

TUGAS AKHIR

**PENGARUH RASIO TULANGAN LENTUR
TERHADAP PERILAKU KERUNTUHAN BALOK
BETON BERTULANG
(*EFFECT OF FLEXURAL REINFORCEMENT RATIO
ON THE COLLAPSE BEHAVIOR OF REINFORCED
CONCRETE BEAMS*)**

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



**MUHAMMAD ISHOMUDDIN WAHID
20511362**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2024**

TUGAS AKHIR

PENGARUH RASIO TULANGAN LENTUR TERHADAP PERILAKU KERUNTUHAN BALOK BETON BERTULANG (*EFFECT OF FLEXURAL REINFORCEMENT RATIO ON THE COLLAPSE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS*)

Disusun oleh

MUHAMMAD ISHOMUDDIN WAHID

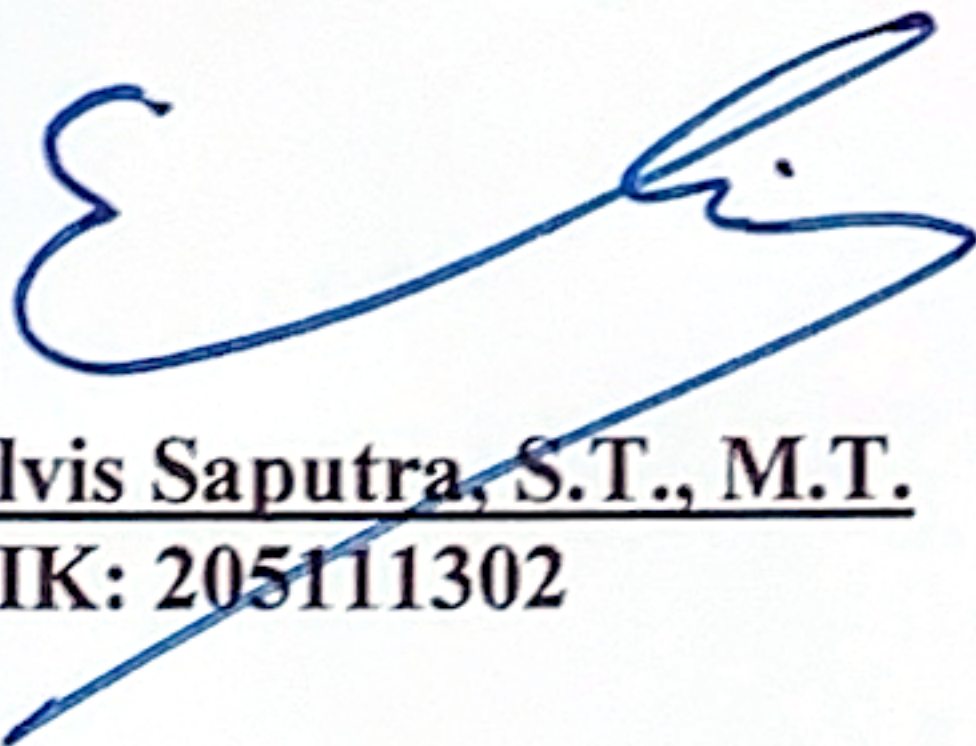
20511362

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

Diuji pada tanggal 23 Oktober 2024

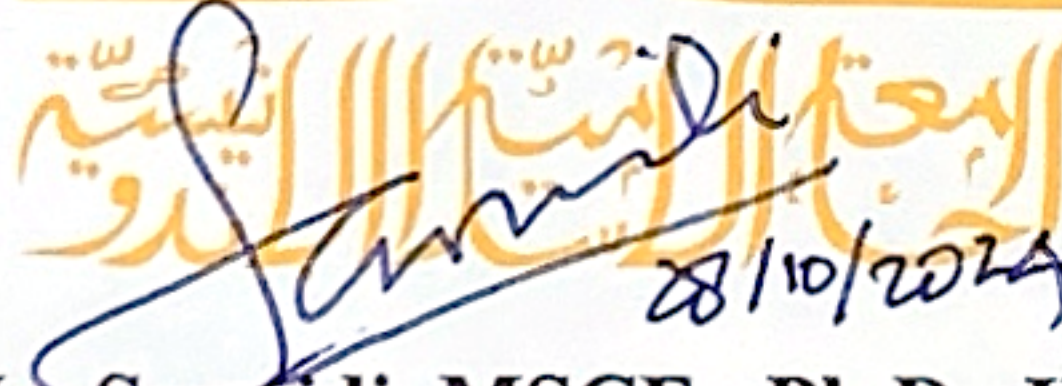
Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing I



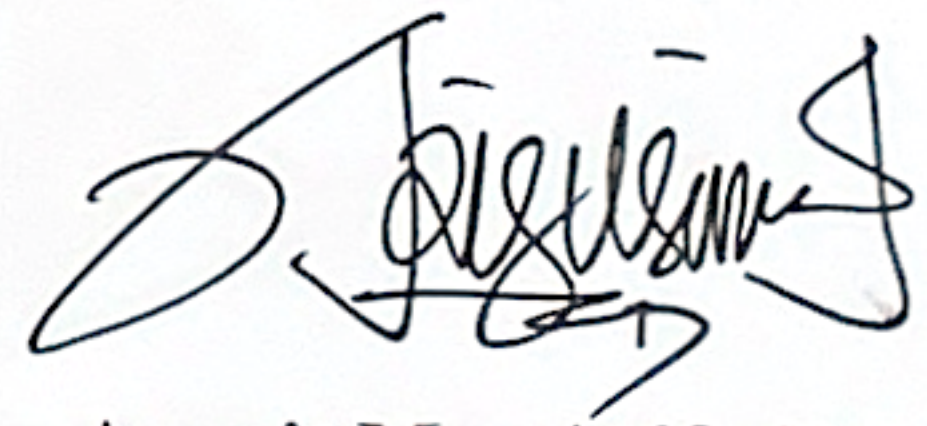
Elvis Saputra, S.T., M.T.
NIK: 205111302

Penguji I


28/10/2024

Prof. Ir. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U.
NIK: 845110101

Penguji II

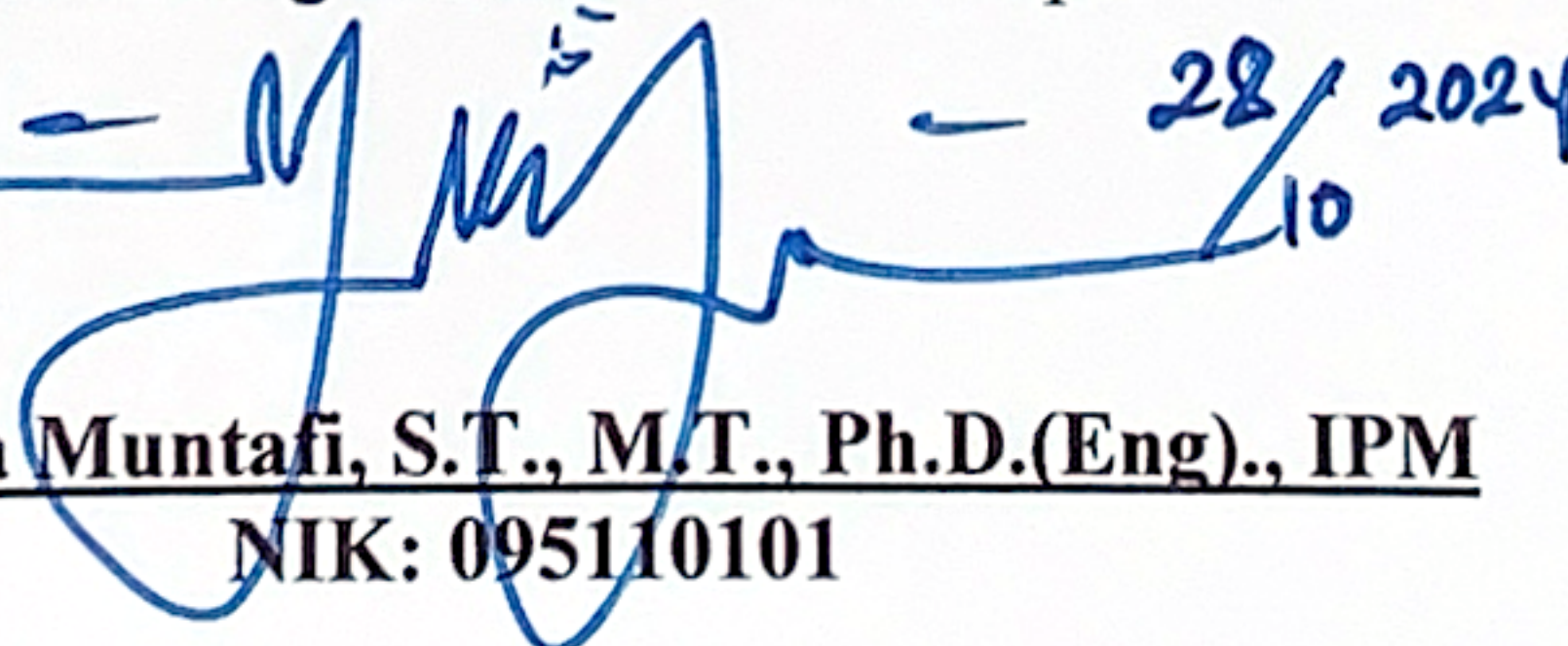


Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK: 18511304

Mengesahkan,



Ketua Program Studi Teknik Sipil


28/10/2024

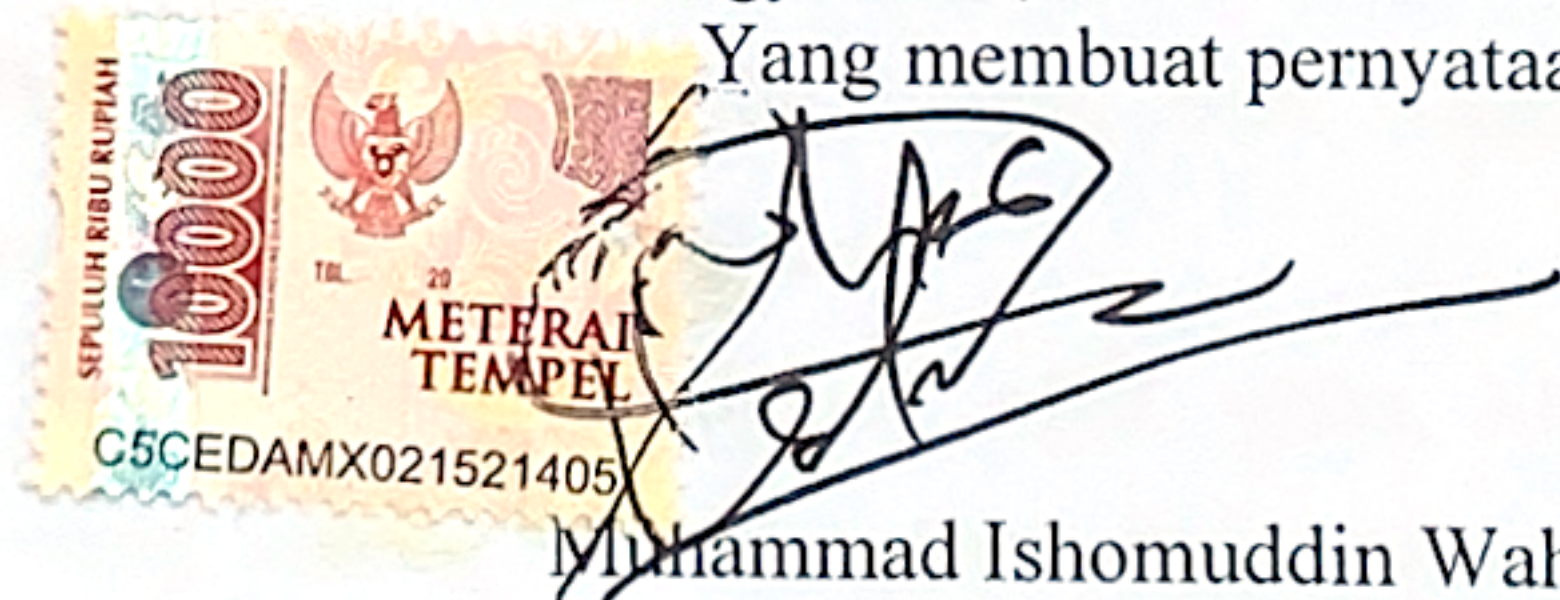
Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 23 Oktober 2024

Yang membuat pernyataan,



Muhammad Ishomuddin Wahid
(20511362)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul *Pengaruh Rasio Tulangan Lentur Terhadap Perilaku Keruntuhan Balok Beton Bertulang*. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

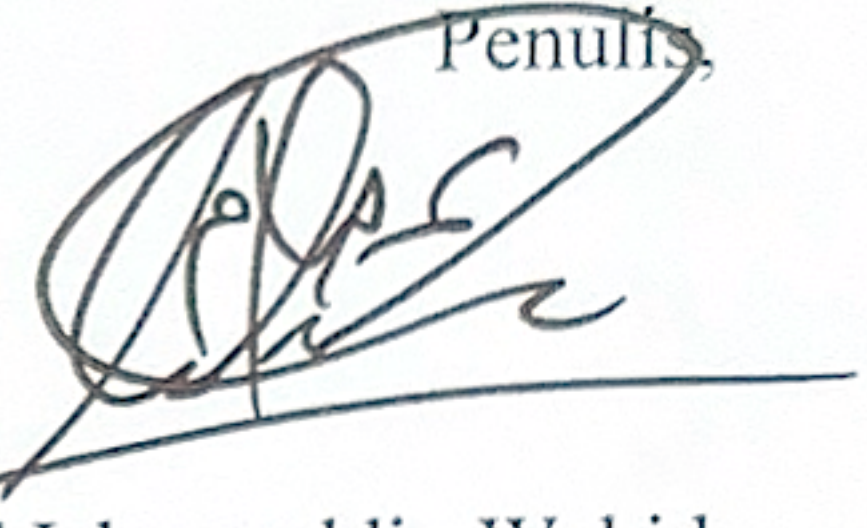
Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)., IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia,
2. Bapak Elvis Saputra, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing,
3. Bapak Prof. Ir. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U., selaku Dosen Penguji I,
4. Bapak Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji II,
5. Bapak dan ibu penulis yang telah berkorban begitu banyak, baik material maupun spiritual, hingga selesainya Tugas Akhir ini, dan
6. Teman-teman terutama Putri Yasmin Azzahra, Khairul, Alief, Dhita, Aldi, Hanif, Roby, Vitho, Fadel, Bintang, Habib, Fadil, Ibil, Deni, Attar, Ghazali, Akmal, Gilang, Ardhya, Reyhan, dan teman-teman seperjuangan angkatan 2020 yang selalu menguatkan untuk tidak menyerah dan selalu ada dalam segala kondisi apa pun untuk memberikan semangat dan dukungan, sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

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

Yogyakarta, 23 Oktober 2024

Penulis,

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, overlapping loops and a long horizontal stroke at the bottom.

Muhammad Ishomuddin Wahid
(20511362)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xiv
ABSTRAK	xvii
<i>ABSTRACT</i>	xviii
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	4
2.1 Tinjauan Umum	4
2.2 Penelitian Terdahulu	4
2.3 Keaslian Penelitian	7
BAB III LANDASAN TEORI	10
3.1 Beton	10
3.2 Bahan Campuran Beton	10
3.2.1 Agregat Halus	10
3.2.2 Agregat Kasar	16
3.2.3 Semen <i>Portland</i>	21
3.2.4 Air	24

3.3 Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	24
3.4 Uji <i>Slump</i>	35
3.5 Tulangan Baja	35
3.6 Beton Bertulang	36
3.7 Rasio Tulangan Balok Beton Bertulang	37
3.8 Uji Tekan Beton	41
3.9 Uji Lentur Balok	41
3.10 Pola Retak Balok Beton Bertulang	42
3.11 Perilaku Keruntuhan Balok Beton Bertulang	44
BAB IV METODE PENELITIAN	47
4.1 Tinjauan Umum	47
4.2 Bahan Penelitian	47
4.3 Peralatan Penelitian	48
4.4 Benda Uji	51
4.5 Pelaksanaan Penelitian	52
4.5.1 Persiapan Penelitian	52
4.5.2 Pengujian Agregat	52
4.5.3 Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	53
4.5.4 Pembuatan Benda Uji <i>Trial</i>	53
4.5.5 Perencanaan Tulangan Benda Uji	54
4.5.6 Pembuatan Benda Uji	66
4.5.7 Perawatan Benda Uji	67
4.5.8 Pengujian Benda Uji	67
4.6 Bagan Alir Penelitian	69
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN	72
5.1 Tinjauan Umum	72
5.2 Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton	72
5.2.1 Agregat Halus	72
5.2.2 Agregat Kasar	81
5.3 Perencanaan Campuran Beton (<i>Mix Design</i>)	88
5.4 Hasil Pengujian Benda Uji <i>Trial</i>	97

5.5 Hasil Pengujian Balok Beton Bertulang	98
5.5.1 <i>Under Reinforced</i>	99
5.5.2 <i>Balance Reinforced</i>	100
5.5.3 <i>Over Reinforced</i>	101
5.6 Analisis Pola Keretakan	101
5.6.1 Pola Keretakan Balok <i>Under Reinforced</i> (BRK)	102
5.6.2 Pola Keretakan Balok <i>Balance Reinforced</i> (BRS)	102
5.6.3 Pola Keretakan Balok <i>Over Reinforced</i> (BRL)	103
5.7 Analisis Perilaku Keruntuhan	104
5.7.1 Keruntuhan Balok <i>Under Reinforced</i> (BRK)	104
5.7.2 Keruntuhan Balok <i>Balance Reinforced</i> (BRS)	105
5.7.3 Keruntuhan Balok <i>Over Reinforced</i> (BRL)	105
5.8 Perbandingan Regangan Hasil Eksperimen dan Teoritis	106
5.8.1 Regangan Beton	106
5.8.2 Regangan Baja	107
5.9 Analisis Lendutan Balok Beton Bertulang	109
5.9.1 Lendutan Balok <i>Under Reinforced</i> (BRK)	109
5.9.2 Lendutan Balok <i>Balance Reinforced</i> (BRS)	110
5.9.3 Lendutan Balok <i>Over Reinforced</i> (BRL)	110
5.10 Implikasi terhadap Desain Struktural	111
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	115
6.1 Kesimpulan	115
6.2 Saran	116
DAFTAR PUSTAKA	118
LAMPIRAN	120

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Dilakukan	8
Tabel 3.1	Batas-batas Gradasi Agregat Halus	14
Tabel 3.2	Batas-batas Gradasi Agregat Kasar	20
Tabel 3.3	Kandungan Oksidasi Pada Semen Portland	22
Tabel 3.4	Kandungan Oksidasi Pada Semen Portland	22
Tabel 3.5	Komposisi Senyawa Semen Portland	22
Tabel 3.6	Faktor Pengali Untuk Deviasi Standar	26
Tabel 3.7	Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Faktor Air Semen dan Agregat Kasar Yang Biasa Dipakai Di Indonesia	28
Tabel 3.8	Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Dalam Lingkungan Khusus	29
Tabel 3.9	Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m ³) Yang Dibutuhkan	30
Tabel 4.1	Rincian Benda Uji	52
Tabel 4.2	Rekapitulasi Penulangan Balok Beton Bertulang	66
Tabel 5.1	Rekapitulasi Analisa Saringan Agregat Halus	75
Tabel 5.2	Batas Daerah Gradasi Agregat Halus	76
Tabel 5.3	Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus	77
Tabel 5.4	Hasil Uji Berat Volume Gembur Agregat Halus	79
Tabel 5.5	Hasil Uji Berat Volume Padat Agregat Halus	80
Tabel 5.6	Hasil Uji Lolos Saringan No. 200	81
Tabel 5.7	Rekapitulasi Analisa Saringan Agregat Kasar	83
Tabel 5.8	Batas Daerah Gradasi Agregat Kasar	84
Tabel 5.9	Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar	85
Tabel 5.10	Hasil Uji Berat Volume Gembur Agregat Kasar	87
Tabel 5.11	Hasil Uji Berat Volume Padat Agregat Kasar	87

Tabel 5.12	Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Faktor Air Semen dan Agregat Kasar Yang Biasa Dipakai Di Indonesia	89
Tabel 5.13	Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Dalam Lingkungan Khusus	91
Tabel 5.14	Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m ³) Yang Dibutuhkan	92
Tabel 5.15	Rekapitulasi Proporsi Campuran Beton	97
Tabel 5.16	Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Trial	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen	28
Gambar 3.2	Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm	31
Gambar 3.3	Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm	32
Gambar 3.4	Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm	32
Gambar 3.5	Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah	34
Gambar 3.6	Grafik Tegangan-Regangan Baja	36
Gambar 3.7	Diagram Tegangan Regangan Balok Beton Tulangan Tunggal	37
Gambar 3.8	Diagram Tegangan Regangan Balok Beton Tulangan Rangkap	38
Gambar 3.9	Regangan Baja Pada Keadaan Batas Lentur	39
Gambar 3.10	Sketsa Pengujian Kuat Tekan Beton	41
Gambar 3.11	Sketsa Pengujian Kuat Lentur Balok	42
Gambar 3.12	Retak Lentur	42
Gambar 3.13	Retak Geser	43
Gambar 3.14	Retak Lentur Geser	43
Gambar 3.15	Retak Puntir	44
Gambar 3.16	Retak Lekatan	44
Gambar 3.17	Grafik Hubungan Beban dan Lendutan Pada Balok	45
Gambar 4.1	Sketsa Penulangan Balok Kondisi <i>Balance Reinforced</i> (BRS)	58
Gambar 4.2	Sketsa Penulangan Balok Kondisi Under Reinforced (BRK)	62
Gambar 4.3	Sketsa Penulangan Balok Kondisi Over Reinforced (BRL)	65
Gambar 4.4	Rekapitulasi Regangan Balok Beton Bertulang	66
Gambar 4.5	Sketsa Pengujian Kuat Tekan Beton	68
Gambar 4.6	Sketsa Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang	69
Gambar 4.7	Tampak Atas Balok Beton Bertulang	69
Gambar 4.8	Diagram Alir Penelitian	71

Gambar 5.1	Grafik Gradasi Agregat Halus Daerah II	76
Gambar 5.2	Grafik Gradasi Agregat Kasar Maksimum 20 mm	84
Gambar 5.3	Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen	90
Gambar 5.4	Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm	93
Gambar 5.5	Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah	94
Gambar 5.6	Benda Uji BRK Sisi Timur (Kiri) dan Sisi Barat (Kanan)	99
Gambar 5.7	Grafik Beban (kN) – Lendutan (mm) BRK	99
Gambar 5.8	Benda Uji BRS Sisi Timur (Kiri) dan Sisi Barat (Kanan)	100
Gambar 5.9	Grafik Beban (kN) – Lendutan (mm) BRS	100
Gambar 5.10	Benda Uji BRL Sisi Timur (Kiri) dan Sisi Barat (Kanan)	101
Gambar 5.11	Grafik Beban (kN) – Lendutan (mm) BRL	101
Gambar 5.12	Sket Pola Retak Benda Uji BRK	102
Gambar 5.13	Sket Pola Retak Benda Uji BRS	103
Gambar 5.14	Sket Pola Retak Benda Uji BRL	104
Gambar 5.15	Perbandingan Regangan Balok Under Reinforced (BRK) Berdasarkan Hasil Eksperimen dan Teoritis	108
Gambar 5.16	Perbandingan Regangan Balok Balance Reinforced (BRS) Berdasarkan Hasil Eksperimen dan Teoritis	108
Gambar 5.17	Perbandingan Regangan Balok Over Reinforced (BRL) Berdasarkan Hasil Eksperimen dan Teoritis	109
Gambar 5.18	Grafik Rasio Tulangan (%) – Beban (kN)	113
Gambar 5.19	Grafik Rasio Tulangan (%) – Lendutan (mm)	113
Gambar 5.20	Grafik Zona Berdasarkan Keretakan dan Keruntuhan Pada Balok Beton Bertulang	114

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar Alat yang Digunakan	121
Lampiran 2 Gambar Bahan yang Digunakan	125

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

a	= Tinggi dari blok tegangan persegi (mm)
A_s	= Luas penampang (mm ²)
$A_{sldb'}$	= Luas 1 tulangan pada sisi tekan (mm ²)
A_{sldb}	= Luas 1 tulangan pada sisi tarik (mm ²)
A_{sldt}	= Luas 1 tulangan transversal atau sengkang (mm ²)
A_v	= Luas tulangan transversal (mm ²)
β_1	= Nilai faktor bentuk tegangan
b	= Lebar balok (mm)
B	= Berat piknometer berisi air (gr)
$BJTP$	= Baja tulangan polos
$BJTS$	= Baja tulangan ulir
Bk	= Berat benda uji kering oven (gr)
Bt	= Berat piknometer berisi benda uji dan air (gr)
BRK	= Balok rasio tulangan kurang (<i>under reinforced</i>)
BRL	= Balok rasio tulangan lebih (<i>over reinforced</i>)
BRS	= Balok rasio tulangan seimbang (<i>balance reinforced</i>)
c	= Tinggi garis netral (mm)
c_c	= Selimut beton (mm)
Cc	= Resultan tegangan tekan beton (N)
Cs	= Resultan tegangan tulangan pada daerah tekan (N)
d	= Tinggi efektif balok (mm)
d'	= Jarak dari serat tekan ke titik berat tulangan tekan (mm)
D	= Diameter (mm)
d_{agg}	= Diameter agregat (mm)
d_b	= Diameter tulangan utama pada sisi tarik (mm)
d_b'	= Diameter tulangan utama pada sisi tekan (mm)
ds	= Jarak dari serat tarik ke titik berat tulangan tarik (mm)
d_t	= Diameter tulangan transversal atau sengkang (mm)

E_s	= Modulus elastisitas baja (MPa)
ε_c	= Regangan beton
ε_{ty}	= Regangan leleh baja
FAS	= Faktor air semen
f_c'	= Kuat tekan beton (MPa)
f_s	= Tegangan baja daerah tarik (MPa)
f_s'	= Tegangan baja daerah tekan (MPa)
f_y	= Tegangan leleh (MPa)
h	= Tinggi balok (mm)
M	= Nilai tambah (MPa)
M_u	= Momen <i>ultimate</i> (MPa)
n_1	= Jumlah tulangan pada baris 1
n_2	= Jumlah tulangan pada baris 2
ρ_b	= Rasio tulangan seimbang (<i>balance reinforced</i>)
ρ_{over}	= Rasio tulangan lebih (<i>over reinforced</i>)
ρ_{under}	= Rasio tulangan kurang (<i>under reinforced</i>)
s	= Jarak antar tulangan horizontal (mm)
s_{min}	= Jarak minimal antar tulangan horizontal (mm)
SNI	= Standar Nasional Indonesia
S_r	= Deviasi standar rencana
SSD	= Keadaan jenuh kering permukaan
T_s	= Resultan tegangan tarik baja (N)
V	= Volume (cm ³)
V_c	= Gaya geser beton (N)
V_s	= Kekuatan tulangan geser (N)
V_u	= Gaya geser <i>ultimate</i> (N)
W	= Jumlah air yang dibutuhkan (kg)
$W1$	= Berat tabung (gr)
$W2$	= Berat tabung + berat benda uji (gr)
$W3$	= Berat benda uji (gr)
W_c	= Jumlah semen yang dibutuhkan (kg)

W_h	= Perkiraan jumlah air untuk agregat halus (kg)
W_k	= Perkiraan jumlah air untuk agregat kasar (kg)
x_v	= Jarak spasi antar tulangan vertikal (mm)
$Z1$	= Zona 1 atau zona aman
$Z2$	= Zona 2 atau zona sedang
$Z3$	= Zona 3 atau zona rawan

ABSTRAK

Beton bertulang merupakan material komposit yang memanfaatkan beton dan baja tulangan untuk menahan gaya tarik dan lentur. Namun, rasio tulangan yang digunakan pada balok beton bertulang sangat memengaruhi kekuatan, deformasi, dan pola keruntuhan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh rasio tulangan terhadap perilaku keruntuhan pada balok beton bertulang dalam kondisi *under reinforced*, *balanced reinforced*, dan *over reinforced*. Penelitian ini memberikan wawasan mengenai bagaimana variasi rasio tulangan memengaruhi pola keruntuhan balok, sehingga diharapkan dapat meningkatkan keamanan dan efisiensi dalam desain balok beton bertulang.

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium dengan pengujian lentur pada balok beton bertulang dengan rasio tulangan yang bervariasi. Setiap balok diuji menggunakan metode pembebanan 2 titik untuk mengevaluasi hubungan antara beban dan lendutan, serta mengamati pola retak yang muncul selama proses pengujian. Analisis data dilakukan dengan membandingkan perilaku keruntuhan pada ketiga kondisi penulangan, guna menentukan bagaimana rasio tulangan memengaruhi kegagalan struktural.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok *over reinforced* cenderung mengalami keruntuhan geser yang lebih cepat dan signifikan, sehingga perilaku yang terjadi yaitu getas. Balok *balance reinforced* mengalami retak geser dan lentur yang lebih seimbang, akan tetapi keruntuhan yang terjadi yaitu keruntuhan geser. Sementara itu, balok *under reinforced* mengalami keruntuhan yang lebih dini tetapi sifat keruntuhan yang lebih daktail dan keruntuhannya berupa lentur. Penelitian ini memberikan wawasan yang dapat membantu dalam memperbaiki desain balok beton bertulang, khususnya dalam mencegah kegagalan geser yang tidak diinginkan.

Kata kunci: Keruntuhan balok, Balok beton bertulang, Rasio penulangan.

ABSTRACT

Reinforced concrete is a composite material that utilizes concrete and reinforcing steel to resist tensile and flexural forces. However, the reinforcement ratio used in reinforced concrete beams greatly affects the strength, deformation, and collapse pattern of the structure. This study aims to analyze the effect of reinforcement ratio on the collapse behavior of reinforced concrete beams in under reinforced, balanced reinforced, and over reinforced conditions. This research provides insight into how variations in reinforcement ratio affect the collapse pattern of beams, which is expected to improve safety and efficiency in the design of reinforced concrete beams.

The research method used a laboratory experimental approach with flexural testing of reinforced concrete beams with varying reinforcement ratios. Each beam was tested using the 2-point loading method to evaluate the relationship between load and deflection, as well as observing the crack patterns that appeared during the testing process. Data analysis was performed by comparing the collapse behavior of the three reinforcement conditions, to determine how the reinforcement ratio affects structural failure.

The results show that over reinforced beams tend to experience faster and more significant shear collapse, resulting in brittle behavior. Balanced reinforced beams experience more balanced shear and flexural cracking, but the collapse that occurs is shear collapse. Meanwhile, under reinforced beams experience earlier collapse but more ductile collapse behavior and flexural collapse. This research provides insights that can help in improving the design of reinforced concrete beams, especially in preventing undesirable shear failures.

Keywords: *Beam failure, Reinforced concrete beams, Reinforcement ratio.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton bertulang merupakan material komposit yang terdiri dari beton dan baja tulangan yang ditanam di dalam beton. Beton mempunyai kelebihan diantaranya, mempunyai kuat tekan yang tinggi, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan. Tetapi beton juga mempunyai kelemahan, yaitu lemah terhadap kuat tarik beton (Dewi dan Suandi, 2021). Oleh sebab itu, beton bertulang digunakan sebagai pencegahan terhadap beton yang tidak dapat menahan beban lentur secara signifikan. Salah satu elemen struktur beton bertulang yang menahan beban lentur yaitu balok beton bertulang.

Balok beton bertulang merupakan elemen struktural yang menerima gaya-gaya yang bekerja dalam arah transversal terhadap sumbunya yang mengakibatkan terjadinya momen lentur dan gaya geser sepanjang bentangnya (Wicaksono dkk., 2019). Peran utama balok adalah menahan beban lentur dan geser yang terjadi akibat pengaruh beban yang bekerja pada struktur. Namun, perilaku balok beton bertulang sangat dipengaruhi oleh rasio penulangan yang digunakan, yang secara langsung berhubungan dengan kekuatan, deformasi, dan pola keruntuhan balok. Pemilihan rasio tulangan yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa balok memiliki kapasitas yang memadai untuk menahan beban dan tegangan yang diterima.

Lentur dan geser pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban gravitasi (beban hidup dan mati) dan juga beban lateral (angin dan gempa). Apabila bebannya bertambah, maka pada balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbul dan bertambahnya retak di sepanjang bentang balok (Tripamungkas, 2023). Jumlah penulangan pada balok setiap kondisi berbeda sehingga sering pula disebut *under reinforced*, *over reinforced*, dan *balance reinforced*.

Rasio tulangan yang dirancang untuk menahan gaya lentur sangat penting untuk memastikan bahwa balok memiliki kapasitas yang cukup untuk menahan momen lentur yang terjadi akibat beban. Rasio tulangan yang terlalu besar (*over reinforced*) dapat membuat balok menjadi terlalu kaku dan tidak efisien, meskipun kapasitas lenturnya bertambah. Selain itu, rasio tulangan yang terlalu besar juga menyebabkan hasil analisis jarak tulangan geser terlalu rapat sehingga terkadang hanya diambil minimal. Hal ini dapat mengakibatkan distribusi tegangan yang tidak optimal dan meningkatkan risiko kegagalan geser. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana pengaruh rasio tulangan terhadap perilaku lentur dan geser balok beton bertulang dengan melakukan eksperimen laboratorium.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan eksperimen laboratorium keruntuhan balok berdasarkan rasio tulangan balok (*under reinforced*, *over reinforced*, dan *balance reinforced*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah di uraikan, dirumuskan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada balok beton bertulang berdasarkan rasio penulangan?
2. Bagaimana perilaku retak yang terjadi pada tiap balok berdasarkan rasio penulangan?
3. Bagaimana pengaruh rasio tulangan terhadap perilaku keruntuhan pada balok beton bertulang?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, didapatkan tujuan penelitian yaitu sebagai berikut.

1. Mengetahui hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada balok beton bertulang berdasarkan rasio penulangan.
2. Mengetahui perilaku retak yang terjadi pada tiap balok berdasarkan rasio penulangan.

3. Mengetahui pengaruh rasio tulangan terhadap perilaku keruntuhan pada balok beton bertulang.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk menambah pemahaman dan dapat mengetahui secara eksperimental tipe rasio penulangan terhadap perilaku keruntuhan balok beton bertulang.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian sebagai tinjauan agar penelitian terarah dan mudah dipahami, untuk itu diperlukan adanya batasan penelitian sebagai berikut.

1. Kuat tekan rencana adalah $f_c' = 25$ MPa.
2. Semen *portland* tipe I yang digunakan merek semen gresik.
3. Baja tulangan yang digunakan merek Krakatau *Steel* (KS) jenis ulir dengan mutu 420 MPa (BJTS 420) diameter 13 mm, 16 mm, 22 mm, dan 25 mm. Untuk jenis polos dengan mutu 280 MPa (BJTP 280) diameter 10 mm.
4. Benda uji yang diteliti adalah balok beton bertulang dengan penulangan rangkap, dengan ukuran 150 mm × 200 mm × 1400 mm.
5. Jarak sengkang digunakan 150 mm berdasarkan batas maksimal pada SNI 2847-2019.
6. Benda uji untuk kuat tekan berjumlah 3 silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm.
7. Metode *mix design* menggunakan SNI 2834-2000.
8. Perawatan balok beton bertulang selama 28 hari menggunakan karung goni basah.
9. Pengujian hanya pada kuat lentur menggunakan SNI 4431-2011.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Tinjauan pustaka merupakan rangkuman pandangan, pendapat, dan hasil penelitian atau perancangan yang didapatkan dari berbagai sumber yang ada, di mana sumber tersebut memiliki topik yang sejenis dengan penelitian yang dilakukan oleh penulis. Dengan adanya tinjauan pustaka ini dapat menjadikan sebuah acuan dalam melakukan penelitian dan dapat memberikan gambaran terhadap penelitian yang kelak akan dilakukan. Tinjauan pustaka juga dapat menjadi sebuah pembandingan pada saat akan melakukan penelitian, dengan adanya pembandingan ini diharapkan penelitian dapat meningkatkan kualitas dari penelitian sebelumnya.

Pada bab ini penelitian-penelitian terdahulu yang serupa akan ditinjau kembali dan diuraikan sehingga terdapat perbedaan dengan penelitian sebelumnya. Dengan adanya tinjauan umum penulis dapat mengetahui perbedaan dari masing-masing acuan sehingga tidak terjadi kesamaan.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai perilaku balok beton bertulang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya, sehingga dapat dijadikan sebagai acuan dalam penelitian ini. Peneliti mengacu pada jurnal-jurnal terdahulu sebagai referensi untuk penelitian ini. Jurnal-jurnal yang dijadikan referensi adalah sebagai berikut.

1. Nur (2009) melakukan penelitian tentang perilaku balok beton tulangan tunggal berdasarkan tipe keruntuhan balok.

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada balok beton tulangan tunggal berdasarkan tipe keruntuhannya. Selain itu juga untuk mengetahui perilaku retak yang terjadi pada tiap balok. Metode penelitian yang dilakukan yaitu metode eksperimen yang dilakukan pada laboratorium, di mana nantinya balok akan di uji lentur. Hasil penelitian ini menunjukkan balok dengan tipe keruntuhan tarik

mengalami lendutan yang cukup besar dan menunjukkan gejala keretakan lentur terlebih dahulu. Balok dengan rasio bentang (L) dan tinggi (h) cukup besar dengan tipe keruntuhan tekan dan seimbang keruntuhan yang terjadi bersifat lentur, dan jika rasio (L/h) kecil keruntuhan dominan adalah geser yang bersifat non-daktail yaitu, tiba-tiba runtuh tanpa menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu.

2. Pranata dan Suryoatmono (2010) melakukan penelitian tentang pemodelan numerik perilaku keruntuhan balok tinggi beton bertulang.

Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mempelajari metode *strut and tie model* untuk perencanaan balok tinggi beton bertulang. Selain itu juga mempelajari simulasi numerik metode elemen hingga pada model benda uji untuk mendapatkan parameter yang diperlukan dalam perencanaan *strut and tie model*. Mempelajari perilaku keruntuhan dan melakukan studi perbandingan hasil simulasi numerik elemen hingga pada model benda uji balok tinggi dari hasil penelitian eksperimental juga menjadi tujuan pada penelitian ini. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu Metode elemen hingga dengan *software* ADINA. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa perbedaan % relatif lendutan balok hasil simulasi ADINA terhadap eksperimental berkisar antara 25,49%-27,71%. Perbedaan % relatif regangan- z hasil simulasi ADINA terhadap eksperimental berkisar antara 10,53%-17,25%. Penentuan nilai *uniaxial cutoff tensile stress* (f_{ct}) berpengaruh terhadap beban *ultimate* yang dapat dicapai oleh balok.

3. Tjitradi dan Eliatun (2014) melakukan penelitian tentang permodelan perilaku keruntuhan balok tinggi beton bertulang menggunakan Ansys.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara beban dengan deformasi yang terjadi, mengetahui daktilitas kurvatur, mengetahui perilaku tegangan dan regangan, dan mengetahui perilaku retak yang terjadi. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu permodelan komputer *software* ANSYS *version* 9.0. Hasil dari penelitian ini dapat diketahui bahwa semakin tinggi balok maka kapasitas lentur akan semakin meningkat namun lendutan yang terjadi semakin kecil, nilai daktilitas kurvatur semakin rendah yang

menyebabkan keruntuhan menjadi lebih getas, dan semakin tinggi pula tegangan yang terjadi pada tulangan geser, hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi penampang balok sangat diperlukan sekali tulangan geser untuk mencegah terjadinya lebih awal keruntuhan geser beton yang bersifat getas, serta konsentrasi retak lebih mengarah pada bagian tekan balok yaitu pada bagian serat tekan dan tumpuan balok, sehingga mutu beton sangat mempengaruhi keruntuhan balok tinggi.

4. Tjitradi (2018) melakukan penelitian tentang visualisasi dan analisis keruntuhan balok beton bertulang menggunakan Ansys.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas beban, deformasi, tegangan, regangan dan pola retak yang terjadi pada balok beton bertulang tunggal dengan kondisi keruntuhan tarik, tekan dan seimbang. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode elemen hingga menggunakan *software* ANSYS. Benda uji yang digunakan sebanyak 3 balok beton bertulang berukuran $200 \times 400 \times 3000$ mm dengan tumpuan sederhana dan memakai tulangan tunggal 2D16, 2D32 dan 2D34,7475 untuk mewakili kondisi keruntuhan tarik, tekan, dan seimbang. Balok akan dibebani beban terpusat di tengah bentang dan diamati perilaku keruntuhannya mulai dari beban retak pertama sampai dengan keruntuhannya. Hasil dari penelitian ini dapat diketahui bahwa balok dengan kondisi keruntuhan tarik memiliki beban yang lebih rendah pada lendutan yang sama dibandingkan kondisi keruntuhan tekan dan seimbang. Balok dengan kondisi keruntuhan tarik memiliki perilaku keruntuhan yang lebih daktil. Pada kondisi keruntuhan tarik, daerah tekan beton kerusakannya lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi keruntuhan tekan dan seimbang. Retak geser yang terjadi pada badan balok kondisi keruntuhan tarik lebih sedikit dibandingkan dengan kondisi keruntuhan tekan dan seimbang. Selain itu, semakin tinggi rasio tulangan tarik maka tegangan tarik yang terjadi akan semakin rendah.

5. Prayoga dkk. (2023) melakukan penelitian tentang perbandingan kuat lentur balok beton bertulang dengan variasi jumlah tulangan pada zona tekan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan kuat lentur balok beton bertulang dengan memvariasikan jumlah tulangan pada bagian tekan. Metode penelitian yang digunakan merupakan metode eksperimental laboratorium. Benda uji balok berukuran $100 \times 150 \times 600$ mm, dengan variasi balok (BN) terdapat 4 buah tulangan longitudinal, sedangkan balok (BT) terdapat 3 buah tulangan longitudinal. Hasil penelitian ini menunjukkan kapasitas lentur balok variasi 2 (BT) mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan variasi 1 balok (BN) sebesar 5,758% dengan rata-rata kuat lentur sebesar 15,305 MPa. Hasil pengamatan dari pola retak pada balok BT-1 mengalami retak geser lentur, BT-2 dan balok BT-3 mengalami retak lentur.

2.3 Keaslian Penelitian

Berdasarkan penelitian terdahulu yang dilakukan, terdapat perbedaan dalam penelitian ini. Perbedaan yang dimiliki oleh penelitian ini yaitu metode penelitian dan tujuan penelitian. Perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Dilakukan

Penelitian terdahulu						Penelitian yang dilakukan
Nama	Nur	Pranata dan Suyoatmono	Tjitradi dan Eliatun	Tjitradi	Prayoga dkk.	Wahid
Tahun	(2009)	(2010)	(2014)	(2018)	(2023)	(2024)
Judul Penelitian	Kajian Eksperimental Perilaku Balok Beton Tulangan Tunggal Berdasarkan Tipe Keruntuhan Balok	Pemodelan Numerik Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang	Permodelan Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang Menggunakan Ansys	Visualisasi dan Analisis Keruntuhan Balok Beton Bertulang Menggunakan Ansys	Perbandingan Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Jumlah Tulangan Pada Zona Tekan	Pengaruh Rasio Tulangan Terhadap Kegagalan Geser Pada Balok Beton Bertulang: Studi Perbandingan Kondisi Tulangan Kurang, Seimbang, Dan Berlebih
Tujuan Penelitian	Mengetahui hubungan antara beban dan perpindahan yang terjadi pada balok beton tulangan tunggal berdasarkan tipe keruntuhannya. Selain itu juga untuk mengetahui perilaku retak yang terjadi pada tiap balok.	Mempelajari metode <i>strut and tie</i> model untuk perencanaan balok tinggi beton bertulang. Selain itu juga mempelajari simulasi numerik metode elemen hingga pada model benda uji untuk mendapatkan parameter yang diperlukan dalam perencanaan. Mempelajari perilaku keruntuhan dan melakukan studi perbandingan hasil simulasi numerik elemen hingga dengan hasil penelitian eksperimental.	Mengetahui hubungan antara beban dengan deformasi yang terjadi, mengetahui daktilitas kurvatur, mengetahui perilaku tegangan dan regangan, dan mengetahui perilaku retak yang terjadi.	Mengetahui kapasitas beban, deformasi, tegangan, regangan dan pola retak yang terjadi pada balok beton bertulangan tunggal dengan kondisi keruntuhan tarik, tekan dan seimbang.	Mengetahui perbandingan kuat lentur balok beton bertulang dengan memvariasikan jumlah tulangan pada bagian tekan.	Mengetahui hubungan antara beban dan perpindahan yang terjadi pada balok beton bertulang berdasarkan rasio penulangan. Selain itu, mengetahui perilaku retak yang terjadi pada setiap balok, dan menganalisis pengaruh rasio tulangan terhadap kegagalan geser dan lentur pada balok beton bertulang.

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Dilakukan

Penelitian terdahulu						Penelitian yang dilakukan
Nama	Nur	Pranata dan Suyoatmono	Tjitradi dan Eliatun	Tjitradi	Prayoga dkk.	Wahid
Tahun	(2009)	(2010)	(2014)	(2018)	(2023)	(2024)
Metode Penelitian	Metode eksperimen yang dilakukan pada laboratorium.	Metode elemen hingga dengan <i>software</i> ADINA.	Metode elemen hingga menggunakan <i>software</i> ANSYS <i>version</i> 9.0.	Metode elemen hingga menggunakan <i>software</i> ANSYS.	Metode eksperimental laboratorium.	Metode eksperimental laboratorium.
Hasil Penelitian	Hasil penelitian ini menunjukkan balok dengan tipe keruntuhan tarik mengalami lendutan yang cukup besar dan menunjukkan gejala keretakan lentur terlebih dahulu. Balok dengan rasio bentang (L) dan tinggi (h) cukup besar dengan tipe keruntuhan tekan dan seimbang keruntuhan yang terjadi bersifat lentur, dan jika rasio (L/h) kecil keruntuhan dominan adalah geser yang bersifat non-daktail yaitu, tiba-tiba runtuh tanpa menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu.	Hasil penelitian memperlihatkan bahwa perbedaan % relatif lendutan balok hasil simulasi ADINA terhadap eksperimental berkisar antara 25,49%-27,71%. Perbedaan % relatif regangan-z hasil simulasi ADINA terhadap eksperimental berkisar antara 10,53%-17,25%. Penentuan nilai <i>uniaxial cutoff tensile stress</i> (fct) berpengaruh terhadap beban <i>ultimate</i> yang dapat dicapai oleh balok.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tinggi balok meningkatkan kapasitas lentur namun mengurangi lendutan yang terjadi, sehingga nilai daktilitas kurvatur menurun dan menyebabkan keruntuhan menjadi lebih getas. Selain itu, tegangan pada tulangan geser semakin tinggi, menekankan pentingnya tulangan geser untuk mencegah keruntuhan geser yang bersifat getas. Konsentrasi retak lebih mengarah pada bagian tekan balok sehingga mutu beton sangat mempengaruhi.	Hasil penelitian ini dapat diketahui balok dengan kondisi keruntuhan tarik memiliki beban yang lebih rendah pada lendutan yang sama. Balok dengan kondisi keruntuhan tarik memiliki perilaku keruntuhan yang lebih daktail. Selain itu, daerah tekan beton kerusakannya lebih sedikit dibandingkan dengan yang lain. Retak geser yang terjadi pada badan balok kondisi keruntuhan tarik lebih sedikit. Selain itu, semakin tinggi rasio tulangan tarik maka tegangan tarik yang terjadi akan semakin rendah.	Hasil penelitian ini menunjukkan kapasitas lentur balok variasi 2 (BT) mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan variasi 1 balok (BN) sebesar 5,758% dengan rata-rata kuat lentur sebesar 15,305 MPa. Hasil pengamatan dari pola retak pada balok BT-1 mengalami retak geser lentur, BT-2 dan balok BT-3 mengalami retak lentur.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok <i>over reinforced</i> cenderung mengalami keruntuhan geser yang lebih cepat dan signifikan, sehingga perilaku yang terjadi yaitu getas. Balok <i>balance reinforced</i> mengalami retak geser dan lentur yang lebih seimbang, akan tetapi keruntuhan yang terjadi yaitu keruntuhan geser. Sementara itu, balok <i>under reinforced</i> mengalami keruntuhan yang lebih dini tetapi sifat keruntuhan yang lebih daktail dan keruntuhannya berupa lentur.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Beton

Beton merupakan suatu bahan konstruksi yang terbentuk melalui proses pencampuran semen, air, serta agregat seperti kerikil atau pasir. Beton tetap menjadi salah satu material konstruksi yang paling umum di dunia, dikarenakan sifat kekuatannya, daya tahan, dan kemampuannya untuk diproses dalam berbagai bentuk dan ukuran. Pemanfaatan beton umumnya terdapat dalam proyek-proyek konstruksi seperti pembangunan jembatan, bangunan bertingkat, jalan raya, serta bendungan.

3.2 Bahan Campuran Beton

3.2.1 Agregat Halus

Menurut SNI 1970-2016, agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (No. 4).

Agregat halus adalah agregat yang terbuat dari penghancuran agregat kasar atau murni dari alam. Agregat halus mempunyai peran penting sebagai pembentuk beton dalam pengendalian (*workability*), kekuatan (*strength*), dan keawetan (*durability*). Pasir sebagai agregat halus harus memenuhi gradasi dan persyaratan yang telah ditentukan.

Syarat-syarat agregat halus (pasir) sebagai bahan material pembuatan beton sesuai dengan ASTM C 33 adalah sebagai berikut.

1. Material dari bahan alami dengan kekasaran permukaan yang optimal sehingga kuat tekan beton besar.
2. Butiran tajam, keras, awet (*durable*), dan tidak bereaksi dengan material beton lainnya.
3. Berat jenis agregat tinggi yang berarti agregat padat sehingga beton yang dihasilkan padat dan awet.

4. Gradasi sesuai spesifikasi dan hindari *gap graded aggregate* karena akan membutuhkan semen lebih banyak untuk mengisi rongga.
5. Bentuk yang baik adalah bulat, karena akan saling mengisi rongga dan jika ada bentuk yang pipih dan lonjong dibatasi 15% berat total agregat.

Pemakaian agregat halus berfungsi sebagai bahan pengisi dengan tujuan untuk menambah kekuatan, mengurangi penyusutan, dan mengurangi pemakaian bahan pengikat (semen). Sifat dan karakteristik agregat halus yang akan digunakan harus memenuhi persyaratan adukan dalam pembuatan beton. Pemeriksaan agregat halus perlu dilakukan untuk mengetahui sifat dan karakteristik bahan yang akan digunakan dan juga dilakukan untuk mengetahui apakah agregat halus telah memenuhi persyaratan atau tidak. Pemeriksaan pada agregat halus yaitu sebagai berikut.

1. Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air

Pemeriksaan ini dilakukan pada agregat halus dan sejenisnya yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) yang bertujuan menentukan angka berat jenis curah, berat jenis jenuh permukaan, berat jenis semu, dan penyerapan air pada agregat halus. Untuk memperoleh data tersebut diperlukan langkah-langkah dan perhitungan yang sesuai SNI 1970-2016.

- a. Berat jenis curah

Berat jenis curah adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu 25°C.

Data pemeriksaan berat jenis curah agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.1.

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{Bk}{B+500-Bt} \quad (3.1)$$

dengan:

Bk = berat benda uji kering oven (gr),

B = berat piknometer berisi air (gr),

Bt = berat piknometer berisi benda uji dan air (gr), dan

500 = berat benda uji dalam keadaan jenuh kering permukaan (gr).

b. Berat jenis jenuh kering permukaan

Berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) adalah perbandingan antara berat agregat jenuh kering permukaan dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan jenuh pada suhu 25°C.

Data pemeriksaan berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.2.

$$\text{Berat jenis jenuh kering permukaan} = \frac{500}{B+500-Bt} \quad (3.2)$$

dengan:

B = berat piknometer berisi air (gr),

Bt = berat piknometer berisi benda uji dan air (gr), dan

500 = berat benda uji dalam keadaan jenuh kering permukaan (gr).

c. Berat jenis semu

Berat jenis semu adalah perbandingan antara berat agregat kering dan berat air suling yang isinya sama dengan isi agregat dalam keadaan kering pada suhu 25°C.

Data pemeriksaan berat jenis semu agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.3.

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{Bk}{B+Bk-Bt} \quad (3.3)$$

dengan:

Bk = berat benda uji kering oven (gr),

B = berat piknometer berisi air (gr), dan

Bt = berat piknometer berisi benda uji dan air (gr).

d. Penyerapan air

Penyerapan air adalah perbandingan berat air yang dapat diserap pori terhadap berat agregat kering, dinyatakan dalam persen (%).

Data pemeriksaan penyerapan air agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.4.

$$\text{Penyerapan air} = \frac{500 - B_k}{B_k} \times 100\% \quad (3.4)$$

dengan:

B_k = berat benda uji kering oven (gr) dan

500 = berat benda uji dalam keadaan jenuh kering permukaan (gr).

2. Pemeriksaan analisis saringan

Pemeriksaan ini dilakukan pada agregat halus dan sejenisnya yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) yang bertujuan untuk memperoleh distribusi besaran atau jumlah persentase butiran agregat halus. Distribusi yang diperoleh dapat ditunjukkan dalam tabel atau grafik. Untuk memperoleh data tersebut diperlukan langkah-langkah dan perhitungan yang sesuai dengan SNI 03-1968-1990. Data pemeriksaan analisis saringan agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.5-3.8.

a. Berat tertinggal

$$\text{Berat tertinggal} = \frac{\text{Berat tertinggal}}{\text{Jumlah}} \times 100\% \quad (3.5)$$

b. Berat tertinggal kumulatif

$$\text{Berat tertinggal kumulatif} = \text{Persentase berat tertinggal} + \text{Persentase berat tertinggal kumulatif sebelumnya} \quad (3.6)$$

c. Persen lolos kumulatif

$$\text{Persen lolos kumulatif} = 100 - \text{berat tertinggal kumulatif} \quad (3.7)$$

d. Modulus halus butir (MHB)

$$\text{Modulus halus butir (MHB)} = \frac{\sum \text{Berat tertinggal kumulatif}}{100} \quad (3.8)$$

Berikut merupakan batas-batas gradasi agregat halus yang dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Batas-batas Gradasi Agregat Halus

Ukuran saringan (mm)	Persentase berat butir lolos saringan			
	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
10,00	100	100	100	100
4,80	90-100	90-100	90-100	95-100
2,40	60-95	75-100	85-100	95-100
1,20	30-70	55-90	75-100	90-100
0,60	15-34	35-59	60-79	80-100
0,30	5-20	8-30	12-40	15-50
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

Keterangan tabel:

Zona I = pasir kasar,

Zona II = pasir agak kasar,

Zona III = pasir agak halus, dan

Zona IV = pasir halus.

3. Pemeriksaan berat volume padat dan gembur

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat volume padat dan gembur agregat halus yang digunakan untuk mencari kebutuhan agregat halus sesuai perbandingan yang telah ditentukan. Untuk memperoleh data tersebut diperlukan langkah-langkah dan perhitungan yang sesuai dengan SNI 03-4804-1998. Data pemeriksaan berat volume padat dan gembur agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.9-3.12.

a. Berat pasir

$$W3 = W2 - W1 \quad (3.9)$$

dengan:

W2 = berat tabung + berat pasir (gr) dan

W1 = berat tabung (gr).

b. Volume tabung

$$V = \frac{1}{4} \times \pi \times D_{tabung}^2 \times t_{tabung} \quad (3.10)$$

dengan:

D tabung = diameter dalam tabung (cm) dan

t tabung = tinggi tabung (cm).

c. Berat volume padat

$$\text{Berat volume padat} = \frac{W_3}{V} \quad (3.11)$$

dengan:

W3 = berat pasir padat (gr) dan

V = volume tabung (cm³).

d. Berat volume gembur

$$\text{Berat volume padat} = \frac{W_3}{V} \quad (3.12)$$

dengan:

W3 = berat pasir gembur (gr) dan

V = volume tabung (cm³).

4. Pemeriksaan kandungan lumpur

Pemeriksaan kandungan lumpur dilakukan untuk menentukan persentase kandungan lumpur di dalam pasir sebagai syarat untuk bahan konstruksi bangunan. Berdasarkan PUBI 1982, berat bagian yang lewat saringan No. 200 untuk pasir maksimal 5%. Pemeriksaan dilakukan pada agregat halus atau pasir yang lolos saringan No. 4 (4,75 mm) sebanyak 500 gram dan langkah-langkah pengujian sesuai dengan SNI 03-4142-1996. Data pemeriksaan kandungan lumpur agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.13.

$$\text{Berat lolos saringan No.200} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100\% \quad (3.13)$$

dengan:

w1 = berat agregat kering oven (gr) dan

w_2 = berat agregat kering oven sesudah dicuci (gr).

3.2.2 Agregat Kasar

Menurut SNI 03-2847-2019, agregat kasar merupakan material pengisi adukan campuran pada beton. Agregat kasar terdiri dari kerikil yang merupakan hasil dari proses batuan pecah yang memiliki ukuran butir 5-40 mm. Agregat kasar memiliki standar yang menjadi acuan dari persyaratan umum agregat kasar yang dapat digunakan sebagai campuran beton. Persyaratan tersebut diatur dalam SK SNI-S-04-1989-F, persyaratan-persyaratan tersebut sebagai berikut.

1. Agregat kasar harus terdiri dari butiran-butiran yang kuat dan tidak memiliki pori-pori.
2. Agregat kasar memiliki sifat ketahanan yang tinggi, artinya tidak akan pecah atau hancur karena pengaruh cuaca eksternal, seperti sinar matahari yang terik atau hujan.
3. Agregat kasar merupakan bahan konstruksi yang dapat berupa kerikil yang berasal dari batuan alam atau batu pecah yang dihasilkan dari pemecah batu.
4. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang bersifat reaktif dan dapat merusak beton, seperti zat alkali yang bersifat reaktif.
5. Ukuran butiran agregat kasar maksimum harus mematuhi persyaratan tertentu yang disebutkan sebagai berikut: ukuran butiran maksimum tidak boleh melebihi $1/5$ dari jarak terkecil antara dua sisi cetakan, $1/3$ tebal pelat beton, atau $3/4$ jarak bersih antar tulangan beton.
6. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%. Jika kadar lumpur melebihi angka ini, maka agregat kasar harus dicuci.

Dalam penentuan agregat kasar yang dapat digunakan dalam campuran beton ada beberapa pengujian yang dapat dilakukan sebagai parameter agregat kasar dapat digunakan. Berikut merupakan pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini.

1. Pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air

Pengujian berat jenis pada agregat kasar adalah prosedur untuk mengukur berat jenis atau kerapatan agregat kasar. Berat jenis adalah perbandingan antara berat agregat kasar dengan berat air pada volume yang sama pada suhu tertentu.

Tujuan utama dari pengujian berat jenis adalah untuk menentukan kerapatan atau bobot relatif agregat kasar terhadap air. Sedangkan, pengujian penyerapan air pada agregat kasar adalah prosedur yang digunakan untuk mengukur kemampuan agregat kasar dalam menyerap air. Penyerapan air adalah parameter penting karena dapat memengaruhi sifat-sifat fisik agregat dan kualitas campuran beton. Pengujian ini adalah parameter penting karena dapat memengaruhi kualitas campuran beton.

a. Berat jenis curah

Berat jenis curah pada agregat kasar adalah parameter yang mengukur kerapatan atau berat relatif agregat kasar tanpa memperhitungkan pori-pori atau retakan yang ada dalam butiran agregat. Dalam kata lain, berat jenis kering mutlak mengukur kerapatan agregat kasar pada tingkat terbesar, yaitu jika semua pori-pori dalam agregat tersebut dihapus atau diisi dengan bahan yang padat. Dalam konteks agregat kasar, berat jenis kering mutlak adalah ukuran kerapatan atau kepadatan agregat kasar dalam keadaan paling padat yang mungkin. Ini adalah parameter penting karena dapat memengaruhi sifat-sifat fisik dan mekanik agregat, serta kinerja campuran beton atau aspal yang mengandung agregat tersebut.

Data pemeriksaan berat jenis curah agregat kasar dapat dihitung dengan Persamaan 3.14.

$$\text{Berat jenis curah} = \frac{B_k}{B_j - B_a} \quad (3.14)$$

dengan:

B_k = berat benda uji kering oven (gr),

B_j = berat benda uji dalam keadaan jenuh kering permukaan (gr), dan

B_a = berat benda uji dalam air (gr).

b. Berat jenis jenuh kering permukaan

Berat jenis kering permukaan pada agregat kasar adalah parameter yang mengukur kerapatan agregat kasar pada permukaan butiran, yaitu berat dari permukaan agregat kasar yang tidak termasuk pori-pori dan retakan yang terbuka. Ini adalah satu aspek penting dari berat jenis agregat kasar dan

memberikan informasi tambahan tentang kerapatan atau kepadatan agregat tersebut.

Data pemeriksaan berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) agregat kasar dapat dihitung dengan Persamaan 3.15.

$$\text{Berat jenis jenuh kering permukaan} = \frac{B_j}{B_j - B_a} \quad (3.15)$$

dengan:

B_j = berat benda uji dalam keadaan jenuh kering permukaan (gr) dan

B_a = berat benda uji dalam air (gr).

c. Berat jenis semu

Berat jenis semu pada agregat kasar adalah parameter yang mengukur berat jenis agregat kasar bersama dengan pori-pori yang ada dalam butiran agregat tersebut. Dalam pengertian yang lebih umum, berat jenis semu mencakup ruang pori-pori dan retakan di dalam agregat kasar. Dengan kata lain, berat jenis semu memperhitungkan kerapatan agregat bersama dengan ruang pori-pori yang ada dalam agregat tersebut. Berat jenis semu agregat kasar dapat digunakan untuk memahami sejauh mana agregat kasar akan berinteraksi dengan campuran beton. Semakin tinggi berat jenis semu, semakin sedikit pori-pori yang ada dalam agregat, dan ini dapat berarti bahwa agregat lebih kompak atau padat. Hal ini dapat berdampak positif pada kinerja campuran beton karena agregat yang lebih padat cenderung memberikan struktur yang lebih kuat dan daya tahan yang lebih baik.

Data pemeriksaan berat jenis semu agregat kasar dapat dihitung dengan Persamaan 3.16.

$$\text{Berat jenis semu} = \frac{B_k}{B_k - B_a} \quad (3.16)$$

dengan:

B_k = berat benda uji kering oven (gr) dan

B_a = berat benda uji dalam air (gr).

d. Penyerapan air

Penyerapan air pada agregat kasar adalah parameter yang mengukur kemampuan agregat kasar untuk menyerap air. Ini adalah salah satu karakteristik penting dari agregat kasar yang dapat memengaruhi sifat-sifat campuran beton atau aspal yang mengandung agregat tersebut. Penyerapan air mengacu pada berapa banyak air yang dapat diserap oleh agregat kasar dan berapa banyak air yang dapat dipegang oleh pori-pori dan retakan di dalam agregat tersebut.

Data pemeriksaan penyerapan air agregat kasar dapat dihitung dengan Persamaan 3.17.

$$\text{Penyerapan air} = \frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\% \quad (3.17)$$

dengan:

B_k = berat benda uji kering oven (gr) dan

B_j = berat benda uji dalam keadaan jenuh kering permukaan (gr).

2. Pemeriksaan analisis saringan

Pengujian analisis saringan pada agregat kasar adalah salah satu metode pengujian yang digunakan untuk menentukan distribusi ukuran butiran agregat kasar. Metode ini memisahkan agregat kasar menjadi berbagai fraksi berdasarkan ukuran butiran masing-masing. Hal ini penting karena distribusi ukuran butiran agregat dapat memengaruhi sifat-sifat campuran beton atau aspal, seperti kekuatan, kerapatan, dan tekstur. Distribusi yang diperoleh dapat ditunjukkan dalam tabel atau grafik. Untuk memperoleh data tersebut diperlukan langkah-langkah dan perhitungan yang sesuai dengan SNI 03-1968-1990. Data pemeriksaan analisis saringan agregat halus dapat dihitung dengan Persamaan 3.18-3.21.

a. Berat tertinggal

$$\text{Berat tertinggal} = \frac{\text{Berat tertinggal}}{\text{Jumlah}} \times 100\% \quad (3.18)$$

b. Berat tertinggal kumulatif

$$\text{Berat tertinggal kumulatif} = \text{Persentase berat tertinggal} + \text{Persentase berat tertinggal kumulatif sebelumnya} \quad (3.19)$$

c. Persen lolos kumulatif

$$\text{Persen lolos kumulatif} = 100 - \text{berat tertinggal kumulatif} \quad (3.20)$$

d. Modulus halus butir (MHB)

$$\text{Modulus halus butir (MHB)} = \frac{\sum \text{Berat tertinggal kumulatif}}{100} \quad (3.21)$$

Berikut merupakan batas-batas gradasi agregat kasar yang dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Batas-batas Gradasi Agregat Kasar

Ukuran saringan (mm)	40 mm		20 mm	
	Batas atas	Batas bawah	Batas atas	Batas bawah
4,8	5	0	10	0
10	35	10	55	25
20	70	30	100	95
40	100	95	100	100

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

3. Pemeriksaan berat volume padat dan gembur

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berat volume padat dan gembur agregat kasar yang digunakan untuk mencari kebutuhan agregat kasar sesuai perbandingan yang telah ditentukan. Untuk memperoleh data tersebut diperlukan langkah-langkah dan perhitungan yang sesuai dengan SNI 03-4804-1998. Data pemeriksaan berat volume padat dan gembur agregat kasar dapat dihitung dengan Persamaan 3.22-3.25.

a. Berat agregat kasar

$$W3 = W2 - W1 \quad (3.22)$$

dengan:

W2 = berat tabung + berat benda uji (gr) dan

W1 = berat tabung (gr).

b. Volume tabung

$$V = \frac{1}{4} \times \pi \times D_{tabung}^2 \times t_{tabung} \quad (3.23)$$

dengan:

D tabung = diameter dalam tabung (cm) dan

t tabung = tinggi tabung (cm).

c. Berat volume padat

$$\text{Berat volume padat} = \frac{W3}{V} \quad (3.24)$$

dengan:

W3 = berat benda uji padat (gr) dan

V = volume tabung (cm³).

d. Berat volume gembur

$$\text{Berat volume padat} = \frac{W3}{V} \quad (3.25)$$

dengan:

W3 = berat benda uji gembur (gr) dan

V = volume tabung (cm³).

3.2.3 Semen *Portland*

Semen berdasarkan SNI 15-2049-2015 adalah bubuk halus yang memiliki sifat adhesif maupun kohesif, yaitu bahan pengikat. Arti dari bahan pengikat adalah suatu reaksi semen mengikat butir-butir agregat sehingga membentuk suatu massa padat dan mengisi rongga-rongga udara di antara butir-butir agregat.

Definisi semen *portland* merupakan bahan perekat hidrolis yang sangat penting dalam konstruksi beton. Bahan perekat hidrolis yaitu dihasilkan dengan cara menghaluskan *klinker*, terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan pembantu untuk membentuk pasta semen atau

grout bila bersenyawa dengan air dapat mengeras dan jika bereaksi dengan agregat halus biasa disebut dengan mortar (Tjokrodinuljo, 2007).

Selain itu juga semen *portland* mempunyai sifat-sifat kimia yang mempengaruhi kualitas semen yang dihasilkan, sebagaimana hasil susunan kimia yang terjadi diperoleh senyawa dari semen *portland*. Kandungan oksida, unsur penyusun, dan komposisi senyawa semen *portland* akan ditunjukkan pada Tabel 3.3-3.5 sebagai berikut.

Tabel 3.3 Kandungan Oksidasi Pada Semen *Portland*

Oksida	Kandungan (%)
Kalsium (CaO)	60 – 65
Silika (SiO ₂)	17 – 25
Aluminium (Al ₂ O ₃)	3 – 8
Ferik (Fe ₂ O ₃)	0,5 – 0,6
Magnesium (MgO)	0,5 – 0,4
Sulfur (SO ₃)	1 – 2
Sodium (Na ₂ O+K ₂ O)	0,5 – 1

Sumber: Tjokrodinuljo (2007)

Tabel 3.4 Kandungan Oksidasi Pada Semen *Portland*

Nama unsur	Komposisi oksida	Simbol
<i>Tricalcium Silicate</i>	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
<i>Dicalcium Silicate</i>	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
<i>Tricalcium Aluminate</i>	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
<i>Tetracalcium Aluminoferrite</i>	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Sumber: Tjokrodinuljo (2007)

Tabel 3.5 Komposisi Senyawa Semen *Portland*

Senyawa	Kandungan (%)
C ₃ S	40 – 65
C ₂ S	10 – 25
C ₃ A	7 – 12
C ₄ AF	5 – 11

Sumber: Tjokrodinuljo (2007)

Ketika dicampur dengan air, senyawa-senyawa kimia di atas akan mengalami reaksi hidrasi. Demikian untuk membentuk produk hidrasi dan kecepatan bereaksi dengan air dari setiap komponen tentunya berbeda-beda. Penggolongan komposisi kimia (*manufacturing*) semen dilakukan dengan cara mengubah persentase 4 komponen utama semen agar menghasilkan 5 semen tipe umum (PUBI, 1982). Di mana penggolongan ini dimaksudkan agar penggunaan semen sesuai dengan tujuan pemakaian dan spesifik, penggolongan ini mengacu pada SNI 15-2049-2015 dan *American Society for Testing and Material* (ASTM) C-150, yaitu sebagai berikut.

1. Jenis I (untuk keperluan umum)

Digunakan pada air dan tanah yang mengandung 0,01%-0,10% sulfat. Dapat digunakan untuk konstruksi yang tidak memerlukan adanya persyaratan khusus untuk panas hidrasi dan kekuatan tekan awal (konstruksi umum) seperti perumahan, gedung, gudang, dan lain sebagainya.

2. Jenis II (untuk konstruksi dengan ketahanan sulfat sedang)

Digunakan pada air dan tanah yang mengandung 0,10%-0,20% sulfat serta panas hidrasi yang rendah. Dapat digunakan untuk konstruksi yang membutuhkan massa beton tebal dan ketahanan sulfat seperti saluran irigasi, bekas rawa, bangunan yang berada di pinggir laut, dan dam.

3. Jenis III (untuk konstruksi dengan kekuatan awal tinggi)

Penggunaan semen *portland* dengan kekuatan awal yang tinggi (cepat mengeras) digunakan untuk konstruksi bangunan yang memerlukan kuat tekan awal tinggi pada fase awal setelah terjadinya pengikatan. Kuat tekan yang dapat dicapai oleh beton yang menggunakan semen *portland* jenis III selama 24 jam akan sama hasilnya dengan kuat tekan beton dari semen biasa selama 7 hari. Semen *portland* tipe ini dapat digunakan pada bangunan-bangunan yang terletak di dalam air yang tidak memiliki kandungan sulfat yang tinggi, bangunan tingkat tinggi, dan pembuatan jalan dari beton.

4. Jenis IV (untuk konstruksi dengan panas hidrasi rendah)

Jenis ini dalam penggunaannya memiliki panas hidrasi rendah dan biasanya digunakan untuk pekerjaan pengecoran dengan volume yang besar.

5. Jenis V (untuk konstruksi dengan ketahanan sulfat tinggi)

Digunakan pada air dan tanah yang mengandung lebih dari 0,20% kadar sulfat. Dapat digunakan pada konstruksi instalasi limbah dari limbah pabrik dan pembangkit tenaga nuklir.

3.2.4 Air

Air merupakan bahan dasar yang sangat penting dalam pembuatan konstruksi bangunan khususnya pembuatan beton. Air berfungsi sebagai pelarut semen sehingga membentuk pasta dan mengikat seluruh agregat yang berukuran besar hingga kecil. Dalam pembuatan beton apabila air yang digunakan berlebihan maka mengakibatkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi tidak tercapai seluruhnya sehingga akan mempengaruhi kekuatan beton.

Menurut SNI 03-6861.1-2002 syarat air yang digunakan dalam campuran beton adalah sebagai berikut.

1. Bersih, tidak mengandung benda terapung yang terlihat secara visual (minyak, lumpur, dan lain sebagainya).
2. Tidak mengandung benda yang tersuspensi $> 2 \text{ gr/l}$.
3. Tidak mengandung garam yang larut dan dapat merusak beton.
4. Tidak mengandung kandungan klorida $> 0,50 \text{ gr/l}$.
5. Tidak mengandung senyawa sulfat $> 1 \text{ gr/l}$.
6. Penurunan kekuatan beton tidak lebih dari 10%.

3.3 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Perencanaan campuran beton merupakan tahap merancang dan mengembangkan susunan bahan beton yang sesuai dengan kebutuhan proyek konstruksi tertentu. Tujuan pokok dari perencanaan campuran beton adalah menciptakan campuran dengan karakteristik yang diinginkan, seperti kekuatan, ketahanan, kepadatan, dan karakteristik lainnya, yang sesuai dengan standar proyek dan persyaratan lingkungan. Proses pencampuran beton dalam penelitian ini mengacu pada standar SNI 03-2834-2000 tentang tata cara pembuatan campuran beton normal.

Dalam menentukan proporsi campuran beton, diperlukan pula perhitungan yang mencakup beberapa aspek. Perhitungan tersebut meliputi kuat tekan rata-rata

yang ditargetkan, berat isi beton yang disyaratkan, pemilihan agregat ringan, proporsi campuran beton ringan, serta koreksi proporsi campuran. Berikut adalah prosedur perencanaan proporsi campuran beton normal.

1. Kuat tekan yang disyaratkan (f_c')

Kuat tekan yang disyaratkan (f_c') merupakan kuat tekan yang akan direncanakan pada perencanaan beton di umur 28 hari. Kuat tekan ini sebagai patokan awal perencanaan campuran beton yang akan dipergunakan dalam pembuatan beton.

2. Deviasi standar (S_r)

Deviasi standar (S_r) pada kuat tekan rata-rata beton adalah sebuah ukuran statistik yang digunakan untuk mengukur variabilitas atau sebaran data pada kuat tekan rata-rata beton. Deviasi standar pada kuat tekan rata-rata beton menunjukkan seberapa jauh kuat tekan rata-rata beton dari nilai rata-rata yang diharapkan. Deviasi standar pada kuat tekan rata-rata beton dihitung dengan mengukur kuat tekan beton dari sejumlah sampel beton, kemudian menghitung nilai rata-rata dan deviasi standar dari sampel-sampel tersebut. Deviasi standar pada kuat tekan rata-rata beton dapat memberikan informasi penting mengenai seberapa homogen beton yang dihasilkan dan seberapa besar variasi kuat tekan beton yang dihasilkan dari campuran beton yang sama. Menurut SNI 03-2834-2000 deviasi standar yang didapat dari pengalaman di lapangan selama produksi beton dapat dihitung dengan Persamaan 3.26.

$$S_r = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{n} \quad (3.26)$$

dengan:

S_r = deviasi standar (MPa),

x_i = kuat tekan beton ringan yang didapat dari masing-masing benda uji (MPa),

$\bar{x}$ = kuat tekan beton rata-rata (MPa), dan

n = jumlah nilai hasil uji yang harus diambil minimum 30 buah yang setiap nilainya diambil minimum rata-rata 2 buah benda uji yang dibuat dari contoh beton yang sama pada umur 28 hari. Dua hasil

benda uji yang akan digunakan untuk menghitung deviasi standar mempunyai persyaratan sebagai berikut.

- a. Mewakili bahan-bahan prosedur pengawasan mutu dan kondisi produksi yang serupa dengan pekerjaan yang diusulkan.
- b. Mewakili kuat tekan beton yang disyaratkan (f_c') yang nilainya dalam batas 7 MPa dari nilai f_{cr}' yang ditentukan.
- c. Paling sedikit terdiri dari 30 hasil uji yang diurutkan atau 2 kelompok hasil uji diambil dalam produksi selama jangka waktu tidak kurang dari 45 hari.
- d. Bila suatu produksi beton tidak mempunyai 2 hasil uji yang memenuhi poin a, tetapi hanya ada sebanyak 15-29 hasil uji yang berurutan, maka nilai deviasi standar adalah perkalian deviasi standar yang dihitung dari data hasil uji tersebut dengan faktor pengali pada Tabel 3.6 berikut.

Tabel 3.6 Faktor Pengali Untuk Deviasi Standar

Jumlah pengujian	Faktor pengali deviasi standar
Kurang dari 15	Diterangkan lebih lanjut
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 atau lebih	1,00

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

- e. Bila data uji lapangan kurang dari 15, maka kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}') harus diambil tidak kurang dari ($f_c' + 12$ MPa).
3. Nilai tambah (M)
- Nilai tambah (M) dapat dihitung dengan Persamaan 3.27.

$$M = k \times S_r \quad (3.27)$$

dengan:

M = nilai tambah (MPa),

k = tetapan statistik yang nilainya tergantung pada persentase hasil uji yang lebih rendah dari f_c' . Dalam hal ini diambil 5% dan nilai $k = 1,64$, dan

S_r = deviasi standar rencana (MPa).

4. Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}')

Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}') dapat dihitung dengan Persamaan 3.28.

$$f_{cr}' = f_c' + M \quad (3.28)$$

dengan:

f_{cr}' = kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (MPa),

f_c' = kuat tekan yang disyaratkan (MPa), dan

M = nilai tambah (MPa).

5. Menentukan jenis semen yang akan digunakan penelitian.

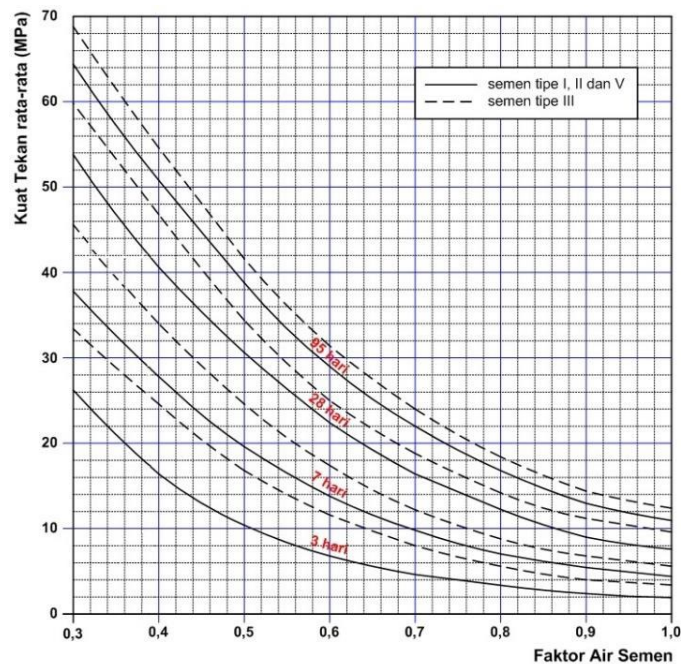
6. Menentukan jenis agregat halus dan kasar yang akan digunakan penelitian.

7. Nilai faktor air semen (FAS)

Menurut SNI 2834-2000, pemilihan faktor air semen diperlukan untuk mencapai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan yang didasarkan sebagai berikut.

a. Hubungan kuat tekan dan faktor air semen yang diperoleh dari penelitian lapangan sesuai dengan bahan dan kondisi pekerjaan yang diusulkan.

b. Penentuan faktor air semen didasarkan grafik pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Grafik 1 : Hubungan antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen (fas)
(benda uji berbentuk Silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm)

**Gambar 3.1 Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen
(benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm)**

(Sumber: SNI 03-2834, 2000)

- c. Penentuan kuat tekan rata-rata untuk melakukan target dari grafik yang akan dibuat diambil dari Tabel 3.7 di bawah ini.

Tabel 3.7 Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Faktor Air Semen dan Agregat Kasar Yang Biasa Dipakai Di Indonesia

Jenis semen	Jenis agregat kasar	Kekuatan tekan (MPa)				
		Pada umur (hari)				Bentuk benda uji
		3	7	28	91	
Semen <i>portland</i> tipe I	Batu tidak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu pecah	19	27	37	45	
Semen <i>portland</i> tipe II dan V	Batu tidak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu pecah	25	32	45	54	
Semen <i>portland</i> tipe III	Batu tidak dipecahkan	21	28	38	44	Silinder
	Batu pecah	25	33	44	48	
	Batu tidak dipecahkan	25	31	46	53	Kubus
	Batu pecah	30	40	53	60	

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

8. Setelah mengetahui FAS dari Tabel 3.7 dan Gambar 3.1, maka dapat ditentukan FAS maksimum yang terdapat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Dalam Lingkungan Khusus

Lokasi		Jumlah semen minimum per m ³ beton (kg)	Nilai faktor air semen maksimum
Beton di dalam ruang bangunan	Keadaan keliling non-korosif	275	0,60
	Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325	0,52
Beton di luar ruangan bangunan	Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60
	terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
Beton masuk ke dalam tanah	Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
	Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		
Beton yang kontinu berhubungan	Air tawar		
	Air laut		

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

9. Menentukan nilai *slump*

Menurut SNI 03-2834-2000, nilai *slump* ditentukan dengan kondisi pelaksanaan di lapangan sehingga diperoleh beton yang mudah untuk dikerjakan, dituangkan, dipadatkan, dan diratakan.

10. Menentukan ukuran agregat maksimum

Menurut SNI 03-2834-2000, ukuran butir agregat maksimum dipilih dengan persyaratan yang tidak boleh melebihi:

- seperlima jarak terkecil antara bidang-bidang samping dari cetakan,
- sepertiga dari tebal pelat, dan
- tiga perempat dari jarak bersih minimum di antara batang-batang atau berkas-berkas tulangan.

11. Menentukan kadar air bebas

Penentuan kadar air bebas dilakukan untuk mengetahui seberapa kadar air yang digunakan dengan perkiraan jumlah agregat yang dipakai. Kadar air bebas menurut SNI 03-2834-2000 dapat ditentukan sebagai berikut.

- a. Agregat tak dipecah dan agregat dipecah digunakan nilai-nilai pada Tabel 3.9 dan grafik FAS pada Gambar 3.1.

Tabel 3.9 Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m^3) Yang Dibutuhkan

Ukuran maksimum agregat (mm)	Jenis batuan	Slump (mm)			
		0 – 10	10 – 30	30 – 60	60 – 180
10	Batu tak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

Agregat campuran (tak dipecah dan dipecah), dihitung menggunakan Persamaan 3.29.

$$W = \frac{2}{3} \times W_h + \frac{1}{3} \times W_k \quad (3.29)$$

dengan:

W = jumlah air yang dibutuhkan (kg/m^3),

W_h = perkiraan jumlah air untuk agregat halus, dan

W_k = perkiraan jumlah air untuk agregat kasar.

12. Menentukan kebutuhan semen

Penentuan kebutuhan semen dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.30.

$$W_c = \frac{W}{FAS} \quad (3.30)$$

dengan:

W_c = jumlah semen yang dibutuhkan (kg/m^3),

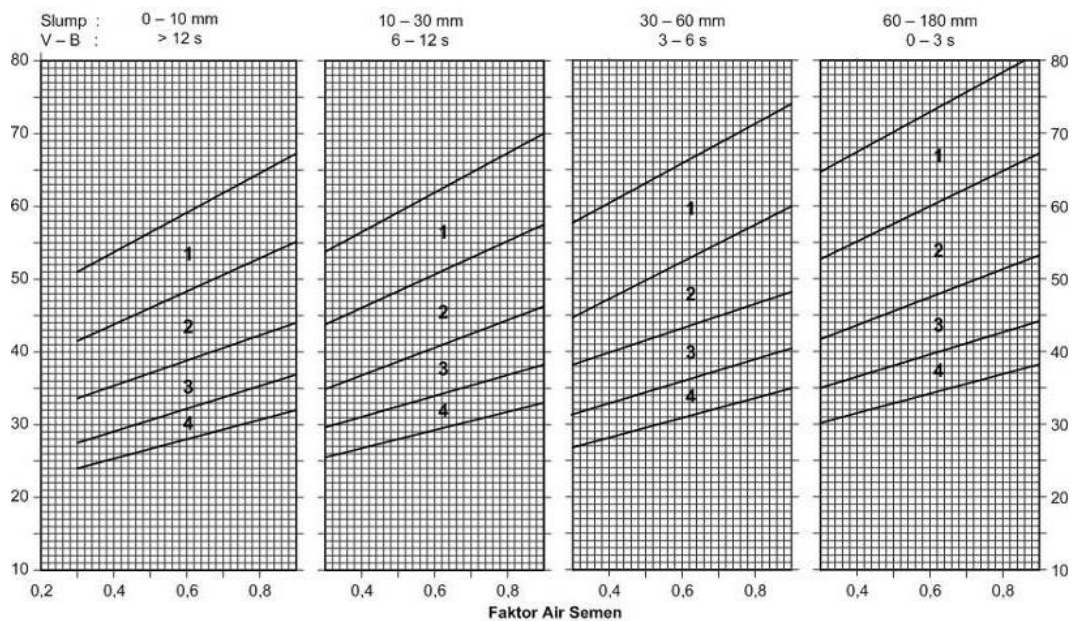
W = jumlah air yang dibutuhkan (kg/m^3), dan

FAS = nilai faktor air semen yang digunakan.

Apabila jumlah semen tidak memenuhi batasan minimum yang ditetapkan pada Tabel 3.8, maka batasan minimum yang harus dipakai dan perlu melakukan perhitungan ulang untuk nilai FAS.

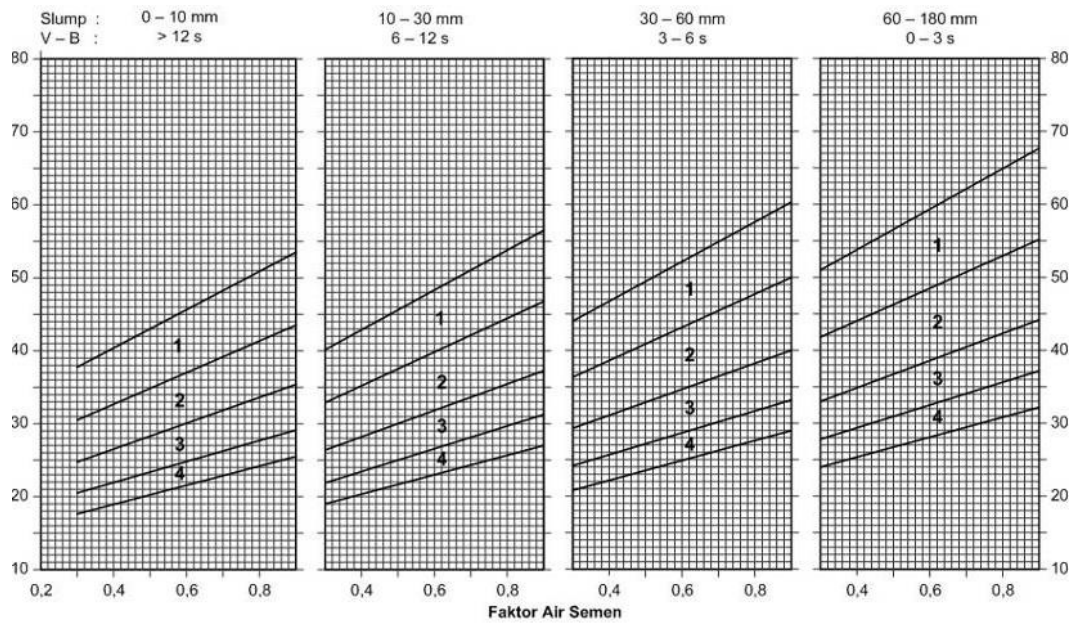
13. Menentukan persentase jumlah agregat halus

Penentuan jumlah agregat halus menurut SNI-03-2834-2000 ditentukan dengan menggunakan penggunaan besar ukuran agregat maksimum dari agregat kasar, nilai *slump*, daerah gradasi agregat halus, dan faktor air semen. Penentuan persentase jumlah agregat halus dapat menggunakan grafik pada Gambar 3.2-3.4.



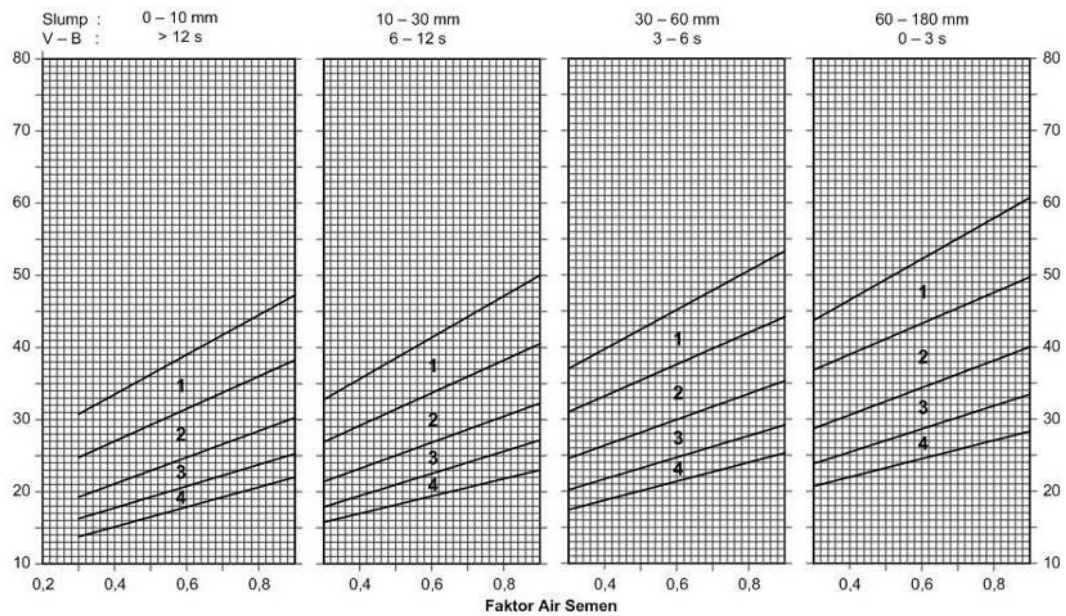
Grafik 13: Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan
Untuk ukuran butir maksimum 10 mm

Gambar 3.2 Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm
(Sumber: SNI 03-2834, 2000)



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

Gambar 3.3 Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm
(Sumber: SNI 03-2834, 2000)



Grafik 15: Persen Pasir terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan
Untuk ukuran butir maksimum 40 mm

Gambar 3.4 Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm
(Sumber: SNI 03-2834, 2000)

Untuk memperoleh persentase dari agregat halus dapat mengikuti langkah sebagai berikut.

- a. Melakukan penentuan melalui grafik yang berdasarkan dari besaran ukuran agregat kasar, nilai *slump*, daerah gradasi agregat halus, dan faktor air semen.
- b. Menarik garis ke atas hingga ke kurva di antara 2 kurva yang memasuki daerah gradasi.
- c. Tarik garis secara horizontal ke kanan, dari kurva batas atas maupun kurva batas bawah pada daerah gradasi.
- d. Mencatat nilai lalu diambil rata-rata dari kedua nilai tersebut.

14. Menentukan berat jenis relatif agregat gabungan

Penentuan berat jenis relatif agregat gabungan dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.31.

$$B_{jAG} = (\%AH \times B_{jAH}) + (\%AK \times B_{jAK}) \quad (3.31)$$

dengan:

B_{jAG} = berat jenis agregat gabungan,

B_{jAH} = berat jenis agregat halus,

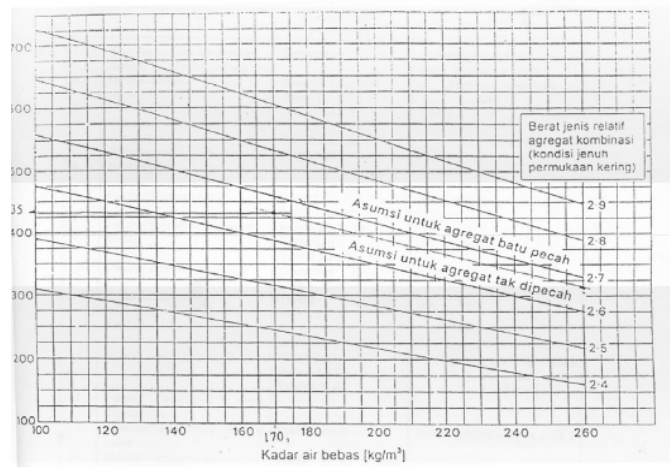
B_{jAK} = berat jenis agregat kasar,

$\%AH$ = persentase jumlah agregat halus, dan

$\%AK$ = persentase jumlah agregat kasar.

15. Menentukan berat isi beton

Penentuan berat isi beton digunakan untuk mengetahui perkiraan berat dari seluruh campuran dalam beton. Untuk menentukan berat isi beton dapat menggunakan grafik pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah
(Sumber: SNI 03-2834, 2000)

16. Menentukan proporsi agregat gabungan

Penentuan proporsi agregat gabungan dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.32.

$$AG = \text{Berat isi beton} - \text{jumlah semen} - \text{jumlah air} \quad (3.32)$$

17. Menentukan proporsi agregat halus

Penentuan proporsi agregat halus dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.33.

$$W_{AH} = \text{persentase agregat halus} \times \text{agregat gabungan} \quad (3.33)$$

18. Menentukan proporsi agregat kasar

Penentuan proporsi agregat kasar dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.34.

$$W_{AK} = \text{persentase agregat kasar} \times \text{agregat gabungan} \quad (3.34)$$

19. Menentukan proporsi campuran

Proporsi campuran ditentukan untuk tiap m^3 beton dengan kondisi agregat dalam keadaan jenuh kering permukaan (SSD). Proporsi campuran uji untuk tiap m^3 beton ditentukan dengan mengalikan dengan volume total benda uji.

20. Menghitung koreksi proporsi campuran

Koreksi proporsi campuran diperlukan untuk kondisi agregat yang tidak dalam keadaan jenuh kering permukaan (SSD). Koreksi dilakukan terhadap kandungan air dalam agregat.

3.4 Uji *Slump*

Pengujian *slump* berguna untuk menentukan tingkat kekentalan campuran beton dan tingkat kemudahan dalam melakukan proses pengerjaan beton. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah kerucut *abrams* (SNI 1972-2008) serta tongkat penumbuk untuk memadatkan. Jika nilai hasil pengujian tinggi maka pekerjaan akan semakin mudah begitu juga sebaliknya. Nilai *slump* yang ideal akan tergantung pada jenis konstruksi yang dibuat, dan umumnya berkisar antara 10-12 cm.

Hasil dari uji *slump* pada beton berguna untuk menentukan kualitas beton dan memastikan bahwa campuran beton yang dihasilkan memiliki konsistensi yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi konstruksi. Uji *slump* juga membantu mengidentifikasi apakah campuran beton perlu ditambah atau dikurangi kandungan airnya untuk mencapai konsistensi yang optimal.

3.5 Tulangan Baja

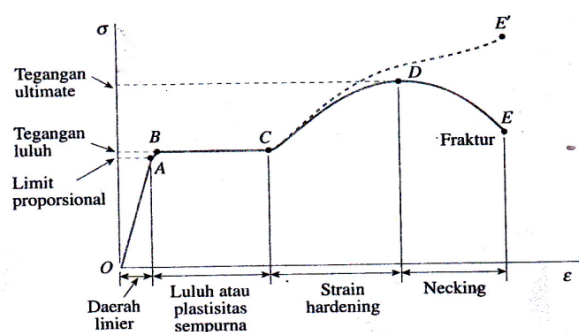
Tulangan baja merupakan komponen yang vital dalam pembuatan beton bertulang. Karena berfungsi dalam menentukan kekuatan struktur konstruksi. Dalam desain beton bertulang, terdapat dua karakteristik fisik penting dari tulangan baja yang digunakan, yaitu modulus elastisitas (E_s) dan tegangan leleh (f_y).

Salah satu metode yang digunakan dalam mengetahui dan menguji tegangan leleh pada suatu material baja adalah dengan mengacu tolak ukur pada SII 0136-84. Tegangan leleh pada baja adalah titik di mana baja mengalami kenaikan tegangan tanpa adanya penambahan regangan lebih lanjut. Sementara itu, modulus elastisitas baja adalah kemiringan awal dari kurva tegangan-regangan di daerah elastis. Pada SNI 2847-2019 ditetapkan bahwa modulus elastisitas material baja memiliki nilai 200 GPa atau 200.000 MPa.

Menurut SNI 2052-2017, baja tulangan memiliki dua tipe tulangan, yaitu tulangan ulir (*deformed*) dan tulangan polos (*plain*). Namun pada pembaharuan SNI 2847-1019, tulangan dan kawat non prategang wajib memiliki ulir, kecuali penggunaan kawat polos atau batang sebagai tulangan spiral diperbolehkan. Sementara itu, komponen logam lain seperti baut angkur, pelat ring, atau baja polos yang digunakan dalam *joint* konstruksi, umumnya tidak dianggap sebagai tulangan baja.

Pada perancangan struktur beton bertulang, sangat penting untuk memahami sifat-sifat mekanik baja yang unik, seperti modulus elastisitas (E_s) dan tegangan leleh (f_y) (Setiawan, 2008). Untuk mengetahui sifat mekanik dari baja tulangan, uji tarik dilakukan sebagai metode utama. Uji tarik memberikan data yang akurat dan dapat mengetahui karakteristik mekanik material baja dengan baik. Untuk uji tekan tidak menghasilkan data yang akurat karena karakteristik kuat tekan baja relatif rendah yang mengakibatkan terjadinya tekuk pada tulangan baja.

Berikut merupakan kurva tegangan-regangan material baja yang dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Grafik Tegangan-Regangan Baja

3.6 Beton Bertulang

Baja tulangan terdiri dari batang, kawat, dan jaring kawat baja las yang seluruhnya dirakit dengan standar yang telah ditetapkan. Baja tulangan dapat menahan gaya tarik maupun gaya tekan. Menurut SNI 2847-2019, tulangan yang dapat digunakan dalam elemen beton bertulang hanya dibatasi pada baja tulangan dan kawat baja saja. Ada 2 jenis baja tulangan yang terdapat di pasaran, yaitu baja tulangan polos (BJTP) dan baja tulangan ulir atau *deform* (BJTD/BJTS).

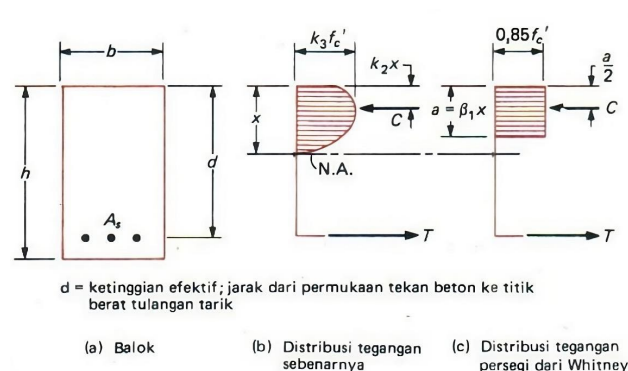
Sifat utama beton adalah sangat kuat dalam menahan gaya tekan tetapi lemah dalam menahan gaya tarik. Sifat utama baja tulangan yaitu sangat kuat terhadap gaya tarik namun lemah terhadap gaya tekan, sehingga diperlukan baja tulangan di dalam beton yang berfungsi menahan gaya tarik yang bekerja.

Dari sifat utama kedua bahan tersebut, jika keduanya digabungkan menjadi satu kesatuan secara komposit sehingga dapat diperoleh beton bertulang. Beton bertulang merupakan material komposit yang terdiri dari beton dan baja tulangan yang ditanam di dalam beton. Beton bertulang mempunyai sifat yang sesuai dengan kedua bahan penyusunnya, yaitu sangat kuat terhadap beban tekan maupun beban tarik.

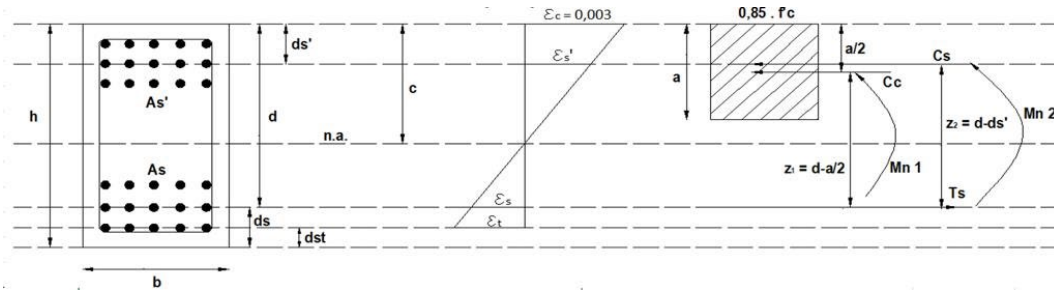
3.7 Rasio Tulangan Balok Beton Bertulang

Rasio tulangan (ρ) didefinisikan sebagai perbandingan antara luas tampang tulangan baja tarik dengan luas efektif beton. Dua hal utama yang dialami oleh suatu balok beton bertulang adalah kondisi tekan dan tarik, yang antara lain karena adanya pengaruh lentur ataupun gaya lateral.

Pada balok beton bertulang, material tulangan berperan dalam menopang momen lentur yang terjadi pada sumbu memanjang balok. Berikut merupakan diagram tegangan-regangan antara balok beton tulangan tunggal dan tulangan rangkap yang terdapat pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8.



Gambar 3.7 Diagram Tegangan Regangan Balok Beton Tulangan Tunggal
(Sumber: Simatupang, 2013)



Gambar 3.8 Diagram Tegangan Regangan Balok Beton Tulangan Rangkap

Gaya-gaya pada balok beton bertulang dapat dihitung dengan Persamaan 3.35-3.37.

$$Ts = As \times fs \quad (3.35)$$

dengan:

Ts = resultan tegangan tarik baja (N),

As = luas penampang (mm^2), dan

fs = tegangan baja (MPa).

$$Cc = 0,85 \times fc' \times a \times b \quad (3.36)$$

dengan:

Cc = resultan tegangan tekan beton (N),

fc' = tegangan beton (MPa),

a = tinggi dari blok tegangan balok segi empat (mm), dan

b = lebar balok (mm).

$$Mu = Ts \times z = Cc \times z \quad (3.37)$$

dengan:

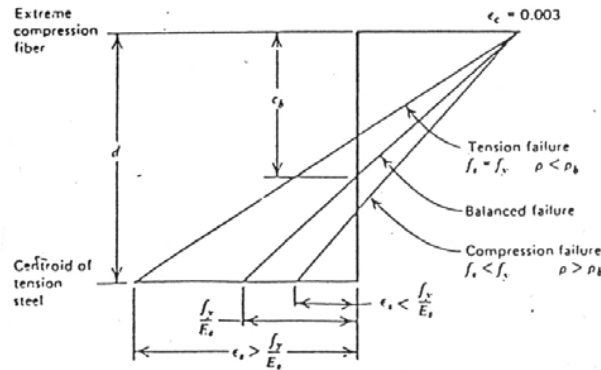
Mu = momen batas (*ultimate*) (MPa),

Ts = resultan tegangan tarik baja (N),

Cc = resultan tegangan tekan beton (N), dan

z = tinggi dari titik berat gaya terhadap posisi tulangan baja (mm).

Dengan menetapkan nilai regangan beton (ϵ_c) sebesar 0,003 dalam kondisi *ultimite*, ada 3 kemungkinan regangan yang terjadi pada daerah tulangan seperti pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Regangan Baja Pada Keadaan Batas Lentur

1. Rasio tulangan seimbang (*balanced reinforced*)

Balanced reinforced terjadi apabila regangan baja tulangan sama besar dengan regangan lelehnya, di mana $\varepsilon_{ty} = \frac{f_y}{E_s}$, dengan demikian terdapat Persamaan 3.38-3.45.

$$Cc = Ts \quad (3.38)$$

$$0,85 \times f_c' \times a_b \times b = A_s \times f_y \quad (3.39)$$

$$a_b = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f_c' \times b} \quad (3.40)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{c_b} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \quad (3.41)$$

$$c_b = \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{200.000}} \times d \quad (3.42)$$

$$c_b = \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) d \quad (3.43)$$

$$\rho_b = \frac{A_s}{b \times d} \quad (3.44)$$

$$\rho_b = 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (3.45)$$

2. Rasio tulangan lebih (*over reinforced*)

Over reinforced terjadi apabila regangan yang terjadi pada daerah baja tulangan (ε_t) lebih kecil dari regangan leleh baja (ε_{ty}) atau melebihi rasio *balance* ($\rho_{balance}$). Dalam hal desain balok menggunakan *over reinforced*, diambil regangan tulangan dengan nilai $\varepsilon_t = 0,002$, sehingga diperoleh Persamaan 3.46-3.53.

$$c_b = \frac{a_b}{\beta_1} = \frac{A_s b \times f_y}{0,85 \times f_{c'} \times b \times \beta_1} = \frac{\rho_b \times f_y \times d}{0,85 \times f_{c'} \times \beta_1} \quad (3.46)$$

$$c = \frac{\rho \times f_y \times d}{0,85 \times f_{c'} \times \beta_1} \quad (3.47)$$

$$\frac{c}{c_b} = \frac{\rho}{\rho_b} \quad (3.48)$$

$$\frac{c}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} \times \frac{c_b}{d} = \left(\frac{\rho}{\rho_b} \right) \times \left(\frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \right) \quad (3.49)$$

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + \epsilon_t} \quad (3.50)$$

$$\rho_{over} = \left(\frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + \epsilon_t} \right) \rho_b \quad (3.51)$$

$$\rho_{over} = \left(\frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + 0,002} \right) \rho_b \quad (3.52)$$

$$\rho_{over} = \left(\frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,005} \right) \rho_b \quad (3.53)$$

3. Rasio tulangan kurang (*under reinforced*)

Under reinforced terjadi bila regangan yang terjadi pada daerah baja tulangan lebih besar dari nilai 0,005. Dalam hal desain balok menggunakan *under reinforced*, diambil regangan tulangan dengan nilai $\epsilon_t = 0,005$, sehingga diperoleh persamaan keseimbangan seperti pada Persamaan 3.54-3.61.

$$c_b = \frac{a_b}{\beta_1} = \frac{A_s b \times f_y}{0,85 \times f_{c'} \times b \times \beta_1} = \frac{\rho_b \times f_y \times d}{0,85 \times f_{c'} \times \beta_1} \quad (3.54)$$

$$c = \frac{\rho \times f_y \times d}{0,85 \times f_{c'} \times \beta_1} \quad (3.55)$$

$$\frac{c}{c_b} = \frac{\rho}{\rho_b} \quad (3.56)$$

$$\frac{c}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} \times \frac{c_b}{d} = \left(\frac{\rho}{\rho_b} \right) \times \left(\frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \right) \quad (3.57)$$

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + \epsilon_t} \quad (3.58)$$

$$\rho_{under} = \left(\frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + \epsilon_t} \right) \rho_b \quad (3.59)$$

$$\rho_{under} = \left(\frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + 0,005} \right) \rho_b \quad (3.60)$$

$$\rho_{under} = \left(\frac{0,003 + \frac{fy}{Es}}{0,008} \right) \rho_b \quad (3.61)$$

3.8 Uji Tekan Beton

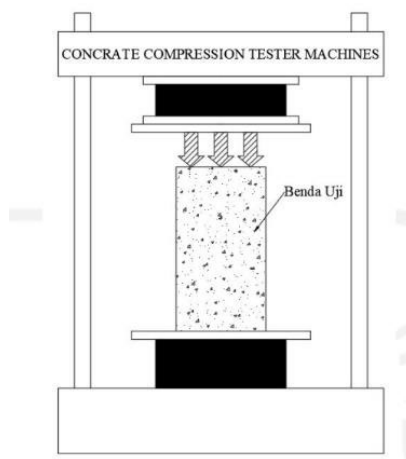
Kuat tekan beton merupakan berat beban maksimum persatuan luas pada saat benda uji hancur yang dihasilkan oleh mesin tekan beton (SNI 1974-2011). Pada dasarnya nilai kuat tekan beton lebih tinggi dari pada nilai kuat tarik. Menurut SNI 1974-2011 untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton adalah dengan besarnya beban dibanding dengan luas permukaan yang dibebani seperti Persamaan 3.62.

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (3.62)$$

dengan:

- f_c' = kuat tekan beton (MPa),
- P = beban maksimal (N), dan
- A = luas penampang (mm^2).

Berikut merupakan sketsa pengujian kuat tekan beton pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Sketsa Pengujian Kuat Tekan Beton

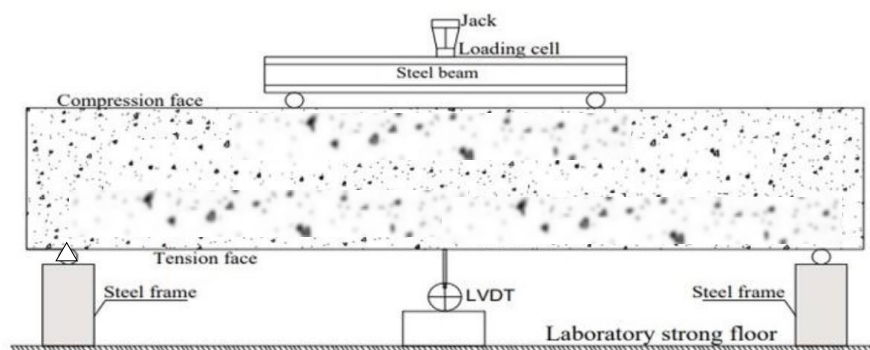
3.9 Uji Lentur Balok

Sebuah benda yang diberi beban akan mengalami perubahan bentuk (deformasi) akibatnya muncul momen lentur sebagai respons dari bahan yang membentuk balok tersebut terhadap beban eksternal. Selama mengalami deformasi,

tegangan yang muncul tidak boleh melebihi tegangan lentur yang diizinkan untuk bahan beton tersebut (Rahamudin, dkk, 2016).

Ketika beban yang bekerja pada sebuah balok meningkat, itu menyebabkan deformasi tambahan dan regangan tambahan yang berujung pada munculnya retakan sepanjang panjang balok. Peningkatan beban tersebut dapat menyebabkan kegagalan struktur, terjadi ketika beban eksternal mencapai kapasitas maksimum elemen struktur.

Berikut merupakan sketsa pengujian kuat lentur balok pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Sketsa Pengujian Kuat Lentur Balok

3.10 Pola Retak Balok Beton Bertulang

Pola retak pada balok beton bertulang diakibatkan adanya tegangan. Tegangan tarik salah satu faktor utama yang menyebabkan keretakan atau keruntuhan pada balok. Menurut Mac Cormac (2001) bahwa pola retak dapat dibedakan menjadi 5 macam yaitu sebagai berikut.

1. Retak lentur

Retak lentur merupakan jenis retakan yang terjadi secara vertikal dari sisi yang mengalami tegangan tarik ke arah atas hingga mencapai wilayah pusat netral. Berikut merupakan ilustrasi retak lentur yang dapat dilihat pada Gambar 3.12.

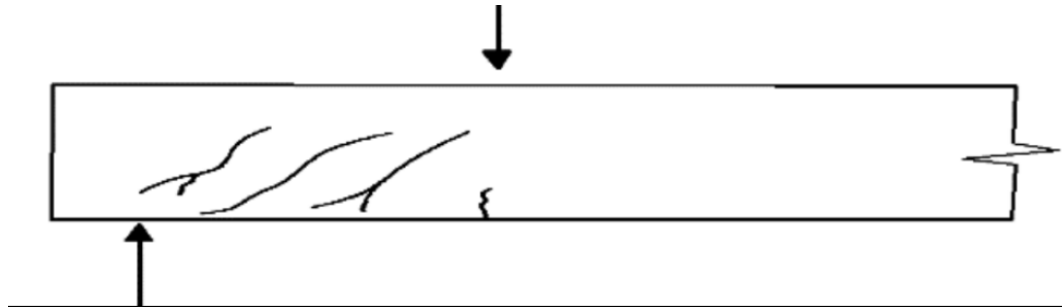


Gambar 3.12 Retak Lentur

(Sumber: Kholilul dkk, 2009)

2. Retak geser

Retak geser merupakan jenis retakan yang muncul secara diagonal pada tumpuan struktur, baik sebagai retak terpisah atau sebagai perpanjangan dari retak lentur. Berikut merupakan ilustrasi retak lentur yang dapat dilihat pada Gambar 3.13.

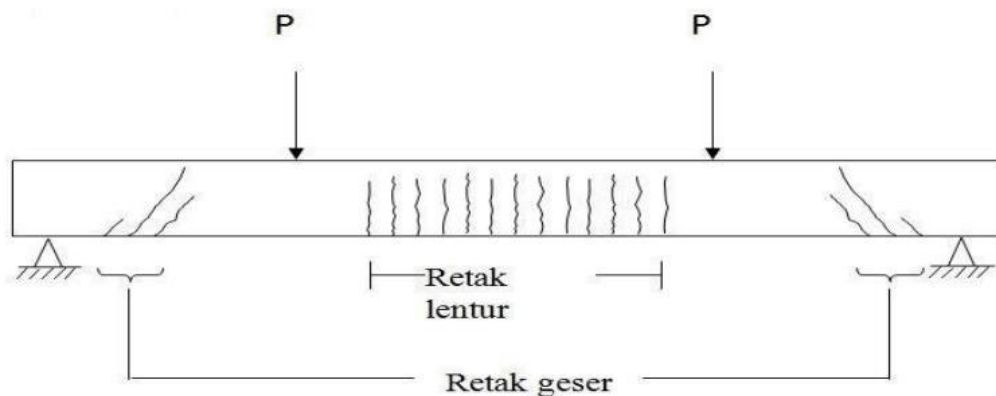


Gambar 3.13 Retak Geser

(Sumber: Kholilul dkk, 2009)

3. Retak lentur geser

Retak lentur geser merupakan perpaduan antara lentur dan retak geser. Berikut merupakan ilustrasi retak lentur yang dapat dilihat pada Gambar 3.14.



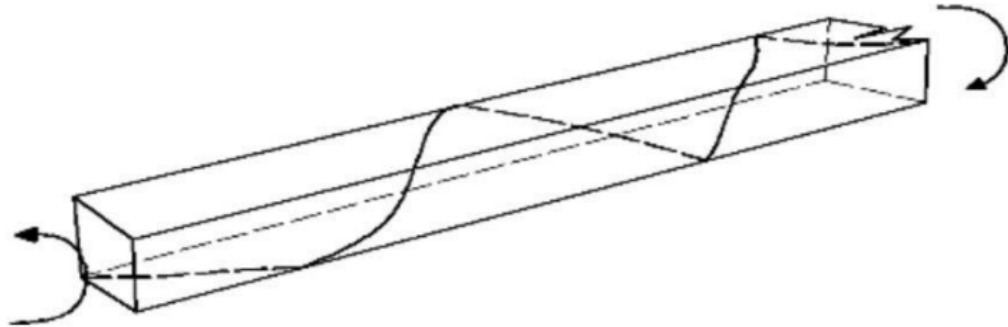
Gambar 3.14 Retak Lentur Geser

(Sumber: Kholilul dkk, 2009)

4. Retak puntir

Retak puntir memiliki kemiripan dengan retak geser, namun retak puntir ini berbentuk lingkaran yang menyelimuti balok atau plat secara diagonal. Ketika suatu struktur beton tanpa tulangan menerima torsi murni, batang tersebut akan mengalami retakan dan kerusakan sepanjang garis 45 derajat karena tegangan

puntir yang menyebabkan tarikan diagonal. Berikut merupakan ilustrasi retak puntir yang dapat dilihat pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15 Retak Puntir

(Sumber: Kholilul dkk, 2009)

5. Retak lekatan

Retak lekatan terjadi karena tegangan lekatan (*bond stress*) antar tulangan dan beton yang menyebabkan terjadinya pemisahan sepanjang tulangan. Berikut merupakan ilustrasi retak lekatan yang dapat dilihat pada Gambar 3.16.

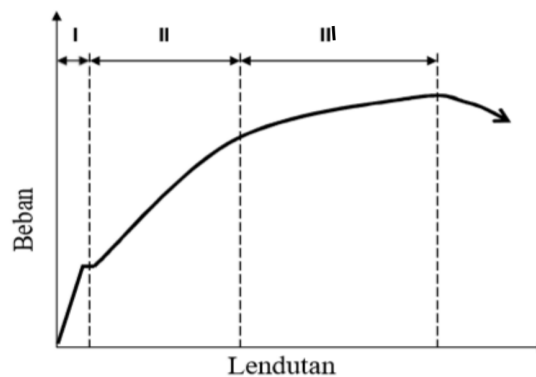


Gambar 3.16 Retak Lekatan

(Sumber: Kholilul dkk, 2009)

3.11 Perilaku Keruntuhan Balok Beton Bertulang

Perilaku keruntuhan yang terjadi pada struktur balok pada umumnya adalah keruntuhan lentur dan keruntuhan geser. Perilaku keruntuhan balok beton bertulang di atas 2 tumpuan dapat digambarkan dalam bentuk kurva beban-lendutan. Bentuk kurva tersebut seperti pada Gambar 3.17.



Gambar 3.17 Grafik Hubungan Beban dan Lendutan Pada Balok

1. Pada daerah I disebut sebagai fase pra retak, batang-batang strukturalnya tidak mengalami retakan. Bagian awal kurva beban-lendutan menunjukkan garis lurus yang mengindikasikan perilaku elastis. Tegangan lentur maksimum pada balok fase ini lebih rendah dari pada kekuatan lenturnya akibat dari modulus kehancuran (f_r) beton lebih kecil.
2. Pada daerah II disebut sebagai fase beban pasca retak, batang-batang struktural mengalami retakan yang masih dapat diterima, baik dalam distribusi maupun lebar retaknya. Pada tumpuan sederhana, retakan pada balok cenderung menjadi lebih luas di daerah lapangan, sementara pada tumpuan lebih sedikit yang mana retakan cenderung bersifat minor dan tidak luas. Ketika terjadi retakan akibat lentur, kontribusi kekuatan lentur penampangnya telah mengalami penurunan. Dengan demikian, kurva beban-lendutan di daerah ini akan lebih landai dibandingkan dengan fase pra-retak.
3. Pada daerah III disebut sebagai fase retak setelah *serviceability*, tegangan pada tulangan tarik telah mencapai tegangan lelehnya. Grafik beban-lendutan pada zona ini jauh lebih datar dari pada zona sebelumnya. Hal ini disebabkan oleh hilangnya kekuatan penampang akibat adanya retakan yang cukup meluas dan lebar di sepanjang balok. Jika beban terus bertambah, regangan pada tulangan sisi yang mengalami tarikan akan terus meningkat melebihi regangan lelehnya tanpa adanya peningkatan tegangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya telah meleleh dianggap telah mengalami keruntuhan struktural. Balok ini akan terus mengalami defleksi tanpa peningkatan beban, dan retakan semakin meluas, menyebabkan garis netral terus mendekati tepi yang mengalami

tekanan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan yang menyebabkan kehancuran pada beton di daerah momen maksimum dan diikuti oleh kehancuran.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian merupakan suatu cara ilmiah untuk mendapatkan data dengan tujuan dan kegunaan tertentu. Metode penelitian bertujuan untuk merencanakan langkah-langkah kerja suatu penelitian mulai dari perumusan masalah, pengumpulan data, pembuatan benda uji, pengujian benda uji, analisis data, kesimpulan, dan saran. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada balok beton bertulang berdasarkan tipe rasio penulangan, mengetahui perilaku retak yang terjadi pada tiap balok berdasarkan rasio penulangan, dan menganalisis pengaruh rasio tulangan terhadap kegagalan geser dan lentur pada balok beton bertulang. Maka diperlukan sebuah studi eksperimental dengan melakukan percobaan di laboratorium. Bab ini akan menjelaskan proses dan tahapan dalam melakukan studi eksperimental pada penelitian ini.

4.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Agregat halus

Agregat halus pada penelitian ini berasal dari Merapi, Yogyakarta dengan dilakukan analisis saringan agregat halus terlebih dahulu untuk menentukan gradasi agregat.

2. Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini yaitu batu pecah dengan maksimum berdiameter 20 mm dari Merapi, Yogyakarta.

3. Semen *portland*

Semen *portland* pada penelitian ini digunakan sebagai bahan pengikat. Semen yang digunakan pada penelitian ini yaitu semen *portland* tipe I dengan merek gresik dengan berat 40 kg/zak.

4. Air

Air pada penelitian ini menggunakan air yang berasal dari Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Air yang digunakan secara visual bersih dan tidak mengandung benda-benda lain didalamnya.

5. Baja tulangan

Baja tulangan yang digunakan merupakan baja ulir diameter 13 mm, 16 mm, 22 mm, 25 mm sebagai tulangan pokok. Selain itu juga digunakan baja tulangan polos diameter 10 mm sebagai tulangan sengkang.

6. Kawat bendrat

Kawat bendrat digunakan untuk mengikat antara baja tulangan dengan sengkang.

4.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam proses persiapan, pembuatan, dan pengujian adalah sebagai berikut.

1. Saringan agregat

Saringan agregat adalah alat yang digunakan untuk memisahkan agregat (bahan kasar seperti pasir, kerikil, batu pecah, dll.) menjadi berbagai ukuran partikel yang berbeda. Alat ini terdiri dari beberapa lapisan saringan yang memiliki ukuran lubang yang berbeda-beda.

Proses pemisahan pada saringan agregat biasanya dilakukan dengan cara mengayak bahan tersebut melalui lapisan saringan. Partikel-partikel yang lebih kecil akan lolos melalui lubang-lubang pada saringan yang lebih besar, sedangkan partikel-partikel yang lebih besar akan terperangkap di atas lapisan saringan yang lebih halus.

2. Timbangan

Timbangan adalah alat yang digunakan untuk mengukur berat atau massa suatu benda atau substansi. Timbangan memiliki berbagai jenis dan digunakan dalam berbagai macam aplikasi, dari aplikasi kecil seperti mengukur berat bahan penelitian.

3. Oven

Oven merupakan alat yang digunakan untuk mengeringkan sampel beton atau bahan beton lainnya pada suhu dan waktu yang ditentukan sebelum melakukan pengujian fisik dan mekanik pada bahan tersebut. Oven digunakan untuk memastikan bahwa sampel beton dalam kondisi kering dan stabil sebelum pengujian dilakukan, sehingga hasil pengujian dapat lebih akurat dan konsisten. Proses pengeringan sampel beton pada oven dilakukan dengan memanaskan sampel pada suhu tertentu, biasanya antara 60-70°C, selama beberapa jam atau hari tergantung pada ukuran dan jenis sampel beton yang akan diuji. Pengeringan dengan oven bertujuan untuk menghilangkan kelembaban dari sampel beton dan membantu mengurangi pengaruh kelembaban dalam pengujian yang dapat memengaruhi keakuratan hasil.

4. Piknometer

Piknometer adalah alat laboratorium yang digunakan untuk mengukur kerapatan atau densitas suatu cairan atau zat padat. Alat ini berbentuk tabung atau botol yang terbuat dari kaca atau bahan lain yang tahan terhadap bahan yang akan diukur densitasnya. Piknometer juga dilengkapi dengan tutup dan pengukur volume yang biasanya terukir di badan tabung atau botolnya.

5. Sekop

Sekop atau corong beton adalah alat yang digunakan untuk mencampur adukan beton dan memindahkan campuran beton dari tempat pencampuran ke tempat pengecoran. Sekop biasanya terbuat dari logam atau plastik dengan pegangan yang ergonomis untuk memudahkan penggunaannya.

6. *Concrete mixer*

Concrete mixer atau mesin pencampur beton adalah alat yang digunakan untuk mencampur bahan-bahan konstituen beton, yaitu agregat kasar, agregat halus, semen, dan air, menjadi campuran beton yang homogen dan konsisten. Mesin pencampur beton umumnya terdiri dari sebuah drum atau tabung yang berputar di sekitar porosnya, dan memiliki sudut kemiringan yang memungkinkan bahan-bahan konstituen untuk dicampur secara efektif.

Pada saat mesin pencampur beton dinyalakan, drum akan berputar dengan kecepatan yang stabil, dan bahan-bahan konstituen dimasukkan ke dalam drum melalui pintu yang ada di atasnya. Drum akan terus berputar, sehingga bahan-bahan konstituen tercampur secara merata dan terbentuk adukan beton yang konsisten dan homogen. Selama proses pencampuran, air ditambahkan ke dalam campuran secara bertahap untuk memastikan konsistensi yang diinginkan.

7. Kerucut abrams

Kerucut abrams adalah alat ukur yang digunakan untuk menentukan konsistensi beton segar dan kemampuan pemadatan. Alat ini dinamai dari insinyur Amerika Serikat bernama Charles F. Abrams yang mengembangkan metode pengujian konsistensi beton pada tahun 1918.

Kerucut abrams terbuat dari logam atau plastik dengan ukuran dan bentuk yang standar. Kerucut ini memiliki lubang di bagian bawahnya yang berukuran 20 mm x 10 mm dan berfungsi untuk mengalirkan adukan beton selama pengujian. Kerucut ini juga dilengkapi dengan pegangan untuk memudahkan penanganan. Pengujian dengan kerucut abrams dilakukan dengan cara uji *slump* dengan mengisi kerucut dengan adukan beton segar yang telah diambil dari tempat pencampuran. Kemudian, adukan beton tersebut dicetak dengan menempatkan kerucut di atas permukaan datar dan menekannya dengan menggunakan stempel khusus yang disebut dengan "tamping rod" hingga 25 kali. Setelah itu, kerucut diangkat beton untuk mengalir keluar dari lubang pada bagian bawah kerucut diukur dengan alat ukur.

8. Bekisting beton

Bekisting beton adalah sebuah struktur *temporary* yang digunakan untuk membantu membentuk dan mendukung beton selama proses pengecoran. Bekisting ini umumnya terbuat dari bahan kayu, logam, atau plastik dan dirancang sesuai dengan bentuk dan ukuran yang diinginkan dari beton yang akan dicor. Pada penilitan ini digunakan bekisting dalam bentuk silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm dan bekisting untuk cetakan balok beton bertulang ukuran lebar 150 mm, tinggi 200 mm, dan panjang 1400 mm.

9. Tang catut

Tang catut digunakan untuk mengikat kawat bendrat pada baja tulangan longitudinal dan sengkang.

10. Ember

Ember yang digunakan adalah ember cor yang berfungsi untuk mengangkut semen, air, agregat, atau lainnya serta dapat dimanfaatkan untuk menampung material.

11. Tongkat penumbuk

Pada saat beton segar dimasukkan ke dalam kerucut abrams tongkat penumbuk berfungsi untuk memadatkan campuran beton sehingga tidak ada rongga udara.

12. *Compression Testing Machine* (CTM)

Compression Testing Machine (CTM) adalah perangkat yang digunakan untuk menguji kekuatan tekan beton. Mesin ini biasanya digunakan dalam laboratorium atau pengujian material untuk menentukan kualitas beton yang dibuat dan memastikan bahwa beton memenuhi standar yang ditetapkan.

13. *Linier Variable Differential Transformers* (LVDT)

LVDT dipasang pada balok beton saat pengujian untuk mengetahui lendutan yang terjadi.

14. *Frame load*

Pengujian lentur menggunakan alat yang disebut *Bending Test Machine* (BTM).

15. Beban 2 titik

Beban 2 titik dipasang pada BTM digunakan untuk melakukan pembebanan pada benda uji balok.

4.4 Benda Uji

Benda uji pada penelitian ini merupakan balok beton bertulang dengan beberapa variasi berdasarkan rasio tulangan. Benda uji memiliki 3 variasi dengan setiap variasi terdapat 1 benda uji. Selain itu terdapat benda uji silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm digunakan untuk mengetahui nilai kuat tekan beton yang dihasilkan. Pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium berdasarkan SNI 2493-2011. Perincian benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rincian Benda Uji

Jenis pengujian	Bentuk dan ukuran (mm)	Rasio penulangan	Kode	Jumlah sampel
Kuat tekan	Silinder (150×300)	-	BN	3
Kuat lentur	Balok ($150 \times 200 \times 1400$)	<i>Balance reinforced</i>	BRS	1
	Balok ($150 \times 200 \times 1400$)	<i>Over reinforced</i>	BRL	1
	Balok ($150 \times 200 \times 1400$)	<i>Under reinforced</i>	BRK	1

4.5 Pelaksanaan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu tahapan persiapan, pengujian material agregat, perencanaan campuran (*mix design*), pembuatan dan perawatan benda uji *trial*, pengujian benda uji *trial*, perencanaan tulangan benda uji, pembuatan dan perawatan benda uji, pengujian benda uji, olah data, analisis data dan pembahasan, dan pelaporan.

4.5.1 Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian merupakan tahapan awal sebelum melakukan penelitian dilaksanakan seperti studi literatur, penyiapan bahan dan peralatan yang digunakan selama penelitian.

4.5.2 Pengujian Agregat

Pengujian agregat merupakan tahapan terhadap agregat halus dan agregat kasar yang memiliki tujuan untuk mengetahui dan menentukan karakteristik agregat yang akan digunakan pada penelitian ini dalam pembuatan beton. Karakteristik agregat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan campuran beton. Adapun pengujian yang akan dilakukan sebagai berikut.

1. Uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar berdasarkan SNI 1969-2016.
2. Uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus berdasarkan SNI 1970-2016.
3. Uji analisa saringan agregat halus dan kasar berdasarkan SNI ASTM-C136-2012.
4. Uji berat volume gembur dan berat volume padat agregat halus dan kasar berdasarkan SNI 4804-1998.

5. Uji butiran lolos ayakan No. 200 (uji kandungan lumpur dalam pasir) berdasarkan SNI 4142-1996.

4.5.3 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Perencanaan campuran beton dilaksanakan berdasarkan hasil dari pengujian agregat. Perencanaan campuran beton pada penelitian ini dilakukan berdasarkan tata cara perencanaan campuran beton pada SNI 2834-2000.

4.5.4 Pembuatan Benda Uji *Trial*

Setelah melakukan perencanaan campuran beton, dilakukan pembuatan benda uji *trial*. Pembuatan Benda uji *trial* bertujuan untuk menyesuaikan mutu beton pada perencanaan dan hasilnya.

Tahapan dalam pembuatan benda uji *trial* adalah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan bahan penyusun seperti agregat kasar, agregat halus, air, dan semen sesuai dengan kebutuhan yang telah dihitung sesuai SNI 03-2834-2000.
2. Mempersiapkan peralatan untuk menakar seperti timbangan dan ember.
3. Melakukan penimbangan bahan penyusun beton sesuai *mix design* yang telah dibuat.
4. Cetakan silinder disiapkan dan diolesi dengan oli seluruh permukaannya.
5. Memasukkan agregat kasar dan halus dalam keadaan SSD pada *mixer* beton lalu dinyalakan diaduk hingga merata.
6. Semen dimasukkan ke *mixer* beton dan diaduk hingga merata.
7. Menuangkan air perlahan dengan tujuan untuk mengontrol ke enceran campuran beton segar.
8. Melakukan uji *slump*.
9. Jika uji *slump* beton telah memenuhi syarat, campuran beton segar ke dalam cetakan silinder dengan memasukkan 1/3 bagian dari silinder dan ditumbuk secara merata sebanyak 25 kali dan dipukul menggunakan palu karet hingga beton merata tanpa adanya rongga udara, proses tersebut diulangi hingga beton segar memenuhi silinder.
10. Permukaan benda uji diratakan menggunakan sekop.
11. Setelah 24 jam beton dibuka dari cetakan dan dilakukan proses *curing*.

4.5.5 Perencanaan Tulangan Benda Uji

Perencanaan tulangan pada benda uji balok beton bertulang didasari pada setiap kondisi *balance reinforced*, *under reinforced*, dan *over reinforced*. Perencanaan diawali dengan mengetahui dan menghitung parameter awal yang digunakan dan perhitungan pada setiap kondisi.

Parameter awal pada perencanaan tulangan benda uji balok yaitu sebagai berikut.

Kuat tekan beton	(f_c')	= 25 MPa
Kuat leleh baja	(f_y)	= 420 MPa
Lebar balok	(b)	= 150 mm
Tinggi balok	(h)	= 200 mm
Selimut beton	(c_c)	= 25 mm
Diameter agregat maksimum	(d_{agg})	= 20 mm
Jarak spasi tulangan vertikal	(x_v)	= 25 mm
Modulus elastisitas baja	(E_s)	= 200.000 MPa
Regangan leleh baja	(ϵ_{ty})	$= \frac{f_y}{E_s}$ $= \frac{420}{200.000}$ $= 0,0021$
Nilai faktor bentuk tegangan	(β_1)	$= f_c' < 28 \text{ MPa}$ $= 25 < 28 \text{ MPa}$ $= 0,85$

Perhitungan perencanaan tulangan pada setiap kondisi yaitu sebagai berikut.

1. Kondisi *balance reinforced*

a. Menghitung luasan tulangan tarik

Diameter tulangan tarik	(d_b)	= 22 mm
Luasan tulangan tarik	(A_{s1db})	$= \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2$ $= \frac{1}{4} \times \pi \times 22^2$ $= 380,133 \text{ mm}^2$

b. Menghitung luasan tulangan tekan

$$\text{Diameter tulangan tekan } (d_b') = 13 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Luasan tulangan tekan } (A_{s1db'}) &= \frac{1}{4} \times \pi \times d_b'^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 13^2 \\ &= 132,732 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

c. Menghitung tinggi efektif balok

$$\begin{aligned} \text{Jarak dari serat tarik ke pusat tulangan tarik } (d_s) &= c_c + d_t + \frac{1}{2} d_b \\ &= 25 + 10 + \frac{1}{2} 22 \\ &= 46 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi efektif balok } (d) &= h - d_s \\ &= 200 - 46 \\ &= 154 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Menentukan jumlah tulangan berdasarkan kondisi *balance reinforced*

$$\begin{aligned} \text{Rasio seimbang } (\rho_b) &= 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \\ &= 0,85 \times 0,85 \times \frac{25}{420} \times \left(\frac{600}{600 + 420} \right) \\ &= 0,02529762 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas tulangan perlu } (A_{s \text{ perlu}}) &= \rho_b \times b \times d \\ &= 0,02529762 \times 150 \times 154 \\ &= 584,375 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah tulangan perlu } (n_{\text{perlu}}) &= \frac{A_{s \text{ perlu}}}{A_{s1db}} \\ &= \frac{584,375}{380,133} \\ &= 1,537 \text{ buah} \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah tulangan pakai } (n_{\text{pakai}}) = 2 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas tulangan pakai } (A_s) &= n_{\text{pakai}} \times A_{s1db} \\ &= 2 \times 380,133 \\ &= 760,265 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

e. Cek regangan tulangan

$$\text{Jumlah tulangan tekan } (n_{\text{tekan}}) = 2 \text{ buah}$$

$$\text{Luas tulangan tekan } (A_s') = n_{\text{tekan}} \times A_{s1db'}$$

$$\begin{aligned}
&= 2 \times 132,732 \\
&= 265,465 \text{ mm}^2 \\
\text{Jarak titik berat tulangan (d')} &= c_c + d_t + \frac{1}{2} d_b' \\
&= 25 + 10 + \frac{1}{2} 13 \\
&= 41,5 \text{ mm} \\
\text{Persamaan 1} \quad (K_1) &= 0,85 \times f_c' \times \beta_1 \times b \\
&= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150 \\
&= 2709,375 \\
\text{Persamaan 2} \quad (K_2) &= A_s' \times (600 - 0,85 \times f_c') - A_s \times f_y \\
&= 265,465 \times (600 - 0,85 \times 25) - \\
&\quad 760,265 \times 420 \\
&= -165673,852 \\
\text{Persamaan 3} \quad (K_3) &= -600 \times A_s' \times d' \\
&= -600 \times 265,465 \times 41,5 \\
&= -6610068,02 \\
\text{Tinggi garis netral 1} \quad (c_1) &= \frac{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1} \\
&= \frac{-(-165673,852) + \sqrt{(-165673,852)^2 - 4(2709,375)(-6610068,02)}}{2(2709,375)} \\
&= 88,664 \text{ mm} \\
\text{Tinggi garis netral 2} \quad (c_2) &= \frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1} \\
&= \frac{-(-165673,852) - \sqrt{(-165673,852)^2 - 4(2709,375)(-6610068,02)}}{2(2709,375)} \\
&= -27,516 \text{ mm} \\
\text{Tinggi garis netral pakai} \quad (c) &= 88,664 \text{ mm} \\
\text{Tinggi blok tekan} \quad (a) &= \beta_1 \times c \\
&= 0,85 \times 88,664 \\
&= 75,365 \text{ mm}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Regangan tulangan tarik } (\varepsilon_t) &= \frac{d-c}{c} \times 0,003 \\
 &= \frac{154-88,664}{88,664} \times 0,003 \\
 &= 0,0022
 \end{aligned}$$

Syarat untuk kondisi *balance reinforced* yaitu $\varepsilon_t = \varepsilon_{ty}$, di mana nilai ε_{ty} sebesar 0,0021 dan nilai ε_t sebesar 0,0022. Hasil dari perhitungan regangan tulangan tarik apabila dibandingkan dengan regangan leleh hanya selisih sebesar 0,0001, sehingga dapat dianggap memenuhi syarat.

f. Menghitung tegangan tulangan tekan

$$\begin{aligned}
 \text{Tegangan tulangan tekan } (f_s') &= 600 \times \frac{c-d'}{c} \\
 &= 600 \times \frac{88,664-41,5}{88,664} \\
 &= 319,166 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

g. Menghitung kekuatan tekan beton

$$\begin{aligned}
 \text{Kekuatan tekan beton } (C_c) &= 0,85 \times f_c' \times \beta_1 \times c \times b \\
 &= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 88,664 \times 150 \\
 &= 240225,329 \text{ N}
 \end{aligned}$$

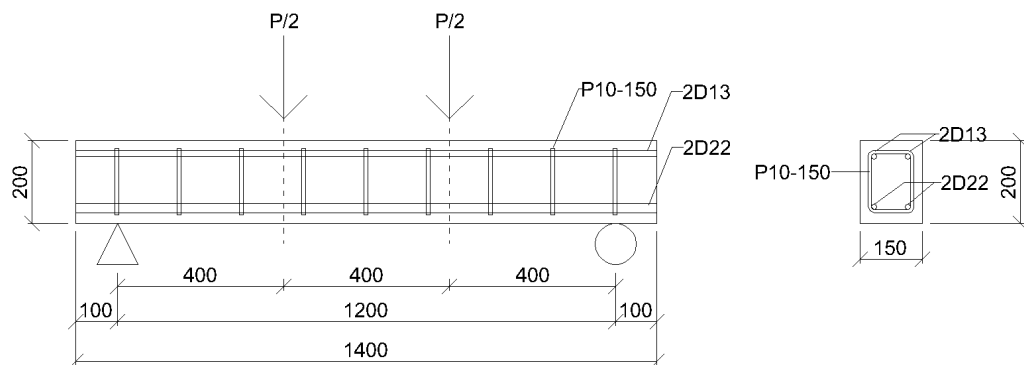
h. Menghitung kekuatan tulangan tekan

$$\begin{aligned}
 \text{Kekuatan tulangan tekan } (C_s) &= (A_s' \times 600) \times \left(\frac{c-d'}{c}\right) - (A_s' \times 0,85 \times \beta_1) \\
 &= (265,465 \times 600) \times \left(\frac{88,664-41,5}{88,664}\right) - \\
 &\quad (265,465 \times 0,85 \times 0,85) \\
 &= 79086,148 \text{ N}
 \end{aligned}$$

i. Menghitung momen *ultimate*

$$\begin{aligned}
 \text{Momen } ultimate \quad (M_u) &= C_c \left(d - \frac{a}{2}\right) + C_s(d - d') \\
 &= 240225,329 \left(154 - \frac{75,365}{2}\right) + \\
 &\quad 79086,148(154 - 41,5) \\
 &= 36839624,3 \text{ Nmm} \\
 &= 36,840 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Kesimpulan dari perhitungan di atas, balok beton bertulang dengan kondisi *balance reinforced* digunakan tulangan tekan sebanyak 2 buah dengan diameter 13 mm (2D13) dan tulangan tarik sebanyak 2 buah dengan diameter 22 mm (2D22). Berikut merupakan sketsa penulangan balok dengan kondisi *balance reinforced* yang dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Sketsa Penulangan Balok Kondisi *Balance Reinforced* (BRS)

2. Kondisi *under reinforced*

a. Menghitung luasan tulangan tarik

$$\begin{aligned}\text{Diameter tulangan tarik } (d_b) &= 16 \text{ mm} \\ \text{Luasan tulangan tarik } (A_{s1db}) &= \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 16^2 \\ &= 201,062 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

b. Menghitung luasan tulangan tekan

$$\begin{aligned}\text{Diameter tulangan tekan } (d_b') &= 13 \text{ mm} \\ \text{Luasan tulangan tekan } (A_{s1db'}) &= \frac{1}{4} \times \pi \times d_b'^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 13^2 \\ &= 132,732 \text{ mm}^2\end{aligned}$$

c. Menghitung tinggi efektif balok

$$\begin{aligned}\text{Jarak dari serat tarik ke pusat tulangan tarik } (d_s) &= c_c + d_t + \frac{1}{2} d_b \\ &= 25 + 10 + \frac{1}{2} 16 \\ &= 43 \text{ mm} \\ \text{Tinggi efektif balok } (d) &= h - d_s \\ &= 200 - 43\end{aligned}$$

$$= 157 \text{ mm}$$

d. Menentukan jumlah tulangan berdasarkan kondisi *under reinforced*

$$\begin{aligned} \text{Rasio seimbang } (\rho_b) &= 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \\ &= 0,85 \times 0,85 \times \frac{25}{420} \times \left(\frac{600}{600 + 420} \right) \\ &= 0,02529762 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rasio tulangan kurang } (\rho_{\text{under}}) &= \left(\frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{ty}}{0,008} \right) \times \rho_b \\ &= \left(\frac{0,003 + 0,0021}{0,008} \right) \times 0,02529762 \\ &= 0,01612723 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas tulangan perlu } (A_s \text{ perlu}) &= \rho_{\text{under}} \times b \times d \\ &= 0,01612723 \times 150 \times 157 \\ &= 379,796 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah tulangan perlu } (n_{\text{perlu}}) &= \frac{A_s \text{ perlu}}{A_{s1db}} \\ &= \frac{379,796}{201,162} \\ &= 1,889 \text{ buah} \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah tulangan pakai } (n_{\text{pakai}}) = 2 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas tulangan pakai } (A_s) &= n_{\text{pakai}} \times A_{s1db} \\ &= 2 \times 201,162 \\ &= 402,124 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

e. Cek regangan tulangan

$$\text{Jumlah tulangan tekan } (n_{\text{tekan}}) = 2 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas tulangan tekan } (A_s') &= n_{\text{tekan}} \times A_{s1db}' \\ &= 2 \times 132,732 \\ &= 265,465 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak titik berat tulangan } (d') &= c_c + d_t + \frac{1}{2} d_b' \\ &= 25 + 10 + \frac{1}{2} 13 \\ &= 41,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Persamaan 1 } (K_1) &= 0,85 \times f_c' \times \beta_1 \times b \\ &= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 2709,375 \\
\text{Persamaan 2} \quad (K_2) &= A_s' \times (600 - 0,85 \times f_c') - A_s \times f_y \\
&= 265,465 \times (600 - 0,85 \times 25) - \\
&\quad 402,124 \times 420 \\
&= -15254,396 \\
\text{Persamaan 3} \quad (K_3) &= -600 \times A_s' \times d' \\
&= -600 \times 265,465 \times 41,5 \\
&= -6610068,02 \\
\text{Tinggi garis netral 1} \quad (c_1) &= \frac{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1} \\
&= \frac{-(-15254,396) + \sqrt{(-15254,396)^2 - 4(2709,375)(-6610068,02)}}{2(2709,375)} \\
&= 52,289 \text{ mm} \\
\text{Tinggi garis netral 2} \quad (c_2) &= \frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1} \\
&= \frac{-(-15254,396) - \sqrt{(-15254,396)^2 - 4(2709,375)(-6610068,02)}}{2(2709,375)} \\
&= -46,658 \text{ mm} \\
\text{Tinggi garis netral pakai} \quad (c) &= 52,289 \text{ mm} \\
\text{Tinggi blok tekan} \quad (a) &= \beta_1 \times c \\
&= 0,85 \times 52,289 \\
&= 44,445 \text{ mm} \\
\text{Regangan tulangan tarik} \quad (\varepsilon_t) &= \frac{d-c}{c} \times 0,003 \\
&= \frac{157-52,289}{52,289} \times 0,003 \\
&= 0,006
\end{aligned}$$

Syarat untuk kondisi *under reinforced* yaitu $\varepsilon_t \geq 0,005$, di mana nilai ε_t sebesar $0,006 > 0,005$. Hasil dari perhitungan regangan tulangan tarik telah memenuhi syarat.

f. Menghitung tegangan tulangan tekan

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tulangan tekan } (f_s') &= 600 \times \frac{c-d'}{c} \\ &= 600 \times \frac{52,289-41,5}{52,289} \\ &= 123,797 \text{ MPa}\end{aligned}$$

g. Menghitung kekuatan tekan beton

$$\begin{aligned}\text{Kekuatan tekan beton } (C_c) &= 0,85 \times f_c' \times \beta_1 \times c \times b \\ &= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 52,289 \times 150 \\ &= 141669,457 \text{ N}\end{aligned}$$

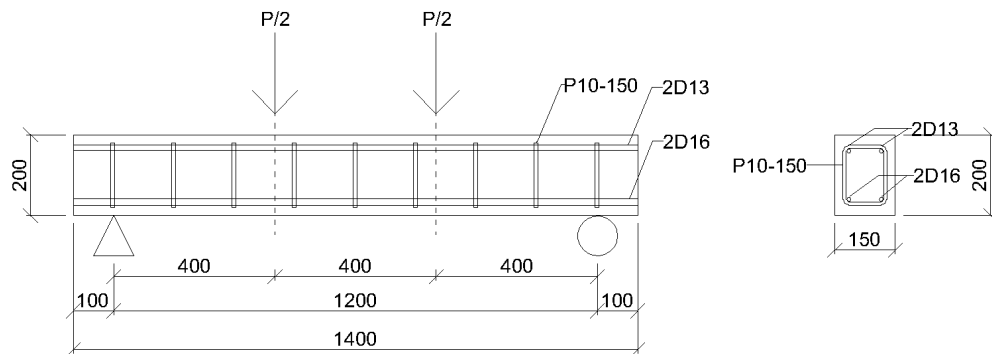
h. Menghitung kekuatan tulangan tekan

$$\begin{aligned}\text{Kekuatan tulangan tekan } (C_s) &= (A_s' \times 600) \times \left(\frac{c-d'}{c}\right) - (A_s' \times 0,85 \times \beta_1) \\ &= (265,465 \times 600) \times \left(\frac{52,289-41,5}{52,289}\right) - \\ &\quad (265,465 \times 0,85 \times 0,85) \\ &= 27222,564 \text{ N}\end{aligned}$$

i. Menghitung momen *ultimate*

$$\begin{aligned}\text{Momen } ultimate \quad (M_u) &= C_c \left(d - \frac{a}{2}\right) + C_s(d - d') \\ &= 141669,457 \left(157 - \frac{44,445}{2}\right) + \\ &\quad 27222,564(157 - 41,5) \\ &= 22238038,7 \text{ Nmm} \\ &= 22,238 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Kesimpulan dari perhitungan di atas, balok beton bertulang dengan kondisi *under reinforced* digunakan tulangan tekan sebanyak 2 buah dengan diameter 13 mm (2D13) dan tulangan tarik sebanyak 2 buah dengan diameter 16 mm (2D16). Berikut merupakan sketsa penulangan balok dengan kondisi *under reinforced* yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Sketsa Penulangan Balok Kondisi *Under Reinforced* (BRK)

3. Kondisi *over reinforced*

a. Menghitung luasan tulangan tarik

$$\text{Diameter tulangan tarik } (d_b) = 25 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Luasan tulangan tarik } (A_{s1db}) &= \frac{1}{4} \times \pi \times d_b^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 25^2 \\ &= 490,874 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

b. Menghitung luasan tulangan tekan

$$\text{Diameter tulangan tekan } (d_b') = 13 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{Luasan tulangan tekan } (A_{s1db'}) &= \frac{1}{4} \times \pi \times d_b'^2 \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 13^2 \\ &= 132,732 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

c. Menghitung tinggi efektif balok

$$\begin{aligned} \text{Jarak dari serat tarik ke pusat tulangan tarik } (d_s) &= c_c + d_t + \frac{1}{2} d_b \\ &= 25 + 10 + \frac{1}{2} 25 \\ &= 47,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi efektif balok } (d) &= h - d_s \\ &= 200 - 47,5 \\ &= 152,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

d. Menentukan jumlah tulangan berdasarkan kondisi *over reinforced*

$$\begin{aligned} \text{Rasio seimbang } (\rho_b) &= 0,85 \times \beta_1 \times \frac{f_c'}{f_y} \times \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \\ &= 0,85 \times 0,85 \times \frac{25}{420} \times \left(\frac{600}{600 + 420} \right) \\ &= 0,02529762 \end{aligned}$$

Rasio tulangan lebih	(ρ_{over})	$= \left(\frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{ty}}{0,005} \right) \times \rho_b$ $= \left(\frac{0,003 + 0,002}{0,005} \right) \times 0,02529762$ $= 0,02580357$
Luas tulangan perlu	$(A_s \text{ perlu})$	$= \rho_{over} \times b \times d$ $= 0,02580357 \times 150 \times 152,5$ $= 590,257 \text{ mm}^2$
Jumlah tulangan perlu	(n_{perlu})	$= \frac{A_s \text{ perlu}}{A_{s1db}}$ $= \frac{590,257}{490,874}$ $= 1,202 \text{ buah}$
Jumlah tulangan pakai	(n_{pakai})	$= 2 \text{ buah}$
Luas tulangan pakai	(A_s)	$= n_{pakai} \times A_{s1db}$ $= 2 \times 490,874$ $= 981,748 \text{ mm}^2$
e. Cek regangan tulangan		
Jumlah tulangan tekan	(n_{tekan})	$= 2 \text{ buah}$
Luas tulangan tekan	(A_s')	$= n_{tekan} \times A_{s1db'}$ $= 2 \times 132,732$ $= 265,465 \text{ mm}^2$
Jarak titik berat tulangan (d')		$= c_c + d_t + \frac{1}{2} d_b'$ $= 25 + 10 + \frac{1}{2} 13$ $= 41,5 \text{ mm}$
Persamaan 1	(K_1)	$= 0,85 \times f_c' \times \beta_1 \times b$ $= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 150$ $= 2709,375$
Persamaan 2	(K_2)	$= A_s' \times (600 - 0,85 \times f_c') - A_s \times f_y$ $= 265,465 \times (600 - 0,85 \times 25) -$ $981,748 \times 420$ $= -258696,411$
Persamaan 3	(K_3)	$= -600 \times A_s' \times d'$

$$= -600 \times 265,465 \times 41,5$$

$$= -6610068,02$$

Tinggi garis netral 1 (c₁)

$$= \frac{-K_2 + \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1}$$

$$= \frac{-(-258696,411) + \sqrt{(-258696,411)^2 - 4(2709,375)(-6610068,02)}}{2(2709,375)}$$

$$= 116,435 \text{ mm}$$

Tinggi garis netral 2 (c₂)

$$= \frac{-K_2 - \sqrt{K_2^2 - 4K_1K_3}}{2K_1}$$

$$= \frac{-(-258696,411) - \sqrt{(-258696,411)^2 - 4(2709,375)(-6610068,02)}}{2(2709,375)}$$

$$= -20,953 \text{ mm}$$

Tinggi garis netral pakai (c) = 116,435 mm

Tinggi blok tekan (a) = $\beta_1 \times c$

$$= 0,85 \times 116,435$$

$$= 98,970 \text{ mm}$$

Regangan tulangan tarik (ϵ_t) = $\frac{d-c}{c} \times 0,003$

$$= \frac{152,5 - 116,435}{116,435} \times 0,003$$

$$= 0,00093$$

Syarat untuk kondisi *over reinforced* yaitu $\epsilon_t \leq \epsilon_{ty}$, di mana nilai ϵ_t sebesar $0,00093 < 0,0021$. Hasil dari perhitungan regangan tulangan tarik telah memenuhi syarat.

f. Menghitung tegangan tulangan tekan

Tegangan tulangan tekan (f_s') = $600 \times \frac{c-d'}{c}$

$$= 600 \times \frac{116,435 - 41,5}{116,435}$$

$$= 386,147 \text{ MPa}$$

g. Menghitung kekuatan tekan beton

$$\begin{aligned}\text{Kekuatan tekan beton } (C_c) &= 0,85 \times f_c' \times \beta_1 \times c \times b \\ &= 0,85 \times 25 \times 0,85 \times 116,435 \times 150 \\ &= 315466,746 \text{ N}\end{aligned}$$

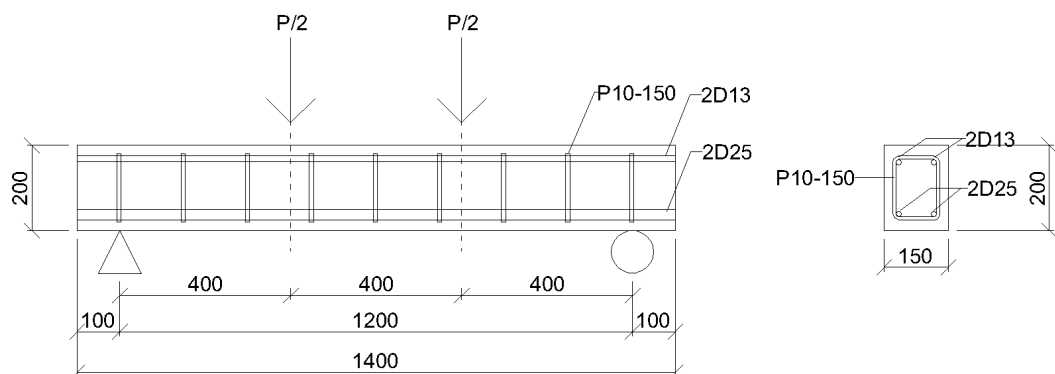
h. Menghitung kekuatan tulangan tekan

$$\begin{aligned}\text{Kekuatan tulangan tekan } (C_s) &= (A_s' \times 600) \times \left(\frac{c-d'}{c}\right) - (A_s' \times 0,85 \times \beta_1) \\ &= (265,465 \times 600) \times \left(\frac{116,435-41,5}{116,435}\right) - \\ &\quad (265,465 \times 0,85 \times 0,85) \\ &= 96867,290 \text{ N}\end{aligned}$$

i. Menghitung momen *ultimate*

$$\begin{aligned}\text{Momen } ultimate \quad (M_u) &= C_c \left(d - \frac{a}{2}\right) + C_s(d - d') \\ &= 315466,746 \left(152,5 - \frac{116,44}{2}\right) + \\ &\quad 96867,290(152,5 - 41,5) \\ &= 43250082,4 \text{ Nmm} \\ &= 43,250 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Kesimpulan dari perhitungan di atas, balok beton bertulang dengan kondisi *over reinforced* digunakan tulangan tekan sebanyak 2 buah dengan diameter 13 mm (2D13) dan tulangan tarik sebanyak 2 buah dengan diameter 25 mm (2D25). Berikut merupakan sketsa penulangan balok dengan kondisi *over reinforced* yang dapat dilihat pada Gambar 4.3.

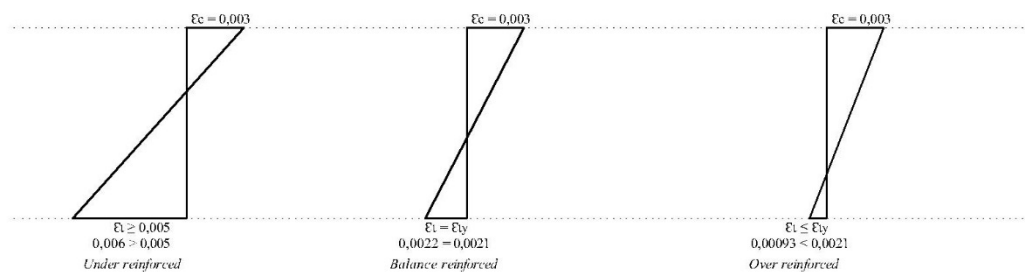


Gambar 4.3 Sketsa Penulangan Balok Kondisi *Over Reinforced* (BRL)

Berikut merupakan rekapitulasi penulangan balok beton, regangan beton, dan regangan tulangan balok beton bertulang pada kondisi *under reinforced*, *balance reinforced*, dan *over reinforced* yang dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.4.

Tabel 4.2 Rekapitulasi Penulangan Balok Beton Bertulang

Rasio penulangan	Tulangan atas	Tulangan bawah	Tulangan sengkang
<i>Balance reinforced</i>	2D13	2D22	P10-150
<i>Over reinforced</i>	2D13	2D16	P10-150
<i>Under reinforced</i>	2D13	2D25	P10-150



Gambar 4.4 Rekapitulasi Regangan Balok Beton Bertulang

4.5.6 Pembuatan Benda Uji

Setelah melakukan perencanaan tulangan benda uji balok beton bertulang, dilakukan pembuatan benda uji dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan bekisting balok dengan ukuran lebar 150 mm, tinggi 200 mm, dan panjang 1400 mm yang telah diolesi oli seluruh permukaannya.
2. Membuat tahu beton untuk selimut beton dibuat dengan ukuran tebal 25 mm menggunakan mortar.
3. Merakit tulangan baja sesuai dengan rencana penulangan.
4. Pemasangan tulangan yang telah dirakit ke dalam bekisting dan menggunakan tahu beton sebagai cetakan selimut beton.
5. Mempersiapkan bahan penyusun beton seperti agregat kasar, agregat halus, air dan semen sesuai kebutuhan yang telah dihitung kebutuhan bahan *mix design* berdasarkan SNI 03-2834-2000.
6. Melakukan penimbangan bahan penyusun sesuai dengan berat yang telah direncanakan dan ditakar ke dalam ember untuk memudahkan pencampuran.

7. Menyiapkan *mixer* beton kemudian menghidupkannya.
8. Menyiapkan tempat untuk menuangkan beton segar.
9. Memasukkan agregat kasar dan halus yang telah dalam keadaan bersih dan SSD ke dalam *mixer* beton dan diaduk hingga merata.
10. Semen dimasukkan ke dalam *mixer* beton dan diaduk hingga merata.
11. Air dituangkan secara perlahan dengan maksud untuk mengontrol ke enceran campuran beton segar.
12. Melakukan uji *slump*.
13. Jika pada uji *slump* telah memenuhi syarat, campuran beton segar dimasukkan ke dalam bekisting balok dengan cara memasukkan $\frac{1}{3}$ dari bagian balok ditumbuk dengan tongkat penumbuk secara merata sebanyak 25 kali dan dipukul dengan palu karet hingga beton merata tanpa terdapat rongga udara, proses tersebut diulangi hingga bekisting balok penuh.

4.5.7 Perawatan Benda Uji

Perawatan sampel berdasarkan SNI-2493-2011 Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium. Benda uji silinder, setelah 24 jam dicetak, bekisting dilepas lalu diberi kode yang kemudian dilakukan perawatan dengan cara dimasukkan kolam perendaman selama 7 hari. Untuk benda uji balok bertulang, bekisting dilepas setelah 7 hari balok dicetak, kemudian perawatan dilakukan dengan cara menutup balok beton dengan karung goni yang dibasahi setiap hari selama 28 hari.

4.5.8 Pengujian Benda Uji

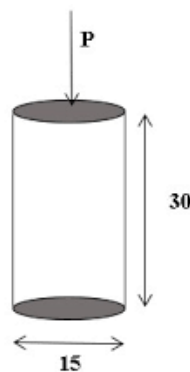
Benda uji diukur dimensinya dan ditimbang sebelum dilakukan pengujian. Setelah itu benda uji silinder akan diuji tekan pada umur 7 hari, sedangkan benda uji balok akan diuji lentur menggunakan 2 titik pembebanan pada umur 28 hari. Untuk mengetahui nilai kuat tekan maka benda uji silinder dilakukan pengujian kuat tekan beton.

1. Kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan berdasarkan SNI 1974-2011. Tahapan pengujian tersebut adalah sebagai berikut.

- a. Mengangkat benda uji dari bak perendaman kemudian dibiarkan selama kurang lebih 24 jam.
- b. Mengukur dimensi benda uji.
- c. Menimbang berat benda uji.
- d. Melakukan *capping* pada benda uji.
- e. Meletakkan benda uji pada mesin pengujian.
- f. Menjalankan mesin pengujian tekan.
- g. Melakukan pembebanan hingga benda uji hancur dan mencatat beban maksimum yang diterima benda uji.

Berikut merupakan sketsa pengujian kuat tekan benda uji silinder yang dapat dilihat pada Gambar 4.5.



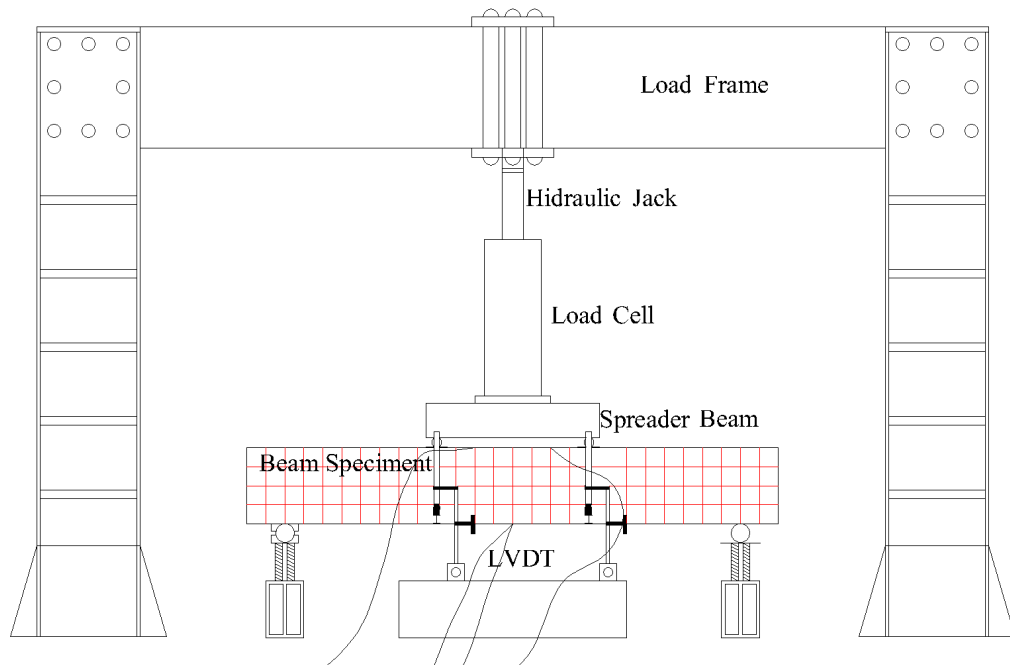
Gambar 4.5 Sketsa Pengujian Kuat Tekan Beton

2. Kuat lentur beton

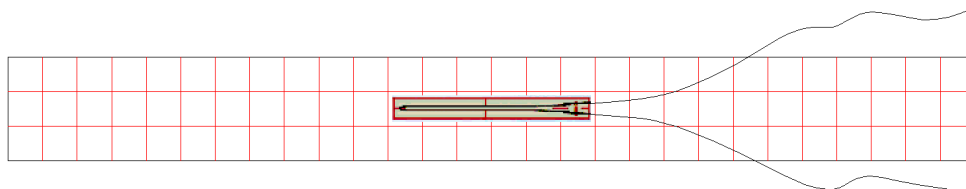
Langkah-langkah dalam pengujian kuat lentur beton yang menggunakan benda uji balok beton bertulang berdasarkan SNI 4431-2011 adalah sebagai berikut.

- a. Mempersiapkan peralatan dan benda uji balok.
- b. Menentukan letak tumpuan benda uji yaitu 10 mm dari kiri dan kanan balok.
- c. Benda uji ditaruh pada tumpuan alat pengujian.
- d. Mempersiapkan dan memasang *strain gauge* pada beton dan baja tulangan.
- e. Mesin uji lentur beton dijalankan dengan beban ditambahkan secara konstan.
- f. Pembebanan dilakukan hingga benda uji hancur dan catat angka maksimum yang dapat ditahan benda uji selama pengujian.

Berikut merupakan sketsa pengujian kuat lentur benda uji balok beton bertulang yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan Gambar 4.7.



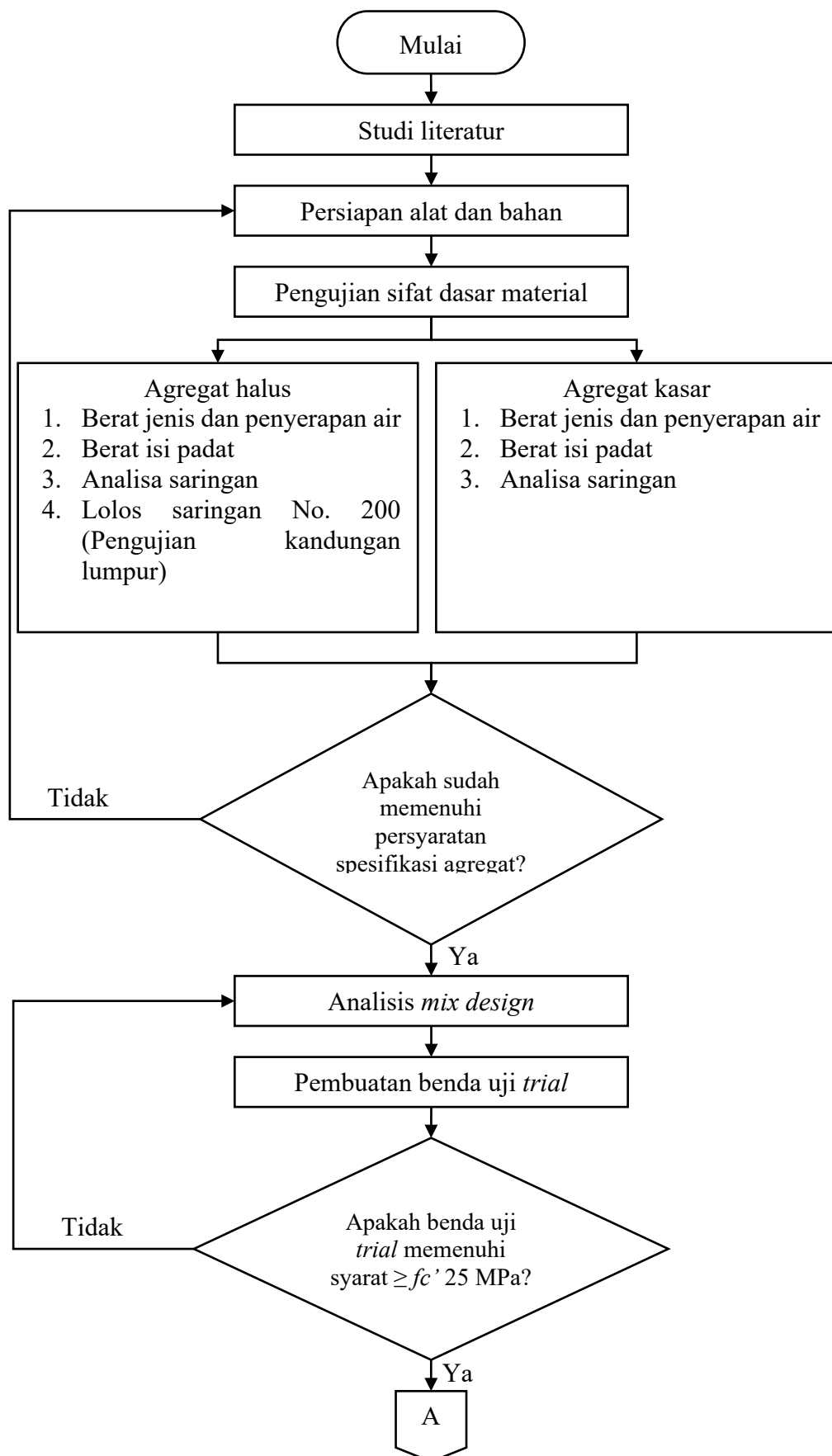
Gambar 4.6 Sketsa Pengujian Kuat Lentur Balok Beton Bertulang

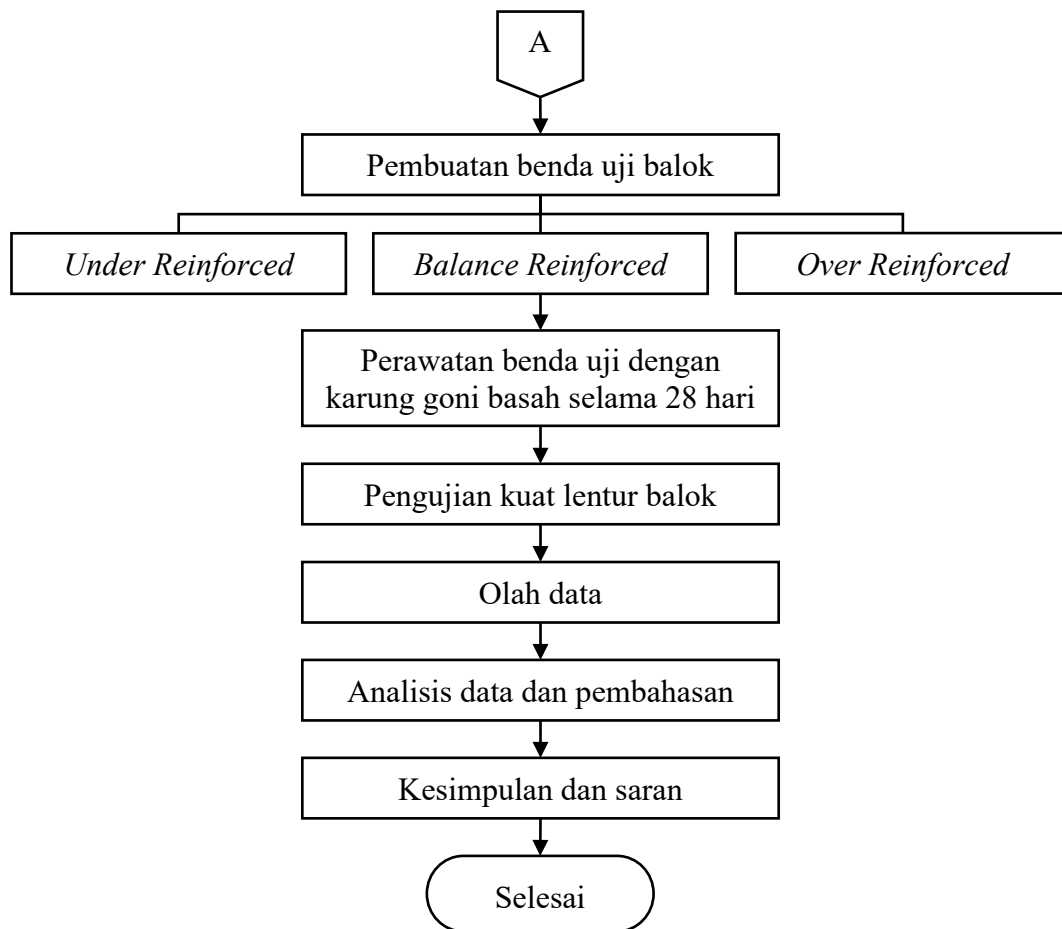


Gambar 4.7 Tampak Atas Balok Beton Bertulang

4.6 Bagan Alir Penelitian

Suatu penelitian ilmiah dilaksanakan dalam sistematika yang jelas dan teratur, sehingga diperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan. Dari uraian di atas dapat dibuat bagan alir (*flowchart*). Berikut adalah bagan alir pelaksanaan penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 4.8.





Gambar 4.8 Diagram Alir Penelitian

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Tinjauan Umum

Pembahasan dalam suatu penelitian memiliki peran krusial dalam mengungkapkan hasil, analisis, dan tujuan penelitian. Pada bagian ini, akan dijelaskan hasil dari seluruh rangkaian penelitian, mulai dari pengujian material penyusun beton hingga pengujian benda uji yang telah dilaksanakan. Data hasil penelitian akan disajikan melalui pengolahan, analisis, dan grafik, yang kemudian menjadi dasar pembahasan terhadap tujuan penelitian. Dengan demikian, bagian ini menjadi sarana untuk menguraikan temuan dan kontribusi penelitian terhadap bidang yang diteliti.

5.2 Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton

Hasil pengujian material penyusun beton berfungsi sebagai dasar untuk melanjutkan tahapan penelitian berikutnya. Pengujian ini mencakup berbagai parameter, seperti modulus halus butir, berat jenis, penyerapan air, berat isi gembur, isi padat, dan kandungan lumpur pada material penyusun beton. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk memastikan bahwa material tersebut memenuhi standar yang ditetapkan dalam perencanaan penelitian, sehingga hasil yang diperoleh sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Dengan memastikan kualitas material penyusun beton, penelitian dapat dilanjutkan dengan keyakinan bahwa parameter-parameter tersebut telah memenuhi persyaratan dan standar yang diperlukan untuk mencapai hasil yang diinginkan.

5.2.1 Agregat Halus

Pengujian terhadap agregat halus mencakup beberapa parameter, di antaranya analisa saringan, berat jenis dan penyerapan air, berat volume padat dan gembur, serta pengujian kadar lumpur agregat halus melalui saringan no. 200. Berikut ini disajikan hasil dari pengujian-pengujian tersebut.

1. Analisa saringan

Pengujian analisis saringan agregat halus ini dilakukan sesuai dengan standar yang berlaku di Indonesia, dengan mengacu pada SNI 1968-1990. Proses pengujian melibatkan penggunaan benda uji agregat halus dengan berat 5000 gram, di mana berat tertinggal pada setiap saringan diukur. Saringan yang digunakan dalam pengujian ini meliputi ukuran 9,5 mm (3/8”), 4,75 mm (saringan no. 4), 2,36 mm (saringan no. 8), 1,18 mm (saringan no. 16), 0,600 mm (saringan no. 30), 0,300 mm (saringan no. 50), 0,150 mm (saringan no. 100), dan pan saringan. Berikut ini disajikan data hasil pengujian analisis saringan agregat halus.

a. Berat tertinggal

$$\text{Persentase berat tertinggal} = \frac{\text{berat tertinggal (gr)}}{\Sigma \text{berat tertinggal}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 4,75 mm} &= \frac{27}{5000} \times 100\% \\ &= 0,54\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 2,36 mm} &= \frac{718}{5000} \times 100\% \\ &= 14,36\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 1,18 mm} &= \frac{1003}{5000} \times 100\% \\ &= 20,06\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 0,60 mm} &= \frac{1399}{5000} \times 100\% \\ &= 27,98\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 0,30 mm} &= \frac{1297}{5000} \times 100\% \\ &= 25,94\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 0,15 mm} &= \frac{446}{5000} \times 100\% \\ &= 8,92\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pan} &= \frac{110}{5000} \times 100\% \\ &= 2,20\% \end{aligned}$$

b. Berat tertinggal kumulatif

$$\begin{aligned}
 \text{Saringan ukuran 4,75 mm} &= 0,00\% + 0,54\% \\
 &= 0,54\% \\
 \text{Saringan ukuran 2,36 mm} &= 0,54\% + 14,36\% \\
 &= 14,90\% \\
 \text{Saringan ukuran 1,18 mm} &= 14,90\% + 20,06\% \\
 &= 34,96\% \\
 \text{Saringan ukuran 0,60 mm} &= 34,96\% + 27,98\% \\
 &= 62,94\% \\
 \text{Saringan ukuran 0,30 mm} &= 62,94\% + 25,94\% \\
 &= 88,88\% \\
 \text{Saringan ukuran 0,15 mm} &= 88,88\% + 8,92\% \\
 &= 97,80\% \\
 \text{Pan} &= 97,80\% + 2,20\% \\
 &= 100\%
 \end{aligned}$$

c. Persen lolos kumulatif

$$\begin{aligned}
 \text{Saringan ukuran 4,75 mm} &= 100\% - 0,54\% \\
 &= 99,46\% \\
 \text{Saringan ukuran 2,36 mm} &= 100\% - 14,90\% \\
 &= 85,10\% \\
 \text{Saringan ukuran 1,18 mm} &= 100\% - 34,96\% \\
 &= 65,04\% \\
 \text{Saringan ukuran 0,60 mm} &= 100\% - 62,94\% \\
 &= 37,06\% \\
 \text{Saringan ukuran 0,30 mm} &= 100\% - 88,88\% \\
 &= 11,12\% \\
 \text{Saringan ukuran 0,15 mm} &= 100\% - 97,80\% \\
 &= 2,20\% \\
 \text{Pan} &= 100\% - 100\% \\
 &= 0\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis yang dilakukan, diperoleh rekapitulasi hasil pengujian analisis saringan agregat halus. Rekapitulasi ini disajikan dalam bentuk tabel yang telah divalidasi menggunakan pemrograman Excel. Rekapitulasi hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.1 berikut ini.

Tabel 5.1 Rekapitulasi Analisa Saringan Agregat Halus

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gr)	Berat tertinggal (%)	Berat tertinggal kumulatif (%)	Persen lolos kumulatif (%)
4,75	27	0,54	0,54	99,46
2,36	718	14,36	14,90	85,1
1,18	1003	20,06	34,96	65,04
0,60	1399	27,98	62,94	37,06
0,30	1297	25,94	88,88	11,12
0,15	446	8,92	97,80	2,2
Pan	110	2,20	100,00	0,00
Jumlah	5000	100	300,02	

d. Modulus Halus Butir (MHB)

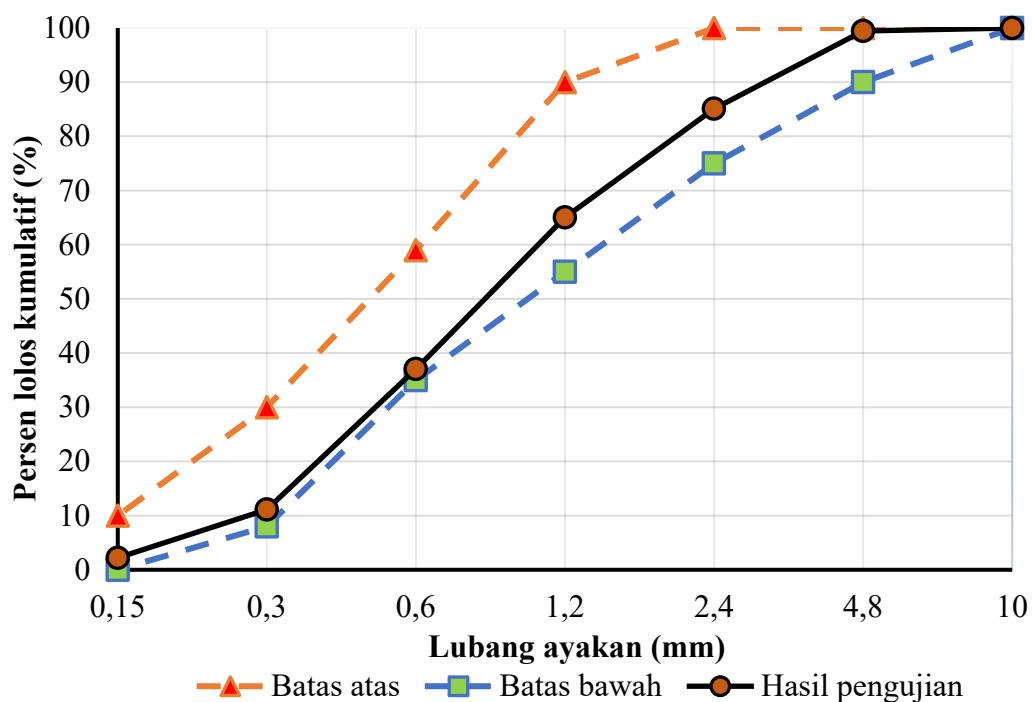
$$\begin{aligned}
 \text{MHB} &= \frac{\sum \text{Persentase berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{300,02}{100} \\
 &= 3,00
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan pengujian modulus halus butir agregat halus, diperoleh nilai modulus halus butir sebesar 3,00. Berdasarkan SNI 03-1968-1990, modulus halus butir dengan rentang 2,90-3,20 termasuk dalam kategori pasir kasar. Selain itu, menurut SNI-2834-2000, gradasi agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam gradasi agregat halus daerah II, sesuai dengan hasil perhitungan modulus halus butir. Penentuan gradasi agregat halus ini dapat dilihat pada Tabel 5.2 dan grafik pada Gambar 5.1 berikut.

Tabel 5.2 Batas Daerah Gradasi Agregat Halus

Lubang ayakan (mm)	Persen butir agregat lolos ayakan (%)			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10,00	100	100	100	100
4,80	90-100	90-100	90-100	95-100
2,40	60-95	75-100	85-100	95-100
1,20	30-70	55-90	75-100	90-100
0,60	15-34	35-59	60-79	80-100
0,30	5-20	8-30	12-40	15-50

Sumber: SNI 2834 (2000)



Gambar 5.1 Grafik Gradasi Agregat Halus Daerah II

2. Berat jenis dan penyerapan air

Pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat halus dilakukan sesuai dengan SNI 1970-2016. Pengujian ini merupakan prosedur laboratorium yang bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik fisik agregat halus, yang biasanya digunakan dalam campuran beton. Berat jenis dan penyerapan air agregat halus adalah 2 parameter penting dalam industri konstruksi dan rekayasa sipil, yang

berperan dalam menilai kualitas dan karakteristik material tersebut. Selanjutnya, hasil perhitungan berat jenis dan penyerapan air pada agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut ini.

$$\begin{aligned}
 \text{a. Berat jenis curah} &= \frac{Bk}{B+500-Bt} \\
 &= \frac{487}{708+500-1010} \\
 &= 2,46 \\
 \text{b. Berat jenis SSD} &= \frac{500}{B+500-Bt} \\
 &= \frac{500}{708+500-1010} \\
 &= 2,52 \\
 \text{c. Berat jenis semu} &= \frac{Bk}{B+Bk-Bt} \\
 &= \frac{487}{708+487-1010} \\
 &= 2,63 \\
 \text{d. Penyerapan air} &= \frac{500-Bk}{Bk} \\
 &= \frac{500-2,46}{2,46} \times 100\% \\
 &= 2,67\%
 \end{aligned}$$

Tabel 5.3 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Uraian	Hasil pengamatan		Rata-rata
	Sampel 1	Sampel 2	
Berat pasir kering mutlak (Bk), gr	487	485	486
Berat kondisi jenuh kering muka (SSD), gr	500	500	500
Berat piknometer berisi pasir dan air (Bt), gr	1010	1021	1015,5
Berat piknometer berisi air, (B), gr	708	718	713
Berat jenis curah	2,46	2,46	2,46
Berat jenis SSD	2,53	2,54	2,53
Berat jenis semu	2,63	2,66	2,65
Penyerapan air	2,67%	3,09%	2,88%

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, diperoleh nilai berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) rata-rata agregat sebesar 2,53, dan penyerapan air rata-rata sebesar 2,88%. Informasi ini dapat diinterpretasikan sebagai berikut.

- a. Nilai rata-rata berat jenis SSD sebesar 2,53 berada dalam rentang normal untuk berat jenis agregat, seperti yang disebutkan oleh Tjokrodimuljo (2007), yaitu antara 2,4 hingga 2,7.
- b. Nilai rata-rata penyerapan air sebesar 2,88% menunjukkan karakteristik penyerapan yang sesuai dengan standar agregat.

Dengan berat jenis jenuh kering muka yang berada dalam rentang normal (2,4-2,7) seperti yang disarankan oleh Tjokrodimuljo (2007), dapat disimpulkan bahwa agregat tersebut termasuk dalam kategori berat jenis agregat normal.

3. Berat volume padat dan gembur

Pengujian berat volume gembur dan padat pada agregat halus dilaksanakan sesuai dengan SNI 4804-1998. Uji ini merupakan pengujian laboratorium yang bertujuan untuk menentukan karakteristik fisik agregat halus, yang sering digunakan dalam campuran beton. Pengujian ini memberikan informasi mengenai tingkat kepadatan dan porositas agregat, yang dapat memengaruhi sifat-sifat mekanis dan daya tahan beton. Kedua pengujian ini berperan penting dalam memahami karakteristik fisik agregat halus yang akan digunakan dalam campuran konstruksi. Dengan mengetahui berat volume padat dan gembur agregat halus, maka dapat merencanakan campuran beton dengan lebih efisien dan akurat, yang pada akhirnya akan mempengaruhi kinerja dan daya tahan struktur konstruksi yang dibangun. Perhitungan dan hasil rekapitulasi berat volume gembur dan padat untuk sampel 1 dijabarkan pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5 berikut ini.

a. Berat volume gembur

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat (W3)} &= W2 - W1 \\
 &= 19138 - 10920 \\
 &= 8218 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\text{Volume tabung} = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,5^2 \times 31 \\
 &= 5849,449 \text{ cm}^3 \\
 \text{Berat volume gembur} &= \frac{W_3}{V} \\
 &= \frac{8218}{5849,449} \\
 &= 1,405 \text{ gr/cm}^3
 \end{aligned}$$

b. Berat volume padat

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat (W3)} &= W_2 - W_1 \\
 &= 20064 - 10920 \\
 &= 9144 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume tabung} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,5^2 \times 31 \\
 &= 5849,449 \text{ cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat volume padat} &= \frac{W_3}{V} \\
 &= \frac{9144}{5849,449} \\
 &= 1,563 \text{ gr/cm}^3
 \end{aligned}$$

Tabel 5.4 Hasil Uji Berat Volume Gembur Agregat Halus

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,50	15,10	15,30
Tinggi silinder (t), cm	31	30,20	30,60
Berat tabung (W1), gr	10920	11267	11093,5
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gr	19138	19328	19233
Berat agregat (W3), gr	8218	8061	8139,5
Volume tabung (V), cm ³	5849,449	5408,175	5628,812
Berat volume gembur, gr/cm ³	1,405	1,491	1,448

Tabel 5.5 Hasil Uji Berat Volume Padat Agregat Halus

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,50	15,10	15,300
Tinggi silinder (t), cm	31	30,2	30,600
Berat tabung (W1), gr	10920	11267	11093,5
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gr	20064	20344	20204
Berat agregat (W3), gr	9144	9077	9110,5
Volume tabung (V), cm ³	5849,449	5408,175	5628,812
Berat volume padat, gr/cm ³	1,563	1,678	1,621

Berdasarkan hasil analisis perhitungan berat volume, diperoleh bahwa berat volume gembur agregat halus memiliki rata-rata sebesar 1,448 gr/cm³, sedangkan berat volume padat agregat halus memiliki rata-rata sebesar 1,621 gr/cm³. Nilai berat volume padat lebih tinggi dibandingkan dengan berat volume gembur karena dalam pengujian, setiap sepertiga volume tabung mengalami proses pemadatan melalui penumbukan untuk mengurangi rongga udara, sehingga menghasilkan berat volume padat yang lebih tinggi. Berat volume padat agregat halus yang diperoleh berada dalam rentang yang direkomendasikan untuk beton normal, yaitu antara 1,4 hingga 1,8 gr/cm³, sehingga memenuhi standar yang ditetapkan.

4. Pengujian lolos saringan No. 200

Pengujian lolos saringan No. 200 merupakan pengujian kandungan lumpur pada agregat halus. Pengujian kandungan lumpur dilakukan dengan metode yang sesuai dengan SNI 4142-1996. Pengujian ini menyediakan informasi mengenai persentase kandungan lumpur dalam sampel agregat halus, yang menjadi parameter penting dalam menilai kualitas dan kesesuaian pasir atau agregat halus untuk keperluan konstruksi. Rincian perhitungan serta hasil uji yang memenuhi syarat pada saringan no. 200 dapat dilihat pada Tabel 5.6.

$$\begin{aligned}
 \text{Kandungan lumpur} &= \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \\
 &= \frac{500 - 496}{500} \times 100\% \\
 &= 0,80\%
 \end{aligned}$$

Tabel 5.6 Hasil Uji Lolos Saringan No. 200

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat agregat kering oven (W1), gr	500	500	500
Berat agregat kering oven setelah di cuci (W2), gr	496	495	495,5
Berat yang lolos ayakan No. 200	0,80%	1,00%	0,90%

Hasil pengujian menunjukkan bahwa persentase agregat halus yang lolos saringan no. 200 atau kadar lumpur, memiliki rata-rata sebesar 0,90%. Berdasarkan standar ASTM C-33 (2003), kadar lumpur yang diperbolehkan untuk agregat halus adalah maksimal 5%. Oleh karena itu, agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan yang ditetapkan.

5.2.2 Agregat Kasar

Pengujian yang dilakukan terhadap agregat kasar meliputi uji berat jenis dan penyerapan air, uji analisis saringan, serta uji berat volume. Hasil dari masing-masing pengujian agregat kasar tersebut adalah sebagai berikut.

1. Analisa saringan

Pengujian analisis saringan agregat kasar ini dilakukan sesuai dengan standar yang berlaku di Indonesia, dengan mengacu pada SNI 1968-1990. Proses pengujian melibatkan penggunaan benda uji agregat kasar dengan berat 5000 gram, di mana berat tertinggal pada setiap saringan diukur. Berikut ini disajikan data hasil pengujian analisis saringan agregat halus.

a. Berat tertinggal

$$\text{Persentase berat tertinggal} = \frac{\text{berat tertinggal (gr)}}{\Sigma \text{berat tertinggal}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 40 mm} &= \frac{0}{5000} \times 100\% \\ &= 0\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 20 mm} &= \frac{41}{5000} \times 100\% \\ &= 0,82\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Saringan ukuran 10 mm} &= \frac{3376}{5000} \times 100\% \\ &= 67,52\% \end{aligned}$$

$$\text{Saringan ukuran 4,8 mm} = \frac{1453}{5000} \times 100\%$$

$$\begin{aligned}
 &= 29,06\% \\
 \text{Saringan ukuran 2,4 mm} &= \frac{63}{5000} \times 100\% \\
 &= 1,26\% \\
 \text{Saringan ukuran 1,2 mm} &= \frac{5}{5000} \times 100\% \\
 &= 0,1\% \\
 \text{Pan} &= \frac{62}{5000} \times 100\% \\
 &= 1,24\%
 \end{aligned}$$

b. Berat tertinggal kumulatif

$$\begin{aligned}
 \text{Saringan ukuran 40 mm} &= 0,00\% + 0,00\% \\
 &= 0,00\% \\
 \text{Saringan ukuran 20 mm} &= 0,00\% + 0,82\% \\
 &= 0,82\% \\
 \text{Saringan ukuran 10 mm} &= 0,82\% + 67,52\% \\
 &= 68,34\% \\
 \text{Saringan ukuran 4,8 mm} &= 68,34\% + 29,06\% \\
 &= 97,40\% \\
 \text{Saringan ukuran 2,4 mm} &= 97,40\% + 1,26\% \\
 &= 98,66\% \\
 \text{Saringan ukuran 1,2 mm} &= 98,66\% + 0,1\% \\
 &= 98,76\% \\
 \text{Pan} &= 98,76\% + 1,24\% \\
 &= 100\%
 \end{aligned}$$

c. Persen lolos kumulatif

$$\begin{aligned}
 \text{Saringan ukuran 40 mm} &= 100\% - 0,00\% \\
 &= 100\% \\
 \text{Saringan ukuran 20 mm} &= 100\% - 0,82\% \\
 &= 99,18\% \\
 \text{Saringan ukuran 10 mm} &= 100\% - 68,34\% \\
 &= 31,66\% \\
 \text{Saringan ukuran 4,8 mm} &= 100\% - 97,40\%
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2,6\% \\
 \text{Saringan ukuran 2,4 mm} &= 100\% - 98,66\% \\
 &= 1,34\% \\
 \text{Saringan ukuran 1,2 mm} &= 100\% - 98,76\% \\
 &= 1,24\% \\
 \text{Pan} &= 100\% - 100\% \\
 &= 0\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan analisis yang dilakukan, diperoleh rekapitulasi hasil pengujian analisis saringan agregat kasar. Rekapitulasi ini disajikan dalam bentuk tabel yang dapat dilihat pada Tabel 5.7 berikut ini.

Tabel 5.7 Rekapitulasi Analisa Saringan Agregat Kasar

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gr)	Berat tertinggal (%)	Berat tertinggal kumulatif (%)	Persen lolos kumulatif (%)
40	0	0	0	100
20	41	0,82	0,82	99,18
10	3376	67,52	68,34	31,66
4,8	1453	29,06	97,40	2,6
2,4	63	1,26	98,66	1,34
1,2	5	0,1	98,76	1,24
Pan	62	1,24	100,00	0,00
Jumlah	5000	100	660,26	

d. Modulus Halus Butir (MHB)

$$\begin{aligned}
 \text{MHB} &= \frac{\sum \text{Persentase berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{600,26}{100} \\
 &= 6,60
 \end{aligned}$$

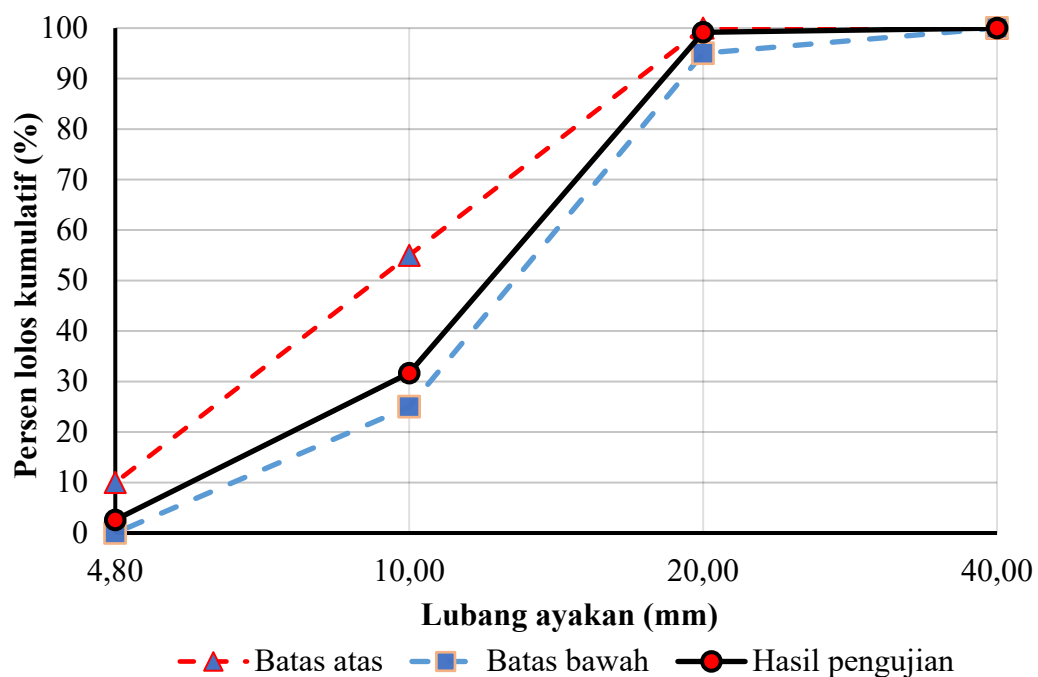
Dari hasil perhitungan pengujian modulus halus butir agregat kasar, diperoleh nilai modulus halus butir sebesar 6,60. Berdasarkan SK SNI S-04-1989-F, modulus halus butir berada pada rentang 5-8. Sehingga, nilai

modulus halus butir agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini telah memenuhi persyaratan tersebut. Penentuan gradasi agregat kasar ini dapat dilihat pada Tabel 5.8 dan grafik pada Gambar 5.2 berikut.

Tabel 5.8 Batas Daerah Gradasi Agregat Kasar

Lubang ayakan (mm)	Persen butir agregat lolos ayakan / besar butiran maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 – 100	100
20	30 – 70	95 – 100
10	10 – 35	25 – 55
4,8	0 – 5	0 – 10

Sumber: SNI 2834 (2000)



Gambar 5.2 Grafik Gradasi Agregat Kasar Maksimum 20 mm

2. Berat jenis dan penyerapan air

Pengujian berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar dilakukan sesuai dengan SNI 1969-2016. Pengujian ini merupakan prosedur laboratorium yang bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik fisik agregat kasar, yang biasanya

digunakan dalam campuran beton. Berat jenis dan penyerapan air agregat kasar adalah 2 parameter penting dalam industri konstruksi dan rekayasa sipil, yang berperan dalam menilai kualitas dan karakteristik material tersebut. Selanjutnya, hasil perhitungan berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 5.9 berikut ini.

$$\begin{aligned}
 \text{a. Berat jenis curah} &= \frac{Bk}{Bj - Ba} \\
 &= \frac{4895}{5000 - 3045} \\
 &= 2,504 \\
 \text{b. Berat jenis SSD} &= \frac{Bj}{Bj - Ba} \\
 &= \frac{5000}{5000 - 3045} \\
 &= 2,558 \\
 \text{c. Berat jenis semu} &= \frac{Bk}{Bk - Ba} \\
 &= \frac{4895}{4895 - 3045} \\
 &= 2,646 \\
 \text{d. Penyerapan air} &= \frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\% \\
 &= \frac{5000 - 4895}{4895} \\
 &= 2,15\%
 \end{aligned}$$

Tabel 5.9 Hasil Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Uraian	Hasil pengamatan		Rata-rata
	Sampel 1	Sampel 2	
Berat kerikil kering mutlak (Bk), gr	4895	4893	4894
Berat kondisi jenuh kering muka (Bj), gr	5000	5000	5000
Berat kerikil dalam air (Ba), gr	3045	3043	3044
Berat jenis curah	2,504	2,500	2,502
Berat jenis SSD	2,558	2,555	2,556
Berat jenis semu	2,646	2,645	2,645
Penyerapan air	2,15%	2,19%	2,17%

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, diperoleh nilai berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) rata-rata agregat sebesar 2,556, dan penyerapan air rata-rata sebesar 2,17%. Informasi ini dapat diinterpretasikan sebagai berikut.

- a. Nilai rata-rata berat jenis SSD sebesar 2,556 berada dalam rentang normal untuk berat jenis agregat, seperti yang disebutkan oleh Tjokrodinuljo (2007), yaitu antara 2,4 hingga 2,7.
- b. Nilai rata-rata penyerapan air sebesar 2,17% menunjukkan karakteristik penyerapan yang sesuai dengan standar agregat.

Dengan berat jenis jenuh kering muka (SSD) yang berada dalam rentang normal (2,4-2,7) seperti yang disarankan oleh Tjokrodinuljo (2007), dapat disimpulkan bahwa agregat tersebut termasuk dalam kategori berat jenis agregat normal.

3. Berat volume padat dan gembur

Pengujian berat volume gembur dan padat pada agregat kasar dilaksanakan sesuai dengan SNI 4804-1998. Uji ini merupakan pengujian laboratorium yang bertujuan untuk menentukan karakteristik fisik agregat kasar, yang sering digunakan dalam campuran beton. Pengujian ini memberikan informasi mengenai tingkat kepadatan dan porositas agregat, yang dapat memengaruhi sifat-sifat mekanis dan daya tahan beton. Perhitungan dan hasil rekapitulasi berat volume gembur dan padat untuk sampel 1 dijabarkan pada Tabel 5.10 dan Tabel 5.11 berikut ini.

a. Berat volume gembur

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat (W3)} &= W2 - W1 \\
 &= 18325 - 10306 \\
 &= 8019 \text{ gr} \\
 \text{Volume tabung} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,5^2 \times 31 \\
 &= 5849,449 \text{ m}^3 \\
 \text{Berat volume gembur} &= \frac{W3}{V} \\
 &= \frac{8019}{5849,449}
 \end{aligned}$$

$$= 1,371 \text{ gr/cm}^3$$

b. Berat volume padat

$$\begin{aligned} \text{Berat agregat (W3)} &= W2 - W1 \\ &= 18898 - 10306 \\ &= 8592 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume tabung} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\ &= \frac{1}{4} \times \pi \times 15,5^2 \times 31 \\ &= 5849,449 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat volume padat} &= \frac{W3}{V} \\ &= \frac{8592}{5849,449} \\ &= 1,469 \text{ gr/cm}^3 \end{aligned}$$

Tabel 5.10 Hasil Uji Berat Volume Gembur Agregat Kasar

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,50	15,10	15,30
Tinggi silinder (t), cm	31	30,20	30,60
Berat tabung (W1), gr	10306	11330	10818
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gr	18325	18748	18536,5
Berat agregat (W3), gr	8019	7418	7718,5
Volume tabung (V), cm ³	5849,449	5408,175	5628,812
Berat volume gembur, gr/cm ³	1,371	1,372	1,371

Tabel 5.11 Hasil Uji Berat Volume Padat Agregat Kasar

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Diameter silinder (d), cm	15,50	15,10	15,300
Tinggi silinder (t), cm	31	30,2	30,600
Berat tabung (W1), gr	10306	11330	10818
Berat tabung + agregat kering tungku (W2), gr	18898	19321	19109,5
Berat agregat (W3), gr	8592	7991	8291,5
Volume tabung (V), cm ³	5849,449	5408,175	5628,812
Berat volume padat, gr/cm ³	1,469	1,478	1,473

Berdasarkan hasil analisis perhitungan berat volume, diperoleh bahwa berat volume gembur agregat kasar memiliki rata-rata sebesar $1,371 \text{ gr/cm}^3$, sedangkan berat volume padat agregat kasar memiliki rata-rata sebesar $1,473 \text{ gr/cm}^3$. Nilai berat volume padat lebih tinggi dibandingkan dengan berat volume gembur karena dalam pengujian, setiap sepertiga volume tabung mengalami proses pemadatan melalui penumbukan untuk mengurangi rongga udara, sehingga menghasilkan berat volume padat yang lebih tinggi. Berat volume padat agregat kasar yang diperoleh berada dalam rentang yang direkomendasikan untuk beton normal, yaitu antara 1,4 hingga $1,8 \text{ gr/cm}^3$, sehingga memenuhi standar yang ditetapkan.

5.3 Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Perencanaan campuran beton (*mix design*) menggunakan SNI 2847-2000. Adapun perhitungan perencanaan campuran beton adalah sebagai berikut.

1. Kuat tekan rencana (f_c')

Kuat tekan rencana adalah sebesar 25 MPa.

2. Deviasi standar (S_r)

Deviasi standar merupakan nilai yang didapatkan berdasarkan pengalaman di lapangan sesuai dengan tingkat pengendalian mutu pekerjaan. Nilai deviasi standar yang diambil yaitu 7 MPa.

3. Nilai tambah (M)

Nilai tambah diambil dari rumus sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Nilai tambah (M)} &= 1,64 \times S_r \\ &= 1,64 \times 7 \\ &= 11,48 \text{ MPa dibulatkan } 12 \text{ MPa} \end{aligned}$$

4. Kekuatan yang direncanakan (f_{cr}')

$$\begin{aligned} \text{Kekuatan yang direncanakan (} f_{cr}' \text{)} &= f_c' + M \\ &= 25 + 12 \\ &= 37 \text{ MPa} \end{aligned}$$

5. Jenis semen

Semen yang digunakan pada penelitian ini yaitu jenis semen *portland* tipe I.

6. Jenis agregat

Agregat halus dan kasar yang digunakan berasal dari merapi. Agregat halus masuk dalam gradasi daerah II dan agregat kasar yang digunakan berukuran maksimum 20 mm.

7. Penentuan faktor air semen (FAS)

Menentukan nilai faktor air semen (FAS) berdasarkan Tabel 5.12 dan Gambar 5.3 berikut.

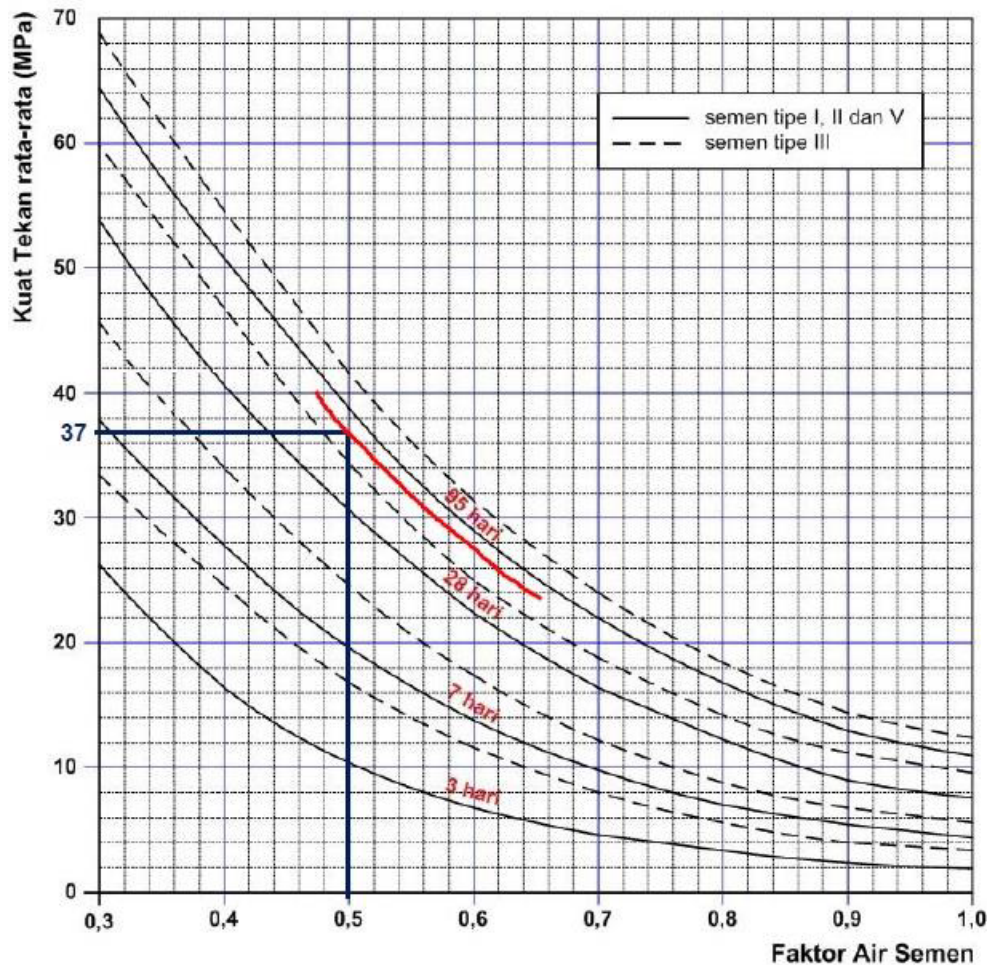
Tabel 5.12 Perkiraan Kekuatan Tekan (MPa) Beton Dengan Faktor Air Semen dan Agregat Kasar Yang Biasa Dipakai Di Indonesia

Jenis semen	Jenis agregat kasar	Kekuatan tekan (MPa)				Bentuk benda uji
		Pada umur (hari)				
		3	7	28	91	
Semen <i>portland</i> tipe I	Batu tidak dipecahkan	17	23	33	40	Silinder
	Batu pecah	19	27	37	45	
Semen <i>portland</i> tipe II dan V	Batu tidak dipecahkan	20	28	40	48	Kubus
	Batu pecah	25	32	45	54	
Semen <i>portland</i> tipe III	Batu tidak dipecahkan	21	28	38	44	Silinder
	Batu pecah	25	33	44	48	
	Batu tidak dipecahkan	25	31	46	53	Kubus
	Batu pecah	30	40	53	60	

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

- Semen yang digunakan yaitu semen *portland* tipe I, jenis agregat kasar yang digunakan yaitu batu pecah, dan kuat tekan diuji pada umur 28 hari. Sehingga, berdasarkan Tabel 5.12 diperoleh perkiraan kekuatan tekan beton dengan FAS 0,5 sebesar 37 MPa.
- Dengan menggunakan Gambar 5.3, tarik garis vertikal ke atas dari FAS 0,5 dan tarik garis horizontal ke kanan dari kuat tekan rata-rata sebesar 37 MPa yang didapat dari Tabel 5.12, sehingga didapatkan titik perpotongan antara kedua garis tersebut.
- Dibuat kurva baru yang memotong titik perpotongan pada butir b.

- d. Buat garis horizontal ke kanan dari nilai kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr}') sebesar 37 MPa sampai memotong kurva pada butir c.
- e. Tarik garis vertikal ke bawah dari titik perpotongan pada butir d, sehingga didapat nilai FAS sebesar 0,5.



Grafik 1 : Hubungan antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen (fas)
(benda uji berbentuk Silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm)

**Gambar 5.3 Grafik Hubungan Antara Kuat Tekan dan Faktor Air Semen
(benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm)**

(Sumber: SNI 03-2834, 2000)

8. Faktor air semen maksimum dan kadar semen minimum

Faktor air semen maksimum dan kadar semen minimum merupakan 2 parameter penting yang harus diperhatikan dalam desain campuran beton. Parameter ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kekuatan yang diharapkan, kondisi lingkungan konstruksi, dan jenis agregat yang digunakan.

Ketentuan mengenai kadar semen minimum dan faktor air semen maksimum pada beton dapat dilihat pada Tabel 5.13 di bawah ini.

Tabel 5.13 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Maksimum Untuk Berbagai Macam Pembetonan Dalam Lingkungan Khusus

Lokasi		Jumlah semen minimum per m ³ beton (kg)	Nilai faktor air semen maksimum
Beton di dalam ruang bangunan	Keadaan keliling non-korosif	275	0,60
	Keadaan keliling korosif disebabkan oleh kondensasi atau uap korosif	325	0,52
Beton di luar ruangan bangunan	Tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0,60
	terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	275	0,60
Beton masuk ke dalam tanah	Mengalami keadaan basah dan kering berganti-ganti	325	0,55
	Mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		
Beton yang kontinu berhubungan	Air tawar		
	Air laut		

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

Jenis pembetonan yang digunakan merupakan beton di dalam ruang bangunan dengan keadaan keliling non korosif. Oleh karena itu, berdasarkan Tabel 5.13 diperoleh jumlah semen minum sebesar 275 kg/m³ dan FAS maksimum sebesar 0,60.

9. Nilai *slump*

Nilai *slump* yang digunakan sebesar 60-180 mm.

10. Kadar air yang dibutuhkan

Kadar air dalam campuran beton ditentukan berdasarkan Tabel 5.14 sebagai berikut.

Tabel 5.14 Perkiraan Kadar Air Bebas (kg/m³) Yang Dibutuhkan

Ukuran maksimum agregat (mm)	Jenis batuan	Slump (mm)			
		0 – 10	10 – 30	30 – 60	60 – 180
10	Batu tak dipecahkan	150	180	205	225
	Batu pecah	180	205	230	250
20	Batu tak dipecahkan	135	160	180	195
	Batu pecah	170	190	210	225
40	Batu tak dipecahkan	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Sumber: SNI 03-2834 (2000)

Pada tabel di atas diperoleh kadar air bebas untuk agregat halus (W_h) yaitu 195 kg/m³ dan agregat kasar (W_k) yaitu 225 kg/m³. Kemudian dihitung kadar air bebas yang dibutuhkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Kadar air bebas (W)} &= \frac{2}{3} W_h + \frac{1}{3} W_k \\
 &= \frac{2}{3} 195 + \frac{1}{3} 225 \\
 &= 205 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

11. Kadar semen yang digunakan

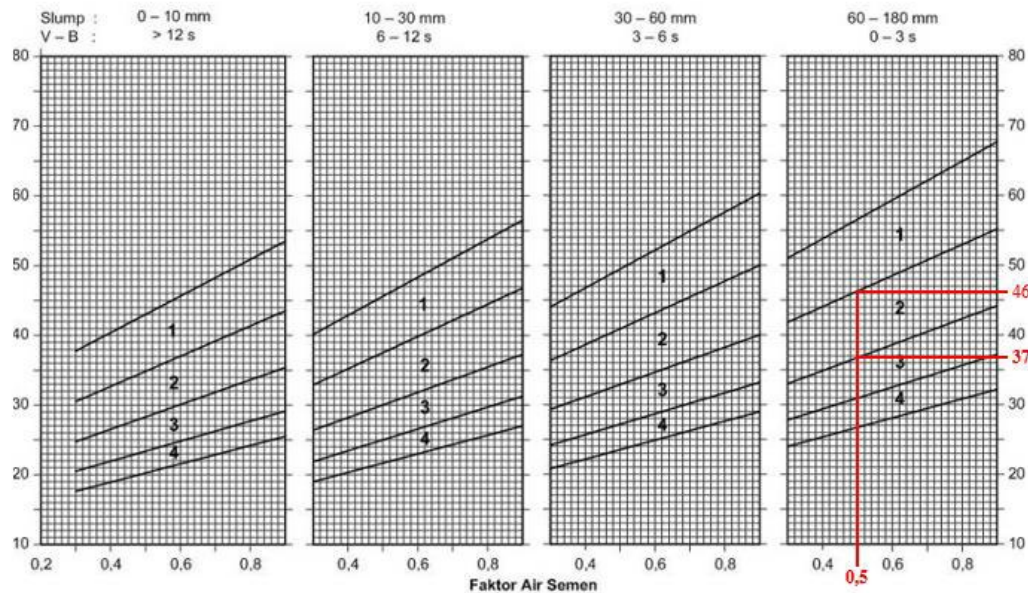
$$\begin{aligned}
 \text{Kadar semen yang digunakan (C)} &= \frac{\text{kadar air bebas (W)}}{FAS} \\
 &= \frac{205}{0,5} \\
 &= 410 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

12. Persen agregat halus dan agregat kasar

Persentase agregat halus ditentukan berdasarkan Gambar 5.4 sebagai berikut.

- Ukuran maksimum agregat yang digunakan adalah 20 mm, *slump* yang direncanakan masuk dalam rentang 60-180 mm, nilai FAS yaitu 0,5, dan gradasi agregat halus yang digunakan masuk dalam gradasi II.
- Tarik garis vertikal ke atas dari nilai FAS 0,5 sampai memotong 2 buah kurva yang membatasi daerah gradasi II.

- c. Dari 2 titik perpotongan pada butir b, tarik garis horizontal ke kanan, sehingga diperoleh persentase batas atas dan batas bawah yaitu sebesar 46% dan 37%.



Gambar 5.4 Grafik Persentase Agregat Halus Terhadap Kadar Total Agregat Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm

(Sumber: SNI 03-2834, 2000)

- d. Nilai persentase agregat halus dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\% \text{Ag. Halus} &= \frac{46\% + 37\%}{2} \\ &= 41,50\%\end{aligned}$$

- e. Nilai persentase agregat kasar dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\% \text{Ag. Kasar} &= 100\% - \% \text{Ag. Halus} \\ &= 100\% - 41,50\% \\ &= 58,50\%\end{aligned}$$

13. Berat jenis agregat gabungan

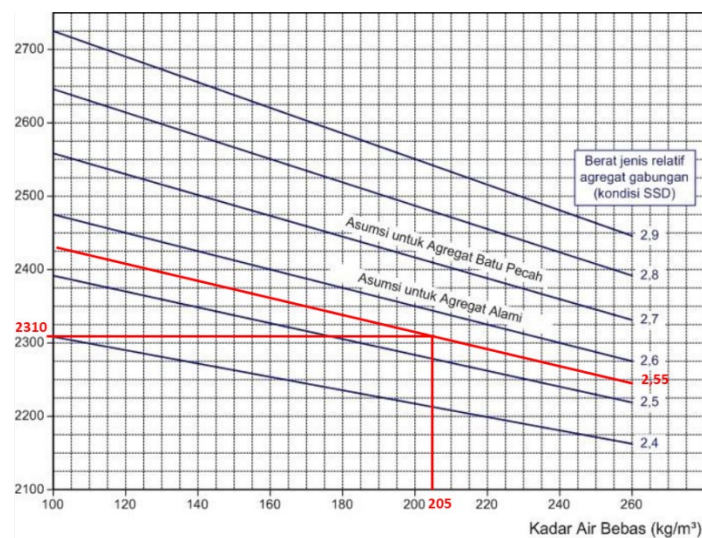
Berat jenis agregat gabungan dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\text{BJ}_{\text{gab.}} &= (\% \text{Ag. Halus} \times \text{BJ}_{\text{Ag. Halus}}) + (\% \text{Ag. Kasar} \times \text{BJ}_{\text{Ag. Kasar}}) \\ &= (41,50\% \times 2,53) + (58,50\% \times 2,56) \\ &= 2,55\end{aligned}$$

14. Berat isi beton

Berat isi beton ditentukan berdasarkan Gambar 5.5 sebagai berikut.

- Membuat kurva dengan nilai berat jenis agregat gabungan yaitu 2,55.
- Tarik garis vertikal ke atas dari nilai kadar air sebesar 205 kg/m³ sampai memotong kurva baru pada butir a.
- Dari titik perpotongan pada butir b, tarik garis horizontal ke kiri, sehingga diperoleh nilai perkiraan berat isi beton (W_{beton}) sebesar 2310 kg/m³



Gambar 5.5 Grafik Perkiraan Berat Isi Beton Basah
(Sumber: SNI 03-2834, 2000)

15. Kadar agregat gabungan dalam campuran beton

Kadar agregat gabungan dalam campuran beton dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{Ag.gab}} &= W_{\text{beton}} - C - W \\
 &= 2310 - 410 - 205 \\
 &= 1695 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

16. Kadar agregat halus dan agregat kasar

Kadar agregat halus dan agregat kasar dihitung sebagai berikut.

a. Agregat halus

$$\begin{aligned}
 W_{\text{Ag. halus}} &= \% \text{Ag. Halus} \times W_{\text{Ag. gab}} \\
 &= 41,50\% \times 1695 \\
 &= 703,43 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

b. Agregat kasar

$$\begin{aligned}
 W_{\text{Ag. kasar}} &= W_{\text{Ag. gab}} - W_{\text{Ag. halus}} \\
 &= 1695 \times 703,43 \\
 &= 991,58 \text{ kg/m}^3
 \end{aligned}$$

17. Proporsi campuran per 1 m³ beton

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

- a. Semen $(W_c) = 405 \text{ kg}$
- b. Air $(W) = 205 \text{ kg}$
- c. Agregat halus $(W_{ah}) = 703,43 \text{ kg}$
- d. Agregat kasar $(W_{ak}) = 991,58 \text{ kg}$

18. Volume benda uji

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini yaitu berbentuk silinder untuk *trial* kuat tekan dan benda uji balok. Ukuran benda uji berbentuk silinder yaitu diameter (d) 150 mm dan tinggi (t) 300 mm. Sedangkan benda uji balok berukuran lebar (b) 150 mm, tinggi (h) 200 mm, dan panjang (l) 1400 mm. Volume benda uji dihitung sebagai berikut.

a. Volume 1 silinder

$$\begin{aligned}
 V_{\text{silinder}} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\
 &= \frac{1}{4} \times \pi \times 0,15^2 \times 0,3 \\
 &= 0,0053 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

b. Volume 1 balok

$$\begin{aligned}
 V_{\text{balok}} &= b \times h \times l \\
 &= 0,15 \times 0,3 \times 1,4 \\
 &= 0,042 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

19. Proporsi campuran tiap benda uji

Proporsi campuran tiap benda uji didapatkan dari volume benda uji dikali dengan proporsi campuran per 1 m³ beton. Kemudian ditambah angka penyusutan sebesar 35%. Perhitungan proporsi campuran setiap benda uji yaitu sebagai berikut.

a. Benda uji silinder

1) Berat semen

$$\begin{aligned}
 \text{Berat semen} &= W_c \times V_{\text{silinder}} + (35\% \times (W_c \times V_{\text{silinder}})) \\
 &= 410 \times 0,0053 + (35\% \times (410 \times 0,0053)) \\
 &= 2,934 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

2) Berat air

$$\begin{aligned}
 \text{Berat air} &= W \times V_{\text{silinder}} + (35\% \times (W \times V_{\text{silinder}})) \\
 &= 205 \times 0,0053 + (35\% \times (205 \times 0,0053)) \\
 &= 1,467 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

3) Berat agregat halus

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat halus} &= W_{\text{ah}} \times V_{\text{silinder}} + (35\% \times (W_{\text{ah}} \times V_{\text{silinder}})) \\
 &= 703,425 \times 0,0053 + (35\% \times (703,425 \times 0,0053)) \\
 &= 5,034 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

4) Berat agregat kasar

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat kasar} &= W_{\text{ak}} \times V_{\text{silinder}} + (35\% \times (W_{\text{ak}} \times V_{\text{silinder}})) \\
 &= 991,575 \times 0,0053 + (35\% \times (991,575 \times 0,0053)) \\
 &= 7,097 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

b. Benda uji balok

1) Berat semen

$$\begin{aligned}
 \text{Berat semen} &= W_c \times V_{\text{balok}} + (35\% \times (W_c \times V_{\text{balok}})) \\
 &= 410 \times 0,042 + (35\% \times (410 \times 0,042)) \\
 &= 23,247 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

2) Berat air

$$\begin{aligned}
 \text{Berat air} &= W \times V_{\text{balok}} + (35\% \times (W \times V_{\text{balok}})) \\
 &= 205 \times 0,042 + (35\% \times (205 \times 0,042)) \\
 &= 11,624 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

3) Berat agregat halus

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat halus} &= W_{\text{ah}} \times V_{\text{balok}} + (35\% \times (W_{\text{ah}} \times V_{\text{balok}})) \\
 &= 703,425 \times 0,042 + (35\% \times (703,425 \times 0,042)) \\
 &= 39,884 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

4) Berat agregat kasar

$$\begin{aligned}
 \text{Berat agregat kasar} &= W_{\text{ak}} \times V_{\text{balok}} + (35\% \times (W_{\text{ak}} \times V_{\text{balok}})) \\
 &= 991,575 \times 0,042 + (35\% \times (991,575 \times 0,042)) \\
 &= 56,222 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Berikut merupakan rekapitulasi proporsi campuran yang dapat dilihat pada Tabel 5.15.

Tabel 5.15 Rekapitulasi Proporsi Campuran Beton

	Semen	Air	Agregat	
			Halus	Kasar
	kg	kg	kg	kg
Proporsi campuran	1,000	0,500	1,716	2,418
1 m ³ beton	410,000	205,000	703,425	991,575
1 Silinder	2,934	1,467	5,034	7,097
1 Balok	23,247	11,624	39,884	56,222

5.4 Hasil Pengujian Benda Uji *Trial*

Berdasarkan perencanaan campuran yang telah dibuat, percobaan pembuatan benda uji *trial* kemudian dilaksanakan untuk memverifikasi keakuratan desain campuran. Benda uji yang dibuat adalah 3 silinder, yang sebelum diuji terlebih dahulu dilapisi *capping* untuk meratakan permukaannya. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur beton 7 hari. Oleh karena itu, dalam perhitungan nilai kuat tekan beton perlu dilakukan pembagian dengan faktor konversi umur uji. Perhitungan nilai kuat tekan beton *trial* adalah sebagai berikut.

1. Kuat tekan beton *trial* umur 7 hari

$$\begin{aligned}
 f'_{\text{c aktual}} &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{328.919,63}{17.671,5} \\
 &= 18,613 \text{ MPa} \\
 f'_{\text{c terkonversi}} &= f'_{\text{c aktual}} \times \frac{1}{\text{angka konversi}} \\
 &= 18,613 \times \frac{1}{0,65} \\
 &= 28,635 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Dengan metode yang sama, perhitungan kuat tekan beton dilakukan juga pada sampel-sampel lainnya. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton *trial* dapat dilihat pada Tabel 5.16.

Tabel 5.16 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton *Trial*

Sampel	Umur Uji	Diameter (mm)	Luas penampang (mm ²)	Beban maksimum (N)	Kuat tekan umur uji (MPa)	Angka konversi umur uji	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rerata (MPa)
1	7	150	17.671,5	328,919	18,613	0,65	28,635	30,573
2	7	150	17.671,5	351,910	19,914	0,65	30,637	
3	7	150	17.671,5	372,691	21,090	0,65	32,446	

Berdasarkan Tabel 5.16, dapat diketahui bahwa hasil pengujian kuat tekan benda uji *trial* sebesar 30,573 MPa telah memenuhi mutu rencana yaitu 25 MPa.

5.5 Hasil Pengujian Balok Beton Bertulang

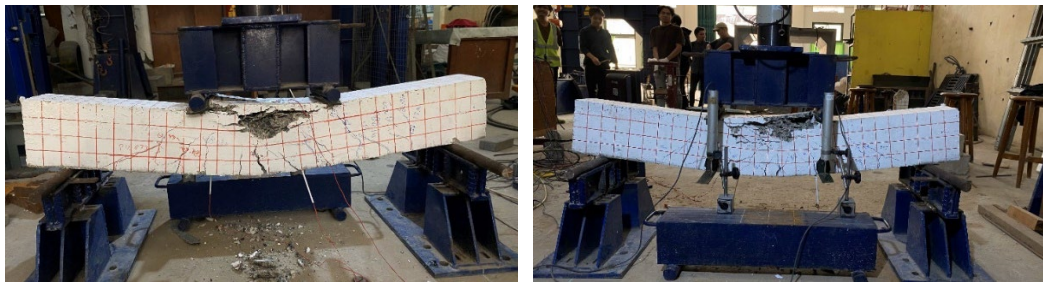
Pada bagian ini akan dibahas hasil pengujian dari berbagai kondisi penulangan pada balok beton bertulang, yaitu *under reinforced*, *balance reinforced*, dan *over reinforced*. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi pola retakan, kapasitas beban, dan perilaku keruntuhan yang terjadi pada masing-masing balok. Dengan memahami perbedaan perilaku balok pada setiap kondisi penulangan, diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai pengaruh rasio tulangan terhadap perilaku struktural balok beton bertulang.

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio penulangan sangat mempengaruhi perilaku keruntuhan yang terjadi pada balok beton bertulang. Balok *under reinforced* cenderung mengalami keruntuhan lentur tarik, sementara balok *balance reinforced* menunjukkan interaksi antara keruntuhan lentur dan geser yang lebih seimbang. Sebaliknya, balok *over reinforced* lebih rentan terhadap keruntuhan geser dengan pola retak diagonal yang tajam.

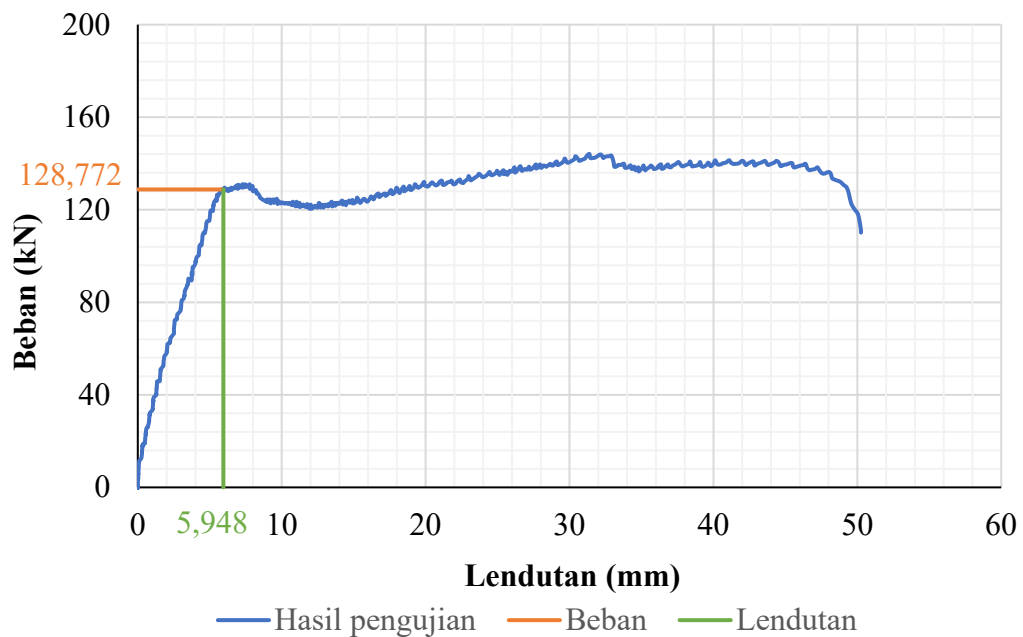
Setiap kondisi penulangan menunjukkan karakteristik perilaku yang berbeda, baik dalam hal pola retak maupun kapasitas beban yang dapat ditahan sebelum kegagalan terjadi. Berikut adalah rincian hasil pengujian untuk masing-masing kondisi penulangan.

5.5.1 Under Reinforced

Hasil pengujian pada balok *under reinforced* (BRK) menunjukkan bahwa keruntuhan dominan adalah kegagalan lentur tarik. Balok ini pertama kali menunjukkan retakan halus di tengah balok pada zona tarik saat beban mencapai 30,996 kN. Retakan yang awalnya halus dan mulai membesar terlihat saat beban mencapai 131,040 kN. Retakan ini kemudian berkembang secara bertahap hingga meluas ke seluruh balok sebelum mencapai keruntuhan total pada beban 144,144 kN dengan lendutan sebesar 31,377 mm. Hasil pengujian berupa gambar benda uji dan grafik beban lendutan pada balok *under reinforced* dapat dilihat pada Gambar 5.6 dan Gambar 5.7.



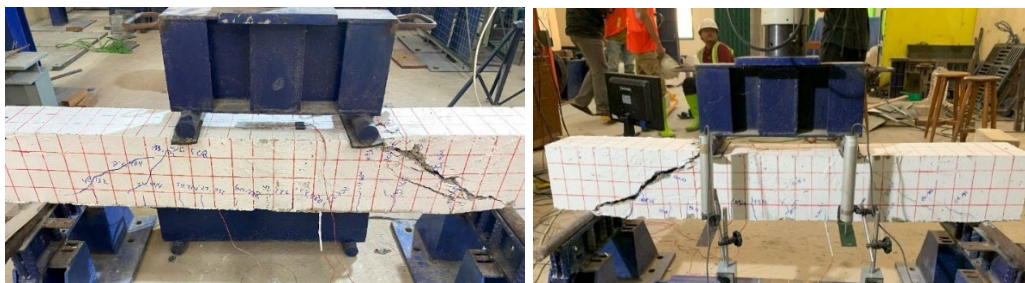
Gambar 5.6 Benda Uji BRK Sisi Timur (Kiri) dan Sisi Barat (Kanan)



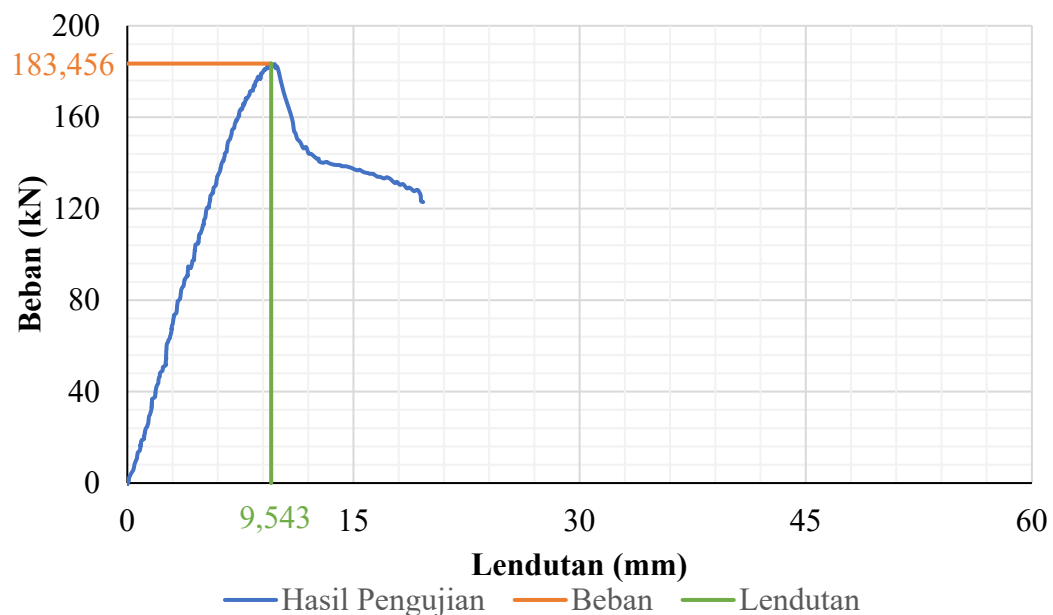
Gambar 5.7 Grafik Beban (kN) – Lendutan (mm) BRK

5.5.2 *Balance Reinforced*

Pada balok *balance reinforced* (BRS), hasil pengujian menunjukkan interaksi antara kegagalan lentur dan geser. Retakan lentur halus mulai muncul di tengah bentang pada beban 22,932 kN dan retakan miring halus mulai muncul pada beban 83,160 kN. Pada balok *balance reinforced*, retakan diagonal berkembang dari tumpuan dan menyebar ke pusat beban sebelum menyebabkan keruntuhan geser pada beban maksimum 183,456 kN dengan lendutan sebesar 9,543 mm. Hasil pengujian berupa gambar benda uji dan grafik beban lendutan pada balok *balance reinforced* dapat dilihat pada Gambar 5.8 dan Gambar 5.9.



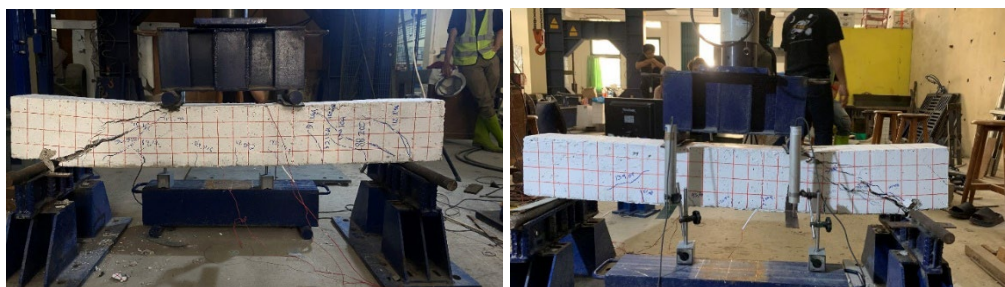
Gambar 5.8 Benda Uji BRS Sisi Timur (Kiri) dan Sisi Barat (Kanan)



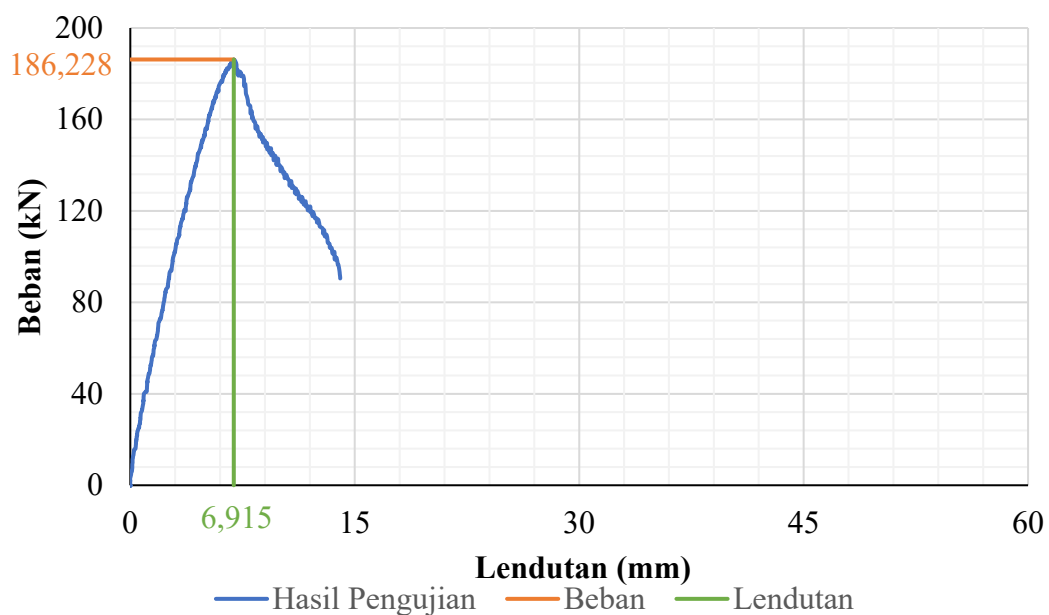
Gambar 5.9 Grafik Beban (kN) – Lendutan (mm) BRS

5.5.3 Over Reinforced

Hasil pengujian balok *over reinforced* (BRL) menunjukkan kegagalan geser yang dominan. Pada pengujian balok *over reinforced*, retakan diagonal halus muncul sejak beban 87,192 kN dan berkembang cepat menuju kegagalan pada beban maksimum 186,228 kN dengan lendutan sebesar 7,389 mm. Hasil pengujian berupa gambar benda uji dan grafik beban lendutan pada balok *over reinforced* dapat dilihat pada Gambar 5.10 dan Gambar 5.11.



Gambar 5.10 Benda Uji BRL Sisi Timur (Kiri) dan Sisi Barat (Kanan)



Gambar 5.11 Grafik Beban (kN) – Lendutan (mm) BRL

5.6 Analisis Pola Keretakan

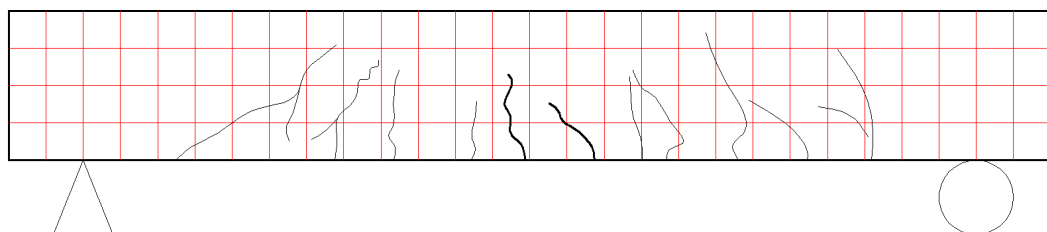
Retakan pada balok beton bertulang merupakan indikasi awal dari perilaku kegagalan struktural. Dalam penelitian ini, analisis bentuk retakan memberikan wawasan mendalam mengenai dominasi kegagalan yang terjadi, apakah itu lentur

atau geser. Secara umum, retakan lentur cenderung muncul di zona tarik dan berkembang seiring peningkatan beban, sedangkan retakan geser biasanya muncul sebagai retakan diagonal dari tumpuan menuju pusat balok.

5.6.1 Pola Keretakan Balok *Under Reinforced* (BRK)

Pola keretakan yang terjadi pada balok *under reinforced* (BRK) didominasi oleh retak lentur. Retakan awal muncul ketika beban mencapai 30,996 kN, ditandai dengan retakan halus di tengah balok. Keretakan lentur terus bermunculan dan berkembang sepanjang bentang balok sampai beban 73,584 kN. ketika beban bertambah, retakan geser mulai muncul pada beban 80,388 kN. Penambahan beban menyebabkan perkembangan retakan yang semakin signifikan, dengan retakan lentur menjalar dari bagian bawah balok ke atas, sedangkan retakan geser berkembang dari tumpuan menuju pusat beban dengan pola retakan diagonal. Ukuran retakan mengalami perubahan dari retakan halus menjadi retakan yang lebih besar seiring peningkatan beban, hingga balok BRK mencapai beban maksimum sebesar 144,144 kN. Bentuk retakan akhir pada balok BRK yaitu retak lentur di tengah bentang balok yang lebih besar dibandingkan dengan retak yang terjadi sepanjang balok BRK. Hal ini menunjukkan bahwa balok BRK kegagalan yang didominasi oleh retak lentur.

Pola retak balok *under reinforced* (BRK) dapat dilihat pada Gambar 5.12.



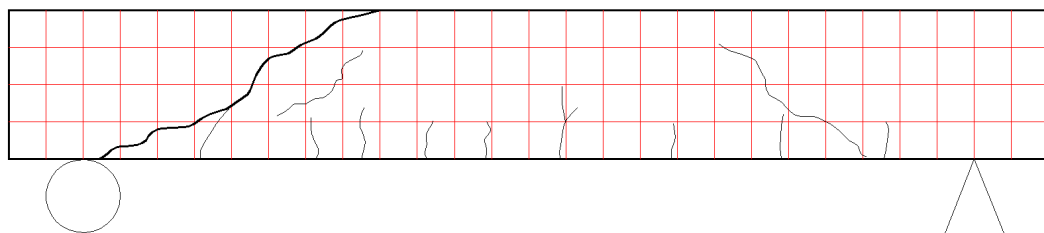
Gambar 5.12 Sket Pola Retak Benda Uji BRK

5.6.2 Pola Keretakan Balok *Balance Reinforced* (BRS)

Balok *balance reinforced* (BRS) menunjukkan dominasi retakan lentur pada awal pengujian. Retakan awal muncul ketika beban mencapai 22,932 kN, ditandai dengan retak halus di tengah bentang sisi timur. Retakan lentur terus berkembang seiring dengan peningkatan beban, dengan retakan halus tambahan muncul pada beban 24,444 kN dan 27,720 kN di sisi timur balok. Seiring bertambahnya beban

hingga 60,228 kN, retakan lentur terus bermunculan dan terlokalisasi di sepanjang tengah bentang balok. Pada beban 83,160 kN, retakan miring mulai terlihat dan berkembang dari tumpuan ke arah pusat beban, menandakan awal interaksi antara kegagalan geser dan lentur. Retakan miring ini berkembang lebih lanjut saat beban mencapai 95,508 kN, menyebar dari tumpuan menuju pusat balok, dan menjadi lebih dominan seiring peningkatan beban. Pada beban 105,336 kN, retakan diagonal menyebar signifikan dan berkembang dari tumpuan ke arah pusat beban, menyebabkan interaksi antara retakan geser dan lentur. Ketika beban mencapai 183,456 kN, balok BRS mengalami keruntuhan geser, ditandai dengan retakan miring yang membesar dan mengakibatkan kegagalan struktural. Bentuk retakan akhir pada balok BRS menunjukkan kombinasi antara retakan lentur di tengah bentang dan retakan geser yang dominan berkembang dari tumpuan ke pusat beban.

Pola retak balok *balance reinforced* (BRS) dapat dilihat pada Gambar 5.13.



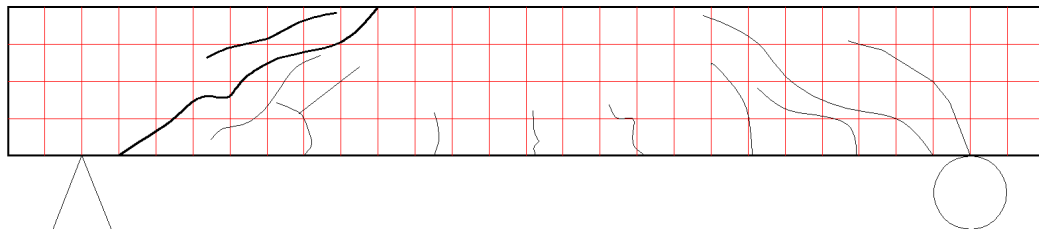
Gambar 5.13 Sket Pola Retak Benda Uji BRS

5.6.3 Pola Keretakan Balok *Over Reinforced* (BRL)

Balok *over reinforced* (BRL) menunjukkan dominasi kegagalan geser dengan retakan yang berkembang secara cepat dan tiba-tiba. Retakan awal muncul saat beban mencapai 48,888 kN, ditandai dengan retakan halus di tengah bentang yang sangat halus di sisi timur balok. Seiring bertambahnya beban, retakan lentur halus terus muncul dan berkembang di sepanjang tengah bentang, dengan retakan lentur dominan muncul pada beban 61,488 kN. Pada beban 112,896 kN, retakan miring mulai menyebar dan berkembang dari tumpuan menuju pusat beban, menandakan retakan geser berkembang. Retakan ini semakin dominan pada beban 135,576 kN, di mana retakan diagonal berkembang dari sisi tumpuan dan menyebar ke arah atas balok. Perkembangan retakan diagonal ini terus berlanjut dan menjadi semakin besar hingga mencapai beban maksimum 186,228 kN, mengakibatkan keruntuhan

geser yang mendominasi. Pada kondisi akhir, bentuk keretakan pada balok BRL menunjukkan retakan diagonal yang besar dan menyebar secara tiba-tiba, terutama dari sisi atas menuju tumpuan. Hal ini menegaskan bahwa balok BRL memiliki dominasi kegagalan geser.

Pola retak balok *over reinforced* (BRL) dapat dilihat pada Gambar 5.14.



Gambar 5.14 Sket Pola Retak Benda Uji BRL

5.7 Analisis Perilaku Keruntuhan

Perilaku keruntuhan balok beton bertulang dipengaruhi oleh rasio penulangan yang digunakan, di mana setiap jenis rasio menunjukkan karakteristik kegagalan yang berbeda. Analisis ini bertujuan untuk memahami bagaimana balok *under reinforced* (BRK), *balance reinforced* (BRS), dan *over reinforced* (BRL) mengalami keruntuhan berdasarkan pola retakan, perkembangan beban, dan jenis kegagalan yang terjadi.

5.7.1 Keruntuhan Balok *Under Reinforced* (BRK)

Balok *under reinforced* (BRK) menunjukkan dominasi kegagalan lentur dengan pola retakan yang berkembang secara bertahap pada bagian tarik balok. Pada awal pengujian, retakan halus lentur mulai muncul pada beban 30,996 kN, dengan retakan yang berlokasi di tengah balok bagian bawah atau zona tarik. Seiring peningkatan beban hingga 129,780 kN, retakan halus lentur terus berkembang sepanjang bentang balok.

Retakan halus terus berkembang hingga retaknya mulai membesar dan terlihat pada beban 131,040 kN. Setelah itu, beban tidak bertambah secara signifikan, akan tetapi lendutan terus bertambah hingga mencapai beban maksimum 144,144 kN dengan lendutan 31,377 mm. Ketika mencapai beban maksimum, retakan lentur pada tengah bentang terus membesar hingga menyebabkan keruntuhan. Retakan geser juga muncul pada balok BRK, akan tetapi retak geser

sangat halus sehingga keruntuhan di dominasi oleh keruntuhan lentur. Hal ini juga mencerminkan bahwa balok *under reinforced* (BRK) memberikan peringatan kegagalan yang jelas dan bertahap melalui perkembangan retakan lentur sebelum keruntuhan total terjadi. Grafik balok BRK dapat dilihat pada Gambar 5.7.

5.7.2 Keruntuhan Balok *Balance Reinforced* (BRS)

Balok *balance reinforced* (BRS) memperlihatkan interaksi antara kegagalan lentur dan geser. Retakan awal lentur muncul pada beban 22,932 kN, ditandai dengan retakan halus di tengah bentang sisi timur. Retakan lentur terus berkembang seiring peningkatan beban, dan retakan geser mulai muncul pada beban 83,160 kN, yang menunjukkan bahwa interaksi antara kedua jenis kegagalan ini mulai terjadi. Pada beban 105,336 kN, retakan diagonal yang berkembang dari tumpuan menuju pusat beban menunjukkan tanda-tanda kegagalan geser yang semakin signifikan.

Keruntuhan geser terjadi pada beban maksimum 183,456 kN dengan lendutan sebesar 9,543 mm, di mana retakan diagonal berkembang pesat dan mengakibatkan kegagalan struktural berupa keruntuhan geser. Grafik balok BRS dapat dilihat pada Gambar 5.9.

5.7.3 Keruntuhan Balok *Over Reinforced* (BRL)

Balok *over reinforced* (BRL) menunjukkan dominasi kegagalan geser dengan pola retakan yang berkembang cepat dan keruntuhan tiba-tiba. Retakan lentur awal muncul pada beban 48,888 kN sebagai retakan halus di tengah bentang, tetapi dengan peningkatan beban, retakan diagonal yang berkembang dari tumpuan menjadi lebih dominan. Pada beban 112,896 kN, retakan geser mulai berkembang pesat dan terjadi retakan di sisi atas balok. Ketika mencapai beban maksimum 186,228 kN, retakan pada sisi atas balok mulai membesar diiringi dengan retak geser yang juga membesar sampai menyebabkan keruntuhan. Keruntuhan geser mendominasi pada balok BRL dengan retakan diagonal yang tiba-tiba membesar dari sisi atas menuju tumpuan.

Keruntuhan geser yang dominan pada balok BRL menunjukkan bahwa peningkatan rasio penulangan tanpa detailing geser yang memadai mempercepat kegagalan geser sebelum kapasitas lentur dapat sepenuhnya dimanfaatkan. Hal ini membuktikan bahwa pada balok BRL, kegagalan geser terjadi lebih cepat dan tidak

memberikan peringatan yang cukup melalui perkembangan retakan lentur, berbeda dengan balok *under reinforced* (BRK).

Dari ketiga jenis balok yang diuji, terlihat bahwa rasio penulangan berpengaruh signifikan terhadap perilaku keruntuhan. Balok *under reinforced* (BRK) memberikan peringatan kegagalan yang lebih bertahap dengan dominasi kegagalan lentur, sementara balok *over reinforced* (BRL) menunjukkan kegagalan geser yang cepat dan mendominasi tanpa perkembangan retakan lentur yang signifikan. Balok *balance reinforced* (BRS) menunjukkan distribusi kegagalan yang lebih seimbang antara lentur dan geser. Grafik balok BRL dapat dilihat pada Gambar 5.11.

5.8 Perbandingan Regangan Hasil Eksperimen dan Teoritis

Regangan pada beton dan baja merupakan parameter penting dalam menganalisis perilaku struktural balok beton bertulang. Regangan teoritis memberikan panduan mengenai nilai-nilai yang diharapkan dalam desain struktur, sedangkan regangan hasil eksperimen didapatkan dari bacaan *strain gauge* yang dipasang pada beton dan baja tulangan. Regangan hasil eksperimen mencerminkan kondisi aktual yang terjadi selama pengujian balok. Perbandingan antara regangan teoritis dan hasil eksperimen ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian antara desain teoritis dan perilaku sebenarnya, serta untuk memahami seberapa baik struktur bekerja dalam kondisi nyata.

5.8.1 Regangan Beton

Regangan teoritis beton yang digunakan dalam desain struktur beton bertulang umumnya adalah 0,003. Hasil eksperimen menunjukkan variasi regangan beton berdasarkan jenis rasio penulangan yang diterapkan pada masing-masing balok.

1. *Under reinforced* (BRK)

Regangan beton pada balok *under reinforced* (BRK) hasil eksperimen tercatat sebesar 0,0027885. Nilai ini lebih rendah, akan tetapi mendekati dari nilai teoritis yaitu sebesar 0,003. Hal ini menunjukkan bahwa beton pada balok ini masih berada dalam batas elastis sebelum mencapai kapasitas regangan maksimumnya.

2. *Balance reinforced* (BRS)

Regangan beton pada balok *balance reinforced* (BRS) hasil eksperimen tercatat sebesar 0,0027452, dimana mendekati nilai teoritis yaitu 0,003. Hal ini menunjukkan bahwa beton pada balok ini masih berada dalam batas elastis sebelum mencapai kapasitas regangan maksimumnya.

3. *Over reinforced* (BRL)

Regangan beton pada balok *over reinforced* (BRL) hasil eksperimen tercatat sebesar 0,0026038, yang juga lebih rendah dari nilai teoritis yaitu 0,003. Hal ini menunjukkan bahwa beton pada balok ini masih berada dalam batas elastis sebelum mencapai kapasitas regangan maksimumnya.

5.8.2 Regangan Baja

Regangan baja teoritis beragam sesuai dengan jenis penulangan yang digunakan dan menunjukkan seberapa besar deformasi baja sebelum mencapai kondisi kritis. Regangan baja sangat berperan dalam menentukan kapasitas lentur balok.

1. *Under reinforced* (BRK)

Regangan baja pada balok *under reinforced* (BRK) hasil eksperimen tercatat sebesar 0,0058322, mendekati nilai teoritis 0,006. Hal ini menunjukkan bahwa baja pada balok ini mengalami deformasi yang hampir mencapai kondisi plastisitas penuh sebelum kegagalan, mendukung karakteristik kegagalan lentur yang dominan pada balok *under reinforced* (BRK).

2. *Balance reinforced* (BRS)

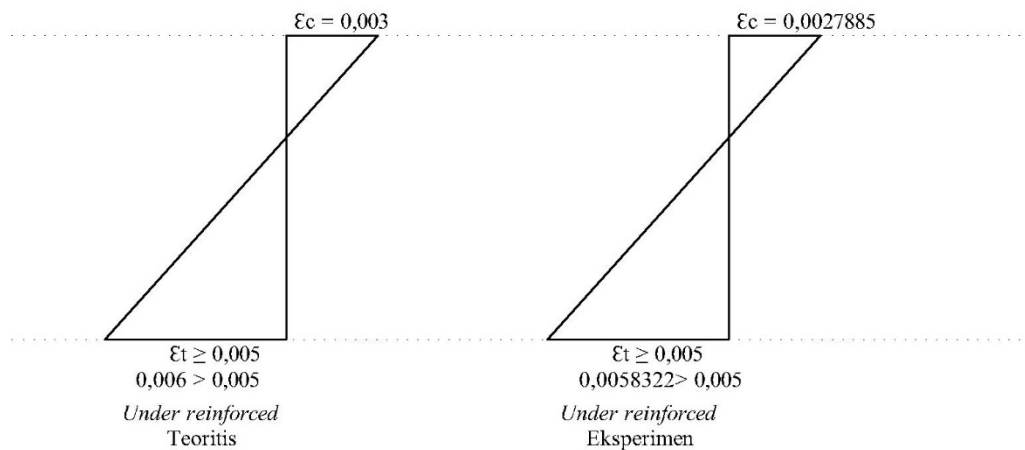
Regangan baja pada balok *balance reinforced* (BRS) hasil eksperimen tercatat sebesar 0,0024488, sedikit lebih tinggi dari nilai teoritis 0,0022. Hal ini menunjukkan bahwa baja pada balok BRS bekerja mendekati kondisi optimal dengan deformasi yang cukup besar sebelum kegagalan.

3. *Over reinforced* (BRL)

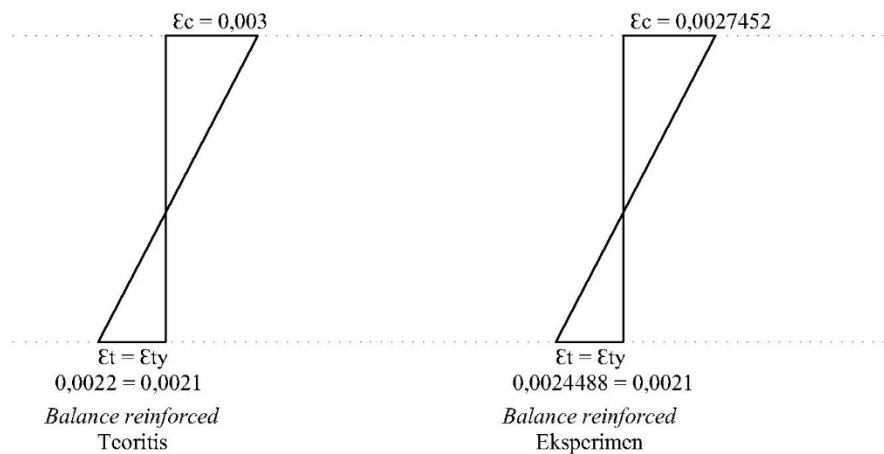
Regangan baja pada balok *over reinforced* (BRL) hasil eksperimen tercatat sebesar 0,0018615, lebih tinggi dibandingkan nilai teoritis 0,00093. Perbedaan ini menunjukkan bahwa baja pada balok BRL berdeformasi lebih besar dari yang diharapkan sebelum kegagalan geser terjadi, meskipun tidak mencapai

plastisitas penuh. Hal ini menegaskan bahwa kegagalan geser mendominasi dan membatasi deformasi penuh baja.

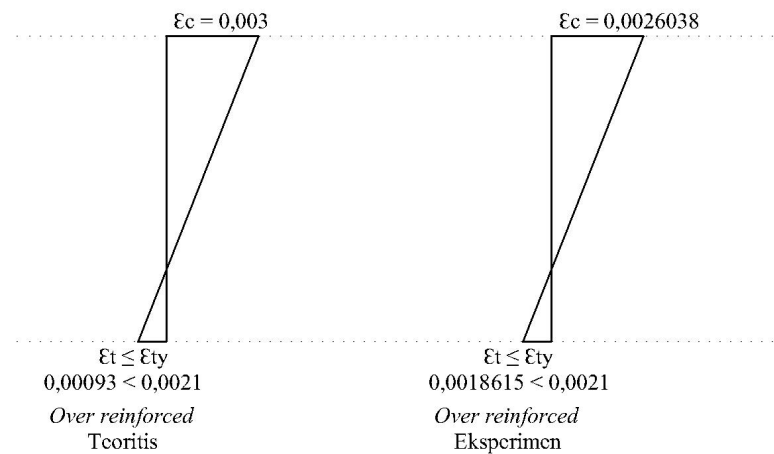
Berikut merupakan rekapitulasi regangan beton dan baja tulangan balok beton bertulang hasil eksperimen dan teoritis yang dapat dilihat pada Gambar 5.15-5.17.



Gambar 5.15 Perbandingan Regangan Balok *Under Reinforced* (BRK) Berdasarkan Hasil Eksperimen dan Teoritis



Gambar 5.16 Perbandingan Regangan Balok *Balance Reinforced* (BRS) Berdasarkan Hasil Eksperimen dan Teoritis



Gambar 5.17 Perbandingan Regangan Balok *Over Reinforced* (BRL) Berdasarkan Hasil Eksperimen dan Teoritis

5.9 Analisis Lendutan Balok Beton Bertulang

Lendutan merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi perilaku struktural balok beton bertulang, terutama dalam menilai kapasitas deformasi dan respons struktur terhadap beban. Analisis lendutan pada balok *under reinforced*, *balance reinforced*, dan *over reinforced* memberikan gambaran mengenai karakteristik deformasi balok saat mengalami pembebanan hingga mencapai kegagalan. Berikut ini adalah analisis lendutan berdasarkan hasil pengujian pada ketiga tipe balok.

5.9.1 Lendutan Balok *Under Reinforced* (BRK)

Lendutan pada balok *under reinforced* (BRK) menunjukkan bahwa balok ini memiliki kapasitas deformasi yang signifikan sebelum mencapai kegagalan. Lendutan awal mulai meningkat tajam seiring dengan penambahan beban hingga mencapai puncak pada beban sekitar 144 kN dengan lendutan 31,377 mm. Setelah mencapai kapasitas maksimum, grafik menunjukkan bagian mendatar yang mengindikasikan bahwa balok mengalami deformasi plastis yang signifikan sebelum terjadi penurunan kapasitas beban. Grafik beban-lendutan balok BRK dapat dilihat pada Gambar 5.7.

Karakteristik grafik pada Gambar 5.7 menunjukkan bahwa balok BRK mendominasi kegagalan lentur, di mana lenturan pada balok BRK mengalami regangan penuh sebelum terjadi keruntuhan. Lendutan yang tinggi sebelum

kegagalan memberikan indikasi bahwa balok ini memiliki perilaku daktail yang baik, memungkinkan struktur untuk memberikan peringatan dini sebelum kegagalan total terjadi.

5.9.2 Lendutan Balok *Balance Reinforced* (BRS)

Lendutan pada balok *balance reinforced* (BRS) menunjukkan pola yang berbeda dengan balok *under reinforced* (BRK). Balok BRS mencapai beban maksimum sekitar 183 kN dengan lendutan sebesar 9,543 mm. Setelah mencapai puncak beban, grafik menunjukkan penurunan beban secara bertahap dengan lendutan yang meningkat mencapai lendutan maksimum sebesar 20 mm. Grafik beban-lendutan balok BRS dapat dilihat pada Gambar 5.9.

Grafik pada Gambar 5.9 mengindikasikan bahwa balok BRS mengalami penurunan kapasitas beban yang lebih bertahap setelah puncak. Hasil pengujian balok BRS menunjukkan kegagalan terjadi secara tiba-tiba, tetapi terdistribusi dengan baik sepanjang proses pembebanan. Hal ini menunjukkan bahwa balok BRS mampu memberikan performa struktural yang stabil dengan deformasi yang terkontrol.

5.9.3 Lendutan Balok *Over Reinforced* (BRL)

Lendutan pada balok *over reinforced* (BRL) memperlihatkan bahwa balok ini memiliki kapasitas beban tertinggi di antara ketiga balok, mencapai puncak beban sekitar 186 kN. Namun, lendutan maksimum yang tercapai hanya sekitar 6,915 mm, dan penurunan beban terjadi secara cepat setelah puncak, menunjukkan kegagalan geser yang mendominasi. Grafik beban-lendutan balok BRL dapat dilihat pada Gambar 5.11.

Grafik pada Gambar 5.11 mengindikasikan bahwa balok BRL memiliki kapasitas yang tinggi tetapi deformasi lentur yang terbatas. Penurunan beban yang cepat setelah puncak menunjukkan bahwa kegagalan terjadi tanpa peringatan yang memadai, berbeda dengan balok *under reinforced* (BRK) yang memiliki perilaku lebih daktail. Kegagalan geser yang mendominasi membatasi kemampuan balok untuk berdeformasi secara plastis, sehingga lebih rentan terhadap kegagalan mendadak dan membuat balok memiliki perilaku getas.

Kondisi ini memberikan implikasi penting dalam desain balok beton bertulang, khususnya terkait dengan pemilihan rasio penulangan yang tepat. Kegagalan geser yang terjadi pada balok *over reinforced* (BRL) menunjukkan bahwa meskipun penambahan tulangan dapat meningkatkan kekuatan lentur, perhatian khusus harus diberikan pada *detailing* tulangan geser untuk mencegah kegagalan awal.

5.10 Implikasi terhadap Desain Struktural

Hasil pengujian balok beton bertulang dengan rasio penulangan yang berbeda menunjukkan bahwa rasio penulangan memiliki dampak signifikan terhadap perilaku geser dan lentur. Desain yang tidak memperhatikan keseimbangan antara kekuatan lentur dan geser dapat menyebabkan kegagalan struktural yang tidak diinginkan, terutama pada balok *over reinforced*. Balok *under reinforced* cenderung mengalami kegagalan lentur, sementara balok *over reinforced* lebih rentan terhadap kegagalan geser yang terjadi lebih awal.

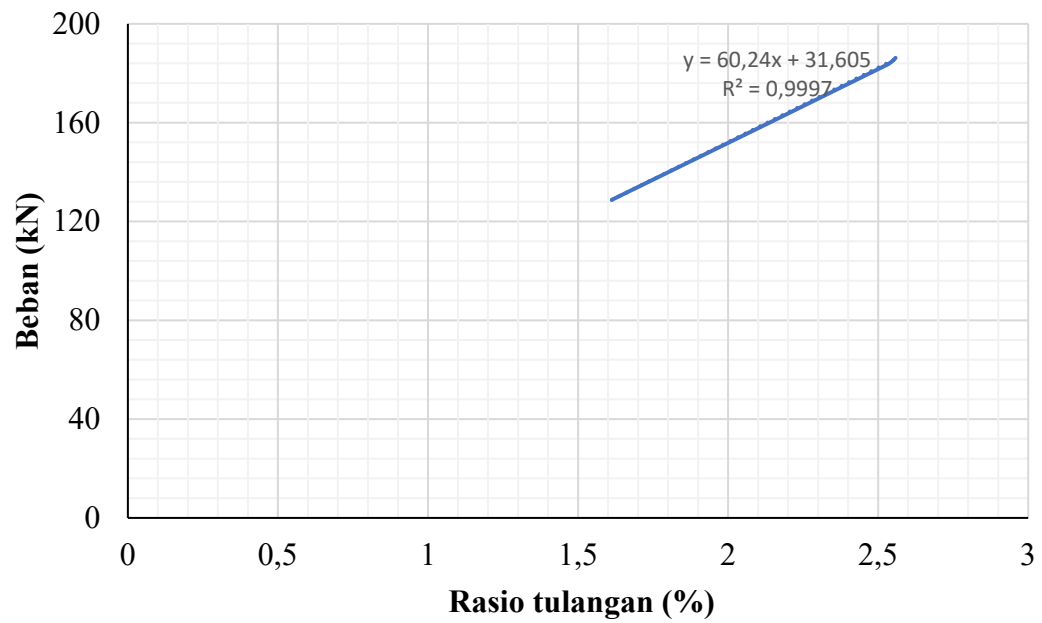
Visualisasi data dari pengujian menunjukkan bahwa balok *under reinforced* mengalami retakan lentur yang berkembang secara bertahap dengan lendutan yang besar pada beban akhir 144,144 kN dan lendutan maksimum 31,377 mm. Pola retakan ini menunjukkan bahwa balok *under reinforced* memberikan peringatan kegagalan yang jelas, dengan deformasi yang signifikan sebelum mencapai kegagalan total. Hal ini penting untuk mempertimbangkan aspek keamanan dalam desain, terutama untuk struktur yang memerlukan peringatan dini sebelum kegagalan. Sebaliknya, balok *over reinforced* mengalami kegagalan geser yang cepat pada beban 198,828 kN dengan lendutan yang hanya mencapai 10,363 mm, sebelum retakan diagonal tajam menyebabkan kegagalan tiba-tiba. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan tulangan tanpa *detailing* geser yang memadai dapat mempercepat kegagalan geser dan membatasi kemampuan balok untuk memanfaatkan kapasitas lentur sepenuhnya.

Moehle dan Mahin (1991) mendukung pentingnya *detailing* geser dalam desain struktural. *Detailing* geser yang tidak memadai pada struktur beton bertulang dapat menyebabkan kegagalan geser yang mendominasi, terutama pada struktur yang mengalami beban dinamis seperti gempa bumi. Dalam penelitiannya

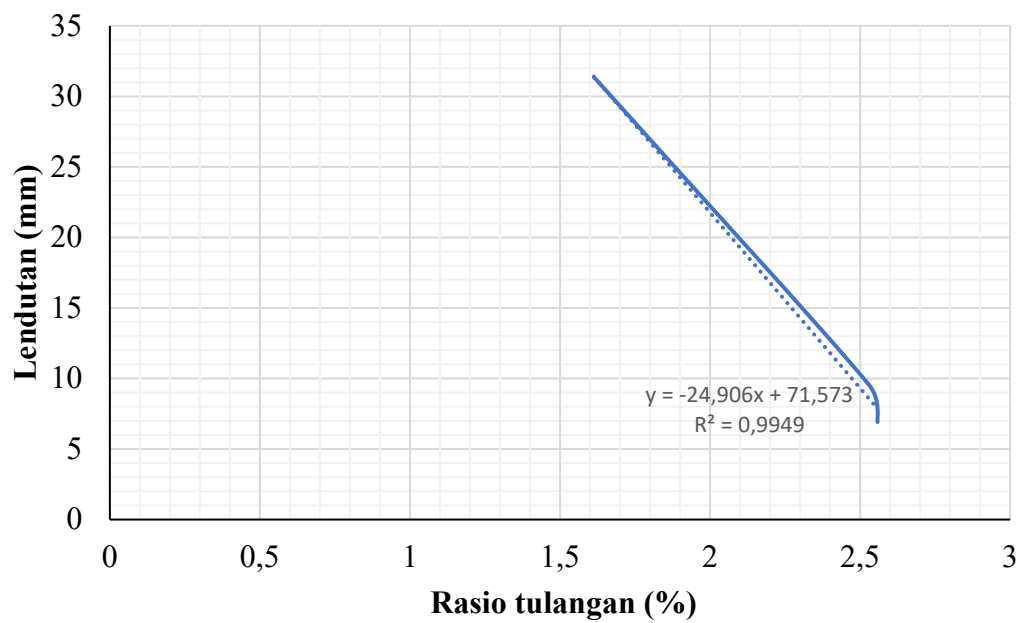
mengungkapkan bahwa penambahan tulangan tekan tanpa memperkuat detailing geser dapat mempercepat kegagalan geser yang tidak diinginkan.

Dengan memperhatikan implikasi ini, perancang struktur dapat membuat keputusan yang lebih tepat dalam memilih rasio penulangan dan memastikan detailing yang memadai untuk menghindari kegagalan yang tidak diinginkan. Hal ini akan meningkatkan kualitas, keamanan, efisiensi struktur, dan memastikan bahwa struktur beton bertulang mampu menahan beban dengan cara yang lebih optimal dan aman. Selain itu, edukasi terhadap perancang dan pekerja konstruksi mengenai pentingnya *detailing* tulangan geser dan dampaknya terhadap stabilitas struktur sangat diperlukan. Pemahaman yang lebih baik tentang perilaku keruntuhan pada balok beton bertulang akan membantu dalam implementasi desain yang lebih aman dan efektif, serta mengoptimalkan struktur untuk menahan beban yang lebih kompleks.

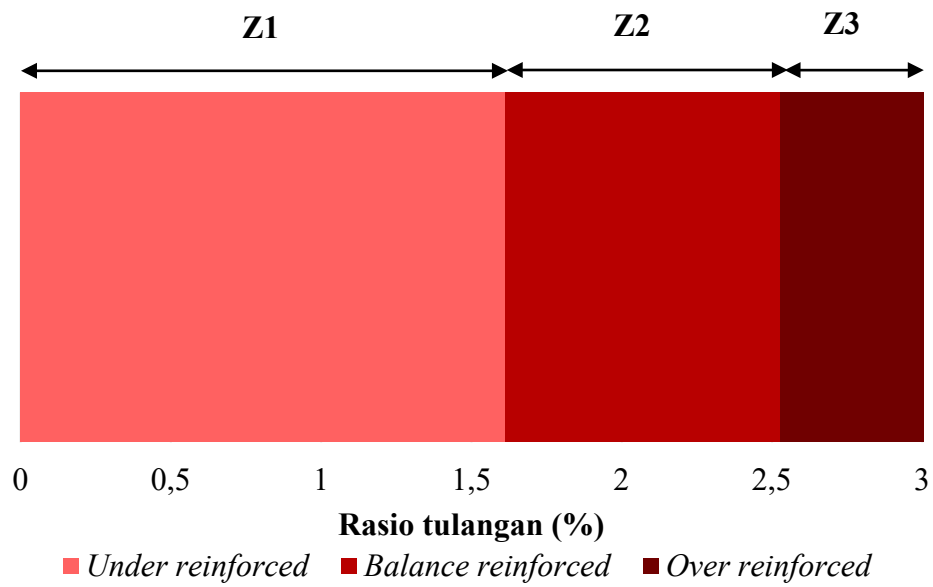
Kesimpulan yang didapatkan dari pembahasan di atas adalah dengan penambahan rasio penulangan dapat meningkatkan beban, akan tetapi lendutannya semakin menurun. Hal ini karena regangan baja tulangan yang semakin kecil seiring dengan penambahan rasio tulangan. Regangan baja tulangan perlu diperhatikan agar balok beton bertulang mencapai regangan lelehnya sebelum mencapai beban maksimumnya, sehingga balok sebelum mengalami keruntuhan terdapat peringatan terlebih dahulu. Keretakan dan keruntuhan pada balok beton bertulang berdasarkan rasio penulangan dapat di klasifikasikan dengan pembagian zona. Pembagian zona berdasarkan rasio penulangan pada penelitian ini hanya untuk desain balok dengan mutu beton rencana (f_c') sebesar 25 MPa dan mutu baja tulangan pokok (f_y) sebesar 420 MPa. Zona 1 (Z1) merupakan zona aman di mana rasio penulangan maksimum sebesar 1,61% atau dalam kondisi *under reinforced*. Pada Zona 2 (Z2) rasio penulangan minimumnya yaitu sebesar 1,61% dan maksimumnya sebesar 2,53% atau dalam kondisi *balance reinforced*, di mana Z2 merupakan zona sedang. Rasio penulangan di atas 2,53% atau dalam kondisi *over reinforced* masuk ke dalam zona 3 (Z3) atau zona rawan. Berikut merupakan grafik yang di dapat dari kesimpulan di atas yang dapat dilihat pada Gambar 5.18-5.20.



Gambar 5.18 Grafik Rasio Tulangan (%) – Beban (kN)



Gambar 5.19 Grafik Rasio Tulangan (%) – Lendutan (mm)



Gambar 5.20 Grafik Zona Berdasarkan Keretakan dan Keruntuhan Pada Balok Beton Bertulang

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh rasio penulangan terhadap perilaku geser dan lentur pada balok beton bertulang, dengan fokus pada hubungan antara beban dan lendutan, perilaku retak, serta interaksi kegagalan geser dan lentur. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, kesimpulan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio penulangan berpengaruh signifikan terhadap hubungan antara beban dan lendutan yang terjadi pada balok beton bertulang. Pada balok *under reinforced* atau rasio tulangan maksimum sebesar 1,61%, lendutan mulai signifikan pada beban 129,780 kN dengan lendutan sebesar 6,886 mm dan terus meningkat hingga mencapai lendutan maksimum 31,377 mm pada beban 144,144 kN. Hal ini menandakan kemampuan balok untuk menahan deformasi besar sebelum kegagalan terjadi, sehingga balok *under reinforced* memiliki perilaku lebih daktail. Balok *balance reinforced* atau rasio tulangan sebesar 2,53% mengalami lendutan awal terjadi sebesar 1,196 mm pada beban 22,932 kN, dan mencapai lendutan maksimum sebesar 9,543 mm pada beban 183,456 kN. Sementara itu, balok *over reinforced* atau rasio tulangan di atas 2,53% menunjukkan lendutan awal yang lebih kecil, hanya sebesar 1,227 mm pada beban 48,888 kN, dan mencapai lendutan maksimum 7,389 mm pada beban 186,228 kN, sehingga balok *over reinforced* memiliki perilaku getas.
2. Perilaku retak pada balok sangat dipengaruhi oleh rasio penulangan yang diterapkan. Pada balok *under reinforced*, retakan lentur pertama kali muncul di zona tarik dengan retakan halus yang berkembang menjadi retakan yang lebih lebar saat mendekati beban maksimum. Pada balok *balance reinforced*, retakan awal yang terjadi yaitu retakan lentur. Seiring bertambahnya beban, retakan kemudian berkembang menjadi retakan geser yang signifikan sebelum

keruntuhan terjadi. Sebaliknya, pada balok *over reinforced*, retakan diagonal tajam muncul lebih awal yang menunjukkan keruntuhan geser yang mendominasi. Pola retak ini mengindikasikan bahwa tanpa detailing geser yang tepat, peningkatan rasio tulangan dapat menyebabkan kegagalan geser lebih dini.

3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rasio penulangan sangat mempengaruhi perilaku keruntuhan pada balok beton bertulang. Balok *under reinforced* cenderung mengalami keruntuhan lentur dengan retakan yang berkembang secara bertahap sebelum terjadi keruntuhan geser. Pada balok *balance reinforced*, interaksi antara geser dan lentur lebih seimbang, dengan keretakan lentur dan geser yang terjadi sepanjang bentang balok. Akan tetapi, keruntuhan yang terjadi yaitu keruntuhan geser. Balok *over reinforced*, meskipun memiliki kapasitas lentur yang tinggi, akan tetapi mengalami keruntuhan geser lebih awal dengan retakan diagonal tajam pada saat mencapai beban maksimumnya. Hal ini membatasi pencapaian kapasitas lentur yang diharapkan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan pemahaman mendalam tentang bagaimana rasio penulangan mempengaruhi hubungan beban-lendutan, perilaku retak, dan perilaku keruntuhan pada balok beton bertulang. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa penambahan rasio tulangan yang tinggi tanpa detailing geser yang tepat dapat mempercepat kegagalan geser dan dapat mengurangi kinerja keseluruhan balok. Detailing tulangan geser yang tepat dan penyesuaian desain untuk memastikan stabilitas dan keselamatan struktur.

6.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan penelitian tentang balok beton bertulang adalah sebagai berikut.

1. Memperhitungkan tulangan geser dalam desain balok beton bertulang dengan mempertimbangkan interaksi antara lentur dan geser secara lebih mendalam. Perhitungan tulangan geser dapat dilakukan dengan memasukkan standar *detailing* tulangan geser sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI).
2. Untuk mengoptimalkan desain balok, penggunaan *software* seperti analisis elemen hingga (*Finite Element Analysis*) sangat dianjurkan. Penggunaan

software ini dapat membantu memprediksi interaksi antara geser dan lentur, serta mengidentifikasi potensi titik kritis di mana keruntuhan dapat terjadi. Dengan cara ini, desain dapat disesuaikan sebelum eksperimen dilakukan, sehingga mengurangi risiko kegagalan.

3. Edukasi kepada pekerja konstruksi tentang pentingnya *detailing* tulangan geser sangat membantu dalam implementasi desain yang lebih aman dan efektif. Pelatihan tambahan mengenai penggunaan teknik dan material yang dapat mengoptimalkan kapasitas geser juga akan memberikan nilai tambah pada kualitas konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. (1990). *Metode Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar*. SNI 03-1968-1990. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (1991). *Metode Pengujian Kuat Tarik Baja Beton*. SNI 07-2529-1991. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (1996). *Metode Pengujian Jumlah Bahan Dalam Agregat yang Lolos Saringan Nomor 200 (0,0075 mm)*. SNI 03-4142-1996. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (1998). *Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara Dalam Agregat*. SNI 03-4804-1998. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2000). *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. SNI 03-2834-2000. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder*. SNI 1974-2011. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal Dengan Dua Titik Pembebanan*. SNI 4431-2011. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). *Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium*. SNI 2493-2011. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2016). *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus*. SNI 1970-2016. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2017). *Baja Tulangan Beton*. SNI 2052-2017. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. SNI 2847-2019. Jakarta.
- Dewi, S. U., & Suandi, A. (2021). Analisa Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan Menggunakan Profil Baja Ringan sebagai Tulangan. *Jurnal Teknika Sains*, 06(1), 25–34.
- Mulyono, T. (2006). *Teknologi Beton*. Penerbit Andi.
- Nur, O. F. (2009). Kajian Eksperimental Perilaku Balok Beton Tulangan Tunggal Berdasarkan Tipe Keruntuhan Balok. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 5(2), 39–2.

- Pranata, Y. A., & Suryoatmono, B. (2010). Pemodelan Numerik Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(1), 42–62. <https://doi.org/10.28932/jts.v6i1.1326>
- Prayoga, A. C., Khomari, M. G., Hardiyanti, S. A., Rifqi, M. G., & Pranowo, D. D. (2023). Perbandingan Kuat Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Jumlah Tulangan Pada Zona Tekan. *Jurnal Teslink: Teknik Sipil dan Lingkungan*, 5(2), 86–95. <https://doi.org/10.52005/teslink.v1i15i1.xxx>
- Setiawan, A. (2008). *Perencanaan Struktur Baja dengan Metode LRFD*. Erlangga.
- Tjitradi, D. (2018). Visualisasi dan Analisis Keruntuhan Balok Beton Bertulang Menggunakan Ansys. *Proceeding Temu Ilmiah Program Magister Teknik Sipil UNLAM*, 1–14.
- Tjitradi, D., & Eliatun. (2014). Permodelan Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang Menggunakan Ansys. *Proceeding Temu Ilmiah Program Magister Teknik Sipil UNLAM*, 1–14.
- Tjokrodinuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Biro Penerbit Teknik Sipil Keluarga Mahasiswa Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.
- Tripamungkas, A. D. (2023). Analisis Tegangan Regangan pada Balok Beton Bertulang Menggunakan Metode Elemen Hingga. *IJCEE*, 9(2), 34–37.
- Wicaksono, D. A., Suryanita, R., & Djauhari Zulfikar. (2019). Studi Eksperimental Balok Beton Bertulang Dengan dan Tanpa Sengkang. *Jurnal Sainstek STT Pekanbaru*, 7(1), 33–39.
- Program Studi Teknik Sipil. (2022). *Pedoman Tugas Akhir*. Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar Alat yang Digunakan



Gambar L-1.1 Concrete Mixer



Gambar L-1.2 Kerucut Abrams



Gambar L-1.3 Alat Uji Tekan Beton



Gambar L-1.4 Mesin Saringan Agregat



Gambar L-1.5 Gerobak Angkut



Gambar L-1.6 Ember



Gambar L-1.7 Sekop Material



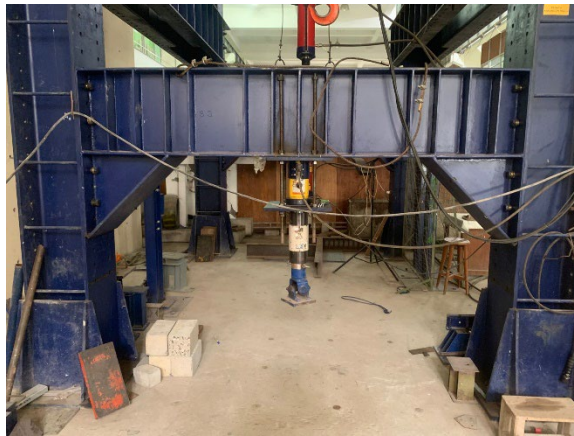
Gambar L-1.8 Timbangan



Gambar L-1.9 Oven



Gambar L-1.10 Bekisting



Gambar L-1.11 *Frame Load*



Gambar L-1.12 Beban 2 Titik

Lampiran 2 Gambar Bahan yang Digunakan



Gambar L-2.1 Semen



Gambar L-2.2 Agregat Halus



Gambar L-2.3 Agregat Kasar



Gambar L-2.4 Baja Tulangan