlampaui sebelum umur 28 hari.
2. Angka konversi kuat tekan beton dengan substitusi *fly ash* 12% terhadap kuat tekan umur 28 hari diperoleh sebesar 0,549 pada umur 3 hari, 0,786 pada umur 7 hari, 0,890 pada umur 14 hari, 0,981 pada umur 21 hari, dan 1,000 pada umur 28 hari.
3. Berdasarkan uji-t satu sampel pada taraf nyata 5%, angka konversi ini signifikan terhadap PBI-1971 pada umur 3 dan 7 hari, sedangkan pada umur 14 dan 21 hari tidak menunjukkan perbedaan signifikan. Terhadap Nahak dkk. (2025), perbedaan signifikan terjadi pada umur 3, 7, dan 21 hari, sedangkan pada umur 14 hari tidak menunjukkan perbedaan signifikan. Sehingga angka konversi yang dapat dipertimbangkan untuk estimasi kuat tekan beton yang mengandung fly ash kelas C sebesar 12% adalah 0,55 pada umur 3 hari dan 0,79 pada umur 7 hari. Angka konversi PBI-1971 tidak dianjurkan digunakan pada umur pengujian dini karena berpotensi menyimpulkan mutu beton lebih tinggi daripada keadaan aktual, sedangkan

4. pada umur 14 hari dan seterusnya angka konversi tersebut masih dapat digunakan.

6.2 Saran

Berdasarkan pelaksanaan dan hasil penelitian ini, diajukan beberapa saran sebagai berikut.

1. Penelitian lanjutan disarankan menyertakan kelompok kontrol internal berupa beton tanpa *fly ash* yang dibuat dari material, *batch*, dan waktu pengadukan yang sama. Pada penelitian ini pembanding beton tanpa *fly ash* diambil dari hasil penelitian Nahak dkk. (2025) sebagai kontrol eksternal, sehingga perbedaan angka konversi yang teramati masih mengandung pengaruh perbedaan kuat tekan rencana dan kondisi laboratorium. Kontrol internal akan menghilangkan pengaruh tersebut dan membuat perbandingan angka konversi menjadi lebih meyakinkan.
2. Jumlah benda uji pada setiap umur pengujian disarankan diperbanyak, sekurang-kurangnya tiga benda uji untuk setiap *batch* pada setiap umur. Pada penelitian ini setiap *batch* hanya menyediakan satu benda uji untuk setiap umur, sehingga eliminasi *Batch* A dan dua benda uji *outlier* menyisakan 18 dari 25 benda uji, dan jumlah data pada umur 21 dan 28 hari berkurang menjadi tiga. Penambahan jumlah benda uji akan menjaga kecukupan data apabila terdapat benda uji yang harus dikeluarkan.
3. Pengendalian pelaksanaan pada setiap *batch* pengadukan disarankan diperketat, khususnya pada penakaran air dan proses pemadatan. Penyimpangan *Batch* A yang berlangsung sistematis pada seluruh umur pengujian menunjukkan bahwa kesalahan pelaksanaan pada satu kali pengadukan dapat mengakibatkan seluruh benda uji dari *batch* tersebut tidak dapat digunakan. Pencatatan kondisi pelaksanaan setiap *batch* juga disarankan dilakukan agar penyebab penyimpangan dapat ditelusuri.
4. Pengujian komposisi kimia *fly ash* disarankan dilakukan, misalnya menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF), untuk memperoleh kadar kalsium oksida dan senyawa oksida lainnya secara kuantitatif. Sifat sementisius *fly ash* kelas C menjadi penjelasan utama atas tingginya angka

konversi pada umur awal dalam penelitian ini, sehingga data komposisi kimia akan memperkuat dasar penjelasan tersebut.

5. Rentang umur pengujian disarankan diperluas hingga umur 56 dan 90 hari. Reaksi pozzolanik *fly ash* berlangsung dalam jangka panjang, sehingga pengujian pada umur tersebut dapat menunjukkan apakah kuat tekan beton *fly ash* 12% masih meningkat melampaui kuat tekan umur 28 hari sebagaimana dilaporkan pada penelitian terdahulu.
6. Variasi kadar substitusi *fly ash* dan faktor air semen disarankan diteliti lebih lanjut, misalnya kadar 8%, 12%, 16%, dan 20% terhadap berat pengikat. Penelitian ini hanya menggunakan satu kadar substitusi, yaitu 12%, sehingga belum dapat diketahui apakah angka konversi yang diperoleh tetap berlaku pada kadar substitusi yang berbeda.
7. Angka konversi yang direkomendasikan pada penelitian ini disarankan diverifikasi terlebih dahulu sebelum diterapkan pada pekerjaan dengan material, kelas *fly ash*, kuat tekan rencana, atau metode perawatan yang berbeda. Verifikasi dapat dilakukan melalui pengujian pendahuluan pada umur dini dan umur 28 hari untuk memastikan kesesuaian angka konversi terhadap kondisi setempat.

DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 214. 2011. *ACI 214R-11 Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete*. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan.

American Concrete Institute. 1992. *ACI 209R-92 Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures*. American Concrete Institute. Farmington Hills, Michigan.

ASTM International. 2018. *ASTM C33/C33M-18 Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.

ASTM International. 2019. *ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.

ASTM International. 2021. *ASTM C39/C39M-21 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.

ASTM International. 2021. *ASTM E178-21 Standard Practice for Dealing with Outlying Observations*. ASTM International. West Conshohocken, Pennsylvania.

Badan Standardisasi Nasional. 1990. *SNI 03-1968-1990 Metode Pengujian tentang Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 1996. *SNI 03-4142-1996 Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregat yang Lolos Saringan No. 200 (0,075 mm)*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 1998. *SNI 03-4804-1998 Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara dalam Agregat*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2000. *SNI 03-2834-2000 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2002. *SNI 03-6815-2002 Tata Cara Mengevaluasi Hasil Uji Kekuatan Beton*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2004. *SNI 15-2049-2004 Semen Portland*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2011. *SNI 2493:2011 Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2014. *SNI 2460:2014 Spesifikasi Abu Terbang Batu Bara dan Pozolan Alam Mentah atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan dalam Beton (ASTM C618-08a, IDT)*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2016. *SNI 1969:2016 Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2016. *SNI 1970:2016 Metode Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2019. *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2022. *SNI 1972:2022 Metode Uji Slump Beton Semen Hidraulis*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. 2023. *SNI 1974:2023 Metode Uji untuk Kekuatan Tekan Beton Spesimen Silinder*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Departemen Pekerjaan Umum. 1971. *Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 (PBI 1971) N.I.-2*. Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.

Hibatulloh, M.I. 2024. *Optimasi Proporsi Bahan Substitusi dalam Campuran Beton terhadap Kuat Tekan Menggunakan Metode Artificial Neural Network*. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Idris, M., Trisnawathy, Hisbullah, & Yusril, I. 2023. Kuat Tekan Beton dengan Penambahan Fly Ash Batu Bara sebagai Pengganti Sebagian Semen. *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering*, Vol. 3 No. 1: 39–43.

Montgomery, D.C. & Runger, G.C. 2018. *Applied Statistics and Probability for Engineers,* 7th ed. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey.

Muhammady, E. 2022. *Analisis Peningkatan Kuat Tekan Beton terhadap Umur Beton dengan Menggunakan Fly Ash sebagai Bahan Substitusi Parsial*. Tugas Akhir. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Nahak, P.G., Muda, A.H. & Rafael, J.W.M. 2025. Evaluasi Faktor Konversi Nilai Kuat Tekan Beton Berdasarkan Umur Beton dengan Menggunakan PCC Tipe I. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 14 No. 2: 108–115.

Naik, T.R. & Ramme, B.W. 1990. High Early Strength Fly Ash Concrete for Precast/Prestressed Products. *PCI Journal*, Vol. 35 No. 6: 72–78.

Neville, A.M. 2011. *Properties of Concrete*, 5th ed. Pearson Education Limited. Harlow, England.

Olii, M.R., Wahab, A.A., Ichsan, I., Djau, R.A. & Nento, S. 2023. Beton Hijau Menggunakan Fly Ash sebagai Substitusi Parsial Semen. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 9 No. 1: 11–20.

Tukey, J.W. 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company. Reading, Massachusetts.

Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L. & Ye, K. 2012. *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, 9th ed. Pearson Education. Boston, Massachusetts.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Nama Peneliti	Muhammad Irwan Ardiansyah
NIM	22511255
Asal Pasir x	Desa Clereng
Tanggal Pengujian	Juni 2026
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Uraian	**Hasil Pengamatan**			
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata-rata**	**Satuan**
Berat pasir kering mutlak (Bk)	487,000	488,400	487,700	gram
Berat pasir kondisi jenuh kering muka (SSD)	500,000	500,000	500,000	gram
Berat piknometer berisi pasir dan air(Bt)	1020,000	1002,000	1011,000	gram
Berat piknometer berisi air (B)	706,000	697,000	701,500	gram
Berat Jenis Curah, Bk / (B+500-Bt)	2,618	2,505	2,561	
Berat Jenis jenuh kering permukaan (SSD), 500 / (B+500-Bt)	2,688	2,564	2,626	
Berat Jenis semu, Bk / (B+Bk-Bt)	2,815	2,663	2,739	
Penyerapan Air (500-Bk)/Bk x 100%	2,669	2,375	2,522	%

Dengan:

- 500: Berat benda uji dalam kondisi jenuh kering muka, dalam gram

Lampiran 2 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Nama Peneliti	Muhammad Irwan Ardiansyah
NIM	22511255
Asal Kerikil	Desa Clereng
Tanggal Pengujian	Juni 2026
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir

Uraian	**Hasil Pengamatan**			
	Sampel 1	**Sampel 2**	**Rata-rata**	**Satuan**
Berat Kerikil kering mutlak (Bk)	4895,000	4904,000	4899,500	gram
Berat kerikil Jenuh kering muka (Bj)	5000,000	5000,000	5000,000	gram
Berat piknometer berisi pasir dan air (Ba)	3152,000	3032,000	3092,000	gram
Berat Jenis Curah BK/(BJ-Ba)	2,649	2,492	2,570	
Berat Jenis jenuh kering permukaan (SSD) Bj/ (Bj-Ba)	2,706	2,541	2,623	
Berat Jenis semu Bk/(Bk-Ba)	2,808	2,620	2,714	
Penyerapan Air (Bj-Bk)/Bk x 100%	2,145	1,958	2,051	%

Dengan:

- 500: Berat benda uji dalam kondisi jenuh kering muka, dalam gram

Lampiran 3 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Halus Sampel 1

Nama Peneliti	Muhammad Irwan Ardiansyah
NIM	22511255
Asal Pasir	Desa Clereng
Tanggal Pengujian	Juni 2026
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir
Sampel	1

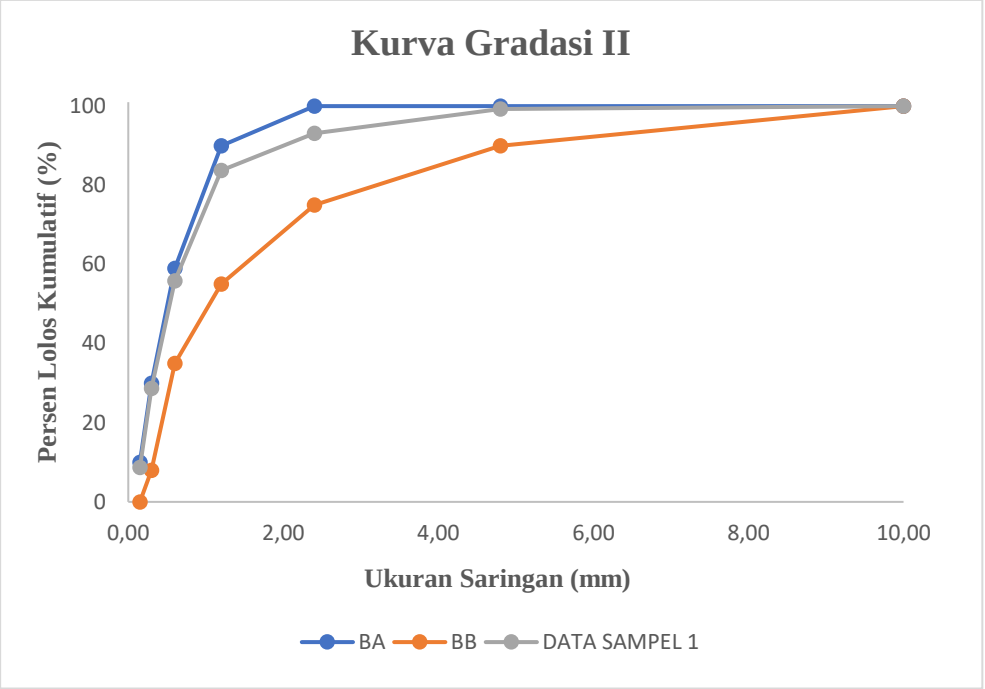
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif(%)
40,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20,00	0,00	0,00	0,00	100,00
10,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4,80	6,00	0,30	0,30	99,70
2,40	74,00	3,70	4,00	96,00
1,20	290,00	14,50	18,50	81,50
0,60	949,00	47,45	65,95	34,05
0,30	470,00	23,50	89,45	10,55
0,15	180,00	9,00	98,45	1,55
Sisa	31,00	1,55	100,00	0,00
Jumlah	2000,00	100,00	276,65	0,00

Modulus Halus Butir $= \frac{276,65}{100} =$ **2,767**

Lampiran 4 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 1

Hasil Analisis Saringan:

- Pasir masuk daerah : Daerah II
- Jenis Pasir : Pasir Agak Kasar



Lampiran 5 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Halus Sampel 2

Nama Peneliti	Muhammad Irwan Ardiansyah
NIM	22511255
Asal Pasir	Desa Clereng
Tanggal Pengujian	Juni 2026
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir
Sampel	2

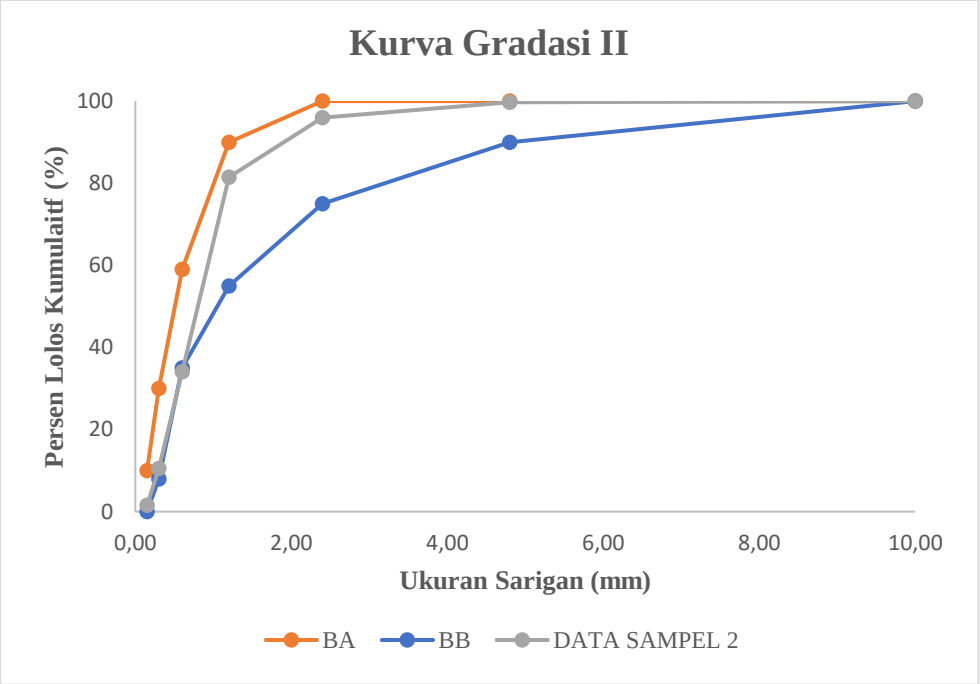
Lubang Ayakan (mm)	**Berat Tertinggal (gram)**	**Berat Tertinggal (%)**	**Berat Tertinggal Kumulatif (%)**	**Persen Lolos Kumulatif(%)**
40,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20,00	0,00	0,00	0,00	100,00
10,00	0,00	0,00	0,00	100,00
4,80	15,00	0,75	0,75	99,25
2,40	122,00	6,10	6,85	93,15
1,20	188,00	9,40	16,25	83,75
0,60	558,00	27,90	44,15	55,85
0,30	544,00	27,20	71,35	28,65
0,15	399,00	19,95	91,30	8,70
Sisa	174,00	8,70	100,00	0,00
Jumlah	2000,00	100,00	230,65	0

Modulus Halus Butir $= \frac{230,65}{100} =$ **2,307**

Lampiran 6 Analisis Saringan Agregat Halus Sampel 2

Hasil Analisis Saringan:

- Pasir masuk daerah : Daerah II
- Jenis Pasir : Pasir Agak Kasar



Lampiran 7 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Kasar Sampel 1

Nama Peneliti	Muhammad Irwan Ardiansyah
NIM	22511255
Asal Kerikil	Desa Clereng
Tanggal Pengujian	Juni 2026
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir
Sampel	1

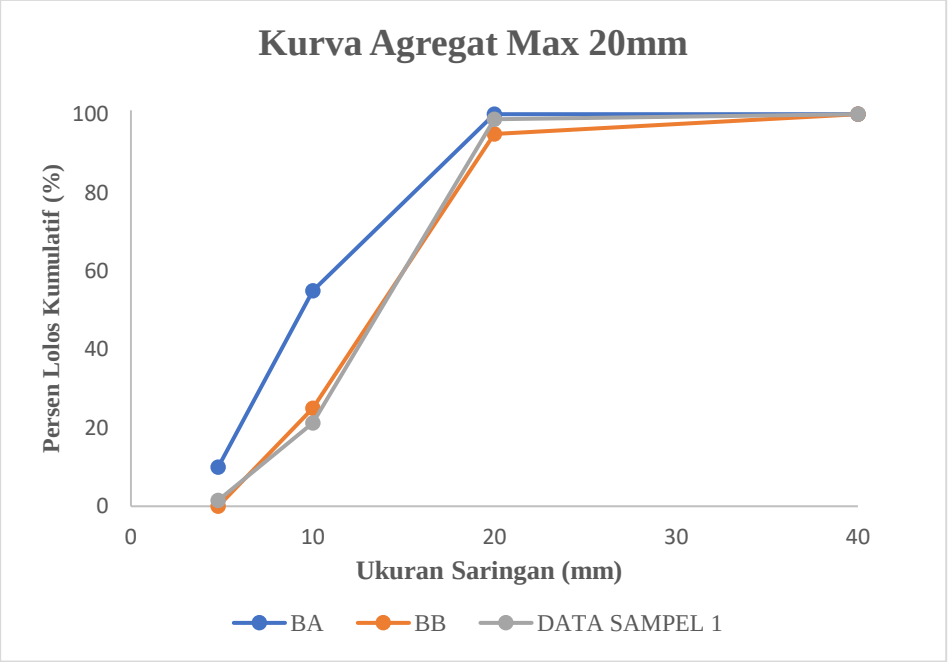
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif(%)
40,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20,00	64,00	1,28	1,28	98,72
10,00	3872,00	77,44	78,72	21,28
4,80	988,00	19,76	98,48	1,52
2,40	25,00	0,50	98,98	1,02
1,20	3,00	0,06	99,04	0,96
0,60	0,00	0,00	99,04	0,96
0,30	0,00	0,00	99,04	0,96
0,15	0,00	0,00	99,04	0,96
Sisa	48,00	0,96	100,00	0,00
Jumlah	5000,00	100,00	673,62	0

Modulus Halus Butir $= \frac{673,62}{100} = 6,736$

Lampiran 8 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 1

Hasil Analisis Saringan:

- Pasir masuk daerah : Gradasi 20 mm
- Ukuran butir maksimum : 20 mm



Lampiran 9 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Kasar Sampel 2

Nama Peneliti	Muhammad Irwan Ardiansyah
NIM	22511255
Asal Kerikil	Desa Clereng
Tanggal Pengujian	Juni 2026
Keperluan	Penelitian Tugas Akhir
Sampel	2

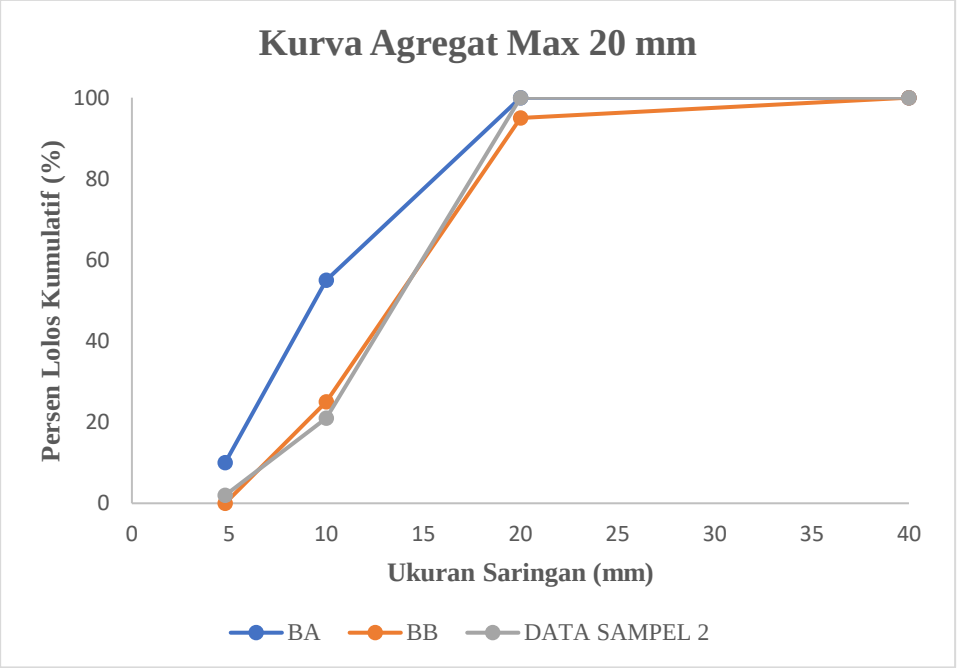
Lubang Ayakan (mm)	Berat Tertinggal (gram)	Berat Tertinggal (%)	Berat Tertinggal Kumulatif (%)	Persen Lolos Kumulatif(%)
40,00	0,00	0,00	0,00	100,00
20,00	0,00	0,00	0,00	100,00
10,00	3950,00	79,00	79,00	21,00
4,80	951,00	19,02	98,02	1,98
2,40	32,00	0,64	98,66	1,34
1,20	2,00	0,04	98,70	1,30
0,60	0,00	0,00	98,70	1,30
0,30	0,00	0,00	98,70	1,30
0,15	0,00	0,00	98,70	1,30
Sisa	65,00	1,30	100,00	0,00
Jumlah	5000,00	100,00	670,48	0,00

Modulus Halus Butir $= \frac{670,48}{100} = 6,705$

Lampiran 10 Analisis Saringan Agregat Kasar Sampel 2

Hasil Analisis Saringan:

- Pasir masuk daerah : Gradasi 20 mm
- Ukuran butir maksimum : 20 mm



Lampiran 11 Formulir Perencanaan Campuran Beton Metode SNI 2834-2000

Formulir Perencanaan Campuran Beton (SNI 2834-2000)			
No	**Uraian**	**Nilai**	**Satuan**
1	Kuat tekan beton yang disyaratkan	25	Mpa
2	Standar Deviasi (s)	7	
3	Nilai Tambah / Margin (M)	12	Mpa
4	Kuat tekan beton rerata yang ditargetkan	37	Mpa
5	Jenis Semen	Tipe I	
6	Jenis Agregat Kasar	Batu Pecah	
8	Jenis Agregat Halus	Alami	
9	Faktor air semen bebas (Fas)	0,5	
10	Faktor air semen maksimum	0,6	
11	FAS digunakan	0,5	
12	*Slump*	60-180	mm
13	Ukuran agregat maksimum	20	mm
14	Kadar air bebas	205	Kg/m3
15	Kadar semen minimum	275	Kg/m3
16	Kadar semen maksmum	-	Kg/m3
17	Kadar semen digunakan	410,00	Kg/m3
18	Susunan besar butir agregat halus	Gradasi II	
19	Berat jenis agregat kasar (SSD)	2,6261	
20	Berat jenis agregat halus (SSD)	2,6231	
21	Persen Agregat Halus	41,505	%
22	Persen Agregat Kasar	58,495	%
23	Berat jenis relatif agregat gabungan (SSD)	2,625	
24	Berat isi Beton	2358,000	Kg/m3
25	Kadar agregat gabungan	1743,0000	Kg/m3
26	Kadar agregat halus	723,432	Kg/m3
27	Kadar agregat kasar	1019,568	Kg/m3
28	Kadar semen dengan angka penyususstan	492,00	Kg/m3
29	Kadar air dengan angka penyusutan	868,12	Kg/m3
30	Kadar agregat halus dengan angka penyususstan	1223,48	Kg/m3
31	Kadar agregat kasar dengan angka penyusutan	246,00	Kg/m3

Lampiran 12 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Benda Uji	Hasil (MPa)
F3A	11,921
F3B	16,576
F3C	13,824
F3D	15,066
F3E	16,032
F7A	14,954
F7B	20,921
F7C	21,963
F7D	22,676
F7E	22,476
F14A	18,643
F14B	25,685
F14C	19,338
F14D	24,304
F14E	30,297
F21A	20,689
F21B	27,502
F21C	27,818
F21D	32,956
F21E	27,047
F28A	22,336
F28B	17,500
F28C	28,327
F28D	26,415
F28E	29,221

4. Bapak Anggit Mas Arifudin S.T., M.T selaku Dosen Penguji II atas segala koreksi, masukan, dan saran yang membangun sehingga penulisan Tugas Akhir ini menjadi lebih baik.
5. Seluruh Dosen dan staf tenaga kependidikan Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, atas ilmu dan pelayanan yang diberikan selama penyusun menempuh pendidikan.
6. Kedua orang tua dan seluruh keluarga penyusun, atas doa, kasih sayang, serta dukungan yang tidak pernah berhenti diberikan.
7. Nabiilah Deasy Maharani, seseorang yang selalu memberi dukungan dan menemani selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia yang telah membantu, khususnya selama pelaksanaan pekerjaan di laboratorium, serta memberikan semangat kepada penyusun.
9. Semua pihak yang tidak dapat penyusun sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penyusun menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan, baik dalam jumlah benda uji, cakupan umur pengujian, maupun variasi kadar substitusi *fly ash* yang ditinjau, sehingga hasil yang diperoleh masih terbuka untuk dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penyusun harapkan demi perbaikan pada penelitian selanjutnya.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Yogyakarta, Agustus 2026

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Irwan Ardiansyah

22511255