TUGAS AKHIR

HUBUNGAN BEBAN DAN LENDUTAN TERHADAP BALOK BETON BERTULANG BERONGGA

Disusun oleh

RISMAWATI RAZAK

4518041095

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS BOSOWA

MAKASSAR

2023

UNIVERSITAS BOSOWA

FAKULTAS TEKNIK

Jalan Urip Sumoharjo Km. 4 Gd. 2 Lt 6
Makassar - Sulawesi Selatan 90231
Telp. 0411 452 901 - 452 789 ext. 116
Faks. 0411 424 568
http://www.universitasbosowa.ac.id

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

LEMBAR PENGAJUAN UJIAN TUTUP

Judul : "Hubungan Beban dan Lendutan Terhadap Balok Beton Bertulang Berongga"

Disusun dan diajukan oleh :

Nama : RISMAWATI RAZAK

STB : 45 18 041 095

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Sipil / Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar

Telah disetujui oleh Komisi Pembimbing :

Mengetahui,

Pembimbing 1 : Dr.Ir. H. Syahrul Sariman, M.T (.....)

Pembimbing 2 : Ir.Eka Yuniarto .S.T.,M.T (.....)

Dekan Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar	Ketua Program Studi Teknik Sipil FT. Universitas Bosowa
(Dr. H. Nasrullah, ST, MT.IAI) NIDN 0001056502	**(Dr. Ir.Andi Rumpang MT.)** NIDN 0001056502

UNIVERSITAS BOSOWA

FAKULTAS TEKNIK

Jalan Urip Sumoharjo Km. 4 Gd. 2 Lt 6
Makassar – Sulawesi Selatan 90231
Telp. 0411 452 901 – 452 789 ext. 116
Faks. 0411 424 568
http://www.universitasbosowa.ac.id

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

HALAMAN PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar A-175/FT/UNIBOS/III/2023 tanggal 15 Februari 2023, perihal Pengangkatan Panitia dan Tim Penguji Tugas Akhir, maka pada:

Hari/Tanggal : Sabtu / 18 Februari 2023

Tugas Akhir Mahasiswa :

N a m a : **RISMAWATI RAZAK**

No.Stambuk : **45 18 041 095**

Judul Tugas Akhir : **"Hubungan Beban dan Lendutan Terhadap Balok Beton Bertulang Berongga "**

Telah diterima dan disahkan oleh Panitia Tugas Akhir Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar setelah dipertahankan di depan Tim Penguji Ujian Sarjana Strata Satu (S-1) untuk memenuhi salah satu syarat guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar.

Tim Penguji Tugas Akhir

Ketua (Ex.Officio)	:	**Dr. Ir. H. Syahrul Sariman, MT**	(.....)
Sekretaris (Ex. Officio)	:	**Ir. Eka Yuniarto, ST. MT**	(.....)
Anggota	:	**Ir. Arman Setiawan, ST. MT**	(.....)
		Ir. Fauzy Lebang, ST. MT	(.....)

Makassar, 18 Februari 2023

Mengetahui :

Dekan Fakultas Teknik
Univ. Bosowa Makassar

Dr. H. Nasrullah, ST. MT. IAI
NIDN. 09 080773 01

Ketua Program Studi /Jurusan Sipil
Univ. Bosowa Makassar

Dr. Ir. A. Rumpang Yusuf, MT
NIDN. 00 010565 02

SURAT PERNYATAAN

KEASLIAN DAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : **RISMAWATI RAZAK**

Stambuk : **45 18 041 095**

Program Studi : **Teknik Sipil**

Judul : **HUBUNGAN BEBAN DAN LENDUTAN TERHADAP BALOK BETON BERTULANG BERONGGA**

Mengatakan dengan sebenarnya bahwa

1. Tugas akhir yang saya tulis ini merupakan hasil karya saya sendiri dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya tidak keberatan apabila Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa menyimpan, mengalihmediakan/mengalihformatkan, mengelola dalam bentuk data base, mendistribusikan, dan menampilkan untuk kepentingan akademik.
3. Bersedia dan menjamin untuk menanggung secara pribadi tanpa melibatkan Pihak Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa dari semua bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran hak cipta dalam tugas akhir ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Makassar, Maret 2023

Yang mem

METERAI TEMPEL

8E9[illegible]0AKX349115625

Rism[illegible] Razak

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kekuatan dan Rahmat yang berlimpah sehingga Penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul ***"Hubungan Beban dan Lendutan Terhadap Balok Beton Bertulang Berongga ".*** Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang dilakukan di Laboratorium Bahan dan Struktur Universitas Bosowa. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan – bantuan pihak lain dalam memberi bantuan dan bimbingan, sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penyusunan Tugas Akhir. Untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada :

1. Allah SWT tempat meminta dan memohon pertolongan.
2. Kedua orang tua saya Ibu Nurani yang tercinta dan Bapak Abdul Razak yang telah memberikan dukungan moral dan materi yang tidak terhitung jumlahnya, sehingga Tugas Akhir ini dapat rampung seperti saat ini.
3. Bapak Dr. Ir. H. Syahrul Sariman, MT Selaku Ketua kelompok dosen Bidang Kajian Struktur & Geoteknik, dan juga Sebagai Dosen Pembimbing I saya, yang sudah banyak meluangkan waktunya untuk

membimbing dan mengarahkan saya sehingga terselesainya penyusunan Tugas akhir ini.

4. Bapak Ir. Eka Yuniarto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah bersedia meluangkan waktu untuk membimbing dan mengarahkan saya hingga penyususunan Tugas Akhir ini terselesaikan.
5. Bapak Dr. H. Nasrullah, ST. MT. IAI selaku Dekan Fakultas Teknik, Para Wakil Dekan, serta staff Fakultas Teknik Universitas Bosowa
6. Bapak Dr. Ir. A. Rumpang Yusuf, MT. Selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil beserta staff dan seluruh dosen di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa.
7. Teman – Teman Seangkatan Teknik Sipil Universitas Bosowa 2018.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa pada penulisan Tugas Akhir ini masih banyak terdapat kekurangan dan kesalahan, oleh sebab itu penulis mohon maaf dan mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak .Semoga penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun rekan-rekan mahasiswa lainnya dimasa yang akan datang dan semoga segala bantuan dari semua pihak dapat bernilai ibadah disisi Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

Makassar, 2023

Rismawati Razak

Hubungan beban dan lendutan terhadap balok beton bertulang berongga

Rismawati Razak [1],Syahrul Sariman [2], Eka Yuniarto [3]
[1] Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bosowa Makassar
[2] Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bosowa Makassar
[3] Jurusan Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bosowa Makassar
Rismawati2763@gmail.com

Abstract.*When a beam structure is loaded, it is held in compression by concrete while the tension area is fully carried by reinforcing steel, so that the concrete cross-section in the tension section below the neutral line is not considered to be carrying the load. So in the concrete tension area filled with plastic bottles, in order to obtain a lighter structure, reduce the volume of concrete/cement and reduce environmental pollution. In this study used reinforced concrete beams with dimensions of 175 x 350 x 3200 mm. The test object consists of 3 (three) namely 1 normal beam and 2 hollow beams with the same length, namely 2640 mm and differentiated according to height, namely 120 mm (2 layers of bottles)-BR2 and 180 mm (3 layers of bottles)-BR3. The test results show that the load-deflection relationship is relatively the same. This shows that the voids in the pure bending moment area provide relatively the same stiffness as the normal beam stiffness. The crack patterns for all test results show that normal and hollow beams experience flexural failure.*

Abstrak.*Suatu struktur balok pada saat mendapatkan beban, di daerah tekan ditahan oleh beton sedangkan daerah tarik sepenuhnya dipikul oleh besi tulangan, sehingga pada penampang beton pada bagian tarik dibawah garis netral yang tidak diperhitungkan memikul beban. Maka di daerah tarik beton yang diisi dengan botol plastik, agar diperoleh struktur yang lebih ringan, mengurangi volume beton/semen dan mengurangi pencemaran lingkungan. Dalam penelitian ini digunakan balok beton bertulang dengan dimensi 175 x 350 x 3200 mm. Benda Uji terdiri dari 3 (tiga) yaitu 1 balok normal dan 2 balok berongga dengan panjang yang sama yaitu 2640 mm dan dibedakan menurut tingginya yakni 120 mm (2 lapis botol)-BR2 dan 180 mm (3 lapis botol)-BR3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Hubungan beban – lendutan sampai pada kondisi relatif sama. Hal ini menunjukkan bahwa rongga pada daerah momen lentur murni memberikan kekakuan yang relatif sama dengan kekakuan balok normal.Pola retak untuk semua hasil pengujian menunjukkan balok normal dan berongga mengalami keruntuhan lentur.*

Kata Kunci: Beton bertulang berongga, lendutan, lentur

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

HALAMAN PENGESAHAN ii

LEMBAR PENGAJUAN UJIAN TUTUP iii

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN iv

KATA PENGANTAR v

ABSTRAK vi

DAFTAR ISI viii

DAFTAR TABEL x

DAFTAR GAMBAR xii

DAFTAR NOTASI xiii

BAB I PENDAHULUAN I-1

1.1. Latar Belakang I-1

1.2. Rumusan Masalah I-3

1.3. Tujuan Penelitian I-4

1.5. Manfaat Penelitian I-4

1.4. Batasan Masalah I-4

1.5. Sistematika Penulisan I-5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA II-1

2.1. Beton II-1

2.2. Balok Beton Bertulang II-1

2.3. Pelat Beton Bertulang II-9

2.4. Kuat Tekan Beton II-11

2.5. Kuat Lentur II-14

2.6. Lendutan.....II-17

2.7. Kekakuan dan Daktilitas Benda Uji II-18

2.7.1 Kekakuan Lentur.....II-18

2.7.2 Daktilitas II-19

2.8. Penelitian Sebelumnya II-20

2.9. Penggunaan Plastik Pada Balok Beton Bertulang.....II-39

BAB III METODE PENELITIAN.....III-1

3.1. Jenis Penelitian.....III-1

3.2. Waktu dan Tempat Penelitian.....III-1

3.3. Pengadaan Bahan dan Alat III-1

3.4. Metode Pelaksanaan III-2

3.5 Bagan Alur Penelitian III-3

3.6. Notasi dan Jumlah Sampel III-4

3.7. Dimensi Benda Uji III-5

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... IV-1

4.1. Hubungan Beban dan Lendutan balok normal dan variasi IV-1

4.2. Kekakuan Balok Uji..... IV-2

4.3. Daktilitas Balok Uji IV-3

4.4. Pola Retak Balok IV-5

BAB V PENUTUP IV-1

5.1. Kesimpulan..... V-1

5.2. Saran..... V-2

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR TABEL

Nomor Halaman

1. Lendutan ijin maksimum II-17
2. Spesifiksi benda uji pelat II-24
3. Hasil eksperimen bahan terhadap lendutan tengah bentang pelat ..II-25
4. Lendutan Tengah bentang pelat hasil eksperimen II-27
5. Data Variasi, Notasi dan Jumlah benda uji II-31
6. Berat dan kemampuan memikul beban II-32
7. Hubungan beban dan lendutan pada setiap kondisi II-33
8. Regangan beton pada beban ultimate II-34
9. Perhitungan Rekapitulasi Dektalias pelat.....II-38
10. Kekauan Eksperimen dan kekauan analisis II-39
11. Jenis plastik dalam kategori Thermoplastic II-40
12. Variasi benda uji.....III-4
13. Hubungan beban dan lendutan IV-1
14. Perbandingan beban (P) secara teoritis dan uji eksperimen..... IV-2
15. Perbandingan Lendutan secara teoritis dan uji experimen IV-4
16. Perhitungan nilai kekakuan balok uji..... IV-5
17. Nilai Daktilitas..... IV-7

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Tegangan tekan benda uji beton II-4

Gambar 2. Contoh distribusi tegangan dan regangan pada beban kecil II-5

Gambar 3. Contoh distribusi tegangan dan regangan pada beban sedang II-6

Gambar 4. Contoh distribusi tegangan dan regangan pada beban unlimit II-6

Gambar 5. Blok Tegangan Ekuivalen..... II-8

Gambar 6. Retak lentur sebelum runtuh II-9

Gambar 7. Pola Pembebanan II-15

Gambar 8. Kurva Beban Terhadap Lendutan II-18

Gambar 9. Grafik Daktalitas (Paulay and Pristley, 1992) II-19

Gambar 10. Tahapan pengujian Rahardyanto II-21

Gambar 11. Skema Pengujian..... II-22

Gambar 12. (a) Diagram perbandingan beban retak awal hasil analitis dan eksperimen (b) Diagram perbandingan beban retak awal pelat hasil eksperimen..... II-26

Gambar 13. Diagram perbandingan beban maksimum hasil analitis dan eksperimen II-26

Gambar 14. Detail Penampang Balok..... II-28

Gambar 15. Detail Penulangan Balok..... II-29

Gambar 16. Grafik hubungan beban-lendutan..... II-32

Gambar 17. Hubungan beban dan regangan tulangan II-34

Gambar 18. Hubungan beban dan regangan beton pada sisi atas Balok..... II-35

Gambar 19. Setting Sendi dan Frame Load..... II-37

Gambar 20. Hubungan beban dan lendutan pada retak awal II-38

Gambar 21. Kekauan Eksperimen dan Analisa pada PP,PB-1 dan PB-2 ..... II-39

Gambar 22. Kemasan plastik PETE atau PET II-41

Gambar 23. Sketsa benda uji balok normal (BN) III-5

Gambar 24. Sketsa benda uji balok berongga 2 lapis botol (BR2) III-6

Gambar 25. Sketsa benda uji balok berongga 3 lapis botol (BR3) III-6

Gambar 26. Sketsa Pembebanan III-8

Gambar 27. Grafik hubungan beban dan lendutan terhadap benda uji IV-1

Gambar 28 Grafik perbedaan beban teoritis dengan beban uji eksperimen IV-3

Gambar 29. Grafik perbandingan lendutan maksimum teoritis dengan uji eksperimen IV-5

Gambar 30. Grafik nilai kekakuan balok IV-6

Gambar 31. Grafik nilai daktilitas ..... IV- 8

Gambar 32. Pola Retak Benda Uji IV-9

DAFTAR NOTASI

F'c : Kuat Tekan Beton

Fy : Kuat Tarik Baja Tulangan

Δ h : Lendutan Maksimum

L : Panjang Bentang

K : Kekakuan

Pcr : Beban Saat Retak Awal

Δ cr : Lendutan Saat Retak Awal

μm : Daktilitas Maksimum

Δm : Lendutan Maksimum

Δy : Lendutan Leleh

Sy : Beban Leleh

Su : Beban Puncak

PET : Polyester Thermplastic

b : Lebar balok

BN : Balok Normal

BR2 : Balok Rongga, Panjang rongga 12 botol, tinggi 2 lapis botol

BR3 : Balok Rongga, Panjang rongga 12 botol, tinggi 3 lapis botol

P : Beban Statis

Pcr : Beban Saat Retak Awal

Py : Beban pada saat terjadinya leleh tulangan

Pu : Beban pada saat penampang runtuh

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton ialah bahan bangunan yang sudah lama diketahui dan digunakan secara luas oleh masyarakat. Hal ini disebabkan karena beton mempunyai kelebihan dibandingkan dengan bahan lainnya, diantaranya harganya yang relatif murah, mudah dalam pengerjaan, dan perawatannya, mudah dibentuk sesuai kebutuhan, tahan terhadap cuaca, tahan terhadap korosi, dan lebih tahan api. Oleh karena itu, beton sebagai bahan bangunan memiliki peranan yang penting dalam kehidupan masyarakat dan seringkali mempengaruhi suasana hidup bagi setiap individu.

Beton terbentuk dari campuran semen, air dan agregat yang akan mengeras melalui proses kimiawi. Semen dan air akan membentuk pasta yang mengikat agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil). Seiring perkembangan infrastruktur yang pesat, material beton seringkali banyak diambil dari alam secara berlebihan tidak melihat dan lupa akan dampak yang timbul, jika terjadi pengambilan berlebihan akan terjadi kerusakan lingkungan dan ekosistem alam. Dari meningkatnya penggunaan material beton, terdapat dua aspek penting yang harus diperhatikan yakni durabilitas (keawetan) material beton itu sendiri dan gangguan lingkungan akibat produksi semen Portland. Dalam proses produksi industri semen sebagian besar menggunakan bahan bakar fosil jadi menimbulkan

dampak gas rumah kaca, disamping itu dalam proses produksi industri semen juga memberikan dampak fisik secara langsung baik pada pekerja dan masyarakat sekitar, yaitu dampak tingkat kebisingan serta getaran mekanik dari rangkaian proses poduksi semen

Namun beton mempunyai kelemahan yaitu kuat tariknya yang rendah sehingga perlu dikombinasikan dengan baja tulangan. Kelemahan yang lain adalah berat sendirinya yang cukup besar sehingga perlu diupayakan inovasi struktur dengan mengurangi berat sendirinya. Elemen struktur beton bertulang dengan rongga merupakan struktur yang cukup efektif untuk mengurangi berat sendirinya. Penggunaan material ringan sebagai bahan pembentuk struktur akan mengurangi berat total dari suatu bangunan. Seperti diketahui bahwa penggunaan bahan bangunan dengan massa rendah akan menjadikan berat struktur menurun yang akan membawa berbagai macam keuntungan.

Salah satu limbah/sampah yang banyak diproduksi adalah botol plastik. Plastik merupakan bahan anorganik buatan yang tersusun dari bahan-bahan kimia yang cukup berbahaya bagi lingkungan. Limbah dari plastik ini sangatlah sulit untuk diuraikan secara alami. Maka dari itu akan diadakan penelitian mengenai pemanfaatan limbah dari botol plastik, khususnya jenis PET (*Poly Ethylene Terepthalate*) sebagai rongga pada balok beton bertulang berongga.

Adapun perkembangan teknologi alternatif yang pernah dilakukan adalah dengan menggunakan pelat beton berongga. Beberapa peneliti

yang telah mengkaji mengenai pelat beton berongga antara lain pada tahun 2005 Aldejohann dan Schnellencbach melakukan penelitian *Biaxial Hollow Slab* dimana kedua jenis pelat tersebut memiliki rongga pada beton di daerah tarik sehingga mengurangi berat sendiri. Pada tahun sebelumnya (1990), Joergen Breuning menemukan pelat berongga bola yang dinamakan *Bubble Deck*. Pada tahun 2009 Kris Bayu Aji dan Andry Soeharno melukukan penelitian pelat berongga bola dengan sistem cor di tempat (*cast in situ*). Pada tahun 2013 La Ode Abdul Majid Muizu dan Dyah Widiastri Intansari melakukan penelitian pelat beton bertulang berongga satu arah dengan sIstem cor di tempat (*cast in situ*) dengan rongga memanfaatkan botol bekas kemasan air minum.

Berdasarkan uraian diatas maka disusunlah tugas akhir dengan judul **"HUBUNGAN BEBAN DAN LENDUTAN TERHADAP BALOK BETON BERTULANG BERONGGA**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang dikemukakan di atas, maka dirumuskan permasalahan penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana perilaku lentur penampang beton bertulang berongga, berkaitan dengan hubungan beban-lendutan,kekakuan dan daktilitas?
2. Bagaimana pola retakan yang terjadi pada balok beton bertulang berongga?

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk menentukan perilaku lentur penampang beton bertulang berongga, berkaitan dengan hubungan beban-lendutan,kekakuan dan daktilitas.
2. Untuk menganalisa pola retakan yang terjadi pada balok beton bertulang berongga

1.3.2 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Memberi informasi mengenai hubungan antara beban dan lendutan beton bertulang berongga menggunakan botol plastik bekas.
2. Dapat dijadikan bahan referensi mengenai persentase botol plastik bekas sebagai rongga pada beton
3. Mengurangi pencemaran lingkungan dengan pemanfaatan limbah sebagai bahan dalam pembuatan beton bertulang berongga.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada hal – hal berikut:

1. Benda uji terdiri dari 1 balok normal, 1 balok dengan penambahan 2 susun botol plastik daan 1 balok dengan penambahan 3 susun botol plastik.
2. Pembuatan benda uji dengan cara cor ditempat (*cast in situ*).

3. Pengamatan hanya terbatas pada perilaku lendutan dan retak, sampai mencapai beban maksimum.

4. Cetakan benda uji dengan ukuran lebar 17,5 cm, tinggi 35 cm dan panjang 3,20 m. Semen yang digunakan adalah semen portland produksi PT. Semen Bosowa

5. Mutu beton yang direncanakan yaitu fc' 25 Mpa

6. Pengujian dilakukan setelah beton berumur 28 hari.

7. Pencampuran bahan dilakukan dengan menggunakan alat mixer agar tercampur dengan homogen.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini akan diuraikan dalam sistematika penulisan yang dibagi menjadi lima bab pokok bahasan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan tentang latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan secara singkat.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Menyajikan kerangka teori kenseptual mengenai penelitian secara singkat dan gambaran umum dari sampel penelitian yang akan diuji.

BAB III METODE PENELITIAN

Membahas tentang penelitian yang meliputi: tahapan penelitian, penentuan dimensi dan bahan penelitian, lokasi dan waktu penelitian, pengujian yang dilakukan, pengumpulan data, serta variable penelitian.

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

Menyajikan hasil analisis perhitungan data – data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang dilaksanakan.

BAB V PENUTUP

Kesimpulan dari hasil penelitian yang dilakukan dan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton adalah bahan yang sering digunakan di bidang konstruksi dikarenakan mudah dibuat dan di bentuk serta harganya yang relatif lebih murah daripada bahan konstruksi lainnya.

Menurut Taufik dan Sabariman (2013) beton merupakan fungsi dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan semen hidrolik (*portland cement*), agregat kasar (kerikil), agregat halus (pasir), air dan bahan tambah (*admixture atau additive*). Untuk mengetahui perilaku elemen gabungan (bahan-bahan penyusun beton). Kata beton atau *concrete* berasal dari bahasa latin concretus berarti tumbuh bersama atau menggabungkan menjadi satu. Beton adalah bahan komposit yang cukup rumit, terdiri dari agregat yang berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*) dan pasta semen yang berfungsi sebagai bahan pengikat (*binder*). Sering ditambahkan bahan kimia (*admixture*) untuk memperbaiki atau mengubah sifat-sifatnya sesuai dengan yang diinginkan.

2.2 Balok Beton Bertulang

Beton dihasilkan dari sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi sejumlahmaterial pembentuknya. Beton merupakan campuran bahan-bahan agregat halus dan agregat kasar, yaitu pasir, batu, batu pecah, atau bahan semacam lainnya, dengan menambahkan bahan perekat semen dan air sebagai bahan yang membantu terjadinya reaksi kimia

selama proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung (Dipohusodo, 1994). Dari berbagai hasil percobaan terhadap kekuatan tarik maupun tekan dari beton, terlihat bahwa kekuatan tarik beton sangat kecil dibandingkan kekuatan tekannya. Sehingga dalam analisis atau desain, kekuatan tarik beton diabaikan dan beton dianggap hanya dapat menahangaya tekan. Karena karakteristik ini, maka struktur beton memerlukan material perkuatan yang dapat menahan gaya tarik.

Baja merupakan material yang kuat terhadap tarik sehingga baja seringkali dipakai untuk perkuatan tarik dari struktur beton. Beton yang diperkuat dengan menggunakan tulangan baja ini disebut sebagai beton bertulang. Dengan penggunaan struktur beton bertulang, gaya tekan yang dialami struktur akibat pembebanan akan ditahan oleh beton karena kuat tekannya yang tinggi, sedangkan gaya tarik yang timbul seluruhnya ditahan oleh baja tulangan karena terbukti bahwa kekuatan tarik dan tekan baja adalah sama (L. Wahyudi dan Sjahril A. Rahim, 1997).

Pada dasarnya beton bertulang merupakan gabungan logis dari dua jenis bahan/ material yaitu beton polos dan tulangan baja. Beton polos merupakan bahan yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi akan tetapi memiliki kekuatan tarik yang rendah. Sedangkan tulangan baja akan memberi kekuatan tarik yang besar sehingga tulangan baja akan memberi kekuatan tarik yang diperlukan. Dengan adanya kelebihan masing-masing elemen tersebut, maka konfigurasi antara beton dan tulangan baja diharapkan dapat saling bekerjasama dalam menahan gaya-gaya yang

berkerja dalam struktur tersebut, dimana gaya tekan ditahan oleh beton, dan tarik ditahan oleh tulangan baja. Baja dan beton dapat bekerja sama atas dasar beberapa hal :

1. Lekatan (*bond*) yang merupakan interaksi antara tulangan baja dengan beton di sekelilingnya, yang akan mencegah slip dari baja relatif terhadap beton.

2. Campuran beton yang memadai yang memberikan sifat anti resap yang cukup dari beton untuk mencegah karat baja.

3. Angka kecepatan muai yang relatif serupa menimbulkan tegangan antara
baja dan beton yang dapat diabaikan di bawah perubahan suhu udara.

Struktur beton bertulang banyak digunakan untuk elemen-elemen balok, kolom, dan slab. Agar struktur beton bertulang dapat menahan lentur akibat beban yang bekerja tanpa terjadi kegagalan, maka perlu dilakukan analisis dan desain terhadap kuat lentur struktur beton bertulang.

Menurut Dipohusodo (1994), dalam kaitannya dengan beban yang dipikul oleh sebuah balok beton bertulang, digunakan beberapa asumsi, yakni:

a) Bidang penampang rata sebelum terjadi lenturan akan tetap rata setelah mengalami lenturan. Ini merupakan prinsip yang dikemukakan

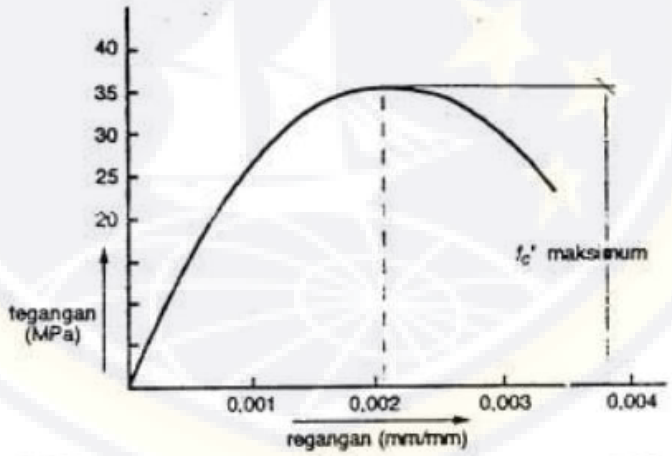
oleh Bernoulli yang menyiratkan bahwa distribusi regangan sebanding atau linier pada berbagai titik dalam penampang.

b) Baik tulangan baja maupun beton berlaku hukum Hooke, dalam artian nilai tegangan sebanding dengan regangannya sampai batas pembebanan tertentu.

c) Beton tidak diperhitungkan menahan gaya tarik. Seluruh gaya Tarik dibebankan pada tulangan baja.

d) Batang tulangan baja terlekat sempurna dengan beton, sehingga tidak terjadi penggelinciran

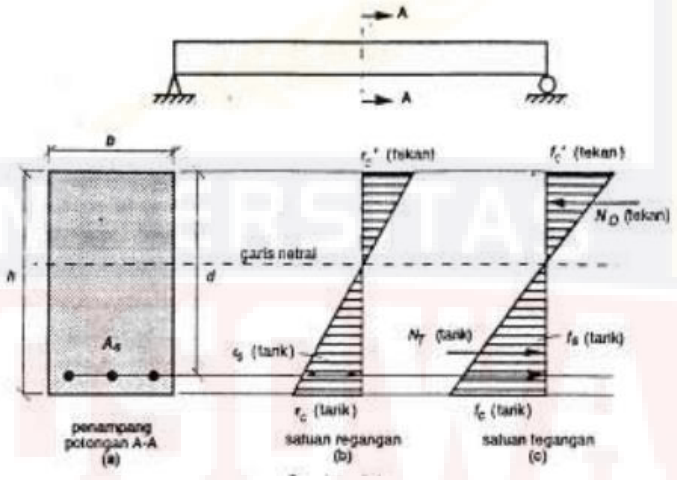
Menurut (Dipohusodo, 1994, hal. 10) nilai kuat tekan dan tarik beton tidak berbanding lurus, setiap usaha perbaikan mutu kekuatan tekan hanya di sertai peningkatan kecil nilai kuat tariknya.



Gambar 2.1 Tegangan tekan benda uji beton

sumber : (Dipohusodo, 1994, hal. 7)

Nilai kuat tekan dan tarik bahan beton tidak berbanding lurus, setiap usaha perbaikan kekuatan tekan hanya di sertai peningkatan kecil nilai kuat tariknya. Suatu perkiraan kasar dapat di pakai, bahwa nilai kuat tarik bahan beton normal hanya berkisar antara 9% - 15% dari kuat tekannya. Istimawan Dipohusodo, (1996:10).

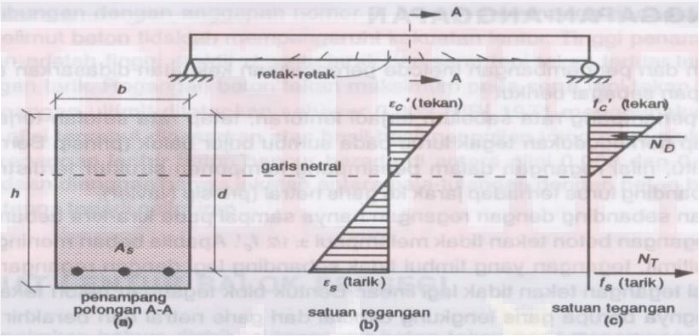


Gambar 2.2 Contoh distribusi tegangan dan regangan pada beban kecil

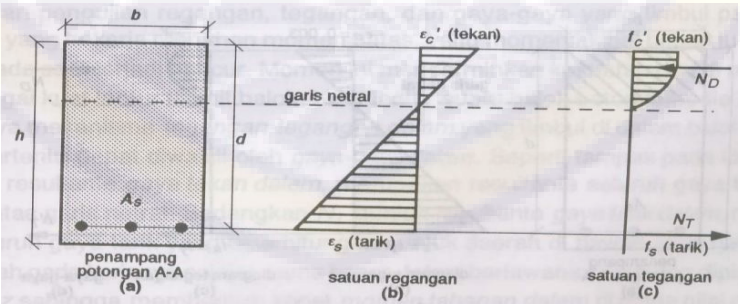
Sumber : (Dipohusodo, 1996, hal. 26)

Pada beban kecil, dengan menganggap belum terjadi retak beton, secara bersama-sama beton dan baja tulangan bekerja menahan gaya-gaya di mana gaya tekan ditahan oleh beton saja. Distribusi tegangan akan tampak seperti pada Gambar 2 dimana distribusi tegangannya linear, bernilai nol pada garis netral dan sebanding dengan regangan yang terjadi. Kasus demikian ditemui bila tegangan maksimum yang timbul pada serat tarik masih cukup rendah, nialinya masih di bawah modulus of rupture.

Pada beban sedang, kuat tarik beton dilampaui dan beton mengalami retak rambut seperti tampak pada Gambar 4. Karena beton tidak dapat meneruskan gaya tarik melintasi daerah retak, karena terputus-putus, baja tulangan akan mengambil alih memikul seluruh gaya tarik yang timbul. Distribusi tegangan untuk penampang pada atau dekat bagian yang retak tampak seperti pada Gambar 5.2, dan hal yang demikian diperkirakan akan terjadi pada nilai tegangan beton sampai dengan $1/2f_c'$. Pada keadaan tersebut tegangan beton tekan masih dianggap bernilai sebanding dengan nilai regangannya.



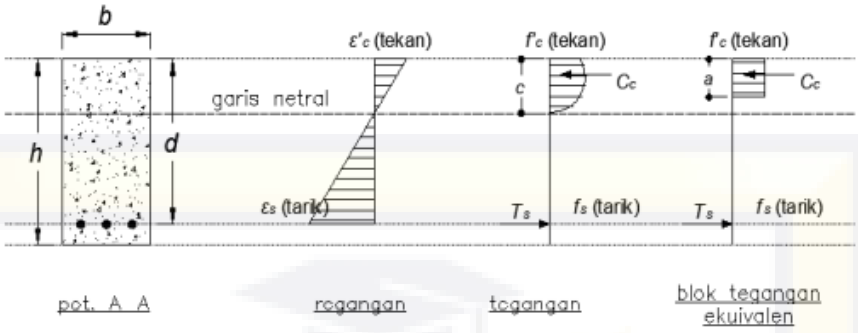
Gambar 2.3. Contoh distribusi tegangan dan regangan pada beban sedang



Gambar 2.4. Contoh distribusi tegangan dan regangan pada beban unlimit

Pada beban yang lebih besar lagi, nilai regangan serta tegangan tekan akan meningkat dan cenderung untuk tidak lagi sebanding antara keduanya, dimana tegangan beton tekan akan membentuk kurva non linear. Kurva tegangan di atas garis netral (daerah tekan) berbentuk sama dengan kurva tegangan-regangan beton seperti tergambar pada Gambar 4. Pada Gambar 4. dapat dilihat model distribusi tegangan dan regangan yang timbul pada kondisi pembebanan mendekati pembebanan ultimit. Bentuk distribusi tegangan aktual yang melengkung ini tentunya menimbulkan kesulitan tersendiri dalam menghitung volume blok tegangan tekan. Oleh karena itu, Whitney mengusulkan agar digunakan blok tegangan segiempat ekuivalen yang dapat digunakan untuk menghitung gaya tekan tanpa harus kehilangan ketelitiannya. Blok tegangan ekuivalen ini mempunyai tinggi dan tegangan tekan rata-rata sebesar 0.85 f'c. Nilai ini diperoleh berdasarkan hasil percobaan pada beton yang berumur lebih dari 28 hari.

Dengan menggunakan semua asumsi di atas maka perhitungan volume blok tegangan tekan dapat lebih mudah dilakukan dengan hanya menggunakan rumus volume balok sederhana. Bentuk blok tegangan ekuivalen ini dapat dilihat pada Gambar 5. Apabila kapasitas batas kekuatan beton pada daerah tekan telah terlampaui maka balok akan mengalami kehancuran. Sampai dengan tahap ini tampak bahwa tercapainya kapasitas ultimit merupakan proses yang tidak dapat berulang karena beton telah melewati kondisi elastisnya.

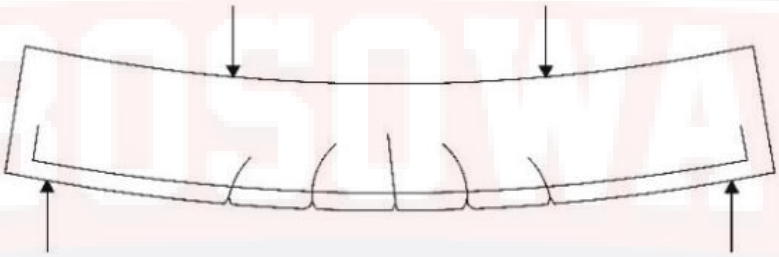


Gambar 2.5. Blok Tegangan Ekuivalen

Komponen struktur balok yang telah retak disertai dengan kondisi baja tulangan yang telah meleleh tentunya ditandai dengan nilai lendutan yang besar. Lendutan besar yang terjadi pada balok tidak akan kembali ke kondisinya yang semula dipengaruhi oleh kondisi baja tulangan yang telah meleleh. Berdasarkan penjelasan-penjelasan yang telah diuraikan sebelumnya maka dalam memperhitungkan kapasitas momen ultimit suatu komponen struktur, kuat tarik beton biasanya diabaikan (tidak diperhitungkan). Seluruh gaya tarik yang terjadi hanya dilimpahkan pada baja tulangan di daerah tarik.

Dengan demikian maka bentuk penampang beton pada daerah tarik tidaklah mempengaruhi kekuatan lentur. Tinggi penampang yang menentukan adalah tinggi efektif d, yaitu jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tarik. Nilai regangan beton tekan maksimum pada serat tekan terluar ditetapkan sebesar 0.003. 13 Penetapan nilai tersebut didasarkan atas hasil-hasil pengujian yang menunjukkan bahwa umumnya regangan beton hancur berada di antara nilai 0.003 dan 0.004.

Menurut T.J. MacGinley dan B. S. Choo, beton bertulang adalah gabungan antara material tulangan baja yang ditanamkan pada beton yang mengeras dimana tulangan baja berfungsi menahan gaya Tarik dan beton untuk menahan gaya tekan. Beton memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menanggung tegangan tekan namun tidak bisa menanggung tegangan tarik. Penulangan dibutuhkan untuk menahan tegangan tarik akibat momen yang muncul. Apabila balok diberikan beban seperti gambar .6. maka akan muncul retakan saat runtuh akibat momen yang ditimbulkan beban.



Gambar 2.6. Retak lentur sebelum runtuh

Sumber : (T.J. MacGinley and B.S. Choo, Halaman 47)

2.3 Pelat beton Bertulang

Pelat adalah elemen bidang horisontal struktur yang mendukung beban mati maupun beban hidup dan menyalurkannya pada kerangka vertikal dari sistem struktur (Sudarmoko,1996).

Menurut Szilard (1974) pelat dibedakan menjadi 4 kategori, yaitu :

1. Pelat Kaku Merupakan pelat tipis yang memiliki ketegaran lentur *(flexural rigid*), dan memikul beban dengan aksi 2D, terutama dengan momen dalam (lentur dan puntir) dan gaya geser transversal yang umumnya sama dengan balok.

2. Membran Merupakan pelat tipis tanpa ketegangan lentur dan memikul beban lateral dengan gaya geser aksial dan gaya geser terpusat.

3. Pelat Tebal Merupakan pelat yang kondisi tegangan dalamnya menyerupai kondisi kontinu 3D.

4. Pelat Fleksibel Merupakan gabungan dari pelat kaku dan membran, memikul beban luar dengan gabungan aksi momen dalam, gaya geser aksial, gaya geser pusat, gaya geser transversal.

Menurut Sudarmoko (1996), pelat beton bertulang yang biasa digunakan untuk lantai rumah, atap maupun jembatan memiliki ciri sebagai berikut ini.

a. Kaku.

b. Mempunyai kemampuan menahan lenturan, baik satu arah ataupun dua arah.

c. Tegangan geser relatif kecil, kecuali dibebani beban terpusat yang besar.

d. Tulangan tekan biasanya jarang diperlukan.

e. Masalah lendutan merupakan sesuatu yang penting dan perhitunganya serupa dengan balok.

Berdasarkan perbandingan antara bentang panjang dan pendeknya, pelat beton bertulang dibedakan satu arah dan pelat dua arah. Pelat dikatakan satu arah apabila perbandingan antara bentang panjang dan bentang pendeknya dua kali atau lebih, sedangkan apabila perbandingan keduanya kurang dari dua termasuk pelat dua arah.

Menurut Sudarmoko (1996), Wang (1985) menyatakan bahwa pelat satu arah hanya memiliki kelengkungan tunggal dengan tulangan utama sejajar sisi pendek pelat dan tulangan susut sejajar sisi panjang pelat. Sedangkan pada pelat dua arah, beban disalurkan keempat sisi pelat sehingga tulangan utama pelat diperlukan pada kedua arah sisi pelat.

2.4 Kuat Tekan Beton

Beton merupakan suatu bahan konstruksi yang mempunyai sifat kekuatan tekan yang khas, yaitu apabila diperiksa dengan sejumlah besar benda-benda uji, nilainya akan menyebar sekitar suatu nilai rata-rata tertentu. kuat tekan beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan beton merupakan sifat terpenting dalam kualitas beton dibanding dengan sifat-sifat lain. Kekuatan tekan beton ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat kasar dan halus, air. Perbandingan dari air semen, semakin tinggi kekuatan tekannya. Suatu julah tertentu air diperlukan untuk memberikan aksi kimiawi dalam pengerasan beton, kelebihan air meningkatkan

kemampuan pekerjaan akan tetapi menurunkan kekuatan (Wang dan Salmon, 1990).

Adapun rumus-rumus yang digunakan adalah sebagai berikut

(SK SNI 1974:2011)

$fc' = \frac{P}{A}$ ..... (1)

Keterangan:

fc' = kekuatan tekan beton yang disyaratkan(MPa)

P = beban aksial (N)

A = luas penampang benda uji (mm2)

(SNI 03-2847-2002)

Sd = $\sqrt{\frac{\sum(\mathrm{fcr}-\mathrm{f'c})^2}{n-1}}$ ..... (2)

Keterangan:

Sd = Standar deviasi

fcr = kuat tekan rata-rata seluruh benda uji

fc' = kekuatan tekan beton yang disyaratkan(MPa)

n = jumlah benda uji

Adapun hal-hal yang mempengaruhi kuat tekan beton yaitu :

1. FAS atau faktor air semen, hubungan fas dengan kuat tekan beton adalah semakin rendah nilai fas maka semakin tinggi nilai kuat tekan beton. Tetapi pada kenyataannya pada suatu nilai fas tertentu semakin rendah nilai fas maka kuat tekan beton akan rendah. Hal ini terjadi karena jika fas rendah menyebabkan adukan beton sulit dipadatkan. Dengan

demikian ada suatu nilai optimal yang menghasilkan kuat tekan beton yang maksimal.

2. Umur beton, kekuatan beton akan bertambah sesuai dengan umur beton
tersebut. Kecepatan bertambahnya kekuatan beton dipengaruhi oleh fas dan suhu perawatan. Semakin tinggi fas, maka semakin lambat kenaikan kekuatan betonnya, dan semakin tinggi suhu perawatan maka semakin cepat kenaikan kekuatan betonnya.

3. Jenis Semen, kualitas pada jenis-jenis semen memiliki laju kenaikan kekuatan yang berbeda.

4. Efisiensi dari perawatan (*curing*), kehilangan kekuatan sampai 40% dapat
terjadi bila terjadi pengeringan terjadi sebelum waktunya. Perawatan adalah
hal yang sangat penting pada pekerjaan dilapangan dan pada pembuatan benda uji.

5. Sifat agregat, dalam hal ini kekerasan permukaan, gradasi, dan ukuran maksimum agregat berpengaruh terhadap kekuatan betonHal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu :

1. Kekakuan material

Material yang memiliki kekakuan (stiffness) yang semakin baik, maka defleksi yang dihasilkan akan semakin kecil.

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

Besar gaya yang diterima pada material berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi. Apabila beban yang diterima oleh struktur material semakin besar, maka defleksi yang terjadi semakin besar pula.

3. Jenis tumpuan yang diterima

Suatu struktur material akan mengalami jumlah reaksi pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Semakin besar reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban, semakin besar pula defleksi yang terjadi. Sehingga besar defleksi tidaklah sama pada masing-masing penggunaan tumpuan yang berbeda-beda.

4. Jenis beban yang terjadi pada batang

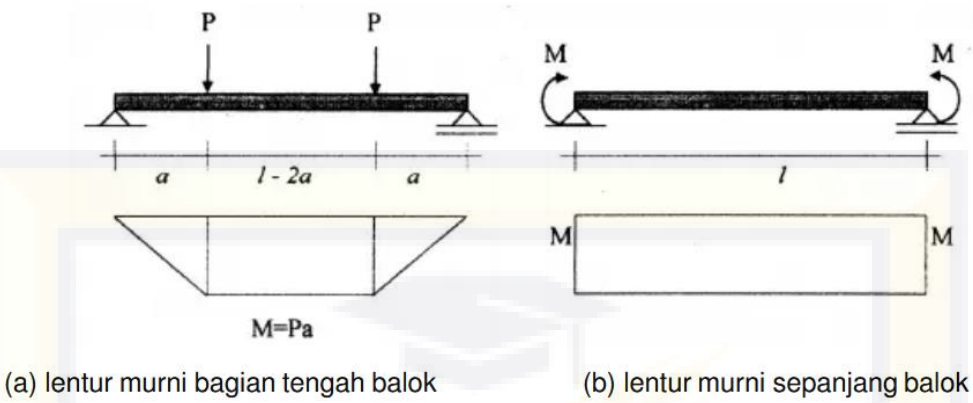
Struktur material atau beban kerja yang mengalami pembebanan akan melendut apabila diberikan beban yang cukup besar. Apabila hal tersebut terjadi pada bagian-bagian tertentu dari struktur jembatan, lendutan sangat tidak diizinkan. Adannya lendutan yang besar pada struktur jembatan tersebut, maka jembatan akan mengalami kerusakan atau bahkan roboh. Setiap konstruksi teknik, bagian-bagian pelengkapnya wajib diberi ukuran-ukuran fisik tertentu. Untuk itu bagian pelengkapnya dilakukan pengukuran dengan tepat, sehingga didapat seberapa kuatkah struktur tersebut mampu untuk menahan beban atau gaya-gaya yang terjadi atau yang mungkin akan dibebankan kepada struktur tersebut.

2.5 Kuat Lentur

Kuat lentur beton adalah kemampuan beton untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu memanjang serat ditengah-tengah balok yang disangga kedua ujungnya. Pada setiap penampang terdapat gaya-gaya dalam yang dapat diuraikan menjadi komponen-komponen yang saling tegak lurus dan menyinggung terhadap penampang tersebut. Komponen-komponen yang tegak lurus terhadap penampang tersebut merupakan tegangan-tegangan lentur (Tarik pada salah satu sisi di daerah sumbu netral dan tekan pada sisi penampang lainnya). Fungsi dari komponen ini adalah untuk memikul momen lentur pada penampang. Kuat lentur balok beton terjadi karena berlangsungnya mekanisme tegangan-regangan yang timbul di dalam balok, pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam. Kuat lentur balok dikenal sebagai modulus runtuh (*modulus of rupture*).

2.5.1 Kuat Lentur Struktur Beton Bertulang

Lenturan murni adalah lenturan yang terjadi pada balok dengan mengkondisikan gaya lintangnya sama dengan nol, yaitu dengan meletakkan balok beton pada tumpuan sederhana yang dibebani secara simetris sejauh a dari tumpuan seperti terlihat pada Gambar 7



Gambar 2.7. Pola Pembebanan

Sumber: Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan, nomor 1 volume 10 – Januari 2008, hal: 14

Lentur pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar (Edward G. Nawy, 1990). Apabila beban bertambah maka akan terjadi deformasi dan regangan tambahan pada balok yang mengakibatkan retak lentur disepanjang bagian balok yang mengalami tarik. Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya terjadi keruntuhan elemen struktur. Taraf pembebanan yang demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan akibat lentur. Dalam perhitungan perencanaan kekuatan balok beton dengan penampang persegi, digunakan distribusi tegangan ekivalen bentuk persegi yang diusulkan oleh withney sebagai penyederhanaan dari bentuk distribusi lengkung. Withney menyarankan suatu distribusi tegangan persegi. Penyederhanaan ini diijinkan dalam SNI 03-2847- 2002 pasal 12.2 dengan nilai intensitas tegangan rata-rata 0,85 fc' dan tinggi blok tegangan a = β1.c. Whitney menetapkan nilai β1 sebesar:

1. Untuk fc' ≤ 28 MPa,β1 = 0,85 (3)
2. Untuk 28 Mpa < fc' ≤ 56 MPa, β1 = 0,85 − 0,05 fc' −28 MPa 7 MPa (4)
3. Untuk fc' ≥ 56 Mpa, β1 = 0,65 (5)

Nilai di atas sesuai dengan pasal 12.2 ayat 7 butir 3 SNI 03-2847-2002. Berdasarkan tegangan persegi ekivalen ini maka nilai kuat lentur nominal Mn dapat dihitung. Pendekatan dan pengembangan metoda perencanaan kekuatan didasarkan atas anggapan :

1. Bidang penampang rata sebelum terjadi lentur, tetap rata setelah lentur, dan tetap tegak lurus sumbu bujur balok (prinsip bernouli). Karena itu, nilai regangan terdistribusi linier atau sebanding lurus dengan jaraknya terhadap garis netral (prinsip Navier).

2. Tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai kira-kira beban sedang, yaitu saat tegangan tekan beton telah melampaui ± fc'. Bila beban meningkat sampai beban batas, tegangan yang timbul tidak lagi sebanding dengan regangan, sehingga blok tegangan tekan berupa garis lengkung.

3. Dalam menghitung kapasitas momen, beton tarik diabaikan, seluruh gaya tarik ditahan batang baja tulangan.

2.6 Lendutan

Lendutan yang diizinkan pada sistem struktur sangat bergantung pada besarnya lendutan yang masih dapat ditahan oleh komponen komponen struktur yang berinteraksi tanpa kehilangan penampilan estetis dan tanpa kerusakan pada elemen yang terdefleksi. Akan tetapi struktur struktur pada masa sekarang dirancang dengan menggunakan prosedur kekuatan batas (ultimate), yaitu dengan memanfaatkan kekuatan tinggi baja dengan betonnya. Dengan demikian akan diperoleh elemen-elemen struktur yang semakin langsing dan dalam hal demikian lendutan sesaat maupun jangka panjang sangat perlu dikontrol.

Pada Tabel 1 dicantumkan rekomendasi dari SNI mengenai tebal minimum balok sebagai fungsi dari panjang bentang. Terlihat disini bahwa untuk balok yang tidak memikul atau tidak dihubungkan dengan konstruksi yang mungkin rusak akibat lendutan besar, tidak diperlukan perhitungan lendutan. Lendutan-lendutan lainnya harus dihitung dan dikontrol dengan menggunakan Tabel 2. Apabila tebal total balok kurang dari yang diperlukan pada tabel, perancang harus membuktikan bahwa lendutan baloknya memberikan serviceability yang memadai, dengan memberikan perhitungan rinci mengenai lendutan sesaat dan lendutan jangka panjangnya.

Tabel 2.1 Tebal Minimum Balok dan Pelat Satu Arah Apabila Lendutan Tidak Dihitung [SNI, 03-2847-2002].

Tabel 1. Tebal Minimum Balok dan Pelat Satu Arah Apabila Lendutan Tidak Dihitung [SNI, 2002].

Tabel minimum,h				
Elemen Struktur[a]	Ditumpu Sederhana	Satu ujung menerus	Dua ujung menerus	Kantilever
Pelat satu arah	L/20	L/24	L/28	L/10
Balok atau pelat satu arah dengan grid	L/16	L/18,5	L/21	L/8

[a]Untuk elemen struktur yang tidak memikul atau dihubungkan dengan partisi atau konstruksi lain yang dapat rusak akibat lendutan yang besar

Tabel 2.1 berlaku untuk massa beton $W_c = 2400$ kg/m^3. Sementara bentang bersih L adalah harga dalam mm.

Lendutan harus diperiksa apabila pelat memikul konstruksi yang akan mengalami kerusakan akibat lendutan yang besar. Batasan lendutan yang ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 24.2.2 adalah :

Tabel 2.2. Lendutan ijin maksimum

Jenis komponen struktur	Kondisi		Lendutan yang diperhitungkan	Batas lendutan
Atap datar	Tidak memikul atau tidak disatukan dengan elemen elemen nonstruktural yang mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar		Lendutan seketika akibat Lr dan R maksimum	l/180
Lantai			Lendutan seketika akibat L	l/360
Atap atau lantai	Memikul atau disatukan dengan elemen-elemen nonstruktural	Mungkin akan rusak akibat lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan elemen nonstruktural, yaitu jumlah dari lendutan jangka panjang akibat semua beban tetap dan lendutan seketika akibat penambahan beban hidup	l/480
		Tidak akan rusak akibat lendutan yang besar		l/240

Kondisi yang seperti benda uji pada penelitian ini untuk pelat yang tidak menahan atau tidak disatukan dengan komponen non struktural

yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar, dengan lendutan seketika akibat beban hidup, batas lendutannya adalah sebesar :

$\Delta h = l / 360$ …… (6)

dengan :

Δh = lendutan maksimum ditengah bentang pelat, mm.

L = panjang bentang, mm

2.7 Kekauan dan Daktilitas Benda Uji

2.7.1 Kekakuan Lentur

Menurut Gere dan Timoshenko (1987), kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu lendutan sebesar satu satuan sehingga kekakuan elastis pada pelat beton bertulang metode secan dapat dihitung sesuai gambar 8 dengan menggunakan persamaan berikut ini :

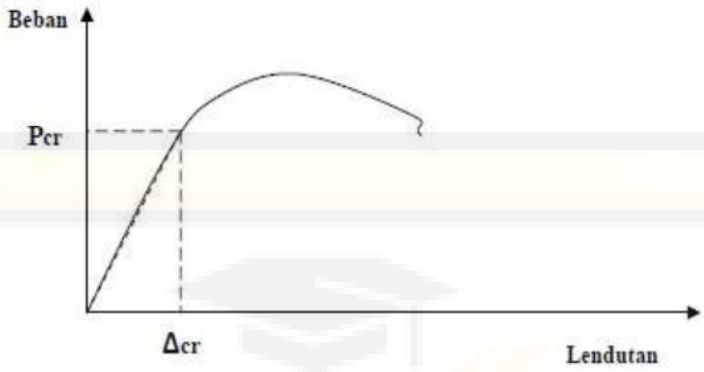
$K = Pcr / \Delta cr$ …… (7)

dengan :

K = Kekakuan , KN/mm

Pcr = Beban saat retak awal (batas elastis) KN.

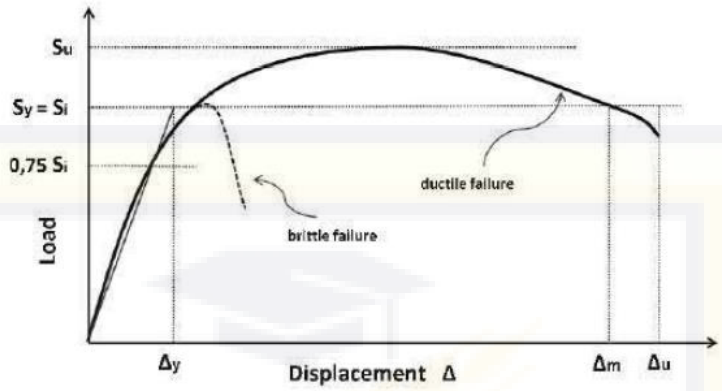
Δcr = Lendutan saat retak awal (batas elastis) mm.



Gambar 2.8. Kurva Beban Terhadap Lendutan

2.7.2 Daktilitas

Suatu struktur beton bertulang dapat bersifat getas atau daktail. Struktur bersifat getas apabila struktur segera rusak ketika beban luar yang bekerja pada struktur tersebut melebihi kekuatan elastisitasnya atau batas lelehnya. Sedangkan struktur bersifat daktail apabila struktur tidak langsung rusak setelah melewati batas elastis, namun melendut dahulu sampai batas waktu tertentu dan akan rusak apabila batas plastisnya terlampaui. Daktalitas struktur pelat beton bertulang dapat ditentukan dari rasio lendutan maksimum terhadap lendutan leleh (Paulay and Priestley,1992) seperti ditunjukkan pada gambar 9 sebagi berikut :



Gambar 2.9. Grafik Daktiliitas (Paulay and Pristley,1992)

Rumus daktlitas :

μm = Δm / Δy ……. (8)

dengan:

μm = daktilitas maksimum

Δm = lendutan maksimum

Δy = lendutan leleh

Sy = Si = 0,75 . Su …… (9)

dengan :

Sy = Si = beban leleh

Su = beban puncak.

Lendutan leleh dapat diperoleh dengan memplot titik pertemuan antara garis beban leleh dengan garis yang dibuat dengan menarik garis linier mulai titik nol kurva beban-lendutan ditarik lurus melalui titik perpotongan kurva dengan garis 0,75 beban leleh.

2.8 Penelitian sebelumnya mengenai balok beton bertulang berongga

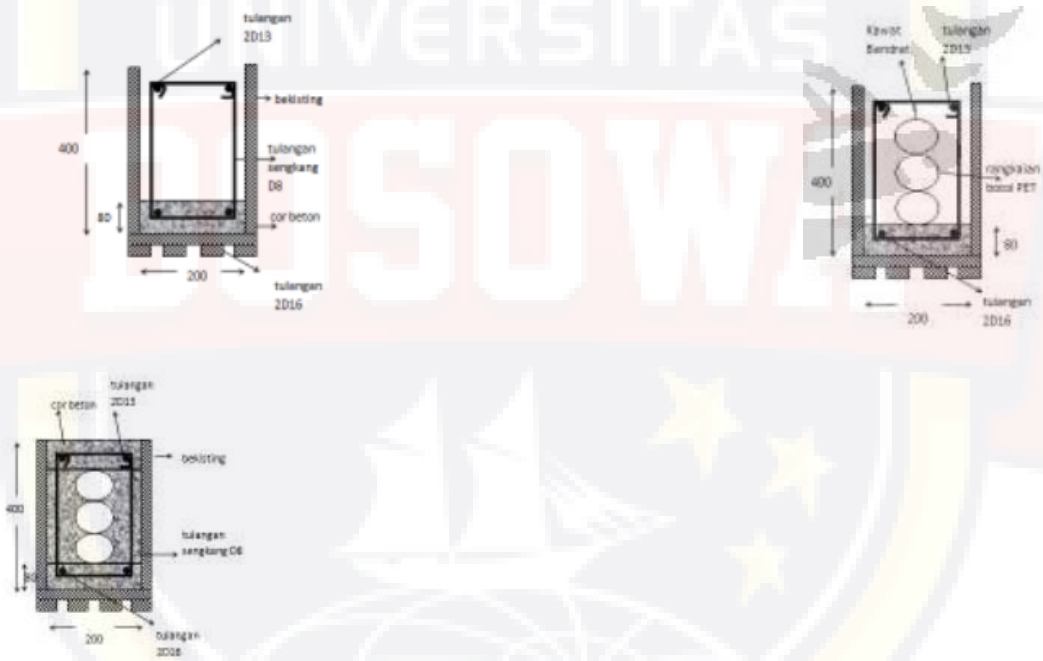
a. Rahadyanto (2013), ***Studi Eksperimental Balok Berongga Dengan Pemanfaatan Limbah Botol Pet***

Balok pracetak berongga atau *hollow core beam* (HCB) merupakan pengembangan dari *Hollow-Core Slab* (HCS). Balok pracetak berongga bukanlah produk baru dalam dunia konstruksi, karena sudah digunakan untuk girder pada jembatan dan balok pada bangunan-bangunan tinggi. Rongga pada balok ditujukan untuk mengurangi berat balok untuk memudahkan proses mobilisasi di lapangan, namun pada akhirnya rongga tersebut dicor setelah ditempatkan hanya karena pertimbangan kemudahan pelaksanaan. Perlu dilakukan penelitian untuk mencari metode pelaksanaan yang mudah agar rongga tersebut tetap dipertahankan sehingga menghemat volume beton yang digunakan di proyek konstruksi.

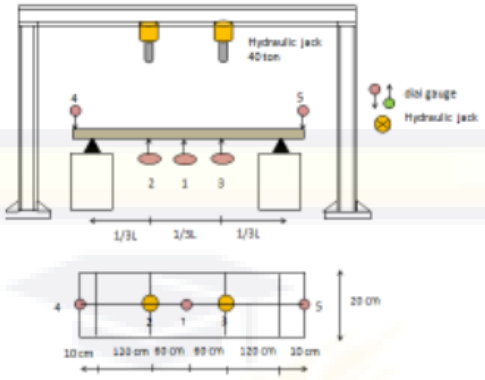
Ide penggunaan botol air mineral sebagai pembentuk rongga diharapkan dapat mempermudah pembuatan balok. Disamping mengurangi volume beton, inovasi ini juga bisa dijadikan alternative sebagai tempat pembuangan limbah botol plastik. Penelitian terdahulu pada *Hollow Core Slab* (HCS) menemukan kendala dalam proses pengecoran karena adanya gaya apung dari rangkaian botol yang menyulitkan proses pelaksanaan.

Studi eksperimental untuk mencari metode pelaksanaan yang mudah serta mempelajari kekuatan lentur balok *hollow* dengan botol PET telah dilakukan dengan benda uji berukuran 200 x 400 x 3850 mm. Total sebanyak enam (6) balok *hollow* dengan mutu beton yang berbeda, yaitu K-300 dan K-400 dan tiga (3) spesimen balok beton bertulang K-400 solid dengan ukuran yang sama juga dites sebagai balok pembanding. *Four point loading test* dipilih untuk melihat perilaku lentur balok.

Dalam pembuatan benda uji ada 3 tahapan, yaitu :



Gambar 2.10. Tahapan pengujian Rahardyanto



Gambar 2.11. Skema Pengujian

Hasil pengujian dianalisa berdasarkan grafik hubungan antara beban – lendutan dan antara momen dengan putaran sudut di tengah bentang, pola retak yang terjadi pada masing-masing spesimen dan jenis keruntuhan (*failure mode*) yang terjadi. Juga dilakukan perbandingan kapasitas ultimit secara teoritis dan eksperimental. Hasil *loading test* menkonfirmasikan teori yang menyatakan bahwa rongga yang dibentuk oleh botol PET tidak mengurangi kekuatan lentur dari balok. Hasil test menunjukkan bahwa balok PET K400 memiliki momen ultimate 0,98 kali dibandingkan balok solid dengan mutu beton yang sama. Penelitian juga menunjukkan bahwa balok PET 300 memiliki kekuatan 1,017 kali dibandingkan balok PET 400. Metode pelaksanaan dengan melakukan dua tahap pengecoran beton mampu mengatasi gaya apung dari rangkaian botol PET sehingga memberikan solusi metode pembuatan balok berongga PET yang mudah diaplikasikan di lapangan.

b. Novia Tinna Wijayanti, Djoko Sulistyo, dan Muslikh (2013) ***Perilaku Lentur Pelat Sistem Satu Arah Beton Bertulang Berongga Dengan Pemanfaatan Botol Bekas Berbahan Plastik Sebagai Pembentuk Rongga***

Pelat beton bertulang berongga sejajar sistem satu arah beton bertulang berongga dengan pemanfaatan botol bekas berbahan plastik sebagai pembentuk rongga merupakan salah satu teknologi alternatif untuk mengurangi berat sendiri pelat dan menghemat kebutuhan material beton. Penempatan rongga pada beton diharapkan tidak akan mengurangi kekuatan lentur pelat tersebut. Namun demikian, perilaku lentur dalam keadaan layan (lendutan) maupun keadaan batas yaitu kekuatan, beban maksimum, dan pola keruntuhan beton bertulang berongga dengan pelat solid, untuk itu perlu penelitian lebih lanjut.

Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan dua tahap pengujian. Pada tahap awal dilakukan dengan pengujian pendahuluan yang meliputi pengujian sifat fisik dan mekanik bahan. Tahap kedua dilakukan dengan pembuatan benda uji, berupa empat benda uji pelat yang terdiri dari satu pelat beton bertulang solid (PS) dan tiga pelat beton bertulang dengan botol plastik bekas kemasan air minum sebagai pembentuk rongga PBBP-1, PBBP-2, dan PBBP-3. Keempat benda uji pelat ini berukuran skala penuh (2200 mm x 1000 mm) dengan ketebalan semua pelat sama yaitu 120 mm. Pengujian dilakukan secara statik dengan beban garis di sepertiga bentang pada system struktur dengan tumpuan sederhana.

Pada penelitian ini juga diamati terhadap beban berulang 20 % (setara dengan beban hidup ruangan pada perkantoran) dari beban retak awal dilakukan sebanyak 10 kali pembebanan. Pengurangan volume beton pada pelat berongga 1 (PBBP-1) diperoleh sebesar 18,52 %, pelat berongga 2 (PBBP-2) sebesar 16,46 %, dan pelat berongga 3(PBBP-3) sebesar 14,41 % dari pelat solid (PS).

Nilai kuat lentur hasil eksperimen yang diperoleh berupa beban maksimum menunjukkan bahwa pelat berongga 1 (PBBP-1) sebesar 98,0 %, pelat berongga 2 (PBBP-2) sebesar 98,04 %, dan pelat berongga (PBBP-3) sebesar 90,98 % dari pelat solid.

Beban maksimum hasil eksperimen sedikit lebih kecil dari hitungan analitis, yaitu berturut turut untuk pelat berongga PBBP-1, PBBP-2, PBBP-3 sebesar 96,83 %, 96,96 %, 90,09 %, dan pelat solid sebesar 99,93 %.

Tabel 2.2. Spesifiksi benda uji pelat

Benda Uji	Dimensi Pelat	Jarak antar rongga	Jumlah	Tulangan (mm)		Jumlah Botol
	(lxbxh) (mm)	(cm)		Pokok	Bagi	
Pelat Solid (PS)	2200x1000x120	-	1	7Φ10-150	13Φ8-175	-
Pelat Berongga 1 (PBBP-1)	2200x1000x120	3	1	7Φ10-150	13Φ8-175	81
Pelat Berongga 2 (PBBP-2)	2200x1000x120	5	1	7Φ10-150	13Φ8-175	72
Pelat Berongga 3 (PBBP-3)	2200x1000x120	7	1	7Φ10-150	13Φ8-175	63

Sumber : (Novia Tinna Wijayanti, Djoko Sulistyo, dan Muslikh)

Hasil pengujian lendutan pada beban layan untuk semua benda uji kurang (dibawah) dari lendutan ijin maksimum sebesar 4,17 mm, yaitu untuk pelat berongga PBBP-1 sebesar 0,570 mm, PBBP-2 sebesar 0,710

mm, PBBP-3 sebesar 0,650 mm, dan pelat solid (PS) sebesar 0,700 mm. Hasil pengujian beban berulang (20 % dari Pcr secara analitis) menunjukkan bahwa setiap benda uji pelat tidak mengalami retak. Pola retak yang terjadi pada semua benda uji pelat menggambarkan pola retak kerusakan lentur.

1) Hasil Pengujian Lentur

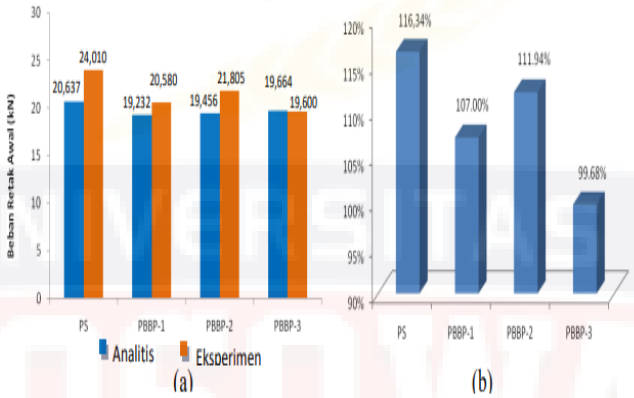
Tabel 2.3. Hasil eksperimen bahan terhadap lendutan tengah bentang pelat

		PS	PBBP- 1	PBBP-2	PBBP-3
1st Crack	P_{cr} (kN)	24,010	20,580	21,805	19,600
	Δ_{cr} (mm)	3,390	2,310	2,100	2,070
Yield	P_y (kN)	50,960	54,145	56,350	49,245
	Δ_y (mm)	12,930	14,310	16,080	15,830
Max	P_{max} (kN)	62,475	61,250	61,250	56,840
	Δ_{mx} (mm)	17,190	30,900	28,720	27,930

2) Beban Retak Awal

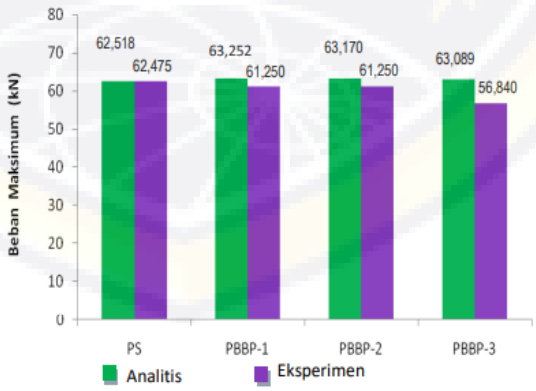
Perbandingan hasil perhitungan analitis dengan hasil pengujian eksperimen beban retak awal dapat dilihat pada Gambar 7. Gambar 7 (a) menunjukkan beban retak awal hasil analitis PS, PBPB-1, PBBP-2, dan PBBP-3 tidak jauh berbeda nilainya dibandingkan dengan beban retak awal eksperimen. Namun, untuk kondisi pada pelat PBBP-3 antara hasil analitis dan eksperimen memiliki sedikit perbedaan terhadap hasil analitis PBBP-3 sebesar 0,32 %, lebih rendah dibandingkan dengan hasil analitis. Hal ini disebabkan pencampuran adukan beton yang dilakukan beberapa kali untuk semua benda uji, sehingga terdapat mutu beton dibawah yang direncanakan atau dibawah rata-rata. Gambar 7 (b) menunjukkan hasil

masing-masing benda uji untuk mengetahui prosentase selisih pelat berongga dengan pelat solid pada pengujian eksperimen dimana beban retak awal hasil analitis untuk benda uji PS mempunyai selisih 16,34 %, PBBP-1 mempunyai selisih 7 %, PBBP-2 mempunyai selisih 11,94 %, dan PBBP-3 mempunyai selisih 0,32 % dari hasil ekperimen.



Gambar 2.12. (a) Diagram perbandingan beban retak awal hasil analitis dan eksperimen (b) Diagram perbandingan beban retak awal pelat hasil eksperimen

3) Beban Maksimum



Gambar 2.13. Diagram perbandingan beban maksimum hasil analitis dan eksperimen

4) Lendutan

Tabel 2.4. Lendutan Tengah bentang pelat hasil eksperimen

Pelat	Beban Retak Awal (kN)		Lendutan (mm)	
	Analitis	Eksperimen	Analitis	Eksperimen
PS	20,637	24,010	1,007	3,390
PBBP-1	19,232	20,580	1,039	1,870
PBBP-2	19,456	21,805	1,038	2,100
PBBP-3	19,664	19,600	1,037	2,070

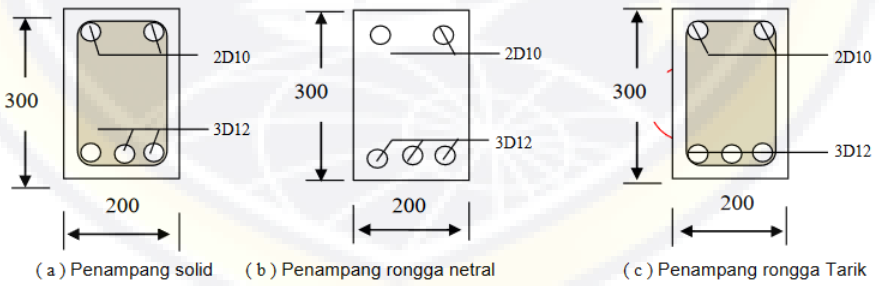
c. Maskimi, Suryawan Murtiadi, Akmaluddin (2018) ***Perilaku Struktur Balok Beton Berongga Bola***

Beton merupakan material bangunan yang sangat populer di dunia konstruksi karena mempunyai kekuatan menahan gaya tekan yang tinggi. Namun beton mempunyai kelemahan yaitu kuat tariknya yang rendah sehingga perlu dikombinasikan dengan baja tulangan. Kelemahan yang lain adalah berat sendirinya yang cukup besar sehingga perlu diupayakan inovasi struktur dengan mengurangi berat sendirinya. Elemen struktur beton bertulang dengan rongga merupakan struktur yang cukup efektif untuk mengurangi berat sendirinya.

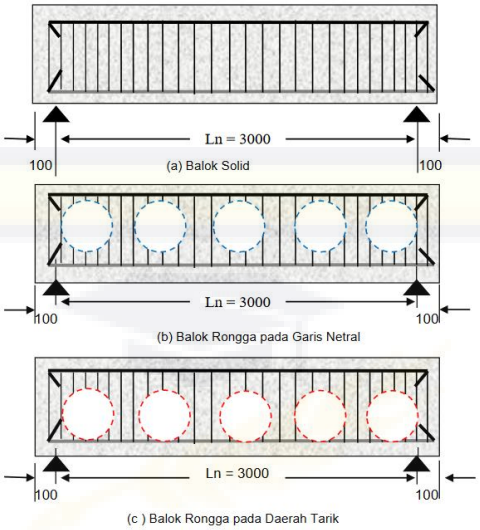
Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan memahami perilaku struktur balok beton bertulang berongga bola.Sepuluh balok beton berongga diuji dengan variasi jumlah bola dan posisi bola dalam penampang balok beton bertulang. Jumlah bola terdiri atas lima variasi yaitu sejumlah 1, 3, 5, 7, dan 9 bola

menghasilkan rasio volume balok masing-masing sebesar 99%, 98%, 97%, 95% dan 94% terhadap volume balok beton solid. Penampang balok berupa empat persegi panjang dengan lebar, b = 200 mm dan tinggi h = 300 mm serta bentang efektif 3000 mm. Tulangan tarik dipakai 3D13 dan tulangan tekan 2D10 dengan sengkang Ø10-20 mm. Mutu beton adalah fc' 22 MPa sedangkan tulangan baja dipakai mutu fy = 390 MPa.

Untuk pembanding, sebuah balok solid tanpa lobang dengan ukuran dan tulangan yang sama juga diuji sebagai balok standar. Pembebanan statis lentur dilaksanakan mengikuti standar pengujian SNI dengan dua titik pembebanan. Load cell ditempatkan pada tengah bentang dan didistribusikan ke dua titik melalui profil baja. Hidrolik jack kapasitas 50 ton sebagai sumber beban dihubungkan dengan load cell. Pengukuran lendutan vertikal pada bagian tengah bentang dicatat dengan LVDT. Dari pengujian ini didapatkan hubungan beban-lendutan sampai benda uji runtuh.



Gambar 2.14. Detail Penampang Balok



Gambar 2.15. Detail Penulangan Balok

Hasil penelitian menunjukkan pola retak yang terjadi pada seluruh benda uji merupakan ciri retak lentur dengan arah retak yang tegak lurus sumbu penampang. Momen retak yang terjadi tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara balok berlobang dengan tanpa lobang. Momen retak tertinggi terjadi pada balok tanpa lobang sebesar 10,09 MPa sedangkan yang terendah terjadi pada balok dengan lobang 7 bola sebesar 8,42 MPa atau terjadi penurunan sekitar 83%.Rata-rata besarnya momen retak eksperimen ini lebih tinggi sekitar 22% dibanding momen retak teoritis.Hal ini disebabkan karena secara teoritis momen retak hanya ditahan oleh beton saja sedangkan dalam kenyataan hadirnya baja tulangan cukup mempengaruhi kekuatanstruktur terhadap momen retak. Besarnya momen ultimit struktur juga tidak terdapat perbedaan yang signifikan, untuk beton tanpa lobang Mu = 47,25 MPa sedangkan yang terlemah pada beton dengan 9 lobang Mu = 44,78 MPa atau hanya terjadi penurunan menjadi 95%. Meskipun terjadi juga penurunan daktilitas pada

beton dengan lobang namun besarnya daktilitas masih bisa diterima karena masih ≥2. Dengan demikian direkomendasikan pemakaian balok beton bertulang 9 lobang dengan posisi lobang di bawah garis netral atau di bagian penampang yang menahan momen lentur positip struktur balok.

d. Syahrul Sariman, Herman Parung,Rudy Djamaluddin dan Rita Irmawaty (2018) , ***Analisis Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Panjang Rongga Pada Penampang Tarik***

1) **Dimensi Benda Uji Balok**

Dimensi Balok dalam penelitian ini menggunakan penampang balok jembatan standar Bina Marga skala 1 : 3 sebagai berikut :

Lebar balok : b = 150 mm; tinggi balok : h = 350 mm ;tinggi efektif : d = 307,5 mm.

Tulangan tekan 2D22 mm , Tulangan bagi : 2f8 mm. Tulangan sengkang, di tumpuan : f 8–100 dan pada daerah lentur murni = f8– 200 mm, Panjang balok : L = 3300 mm (bentang bebas : 3000 mm) Mutu beton f'c : 25 MPa, Mutu baja tulangan f'c = 470 Mpa Pada bagian tarik dibawah garis netral dipasang lapisan bekas kemasan botol minuman plastik dengan tinggi tetap dan panjang yang bervariasi.

2) **Variabel dan Notasi Benda Uji**

Benda uji terdiri 3 (tiga) buah balok normal dan sembilan balok yang terdiri dari masing-masing 3 spesimen untuk setiap variasi panjang rongga. Dalam pengujian ini digunakan botol plastik bekas kemasan air minum

600 ml, dengan panjang 22 cm dan diameter 60 mm. Tabel 4. berikut memberikan gambaran mengenai data spesimen.

Tabel 2.5. Data Variasi, Notasi dan Jumlah benda uji

NO	Panjang Rongga	Tinggi Rongga	Notasi benda Uji	Banyaknya Benda Uji
1	0 mm	0	BN	1
2	4 Botol (880 mm)	3 lapis (180 mm)	BR3A	1
3	8 Botol (1760 mm)	3 lapis (180 mm)	BR3B	1
4	12 Botol (2640 mm)	3 lapis (180 mm)	BR3C	1

Sumber: Syahrul Sariman, Herman Parung,Rudy Djamaluddin dan Rita Irmawaty (2018)

Berikut merupakan hasil pengukuran berat dan pengujian beban maksimum dari penelitian ini, dan berikut analisanya:

3) Berat dan Beban Maksimum

Hasil pengukuran berat dan pengujian beban maksimum disajikan dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Berat dan kemampuan memikul beban

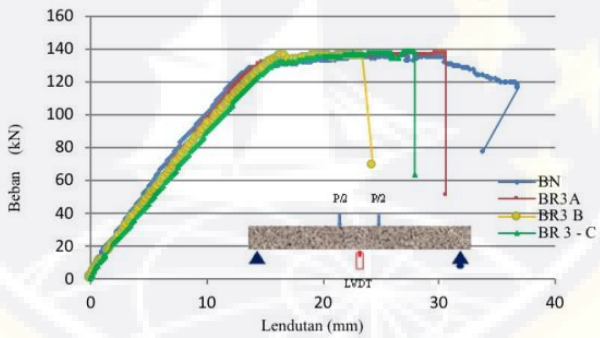
Benda Uji	Berat (kN)	Kapasitas Beban (kN)	Keterangan
BN	425.5	136.079	Gagal Lentur
BR3A	383.5	137.280	Gagal Lentur
BR3B	350.5	135.544	Gagal Lentur
BR3C	313	138.411	Gagal Lentur

Sumber: Syahrul Sariman, Herman Parung,Rudy Djamaluddin dan Rita Irmawaty (2018)

Berat benda uji menunjukkan perbedaan yang signifikan. Berat balok uji BR3A yang hanya terdiri dari satu lapis botol plastik mempunyai berat 383.5 kN atau sebesar 89.1 % terhadap berat balok normal, BR3B (panjang 8 deret botol) dan BR3C (panjang 12 deret botol) beratnya berturut 82.4% dan 73.6% terhadap balok Normal yang beratnya 425.5 kN. Walaupun terjadi penurunan berat yang cukup signifikan sesuai dengan panjang deretan botol yang dipasang, namun kapasitas memikul beban maksimum pada setiap varian balok tidak berbeda signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa balok berongga cukup efektif digunakan pada struktur yang memerlukan berat yang tidak terlalu besar.

4) Hubungan Beban – Lendutan

Hubungan antara beban dan lendutan pada tengah bentang disajikan pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Grafik hubungan beban-lendutan

Tabel 2.7. Hubungan beban dan lendutan pada setiap kondisi

Specimen	Retak awal		Tulangan Lelah		Beban Ultimate.	
	Pcr (kN)	Δcr (mm)	Py (kN)	Δy (mm)	Pu (kN)	Δu (mm)
BN	12.60	0.50	120.68	12.39	136.08	27.11
BR3A	12.93	0.41	120.62	12.59	137.28	22.09
BR3B	9.56	0.50	116.620	13.26	135.54	22.31
BR3C	10.20	0.49	114.89	13.34	136.81	30.94

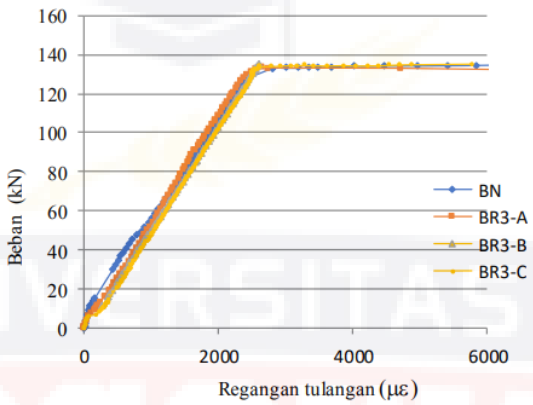
Dari tabel 2.7 dan Gambar 2.16 . memperlihatkan kemampuan memikul beban dan lendutan yang terjadi pada setiap kondisi. Setelah retak pertama terjadi maka tegangan akibat beban luar berangsur-angsur ditransfer ke tulangan tarik balok beton bertulang.

Pada kondisi retak awal, pada balok Normal (BN) terjadi pada beban 12,60 kN dan pada balok BR3A retak awal terjadi pada beban sebesar 12.93 kN, menunjukkan nilai yang hampir sama dengan balok Normal. Sedangkan pada balok BR3B beban pada kondisi retak awal nilainya 9.56 kN atau 71.50 % dari beban retak awal balok normal dan balok BR3C sebesar 10.20 kN atau 76.30 % dari balok normal.

Pada kondisi tulangan leleh, beban pada balok BR3A sebesar 120,62 kN kurang lebih sama dengan beban tulangan leleh pada balok Normal (BN) sebesar 120.68 kN . Sedangkan beban pada kondisi tulangan leleh balok BR3B sebesar 116,62 kN dan BR3C sebesar 114.89 kN menunjukkan penurunan yang cukup signifikan terhadap Balok Normal. BR3A merupakan spesimen balok uji dengan rongga yang terletak dalam area momen murni, sedangkan BR3B dan BR3C merupakan balok dengan rongga yang melewati area momen murni.

Namun demikian pada semua varian balok uji, menunjukkan bahwa kapasitas memikul beban maksimum tidak memberikan perbedaan yang signifikan.

5) Beban dan Regangan

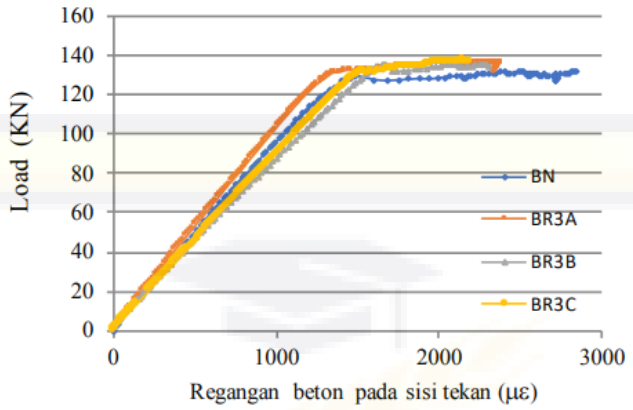


Gambar 2.17. Hubungan beban dan regangan tulangan

Tabel 2.8. Regangan beton pada beban ultimate

No	Specimen	Pu	εc
		kN	με
1	BN	136.079	2520.2
2	BR3A	137.278	2364.4
3	BR3B	135.546	2245.2
4	BR3C	138.411	2255.8

Gambar 2.17 menunjukkan hubungan antara beban dan regangan tulangan. Regangan tulangan terlihat melampaui nilai 2100x106 pada setiap benda uji yang mengindikasikan bahwa tulangan telah leleh. Hubungan antara beban dan regangan beton dikemukakan pada Tabel 2.8 dan Gambar 2.18



Gambar 2.18. Hubungan beban dan regangan beton pada sisi atas balok

Nilai regangan beton pada beban ultimate sebagaimana Tabel 2.8 diatas menunjukkan bahwa nilai regangan paling besar terjadi pada balok Normal (2520 με), sedangkan regangan beton pada spesimen lainnya lebih kecil. Demikian pula halnya pada kurva hubungan beban dan regangan beton yang menunjukkan bahwa puncak kurva terletak pada nilai < 2000 με. Hal ini mengidentifikasikan bahwa regangan beton belum mencapai regangan lelehnya, artinya keruntuhan dari keempat benda uji merupakan keruntuhan tulangan tarik (*under reinforced failure*).

e. Wahyu Mahendra Trias Atmadja, Herman Parung, Rita Irmawaty, dan A. Arwin Amiruddin (2020) ***Kekakuan Pelat Beton Bertulang Berongga Dua Arah Dengan Pemanfaatan Pipa Pvc Sebagai Pembentuk Rongga***

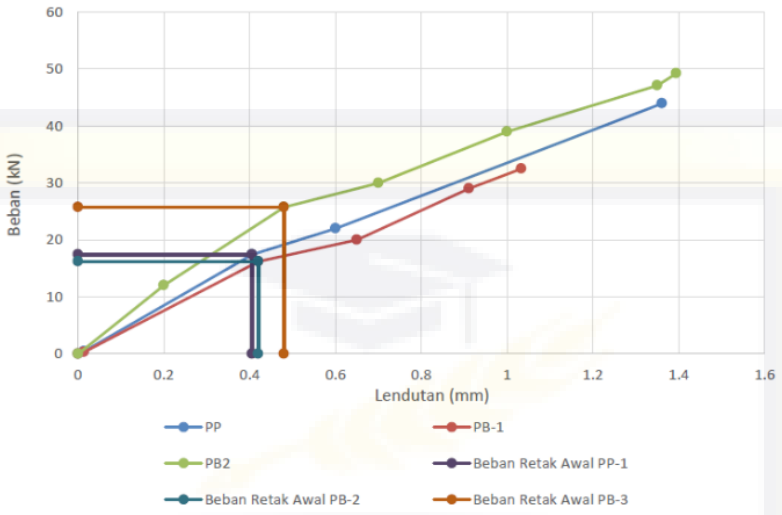
Peningkatan kuat lentur pada pelat beton bertulang dapat dilakukan dengan menambah tebal efektif pelat (d) atau tebal pelat. Namun penambahan ini akan membuat pelat menjadi lebih berat. Berat pelat

dapat dikurangi dengan mengganti sejumlah beton pada daerah tarik dengan membuat rongga dari modifikasi pipa PVC tanpa mengurangi kuat lenturnya, dikarenakan kelemahan alami beton terhadap kuat tarik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh adanya rongga pada pelat beton bertulang terhadap kekakuan pelat, dilakukan di laboratorium dengan 3 varian benda uji yaitu pelat pejal (PP) dengan tebal 14 cm, pelat berongga (PB-1) dengan tebal yang sama dengan PP yaitu 14 cm serta pelat berongga (PB-2) memiliki volume yang sama dengan pelat PP dengan tebal 15,9 cm. Pelat PP, PB-1 dan PB-2 masing-masing memiliki panjang 275 cm dan lebar 180 cm dan di cor dengan beton cast in-situ dengan ukuran dan jarak tulangan yang sama.

Pola pembebanan yang digunakan adalah pola pembebanan merata dengan analisa dua arah, pelat tertumpun sederhana pada keeampat sisinya. Penentuan kekakuan pelat dipengaruhi oleh nilai beban dan lendutan pada retak awal. Dimana kekakuan hasil analisa pelat PP 16,32 kN, PB-1 sebesar 14,79 kN dan PB-2 sebesar 23,94 kN, sedangkan nilai eksperimen kekakuan p ada pelat PP sebesar 14,26 kN, pelat PB-1 sebesar 12,37 kN dan pelat PB-2 sebesar 22,35 kN.

Gambar 2.19. Setting Sendi dan Frame Load

Data hasil pengujian direkap dan kemudian digambarkan dalam bentuk diagram hubungan beban dan lendutan. Sedangkan secara analitis perhitungan beban pada saat retak awal menggunakan SNI 2847-2019 pasal 26.12.5 tentang modulus runtuh dan rumus momen retak pada pasal 24.2.3.9. Kondisi retak awal dalam penelitian ini sangat sulit didapatkan, oleh karena itu data yang mewakili kondisi retak awal adalah satu data sebelum terjadi retak pertama. Pada pelat pejal (PP) beban pada retak awal adalah 17,4 kN dengan lendutan 0,406 mm, pelat berongga (PB-2) beban pada retak awal 16,2 kN dengan lendutan 0,42 mm dan pada pelat berongga (PB-3) beban pada retak awal 25,7 kN dengan lendutan 0,48 mm. Pembebanan dan lendutan pelat benda uji hasil eksperimen ditengah bentang pada kondisi retak awal dapat dilihat pada gambar 20 dibawah ini.



Gambar 2.20. Hubungan beban dan lendutan pada retak awal

Tabel 2.9. Perhitungan Rekapitulasi Daktilitas pelat

Pelat	Titik Berat Y (mm)	Inersia Pcr (kN)	Beban Retak Δcr (mm)	Lendutan (mm)
PP	67,578	331625724,70	28,878	1,402
PB-1	67,334	297759477,77	20,700	1,4
PB-2	76,970	467449196,20	28,818	1,204

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kekakuan pelat beton PB-2 (t=16 cm) lebih besar dari PP dan PB-1 (t=14 cm), dimana beton berongga PB-1 sebesar 87% dari pelat PP dan beton berongga PB-2 157% dari pelat pejal (PP). Hal ini bila dibandingkan dengan hasil hitungan analitis kondisinya berbanding lurus dimana kekakuan pelat beton PP (t=14 cm) dan PB-1 (t=14 cm) lebih kecil dari beton berongga PB-2 (t=16cm), dimana beton berongga PB-1 sebesar 91% dari pelat PP dan beton berongga PB-2 147% dari pelat pejal (PP) sebagaimana disajikan pada tabel 10 dibawah ini.

Tabel 2.10. Kekauan Eksperimen dan kekauan analisis

Pelat	Tebal	Kekakuan Analitis		Kekakuan Eksperimen	
	(mm)	(kN/mm)	(%)	(kN/mm)	(%)
PP	140	16,32	100	14,26	100
PB-1	140	14,79	91	12,37	87
PB-2	15,9	23,94	147	22,35	157

Kekakuan untuk masing- masing benda uji pada kondisi retak awal disajikan pada histogram gambar 21 dibawah ini.

Gambar 21. Kekauan Eksperimen dan Analisa pada PP,PB-1 dan PB-2

2.9 Penggunaan Plastik Pada Balok Beton Bertulang

1. Tinjauan Umum Plastik

Plastik merupakan material yang baru secara luas dikembangkan dan digunakan sejak abad ke-20 yang berkembang secara luar biasa penggunaannya dari hanya beberapa ratus ton pada tahun 1930-an, menjadi 150 juta ton/tahun pada tahun 1990-an dan 220 juta ton/tahun pada tahun 2005. Plastik dapat dikelompokkan menjadi dua macam yaitu *thermoplastic* dan *termosetting*. *Thermoplastic* adalah bahan plastik jika

dipanaskan sampai temperatur tertentu akan mencair dan dapat dibentuk menjadi bentuk yang diinginkan. Sedangkan *thermosetting* adalah jenis plastik yang sudah dipadatkan tidak dapat dicairkan kembali dengan cara dipanaskan (Surono, 2013). Jenis plastik yang termasuk dalam kategori *thermoplastic* bisa dilihat pada Tabel 2.11 sebagai berikut :

Tabel 2.11. Jenis plastik dalam kategori Thermoplastic

Jenis	Kegunaan	Kode	Keterangan
Polyester thermoplastic (PETE)	Botol minuman, botol kecap	1	Disarankan satu kali pemakaian, tidak boleh untuk menyimpan air panas
High Density Polyethylene (HDPE)	Botol *shampoo*, bahan mainan, botol obat	2	Disarankan satu kali pemakaian, jika dipakai berulang bahan penyusun tercampur dalam bahan pangan
Polyvynil Chloride (PVC)	Botol minyak goreng, selang, lapisan kabel, Pipa	3	Tidak disarankan untuk wadah makanan
Low Density Polyethylene (LDPE)	Kantong roti, Kantong kresek, jas hujan plastik	4	Boleh digunakan sekali dan tidak boleh digunakan pada makan yang masih panas
Polypropylene (PP)	Bungkus *snack*, sedotan, gelas kemasan air minum	5	Dapat dipakai kembali dan sangat baik untuk menyimpan makanan dan minuman
Polystyrene (PS)	Styrofoam, Cup kopi sekali pakai	6	Digunakan sekali pakai untuk wadah minuman dan perhatikan lagi dalam penggunaanya
Other, misalnya: polikarbonat	Galon air mineral, botol susu bayi	7	Dapat digunakan berulang, karena sifat termalnya stabil

Sumber : Kurniawan (2012).

Berdasarkan sifat kedua kelompok plastik tersebut, *thermoplastic* adalah jenis plastik yang memungkinkan untuk di daur ulang yang memiliki sifat–sifat khusus, sebagai berikut :

1. Berat molekul kecil
2. Tidak tahan terhadap panas
3. Jika dipanaskan akan melunak
4. Jika didinginkan akan mengeras
5. Mudah untuk diregangkan

6. Fleksibel

7. Dapat dibentuk ulang (daur ulang)

8. Mudah larut dalam pelarut yang sesuai.

Dari Tabel 2.11 setiap jenis plastik memiliki karakteristik masing-masing. Berikut dijelaskan karakteristiknya, yaitu :

1. *Polyester Thermplastic* (PET)

Gambar 2.22. Kemasan plastik PETE atau PET

Jenis plastik PET biasa ditemukan pada botol air mineral, botol soda, botol minyak sayur, dan tempat plastik lainnya yang memiliki karakter berwarna jernih/transparan/tembus pandang dan direkomendasikan hanya sekali pakai. Jenis plastik pada Gambar 2.22 mempunyai sifat karakteristik sebagai berikut :

a. Tembus pandang (transparan), bersih dan jernih

b. Tahan terhadap pelarut organik seperti asam-asam organik dari buahbuahan, sehingga dapat digunakan untuk mengemas minuman sari buah. b. Tidak tahan terhadap asam kuat, fenol dan benzil alkohol.

c. Kuat dan tidak mudah sobek

d. Tidak mudah dikelim dengan pelarut

2. *High Density Polyethylene* (HDPE)

Plastik jenis HDPE banyak digunakan untuk botol detergen, botol pemutih, botol susu yang berkemasan putih pucat, tempat mentega, tempat yoghurt, tempat shampoo, dan tempat sabun. Jenis plastik ini memiliki karakteristik sebagai berikut :

a. Kuat

b. Berbahan kaku

c. Lapisan berminyak

e. Mudah dicetak

3. Polyvynil Chloride (PVC)

Jenis plastik ini banyak digunakan untuk pipa plastik, lantai, dan outdoor meubel. Sangat tidak dianjurkan untuk menggunakan plastik dengan jenis PVC sebagai wadah makanan. Adapun sifat karakteristik dari plastik jenis PVC adalah :

a. Kuat

b. Keras

c. Bisa jernih

d. Bentuk dapat diubah dengan pelarut

4. Low Density Polyethylene (LDPE)

Jenis plastik LDPE mengandung bahan additive dengan komposisi BHEB 18%, isonox 129 21%, irganox 1076 18%, dan irganox 1010 12%. Sifat dari plastik ini mempunyai karakteristik sebagai berikut :

a. Penampakannya bervariasi dari transparan, berminyak sampai keruh tergantung proses pembuatan dan jenis resin.

b. Lentur sehingga mudah dibentuk dan mempunyai daya rentang yang tinggi.

c. Tahan asam, basa, alkohol, deterjen dan bahan kimia.

d. Kedap terhadap air, uap air dan gas.

e. Dapat digunakan untuk penyimpanan beku hingga suhu -50°C

f. Transmisi gas tinggi sehingga tidak cocok untuk pengemasan bahan yang beraroma. Tidak sesuai untuk bahan pangan berlemak

g. Mudah lengket sehingga sulit dalam proses laminasi, tapi dengan bahan antiblok sifat ini dapat diperbaiki.

5. *Polypropylene* (PP)

Jenis plastik PP mengandung bahan additive dengan komposisi stabilator panas (AE) 4%, stabilator panas (AJ) 4%, pelumas (AH) 5%, syntetic hydrotalcite (HD) 3%, slip agent (SB) 14%, dan antiblocking (SC) 8%. Sifat dari plastik ini mempunyai karakteristik sebagai berikut :

a. Keras tapi fleksibel

b. Ringan

c. Mudah dibentuk

d. Kuat

e. Permukaan berlilin

f. Tahan terhadap bahan kimia dan minyak

6. Polystyrene (PS)

Jenis plastik ini banyak digunakan untuk tempat makan styrofoam, coffee cup, dan sendok garpu plastik. Bahan ini berbahaya untuk kesehatan

otak, mengganggu hormon estrogen yang berakibat pada masalah reproduksi, gangguan pertumbuhan sistem syaraf, serta bahan ini sulit didaur ulang. Adapun karakteristik dari plastik jenis PS ini adalah :

a. Ringan

b. Getas

c. Kaku

d. Biasanya berwarna putih

e. Melunak pada suhu 95ºC

f. Baik untuk kemasan bahan segar

g. Permukaan licin, jernih dan mengkilap serta mudah dicetak

h. Bila kontak dengan pelarut akan keruh

i. Mudah menyerap pemlastis, jika ditempatkan bersama-sama dengan plastik lain menyebabkan penyimpangan warna

j. Baik untuk bahan dasar laminasi dengan logam (aluminium)

7. Other

Jenis plastik yang tergolong dalam OTHER adalah SAN (Styrene acrylonitrile), ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PC (poly carbonate), dan Nylon. Jenis platik OTHER banyak ditemui pada CD, alat-alat rumah tangga, dan alat-alat elektronik. Plastik jenis ini memiliki sifat karakteristik sebagai berikut :

a. Keras

b. Tahan panas

c. Tidak mudah pecah

Dalam usaha mengelola limbah atau sampah secara baik, ada beberapa pendekatan teknologi, diantaranya penanganan pendahuluan. Penanganan pendahuluan umumnya dilakukan untuk memperoleh hasil pengolahan atau daur ulang yang lebih baik dan memudahkan penanganan yang akan dilakukan. Penanganan pendahuluan yang umum dilakukan saat ini adalah pengelompokan limbah sesuai jenisnya, pengurangan volume dan pengurangan ukuran. Usaha penanganan pendahuluan ini dilakukan dengan tujuan memudahkan dan mengefektifkan pengolahan sampah selanjutnya, termasuk upaya daur ulang.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Dalam melaksanakan penelitian ini metode yang digunakan adalah penelitian eksperimental yang dilakukan dilaboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu Penelitian : Peneitian ini direncanakan selama 5 bulan yakni dari 17 April 2022 sampai bulan 18 Juli 2022.

Tempat Penelitian : Penelitian ini dilakukan di laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Universitas Bosowa Makassar.

3.3 Pengadaan Bahan dan Alat

1. Bahan

Bahan yang digunakan berupa :

a. Material beton dengan kuat tekan f'c : 25 Mpa
b. Baja tulangan terdiri dari tulangan tarik 3D16 dan tulangan tekan 2ø8
c. Material pembentuk rongga berupa botol minuman PET bekas

2. Peralatan

1) Alat uji pembebanan (*loading frame*), lengkap dengan alat pembebanan yaitu:

1. Actuator, pembebanan dengan kapasitas 1500 kN
2. Load Cell, untuk mengukur besar beban yang bekerja, dengan kapasitas 200 kN

2) 6 Cetakan silinder 15 cm X 30 cm

3) *Mixer concrete*

4) Kaos tangan, sikat kawat, lap, spidol, mistar, neraca, gergaji, palu karet,meteran, batang penumbuk, kerucut dan tempat penampungan air

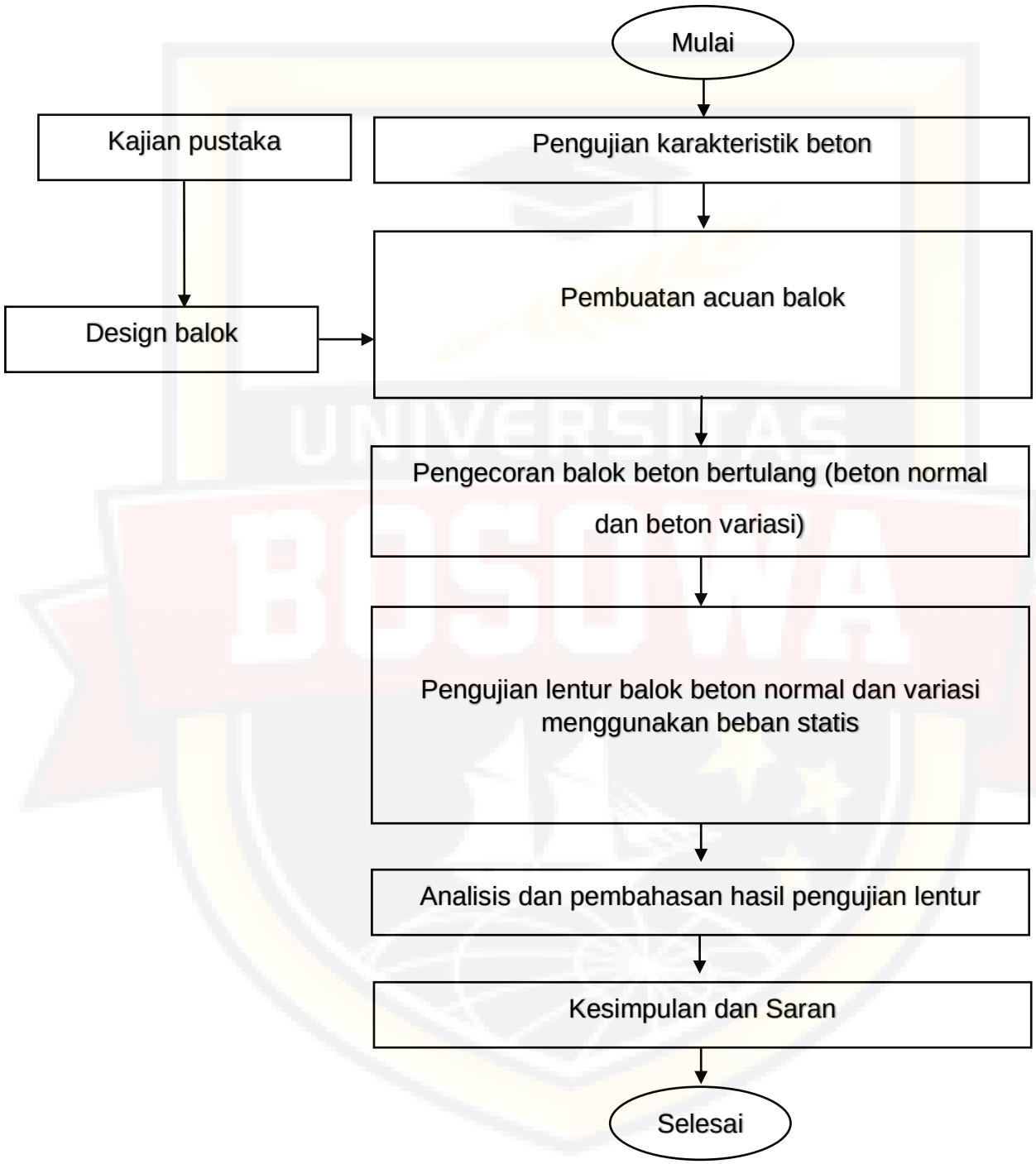
3.4 Metode Pelaksanaan

Untuk mencapai tujuan penelitian ini, maka perlu direncanakan tahapan pelaksanaan. Tahapan-tahanpan yang dilakukan adalah:

1. Uji kuat tekan beton dengan menggunakan 6 silinder.
2. Uji kuat lentur

   Pada pengujian kuat lentur dilakukan untuk mengetahui perilaku lentur penampang yaitu hubungan beban-lendutan, kekakuan dan daktilitas pada balok beton bertulang berongga. sesuai dengan tujuan penelitian
3. Pengamatan dan penggambaran pola retak di balok uji yang dilakukan setiap tahap pembebanan.

3.5 Bagan Alur Penelitian



3.5 Notasi dan Jumlah Sampel

Tabel 3.1. Variasi Benda Ui

No	Uraian	Benda Uji	Panjang Rongga	Tinggi Rongga	Notasi Benda Uji	Banyaknya Benda Uji
1	Uji kuat lentur	Balok Beton Bertulang	0 mm	0	BN	1
2		Balok Beton Bertulang Berongga	12 Botol (2640 mm)	2 lapis (120 mm)	BR2	1
3		Balok Beton Bertulang Berongga	12 Botol (2640 mm)	3 lapis (180 mm)	BR3	1
			JUMLAH			3

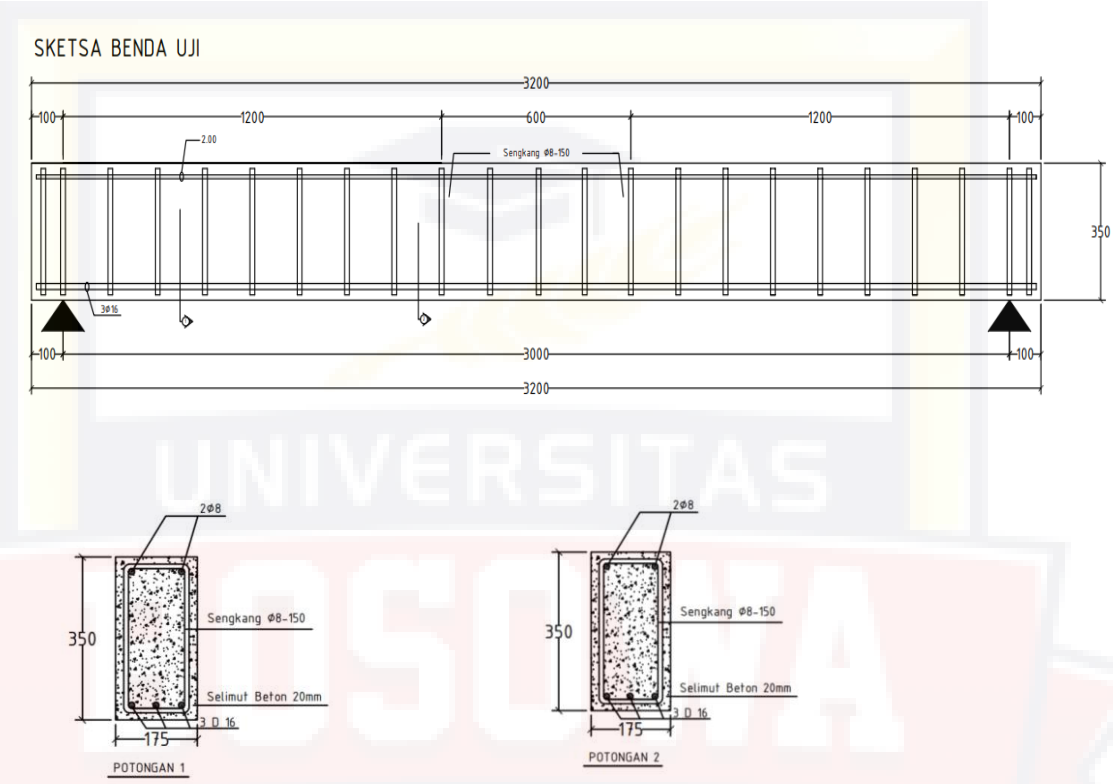
Simbol:

BN:Beton Normal

BR: Beton Rongga

3.7 Dimensi Benda Uji

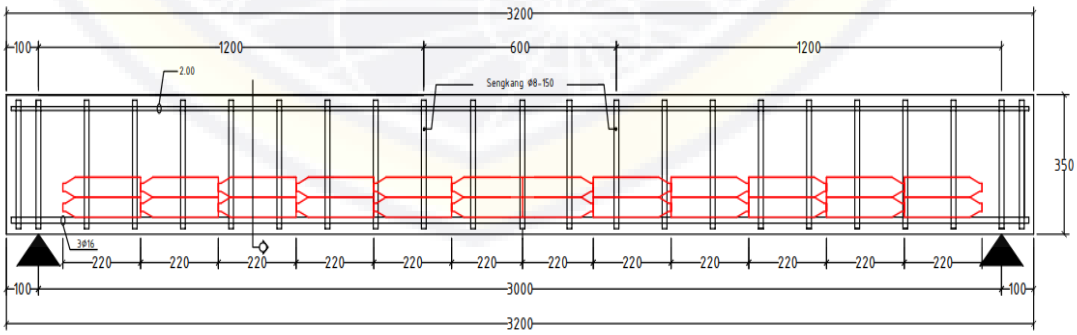
1. BALOK NORMAL (BN)

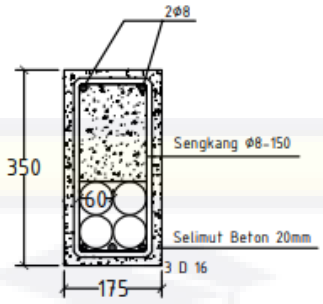


Gambar 3.1. Sketsa benda uji balok normal (BN)

2.BALOK BERONGGA 2 (BR2)

Tinggi Rongga 120 mm (2 Lapis Botol)- BR2

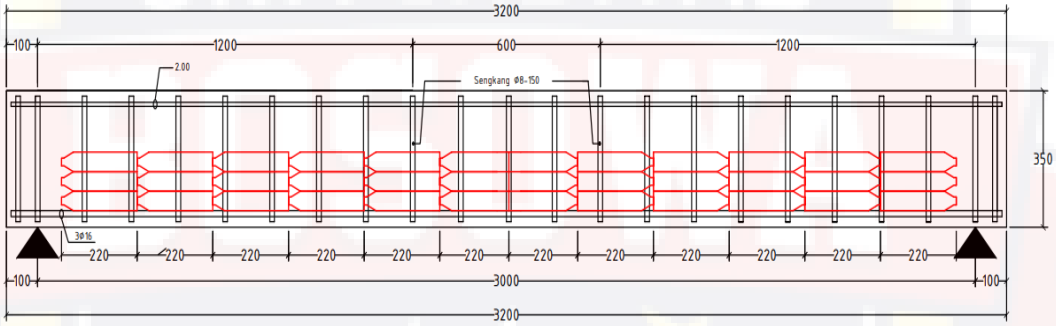


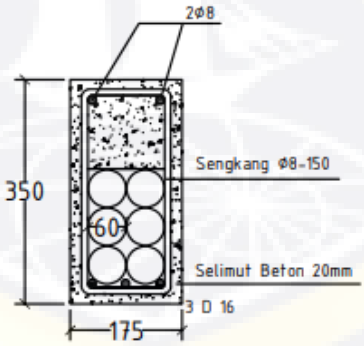


Gambar 3.2. Sketsa benda uji balok berongga 2 lapis botol (BR2)

3. BALOK BERONGGA 3 (BR3)

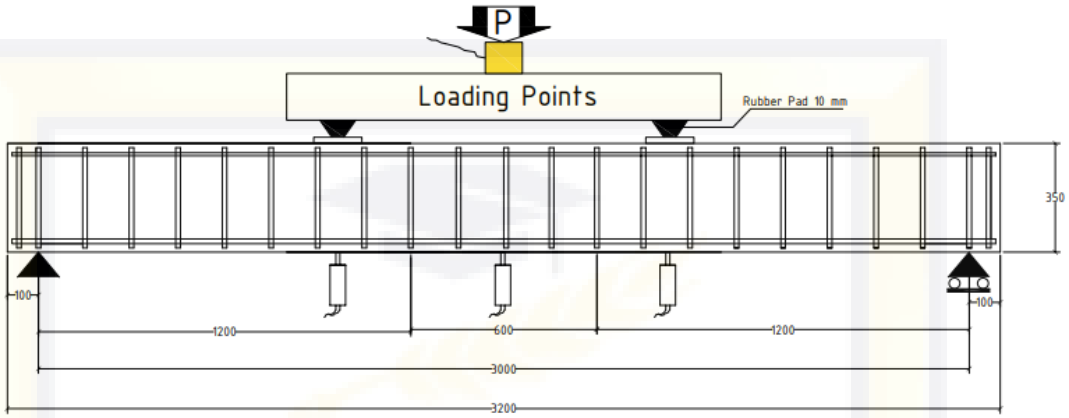
Tinggi Rongga 180 mm (3 Lapis Botol)- BR3

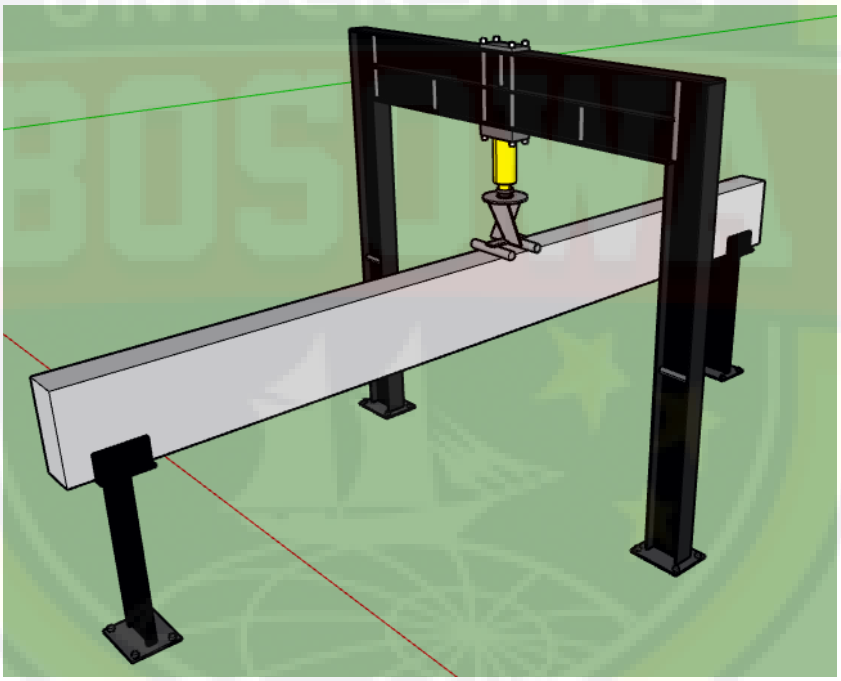


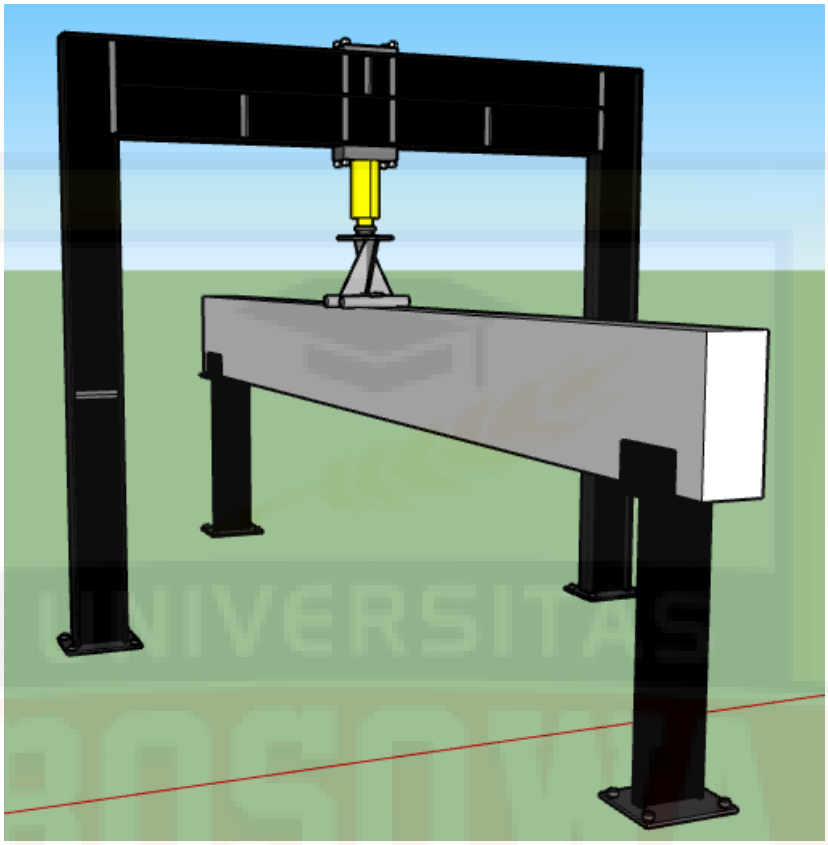


Gambar 3.3. Sketsa benda uji balok berongga 2 lapis botol (BR2)

4.Sketsa Pembebanan







Gambar 3.4. Sketsa Pembebanan

BAB IV

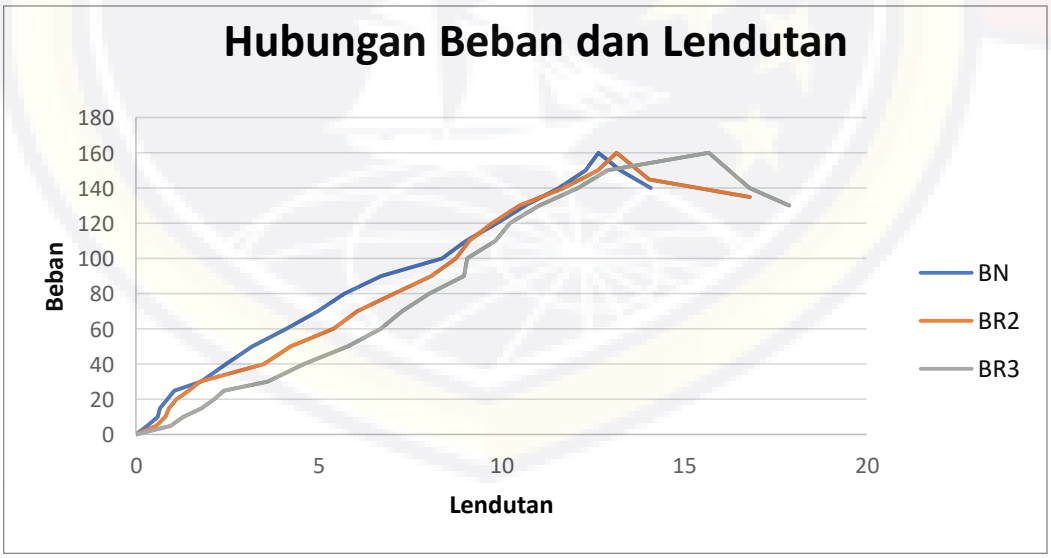
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

Tabel 4.1 menunjukkan hubungan beban dan lendutan

Tabel 4.1. Hubungan beban dan Lendutan

JENIS BALOK	BEBAN MAKSIMUM	LENDUTAN
	kN	Mm
	Pengujian	Pengujian
BN	140	14,08
BR2	135	16,80
BR3	130	17,88



Gambar 4.1. Grafik hubungan beban dan lendutan terhadap benda uji

Terlihat pada grafik *Load-Deflection* dalam pengujian di laboratorium bahwa semua benda uji memiliki perilaku struktur dan kapasitas maksimum hasilnya menunjukkan perbedaan yang tidak signifikan.. Pada beban maksimum 140 kN balok BN menunjukkan lendutan sebesar 14,08 mm, pada balok BR2 dengan beban maksimum 135 kN lendutan sebesar 16,80 mm dan balok BR3 dengan beban maksimum 130 kN lendutan sebesar 17,88 mm.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Perbandingan Beban Maksimum Secara Teoritis dan Uji Eksperimen

Perbandingan kemampuan memikul beban lentur antara perhitungan teoritis dengan uji eksperimen dapat dilihat pada tabel 4.2.

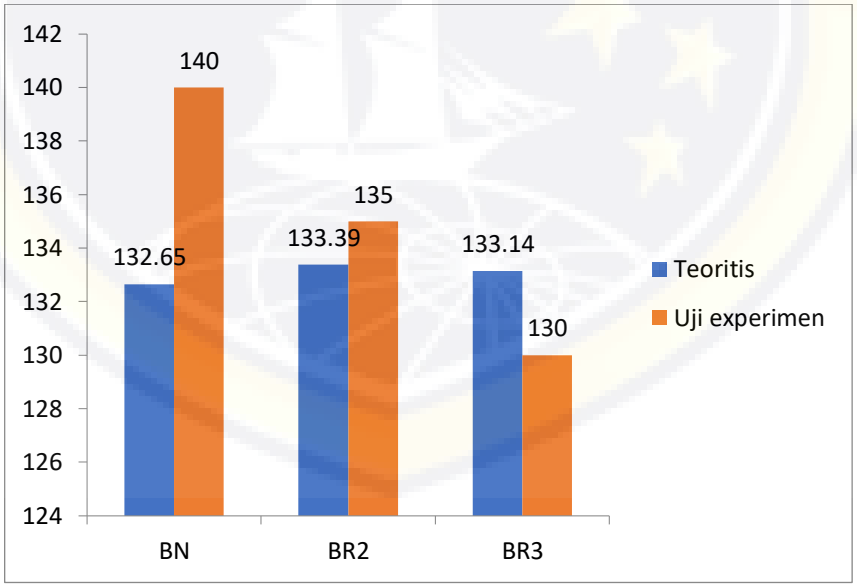
Tabel 4.2 Perbandingan beban (P) secara teoritis dan uji eksperimen

No.	Jenis Balok	Teoritis	Eksperimen
		Pu (kN)	Pu (kN)
1	BN	132,65	140
2	BR2	133,39	135
3	BR3	133,14	130

Sumber : hasil olahan data

Dari tabel diatas menunjukkan hasil beban maksimum setiap balok beton secara teoritis maupun hasil eksperimen. Hasil pada pengujian berbeda dengan hasil olahan data perhitungan teoritis yaitu pada perhitungan teoritis BN 132,65 kN , BR2 133,39 kN , dan BR3 133,14 Kn sedangkan pada hasil pengujian menunjukkan beban maksimum pada BN sebesar 140 kN, BR2 135 kN dan BR3 yaitu 130 kN. Kemampuan memikul beban hasil uji eksperimen semata - mata ditentukan oleh tercapainya tegangan leleh , sedangkan secara teoritis masih ditentukan oleh jarak garis netral.

Secara umum dapat dikatakan bahwa hasil perhitungan teoritis mendekati hasil pengujian eksperimen. Hal ini mengidentifikasikan bahwa perhitungan teoritis kapasitas momen ultimate menggunakan diagram tegangan whitney cukup konservatif.



Gambar 4.2 Grafik perbedaan beban teoritis dengan beban uji eksperimen

4.2.2 Perbandingan Lendutan Maksimum Secara Teoritis dan Uji Eksperimen

Perbandingan lendutan yang terjadi pada saat pembebanan terjadi antara perhitungan teoritis dengan uji eksperimen dapat dilihat pada tabel 4..

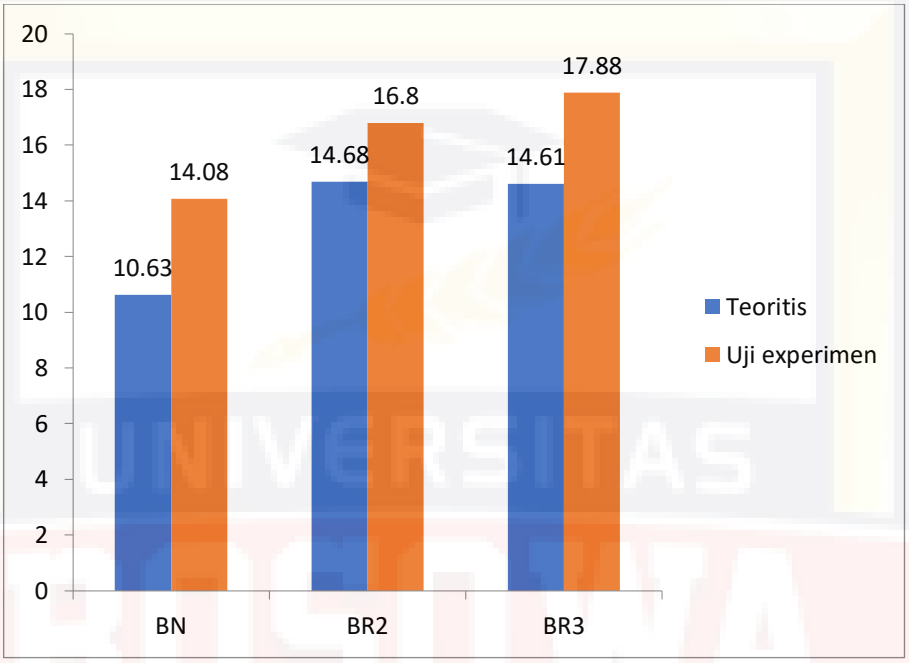
Tabel 4.3 Perbandingan Lendutan secara teoritis dan uji experimen

No.	Jenis Balok	Teoritis	Eksperimen
		(mm)	(mm)
1	BN	10,63	14,08
2	BR2	14,68	16,80
3	BR3	14,61	17,88

Dari tabel diatas menunjukkan hasil lendutan maksimum setiap balok beton secara teoritis maupun hasil eksperimen. Hasil pada pengujian berbeda dengan hasil olahan data perhitungan teoritis yaitu pada perhitungan teoritis BN 10,63 mm , BR2 14,68 mm , dan BR3 16,80 mm sedangkan pada hasil pengujian menunjukkan lendutan maksimum pada BN sebesar 14,08 mm, BR2 16,80 mm dan BR3 yaitu 17,88 mm.

Lendutan terbesar terjadi pada BR2 dan BR3 karena pada BR2 dan BR3 yang memiliki rongga mengakibatkan berat baloknya lebih ringan dibandingkan BN. Beberapa penelitian terdahulu juga menghasilkan bahwa hubungan beban dan lendutan tidak dipengaruhi karena adanya perlemahan beton pada bagian tarik penampang dan kurva beban

lendutan dengan berbagai variasi penelitian menunjukkan hasil yang tidak berbeda jauh.



Gambar 4.3 Grafik perbandingan lendutan maksimum teoritis dengan uji eksperimen

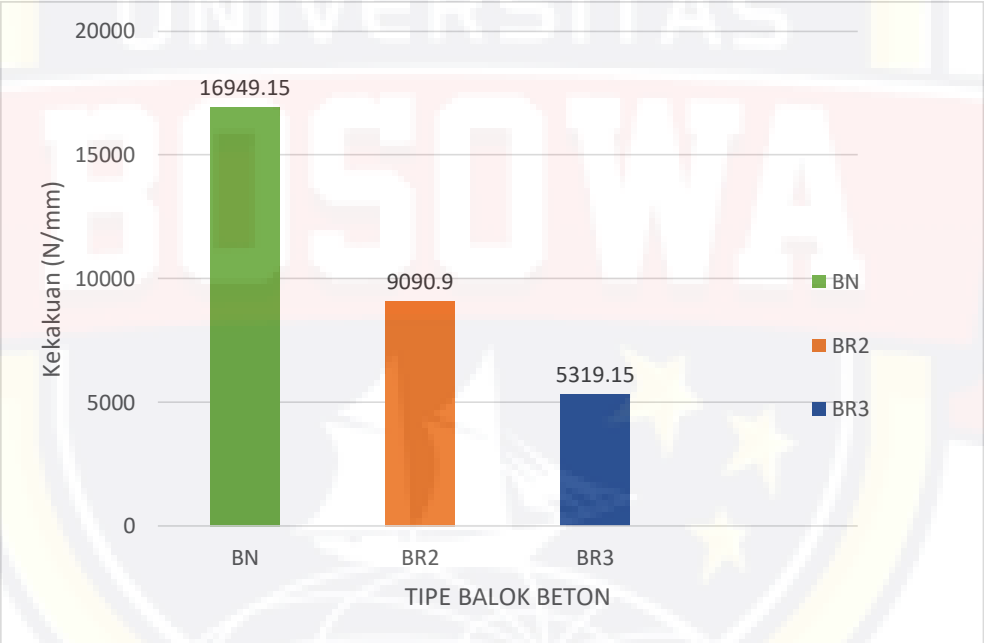
4.2 .3 Penentuan Kekakuan Balok Uji

JENIS BALOK	Pcr	Δcr	K
	N	mm	N/mm
BN	10000	0,59	16949,15
BR2	5000	0,55	9090,90
BR3	5000	0,94	5319,15

Tabel 4.4. Tabel perhitungan nilai kekakuan balok uji

Pada Tabel 4.2. Retak awal, pada balok Normal (BN) terjadi pada beban 10000 N dengan lendutan sebesar 0,59 mm , pada balok BR2 retak awal terjadi pada beban sebesar 5000 N dengan lendutan sebesar 0,55 mm, benda uji BN dan BR2 menunjukkan nilai kekauan yang hampir sama. Sedangkan BR3 retak awal terjadi pada pembebanan 5000 N dengan lendutan sebesar 0,94 mm.

Perbandingan nilai kekakuan balok BN, BR2 dan BR3 dapat dilihat pada grafik.



Gambar 4.4. Grafik Nilai Kekakuan Balok

Dari gambar dapat dilihat bahwa nilai kekakuan BN adalah sebesar 16949,15 N/mm , BR2 sebesar 9090,9 N/mm dan BR3 sebesar 5319,15 N/mm.

4.3 Penentuan Daktilitas Balok Uji

Tabel 4.3 memperlihatkan daktilitas balok normal dan balok rongga dengan variasi tinggi (BR2 dan BR3).

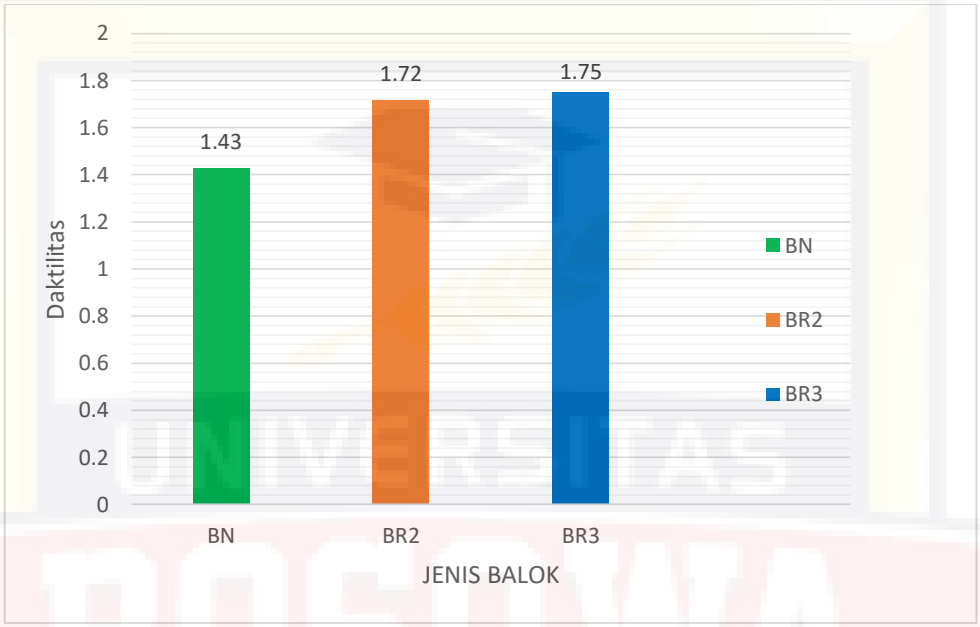
Tabel 4.5. Nilai Daktilitas

JENIS BALOK	Pmax	Δmax	Δy	μ
	kN	mm	Mm	
BN	140	14,08	9,88	1,43
BR2	135	16,80	9,75	1,72
BR3	130	17,88	10,23	1,75

Lendutan leleh dapat diperoleh dengan memplot titik pertemuan antara garis beban leleh dengan garis yang dibuat dengan menarik garis linier mulai titik nol kurva beban-lendutan ditarik lurus melalui titik perpotongan kurva dengan garis 0,75 beban leleh

Pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa lendutan maksimum pada BN yaitu 14,08 mm dengan lendutan leleh yaitu 9,88 mm , pada BR2 lendutan maksimum yaitu 16,80 mm dan lendutan leleh yaitu 9,75 dan pada BR3 dengan lendutan maksimum yaitu 17,88 dengan lendutan leleh yaitu 10,23 mm.

Perbandingan nilai daktilitas Balok Normal, Balok Rongga BR2 dan BR3 dapat dilihat pada grafik

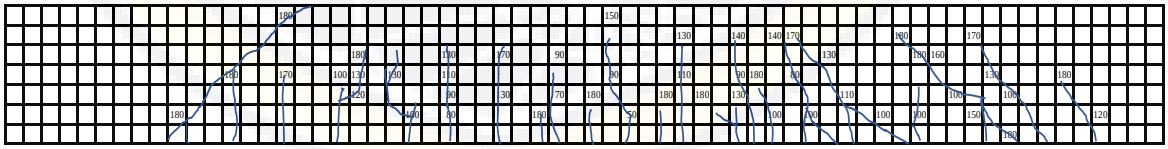


Gambar 4.5. Grafik Nilai Daktilitas

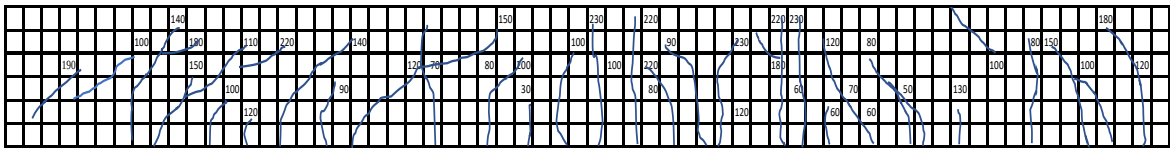
Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa daktilitas BN adalah sebesar 1,43 , BR2 sebesar 1,72 dan daktilitas balok BR3 sebesar 1,75

4.4 POLA RETAK BALOK

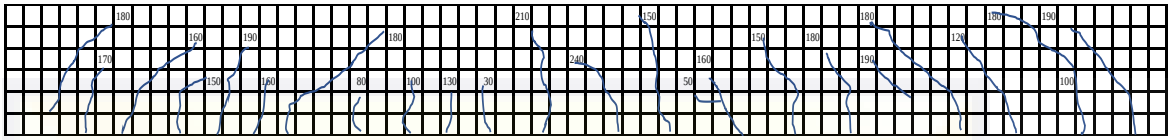
a. Benda Uji Balok Normal (BN)



b. Benda Uji Balok Berongga 2 (BR2)



c. Benda Uji Balok Berongga 3 (BR3)



Gambar 4.6. Pola Retak Balok Uji

Berdasarkan Gambar 4.6 di atas menunjukkan pola retak pada setiap balok uji. Dengan penambahan beban yang bertahap, akan mucul retak awal diikuti retakan lain dengan penyebaran retakan yang ada. Perambatan retak yang terjadi dari daerah tarik ke daerah tekan balok.

Pada Balok Uji beton normal mengalami retak pertama saat pembebanan sebesar 50 kN pada tengah bentang balok, pada balok beton berongga dengan 2 lapis botol mengalami retak pertama saat beban sebesar 30 kN pada tengah bentang balok dan pada balok berongga 3 lapis botol menunjukkan retak pertama saat beban sebesar 30 kN pada tengah bentang balok.

Berdasarkan gambar 4.4 diatas menunjukkan bahwa ketiga variasi balok mengalami kegagalan lentur. Hal ini dapat dilihat dari arah retak di daerah lapangan di tengah bentang balok yang hampir tegak lurus terhadap sumbu balok karena pada daerah ini timbul momen lentur paling besar. Pola retak yang terjadi pada masing-masing benda uji masih menggambarkan pola retak kerusakan lentur dan terlihat masih utuh secara keseluruhan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat ditarik beberaapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari hasil pengujian balok beton bertulang diperoleh :

   a. Pada balok beton normal (BN) diperoleh beban maksimum 140 kN dan lendutan maksimum sebesar 14,08 mm, untuk balok berongga BR2 beban maksimum 135 kN dengan lendutan maksimum sebesar 16,80 mm dan balok berongga BR3 130 kN sebesar 17,88 mm Kemampuan memikul beban dan lendutan yang terjadi pada BR2 dan BR3 menunjukkan tidak ada perbedaan yang signifikan dari BN karena rongga pada BR2 dan BR3 ditempatkan didaerah penampang tarik beton sehingga tidak mempengaruhi pada saat terjadi pembebanan.

   b. Pada kondisi retak awal, Balok Normal (BN) menunjukkan kekakuan sebesar 16949,15 , kekakuan balok BR2 yaitu 9090,9 dan kekakuan balok BR3 yaitu 5319,15.

   c. Hasil nilai daktilitas pada balok BN dengan nilai 1,43 dan pada balok BR3 menunjukkan nilai yang hampir sama yaitu 1,72 sedangkan BR2 sebesar 1,75

2. Pola retak untuk semua hasil pengujian menunjukkan balok normal dan berongga mengalami keruntuhan lentur.

5.2 Saran

Dalam penelitian ini peneliti menyadari masih banyak kekurangan. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik pada penelitian selanjutnya , maka peneliti memberi saran sebagai berikut:

1. Perlu diadakan penelitian selanjutnya tentang balok berongga menggunakan pembentuk rongga dari plastik bekas dengan volume rongga yang lebih besar, sehingga pengurangan volume beton dapat optimal.
2. Untuk pembuatan beton , perlu diperhatikan proporsi campuran pada saat pengadukan campuran beton, terutama kebutuhan air
3. Perlu diadakan penelitian selanjutnya tentang balok berongga botol plastik bekas sebagai pembentuk rongga dengan sistem dua arah

DAFTAR PUSTAKA

Anugrah, A.B., (2016). Kapasitas lentur balok beton bertulang dengan menggunakan styrofoam*. Tugas akhir. Jurusan teknik sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin: Makassar*.

Atmadja, W.M.T, Parung H, Irmawaty R, dan Amiruddin A.A, (2020) Kekakuan Pelat Beton Bertulang Berongga Dua Arah Dengan Pemanfaatan Pipa Pvc Sebagai Pembentuk Rongga, *http://repository.unhas.ac.id/id/eprint/6198/*

Dipohusodo, Istimawan., 1994, Struktur Beton Bertulang, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Jati, D. G., 2012. Analisis Lentur Pelat Sistem Satu Arah Beton Bertulang Berongga Bola Menggunakan Metode Elemen Hingga Non Linier, Yogyakarta: Tesis S2 Prodi S2 Teknik Sipil FT UGM.

Maskimi, Murtiadi S, Akmaluddin (2018). Perilaku struktur balok beton berongga bola*, Spektrum Sipil, ISSN 1858-4896, e ISSN 2581-2505 Vol. 5, No. 2 : 129 – 137*

Muizu, L. A. M., 2013. Perilaku Lentur Pelat Sistem Satu Arah Beton Beton bertulang Berongga dengan Pemanfaatan Botol Bekas Kemasan Air Minum Sebagai Pembentuk Rongga pada Volume Beton Tetap, Yogyakarta: Tesis S2 Prodi S2 Teknik Sipil FT UGM.

Rahardyanto, (2013). Studi eksperimental balok berongga dengan pemanfatan limbah botol PET, *Jurnal Penelitian FT UI*.

Sanjaya, A., 2015. Perilaku Lentur Pelat Sistem Satu Arah Beton Bertulang Berongga Dengan Pemanfaatan Kaleng Bekas Kemasan Susu Sebagai Pembentuk Rongga, Yogyakarta: Tesis S2 Prodi S2 Teknik Sipil FT UGM.

Sariman, S, Parung H, Djamaluddin R, dan Irmawaty R, (2018). Analisis Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Dengan Variasi Panjang Rongga Pada Penampang Tarik, *https://osf.io*

Standar Nasional Indonesia, 2013, Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, SNI 03-2847, Indonesia.

Wijayanti, N.T, Sulistyo D, dan Muslikh, (2013). Perilaku lentur pelat sistem satu arah beton bertulang berongga dengan pemanfaatan botol bekas berbahan plastik sebagai pembentuk rongga, *https://docplayer.info/209205984*

LAMPIRAN

Balok Beton Normal (BN)

Tanggal Percobaan : 7 Juli 2022

Berat : 452

Balok beton Variasi (BR2)

Tanggal Percobaan : 7 Juli 2022

Berat : 395,6

0	0
5	0,55
10	0,8
15	0,9
20	1,1
25	1,45
30	1,75
40	3,5
50	4,23
60	5,4
70	6,06
80	7,06
90	8,08
100	8,76
110	9,12
120	9,75
130	10,5
140	11,7
150	12,64
160	13,15
145	14,05
135	16,8

Balok Beton Variasi (BR3)

Tanggal Percobaan : 7 Juli 2022

Berat : 349,8

0	0
5	0,94
10	1,3
15	1,8
20	2,15
25	2,4
30	3,6
40	4,6
50	5,8
60	6,7
70	7,28
80	8,03
90	8,98
100	9,07
110	9,84
120	10,23
130	11,04
140	12,1
150	12,9
160	15,68
140	16,79
130	17,88

1 Perhitungan Teoritis Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Berongga.

1. Perhitungan Teoritis Kapasitas Lentur Balok Beton Normal (BN)

a. Mekanika Balok Normal

Lebar balok (b) = 175 cm = 0,175 m

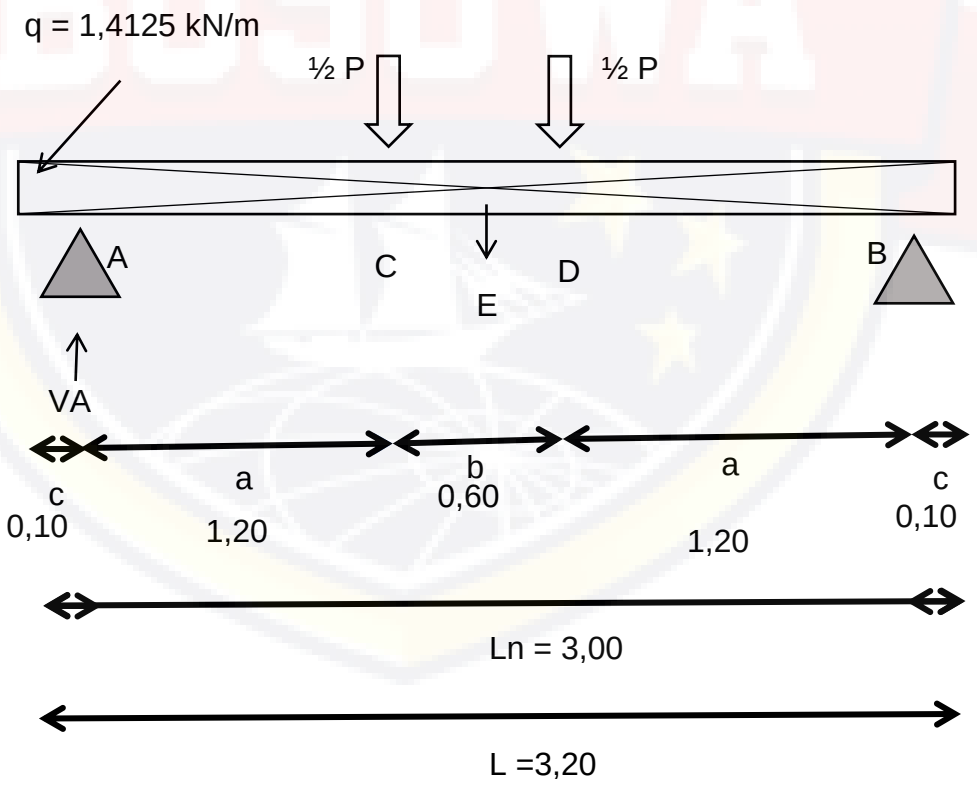
Tinggi balok (h) = 350 cm = 0,350 m

Berat balok BN = 452 Kg.

Berat jenis beton $= \frac{452 \times 100}{0{,}175 \times 0{,}350 \times 3200} = 23{,}0612\ kN/m^3$

Berat balok permeter = 0,175 × 0,350 × 23,061 = 1,4125 kN/m

Perhitungan Reaksi



Gambar 1 Sketsa mekanika balok normal (BN)

$\sum$ MB = 0

VA(Ln) – ½ P (a+b)- ½ P(a) – q.L(1/2b+a) = 0

VA(3,00) – ½P(1,20 + 0,60) – ½P(1,20) -1,4125×3,20 (1/2 0,60 + 1,20)= 0

VA 3,00 – ½ P (1,80) – ½ P(1,20) – 4,52 (1,50) = 0

VA 3,00 – 0,90 P – 0,60 P – 6,78 = 0

VA = $\frac{6,78+1,50\ P}{3,00}$

VA = 2,26 + 0,5 P

$\sum V$ = 0

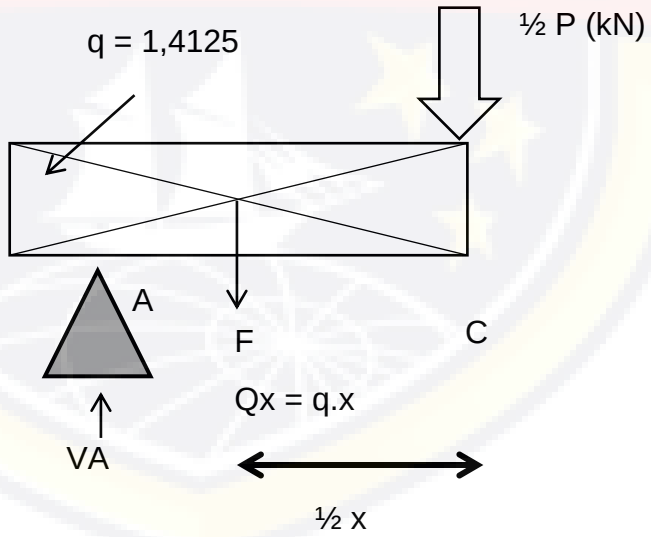
VA + VB = 0

2,26 + 0,5 P + VB – P – 4,52 = 0

VB = 2,26 + 0,5 P

Perhitungan gaya- gaya dalam

Bentang AC



Gambar 2 Sketsa mekanika bentang AC

Momen sejauh – x

Mx = VA (x) – q(c) (1/2 c+x) – q (x)(1/2x) = 0

= VA(x) – q(c) (1/2 c+x) – ½ q (x^2) = 0

= 2,26 + 0,5 P(x) – 1,4125 (0,10)(1/2 0,10 + x) – ½ 1,4125 (x^2) = 0

=2,26 + 0,5 Px - 0,14125 (0,05 + x) – 0,7063 x^2 = 0

= 2,26 + 0,5 Px – 0,007063 + 0,14125 x – 0,7063 x^2 = 0

= - 0,007063 + 2,40125 x– 0,7063 x^2 + 0,5 Px

bila x = 0 m	maka,	MA	= - 0,00706
bila x = 0,6 m	maka	MF	= 1,479438 + 0,3 P
bila x = 1,2 m	maka	MC	= 2,457438 + 0,6 P

Lintang sejauh x

Dx = dMx/dx maka – 0,007063 + 2,40125 x – 0,7063 X^2+ 0,5 Px

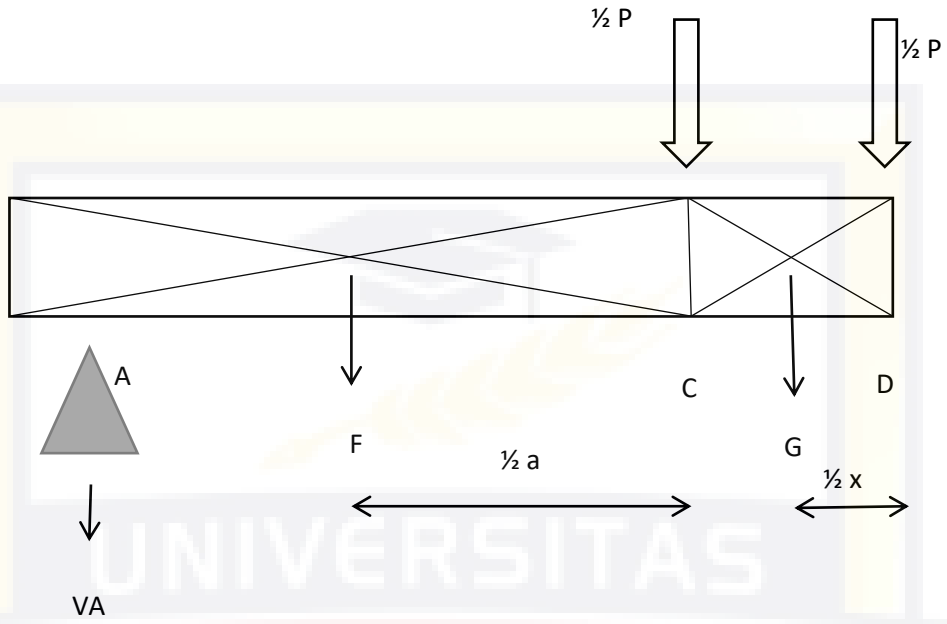
= 2,40125 – 1,4125 x + 0,5 P

bila x = 0	maka	DA	= 2,40125 + 0,5 P
bila x = 0,6	maka	DF	= 1,55375 + 0,5 P
bila x = 1,2	maka	DD	= 0,70625 + 0,5 P

Momen sejauh x

Nx = 0

Bentang CD



Gambar 3 Sketsa mekanika bentang CD

Momen sejauh –x

Mx = VA (a+ x) – Q(1/2(a+c)+x)-1/2 Px – ½ Qx(z)

= 2,26 + 0,5 P (1,2 + x) – 1,83625 (½ 1,2 + 0,10) (x) – 0,70625 x^2

= 2,712 x + 0,6 P + 0,5 Px – 1,83625 (0,65 + x) – 0,70625 x^2

= 1,5184375 – 0,42375 x + 0,6 P – 0,70625 x^2

Bila x = 0 maka , MC = 1,518438 + 0,6 P

Bila X = 0,3 maka, **M = 1,582 + 0,6 P**

Bila x = 0,6 maka, MD = 1,518438 + 0,6 P

Lintang sejauh –x

Dx = dMx/dx maka, 1,518438 – 0,42375 x + 0,6 P – 0,70625 x^2

= 0,42375 – 1,4125 x

Bila x = 0 maka, DC = 0,42375

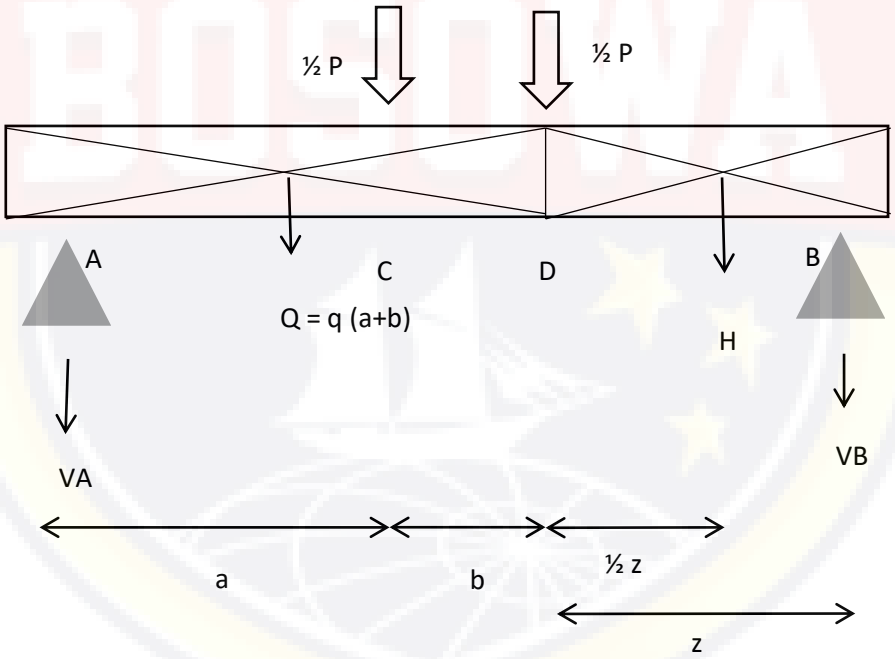
Bila x = 0,3 maka, D = 0

Bila x = 0,6 maka, DD = - 0,42375

Momen Sejauh –x

Nx=0

Bentang DB



Gambar 4 Sketsa mekanika bentang DB

Momen sejauh –x

Mx = VA (a+b)+x) – Q (1/2 (a+b+c)+x) – ½ P (b+x) – ½ Px – ½ qx (x)

= 2,26 + 0,5 P (1,2 + 0,60 + x) – 2,5425 (½ (1,2 + 0,6 + 0,10 + x) - ½ P (0,6 + x) – 0,5 Px – ½ 1,4125 x^2

= 2,26 + 0,5 P(1,8 + x) – 2,5425 (0,95 + x) – 0,5 P (0,6 + x) – 0,5 Px - 0,70625 x^2

= 4,068 + 0,9 P + 2,26 x + 0,5 Px – 2,415375 – 2,5425 x – 0,3 P – 0,5 Px – 0,5 Px – 0,70625 x^2

= 1,652625 – 0,2825 x – 0,70625 x^2 + 0,6 P – 0,5 Px

Bila x = 0	maka,	MD	= 1,652625 + 0,6 P
Bila x = 0,6	maka,	MH	= 1,228875 + 0,3 P
Bila x = 1,2	maka,	MB	= 0,2966

Lintang sejauh -x

Dx = dMx/dx maka, 1,652625 – 0,2825x – 0,70625x^2 + 0,6P – 0,5Px

= - 0,5 Px – 0,2825 – 1,4125 x

Bila x = 0	maka,	DD	= - 0,5 Px – 0,2825
Bila x = 0,6	maka,	DH	= - 0,3 P – 0,5650
Bila x = 1,2	maka,	DB	= - 0,6 P – 1,4125

Nx = 0

a. Desain Balok Normal (BN)

Kuat tekan beton (f'c)	= 17,55 Mpa
Tegangan leleh baja Tarik (fy)	= 481,78 Mpa
Tegangan Leleh baja tekan (f'y)	= 259,95 Mpa
Modulus elastisitas beton (Ec)	= 19690,14 Mpa
Modulus elastisitas baja tarik (Es)	= 206027,398 Mpa
Modulus elastisitas baja tekan (E's)	= 202111,304 Mpa

Asumsikan penampang akibat lendutan

Panjang bentang

Ln = 3 m = 3000 mm

h = Ln/16 = 187,5 mm

Dengan tulangan rangkap

d' = 32 mm

d_b = 3 ΦD 16

d_s = Φ 8

d = h – p – Φ_sk- ½ Φ_tu

= 350 – 20 – 8 – 8

= 314 mm

s = 28 mm

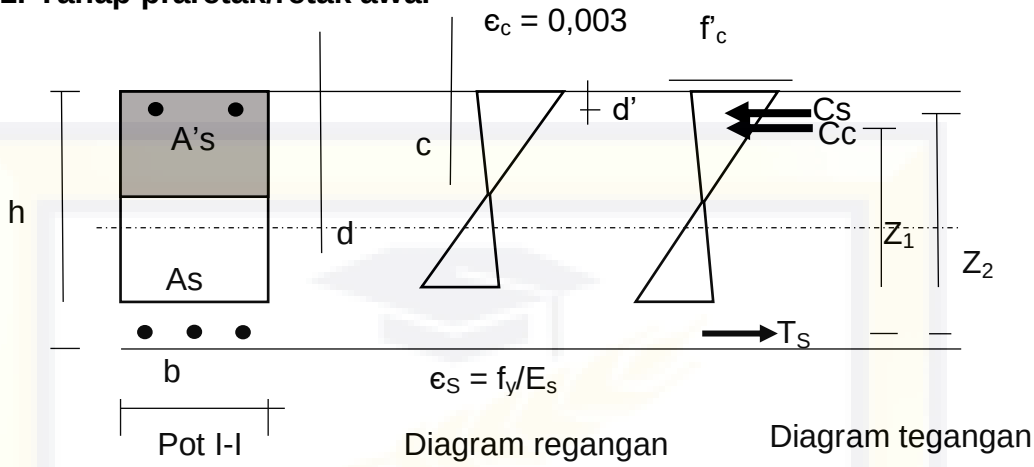
As = 3 ΦD 16 = 602,97 mm^2

A's = 2 Φ 8 = 100,53 mm^2

b. Kapasitas Penampang

Perilaku Lentur pada balok normal (BN)

1. Tahap praretak/retak awal



Gambar 5 Diagram tegangan – regangan pracetak

Angka eqivalen

$$n = \frac{Es}{Ec} = 10{,}4634809$$

$$n' = \frac{E's}{Ec} = 10{,}2645949$$

Titik berat penampang dari serat atas

$$y_n = \frac{b.h.\frac{1}{2h} + (n-1)As.d - (n-1)As'.d'}{b.h + (n-1)As - (n-1)As'}$$

$$= 184{,}7216478 \text{ mm}$$

$$y_b = 350 - y_n = 165{,}2783522 \text{ mm}$$

Momen Inersia penampang terhadap titik berat penampang

$$I_t = 1/12.b.h^3 + b.h.(1/2h - y_n)^2 + (n-1)\,As.(d-y_n)^2 + (n-1)As'.(y_n - d')^2$$

$$I_t = 748140250 \text{ mm}^4$$

Tegangan retak

$fr = 0{,}62\ \lambda \sqrt{f'c}$

$= 0{,}62 \times 1 \times 17{,}55$

$= 2{,}59744553$ Mpa

Momen retak

$$Mcr = \frac{fr.It}{y_b}$$

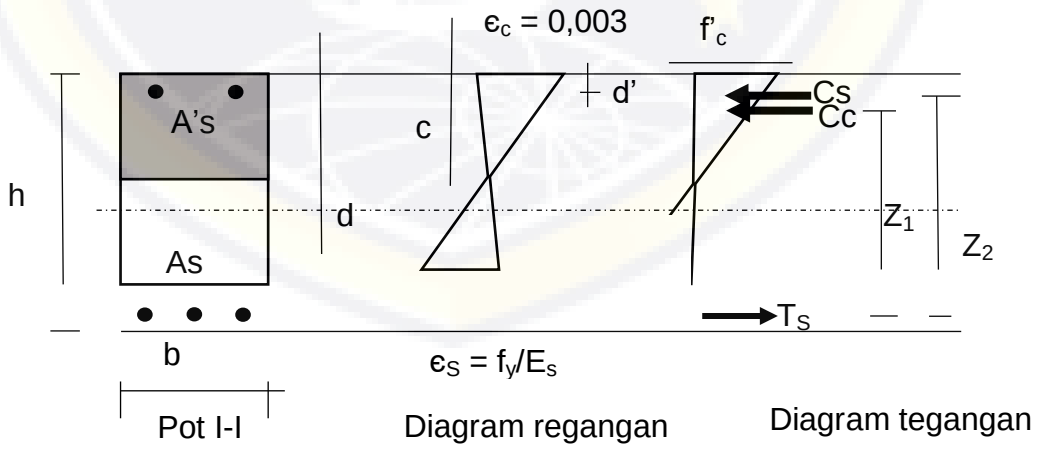
$= (2{,}59744553 \times 748140250) / 165{,}2783522$

$= 11757459{,}6$ Nmm $= 11{,}7574596$ kNm

Mcr = 1,582 + 0,6 P

Pcr = 16,9591 kN

Tahap terjadinya leleh pada tulangan



Gambar 6 Diagram tegangan – regangan kondisi leleh

Perhitungan nilai k menggunakan *trial and error*

Bila k = 0,51753998

k × d = 162,50755479 mm

εy = fy/Es = 0,002338427

$$\varepsilon c = \varepsilon y \frac{k.d}{d\text{-}kd}$$

$$= 0{,}002338427 \ \frac{0{,}51753998 \times 314}{314 - 0{,}51753998 \times 314}$$

= 0,002508455

$$\varepsilon's = \varepsilon c \frac{kd\text{-}d'}{kd}$$

$$= 0{,}002508455 \ \frac{0{,}51753998 \times 314 - 32}{0{,}51753998 \times 314}$$

= 0,002014506

fs' = εs × ε's = 407,1543423 Mpa

Cc = 0,5 × f'c × k×d×b

= 0,5 × 17,55 × 0,51753998× 314 × 175

= 249569,2809 N

Cs = As' × fs'

= 40931,6189 N

T = Cc + Cs

= 290500,8998 N

T = As.fy

= 290500,8998 N

Cc + Cs – As.fy = 0

290500,8998 – 290500,8998 = 0

Asumsi k Benar.

Menentukan lengan momen

Titik berat Cc dan Cs dari serat atas

$$y = \frac{Cc\,(0{,}33 \times kd) + Cs \times d'}{Cc + Cs}$$

$$= \frac{237631{,}5853\,(0{,}33 \times 0{,}51753998\backslash \times 314) + 52869{,}31451 \times 32}{2495569{,}2809 + 40931{,}6189}$$

= 50,58017617 mm

Lengan momen

z = d – y = 314 – 50,58017617 = 263,4198238 mm

My = As× fy×z

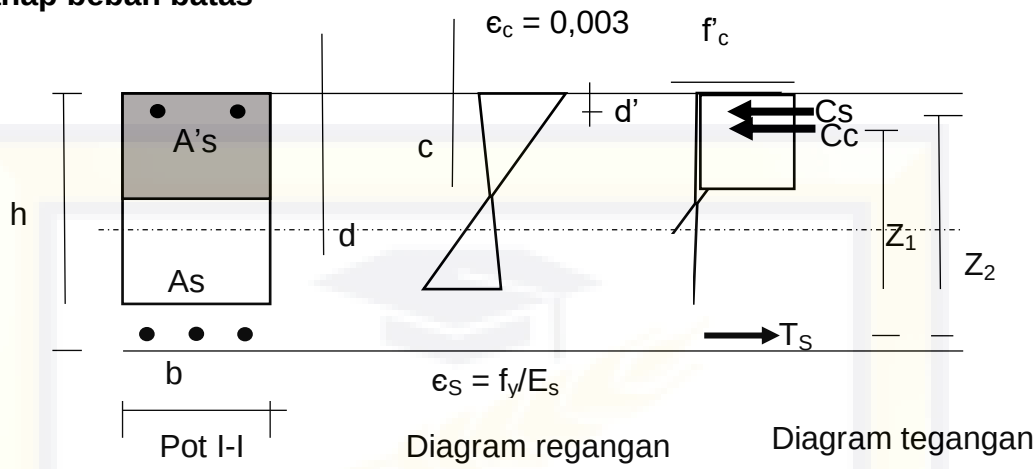
= 602,97 × 481,78 × 263,4198238

= 76523695,84 Nmm = 76,52369584 kNm

My = 1,582 + 0,6 × Py

Py = 124,9028264 kN = 12,49028264 ton

Tahap beban batas



Gambar 7 Diagram tegangan – regangan kondisi batas

Pengecekan nilai P (apakah melebihi P maks atau tidak)

Untuk f'c ≤ 28 Mpa maka β_1 = 0,85

Untuk f'c > 28 Mpa maka β_1 = 0,85 - $\frac{0,05 - (f'c - 30)}{7}$

Karena, f'c = 17,55 Mpa maka β_1 = 0,85

$$a_b = \frac{600 \times \beta_1 \times d}{600 + fy}$$

$$= \frac{600 \times 0,85 \times 314}{600 + 481,78}$$

$$= 148,0337962$$

$$\rho_b = \frac{As_b}{b.d}$$

$$= \frac{0,85.f'c}{fy\ d}$$

$$= \frac{0,85 \times 17,55}{481,78 \times 314}$$

$= 0,01459859$

$\rho_{maks} = 0,75 - \rho_b = 0,01094894$

$\rho_{min} = ¼ \text{ fy} = 0,00291$

$\rho = \frac{(As - A's)}{bd} = 0,009144$

Cek $\rho \leq \rho_{maks}$

0,009143644 < 0,01094894 Ok.

Momen nominal penampang

$$a = \frac{As.fy - A's.f'y}{0,85\ f'c\ b}$$

$$= \frac{602,97 \times 481,78 - 100,53 \times 259,95}{0,85 \times 17,55 \times 175}$$

$= 101,2608759$

$M_{nc} = 0,85\ f'c\ b\ (d - 0,5\ a)$

$= 0,85 \times 17,55 \times 175\ (314 - 0,5 \times 101,2608759)$

$= 69626370,19 \quad = 69,626$ Nmm

$M_{ns} = A's \times f's\ (d - d')$

$= 100,53 \times 407,1543423\ (314 - 32)$

$= 1154271,7 = 11,543$ Nmm

$M_0 = M_{nc} + M_{ns}$ = 69,626 + 11,543 = 81,169 Nmm

M_0 = M maks

81,169 = 1,582 + 0,6 P

0,6 P = 79,59

P = 132,65 kN.

2. Perhitungan kapasitas lentur balok beton Variasi (BR2)

   a. Mekanika Balok Normal

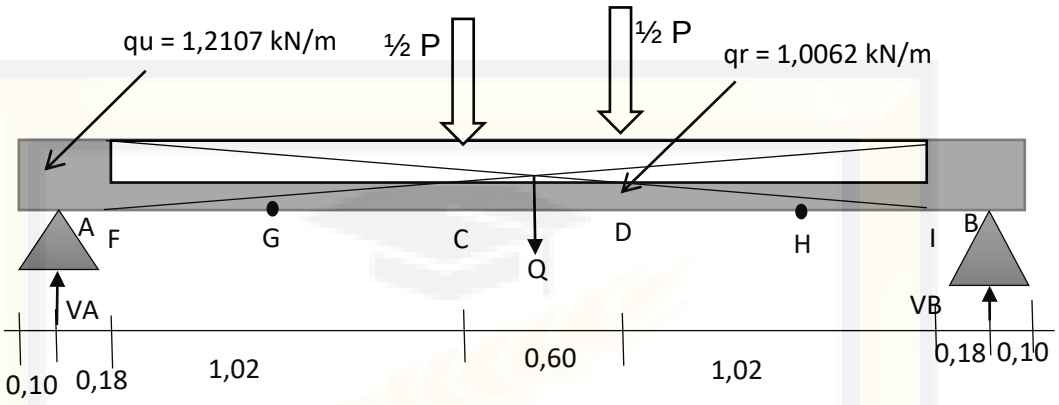
Lebar balok (b)	= 175 cm	= 0,175 m
Tinggi balok (h)	= 35 cm	= 0,35 m
Berat balok	= 395,6 Kg.	
Berat jenis beton	$= \frac{452 \times 100}{0,175 \times 0,350 \times 3,200}$ = 23,061 kN/m^3	
q utuh	= 0,175 × 0,350 × 23,061	
	= 1,2107 kN/m	

Berat jenis penampang rongga = $\frac{1,38 \times 100}{0,12 \times 2,64 \times 0,06}$ = 19,16645 kN/m^3

Berat sendiri balok (q) = 0,175 × 0,35 × 19,166 = 1,0062 kN/m

Q =1,0062 × 2,54 × 1,2107 × 0,56 =3,45 kN

Perhitungan Reaksi



Gambar 8 Sketsa mekanika balok rongga (BR2)

∑MB = 0

VA(Ln) – ½ P (a+b)- ½ P(a) – qu.Lu(½ 0,28+2,82) – qr.Lr (½ Lr+0,18) – ½ qu ($0,18^2$) + ½ qu ($0,10^2$)

VA(3,00) – ½P(1,20 + 0,60) – ½P(1,20) -1,2107×0,28 (2,96) - 1,0062 × 2,64 (½ 2,64 + 0,18) – ½ 1,2107 (0,0324) + ½ 1,2107 (0,01)

VA 3,00 – 0,9P – 0,6P – 1,00344 – 3,98470 – 0,01961 + 0,00605

$$VA = \frac{5,0017 + 1,5\,P}{3,00}$$

VA = 1,66723 + 0,5 P

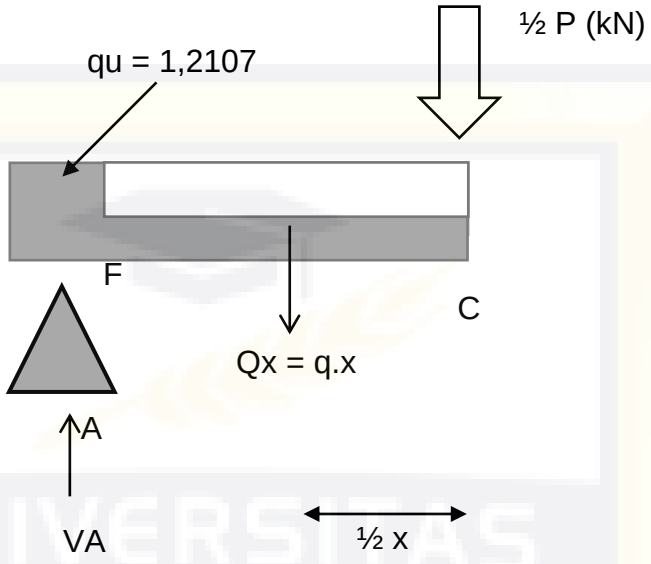
∑v = VA + VB – P – Q

VB = 1,66723 + 0,5 P – P – 3,33

= 1,66723 + 0,5 P

Perhitungan gaya- gaya dalam

Bentang FC



Gambar 9 Sketsa mekanika bentang FC

Momen sejauh – x

Mx = VA (0,18 + x) – qu × 0,28 (0,28/2 + x) - qr(x) (1/2x)

=1,66723 + 0,5P (0,18 + x) – 1,2107 × 0,28(0,14 + x) - 1,0062 (x)(½ x)

=0,3001 + 1,66723x + 0,09P + 0,5Px – 0,04746 – 0,339x – 0,50312 x^2

= 0,25264 – 2,00623 x – 0,50312 x^2 + 0,09 P + 0,5 Px

bila x = 0 m maka, MF = 0,25264 + 0,09 P

bila x = 0,51 m maka MG = 1,14496 + 0,345 P

bila x = 1,02 m maka MC = 1,77556 + 0,6 P

Lintang sejauh x

Dx = dMx/dx maka 0,25264 – 2,00623 x – 0,50312 x^2 + 0,09 P + 0,5 Px

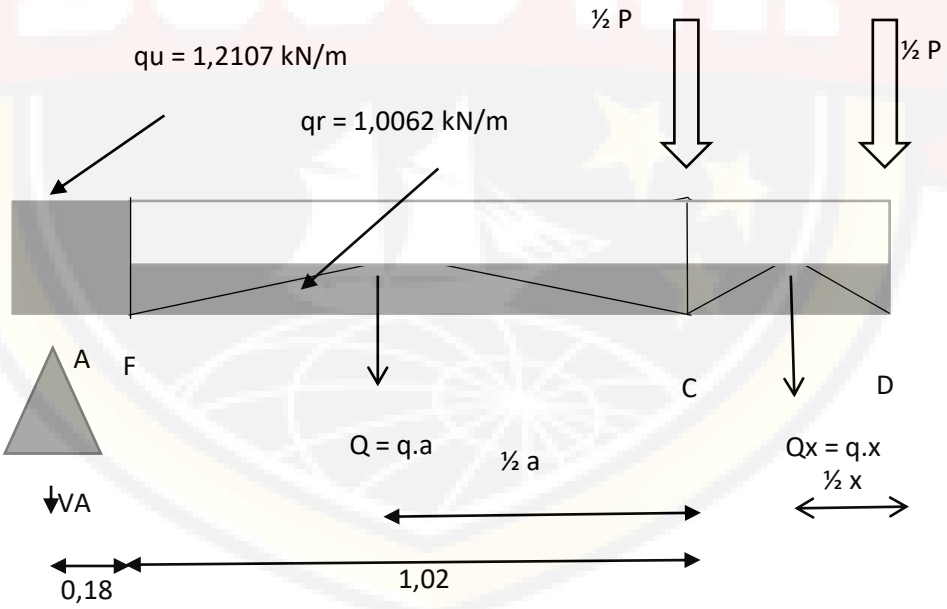
= - 1,0062 x + 2,00623 + 0,09 P

bila x = 0	maka	DF	= 2,00623 + 0,09 P
bila x = 0,6	maka	DG	= 1,49305 + 0,09 P
bila x = 1,2	maka	DC	= 1,03018 + 0,09P

Momen sejauh x

Nx = 0

Bentang CD



Gambar 10 Sketsa mekanika bentang CD

Momen sejauh –x

Mx = VA (a+ x) – qu.lu(1/2 0,28 + a – 0,18 + x) – qr. 1,02 (½ 1,02 + x) - 1/2 Px – ½ qr x^2

= 1,66723 + 0,5 P (1,2 + x) – 1,2107 × 0,28 (0,14 + 1,2 – 0,18 + x) - 1,0062 × 1,02 (0,51 + x) – 0,5 Px – ½ 1,006238 x^2

= 2,16741 + 1,66723x + 0,6P + 0,5Px – 0,39324 – 0,339x – 0,52345 – 1,02636 x – 0,5 Px – 0,50312 x^2

= 1,25072 + 0,30187 x – 0,50312 x^2 + 0,6 P

Bila x = 0	maka ,	MC	= 1,25072 + 0,6 P
Bila X = 0,3	maka,	**MT**	**= 1,296 + 0,6 P**
Bila x = 0,6	maka,	MD	= 1,25072 + 0,6 P

Lintang sejauh –x

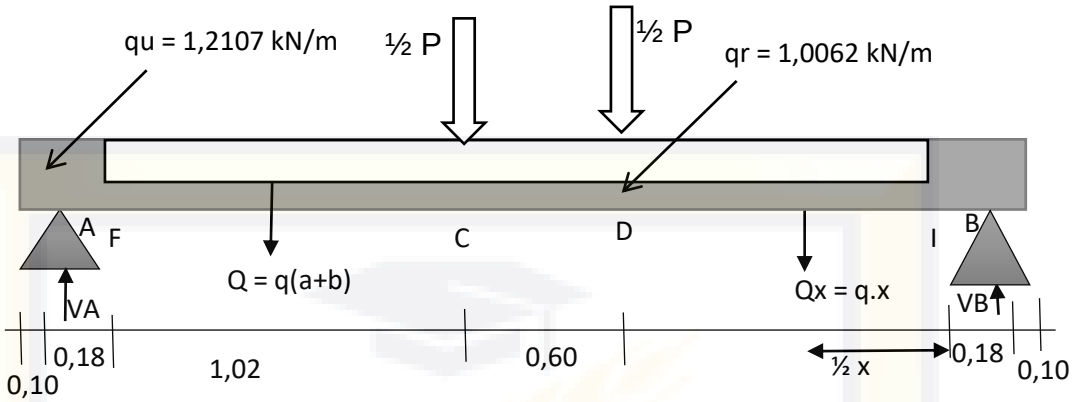
Dx = dMx/dx maka, 1,25072 + 0,30187 x – 0,50312 x^2 + 0,6 P

= 0,301872 – 1,006239 x

Bila x = 0	maka,	DC	= 0,301872
Bila x = 0,3	maka,	D	= 0
Bila x = 0,6	maka,	DD	= - 0,301872

Momen Sejauh –x Nx=0

Bentang DB



Gambar 11 Sketsa mekanika Bentang DB

Momen sejauh –x

Mx = VA (a+b)+x) – qu.0,28 (1/2 0,28 + x) – qr. (0,60 + 1,02) (1/2 (0,60 + 1,02) + x) - ½ P (b+x) – ½ Px – ½ qr (x^2)

= 1,66723 + 0,5 P (1,2 + 0,60 + x) – 1,2107 × 0,28 (0,14 + x) – 1,0062 × 1,62 (0,81 + x) – 0,5P (0,60 + x) - 0,5P – ½ 1,00062 x^2

= 1,66723 + 0,5 P (1,8 + x) – 0,3389 (0,14 + x) – 1,63004 (0,81 + x) – 0,3 P – 0,5 Px - 0,5 P – 0,503144 x^2

= 3,001176 + 1,66723 x + 0,9 P – 0,3 P – 0,5 Px + 0,5 Px – 0,047446 – 0,3389 x – 1,3203324 – 1,63004 x – 0,5 Px – 0,503144 x^2

= 1,6333976 – 0,30171 x – 0,503144 x^2 + 0,6 P – 0,5 Px

Bila x = 0 maka, MD = 1,6333976 + 0,6 P

Bila x = 0,51 maka, MH = 1,34866+ 0,345 P

Bila x = 1,02 maka, MI = 0,80218 + 0,09 P

Lintang sejauh -x

Dx = dMx/dx maka, 1,6333976 – 0,30171 x – 0,503144 x^2 + 0,6 P – 0,5Px

= - 0,5 P – 0,30171 – 1,0062 x

Bila x = 0	maka,	DD	= - 0,5 P – 0,30171
Bila x = 0,51	maka,	DH	= - 0,5 P – 0,2115
Bila x = 1,02	maka,	DI	= - 0,5 P – 0,7246

Nx = 0

Perilaku Lentur pada balok rongga (BR2)

1. **Tahap praretak/retak awal**

Angka eqivalen

$n = \frac{Es}{Ec} = 10,4634809$

$n' = \frac{E's}{Ec} = 10,2645949$

Momen retak penampang Transpormasi

Jarak Tarik terluar ke pusat berat penampang (γ_n)

f'c = 17,55130927 Mpa

fy = 481,78 Mpa

b = 175 mm

h = 350 mm

d = 314 mm

d' = 32 mm

As = 602,97 mm^2 A's = 100,53 mm^2

Titik berat penampang

		Luas bagian Penampang	jarak ke serat atas	Momen statis terhadap serat atas
1.	b × h =	61250 mm^2	175 mm	10718750 mm^3
2.	(n-1) As =	5706,2 mm2	314 mm	1791757,7 mm^3
3.	(n'-1) A's =	931,38 mm^2	32 mm	29804,117 mm^3
	=	67887,6 mm^2		12540311,8 mm^3
4.	b' × h' =	14400 mm^2	180 mm	2592000 mm^3
	=	53487,6 mm^2		9948311,79 mm^3

γ_n = 185,9928155 mm

γ_b = 350 - γ_n = 164,0071845 mm

Momen inersia penampang

I_t = 1/12.b.h^3+ b.h.(1/2h – γ_n)^2 + (n-1) As.(d-γ_n)^2+ (n-1)As'.(γ_n – d')^2 – 1/12b'h'^{3} – b'h'(350 - γ_n – ½ h')

It = 1/12 175 × 350 ^{3} + 175 × 350 (½ 350 – 185,9928155)^2 + (10,4634809 – 1) 602,97 (314 – 185,9928155)^2 + (19,2645949 – 1) 100,53 (185,9928155 – 32)^2 – 1/12 120 × 120^3 – 120 × 120 (164,0071845 – ½ 120)

It = 625260416,7 + 7401572,071 + 93501443,59 + 22086515,42 – 17280 – 188072276,5

It = 542897671,2

Tegangan retak

fr = 0,62 $\lambda \sqrt{f'c}$

= 0,62 × 1 × 17,55 $^{1/2}$

= 2,59744553 Mpa

Momen sebelum retak

Mcr = $\frac{fr.It}{y_b}$

= (2,59744553 × 542897671,2)/ 164,0071845

= 31741125,59 Nmm = 31,74112559 kNm

Mcr = 1,296 + 0,6 P

31,7411 = 1,296 + 0,6 P

0,6 P = 30,4451

Pcr = 50,7419 kN

Alternatif solusi dengan penampang bruto

Titik berat penampang

Luas bagian	Jarak ke Penampang	Momen statis ter serat atas	hadap serat atas
1) b × h =	61250 mm^2	175 mm	10718750 mm^2
2) b' × h' =	14400 mm^2	210 mm	3024000 mm^2
=	46850		7694750

y_n = 164,2422625 mm

y_b = 350 - y_n = 185,7577375 mm

Momen inersia

I_{bruto} = 1/12.b.h^3 + b.h(½ h - y_n)^2 – 1/12b'.h'^{3} – b.h(y_b. 80 – ½ h')

= 1/12 × 175 × 350 ^{3} + 175 × 350 (½ 350 – 164,2422625)^2 – 1/12 × 120 × 120^3 - 175 × 350 (185,7577375 × 80 – ½ 120)

I_{bruto} = 625260416,7 + 7088396,06 – 1728 – 213992853,6

I_{bruto} = 401075959,2 mm^4

$$M_{crack} = \frac{I_{bruto}.fr}{\gamma b}$$

$$= \frac{401075959,2 \times 2,59744553}{185,7577375}$$

M_{crack} = 5608025,348 N.mm

M_{crack} = 5,608025348 kN.m

1,296 + 0,6 P = 5,608025348

0,6 P = 4,312

P = 7,187 kN

Sudut kurvatur momen

φ_{cr} = (fr/Ec)/ y_b

$= \frac{(9,589/\ 19690,14)}{161,8571562}$

= 0,00000301 rad/mm

2. Taraf Pracetak : Daerah II (Terjadinya Leleh)

Perhitungan nilai k menggunakan *trial and error*

Bila k = 0,51635386

k × d = 162,1351108 mm

εy = fy/Es = 0,002338427

$\varepsilon c = \varepsilon y \frac{k.d}{d\text{-}kd}$

$= 0,002338427\ \frac{0,51635386 \times 314}{314 - 0,51635386 \times 314}$

= 0,0024965

$\varepsilon's = \varepsilon c \frac{kd\text{-}d'}{kd}$

$= 0,0024965\ \frac{0,51635386 \times 314 - 32}{0,51635386 \times 314}$

= 0,00200383

fs' = εs × ε's = 412,8439033 Mpa

Cc = 0,5 × f'c × k×d×b

= 0,5 × 17,55 × 0,51635386 × 314 × 175

= 248997,3038 N

Cs = As' × fs'

= 41503,59596 N

T = Cc + Cs

= 290500,8998 N

T = As.fy

= 290500,8998 N

Cc + Cs – As.fy = 0

290500,8998 – 290500,8998 = 0 Asumsi k Benar.

$$\gamma = \frac{Cc\ (0{,}33 \times kd) + Cs \times d'}{T}$$

$$= \frac{248997{,}3038\ (0{,}33 \times 0{,}51635386 \times 314) + 41503{,}59596 \times 32}{290500{,}8998}$$

= 50,43224608 mm

J_d = d – γ = 314 – 50,43224608 = 263,5677539

M γ = As f_y J_d = 765667 N.mm = 76,5667 kN,m

$M_{maks\ ditengah}$ = 1,296 + 0,6 P

M γ = $M_{maks\ ditengah}$

76,5667 = 1,296 + 0,6 P

0,6 P = 75,2707

P = 125,45 kN

Berdasarkan hasil perhitungan diatas maka dapat disimpulkan bahwa tulangan leleh pada beban 125,45 kN.

3. Taraf retak postserviceability : Daerah III (Ultimate)

Pengecekan nilai ρ (apakah melebihi ρ_{maks} atau tidak)

Untuk f'c ≤ 28 Mpa maka β_1 = 0,85

Untuk f'c > 28 Mpa maka β_1 = 0,85 - $\frac{0{,}05 - (f'c - 30)}{7}$

Karena, f'c = 17,55 Mpa maka β_1 = 0,85

$$a_b = \frac{600 \times \beta_1 \times d}{600 + fy}$$

$$= \frac{600 \times 0{,}85 \times 314}{600 + 481{,}78}$$

$$= 148{,}0337962$$

$$\rho_b = \frac{As_b}{b.d}$$

$$= \frac{0{,}85.f'c}{fy\ d}$$

$$= \frac{0{,}85 \times 17{,}55}{481{,}78 \times 314}$$

$$= 0{,}01459859$$

$$\rho_{maks} = 0{,}75 - \rho_b = 0{,}01094894$$

ρ_{min} = ¼ fy = 0,00291

$\rho = \frac{(As - A's)}{bd} = 0,0091436$

Cek $\rho \leq \rho_{maks}$

0,0091436 < 0,01094894 Ok.

Kontrol Tulangan Tekan Sudah Leleh atau Belum

$a = \frac{As.fy - A's.f'y}{0,85\ f'c\ b}$

$= \frac{602,97 \times 481,78 - 100,53 \times 259,95}{0,85 \times 17,55 \times 175}$

= 101,2608759

c = a/0,85 = 101,2608759/0,85 = 119,13044

εc = 0,002496568

$\varepsilon y = \varepsilon c \frac{d-c}{c}$

$= 0,002496568 \frac{314-119,13044}{119,13044}$

= 0,004083802

Ey > fy/Es = 0,0023384 Tulangan Tarik Sudah Leleh Gunakan fy

$\varepsilon' y = \varepsilon c \frac{c-d'}{c}$

$= 0,00249 \frac{119,13044-32}{119,13044}$

= 0,0023384

Ey > fy/Es = 0,0023384 Tulangan Tekan Sudah Leleh Gunakan fy

Momen nominal penampang

M_{nc} = 0,85 f'c b (d – 0,5 a)

= 0,85 × 17,55 × 175 (314 – 0,5 × 101,2608759)

= 69626370,19 = 69,62637019 kNmm

M_{ns} = A's × f's (d – d')

= 100,53 × 412,8439033 (314 – 32)

= 11704014,06 = 11,70401406 Nmm

M_0 = M_{nc} + M_{ns}

= 69,626 + 11,704

= 81330384,25 Nmm = 81,33038425

M_0 = M maks

81,330 = 1,296 + 0,6 P

0,6 P = 80,03

P = 133,39 kN.

3. Perhitungan kapasitas lentur balok beton Variasi (BR3)

   a. Mekanika Balok Normal

Lebar balok (b) = 17,5 cm = 0,175 m

Tinggi balok (h) = 35 cm = 0,350 m

Berat balok = 349,8 Kg.

Berat jenis beton $= \frac{452 \times 100}{0,175 \times 0,350 \times 3,200} = 26,905$ kN/m^3

q utuh = 0,175 × 0,350 × 26,905

= 1,4125 kN/m

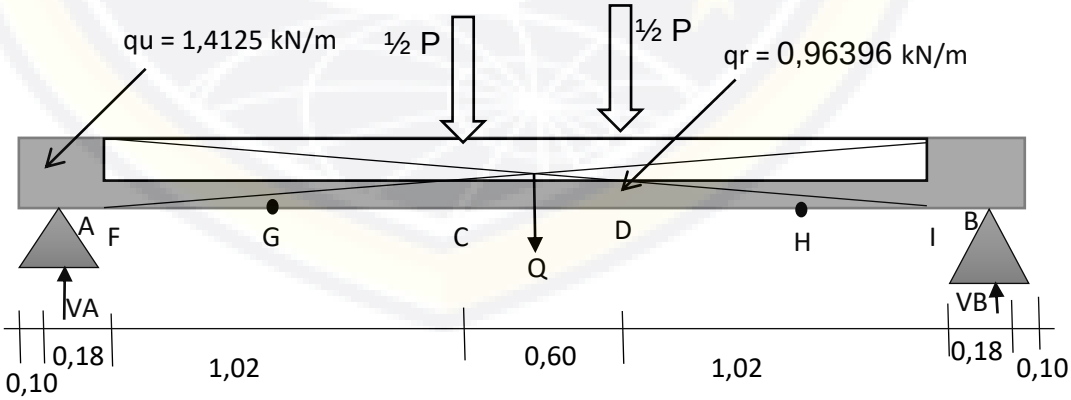
Berat jenis penampang rongga $= \frac{1,38 \times 100}{0,18 \times 2,64 \times 0,06} = 15,7382$ kN/m^3

Berat sendiri balok (q) = 0,175 × 0,35 × 15,7382

= 0,96396 kN/m

Q = 0,96396 × 2,64 × 1,4125 × 0,56 = 3,34 kN

Perhitungan Reaksi



Gambar 12 Sketsa mekanika balok rongga (BR2)

$\sum$ MB = 0

VA(Ln) – ½ P (a+b)- ½ P(a) – qu.Lu(½ 0,28+2,82) – qr.Lr (½ Lr+0,18) – ½ qu ($0,18^2$) + ½ qu ($0,10^2$)

VA(3,00) – ½P(1,20 + 0,60) – ½P(1,20) -1,4125×0,28 (2,953) – 0,96396 × 2,64 (½ 2,64 + 0,18) – ½ 1,125 (0,0529) + ½ 1,4125 (0,01)

VA 3,00 – 0,9 P – 0,6 P – 1,17068 – 3,8173 – 0,02288 + 0,007065

VA = $\frac{5,0038 \ +1,5\,P}{3,00}$

VA = 1,667933 + 0,5 P

$\sum$ v = 0

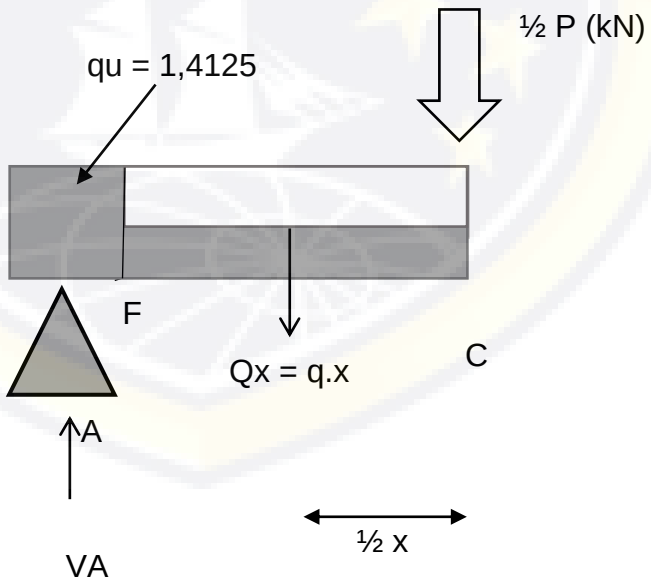
= VA + VB – P – Q

VB = 1,667933 + 0,5 P – P – 3,34

= 1,667933 + 0,5 P

Perhitungan gaya- gaya dalam

Bentang FC



Gambar 13 Sketsa mekanika bentang FC

Momen sejauh – x

Mx = VA (0,18 + x) – qu × 0,28 (0,28/2 + x) - qr(x) (1/2x)

=1,667933 + 0,5 P (0,18 + x) – 1,4125 × 0,28 (0,14 + x) - 0,96396 (x) (½ x)

= 0,300228 + 1,667933 x + 0,09 P + 0,5 Px – 0,05537 – 0,3955 x – 0,48198 x^2

= 0,244858 – 2,06343 x – 0,48198 x^2 + 0,09 P + 0,5 Px

bila x = 0 m	maka,	MF	= 0,24486 + 0,09 P
bila x = 0,51 m	maka	MG	= 1,17185 + 0,345 P
bila x = 1,02 m	maka	MC	= 1,84811 + 0,6 P

Lintang sejauh x

Dx = dMx/dx maka 0,244858 – 2,06343x – 0,48198x^2 + 0,09P + 0,5Px

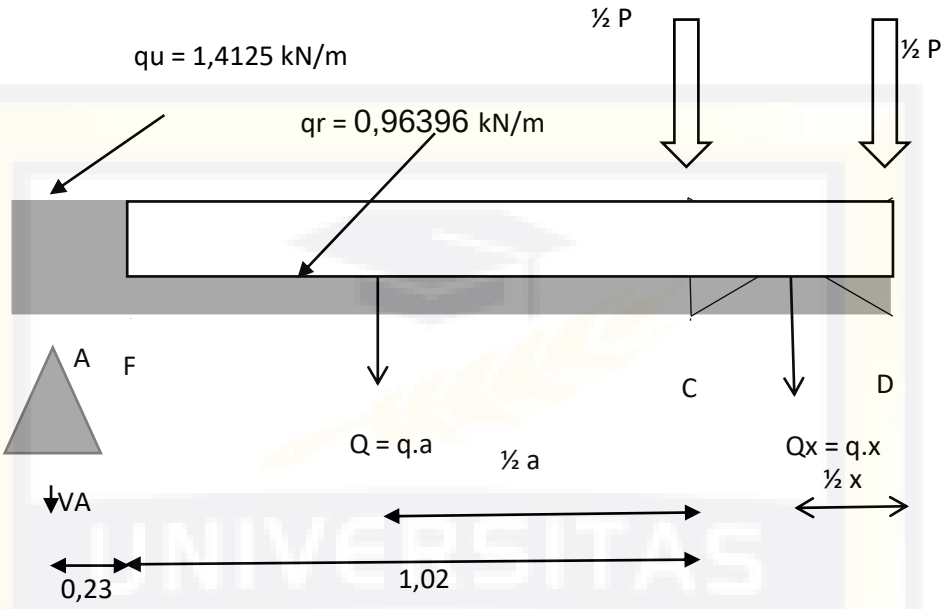
= - 0,964 x + 2,063 + 0,09 P

bila x = 0	maka	DF	= 2,06343 + 0,09 P
bila x = 0,6	maka	DG	= 1,57181 + 0,09 P
bila x = 1,02	maka	DC	= 1,08019 + 0,09 P

Momen sejauh x

Nx = 0

Bentang CD



Gambar 14 Sketsa mekanika bentang CD

Momen sejauh –x

Mx = VA(a+x)–qu.lu(½ 0,28+a–0,18+x)–qr.1,02 (½ 1,02+x)-1/2 Px–½ qr x^2

= 1,667933 + 0,5 P (1,2 + x) – 1,4125 × 0,28 (0,14 + 1,2 – 0,18 + x) –

0,96396 × 1,02 (0,51 + x) – 0,5 Px – ½ 0,96396 x^2

= 2,168314 + 1,667933x + 0,6P + 0,5Px – 0,26451 – 0,3955x –

0,50145 – 0,96396 x – 0,5Px – 0,48198 x^2

= 1,402347 + 0,28919 x – 0,48198 x^2 + 0,6 P

Bila x = 0 maka , MC = 1,40235 + 0,6 P

Bila X = 0,3 maka, **MT = 1,44573 + 0,6 P**

Bila x = 0,6 maka, MD = 1,40235 + 0,6 P

Dx = dMx/dx maka, 1,402347 + 0,28919 x – 0,48198 x^2 + 0,6 P

= 0,28919 – 0,48198 x

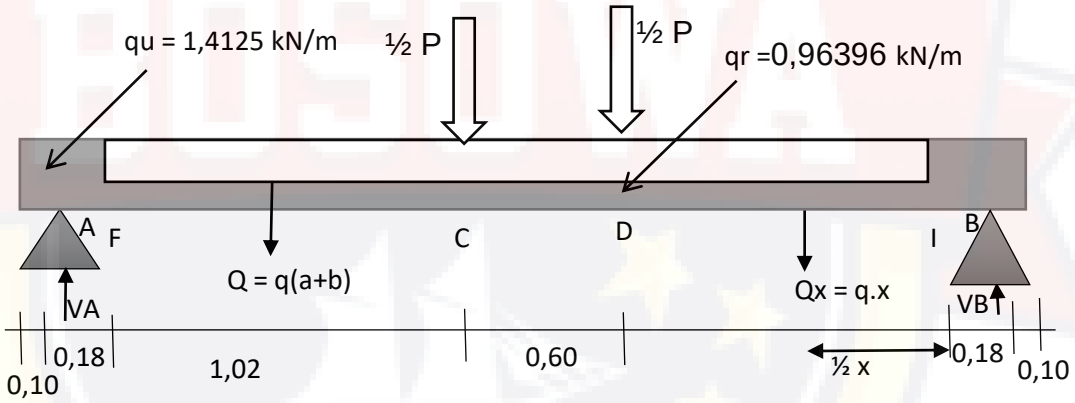
Bila x = 0 maka, DC = 0,28919

Bila x = 0,3 maka, D = 0

Bila x = 0,6 maka, DD = - 0,48198

Momen Sejauh –x Nx=0

Bentang DB



Gambar 15 Sketsa mekanika Bentang DB

Momen sejauh –x

Mx = VA (a+b)+x) – qu.0,28 (1/2 0,28 + x) – qr. (0,6 + 1,02) (1/2 (0,6 + 1,02) + x) - ½ P (b+x) – ½ Px – ½ qr (x^2)

$= 1{,}667933 + 0{,}5\ P\ (1{,}2 + 0{,}6 + x) - 1{,}4125 \times 0{,}28\ (0{,}14 + x) -$

$0{,}96396 \times 1{,}62(0{,}785 + x) - 0{,}5P(0{,}6 + x) - 0{,}5P - ½\ 0{,}96396\ x^2$

$= 1{,}667933 + 0{,}5\ P\ (1{,}8 + x) - 0{,}3955\ (0{,}14 + x) - 1{,}5616\ (0{,}785 +$

$x) - 0{,}3\ P - 0{,}5\ Px - 0{,}5\ P - 0{,}413128\ x^2$

$= 3{,}0022794 + 1{,}667933\ x + 0{,}9\ P - 0{,}3\ P - 0{,}5\ Px + 0{,}5\ Px - 0{,}05537$

$- 0{,}3955\ x - 1{,}2259 - 1{,}5616\ x - 0{,}5\ Px - 0{,}413128\ x^2$

$= 1{,}7210094 - 0{,}289167\ x - 0{,}413128\ x^2 + 0{,}6\ P - 0{,}5\ Px$

Bila x = 0 maka, MD = 1,7210094 + 0,6 P

Bila x = 0,51 maka, MH = 1,46608 + 0,345 P

Bila x = 1,02 maka, MI = 0,99624 + 0,09 P

Lintang sejauh -x

Dx = dMx/dx maka, $1{,}7210094 - 0{,}289167x - 0{,}413128x^2 + 0{,}6P - 0{,}5\ Px$

$= -0{,}5\ P - 0{,}289167 - 0{,}96396\ x$

Bila x = 0 maka, DD = - 0,5 P – 0,289167

Bila x = 0,51 maka, DH = - 0,5 P – 0,7807866

Bila x = 1,02 maka, DI = - 0,5 P – 1,2724062

Perilaku Lentur Pada Balok Rongga (BR3)

1.Tahap praretak/retak awal

Angka eqivalen

$n = \frac{Es}{Ec} = 10,4634809$

$n' = \frac{E's}{Ec} = 10,2645949$

Momen retak penampang Transpormasi

Jarak Tarik terluar ke pusat berat penampang (γ_n)

f'c = 17,55130927 Mpa

fy = 481,78 Mpa

b = 175 mm

b' = 120 mm

h = 350 mm

h' = 120 mm

d = 314 mm

d' = 32 mm

As = 602,97 mm^2

A's = 100,53 mm^2

Titik berat penampang

		Luas bagian Penampang	jarak ke serat atas	Momen statis terhadap serat atas
5.	b × h =	61250 mm^2	175 mm	10718750 mm^3
6.	(n-1) As =	5706,2 mm2	314 mm	1791757,7 mm^3
7.	(n'-1) A's =	931,38 mm^2	32 mm	29804,117 mm^3
	=	67887,6 mm^2		12540311,8 mm^3
8.	b' × h' =	14400 mm^2	180 mm	2592000 mm^3
	=	53487,6 mm^2		9948311,8 mm^3

γ_n = 185,9928155 mm

γ_b = 350 - γ_n = 164,0071845 mm

Momen inersia penampang

I_t = 1/12.b.h^3+ b.h.(1/2h – γ_n)^2 + (n-1) As.(d-γ_n)^2+ (n-1)As'.(γ_n – d')^2 – 1/12b'h'^{3} – b'h'(350 - γ_n – ½ h')

It = 1/12 175 × 350 ^{3} + 175 × 350 (½ 350 – 185,9928155)^2 + (10,4634809 – 1) 602,97 (314 – 185,9928155)^2 + (19,2645949 – 1) 100,53 (185,9928155 – 32)^2 – 1/12 120 × 120^3 – 120 × 120 (164,0071845 – ½ 120)

It = 625260417 + 7401572,07 + 93501443,6 + 22086515,4 – 17280 – 188072277

It = 542897671

Tegangan retak

$fr = 0{,}62\ \lambda \sqrt{f'c}$

$= 0{,}62 \times 1 \times 17{,}55^{\ 1/2}$

= 2,59744553 Mpa

Momen sebelum retak

$Mcr = \dfrac{fr.It}{y_b}$

= (2,59744553 × 542897671)/ 164,0071845

= 8597760,74 Nmm = 8,59776074 kNm

Mcr = 1,4457 + 0,6 P

8,598 = 1,3126+ 0,6 P

0,6 P = 7,152

Pcr = 11,92 kN

Alternatif solusi dengan penampang bruto

Titik berat penampang

		Luas bagian Penampang	Jarak ke serat atas	Momen statis ter hadap serat atas
3) b × h	=	61250 mm^2	175 mm	10718750 mm^2
4) b' × h'	=	14400 mm^2	210 mm	3024000 mm^2
	=	46850		7694750

y_n = 164,242263 mm

y_b = 350 - y_n = 185,757737 mm

Momen inersia

I_{bruto} = 1/12.b.h^3 + b.h(½ h - y_n)^2 – 1/12b'.h'^{3} – b.h(y_b. 80 – ½ h')

= 1/12 × 175 × 350 ^{3} + 175 × 350 (½ 350 – 164,242263)^2 – 1/12 × 120 × 120^3 - 175 × 350 (185,757737 × 80 – ½ 120)

I_{bruto} = 625260416,7 + 7088396,06 – 1728 – 213992853,6

I_{bruto} = 401075959 mm^4

$M_{crack} = \frac{I_{bruto}.fr}{\gamma b}$

$= \frac{401075959 \times 2{,}59744553}{185{,}757737}$

M_{crack} = 5608025,348 N.mm

M_{crack} = 5,608025348 kN.m

1,4457 + 0,6 P = 5,608

0,6 P = 4,1623

P = 6,9372 kN

Sudut kurvatur momen

φ_{cr} = (fr/Ec)/ y_b

$= \frac{(2{,}59744553 / 19690{,}14)}{185{,}757737}$

= 0,00000082 rad/mm

2.Taraf Pracetak : Daerah II (Terjadinya Leleh)

Perhitungan nilai k menggunakan *trial and error*

Bila k = 0,51635386

k × d = 162,1351108 mm

εy = fy/Es = 0,002338427

$$\varepsilon c = \varepsilon y \frac{k.d}{d\text{-}kd}$$

$$= 0{,}002338427 \frac{0{,}51635386 \times 314}{314 - 0{,}51635386 \times 314}$$

= 0,002496568

$$\varepsilon's = \varepsilon c \frac{kd\text{-}d'}{kd}$$

$$= 0{,}002496568 \frac{0{,}51635386 \times 314 - 32}{0{,}51635386 \times 314}$$

= 0,00200383

fs' = εs × ε's = 412,8439033 Mpa

Cc = 0,5 × f'c × k×d×b

= 0,5 × 17,55 × 0,51635386 × 314 × 150

= 248997,3038 N

Cs = As' × fs'

= 41503,59596 N

T = Cc + Cs

= 290500,8998 N

T = As.fy

= 290500,8998 N

Cc + Cs – As.fy = 0

290500,8998 – 290500,8998 = 0 Asumsi k Benar.

$$\gamma = \frac{Cc\ (0{,}33 \times kd) + Cs \times d'}{T}$$

$$= \frac{248997{,}3038\ (0{,}33 \times 0{,}51635386 \times 314) + 41503{,}59596 \times 32}{290500{,}8998}$$

= 50,43224608 mm

J_d = d – γ = 314 – 50,43224608 = 263,5677539

M γ = As f_y J_d = 76566669,66 N.mm = 76,56666966 kN,m

$M_{maks\ ditengah}$ = 1,4457 + 0,6 P kN.m

M γ = $M_{maks\ ditengah}$

76,567 = 1,4457 + 0,6 P

0,6 P = 75,121

P = 125,201 kN

Berdasarkan hasil perhitungan diatas maka dapat disimpulkan bahwa tulangan leleh pada beban 125,201 kN.

3. Taraf retak postserviceability : Daerah III (Ultimate)

Pengecekan nilai ρ (apakah melebihi ρ_{maks} atau tidak)

Untuk f'c ≤ 28 Mpa maka β_1 = 0,85

Untuk f'c > 28 Mpa maka β_1 = 0,85 - $\frac{0{,}05 - (f'c - 30)}{7}$

Karena, f'c = 17,55 Mpa maka β_1 = 0,85

$$a_b = \frac{600 \times \beta_1 \times d}{600 + fy}$$

$$= \frac{600 \times 0{,}85 \times 314}{600 + 481{,}78}$$

$$= 148{,}0337962$$

$$\rho_b = \frac{As_b}{b.d}$$

$$= \frac{0{,}85.f'c}{fy\ d}$$

$$= \frac{0{,}85 \times 17{,}55}{481{,}78 \times 314}$$

$$= 0{,}01459859$$

ρ_{maks} = 0,75 - ρ_b = 0,01094894

ρ_{min} = ¼ fy = 0,00291

$\rho = \frac{(As - A's)}{bd} = 0{,}009144$

Cek $\rho \leq \rho_{maks}$

0,009144 < 0,01094894 Ok.

Kontrol Tulangan Tekan Sudah Leleh atau Belum

$a = \frac{As.fy - A's.f'y}{0{,}85\ f'c\ b}$

$= \frac{602{,}97 \times 481{,}78 - 100{,}53 \times 259{,}95}{0{,}85 \times 17{,}55 \times 175}$

= 101,2608759

c = a/0,85 = 101,2608759/0,85 = 119,1304

εc = 0,002496568

$\varepsilon y = \varepsilon c \frac{d-c}{c}$

$= 0{,}002496568 \frac{314 - 119{,}1304}{119{,}1304}$

= 0,004083802

Ey > fy/Es = 0,002338 Tulangan Tarik Sudah Leleh Gunakan fy

$\varepsilon' y = \varepsilon c \frac{c-d'}{c}$

$= 0{,}002496568 \frac{119{,}1304 - 32}{119{,}1304}$

= 0,001825957

Ey > fy/Es = 0,002338 Tulangan Tekan Sudah Leleh Gunakan fy

Momen nominal penampang

M_{nc} = 0,85 f'c b (d – 0,5 a)

= 0,85 × 17,55 × 175 (314 – 0,5 × 101,2608759)

= 69626370,19 = 69,62637019 kNmm

M_{ns} = A's × f's (d – d')

= 100,53 × 532,34902 (314 – 32)

= 11704014,1 = 11,7040141 Nmm

M_0 = M_{nc} + M_{ns}

= 69,626 + 11,704

= 81330384,25 Nmm = 81,33038425

M_0 = M maks

81,33 = 1,3126 + 0,6 P

0,6 P = 79,88

P = 133,14 kN.

kesimpulan beban maksimum sebesar 133,14 kN

LENDUTAN

1. Kondisi Ultimate

BN Akibat beban terbagi rata

$$D = \frac{5.q.L4}{384.EI} = \frac{5 * 1{,}4125 * 3200^4}{384*23500*748140250}$$

D = 0.10969233 mm

Akibat beban P

$$D = \frac{23.P.L3}{648.EI} = \frac{23 * 133000 * 3200^3}{648*23500*748140250}$$

D = 8.798 mm

TOTAL= 8.908 mm

BR2

Akibat beban terbagi rata

$$D = \frac{5.q.L4}{384.EI} = \frac{5 * 1{,}2107 * 3200^4}{384*23500*542897671{,}2}$$

D = 0.12956551 mm

Akibat beban P

$$D = \frac{23.P.L3}{648.EI} = \frac{23 * 133000 * 3200^3}{648*23500*542897671{,}2}$$

D = 12.125 mm

TOTAL= 12.254 mm

BR3

Akibat beban terbagi rata

$$D = \frac{5.q.L4}{384.EI} = \frac{5 * 1{,}0931 * 3200^4}{384*23500*542897671}$$

D = 0.11698030 mm

Akibat beban P

$$D = \frac{23.P.L3}{648.EI} = \frac{23 * 133000 * 3200^3}{648*23500*542897671}$$

D = 12.125 mm

TOTAL= 12.241 mm

Dokumentasi

1.Proses Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Gambar 1. Pencampuran Material Menggunakan Mixer

Gambar 2. Pengecoran Benda Uji

Gambar 3. Penempatan Botol Plastik ke Benda Uji

Gambar 4. Proses Penyiraman Benda Uji

Gambar 5. Menggambar Benda Uji

2. Proses Pengujian Beton

Gambar 6. Pengujian Lentur Benda Uji

Gambar 7. Menggambar Pola Retak Pada Benda Uji

Gambar 8. Pembacaan Setiap Dial