

TUGAS AKHIR

KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG BERONGGA



**JURUSAN SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BOSOWA
MAKASSAR
2023**



UNIVERSITAS
BOSOWA MAKASSAR

Jln. Urip Sumoharjo Km.4
Telp.(0411) 452901 – 452789 Fax. 452949
MAKASSAR
FAKULTAS TEKNIK

**LEMBAR PENGAJUAN UJIAN TUTUP
TUGAS AKHIR**

Judul : "KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG BERONGGA "

Disusun dan diajukan oleh :

N a m a : NURHALISA NASRUDDIN

No.Stambuk : 45 18 041 004

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 :

Pembimbing I : Dr. Ir. H. Syahrul Sariman, MT

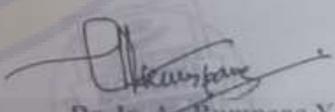
Pembimbing II : Ir. Arman Setiawan ST. MT

Mengetahui :

Dekan Fakultas Teknik

Ketua Program Studi / Jurusan Sipil


Dr. H. Nasrullah ST. MT.
NIDN.09-0807-7301


Dr. Ir. A. Rumpang Yusuf, MT
NIDN. 0001056502



UNIVERSITAS
BOSOWA

DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

Jalan Urip Sumaharto Km. 4 Gal. 2 Lt. B
Makassar - Sulawesi Selatan 90231
Telp. 0411 432 901 - 432 789 ext. 110
Faks. 0411 424 368
<http://www.universitadbosowa.ac.id>

HALAMAN PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar A-867/FT/UNIBOS/VIII/2023 tanggal 16 Agustus 2023, perihal Pengangkatan Panitia dan Tim Penguji Tugas Akhir, maka pada:

Hari/Tanggal : Rabu / 23 Agustus 2023

Tugas Akhir Mahasiswa :

N a m a : Nurhalisa Nasruddin

No.Stambuk : 45 18 041 004

Judul Tugas Akhir : "Kapasitas Lentur 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, ST. MT

Sekretaris (Ex Officio) : Ir. Arman Setiawan, ST. MT

Anggota : Prof.Dr.Ir. M, Natsir Abduh, M.si

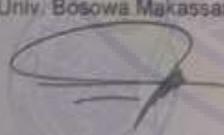
Ir.Eka Yuniarto, ST.MT

Makassar,

2023

Dekan Fakultas Teknik
Univ. Bosowa Makassar

Ketua Program Studi /Jurusan Sipil
Univ. Bosowa Makassar


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


Dr. Ir. A. Rumpang Yusuf, MT
NIDN. 00 010585 02

SURAT PERNYATAN KEASLIAN DAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : **Nurhalisa Nasruddin**
Nomor Stambuk : **45 18 041 004**
Program Studi : **Teknik Sipil**
Judul Tugas Akhir : **Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Beronga**
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 Makassar menyimpan, mengalihmediakan / mengalihformatkan, mengelola dalam bentuk data base, mendistribusikan dan menampilkannya untuk kepentingan akademik.
3. Bersedia dan menjamin untuk menanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa Makassar 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, 2023

Yang membuat pernyataan



(Nurhalisa Nasruddin)

45 18 041 004

KATA PENGANTAR

Segala pujian yang penuh keagungan dan kemuliaan senantiasa penulis panjatkan kepada Allah SWT tuhan yang maha esa, yang telah memberi kesehatan dan kekuatan hingga penulls dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Salawat serta salam kepada junjungan kita nabi muhammad saw yang telah menanamkan kesabaran dan semangat perjuangan bagi umatnya.

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat akademis untuk mencapai derajat sarjana teknik pada program studi strata satu Teknik Sipil, Fakutas Teknik Universitas Bosowa Makassar. Adapun judul skripsi ini yaitu : “ **KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG BERONGGA** “.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mengalami hambatan dan kendala yang penulis hadapi, namun berkat tekad dan dorongan serta bantuan, bimbingan dan kerjasama yang ikhlas dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang telah membantu dalam memberi arahan dan bimbingan dari :

1. Bapak Dekan, Para Wakil dekan dan Staf Fakutas Teknik Universitas Bosowa Makassar.

2. Bapak Dr.Ir. Andi Rumpang, M.T, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bosowa.
3. Bapak Dr.Ir.H.Syahrul Sariman, M.T, selaku Dosen Pembimbing satu dan Bapak Ir. Arman Setiawan, S.T,M.T. Selaku dosen pembimbing duasanya mengucapkan terima kasih sebesar- besarnya atas bimbingan, saran, dan motivasi yang diberikan sehingga tugas akhir ini selesai.
4. Bapak Prof.Dr.Ir.M. Natsir abduh, M.Si dan Bapak Ir.Eka Yuniarto, S.T., M.T. atas bimbingan, saran, motivasi dan bantuan yang diberikan.
5. Bapak Hasrulla, S.T, atas bimbingan, saran, motivasi yang diberikan dan bantuan yang diberikan.
6. Segenap Dosen Jurusan Teknik Sipil , Fakultas Teknik, Universitas Bosowa yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
7. Kedua orang tua ayahanda Nasruddin dan ibunda Suriyanti Arafah yang selalu mendoakan dan mendukung saya begitu banyak.
8. Teman- teman angkatan 2018 Teknik Sipil Fakutas Teknik Universitas Bosowa terima kasih telah memberikan dukungan moril, materi maupun semangat kepada penulis selama perkuliahan.

Akhir kata sebagai manusia biasa, menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kata sempurna, olehnya itu mengharapkan kritik dan saran yang sifatnya membangun dari semua pihak, demi kesempurnaan tugas akhir ini. semoga tugas akhir ini dapat memberikan sumbangan pikiran yang positif bagi pembaca.

Makassar, juli 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PENGAJUAN	iii
SURAT PERNYATAN KEASLIAN DAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR NOTASI	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-3
1.3 Tujuan Dan Manfaat Penelitian	I-3
1.3.1 Tujuan Penelitian	I-3
1.3.2 Manfaat Penelitian	I-3
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
2.2.1 kapasitas balok beton bertulang pada kondisi elastis	II-5
2.2.2 kapasitas balok beton bertulang pada kondisi elastis	II-6
2.3 Botol Plastik Bekas Atau Polyetylene Terephtalate (Pet)	II-8
2.4 Kuat Tekan	II-9
2.5 Kuat Lentur	II-10
2.6 Penelitian Terdahulu Mengenai Balok Beton Bertulang Berongga	II-14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	III-1
3.1 Jenis Penelitian Dan Desain Penelitian	III-1
3.1.1 Jenis Penelitian	III-1
3.1.2 Rancangan Benda Uji Untuk Penelitian Karakteristik Lentur	III-1
3.2 Lokasi Dan Waktu Penelitian	III-2
3.3 Alat Dan Bahan Penelitian	III-2
3.3.1 Bahan.....	III-2
3.3.2 Peralatan	III-4
3.4 Tahapan Penelitian	III-4
3.5 Kerangka Prosedur Penelitian	III-5
3.6 Notasi Dan Jumlah Sampel	III-6
3.7 Rancangan Alat Penelitian	III-6
3.8 Perhitungan Kuat Tekan	III-8

3.9 Mekanika Balok Normal dan Rongga.....	III-11
3.10 Perhitungan teoritis kapasitas lentur balok normal	III-14
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	IV-1
4.1 Hasil Analisi Kapasitas Balok Beton Bertulang Berongga Secara Teoritis	IV-1
4.2 Hasil analisis kapasitas balok beton bertulang berongga secara uji experimental.....	IV-3
4.3 Perbandingan beban dan momen maksimum secara teoritis dan uji experimen	IV-4
4.4 Perbandingan balok normal dan balok berongga	IV-5
4.5 Hubungan beban maksimum dengan berat benda uji	IV-7
BAB V PENUTUP	V-1
5.1 Kesimpulan.....	V-1
5.2 Saran.....	V-2

DAFTAR PUSTAKA

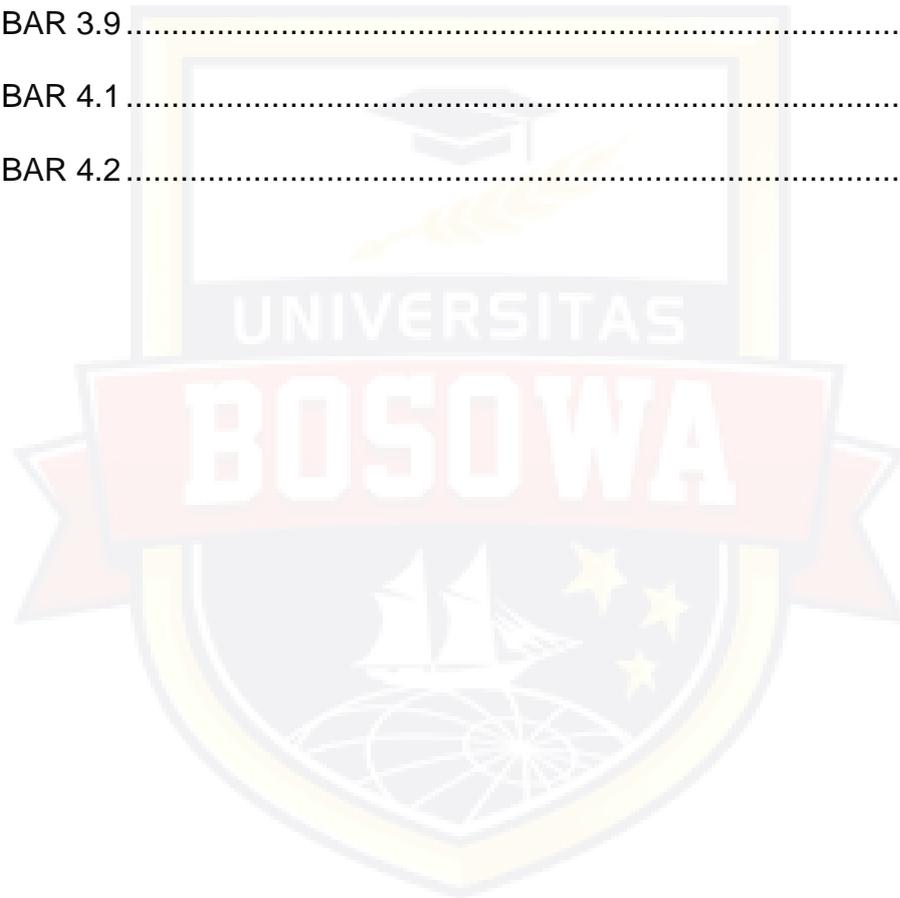
LAMPIRAN

DOKUMENTASI

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1	II-4
GAMBAR 2.2	II-5
GAMBAR 2.3	II-6
GAMBAR 2.4	II-6
GAMBAR 2.5	II-7
GAMBAR 2.6	II-8
GAMBAR 2.7	II-12
GAMBAR 2.8	II-18
GAMBAR 2.9	II-19
GAMBAR 2.10	II-20
GAMBAR 2.11	II-21
GAMBAR 2.12	II-24
GAMBAR 2.13	II-26
GAMBAR 2.14	II-27
GAMBAR 2.15	II-28
GAMBAR 2.16	II-29
GAMBAR 2.17	II-31
GAMBAR 3.1	III-3
GAMBAR 3.2	III-5
GAMBAR 3.3	III-8

GAMBAR 3.4.....	III-11
GAMBAR 3.5.....	III-13
GAMBAR 3.6.....	III-14
GAMBAR 3.7.....	III-16
GAMBAR 3.8.....	III-17
GAMBAR 3.9.....	III-20
GAMBAR 4.1.....	IV-6
GAMBAR 4.2.....	IV-8



DAFTAR TABEL

TABEL 2.1	II-17
TABEL 2.2.....	II-17
TABEL 2.3	II-23
TABEL 2.4	II-24
TABEL 2.5.....	II-25
TABEL 2.6.....	II-27
TABEL 2.7.....	II-30
TABEL 2.8.....	II-31
TABEL 3.1	III-6
TABEL 3.2	III-6
TABEL 3.3	III-8
TABEL 3.4.....	III-22
TABEL 4.1	IV-1
TABEL 4.2.....	IV-4
TABEL 4.3.....	IV-5
TABEL 4.4.....	IV-7
TABEL 4.5.....	IV-8

DAFTAR NOTASI

SNI	= Acuan peraturan standar nasional indonesia
f_c	= Mutu beton yang disyaratkan dengan benda uji silinder
Mpa	= Satuan kuat tekan beton
BN	= Balok beton normal
BR2	=Balok beton dengan variasi dua lapis botol bekas
BR3	=Balok beton bertulang berongga dengan variasi tiga lapis botol bekas
kN	= Kilonewton
PET	= Suatu resin termoplastik dari kelompok polister.
a	= Tinggi balok tegangan
b	= Lebar balok utuh
d	= Tinggi efektif penampang
f_y	= Kuat tarik baja tulangan
Φ	= Diameter tulangan polos
P_{cr}	= Beban pada saat retak awal
P_y	= Beban pada saat terjadinya leleh tulangan
P_u	= Beban pada saat penampang runtuh
M_{cr}	= Momen pada saat retak awal
M_y	= Momen pada saat terjadinya leleh tulangan
M_u	= Momen pada saat penampang runtuh

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini, kemajuan pembangunan dalam bidang struktur terlihat dalam berbagai aspek. Proyek-proyek seperti bendungan, menara, gedung-gedung, jembatan, dan lainnya sedang berlangsung. Manusia secara besar-besaran terlibat dalam kegiatan pembangunan dan lingkungan sekitarnya. Kehadiran bangunan memiliki peran sentral dalam kehidupan masyarakat dan juga berdampak pada lingkungan sekitarnya.

Salah satu bahan bangunan yang telah lama dikenal dan luas digunakan oleh masyarakat adalah beton. Ini dikarenakan beton memiliki kelebihan dibandingkan dengan bahan lainnya, seperti harganya yang terjangkau, kemudahan dalam pengerjaan dan perawatan, fleksibilitas dalam pembentukan sesuai kebutuhan, tahan terhadap cuaca, korosi, dan bahkan api. Karenanya, beton memegang peranan penting dalam kehidupan masyarakat dan seringkali memberi pengaruh pada kualitas hidup individu-individu.

Beton terdiri dari campuran air, semen, dan agregat yang mengeras melalui proses kimia. Pasta yang terbentuk dari semen dan air mengikat agregat halus (pasir) serta agregat kasar (kerikil). Prinsip dasar perhitungan struktur balok beton bertulang adalah bahwa beton menahan tekanan sedangkan baja tulangan menangani tegangan tarik.

Masalah limbah juga menjadi perhatian, terutama limbah plastik yang diproduksi dalam jumlah besar. Plastik adalah bahan buatan anorganik yang mengandung bahan kimia berbahaya bagi lingkungan. Limbah plastik sulit terurai secara alami. Oleh karena itu, penelitian dilakukan untuk memanfaatkan limbah botol plastik sebagai elemen pembentuk ruang dalam balok beton bertulang.

Dengan menggunakan limbah botol plastik sebagai elemen pembentuk ruang dalam balok beton bertulang, struktur menjadi lebih ringan, mengurangi penggunaan semen sebagai bahan dasar beton, dan mengurangi emisi gas CO₂ yang dihasilkan dari produksi semen. Penggunaan botol plastik dalam pembentukan ruang juga bisa berfungsi sebagai tempat fasilitas utilitas serta untuk mengatasi masalah limbah plastik.

Penelitian ini akan memfokuskan pada penggunaan limbah botol plastik sebagai elemen pembentuk ruang dalam balok beton bertulang dan menganalisis sifat mekaniknya, khususnya kapasitas lentur balok. Berdasarkan latar belakang ini, tugas akhir akan disusun dengan judul : **“KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG BERONGGA”**.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang dikemukakan diatas, maka dapat dirumuskan permasalahan penelitian ini adalah :

1. Bagaimana perbandingan kapasitas lentur balok beton bertulang berongga secara teoritis dan eksperimen?

2. Bagaimana perbandingan kapasitas lentur balok beton bertulang berongga dengan kapasitas lentur balok beton bertulang utuh?
3. Bagaimana hubungan berat balok dan beban maksimum yang dapat dipikul oleh balok beton bertulang berongga?

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

1.3.1. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini mencakup hal-hal berikut:

1. Untuk membandingkan secara teoritis dan melalui eksperimen kapasitas lentur antara balok beton bertulang berongga.
2. Untuk membandingkan kapasitas lentur antara balok beton bertulang berongga dengan balok beton bertulang tanpa rongga.
3. Untuk menemukan korelasi antara berat balok dan beban maksimum yang dapat diakomodasi oleh balok beton berongga.

1.3.2. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini meliputi:

1. Memberikan informasi mengenai kesetaraan kapasitas lentur antara balok beton bertulang berongga yang menggunakan botol plastik bekas dan balok beton bertulang tanpa rongga.
2. Menginformasikan bahwa penambahan botol plastik bekas pada balok beton bertulang tidak memengaruhi kapasitas lentur balok, namun mampu mengurangi volume beton sehingga balok menjadi lebih ringan.

3. Mengurangi dampak pencemaran lingkungan melalui pemanfaatan limbah sebagai bahan dalam produksi balok beton bertulang berongga.
4. Mengurangi konsumsi semen dan akibatnya mengurangi emisi gas CO₂ yang timbul dari proses pembuatan semen.
5. Mengakibatkan pengurangan berat konstruksi secara keseluruhan.

1.4. Pokok Bahasan dan Batasan Masalah

Dalam ruang lingkup penelitian ini, beberapa parameter telah diberlakukan secara terbatas guna mencapai tujuan yang telah ditetapkan.

Adapun lingkup masalahnya meliputi:

1. Penggunaan benda uji terdiri dari beberapa jenis balok, yaitu satu (1) balok standar tanpa modifikasi, serta dua (2) balok dengan penambahan limbah botol plastik. Balok dengan penambahan botol plastik ini diatur dalam dua varian, yaitu BR2 yang memiliki dua lapisan rongga botol plastik terletak pada bagian tengah bentang, dan BR3 yang memiliki tiga lapisan rongga botol plastik yang didistribusikan merata di seluruh panjang bentang balok.
2. Proses pembuatan benda uji dilakukan dengan metode pengecoran di tempat (cast in situ).
3. Pengamatan dalam penelitian ini difokuskan pada beberapa aspek, seperti kekuatan lentur, lendutan, dan retakan, hingga benda uji mencapai beban maksimum yang ditentukan.
4. Mutu beton yang direncanakan memiliki nilai f_c' 25 Mpa.

5. Pengujian dilakukan setelah beton mengalami proses pengerasan selama 28 hari.
6. Rongga dalam balok dibentuk dengan menggunakan limbah botol plastik minuman.

Dengan mempertimbangkan aspek-aspek di atas, penelitian ini berusaha mencapai tujuan yang telah ditetapkan.

1.5 Sistematika Penulisan

Berikut adalah struktur penulisan yang diterapkan:

1.5.1. Bab I Pendahuluan

Pada bagian ini, terdapat uraian mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, batasan permasalahan serta penguraian singkat tentang struktur bab yang terdapat dalam penulisan ini.

1.5.2. Bab II Tinjauan Pustaka

Bagian ini merangkum berbagai teori dan rumus yang diperoleh dari berbagai sumber untuk mendukung penelitian.

1.5.3. Bab III Metode Penelitian

pada bagian ini dijelaskan metode yang digunakan dalam pengumpulan data yang diperlukan untuk proses analisis.

1.5.4. Bab IV Hasil dan Pembahasan

pada bagian ini mencakup proses pelaksanaan penelitian yang melibatkan pengumpulan data, pengolahan data, analisis dan pembahasan data yang dieperoleh dari teori yang ada.

1.5.5. Bab V Kesimpulan dan Saran

Bagian ini memuat rangkuman dan rekomendasi mengenai penelitian akhir ini. Dibagian akhir penulisan, akan disertakan daftar referensi dan lampiran yang mengandung data pendukung yang digunakan dalam proses pengolahan informasi.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton sering menjadi bahan yang diterapkan dalam industri konstruksi karena kemudahannya dalam pembuatan dan penyesuaiannya, serta relatif ekonomis dibandingkan dengan bahan konstruksi alternatif.

Sebagai bahan konstruksi komposit, beton terdiri dari campuran agregat, semen, dan air. Hal ini dimaksudkan untuk menggali perilaku dari kombinasi unsur-unsur ini yang membentuk beton. Asal-usul kata "beton" atau "concrete" berasal dari kata Latin "concretus," yang berarti penggabungan atau perpaduan menjadi satu kesatuan. Beton sendiri adalah suatu bahan komposit yang kompleks, dimana agregat berfungsi sebagai bahan pengisi dan pasta semen bertindak sebagai bahan pengikat. Pada umumnya, aditif kimia juga ditambahkan untuk memperbaiki atau mengubah sifat-sifat beton sesuai dengan tujuan yang diinginkan.

2.2 Balok Beton Bertulang

Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 2847-2019, beton bertulang (Reinforced concrete) adalah bentuk beton struktural yang diperkuat dengan jumlah minimum baja prategang atau tulangan nonprategang sesuai dengan ketentuan dalam standar.

Beton dihasilkan melalui proses interaksi mekanis dan kimia dari berbagai material yang membentuknya. Beton terdiri dari campuran bahan agregat halus dan kasar, seperti pasir, batu, pecahan batu, atau material

serupa, dengan penambahan semen sebagai bahan perekat dan air untuk memfasilitasi reaksi kimia selama proses pengerasan dan perawatan beton (Dipohusodo, 1994).

Menurut Mosley dan Bungay (1989), beton memiliki kekuatan tarik yang hanya sekitar 10% dari kekuatan tekan. Karena itu, dalam banyak desain struktur beton bertulang, diasumsikan bahwa beton memiliki keterbatasan dalam menahan beban tarik. Tulangan dirancang untuk menangani gaya tarik dan mentransferkannya melalui pengikatan antara baja dan beton.

Secara esensial, beton bertulang adalah hasil perpaduan cerdas antara dua jenis bahan yang terlibat, yaitu beton tanpa tulangan dan baja tulangan. Beton tanpa tulangan memiliki kemampuan menahan tekan yang signifikan dan stabil. Baja tulangan memberikan daya tahan tarik yang besar sehingga mampu menahan tegangan yang dibutuhkan. Dengan menggabungkan karakteristik keduanya, harapannya adalah bahwa beton dan baja akan saling berkolaborasi dalam menahan gaya-gaya yang bekerja pada struktur tersebut. Gaya tekan ditanggulangi oleh beton, sedangkan gaya tarik ditahan oleh tulangan baja. Baja dan beton dapat berinteraksi berdasarkan beberapa faktor:

1. Lekatan (bond) adalah interaksi antara tulangan baja dan beton di sekitarnya, yang mengurangi kemungkinan slip antara baja dan beton.
2. Campuran beton yang tepat memberikan sifat tahan terhadap penetrasi air yang cukup untuk mencegah korosi pada baja.

3. Perbedaan laju perluasan termal antara baja dan beton yang relatif serupa menghasilkan tegangan antara keduanya yang bisa diabaikan di bawah perubahan suhu lingkungan.

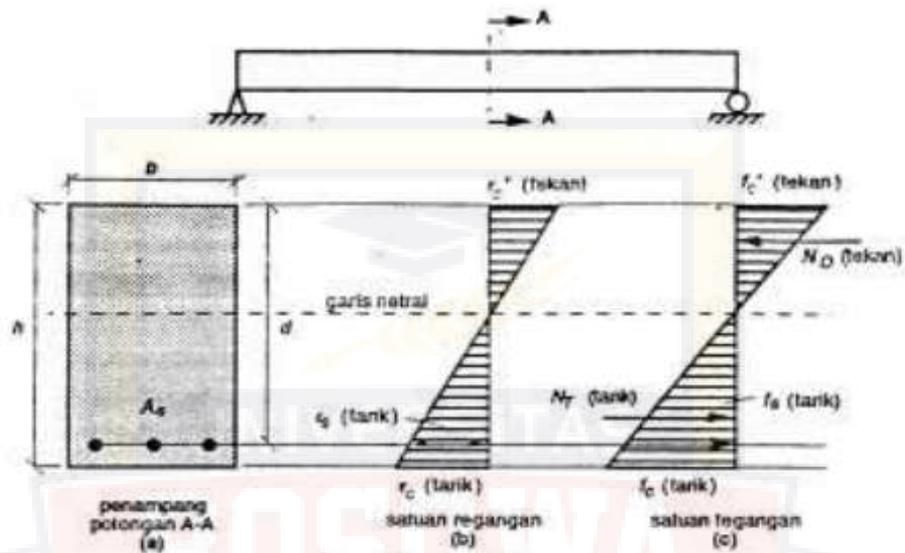
Struktur beton bertulang umumnya digunakan untuk elemen-elemen seperti balok, kolom, dan pelat. Agar struktur beton bertulang mampu menahan beban lentur tanpa mengalami kegagalan, analisis dan perancangan kuat lentur terhadap struktur beton bertulang perlu dilakukan.

Menurut Dipohusodo (1994), dalam konteks beban yang ditanggung oleh balok beton bertulang, beberapa asumsi diadopsi, termasuk:

- a) penampang balok yang datar sebelum mengalami lenturan akan tetap datar setelah mengalami lenturan. ini mencerminkan prinsip bernoulli, yang mengartikan bahwa distribusi regangan linier berlaku pada berbagai titik didalam penampang.
- b) Baik tulangan baja maupun beton mengikuti hukum Hooke, dimana tegangan berbanding lurus dengan reganagnnya hingga batas beban tertentu.
- c) Beton dianggap tidak tidak mampu menhaan gaya tarik. semua beban tarik diperoleh oleh tulangan baja.
- d) Batang tulangan baja sepenuhnya terikat dengan beton, sehingga pergeseran antara keduanya diabaikan.

tidak ada hubungan proporsional anatar nilai kekuatan tekan dan tarik bahan beton. setiap upaya untuk meningkatkan kekuatan tekan hanya diikuti dengan kenaikan kecil dalam nilai kekuatan tariknya. sebagai

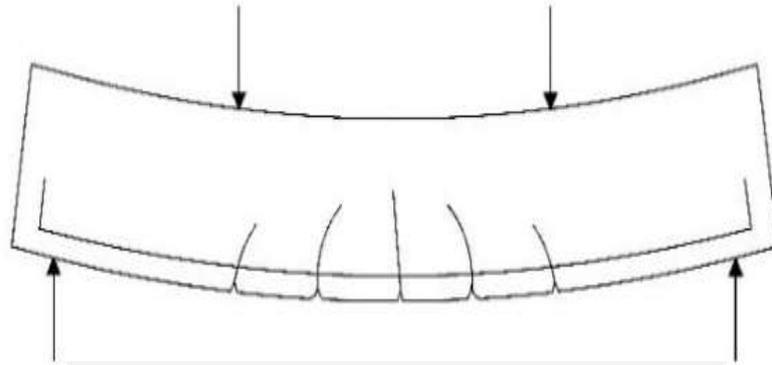
perkiraan kasar, nilai kekuatan tarik bahan beton biasanya hanya sekitar 9% hingga 15% dari nilai kekuatan tekannya. pandangan ini sejalan dengan perkiraan yang diungkapkan oleh Dipohusodo, (1996:10).



Gambar 2.1. Contoh distribusi tegangan dan regangan beton bertulang

Sumber : (Dipohusodo, 1994, hal. 26)

Menurut T.J. MacGinley dan B. S. Choo, beton bertulang adalah gabungan dari bahan tulangan baja yang diletakkan didalam beton yang mengeras. Tulangan baja berperan dalam menanggung gaya Tarik, sementara beton bertugas menahan gaya tekan. Beton memiliki kemampuan yang signifikan dalam mengatasi beban tekan namun tidak dapat menanggung beban tarik. oleh karena itu, penguatan dengan baja diperlukan untuk menahan gaya tarik yang timbul akibat momen. jika balok diberikan beban yang terlihat dalam gambar 2, akan muncul retakan saat terjadi keruntuhan akibat momen yang ditimbulkan oleh beban tersebut.



Gambar 2.2 Retak lentur sebelum runtuh

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

2.2.1. Kapasitas Balok Beton Bertulang Pada Kondisi Elastis

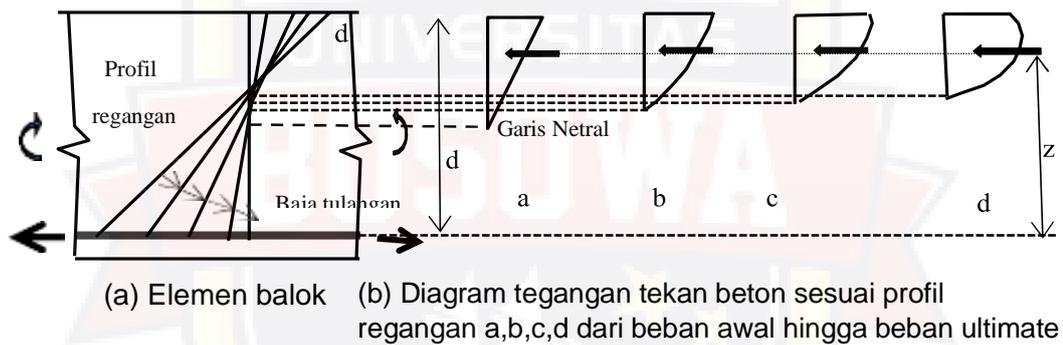
Ketika membawa momen lentur, beton menunjukkan sifat elastis sampai mencapai tingkat pembebanan tertentu. Menurut Dipohusodo (1994), dalam konteks beban yang diterapkan pada balok beton bertulang, beberapa asumsi digunakan:

- a. Penampang balok tetap datar sebelum mengalami lenturan dan tetap datar setelah mengalami lenturan. Prinsip ini mencerminkan gagasan Bernoulli, yang mengindikasikan bahwa distribusi regangan sebanding atau linear pada berbagai titik dalam penampang.
- b. Baik tulangan baja maupun beton mengikuti hukum Hooke, yang berarti nilai tegangan berbanding lurus dengan regangannya sampai batas pembebanan tertentu.
- c. Balok dianggap tidak memiliki kemampuan menahan gaya tarik. Semua tegangan tarik diteruskan ke tulangan baja.

d. Tulangan baja secara sempurna berdekatan dengan beton tanpa ada gesekan yang signifikan.

Dengan kata lain, dalam analisis momen lentur, asumsi-asumsi ini memandu pendekatan yang digunakan untuk menggambarkan perilaku balok beton bertulang dalam menghadapi pembebanan.

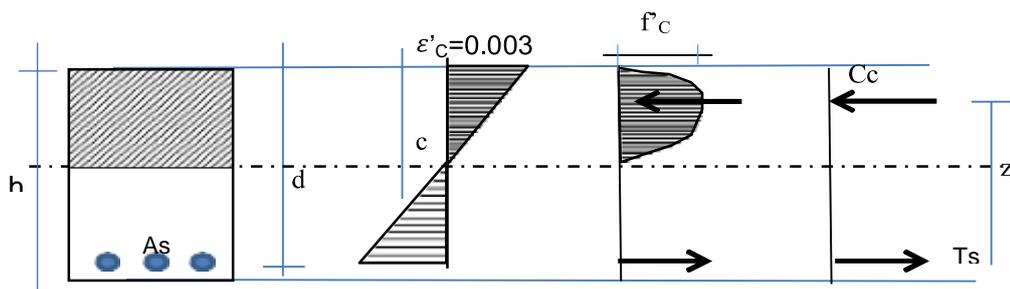
Menurut Park & Paulay (1975), jika beban terus bertambah, situasi keseimbangan akan terganggu dan grafik tegangan tekan pada penampang balok beton akan menyerupai kurva tegangan – regangan tekan seperti yang digambarkan dalam gambar 2.3 dibawah ini :

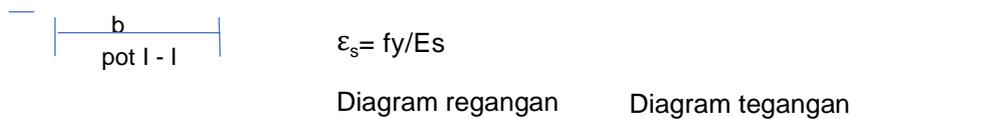


Gambar 2.3 Diagram regangan dan tegangan balok beton bertulang dalam kondisi seimbang

2.2.2. Kapasitas balok beton bertulang pada kondisi plastis

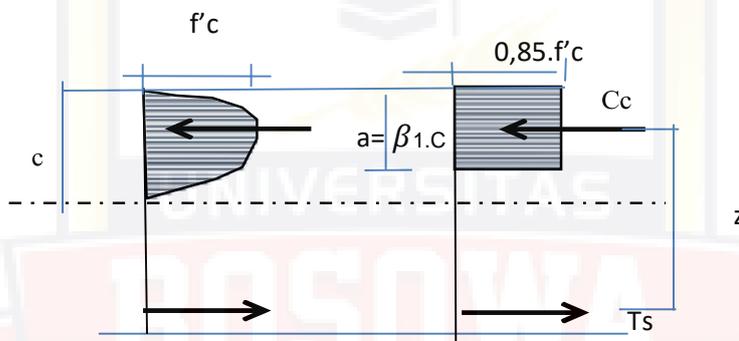
Pada kondisi plastis tegangan beton akan membentuk kurva non linier. Kurva tegangan diatas garis netral (daerah tekan) berbentuk sama dengan tegangan – regangan beton.





Gambar 2.4 Grafik hubungan tegangan – regangan kondisi plastis

Untuk penyederhanaan, Whitney mengusulkan balok diagram beton tekan berbentuk persegi dengan luas diagram tekan sama besar dengan bentuk diagram lengkung dan diadopsi pula dalam peraturan SNI 2847 : 2013.



Gambar 2.5 Diagram tegangan dan balok diagram

β_1 adalah konstanta yang tergantung dari kuat tekan beton,

1. Menurut SNI 2847 : 2019 :

untuk $f'_c \leq 28$ Mpa

$$\beta_1 = 0,85$$

untuk $f'_c > 28 < f'_c < 56$ Mpa

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008 (f'_c - 30) \geq 0,65$$

untuk $f'_c \leq 56$ Mpa

$$\beta_1 \geq 0,65$$

2. Besar gaya – gaya dalam :

Gaya tekan

$$C_c = 0,85 f'_c b . a \dots\dots\dots (2.1)$$

Gaya tarik

$$T_s = A_s f_y \dots\dots\dots (2.2)$$

Keseimbangan gaya dalam $C_c = T_s$ memberikan hasil tinggi balok tegangan :a

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} \dots\dots\dots (2.3)$$

Letak garis netral

$$c = \frac{a}{\beta_1} \dots\dots\dots (2.4)$$

Momen nominal :

$$M_n = C \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

Atau

$$M_n = T \left(d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

2.2 Botol plastik atau polyethylene terephtalate (PET)



Gambar 2.6 botol plastik atau polyethylene Terephtalate (PET)

Tidak dapat disangkal lagi bahwa saat ini banyak minuman dikemas dalam botol plastik. Botol plastik bekas, juga dikenal sebagai polyethylene terephthalate (PET), adalah salah satu jenis plastik yang dapat dengan mudah didaur ulang. Dalam industri konstruksi, penggunaan alternatif bahan yang berasal dari limbah telah mulai

diimplementasikan, termasuk dalam bahan tambahan untuk pembuatan beton, terutama dalam produksi beton bertipe ringan.

2.3 Kuat tekan

Kekuatan tekan merujuk pada parameter yang menunjukkan beban per satuan luas yang menyebabkan keruntuhan pada benda uji akibat gaya tekan tertentu. Kekuatan tekan digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi mutu dan kualitas beton, yang dipengaruhi oleh agregat, rasio semen, dan proporsi air. Keberhasilan dalam pembuatan beton dicapai ketika kekuatan tekanan yang dihasilkan oleh beton akan sejalan dengan yang telah diantisipasi dalam perancangan campuran (*mix design*).

Beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan tekan beton termasuk:

1. Faktor Air-Semen (FAS): keterkaitan antara FAS dan kekuatan tekan beton mengambarkan bahwa ketika nilai fas semakin rendah, kekuatan tekan betonnya cenderung lebih tinggi. Namun, pada suatu titik tertentu, penurunan nilai FAS dapat menyebabkan penurunan kekuatan tekan beton karena pada proses pencampuran beton menciptakan kesulitan untuk dikompakkan. oleh karena itu, terdapat nilai paling efektif pada FAS yang menghasilkan kekuatan tekan beton puncak.
2. Usia Beton: Kekuatan beton semakin tinggi seiring berlalunya waktu. laju peningkatan kekuatan beton dipengaruhi oleh faktor FAS dan suhu perawatan. Semakin besar nilai FAS, tingkat

kenaikan kekuatan beton akan lebih lambat. Peningkatan suhu perawatan juga dapat mempercepat peningkatan kekuatan beton.

3. kategori Semen: mutu berbagai kategori semen mempengaruhi kecepatan peningkatan daya tahan beton.
4. Efektivitas Pemeliharaan (*Curing*): penurunan kekuatan hingga 40% mungkin terjadi jika pengeringan muncul sebelum waktu yang seharusnya. Proses pemeliharaan (*curing*) sangat signifikan dalam kegiatan di lapangan dan pembuatan benda uji.
5. karakteristik material Agregat: Kekerasan permukaan, distribusi ukuran, dan dimensi agregat memiliki dampak pada daya tahan beton.

Perhitungan metode SNI 1974 – 2011 yang digunakan sebagai berikut :

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots (2.7)$$

Keterangan :

f'c = kuat tekan beton (Kg/cm²)

P = beban maksimum (kg)

A = luas penampang benda uji (cm²)

$$f'ck = f'cm - 1,645 \times S.Dev \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

1,645 = Koefisien kuat tekan

$$S.Dev = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi-x)^2}{n-1}}$$

2.4 Kuat lentur

Kekuatan lentur merujuk pada kapasitas beton untuk menahan gaya yang bergerak tegak lurus terhadap sumbu panjang serat di tengah-tengah balok yang dipegang di kedua ujungnya. Pada setiap penampang, terdapat gaya-gaya internal yang dapat diurai menjadi komponen-komponen yang saling tegak lurus dan berinteraksi dengan penampang tersebut. Komponen-komponen yang berperan tegak lurus terhadap penampang ini mewakili tegangan-tension (tarik) pada salah satu sisi yang berada di dekat sumbu netral, serta tegangan-compression (tekan) di sisi penampang lainnya. Fungsi dari komponen ini adalah untuk menahan momen lentur pada penampang balok.

Kekuatan lentur dalam balok beton timbul karena adanya interaksi tegangan-regangan di dalam balok, dan dalam kondisi tertentu, interaksi ini dapat diimbangi oleh gaya-gaya internal. Kekuatan lentur pada balok dikenal juga sebagai modulus kehancuran (modulus of rupture).

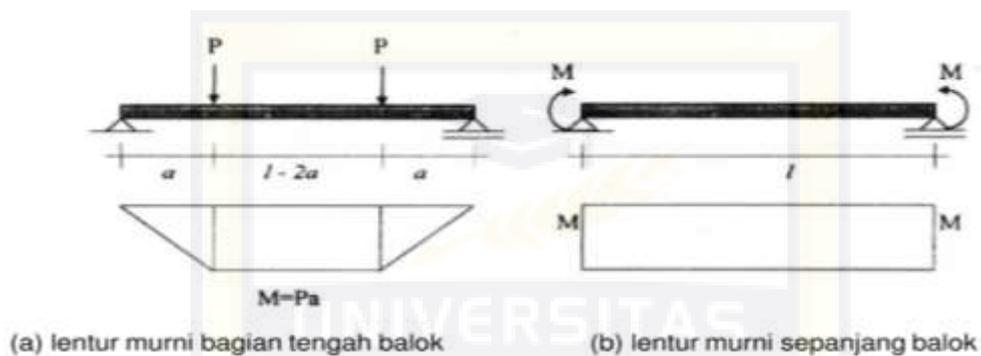
Perhitungan metode SNI 2847 – 2019 yang digunakan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{P \times L}{b \times h^2} \dots \dots \dots (2.9)$$

Keterangan:

- σ = Kuat lentur benda uji (Mpa)
- P = Beban maksimum (ton)
- L = Jarak bentang (mm)
- b = Lebar lintang patah arah horizontal (mm)
- h = Lebar lintang patah arah vertikal (mm)

Lenturan murni adalah lenturan yang terjadi pada balok ketika gaya- gaya lateralnya dinyatakan sebagai nol, ini diperoleh dengan menempatkan balok beton diatas tumpuan sederhana yang dibebani secara simetris, dengan jarak a dari titik tumpu, sebagaimana terlihat dalam ilustrasi gambar 2.7



Gambar 2.7. distribusi beban

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

Lenturan pada balok timbul karena terjadi deformasi akibat beban eksternal, hal ini diterapkan pada balok (Edward G. Nawy, 1990). Ketika beban bertambah, deformasi dan regangan tambahan terjadi pada balok, menyebabkan retakan lentur yang terbentuk di sepanjang bagian yang mengalami tegangan tarik. Jika beban terus meningkat, akhirnya elemen struktur mengalami keruntuhan. Tahap pembebanan di mana keruntuhan akibat lentur terjadi disebut sebagai kondisi batas keruntuhan lentur.

Dalam perhitungan desain kekuatan balok beton dengan penampang persegi, digunakan distribusi tegangan ekuivalen dalam bentuk

persegi yang diajukan oleh Whitney sebagai penyederhanaan dari distribusi tegangan lengkung yang lebih kompleks. Whitney mengusulkan suatu model distribusi tegangan persegi. Penyederhanaan ini diakui dalam SNI 03-2847-2002 Pasal 12.2 dengan intensitas tegangan rata-rata yang diberikan sebesar 0,85 kali f_c' (kekuatan tekan beton) dan tinggi blok tegangan $a = \beta_1 \cdot c$. Nilai β_1 ditetapkan oleh Whitney sebagai:

1. Untuk $f_c' \leq 28 \text{ MPa}$, $\beta_1 = 0,85$ (3)
2. Untuk $28 \text{ MPa} < f_c' \leq 56 \text{ MPa}$, $\beta_1 = 0,85 - 0,05 \frac{f_c' - 28 \text{ MPa}}{28 \text{ MPa}}$ (4)
3. Untuk $f_c' \geq 56 \text{ MPa}$, $\beta_1 = 0,65$ (5)

Nilai yang dijelaskan di atas mengikuti ketentuan dalam Pasal 12.2 ayat 7 poin 3 dari SNI 03-2847-2002. Dengan menggunakan pendekatan distribusi tegangan persegi ekuivalen ini, nilai kuat lentur nominal M_n dapat diestimasi. Metode dan kerangka perencanaan kekuatan ini berdasarkan pada asumsi-asumsi berikut:

1. Penampang balok dianggap tetap datar sebelum terjadi lenturan, dan tetap datar serta tegak lurus terhadap sumbu panjang balok setelah mengalami lenturan (prinsip Bernoulli). Oleh karena itu, regangan memiliki distribusi linier atau sebanding dengan jaraknya dari garis netral (prinsip Navier).
2. Tegangan hanya berbanding lurus dengan regangan hingga mencapai beban sedang, ketika tegangan tekan beton melebihi $\pm f_c'$. Namun, jika

beban terus meningkat menuju beban batas, tegangan yang terbentuk tidak lagi sebanding dengan regangan. Ini menyebabkan bentuk blok tegangan tekan berubah menjadi lengkungan.

3. Saat menghitung kapasitas momen, kontribusi dari beton tarik diabaikan, dan semua tegangan tarik ditahan oleh tulangan baja.

Dengan dasar-dasar ini, perhitungan kekuatan lentur dan kapasitas momen pada balok beton dirancang.

2.5 Penelitian Terdahulu mengenai balok beton bertulang berongga

Sejumlah penelitian serupa telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, sehingga dapat dijadikan sebagai titik perbandingan bagi penelitian ini. Dengan merujuk pada penelitian sebelumnya, perbedaan antara setiap penelitian dapat dianalisis, termasuk mengidentifikasi kekurangan-kekurangan yang mungkin terdapat pada penelitian sebelumnya. Informasi ini akan membantu melengkapi dan memperkaya pendekatan dalam penelitian yang akan dilakukan.

1. Rahardianto (2013) **Studi Eksperimental Balok Berongga Dengan Pemanfaatan Limbah Botol PET.**

Balok pra-cetak berongga bukanlah konsep baru dalam industri konstruksi, karena telah digunakan sebagai girder pada jembatan dan balok pada bangunan-bangunan tinggi. Rongga tersebut dihadirkan

dengan tujuan untuk mengurangi bobot balok, dengan niat untuk mempermudah proses pengangkutan pada lapangan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian guna menemukan metode eksekusi yang sederhana agar rongga tetap dapat dipertahankan, dengan dampak pada penghematan volume beton yang digunakan dalam proyek konstruksi.

Konsep pemanfaatan botol air mineral sebagai elemen pembentuk rongga dimaksudkan untuk mempermudah tahap produksi balok. Dalam penelitian sebelumnya terkait Hollow Core Slab (HCS), telah disorot beberapa kendala terkait proses pengecoran akibat gaya apung dari susunan botol, yang membuat pelaksanaannya menjadi kompleks.

Melalui pendekatan eksperimental, studi ini berupaya menemukan metode eksekusi yang lebih sederhana dan melibatkan analisis terhadap kekuatan lentur balok berongga menggunakan botol PET. Uji coba dilakukan pada benda uji berukuran $200 \times 400 \times 3850$ mm. Total enam balok berongga dengan mutu beton berbeda, yakni K-300 dan K-400, serta tiga contoh balok beton bertulang K-400 tanpa rongga dengan ukuran serupa diuji sebagai pembanding.

Hasil uji coba diolah dengan memperhatikan grafik yang memvisualisasikan hubungan antara beban dan lentutan, serta hubungan antara momen dan sudut rotasi di tengah bentang. Selain itu, dilakukan perbandingan kapasitas batas secara teoritis dan eksperimental. Temuan dari uji beban mengkonfirmasi teori yang menyatakan bahwa penggunaan rongga yang dibentuk oleh botol PET tidak memengaruhi kekuatan lentur

balok. Data menunjukkan bahwa balok dengan penggunaan botol PET K-400 memiliki momen ultimate 0,98 kali dari balok tanpa rongga dengan mutu beton yang serupa. Hasil penelitian juga mengungkap bahwa balok dengan penggunaan botol PET K-300 memiliki kekuatan yang melebihi balok dengan penggunaan botol PET K-400, yakni sebesar 1,017 kali. Melalui penerapan metode pelaksanaan dalam dua tahap pengecoran beton, berhasil mengatasi tantangan gaya apung yang diakibatkan oleh susunan botol PET. Solusi ini membuka jalan bagi penggunaan metode pembuatan balok berongga PET yang dapat dengan mudah diterapkan dalam kondisi lapangan.

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

Pemanfaatan botol bekas berbahan plastik sebagai elemen pembentuk rongga dalam pelat beton bertulang berongga, sejajar dengan sistem satu arah beton bertulang berongga, merupakan salah satu alternatif teknologi yang bertujuan untuk mengurangi berat sendiri pelat dan menghemat penggunaan material beton. Penempatan rongga di dalam struktur pelat beton diharapkan tidak akan berdampak pada kekuatan lentur pelat. Walaupun begitu, perilaku lentur baik dalam kondisi lendutan (layar) maupun dalam kondisi batas, seperti kekuatan, beban maksimum, dan

pola keruntuhan dari pelat beton bertulang berongga dengan pelat beton solid, memerlukan penyelidikan lebih lanjut.

Untuk mengatasi hal ini, penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan dua tahap pengujian yang berbeda. Tahap awal melibatkan pengujian pendahuluan yang mencakup karakterisasi sifat fisik dan mekanik bahan yang digunakan. Sedangkan pada tahap kedua, dilakukan pembuatan benda uji yang berjumlah empat buah pelat berongga. Benda uji ini akan digunakan untuk menjalani serangkaian pengujian yang lebih komprehensif dalam rangka mengidentifikasi perilaku lentur dari pelat beton bertulang berongga dengan penggunaan botol plastik bekas. Penelitian ini melibatkan empat benda uji berukuran skala penuh (2200 mm x 1000 mm) yang terdiri dari satu pelat beton bertulang solid (PS) dan tiga pelat beton bertulang dengan penggunaan botol plastik bekas kemasan air minum sebagai pembentuk rongga (PBBP-1, PBBP-2, dan PBBP-3). Ketebalan semua pelat adalah 120 mm. Pengujian dilakukan secara statik dengan menerapkan beban garis pada sepertiga panjang bentang struktur, dengan menggunakan tumpuan sederhana.

Selama penelitian, juga diamati respons dari pengujian beban berulang sebesar 20% (yang setara dengan beban hidup di ruangan perkantoran) dari beban retak awal. Pengulangan pembebanan ini dilakukan sebanyak 10 kali. Hasil analisis menunjukkan bahwa terjadi pengurangan volume beton pada pelat berongga 1 (PBBP-1) sebesar

18,52%, pada pelat berongga 2 (PBBP-2) sebesar 16,46%, dan pada pelat berongga 3 (PBBP-3) sebesar 14,41% dari volume pelat solid (PS).

Dalam hal kekuatan lentur, hasil eksperimen menunjukkan bahwa beban maksimum yang dapat ditahan oleh pelat berongga 1 (PBBP-1) adalah sebesar 98,0% dari beban maksimum yang ditahan oleh pelat solid. Pelat berongga 2 (PBBP-2) mampu menahan beban maksimum sebesar 98,04%, dan pelat berongga 3 (PBBP-3) sebesar 90,98% dari beban maksimum yang mampu ditahan oleh pelat solid. Meskipun begitu, beban maksimum hasil eksperimen sedikit lebih rendah dari perhitungan analitis. Secara spesifik, untuk pelat berongga PBBP-1, PBBP-2, dan PBBP-3 masing-masing adalah 96,83%, 96,96%, dan 90,09% dari hasil perhitungan analitis. Sementara itu, pelat solid memiliki kemampuan menahan beban maksimum sebesar 99,93% dari hasil perhitungan analitis.

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

Tabel 2.1. Spesifikasi benda uji pelat

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

1) Hasil Pengujian Lentur

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

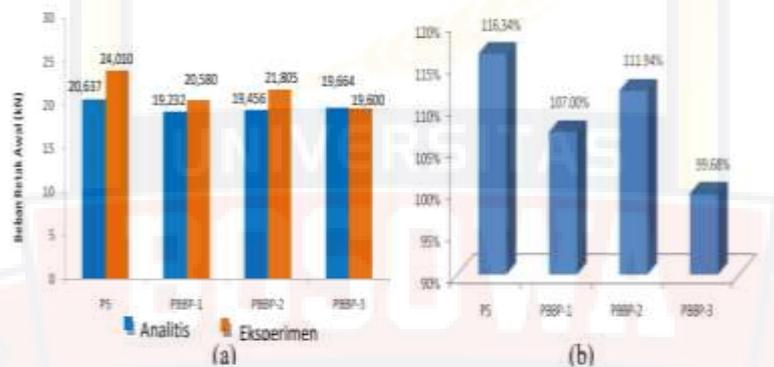
Tabel 2.2 Hasil eksperimen bahan terhadap lendutan tengah bentang pelat

2) Beban Retak Awal

Perbandingan hasil perhitungan analitis dengan hasil pengujian eksperimen beban retak awal dapat dilihat pada Gambar 2.8.

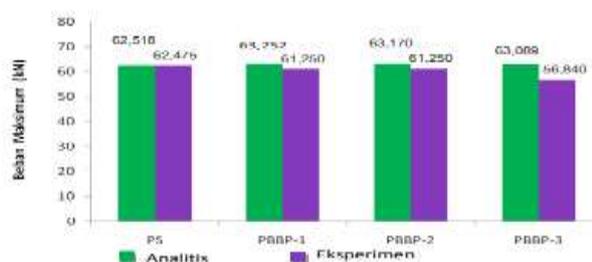
Gambar 2.8 (a) menunjukkan beban retak awal hasil analitis PS, PBBP-1, PBBP-2, dan PBBP-3 tidak jauh berbeda nilainya dibandingkan dengan beban retak awal eksperimen. Namun, perlu dicatat bahwa terdapat perbedaan kecil antara hasil analisis dan hasil eksperimen pada pelat PBBP-3. Perbedaan ini mencapai 0,32% lebih rendah dari hasil analisis. Discrepancy ini bisa dijelaskan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah pengadukan campuran beton yang dilakukan beberapa kali untuk semua benda uji. Praktek ini mungkin menyebabkan kualitas beton yang lebih rendah dari yang direncanakan atau di bawah rata-rata yang diharapkan.

Gambar 2.8 (b) dalam laporan menggambarkan hasil dari masing-masing benda uji, dengan tujuan untuk mengidentifikasi persentase perbedaan antara pelat berongga dan pelat solid pada pengujian eksperimental. Hasil analisis untuk beban retak awal menunjukkan perbedaan sebesar 16,34% untuk benda uji PS, 7% untuk PBBP-1, 11,94% untuk PBBP-2, dan hanya 0,32% untuk PBBP-3, jika dibandingkan dengan hasil eksperimen.



Gambar 2. 8. (a) Diagram perbandingan beban retak awal hasil analitis dan eksperimen (b) Diagram perbandingan beban retak awal pelat hasil eksperimen

3) Beban Maksimum



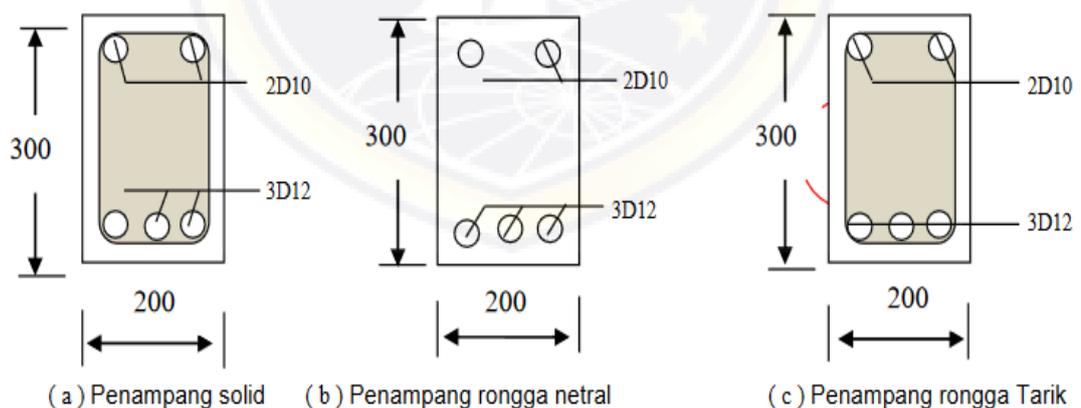
Gambar 2.9. Diagram perbandingan beban maksimum hasil analitis dan eksperimen

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

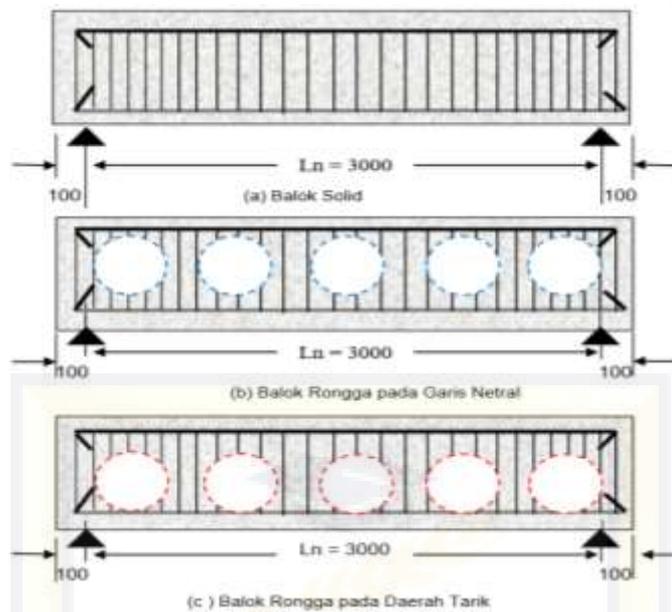
Beton adalah bahan bangunan yang sangat terkenal dalam industri konstruksi karena memiliki kemampuan yang tinggi dalam menahan gaya tekan. Namun, beton memiliki kelemahan yang meliputi ketahanan terhadap gaya tarik yang rendah, sehingga memerlukan perpaduan dengan baja tulangan. Kelemahan lainnya adalah beratnya yang signifikan, mendorong adanya upaya inovasi pada struktur untuk mengurangi beban sendiri yang dimiliki oleh beton. Dalam upaya tersebut, penggunaan elemen struktur beton bertulang dengan rongga telah terbukti menjadi solusi efektif dalam mengurangi berat sendiri dari struktur. Melalui penggunaan rongga, struktur tersebut mampu memberikan kontribusi positif dalam mengatasi masalah beban berat yang melekat pada beton.

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. Dalam penelitian ini, sepuluh balok beton berongga telah diuji dengan variasi jumlah bola dan posisi bola dalam penampang balok bertulang. Variasi jumlah bola meliputi lima variasi, yakni 1, 3, 5, 7, dan 9 bola, yang menghasilkan rasio volume masing-masing balok sebesar 99%, 98%, 97%, 95%, dan 94% terhadap volume balok beton solid. Penampang balok memiliki bentuk empat persegi panjang dengan lebar, $b = 200$ mm, tinggi, $h = 300$ mm, dan bentang efektif sepanjang 3000 mm.

Dalam penelitian ini, digunakan tulangan tarik 3D13 dan tulangan tekan 2D10 dengan sengkang $\emptyset 10$ -20 mm. Mutu beton yang digunakan adalah $f_c' 22$ MPa, sementara mutu baja tulangan adalah $f_y = 390$ MPa. Sebagai pembanding, sebuah balok solid tanpa lobang yang memiliki dimensi dan jenis tulangan yang sama juga diuji sebagai balok standar. Pengujian dilakukan dengan pembebanan statis lentur sesuai dengan standar pengujian SNI, dengan menggunakan dua titik pembebanan. Load cell ditempatkan di tengah bentang dan beban didistribusikan ke dua titik melalui profil baja. Hidrolik jack kapasitas 50 ton digunakan sebagai sumber beban dan dihubungkan dengan load cell. Pengukuran lendutan vertikal pada bagian tengah bentang dicatat menggunakan LVDT. Dari pengujian ini, diperoleh data tentang hubungan beban-lendutan hingga terjadi keruntuhan pada benda uji.



Gambar 2.10. Detail Penampang Balok



Gambar 2.11. 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. Tidak ada perbedaan yang signifikan dalam momen retak yang terjadi antara balok berongga dan balok tanpa lobang. Momen retak tertinggi diamati pada balok tanpa lobang, mencapai 10,09 MPa, sementara momen retak terendah terjadi pada balok berongga dengan 7 bola, sebesar 8,42 MPa, mengalami penurunan sekitar 83%. Rata-rata momen retak hasil eksperimen lebih tinggi sekitar 22% dibandingkan dengan nilai momen retak teoritis. Hal ini terjadi karena dalam situasi praktis, adanya baja tulangan memainkan peran penting dalam menahan momen retak, berbeda dengan asumsi teoritis yang hanya mempertimbangkan beton.

Tidak terdapat perbedaan signifikan dalam momen ultimit struktur antara berongga dan tanpa lobang. Untuk balok tanpa lobang, momen ultimit $M_u = 47,25$ MPa, sementara untuk balok berongga dengan 9 bola, momen ultimit terendah adalah 44,78 MPa atau mengalami penurunan sekitar 95%. Meskipun daktilitas beton dengan lobang mengalami penurunan, namun angka daktilitas masih memenuhi standar, yaitu ≥ 2 . Berdasarkan hasil ini, disarankan untuk menggunakan balok beton berongga dengan 9 bola dan posisi lobang di bawah garis netral atau di bagian penampang yang menahan momen lentur positif pada 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

Penelitian ini menggunakan dimensi balok jembatan standar Bina Marga dengan skala 1:3. Dimensi tersebut adalah sebagai berikut:

- Lebar balok: $b = 150$ mm
- Tinggi balok: $h = 350$ mm
- Tinggi efektif: $d = 307,5$ mm
- Tulangan tekan: $\varnothing 22$ mm
- Tulangan bagi: $\varnothing 8$ mm
- Tulangan sengkang di tumpuan: $\varnothing 8-100$ mm, pada daerah lentur murni:

Ø8-200 mm

- Panjang balok: $L = 3300$ mm (bentang bebas: 3000 mm)
- Mutu beton f'_c : 25 MPa
- Mutu baja tulangan f'_y : 470 MPa

Pada bagian tarik di bawah garis netral, dilakukan penambahan lapisan bekas kemasan botol minuman plastik dengan tinggi tetap dan panjang yang bervariasi.

2) Variabel dan Notasi Benda Uji

Benda uji terdiri dari tiga balok normal dan sembilan balok yang terbagi menjadi tiga 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 berikut memberikan gambaran mengenai data spesimen yang digunakan dalam penelitian ini.

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

Tabel 2.3 Data Variasi, Notasi dan Jumlah benda uji

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 analisisnya:

1) Berat dan Beban Maksimum

Hasil pengukuran berat dan pengujian beban maksimum disajikan dalam Tabel 2.4.

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

Tabel 2.4. Berat dan kemampuan memikul beban

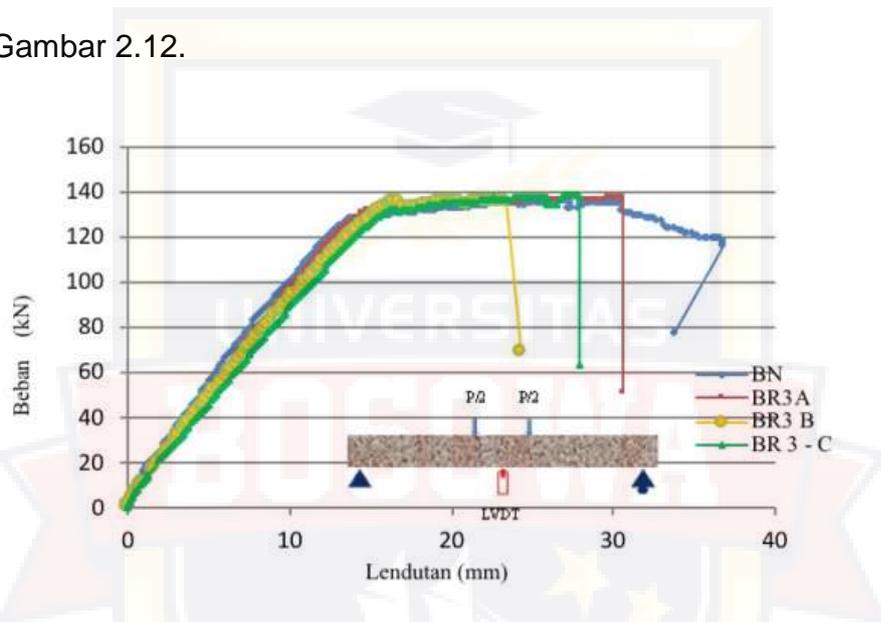
Sumber: Syahrul Sariman, Herman Parung, Rudy Djamaluddin dan Rita Irmawaty (2018)

Berat benda uji menunjukkan perbedaan yang signifikan. Berat balok uji BR3A, yang hanya terdiri dari satu lapis botol plastik, memiliki berat sebesar 383.5 kN atau setara dengan 89.1% dari berat balok normal. Sementara itu, BR3B (dengan panjang 8 deret botol) dan BR3C (dengan panjang 12 deret botol) memiliki berat berturut-turut sebesar 82.4% dan 73.6% dari berat balok normal yang beratnya adalah 425.5 kN. Meskipun terjadi penurunan berat yang signifikan seiring dengan peningkatan panjang deretan botol, namun kapasitas balok untuk memikul beban maksimum pada setiap variasi tidak menunjukkan perbedaan yang

signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa balok berongga secara efektif dapat digunakan dalam struktur yang tidak memerlukan beban berat yang terlalu besar.

2) Hubungan Beban – Lendutan

Hubungan antara beban dan lendutan pada tengah bentang disajikan pada Gambar 2.12.



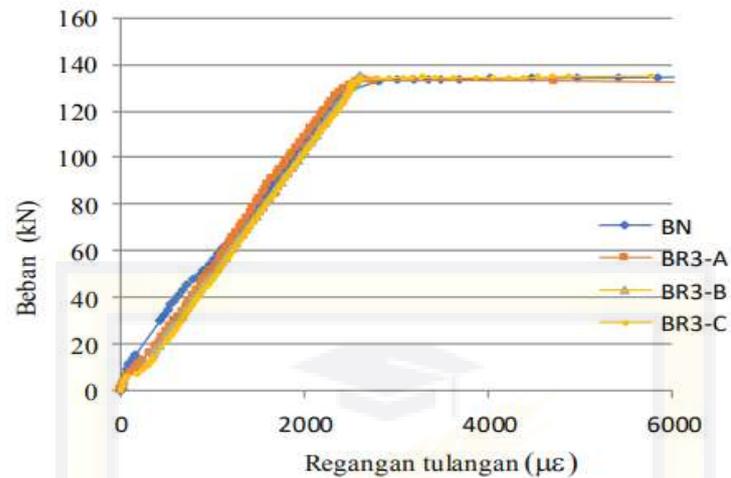
Gambar 2.12. Grafik hubungan beban-lendutan

Specimen	Retak awal		Tulangan Lelah		Beban Ultimate.	
	P_{cr} (kN)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (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

Tabel 2.5. Hubungan beban dan lendutan pada setiap kondisi

Dari tabel 11 dan Gambar 6 . 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.

3) Beban dan Regangan

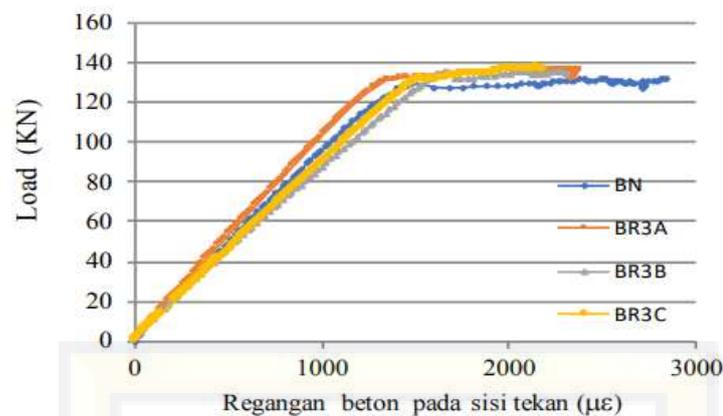


Gambar 2.13. Hubungan beban dan regangan tulangan

No	Specimen	Pu	ϵ_c
		kN	$\mu\epsilon$
1	BN	136.079	2520.2
2	BR3A	137.278	2364.4
3	BR3B	135.546	2245.2
4	BR3C	138.411	2255.8

Tabel 2.6. Regangan beton pada beban ultimate

Gambar 2.13 menunjukkan hubungan antara beban dan regangan tulangan. Regangan tulangan terlihat melampaui nilai 2100×10^6 pada setiap benda uji yang mengindikasikan bahwa tulangan telah leleh. Hubungan antara beban dan regangan beton dikemukakan pada Tabel 4 dan Gambar 2.13



Gambar 11. Hubungan beban dan regangan beton pada sisi atas balok

Gambar 2.14. Hubungan beban dan regangan beton pada sisi atas balok

Nilai regangan beton pada beban ultimate sebagaimana Tabel 7.

diatas menunjukkan bahwa nilai regangan paling besar terjadi pada balok Normal (2520 $\mu\epsilon$), 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 $\mu\epsilon$. Hal ini mengidentifikasikan bahwa regangan beton belum mencapai regangan lelehnya, artinya keruntuhan dari keempat benda uji merupakan keruntuhan tulangan tarik (under reinforced failure).

5. 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***

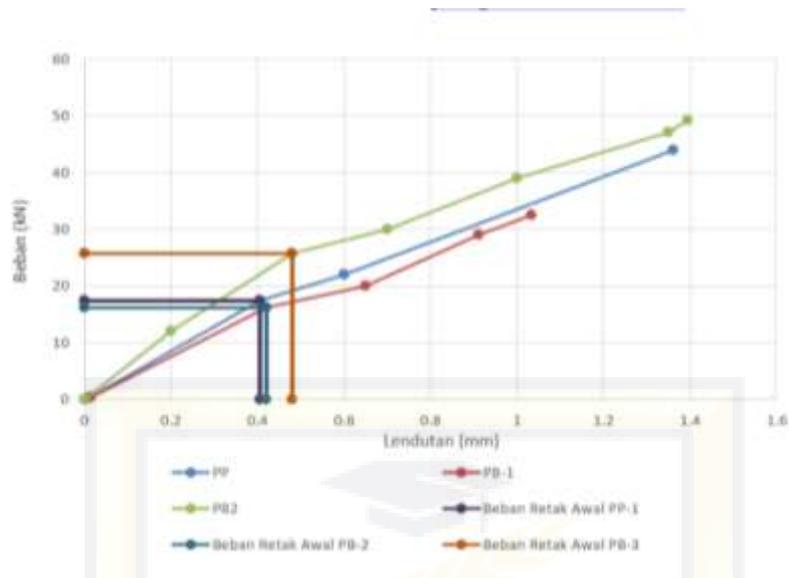
Peningkatan kuat lentur pada pelat beton bertulang dapat dilakukan dengan menambah tebal efektif pelat (d) atau tebal pelat itu sendiri. Namun, penambahan ini akan berdampak pada peningkatan berat pelat. pengurangan Berat pelat dapat dilakukan dengan mengganti sebagian beton pada daerah tarik dengan membentuk rongga dari modifikasi pipa PVC, namun tetap mempertahankan kemampuan lentur pelat tanpa mengabaikan kelemahan beton terhadap gaya tarik.

Penelitian ini dilakukan untuk menanamkan pengaruh adanya rongga pada pelat beton yang ditujukan terhadap tingkat kekakuan pelat, percobaan 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 dicor dengan beton cast in-situ dengan ukuran dan jarak tulangan yang sama. Pola pembebanan yang digunakan adalah pembebanan merata dengan analisa dua arah, pelat tertumpun sederhana pada keempat 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 pada pelat PP sebesar 14,26 kN, pelat PB-1 sebesar 12,37 kN dan pelat PB-2 sebesar 22,35 kN.



Gambar 2.15. 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 16 dibawah ini.



Gambar 2.16. Hubungan beban dan lendutan pada retak awal

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

Tabel 2.7 Perhitungan Rekapitulasi Dektalias pelat

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 ($t=16$ cm), dimana beton berongga PB-1 sebesar 91% dari pelat PP dan beton

berongga PB-2 147% dari pelat pejal (PP) sebagaimana disajikan pada tabel 2.8 dibawah ini.

Pelat	Tebal (mm)	Kekakuan Analitis		Kekakuan Eksperimen	
		(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

Tabel 2.8. Kekauan Eksperimen dan kekauan analisis

Kekakuan untuk masing- masing benda uji pada kondisi retak awal disajikan pada histogram gambar 2.17 dibawah ini.



Gambar 2.17. Kekauan Eksperimen dan Analisa pada PP,PB-1 dan PB-2.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian dan Desain Penelitian

3.1.1. Jenis Penelitian

Metode penelitian ini meliputi analisis pustaka serta uji eksperimen terhadap kemampuan lentur balok beton bertulang berongga. Guna mencapai sasaran penelitian ini, langkah-langkah pelaksanaan perlu disusun. Rangkaian tahapan yang dijalankan meliputi:

1. Perencanaan campuran beton

Mix desain beton yang direncanakan $f'c = 25$ Mpa.

2. Uji kuat tekan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tekan beton yang telah mengeras dengan benda uji berbentuk silinder.

3. Uji kuat lentur

Pada pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kapasitas lentur balok beton, lendutan, dan pola retak pada balok beton bertulang berongga. sesuai dengan tujuan penelitian ini untuk mengetahui kapasitas lentur balok beton bertulang berongga maka untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan pengujian lentur.

3.1.2. Rancangan Benda Uji Untuk Penelitian Karakteristik Lentur

1. Tujuan utama adalah mencapai keruntuhan akibat lentur sebelum terjadi keruntuhan akibat geser.

2. Untuk memastikan bahwa keruntuhan akibat geser tidak terjadi, jumlah tulangan geser yang digunakan ditingkatkan (sekitar dua kali lipat beban keruntuhan akibat lentur).
3. Dalam rangka menguji karakteristik lentur balok, balok beton yang digunakan memiliki dimensi sebagai berikut:
 - Tinggi balok
 - Lebar balok
 - Tinggi efektif
 - Panjang balok
 - Tulangan longitudinal:
 - Tulangan Sengkang

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Riset ini akan dilaksanakan di Laboratorium Material dan Struktur Beton, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Bosowa. Jadwal pelaksanaan penelitian mulai dari tanggal 17 Maret 2022 hingga 18 Juli 2022.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1 Bahan

Bahan yang dipergunakan berupa:

- a Material beton direncanakan memiliki kekuatan tekan $f'c = 25$ Mpa.

- b Baja tulangan, terdiri dari rangkaian tulangan $3 \Phi D16$ dan tulangan sengkang $2 \Phi 8$.
- c Limbah botol minuman PET bekas sebagai material pembentuk rongga pada benda uji dengan dimensi yaitu: volume = 600 , D = 60 mm, L = 220 mm sudah termasuk dengan penutup betolnya.



Gambar 3.1 Limbah botol minuman PET

3.3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a Alat uji pembebanan (*Loading frame*) , lengkap dengan alat pembebanan yaitu:
 - Alat ukur lendutan.
- b 6 cetakan silinder dengan ukuran 15 cm x 30 cm
- c Mixer concrete.
- d Kaos tangan
- e sikat kawat
- f lap
- g spidol,

- h mistal,
- i gergaji,
- j palu karet
- k meteran
- l batang penumbuk
- m tempat penampungan air
- n kerucut terpancung

3.3 Tahapan penelitian

1. Studi literatur
2. Menyiapkan peralatan dan material bahan
 - a Agregat kasar (batu pecah 1-2)
 - b Agregat halus (pasir)
 - c Semen
 - d Air
 - e limbah botol PET minuman bekas.
3. Proses pembuatan sampel uji/mix design (SNI 2847 – 2019)
 - a Beton utuh
 - b Beton dengan variasi
4. Pemeriksaan slump beton (SNI 1972-2008)
5. Pemeliharaan beton (*Curing*) dalam jangka waktu 28 hari.
6. Pengujian kekuatan tekan beton yang direncanakan $f'c$ 25 Mpa.
7. Pengujian kuat lentur beton yang direncanakan $f'c$ 25 Mpa.

3.5 Karangka Prosedur Penelitian



Gambar 3.2 Karangka prosedur penelitian

3.6 Notasi dan Jumlah Sampel

Tabel 3.1 Notasi dan jumlah sampel

No.	Uraian pengujian	Benda uji	Panjang rongga	Tinggi rongga	Notasi benda uji	Jumlah benda uji
1	Uji kuat lentur	Balok beton bertulang	0	0	BN	1
2	Uji kuat lentur	Balok beton bertulang berongga	12 botol	2 lapis	BR2	1
3	Uji kuat lentur	Balok beton bertulang berongga	12 botol	3 lapis	BR3	1
					Jumlah	3

3.7 Variabel Penelitian

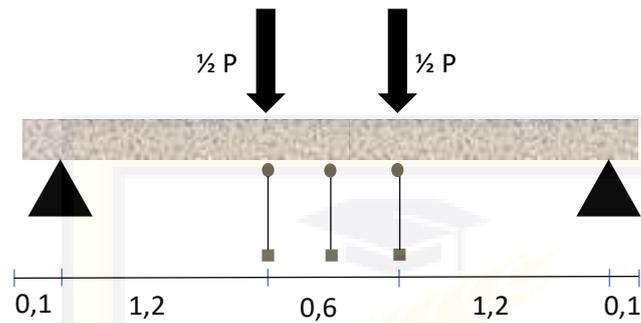
Variabel balok lentur yang diteliti bisa dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Variabel Benda Uji dan sketsa panjang rongga

No.	KODE	PROFIL BALOK
1	BN	 <p>Sketsa profil balok uji yang menunjukkan dimensi panjang rongga 3,00 m dan dimensi 0,10 m di setiap ujungnya.</p>

		<p>0,35</p> <p>0,175</p> <p>2 Φ 8</p> <p>3 Φ 16</p>
2	BR2	<p>0,10 0,18 2,64 0,18 0,10</p> <p>3,00</p> <p>2 Φ 8</p> <p>3 Φ 16</p> <p>0,35</p> <p>0,175</p>
3	BR3	<p>0,10 0,18 2,64 0,18 0,10</p> <p>3,00</p> <p>2 Φ 8</p> <p>3 Φ 16</p> <p>0,35</p> <p>0,175</p>

Adapun penempatan alat uji untuk mengukur lendutan beton yang terjadi seperti pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Penempatan alat uji untuk mengukur lendutan beton

3.8 Perhitungan Kuat tekan

Tabel 3.3 berat dan beban maksimum

No. Sampel	Berat (kg)	Beban Maksimum (kN)
1	12117	320
2	12030	305
3	12050	295
4	11900	310
5	11875	300
6	12090	330

Sumber : Hasil olahan data

Luas penampang

$$A = 1/4 \pi d^2$$

Dimana :

A = Luas penampang (mm²)

π = Jari – jari

d = Diameter

$$A = 1/4 \pi d^2$$

$$A = 1/4 \times 3,14 \times (150^2)$$

$$A = 17662,500 \text{ mm}^2$$

Kuat Tekan

$$f_c = P/A$$

Dimana:

f_c = kuat tekan (Mpa)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang (mm²)

Sampel I

$$\begin{aligned} f_c &= \frac{320000}{17662,500} \\ &= 18,117 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

Sampel 2

$$\begin{aligned} f'c &= \frac{305000}{17662,500} \\ &= 17,268 \quad \text{Mpa} \end{aligned}$$

Sampel 3

$$\begin{aligned} f'c &= \frac{295000}{17662,500} \\ &= 16,702 \quad \text{Mpa} \end{aligned}$$

Sampel 4

$$\begin{aligned} f'c &= \frac{310000}{17662,500} \\ &= 17,551 \quad \text{Mpa} \end{aligned}$$

Sampel 5

$$\begin{aligned} f'c &= \frac{300000}{17662,500} \\ &= 16,985 \quad \text{Mpa} \end{aligned}$$

Sampel 6

$$\begin{aligned} f'c &= \frac{330000}{17662,500} \\ &= 18,684 \quad \text{Mpa} \end{aligned}$$

Kuat tekan rata-rata (fcm)

Rumus =

$$F_{cm} = \frac{f'c \text{ I} + f'c \text{ II} + f'c \text{ III} + f'c \text{ IV} + f'c \text{ V} + f'c \text{ VI}}{6}$$

$$\begin{aligned} F_{cm} &= \frac{18,12 + 17,27 + 16,70 + 17,55 + 16,99 + 18,68}{6} \\ &= 17,6 \quad \text{Mpa} \end{aligned}$$

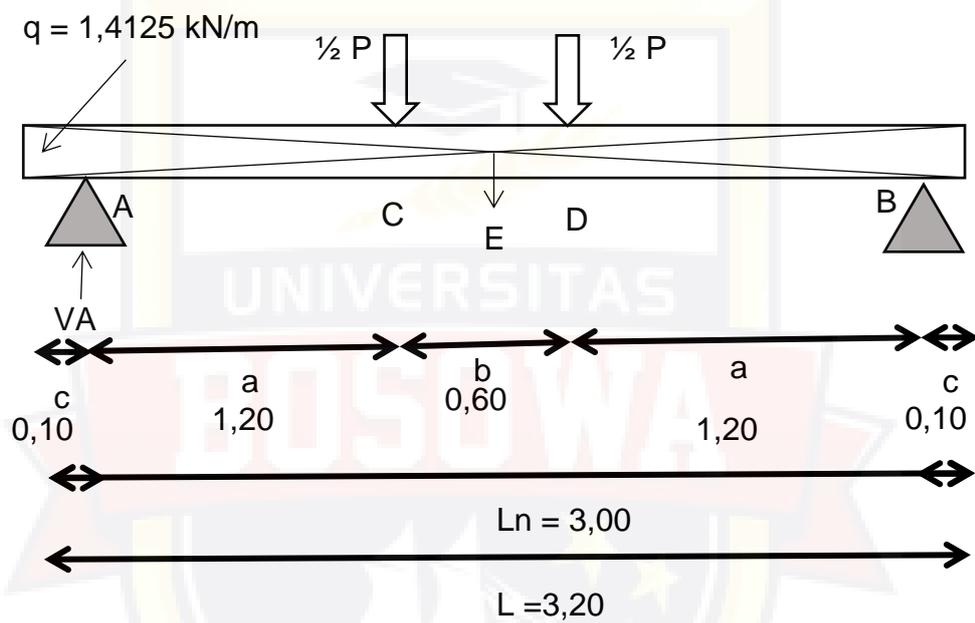
3.9 Mekanika Balok Normal Dan Rongga

a. Balok normal

Berat balok = 452 kg.

Berat jenis balok $= \frac{452 \times 100}{0,150 \times 0,350 \times 3,200} = 23,061 \text{ kN/m}^3$

Berat balok per meter $= 0,175 \times 0,350 \times 23,061 = 1,4125 \text{ kN/m}^1$



Gambar 3.4 Sketsa mekanika balok normal (BN)

Reaksi perletakan

$V_A = 2,26 + 0,5 P$

$V_B = 2,26 + 0,5 P$

Momen

$M_A = - 0,00706$

$M_F = 1,479438 + 0,3 P$

$$M_C = 1,518438 + 0,6 P$$

$$M_T = 1,582 + 0,6 P$$

$$M_D = 1,518438 + 0,6 P$$

$$M_H = 1,228875 + 0,3 P$$

$$M_B = 0,2966 \text{ kNm}$$

Gaya lintang

$$D_A = 2,40125 + 0,5 P$$

$$D_F = 1,55375 + 0,5 P$$

$$D_C = 0,42375 + 0,5 P$$

$$D_T = 0$$

$$D_D = -0,42375 - 0,5 P$$

$$D_H = -0,5650 - 0,3 P$$

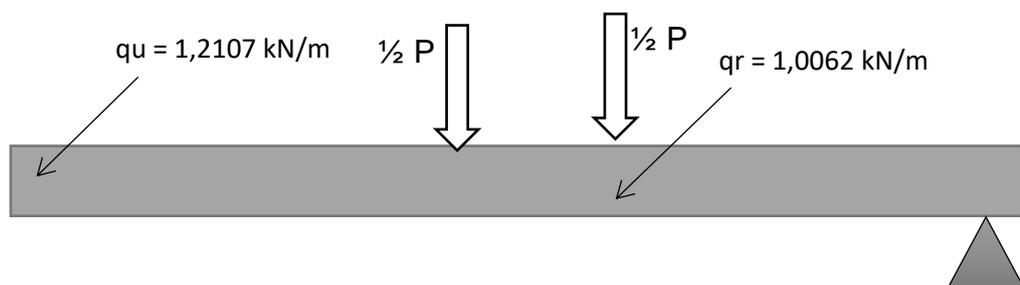
$$D_B = -1,4125 - 0,6 P$$

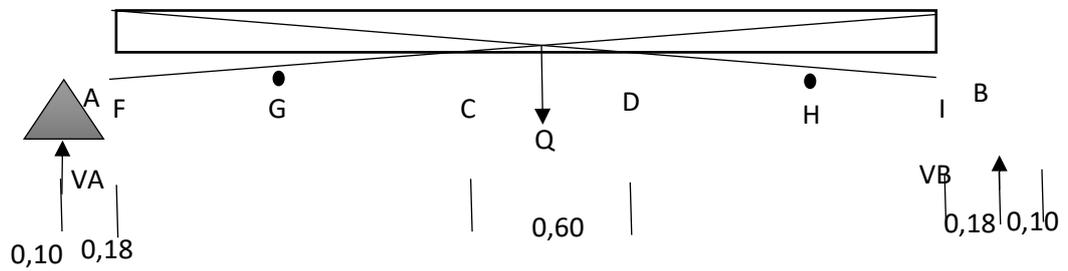
b. Balok Variasi (BR2)

$$\text{Berat balok} = 395,6 \text{ kg.}$$

$$\text{Berat jenis balok} = \frac{452 \times 100}{0,175 \times 0,350 \times 3,200} = 23,061 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Berat balok per meter} = 0,175 \times 0,35 \times 19,166 = 1,0062 \text{ kN/m}$$





Gambar 3.5 Sketsa mekanika balok rongga (BR2)

Reaksi perletakan

$$V_A = 1,667 + 0,5 P$$

$$V_B = 1,667 + 0,5 P$$

Momen

$$M_A = 0,25264 + 0,09 P$$

$$M_G = 1,14496 + 0,345 P$$

$$M_C = 1,25072 + 0,6 P$$

$$M_T = 1,296 + 0,6 P$$

$$M_D = 1,25072 + 0,6 P$$

$$M_H = 1,34866 + 0,345 P$$

$$M_B = 0,80218 + 0,09 P$$

Gaya lintang

$$D_A = 2,00623 + 0,09 P$$

$$D_G = 1,49305 + 0,09 P$$

$$D_C = 0,301872$$

$$D_T = 0$$

$$D_D = - 0,301872$$

$$D_H = - 0,2115 - 0,5 P$$

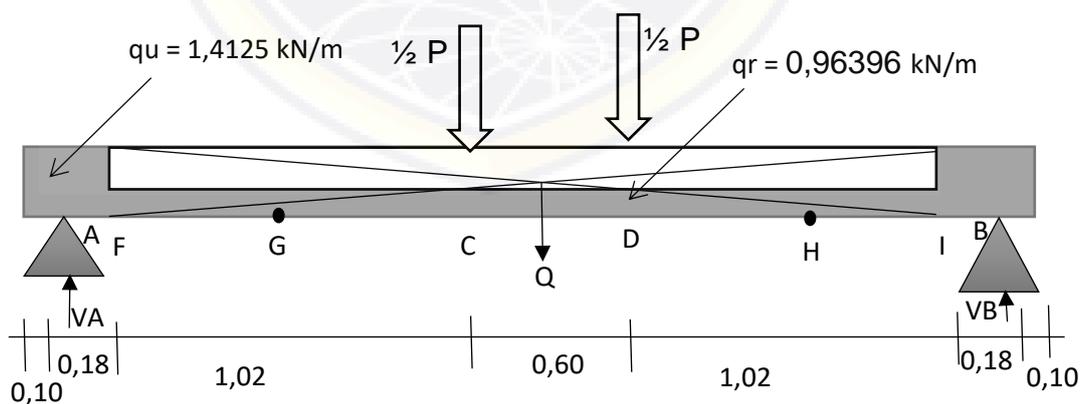
$$D_B = - 0,7246 - 0,5 P$$

c. Balok Variasi (BR3)

Berat balok = 349,8 kg.

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

Berat balok per meter = $0,175 \times 0,35 \times 15,7382 = 0,96396 \text{ kN/m}$



Gambar 3.6 Sketsa mekanika balok rongga (BR3)

Reaksi perletakan

$$V_A = 1,667 + 0,5 P$$

$$V_B = 1,667 + 0,5 P$$

Momen

$$M_A = 0,24486 + 0,09 P$$

$$M_G = 1,17185 + 0,345 P$$

$$M_C = 1,40235 + 0,6 P$$

$$M_T = 1,44573 + 0,6 P$$

$$M_D = 1,40235 + 0,6 P$$

$$M_H = 1,46608 + 0,345 P$$

$$M_B = 0,99624 + 0,09 P$$

Gaya lintang

$$D_A = 2,06343 + 0,09 P$$

$$D_G = 1,57181 + 0,09 P$$

$$D_C = 0,28919$$

$$D_T = 0$$

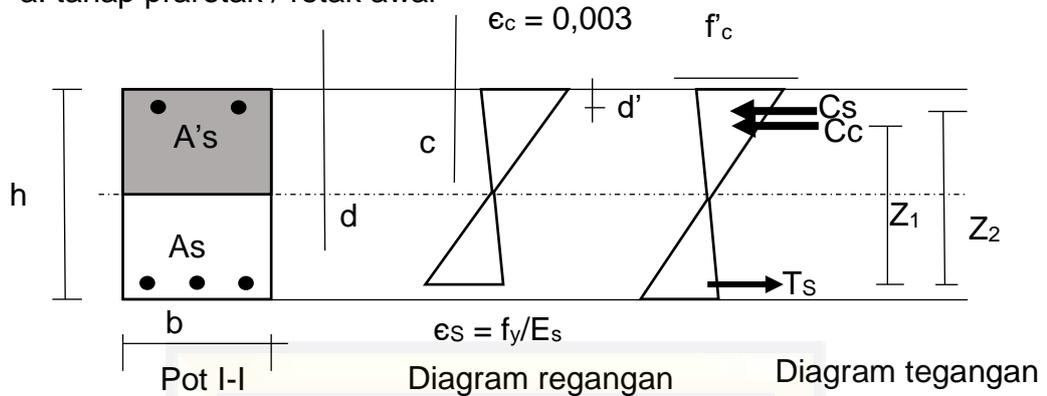
$$D_D = - 0,28919$$

$$D_H = - 0,7807866 - 0,5 P$$

$$D_B = - 1,2724062 - 0,5 P$$

3.10 Perhitungan Teoritis Kapasitas Lentur Balok Normal

a. tahap praretak / retak awal



Gambar 3.7 Diagram tegangan – regangan pracetak

Angka eqivalen

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 10,4634809$$

$$n' = \frac{E'_s}{E_c} = 10,2645949$$

Titik berat penampang dari serat atas

$$y_n = \frac{b \cdot h \cdot \frac{1}{2h} + (n-1) A_s \cdot d - (n-1) A'_s \cdot d'}{b \cdot h + (n-1) A_s - (n-1) A'_s}$$

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

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

Momen inerti penampang terhadap titik penampang

$$I_t = 1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot (1/2h - y_n)^2 + (n-1) A_s \cdot (d - y_n)^2 + (n-1) A'_s \cdot (y_n - d')^2$$

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

Tegangan retak

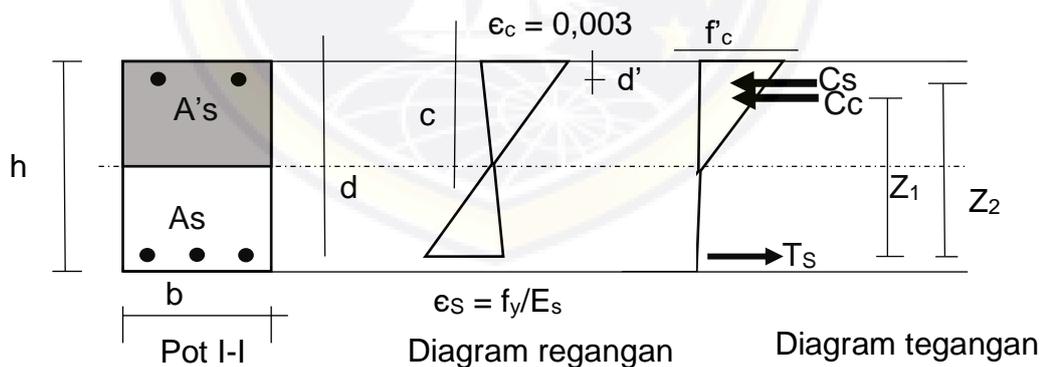
$$\begin{aligned}
 f_r &= 0,62 \lambda \sqrt{f'_c} \\
 &= 0,62 \times 1 \times 17,55 \\
 &= 2,59744553 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

Momen retak

$$\begin{aligned}
 M_{cr} &= \frac{f_r I_t}{y_b} \\
 &= (2,59744553 \times 748140250) / 165,2783522 \\
 &= 11757459,6 \text{ Nmm} = 11,7574596 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{cr} &= 1,582 + 0,6 P \\
 P_{cr} &= 16,9591 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

b. Tahap terjadinya leleh pada tulangan



Gambar 3.8 Diagram tegangan – regangan kondisi leleh

Perhitungan nilai k menggunakan *trial and error*

$$\text{Bila } k = 0,51753998$$

$$k \times d = 162,50755479 \text{ mm}$$

$$\epsilon_y = f_y/E_s = 0,002338427$$

$$\epsilon_c = \epsilon_y \frac{k \cdot d}{d - k \cdot d}$$

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

$$= 0,002508455$$

$$\epsilon'_s = \epsilon_c \frac{k \cdot d - d'}{k \cdot d}$$

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

$$= 0,002014506$$

$$f_s' = \epsilon_s \times \epsilon'_s = 407,1543423 \text{ Mpa}$$

$$C_c = 0,5 \times f'_c \times k \cdot d \cdot b$$

$$= 0,5 \times 17,55 \times 0,51753998 \times 314 \times 175$$

$$= 249569,2809 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \times f_s'$$

$$= 40931,6189 \text{ N}$$

$$T = C_c + C_s$$

$$= 290500,8998 \text{ N}$$

$$T = A_s \cdot f_y$$

$$= 290500,8998 \text{ N}$$

$$C_c + C_s - A_s \cdot f_y = 0$$

$$290500,8998 - 290500,8998 = 0$$

Asumsi k Benar.

Menentukan lengan momen

Titik berat C_c dan C_s dari serat atas

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

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

$$= 50,58017617 \text{ mm}$$

Lengan momen

$$z = d - y = 314 - 50,58017617 = 263,4198238 \text{ mm}$$

$$M_y = A_s \times f_y \times z$$

$$= 602,97 \times 481,78 \times 263,4198238$$

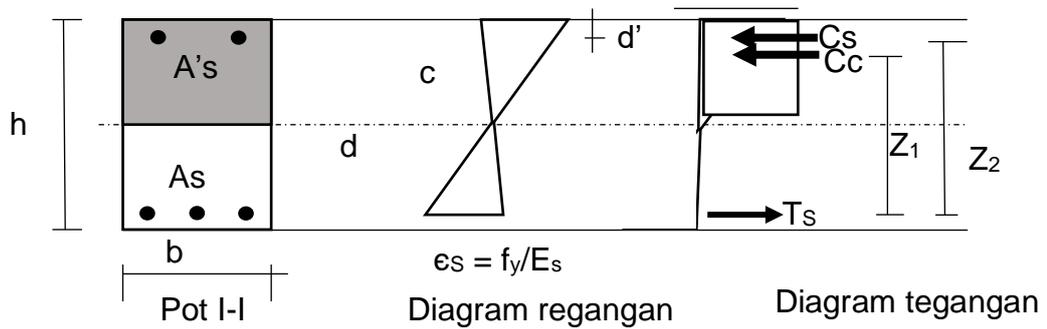
$$= 76523695,84 \text{ Nmm} = 76,52369584 \text{ kNm}$$

$$M_y = 1,582 + 0,6 \times P_y$$

$$P_y = 124,9028264 \text{ kN} = 12,49028264 \text{ ton}$$

c. Tahap beban batas

$$\epsilon_c = 0,003 \quad f'_c$$



Gambar 3.9 Diagram tegangan – regangan kondisi batas

$$C_c = 0,85 f'_c \cdot a \cdot b \quad \text{dan} \quad C_s = A_s \cdot F_y \quad ;$$

$$T_{s1} = A_{s1} \cdot F_y \quad \text{dan} \quad T_{s2} = A_{s2} \cdot F_y$$

$$C_c = T_s$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{602,97 \times 481,78 - 100,53 \times 259,95}{0,85 \times 17,55 \times 175} = 101,26 \text{ mm}$$

$$c = \frac{a}{\beta_1} = 119,13 \text{ mm}$$

cek kondisi tulangan

Berdasarkan diagram regangan pada gambar 3.9, dapat dicari kondisi tulangan tekan dan tarik, berdasarkan perbandingan sebagai berikut :

Tulangan tarik

$$\varepsilon_s = \frac{(d-c)}{c} \varepsilon_c = \frac{(314-119,13)}{119,13} 0,003 = 0,0049 > 0,00233$$

Tulangan tarik sudah leleh, digunakan f_y

Tulangan tekan

$$\varepsilon'_s = \frac{(c-d')}{c} \varepsilon_c = \frac{(119,13-32)}{119,13} 0,003 = 0,0022 > 0,00129$$

Perhitungan kapasitas penampang momen

$$C_c = 0,85 f'c.a.b = 249569,28 \text{ N}$$

$$z_1 = d - \frac{1}{2} a = 314 - \frac{1}{2} (101,26) = 263,37 \text{ mm}$$

$$C_s = A_s' . f_y = 40931,62 \text{ N}$$

$$z_2 = d - d' = 314 - 32 = 282 \text{ mm}$$

Titik berat resultan C_c dan C_s dari T_s

$$z = \frac{C_c.z_1 + C_s.z_2}{C_c + C_s} = \frac{(249569,28 \times 263,37) + (40931,62 \times 282)}{249569,28 + 40931,62} = 256,99$$

$$M_u = T_s.z = A_s.f_y.z = 81,17 \text{ kN}$$

Beban maksimum

$$M_u = 1,582 + 0,6 P_u$$

$$P_u = 132,65$$

Resume perhitungan kapasitas lentur pada balok bertulang normal dan beton bertulang berongga dikemukakan sebagai berikut :

Tabel 3.4 Resume perhitungan beban dan momen setiap tahap

Tipe balok	Pcr kN	Mcr kNm	Py Kn	My kNm	Pu kN	Mu kNm
BN	12,83	9,28	124,90	76,52	132,65	81,17
BR2	12,17	8,60	125,45	76,56	133,39	81,33
BR3	11,92	8,60	125,20	76,56	133,14	81,33

Sumber : Hasil Olahan Data



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisis Kapasitas Balok Beton Bertulang Berongga Secara Teoritis.

Data hasil perhitungan teoritis dari beban pada balok normal dan balok variasi yang terjadi dapat dilihat pada table 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 hasil ringkasan perhitungan beban dan momen secara teoritis

Type balok	Pcr kN	Mcr kNm	Py kN	My kNm	Pu kN	Mu kNm
BN	12,83	9,280	124,90	76,52	132,65	81,17
BR2	12,17	8,59	125,45	76,57	133,39	81,33
BR3	11,92	8,59	125,20	76,57	133,14	81,33

Sumber : Hasil olahan data

Pada tabel 4.1 menunjukkan hasil olahan data momen dan beban teoritis pada balok beton bertulang berongga dimana nilai beban maksimum balok normal (BN) sebesar 132,65 kN dan momen maksimum sebesar 81,17 kNm, balok variasi BR2 memiliki nilai beban maksimum sebesar 133,39 kN dan momen maksimum sebesar 81,33 kNm, balok variasi BR3 memiliki nilai beban maksimum sebesar 133,14 kN dan nilai

momen maksimum sebesar 81,33 kNm. Secara teoritis beban maksimum terbesar pada balok beton bertulang berongga dengan variasi BR3.

4.2 Hasil Analisis Kapasitas Balok Beton Bertulang Berongga Secara

Uji experimental

Pemeriksaan balok dilaksanakan setelah beton berumur 28 hari. Eksperimen pada balok ini dilaksanakan dengan menempatkan balok diatas dua titik pendukung dan membebarkannya pada dua beban pusat. Pemberian beban dilakukan secara bertahap hingga balok mengalami kegagalan. Nilai lendutan diperoleh dari tiga dial yang terpasang dibawa beton.

Balok mempunyai karakteristik utama yaitu lentur. Dengan sifat tersebut balok merupakan elemen bangunan yang dapat diandalkan untuk menangani momen lentur. Keruntuhan lentur ditandai dengan lelehnya tulangan tarik atau hancurnya beton tekan yang mana keruntuhan balok normal serupa dengan balok berongga dengan nilai teoritis beban batas mencapai 133 KN. balok benda uji yang mengalami keruntuhan lentur yaitu balok normal dan balok BR2.

Pengujian balok lentur pada penelitian ini dibuat benda uji dengan dimensi balok dengan lebar 175 mm, tinggi 350 mm dan panjangnya 3.200 mm, dengan tambahan dua lapis botol plastik dengan panjang 2,64 m pada balok beton bertulang berongga dengan variasi BR2 dan penambahan tiga lapis botol plastik pada balok beton bertulang berongga dengan variasi BR3. Tulangan utama Tarik dan tekan 2 Φ 8 mm dan 3

D16 mm balok beton bertulang tersebut diletakan pada loading frame yang kuat dan ditumpu sendi – rol pada kedua ujungnya. Pembebanan statis dilakukan dengan *hydraulic jack*, secara bertahap dengan interval kenaikan beban sebesar 10 kN.

Data hasil pengujian dari beban maksimum pada balok beton bertulang dan balok beton bertulang berongga yang terjadi dapat dilihat pada table 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Beban maksimum pada balok dengan uji eksperimental

Tipe benda uji	P_{ultimate} (kN)	M_{ultimate} (kNm)
BN	140	85,582
BR2	135	82,296
BR3	130	79,313

Sumber : hasil olahan data

Tabel 4.2 menunjukkan hasil olahan data beban maksimum pada setiap balok normal dan variasi. Dimana beban maksimum BN sebesar 140 kN, BR2 Sebesar 135 kN atau 96,43 % dari beban maksimum balok normal, dan BR3 sebesar 130 kN atau 92,86 % dari beban maksimum balok normal.

Momen maksimum pada setiap balok normal dan variasi dimana momen maksimum BN sebesar 85,582 kNm, BR2 Sebesar 82,296 kNm atau 96,16 % dari beban maksimum balok normal, dan BR3 sebesar

79,313 kNm atau 92,67 % dari beban maksimum balok normal.

4.3 Perbandingan Beban Dan Momen Maksimum Secara Teoritis dan Uji Experimen

Perbandingan kapasitas menahan beban lentur antara perhitungan berdasarkan teori dan hasil uji ekspeimen dapat ditemukan dalam tabel 4.3

Tabel 4.3 perbandingan beban (P) dan Momen (M) antara hasil perhitungan teori dan uji eksperimen

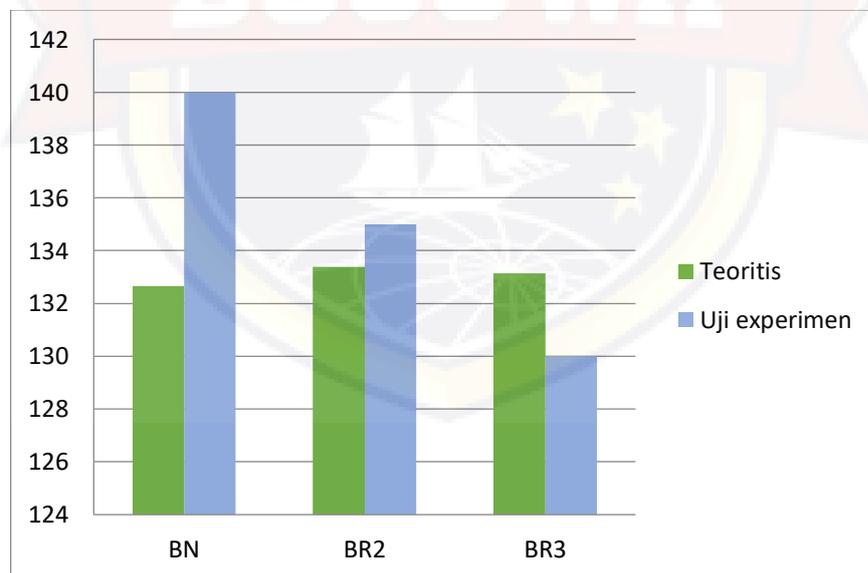
No.	Variasi benda uji	Teoritis (kN)		Experimen (kN)		Perbedaan (%)	
		Pu (kN)	Mu (kNm)	Pu (kN)	Mu (kNm)	Pu (kN)	Mu (kNm)
1	BN	132,65	81,17	140	85,58	5,25%	5,15%
2	BR2	133,39	81,33	135	82,29	1,19%	1,17 %
3	BR3	133,14	81,33	130	79,31	-2,42%	-2,55 %

Sumber : hasil olahan data

Dari tabel diatas menunjukkan hasil olahan data beban maksimum setiap balok beton. Hasil ini sangat berbeda dengan hasil olahan data perhitungan teoritis dengan hasil data BN 132,65 kN , BR2 133,39 kN ,

dan BR3 133,14 kN. Kemampuan memikul beban hasil uji eksperimen semata - mata ditentukan oleh tercapainya tegangan leleh pada baja, sedangkan secara teoritis masih ditentukan oleh jarak garis netral.

Pada kondisi ultimate nilai momen teoritis umumnya lebih kecil 6% Dibandingkan dari hasil uji eksperimental karena kemampuan regangan baja pasca leleh cenderung lebih baik dibanding perkiraan yang diperoleh dari perhitungan teoritis. secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan berdasarkan teori cenderung mendekati hasil dari pengujian eksperimental. ini menunjukkan bahwa penggunaan diagram tegangan whitney dalam perhitungan kapasitas momen maksimal secara teoritis cukup konservatif.



Gambar 4.1 Grafik perbedaan beban teoritis dengan beban uji eksperimen

4.4 Perbandingan Balok Normal dan Balok Berongga

Perbandingan ini dimaksudkan untuk melihat sejauh mana pengaruh rongga terhadap nilai beban dan momen pada balok beton. Perbandingan nilai beban dan momen pada balok normal dan berongga dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4.4 Perbandingan nilai beban dan momen maksimum balok normal dan balok berongga berdasarkan hasil uji eksperimen.

Benda uji	Pu	Mu	Uraian	Beban dan momen terhadap balok normal (%)	
				Pu	Mu
BN	140	85,58	BN/BN	-	-
BR2	135	82,29	BR2/BN	96,43 %	96,16 %
BR3	130	79,31	BR3/BN	92,86 %	92,67 %

Sumber : Hasil olahan data

Dari tabel 4.4 dapat diperoleh data bahwa nilai perbedaan terbesar pada balok BR3 dengan momen maksimum sebesar 7,33 % dan pada balok BR2 dengan momen maksimum sebesar 3,84% . Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas lentur balok normal dan balok berongga cenderung sama.

Penelitian sebelumnya yaitu, penelitian Rahardyanto, berupa balok beton bertulang yang diberi rongga pada botol plastik sebanyak tiga lapis pada tengah sisi tegak dan menggunakan mutu beton yang berbeda menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan pada setiap

variasi balok. Demikian pula dengan penelitian Syahrul Sariman dengan menempatkan botol plastik pada daerah sumbu netral dan pada tengah sisi tegak menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan pada setiap variasi balok uji.

4.5 Hubungan Beban Maksimum Dengan Berat Benda Uji

Pada pembahasan sebelumnya dapat diketahui bahwa pemberian rongga pada balok beton tidak berpengaruh signifikan terhadap kapasitas momen lentur balok tapi pemberian rongga pada balok beton akan mempengaruhi berat balok beton uji. Kinerja balok dapat diukur dari perbandingan kemampuan balok memikul momen ultimate dengan berat balok (Mu/W).

Data hasil perbandingan momen maksimum dan berat benda uji dapat dilihat dari tabel 4.5.

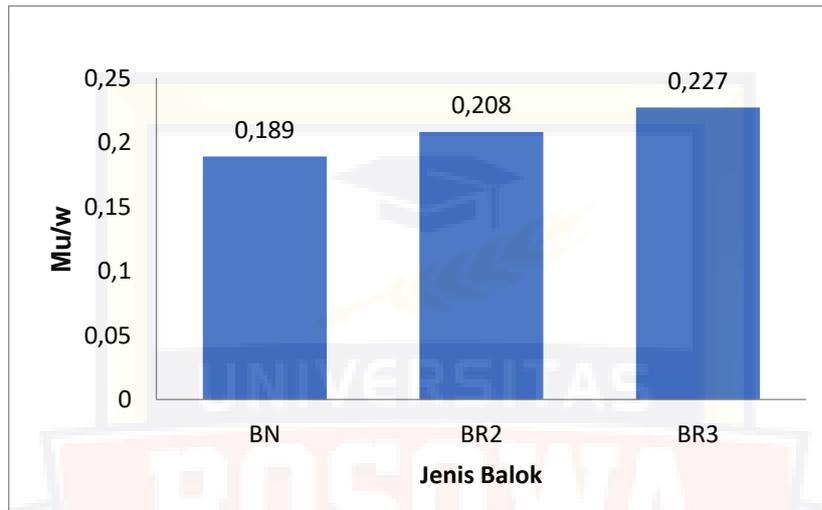
Tabel 4.5 beban maksimum dan berat benda uji

No	Benda uji	Mu (kNm)	W (Kg)	Mu/W
1	BN	85,58	452	0,189
2	BR2	82,29	395,6	0,208

3	BR3	79,31	349,8	0,227
---	-----	-------	-------	-------

Sumber : Hasil olahan data

Dan ratio momen ultimate dan berat disajikan pada grafik gambar 4.2



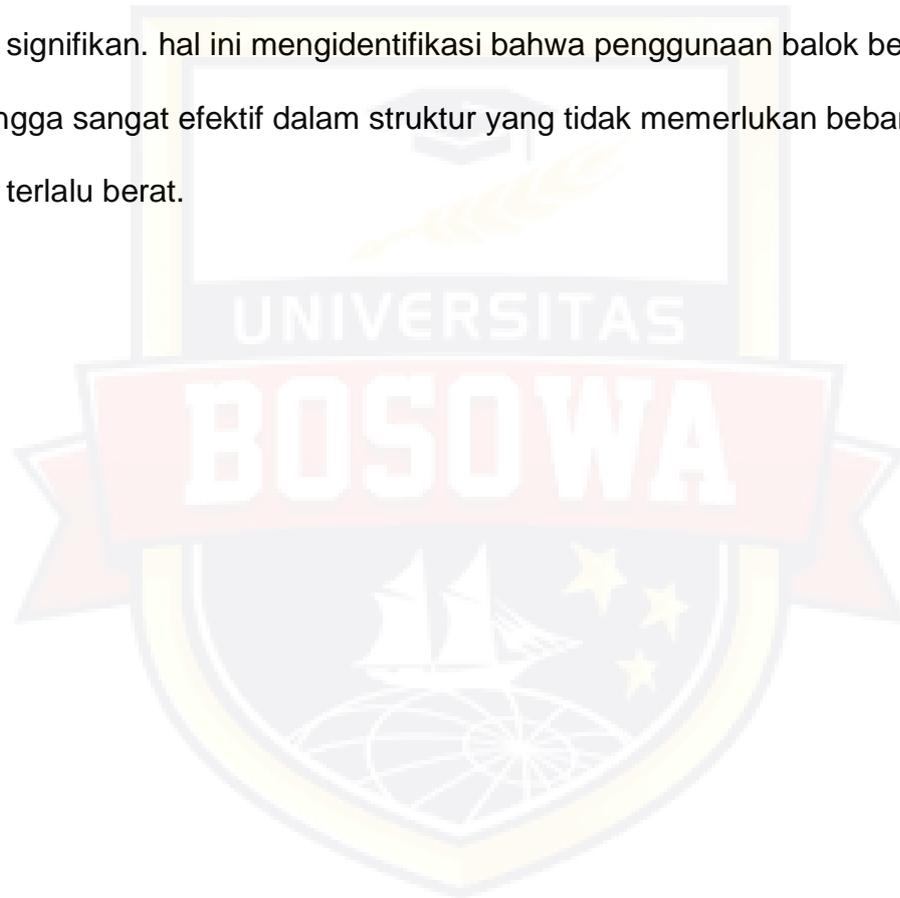
Gambar 4.2 Perbandingan Mu/W pada balok normal dan balok rongga

Perbandingan momen dan berat balok beton uji menunjukkan peningkatan terhadap balok normal. Peningkatan ratio Mu/W pada balok BR2 sebesar 10,05 % terhadap balok beton normal dan peningkatan ratio Mu/W pada balok BR3 sebesar 19,58 % terhadap balok beton normal tanpa mempengaruhi kapasitas momen lentur ultimate semua variasi balok beton uji. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja balok berongga dengan variasi tinggi rongga cukup baik.

Dari tabel 4.5 menunjukkan bahwa perbedaan benda uji yang cukup signifikan. Berat balok beton BR2 mempunyai berat 395,6 kN atau sebesar 87,52 % terhadap berat balok normal, sedangkan berat balok

beton BR3 mempunyai berat 349,8 kN atau sebesar 77,38 % terhadap berat balok normal.

Meskipun terjadi penurunan berat yang nyata sesuai dengan panjang barisan botol plastik yang ditempatkan, kapasitas maksimal untuk menopang beban pada setiap variasi balok tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. hal ini mengidentifikasi bahwa penggunaan balok beton berongga sangat efektif dalam struktur yang tidak memerlukan beban yang terlalu berat.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

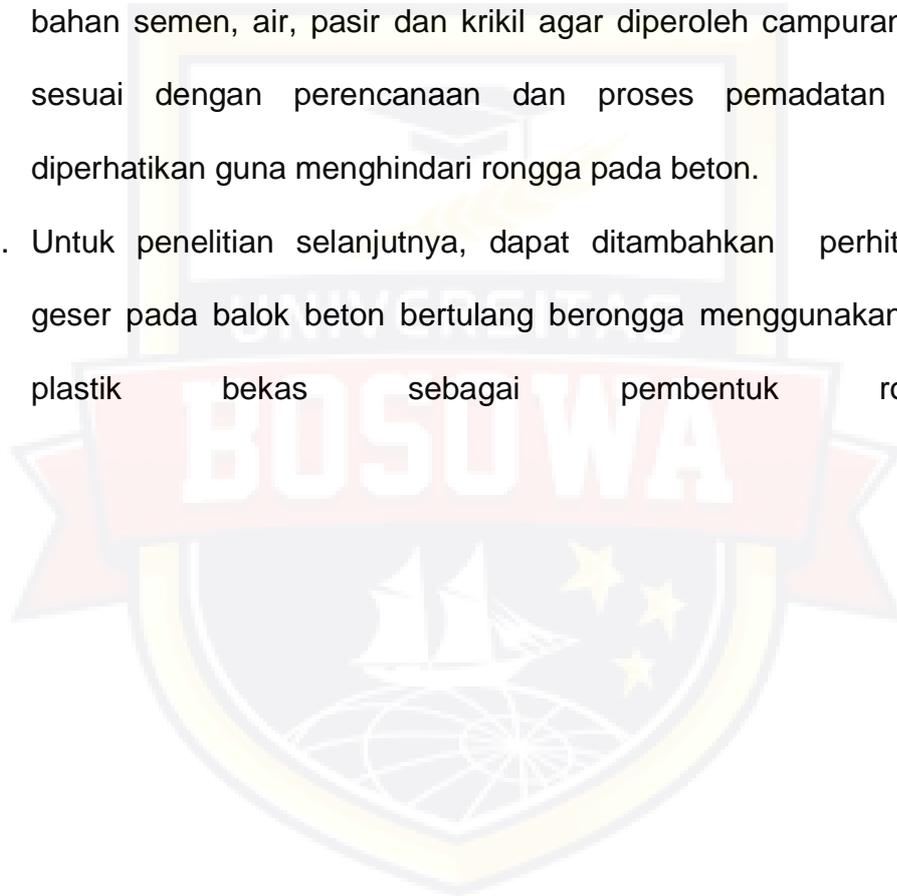
Berdasarkan hasil penelitian dan analisa balok beton bertulang berongga dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil perhitungan beban dan momen teoritis dengan hasil uji eksperimental memiliki perbedaan yang tidak signifikan. Dimana untuk balok rongga hasil uji eksperimen lebih tinggi dibanding perhitungan teoritis dengan perbedaannya tidak lebih dari 6%.
2. Kemampuan memikul beban balok normal dan variasi balok berongga dapat dilihat dengan balok normal dengan balok variasi BR2 perbedaannya tidak signifikan dibawah 5%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya variasi rongga pada penampang tarik tidak mempengaruhi kapasitas lentur balok uji baik balok normal maupun balok berongga.
3. Perbandingan kapasitas momen balok berongga terhadap beratnya, cukup signifikan bahkan mencapai 19,58 % pada balok yang volume rongganya lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja balok beton berongga cukup baik sehingga balok berongga cukup efektif untuk digunakan pada struktur yang memerlukan berat yang tidak terlalu besar.

5.2 Saran

Dalam riset ini, peneliti menyadari adanya potensi peningkatan. Guna meraih hasil yang lebih unggul pada penelitian mendatang, peneliti mengusulkan langka-langka berikut:

1. Penting memperhatikan dengan cermat proses pencampuran bahan semen, air, pasir dan krikil agar diperoleh campuran yang sesuai dengan perencanaan dan proses pemadatan perlu diperhatikan guna menghindari rongga pada beton.
2. Untuk penelitian selanjutnya, dapat ditambahkan perhitungan geser pada balok beton bertulang berongga menggunakan botol plastik bekas sebagai pembentuk rongga.



DAFTAR PUSTAKA

- Anugrah, A. besse., 2016. *Kapasitas lentur balok beton bertulang dengan menggunakan styrofoam. Tugas akhir.* Jurusan teknik sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin: Makassar.
- Atmadja, W. M., Parung, H., Irmawaty, R., & Amiruddin, A. A. 2020. *Kekakuan Pelat Beton Bertulang Berongga Dua Arah Dengan Pemanfaatan Pipa PVC Sebagai Pembentuk Rongga.* SNITT-Politeknik Negeri Balikpapan, 171-178.
- Dipohusodo, Istimawan. 1994, *Struktur Beton Bertulang.* Jakarta: PT Gramedia pustaka utama.
- M. Maskimi, S. Murtiadi, dan A, Akmaluddin, 2018. *Perilaku Struktur Balok Beton Berongga Bola , spektrum sipil, Vol. 5, no.2, pp. 129-137.*
- Permana, Muhammad Hilman., 2016. *Analisis Kuat Lentur Struktur Balok Beton Bertulang Dengan Lubang Hollow core Pada Tengah Penampang Balok.* Tugas akhir. Universitas Brawijaya Fakultas Teknik : Malang
- Rahardianto, 2013. *Studi Experimental Balok Berongga Dengan Pemanfaatan Limbah Botol PET, jurnal penelitian FT UI.*

Sariman, Syahrul, dkk. 2018. Analisis kapasitas lentur balok beton bertulang dengan variasi panjang rongga pada penampang tarik..[Online] Available at: <https://osf.io/h9fuz/download>.

SK SNI 03-2847, 2019, *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Departemen Pekerjaan Umum Indonesia.

Wiyajanti, Novia Tinna, dkk.,2017. *Perilaku Lentur Plat Sistem Satu Arah Beton Bertulang Berongga Dengan Pemanfaatan Botol Bekas Berbahan Plastik Sebagai Pembentuk Rongga*. [Online] Available at: <https://etd.respository.ugm.ac.id/>.



L

A

M

P

I

R

A

N





**LABORATORIUM BAHAN DAN STRUKTUR BETON
JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BOSOWA**

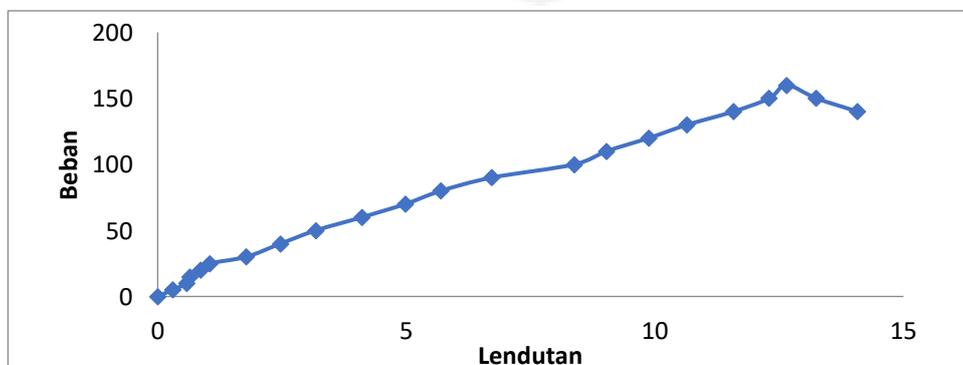
Jln. Urip Sumoharjo Km. 4 – Telp. (0411) 452901 – 342789
fax.(0411)424568

Balok Beton Normal (BN)

Tanggal Percobaan : 7 Juli 2022

Berat : 452 kg

Beban (kn/m)	Lendutan (mm)
0	0
5	0,3
10	0,59
15	0,65
20	0,86
25	1,05
30	1,78
40	2,47
50	3,18
60	4,11
70	4,98
80	5,7
90	6,72
100	8,38
110	9,03
120	9,88
130	10,65
140	11,58
150	12,3
160	12,65
150	13,25
140	14,08





LABORATORIUM BAHAN DAN STRUKTUR BETON
JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BOSOWA

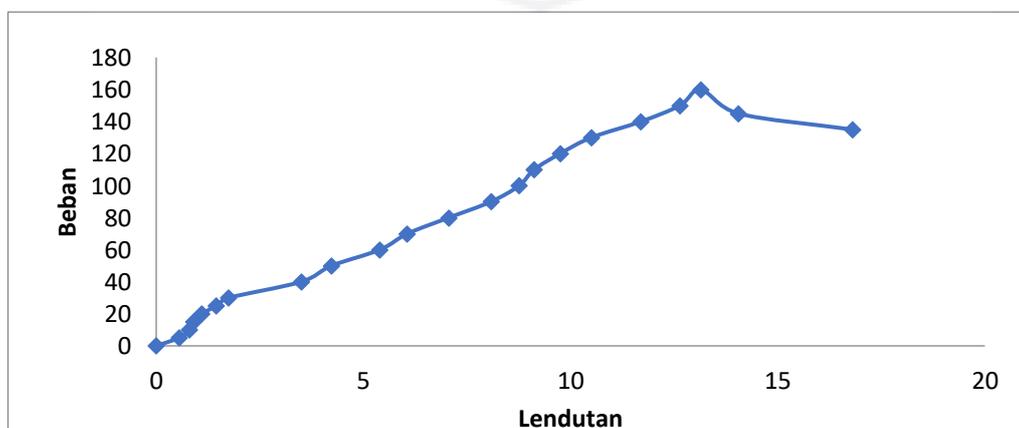
Jln. Urip Sumoharjo Km. 4 – Telp. (0411) 452901 – 342789
fax.(0411)424568

Balok Beton Variasi (BR2)

Tanggal Percobaan : 7 Juli 2022

Berat : 395,6 kg

Beban (kn/m)	Lendutan (mm)
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





LABORATORIUM BAHAN DAN STRUKTUR BETON
JURUSAN SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BOSOWA

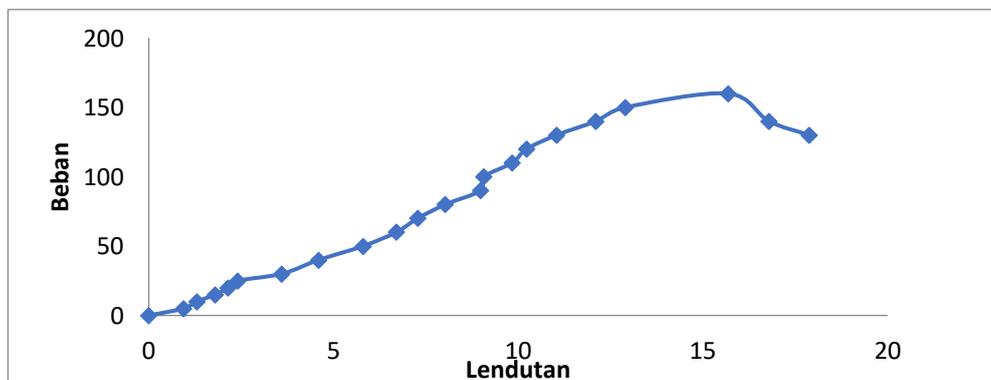
Jln. Urip Sumoharjo Km. 4 – Telp. (0411) 452901 – 342789
fax.(0411)424568

Balok Beton Variasi (BR3)

Tanggal Percobaan : 7 Juli 2022

Berat : 349,8 kg

Beban (kn/m)	Lendutan (mm)
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 Normal (BN)

a. Mekanika Balok Normal

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

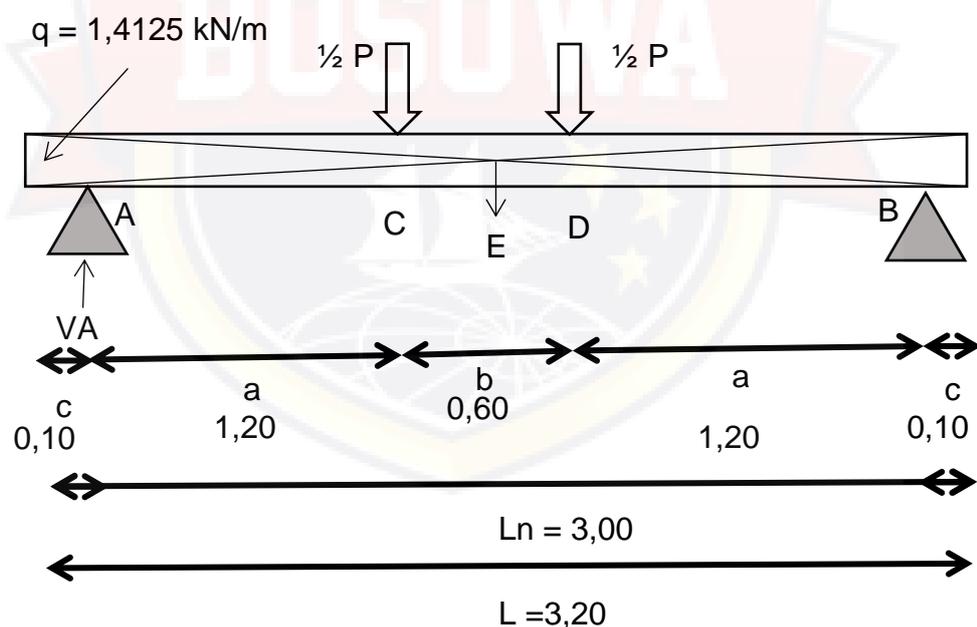
Tinggi balok (h) = 350 cm = 0,350 m

Berat balok BN = 452 Kg.

Berat jenis beton = $\frac{452 \times 100}{0,150 \times 0,350 \times 3,200} = 23,061 \text{ kN/m}^3$

Berat balok permeter = $0,175 \times 0,350 \times 23,061 = 1,4125 \text{ kN/m}$

Perhitungan Reaksi



$$\sum M_B = 0$$

$$V_A(L_n) - \frac{1}{2} P (a+b) - \frac{1}{2} P (a) - q \cdot L \left(\frac{1}{2} b + a \right) = 0$$

$$V_A(3,00) - \frac{1}{2} P (1,20 + 0,60) - \frac{1}{2} P (1,20) - 1,4125 \times 3,20 \left(\frac{1}{2} 0,60 + 1,20 \right) = 0$$

$$V_A 3,00 - \frac{1}{2} P (1,80) - \frac{1}{2} P(1,20) - 4,52 (1,50) = 0$$

$$V_A 3,00 - 0,90 P - 0,60 P - 6,78 = 0$$

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

$$V_A = 2,26 + 0,5 P$$

$$\Sigma V = 0$$

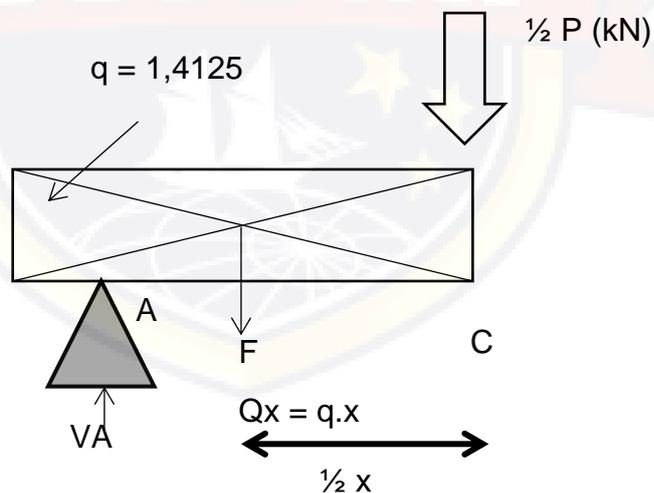
$$V_A + V_B = 0$$

$$2,26 + 0,5 P + V_B - P - 4,52 = 0$$

$$V_B = 2,26 + 0,5 P$$

Perhitungan gaya- gaya dalam

Bentang AC



Momen sejauh - x

$$M_x = V_A (x) - q(c) (1/2 c+x) - q (x)(1/2x) = 0$$

$$= V_A (x) - q(c) (1/2 c+x) - \frac{1}{2} q (x^2) = 0$$

$$= 2,26 + 0,5 P(x) - 1,4125 (0,10)(1/2 0,10 + x) - \frac{1}{2} 1,4125 (x^2) = 0$$

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

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

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

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 $- 0,007063 + 2,40125 x - 0,7063 X^2 + 0,5 Px$

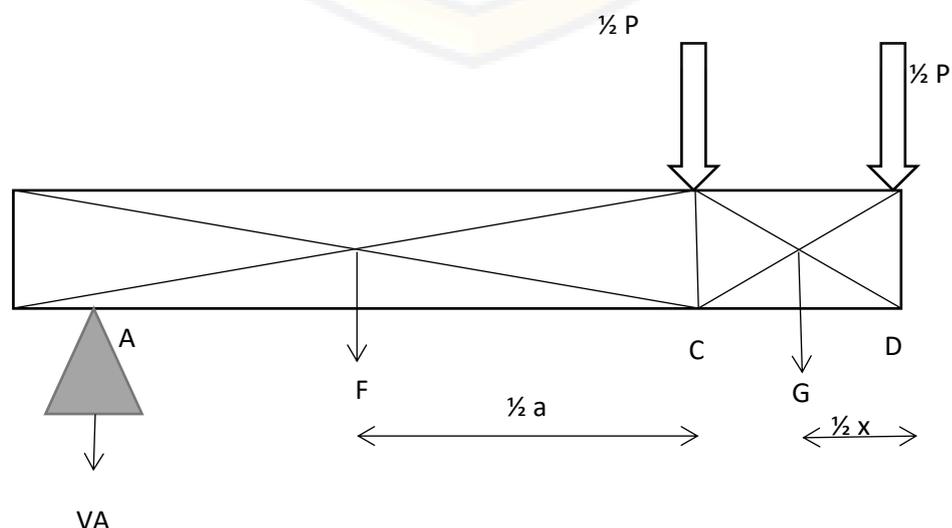
$$= 2,40125 - 1,4125 x + 0,5 P$$

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 $DD = 0,70625 + 0,5 P$

Bentang CD



Momen sejauh $-x$

$$M_x = VA (a+x) - Q(1/2(a+c)+x) - 1/2 Px - 1/2 Qx(z)$$

$$= 2,26 + 0,5 P (1,2 + x) - 1,83625 (1/2 (1,2 + 0,10) (x) - 0,70625 x^2$$

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

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

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, $DC = 0,42375$

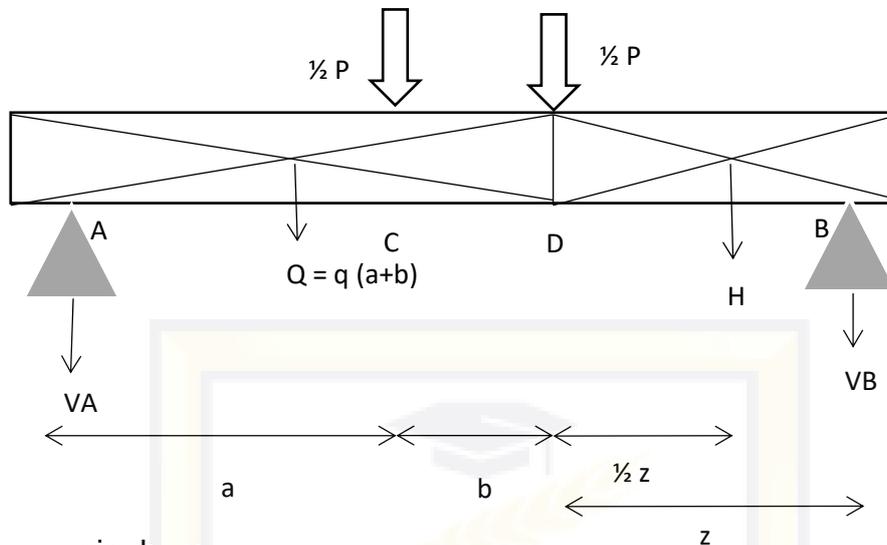
Bila $x = 0,3$ maka, $D = 0$

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

Momen Sejauh $-x$

$$N_x = 0$$

Bentang DB



Momen sejauh -x

$$\begin{aligned}
 M_x &= V_A (a+b)+x) - Q (1/2 (a+b+c)+x) - \frac{1}{2} P (b+x) - \frac{1}{2} P x - \frac{1}{2} q x (x) \\
 &= 2,26 + 0,5 P (1,2 + 0,60 + x) - 2,5425 (\frac{1}{2} (1,2 + 0,6 + 0,10 + x) - \\
 &\quad \frac{1}{2} P (0,6 + x) - 0,5 P x - \frac{1}{2} 1,4125 x^2 \\
 &= 2,26 + 0,5 P (1,8 + x) - 2,5425 (0,95 + x) - 0,5 P (0,6 + x) - 0,5 P x \\
 &\quad - 0,70625 x^2 \\
 &= 4,068 + 0,9 P + 2,26 x + 0,5 P x - 2,415375 - 2,5425 x - 0,3 P - 0,5 \\
 &\quad P x - 0,5 P x - 0,70625 x^2 \\
 &= 1,652625 - 0,2825 x - 0,70625 x^2 + 0,6 P - 0,5 P x
 \end{aligned}$$

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

$$Dx = dMx/dx \text{ maka, } 1,652625 - 0,2825x - 0,70625x^2 + 0,6P - 0,5Px$$

$$= - 0,5 Px - 0,2825 - 1,4125 x$$

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, $DB = - 0,6 P - 1,4125$

$Nx = 0$

b. Desain Balok Normal (BN)

Kuat tekan beton ($f'c$) = 17,55 Mpa

Tegangan leleh baja Tarik (f_y) = 481,78 Mpa

Tegangan Leleh baja tekan ($f'y$) = 259,95 Mpa

Modulus elastisitas beton (E_c) = 19690,14 Mpa

Modulus elastisitas baja tarik (E_s) = 206027,398 Mpa

Modulus elastisitas baja tekan ($E's$) = 202111,304 Mpa

Asumsikan penampang akibat lendutan

Panjang bentang

$L_n = 3 \text{ m} = 3000 \text{ mm}$

$h = L_n/16 = 187,5 \text{ mm}$

Dengan tulangan rangkap

$d' = 32 \text{ mm}$

$d_b = 3 \Phi D 16$

$d_s = \Phi 8$

$d = h - p - \Phi_{sk} - \frac{1}{2} \Phi_{tu}$

$$= 350 - 20 - 8 - 8$$

$$= 314 \text{ mm}$$

$$s = 28 \text{ mm}$$

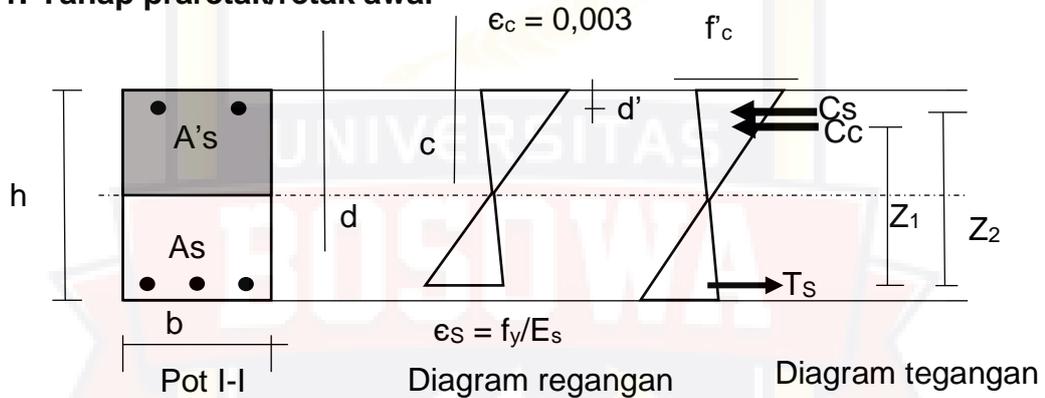
$$A_s = 3 \Phi D 16 = 602,97 \text{ mm}^2$$

$$A'_s = 2 \Phi 8 = 100,53 \text{ mm}^2$$

c. Kapasitas Penampang

Perilaku Lentur pada balok normal (BN)

1. Tahap praretak/retak awal



Gambar Diagram tegangan – regangan pracetak

Angka eivalen

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 10,4634809$$

$$n' = \frac{E'_s}{E_c} = 10,2645949$$

Titik berat penampang dari serat atas

$$y_n = \frac{b \cdot h \cdot \frac{1}{2h} + (n-1)A_s \cdot d - (n-1)A'_s \cdot d'}{b \cdot h + (n-1)A_s - (n-1)A'_s} = 184,7216478 \text{ mm}$$

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

Momen Inersia penampang terhadap titik berat penampang

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

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

Tegangan retak

$$f_r = 0,62 \lambda \sqrt{f'_c} = 0,62 \times 1 \times 17,55 = 2,59744553 \text{ Mpa}$$

Momen retak

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_t}{y_b}$$

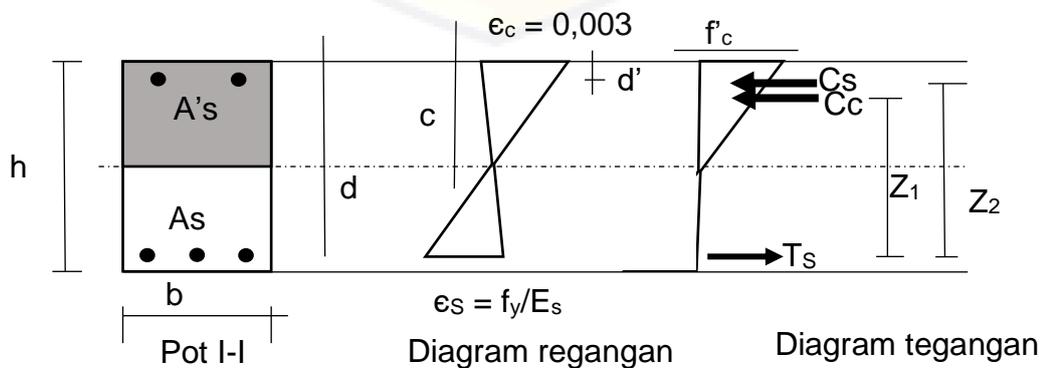
$$= (2,59744553 \times 748140250) / 165,2783522$$

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

$$M_{cr} = 1,582 + 0,6 P$$

$$P_{cr} = 16,9591 \text{ kN}$$

2. Tahap terjadinya leleh pada tulangan



Gambar Diagram tegangan – regangan kondisi leleh

Perhitungan nilai k menggunakan *trial and error*

$$\text{Bila } k = 0,51753998$$

$$k \times d = 162,50755479 \text{ mm}$$

$$\epsilon_y = f_y/E_s = 0,002338427$$

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= \epsilon_y \frac{k \cdot d}{d - k \cdot d} \\ &= 0,002338427 \frac{0,51753998 \times 314}{314 - 0,51753998 \times 314} \\ &= 0,002508455\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon'_s &= \epsilon_c \frac{k \cdot d - d'}{k \cdot d} \\ &= 0,002508455 \frac{0,51753998 \times 314 - 32}{0,51753998 \times 314} \\ &= 0,002014506\end{aligned}$$

$$f_s' = \epsilon_s \times \epsilon'_s = 407,1543423 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned}C_c &= 0,5 \times f'_c \times k \cdot d \times b \\ &= 0,5 \times 17,55 \times 0,51753998 \times 314 \times 175 \\ &= 249569,2809 \text{ N}\end{aligned}$$

$$C_s = A_s' \times f_s' = 40931,6189 \text{ N}$$

$$T = C_c + C_s = 290500,8998 \text{ N}$$

$$T = A_s \cdot f_y = 290500,8998 \text{ N}$$

$$C_c + C_s - A_s \cdot f_y = 0$$

$$290500,8998 - 290500,8998 = 0$$

Asumsi k Benar.

Menentukan lengan momen

Titik berat C_c dan C_s dari serat atas

$$\begin{aligned} y &= \frac{C_c (0,33 \times kd) + C_s \times d'}{C_c + C_s} \\ &= \frac{237631,5853 (0,33 \times 0,51753998 \times 314) + 52869,31451 \times 32}{2495569,2809 + 40931,6189} \\ &= 50,58017617 \text{ mm} \end{aligned}$$

Lengan momen

$$z = d - y = 314 - 50,58017617 = 263,4198238 \text{ mm}$$

$$M_y = A_s \times f_y \times z$$

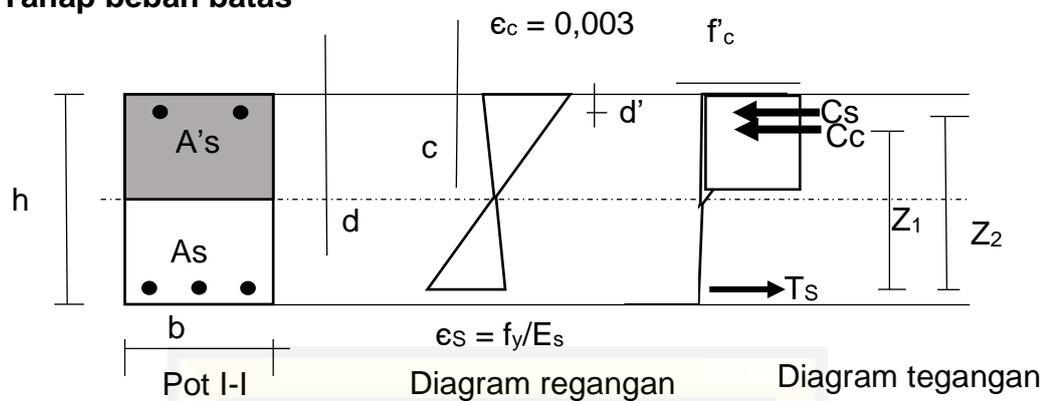
$$= 602,97 \times 481,78 \times 263,4198238$$

$$= 76523695,84 \text{ Nmm} \quad = 76,52369584 \text{ kNm}$$

$$M_y = 1,582 + 0,6 \times P_y$$

$$P_y = 124,9028264 \text{ kN} \quad = 12,49028264 \text{ ton}$$

3. Tahap beban batas



Gambar Diagram tegangan – regangan kondisi batas

Pengecekan nilai P (apakah melebihi P maks atau tidak)

Untuk $f'c \leq 28$ Mpa maka $\beta_1 = 0,85$

Untuk $f'c > 28$ Mpa maka $\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 - (f'c - 30)}{7}$

Karena, $f'c = 17,55$ Mpa maka $\beta_1 = 0,85$

$$\begin{aligned}
 a_b &= \frac{600 \times \beta_1 \times d}{600 + f_y} \\
 &= \frac{600 \times 0,85 \times 314}{600 + 481,78} \\
 &= 148,0337962
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_b &= \frac{A_{s_b}}{b \cdot d} \\
 &= \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y \cdot d}
 \end{aligned}$$

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

$$= 0,01459859$$

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

$$\rho_{\text{min}} = \frac{1}{4} f_y = 0,00291$$

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

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

$$0,009143644 < 0,01094894 \quad \text{Ok.}$$

Momen nominal penampang

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A's \cdot f_y}{0,85 f'c b}$$
$$= \frac{602,97 \times 481,78 - 100,53 \times 259,95}{0,85 \times 17,55 \times 175}$$

$$= 101,2608759$$

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

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

$$= 69626370,19 = 69,626 \text{ Nmm}$$

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

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

$$= 1154271,7 = 11,543 \text{ Nmm}$$

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

$$M_0 = M \text{ maks}$$

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

$$0,6 P = 79,59$$

$$P = 132,65 \text{ kN.}$$

1. Perhitungan kapasitas lentur balok beton Variasi (BR2)

a. Mekanika Balok Variasi (BR2)

$$\text{Lebar balok (b)} = 175 \text{ cm} = 0,175 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi balok (h)} = 35 \text{ cm} = 0,35 \text{ m}$$

$$\text{Berat balok} = 395,6 \text{ Kg.}$$

$$\text{Berat jenis beton} = \frac{452 \times 100}{0,175 \times 0,350 \times 3,200} = 23,061 \text{ kN/m}^3$$

$$q \text{ utuh} = 0,175 \times 0,350 \times 23,061$$

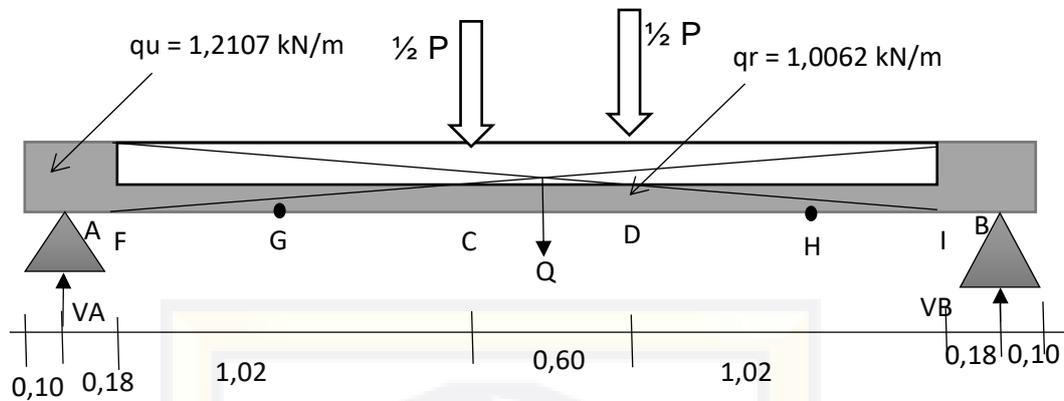
$$= 1,2107 \text{ kN/m}$$

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

$$\text{Berat sendiri balok (q)} = 0,175 \times 0,35 \times 19,166 = 1,0062 \text{ kN/m}$$

$$Q = 1,0062 \times 2,54 \times 1,2107 \times 0,56 = 3,45 \text{ kN}$$

Perhitungan Reaksi



$$\sum M_B = 0$$

$$V_A(L_n) - \frac{1}{2} P (a+b) - \frac{1}{2} P (a) - q_u \cdot L_u \left(\frac{1}{2} 0,28 + 2,82 \right) - q_r \cdot L_r \left(\frac{1}{2} L_r + 0,18 \right) - \frac{1}{2} q_u (0,18^2) + \frac{1}{2} q_u (0,10^2)$$

$$V_A(3,00) - \frac{1}{2} P (1,20 + 0,60) - \frac{1}{2} P (1,20) - 1,2107 \times 0,28 (2,96) - 1,0062 \times 2,64 \left(\frac{1}{2} 2,64 + 0,18 \right) - \frac{1}{2} 1,2107 (0,0324) + \frac{1}{2} 1,2107 (0,01)$$

$$V_A 3,00 - 0,9P - 0,6P - 1,00344 - 3,98470 - 0,01961 + 0,00605$$

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

$$V_A = 1,66723 + 0,5 P$$

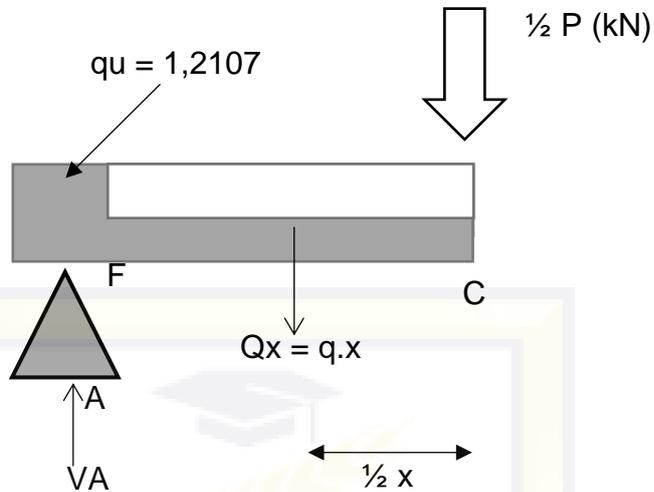
$$\sum v = V_A + V_B - P - Q$$

$$V_B = 1,66723 + 0,5 P - P - 3,33$$

$$= 1,66723 + 0,5 P$$

Perhitungan gaya- gaya dalam

Bentang FC



Momen sejauh x

$$Mx = VA (0,18 + x) - qu \times 0,28 (0,28/2 + x) - qr(x) (1/2x)$$

$$= 1,66723 + 0,5P (0,18 + x) - 1,2107 \times 0,28(0,14 + x) - 1,0062 (x)(1/2 x)$$

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

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

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

$$Dx = dMx/dx \text{ maka } 0,25264 - 2,00623 x - 0,50312 x^2 + 0,09 P + 0,5 Px$$

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

bila $x = 0$ maka DF = $2,00623 + 0,09 P$

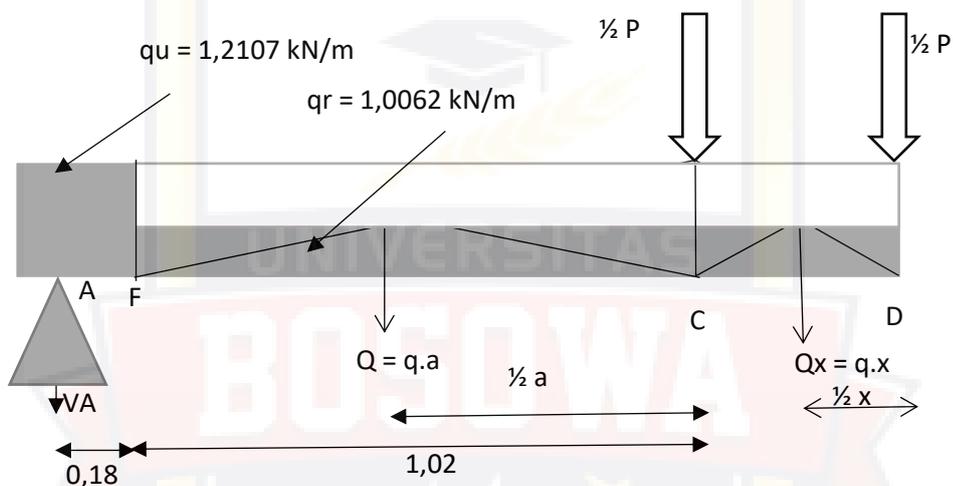
bila $x = 0,6$ maka $DG = 1,49305 + 0,09 P$

bila $x = 1,2$ maka $DC = 1,03018 + 0,09P$

Momen sejauh x

$Nx = 0$

Bentang CD



Momen sejauh $-x$

$$\begin{aligned}
 Mx &= VA (a + x) - qu.lu(1/2 0,28 + a - 0,18 + x) - qr. 1,02 (1/2 1,02 + x) - \\
 &\quad 1/2 Px - 1/2 qr x^2 \\
 &= 1,66723 + 0,5 P (1,2 + x) - 1,2107 \times 0,28 (0,14 + 1,2 - 0,18 + x) - \\
 &\quad 1,0062 \times 1,02 (0,51 + x) - 0,5 Px - 1/2 1,006238 x^2 \\
 &= 2,16741 + 1,66723x + 0,6P + 0,5Px - 0,39324 - 0,339x - 0,52345 \\
 &\quad - 1,02636 x - 0,5 Px - 0,50312 x^2 \\
 &= 1,25072 + 0,30187 x - 0,50312 x^2 + 0,6 P
 \end{aligned}$$

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, $1,25072 + 0,30187 x - 0,50312 x^2 + 0,6 P$

$$= 0,301872 - 1,006239 x$$

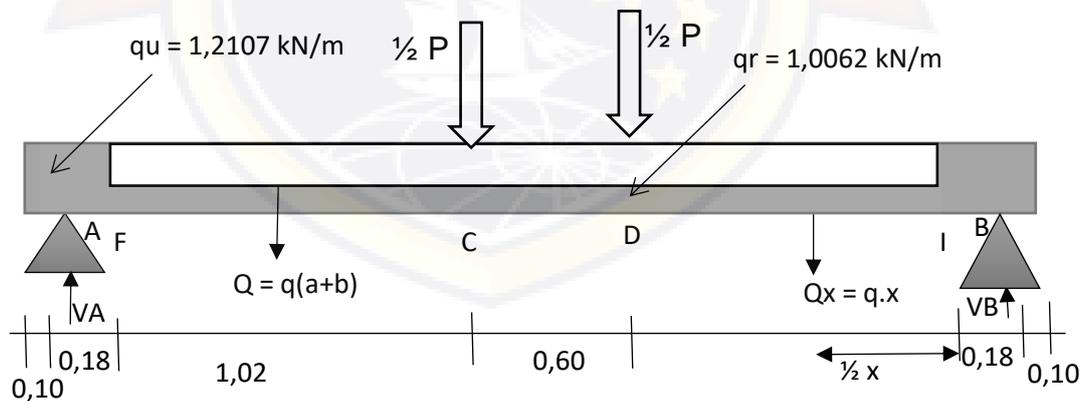
Bila $x = 0$ maka, $DC = 0,301872$

Bila $x = 0,3$ maka, $D = 0$

Bila $x = 0,6$ maka, $DD = - 0,301872$

Momen Sejauh $-x$ $Nx=0$

Bentang DB



Momen sejauh $-x$

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

$$\begin{aligned}
&= 1,66723 + 0,5 P (1,2 + 0,60 + x) - 1,2107 \times 0,28 (0,14 + x) - \\
&\quad 1,0062 \times 1,62 (0,81 + x) - 0,5P (0,60 + x) - 0,5P - \frac{1}{2} 1,00062 x^2 \\
&= 1,66723 + 0,5 P (1,8 + x) - 0,3389 (0,14 + x) - 1,63004 (0,81 + x) \\
&\quad - 0,3 P - 0,5 Px - 0,5 P - 0,503144 x^2 \\
&= 3,001176 + 1,66723 x + 0,9 P - 0,3 P - 0,5 Px + 0,5 Px - 0,047446 \\
&\quad - 0,3389 x - 1,3203324 - 1,63004 x - 0,5 Px - 0,503144 x^2 \\
&= 1,6333976 - 0,30171 x - 0,503144 x^2 + 0,6 P - 0,5 Px
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
Dx = dMx/dx \text{ maka, } &1,6333976 - 0,30171 x - 0,503144 x^2 + 0,6 P - 0,5Px \\
&= - 0,5 P - 0,30171 - 1,0062 x
\end{aligned}$$

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 ekuivalen

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 10,4634809$$

$$n' = \frac{E'_s}{E_c} = 10,2645949$$

Momen retak penampang Transformasi

Jarak Tarik terluar ke pusat berat penampang (γ_n)

$$f'_c = 17,55130927 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 481,78 \text{ Mpa}$$

$$b = 175 \text{ mm}$$

$$h = 350 \text{ mm}$$

$$d = 314 \text{ mm}$$

$$d' = 32 \text{ mm}$$

$$A_s = 602,97 \text{ mm}^2 \quad A'_s = 100,53 \text{ mm}^2$$

Titik berat penampang

	Luas bagian	jarak ke	Momen statis
	Penampang	serat atas	terhadap serat atas
1. $b \times h$	= 61250 mm ²	175 mm	10718750 mm ³
2. $(n-1) A_s$	= 5706,2 mm ²	314 mm	1791757,7 mm ³

$$\begin{aligned}
3. (n'-1) A's &= \underline{931,38 \text{ mm}^2} & 32 \text{ mm} & & \underline{29804,117 \text{ mm}^3} \\
&= 67887,6 \text{ mm}^2 & & & 12540311,8 \text{ mm}^3 \\
4. b' \times h' &= \underline{14400 \text{ mm}^2} & 180 \text{ mm} & & \underline{2592000 \text{ mm}^3} \\
&= 53487,6 \text{ mm}^2 & & & 9948311,79 \text{ mm}^3
\end{aligned}$$

$$\gamma_n = 185,9928155 \text{ mm}$$

$$\gamma_b = 350 - \gamma_n = 164,0071845 \text{ mm}$$

Momen inersia penampang

$$\begin{aligned}
I_t &= 1/12.b.h^3 + b.h.(1/2h - \gamma_n)^2 + (n-1) A_s.(d-\gamma_n)^2 + (n-1)A_s'.(\gamma_n - d')^2 - \\
&1/12b'h'^3 - b'h'(350 - \gamma_n - \frac{1}{2} h')
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_t &= 1/12 \cdot 175 \times 350^3 + 175 \times 350 \left(\frac{1}{2} \cdot 350 - 185,9928155 \right)^2 + (\\
&10,4634809 - 1) \cdot 602,97 \left(314 - 185,9928155 \right)^2 + (19,2645949 - 1 \\
&) \cdot 100,53 \left(185,9928155 - 32 \right)^2 - 1/12 \cdot 120 \times 120^3 - 120 \times 120 \\
&\left(164,0071845 - \frac{1}{2} \cdot 120 \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_t &= 625260416,7 + 7401572,071 + 93501443,59 + 22086515,42 - \\
&17280 - 188072276,5
\end{aligned}$$

$$I_t = 542897671,2$$

Tegangan retak

$$\begin{aligned}
f_r &= 0,62 \lambda \sqrt{f_c} \\
&= 0,62 \times 1 \times 17,55^{1/2} \\
&= 2,59744553 \text{ Mpa}
\end{aligned}$$

Momen sebelum retak

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_t}{y_b}$$

$$= (2,59744553 \times 542897671,2) / 164,0071845$$

$$= 31741125,59 \text{ Nmm} = 31,74112559 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 1,296 + 0,6 P$$

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

$$0,6 P = 30,4451$$

$$P_{cr} = 50,7419 \text{ kN}$$

Alternatif solusi dengan penampang bruto

Titik berat penampang

	Luas bagian Penampang	Jarak ke serat atas	Momen statis ter hadap serat atas
1) $b \times h$	61250 mm^2	175 mm	10718750 mm^2
2) $b' \times h'$	<u>14400 mm^2</u>	210 mm	<u>3024000 mm^2</u>
	$= 46850$		7694750

$$y_n = 164,2422625 \text{ mm}$$

$$y_b = 350 - y_n = 185,7577375 \text{ mm}$$

Momen inersia

$$I_{bruto} = 1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \left(\frac{1}{2} h - y_n \right)^2 - 1/12 b' \cdot h'^3 - b \cdot h \left(y_b \cdot 80 - \frac{1}{2} h' \right)$$

$$= 1/12 \times 175 \times 350^3 + 175 \times 350 \left(\frac{1}{2} 350 - 164,2422625 \right)^2 - 1/12 \times$$

$$120 \times 120^3 - 175 \times 350 \left(185,7577375 \times 80 - \frac{1}{2} 120 \right)$$

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

$$I_{bruto} = 401075959,2 \text{ mm}^4$$

$$M_{crack} = \frac{I_{bruto} \cdot f_r}{y_b}$$
$$= \frac{401075959,2 \times 2,59744553}{185,7577375}$$

$$M_{crack} = 5608025,348 \text{ N.mm}$$

$$M_{crack} = 5,608025348 \text{ kN.m}$$

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

$$0,6 P = 4,312$$

$$P = 7,187 \text{ kN}$$

Sudut kurvatur momen

$$\varphi_{cr} = (f_r/E_c) / y_b$$
$$= \frac{(9,589 / 19690,14)}{161,8571562}$$
$$= 0,00000301 \text{ rad/mm}$$

2. Taraf Pracetak : Daerah II (Terjadinya Leleh)

Perhitungan nilai k menggunakan *trial and error*

$$\text{Bila } k = 0,51635386$$

$$k \times d = 162,1351108 \text{ mm}$$

$$\epsilon_y = f_y/E_s = 0,002338427$$

$$\epsilon_c = \epsilon_y \frac{k \cdot d}{d - k \cdot d}$$

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

$$= 0,0024965$$

$$\epsilon's = \epsilon_c \frac{k_d - d'}{k_d}$$

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

$$= 0,00200383$$

$$f_s' = \epsilon_s \times \epsilon's = 412,8439033 \text{ Mpa}$$

$$C_c = 0,5 \times f_c \times k \times d \times b$$

$$= 0,5 \times 17,55 \times 0,51635386 \times 314 \times 175$$

$$= 248997,3038 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \times f_s' = 41503,59596 \text{ N}$$

$$T = C_c + C_s = 290500,8998 \text{ N}$$

$$T = A_s \cdot f_y = 290500,8998 \text{ N}$$

$$C_c + C_s - A_s \cdot f_y = 0$$

$$290500,8998 - 290500,8998 = 0 \quad \text{Asumsi k Benar.}$$

$$\gamma = \frac{C_c (0,33 \times k_d) + C_s \times d'}{T}$$

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

$$= 50,43224608 \text{ mm}$$

$$J_d = d - \gamma = 314 - 50,43224608 = 263,5677539$$

$$M_\gamma = A_s f_y J_d = 765667 \text{ N.mm} = 76,5667 \text{ kN,m}$$

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

$$M_\gamma = M_{\text{maks ditengah}}$$

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

$$0,6 P = 75,2707$$

$$P = 125,45 \text{ kN}$$

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 $f'_c \leq 28 \text{ Mpa}$ maka $\beta_1 = 0,85$

Untuk $f'_c > 28 \text{ Mpa}$ maka $\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 - (f'_c - 30)}{7}$

Karena, $f'_c = 17,55 \text{ Mpa}$ maka $\beta_1 = 0,85$

$$\begin{aligned} a_b &= \frac{600 \times \beta_1 \times d}{600 + f_y} \\ &= \frac{600 \times 0,85 \times 314}{600 + 481,78} \\ &= 148,0337962 \end{aligned}$$

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{b \cdot d}$$

$$= \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y \cdot d}$$

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

$$= 0,01459859$$

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

$$\rho_{min} = \frac{1}{4} f_y = 0,00291$$

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

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

0,0091436 < 0,01094894 Ok.

Kontrol Tulangan Tekan Sudah Leleh atau Belum

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f'_y}{0,85 f'_c b}$$

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

$$= 101,2608759$$

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

$$\epsilon_c = 0,002496568$$

$$\begin{aligned}\epsilon_y &= \epsilon_c \frac{d-c}{c} \\ &= 0,002496568 \frac{314-119,13044}{119,13044} \\ &= 0,004083802\end{aligned}$$

$E_y > f_y/E_s = 0,0023384$ Tulangan Tarik Sudah Leleh Gunakan f_y

$$\begin{aligned}\epsilon'_y &= \epsilon_c \frac{c-d'}{c} \\ &= 0,00249 \frac{119,13044-32}{119,13044} \\ &= 0,0023384\end{aligned}$$

$E_y > f_y/E_s = 0,0023384$ Tulangan Tekan Sudah Leleh Gunakan f_y

Momen nominal penampang

$$\begin{aligned}M_{nc} &= 0,85 f'_c b (d - 0,5 a) \\ &= 0,85 \times 17,55 \times 175 (314 - 0,5 \times 101,2608759) \\ &= 69626370,19 \quad = 69,62637019 \text{ kNmm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{ns} &= A's \times f'_s (d - d') \\ &= 100,53 \times 412,8439033 (314 - 32) \\ &= 11704014,06 = 11,70401406 \text{ Nmm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_0 &= M_{nc} + M_{ns} \\ &= 69,626 + 11,704 = 81330384,25 \text{ Nmm} = 81,33038425\end{aligned}$$

$$M_0 = M \text{ maks}$$

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

$$0,6 P = 80,03$$

$$P = 133,39 \text{ kN.}$$

2. Perhitungan kapasitas lentur balok beton Variasi (BR3)

a. Mekanika Balok Variasi (BR3)

$$\text{Lebar balok (b)} = 17,5 \text{ cm} = 0,175 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi balok (h)} = 35 \text{ cm} = 0,350 \text{ m}$$

$$\text{Berat balok} = 349,8 \text{ Kg.}$$

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

$$q \text{ utuh} = 0,175 \times 0,350 \times 26,905$$

$$= 1,4125 \text{ kN/m}$$

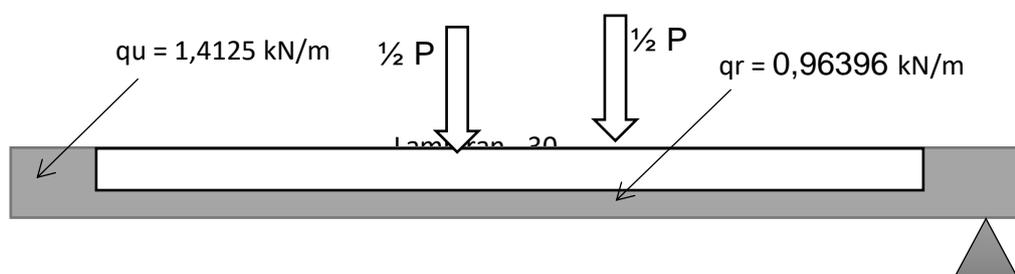
$$\text{Berat jenis penampang rongga} = \frac{1,38 \times 100}{0,18 \times 2,64 \times 0,06} = 15,7382 \text{ kN/m}^3$$

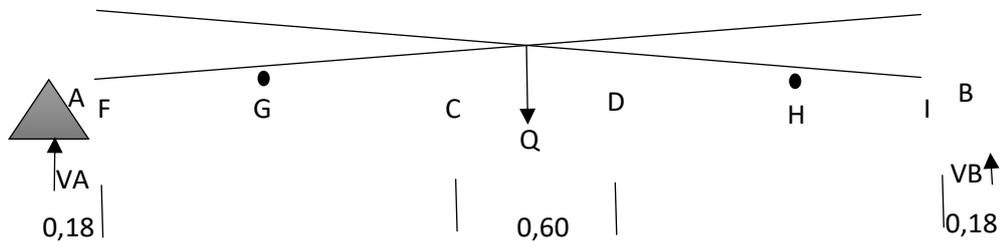
$$\text{Berat sendiri balok (q)} = 0,175 \times 0,35 \times 15,7382$$

$$= 0,96396 \text{ kN/m}$$

$$Q = 0,96396 \times 2,64 \times 1,4125 \times 0,56 = 3,34 \text{ kN}$$

Perhitungan Reaksi





$$\sum MB = 0$$

$$VA(Ln) - \frac{1}{2} P (a+b) - \frac{1}{2} P(a) - qu.Lu(\frac{1}{2} 0,28+2,82) - qr.Lr (\frac{1}{2} Lr+0,18) - \frac{1}{2} qu (0,18^2) + \frac{1}{2} qu (0,10^2)$$

$$VA(3,00) - \frac{1}{2}P(1,20 + 0,60) - \frac{1}{2}P(1,20) - 1,4125 \times 0,28 (2,953) - 0,96396 \times 2,64 (\frac{1}{2} 2,64 + 0,18) - \frac{1}{2} 1,125 (0,0529) + \frac{1}{2} 1,4125 (0,01)$$

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

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

$$VA = 1,667933 + 0,5 P$$

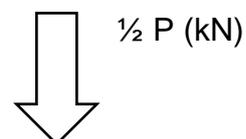
$$\sum v = 0$$

$$= VA + VB - P - Q$$

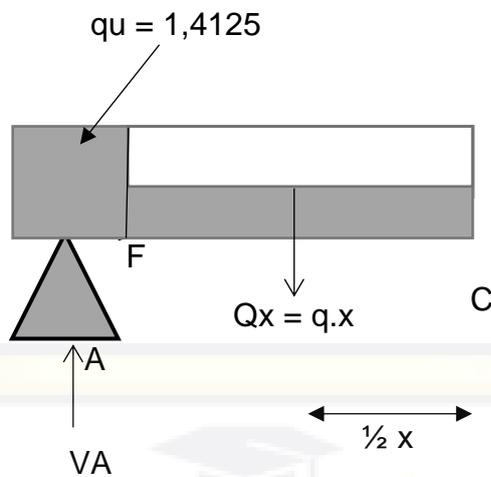
$$VB = 1,667933 + 0,5 P - P - 3,34$$

$$= 1,667933 + 0,5 P$$

Perhitungan gaya- gaya dalam



Bentang FC



Momen sejauh x

$$\begin{aligned}
 Mx &= VA (0,18 + x) - qu \times 0,28 (0,28/2 + x) - qr(x) (1/2x) \\
 &= 1,667933 + 0,5 P (0,18 + x) - 1,4125 \times 0,28 (0,14 + x) - 0,96396 \\
 &\quad (x) (1/2 x) \\
 &= 0,300228 + 1,667933 x + 0,09 P + 0,5 Px - 0,05537 - 0,3955 x - \\
 &\quad 0,48198 x^2 \\
 &= 0,244858 - 2,06343 x - 0,48198 x^2 + 0,09 P + 0,5 Px
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 Dx &= dMx/dx \text{ maka } 0,244858 - 2,06343x - 0,48198x^2 + 0,09P + 0,5Px \\
 &= - 0,964 x + 2,063 + 0,09 P
 \end{aligned}$$

bila $x = 0$ maka $DF = 2,06343 + 0,09 P$

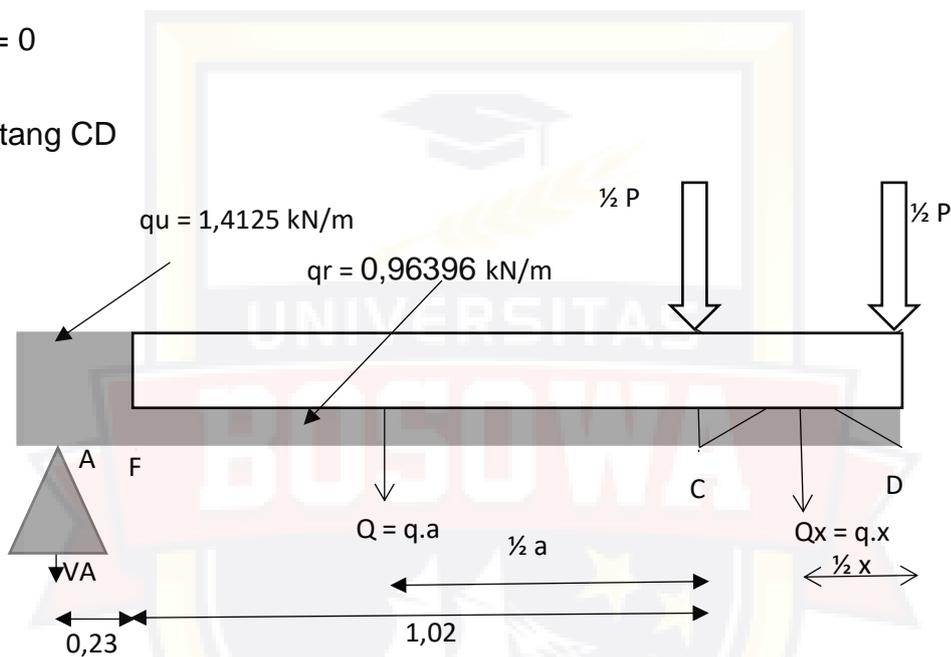
bila $x = 0,6$ maka $DG = 1,57181 + 0,09 P$

bila $x = 1,02$ maka $DC = 1,08019 + 0,09 P$

Momen sejauh x

$N_x = 0$

Bentang CD



Momen sejauh $-x$

$$\begin{aligned}
 M_x &= VA(a+x) - q_u \cdot lu \left(\frac{1}{2} 0,28 + a - 0,18 + x \right) - q_r \cdot 1,02 \left(\frac{1}{2} 1,02 + x \right) - \frac{1}{2} P x - \frac{1}{2} q_r x^2 \\
 &= 1,667933 + 0,5 P (1,2 + x) - 1,4125 \times 0,28 (0,14 + 1,2 - 0,18 + x) - \\
 &\quad 0,96396 \times 1,02 (0,51 + x) - 0,5 P x - \frac{1}{2} 0,96396 x^2 \\
 &= 2,168314 + 1,667933x + 0,6P + 0,5Px - 0,26451 - 0,3955x - \\
 &\quad 0,50145 - 0,96396 x - 0,5Px - 0,48198 x^2 \\
 &= 1,402347 + 0,28919 x - 0,48198 x^2 + 0,6 P
 \end{aligned}$$

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, $1,402347 + 0,28919 x - 0,48198 x^2 + 0,6 P$

$$= 0,28919 - 0,48198 x$$

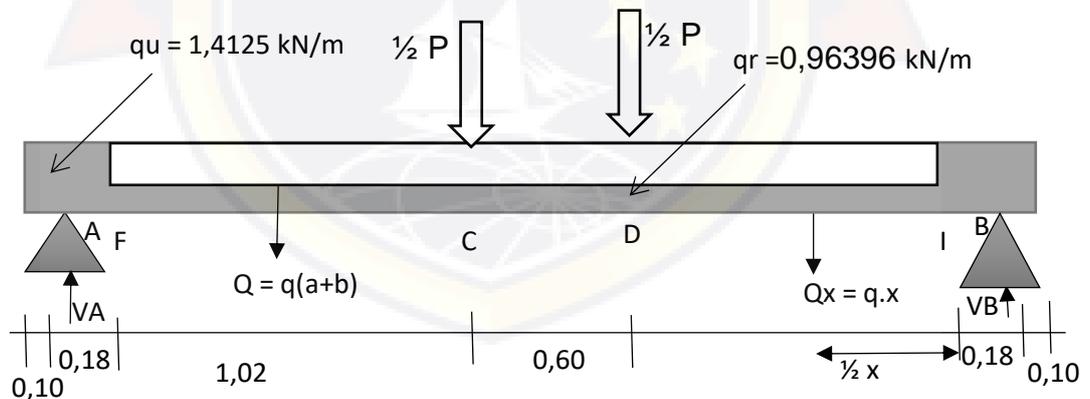
Bila $x = 0$ maka, $DC = 0,28919$

Bila $x = 0,3$ maka, $D = 0$

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

Momen Sejauh $-x$ $Nx=0$

Bentang DB



Momen sejauh $-x$

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

$$\begin{aligned}
&= 1,667933 + 0,5 P (1,2 + 0,6 + x) - 1,4125 \times 0,28 (0,14 + x) - \\
&\quad 0,96396 \times 1,62(0,785 + x) - 0,5P(0,6 + x) - 0,5P - \frac{1}{2} 0,96396 x^2 \\
&= 1,667933 + 0,5 P (1,8 + x) - 0,3955 (0,14 + x) - 1,5616 (0,785 + \\
&\quad x) - 0,3 P - 0,5 Px - 0,5 P - 0,413128 x^2 \\
&= 3,0022794 + 1,667933 x + 0,9 P - 0,3 P - 0,5 Px + 0,5 Px - 0,05537 \\
&\quad - 0,3955 x - 1,2259 - 1,5616 x - 0,5 Px - 0,413128 x^2 \\
&= 1,7210094 - 0,289167 x - 0,413128 x^2 + 0,6 P - 0,5 Px
\end{aligned}$$

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 $-x$

$$\begin{aligned}
Dx = dMx/dx \text{ maka, } &1,7210094 - 0,289167x - 0,413128x^2 + 0,6P - 0,5 Px \\
&= - 0,5 P - 0,289167 - 0,96396 x
\end{aligned}$$

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 ekuivalen

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 10,4634809$$

$$n' = \frac{E'_s}{E_c} = 10,2645949$$

Momen retak penampang Transformasi

Jarak Tarik terluar ke pusat berat penampang (γ_n)

$$f'_c = 17,55130927 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 481,78 \text{ Mpa}$$

$$b = 175 \text{ mm}$$

$$b' = 120 \text{ mm}$$

$$h = 350 \text{ mm}$$

$$h' = 120 \text{ mm}$$

$$d = 314 \text{ mm}$$

$$d' = 32 \text{ mm}$$

$$A_s = 602,97 \text{ mm}^2$$

$$A'_s = 100,53 \text{ mm}^2$$

Titik berat penampang

	Luas bagian	jarak ke	Momen statis
	Penampang	serat atas	terhadap serat atas
5. $b \times h$	$= 61250 \text{ mm}^2$	175 mm	10718750 mm^3

6. $(n-1) A_s =$	5706,2 mm ²	314 mm	1791757,7 mm ³
7. $(n'-1) A's =$	<u>931,38 mm²</u>	32 mm	<u>29804,117 mm³</u>
	= 67887,6 mm ²		12540311,8 mm ³
8. $b' \times h' =$	<u>14400 mm²</u>	180 mm	<u>2592000 mm³</u>
	= 53487,6 mm ²		9948311,8 mm ³

$$\gamma_n = 185,9928155 \text{ mm}$$

$$\gamma_b = 350 - \gamma_n = 164,0071845 \text{ mm}$$

Momen inersia penampang

$$I_t = 1/12.b.h^3 + b.h.(1/2h - \gamma_n)^2 + (n-1) A_s.(d-\gamma_n)^2 + (n-1)A_s'.(\gamma_n - d')^2 - 1/12b'h'^3 - b'h'(350 - \gamma_n - 1/2 h')$$

$$I_t = 1/12 \cdot 175 \times 350^3 + 175 \times 350 \left(\frac{1}{2} \cdot 350 - 185,9928155 \right)^2 + (10,4634809 - 1) \cdot 602,97 \left(314 - 185,9928155 \right)^2 + (19,2645949 - 1) \cdot 100,53 \left(185,9928155 - 32 \right)^2 - 1/12 \cdot 120 \times 120^3 - 120 \times 120 \left(164,0071845 - \frac{1}{2} \cdot 120 \right)$$

$$I_t = 625260417 + 7401572,07 + 93501443,6 + 22086515,4 - 17280 - 188072277$$

$$I_t = 542897671$$

Tegangan retak

$$f_r = 0,62 \lambda \sqrt{f'_c}$$

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

$$= 2,59744553 \text{ Mpa}$$

Momen sebelum retak

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_t}{y_b}$$

$$= (2,59744553 \times 542897671) / 164,0071845$$

$$= 8597760,74 \text{ Nmm} = 8,59776074 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 1,4457 + 0,6 P$$

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

$$0,6 P = 7,152$$

$$P_{cr} = 11,92 \text{ kN}$$

Alternatif solusi dengan penampang bruto

Titik berat penampang

	Luas bagian Penampang	Jarak ke serat atas	Momen statis ter hadap serat atas
3) $b \times h$	61250 mm^2	175 mm	10718750 mm^2
4) $b' \times h'$	<u>14400 mm^2</u>	210 mm	<u>3024000 mm^2</u>
	$= 46850$		7694750

$$y_n = 164,242263 \text{ mm}$$

$$y_b = 350 - y_n = 185,757737 \text{ mm}$$

Momen inersia

$$I_{bruto} = 1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \left(\frac{1}{2} h - y_n \right)^2 - 1/12 b' \cdot h'^3 - b \cdot h \left(y_b - \frac{1}{2} h' \right)^2$$

$$= 1/12 \times 175 \times 350^3 + 175 \times 350 \left(\frac{1}{2} 350 - 164,242263 \right)^2 - 1/12 \times 120 \times 120^3 - 175 \times 350 \left(185,757737 \times 80 - \frac{1}{2} 120 \right)$$

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

$$I_{bruto} = 401075959 \text{ mm}^4$$

$$M_{crack} = \frac{I_{bruto} \cdot f_r}{y_b}$$

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

$$M_{crack} = 5608025,348 \text{ N.mm}$$

$$M_{crack} = 5,608025348 \text{ kN.m}$$

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

$$0,6 P = 4,1623$$

$$P = 6,9372 \text{ kN}$$

Sudut kurvatur momen

$$\varphi_{cr} = (f_r/E_c) / y_b$$

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

$$= 0,00000082 \text{ rad/mm}$$

2. Taraf Pracetak : Daerah II (Terjadinya Leleh)

Perhitungan nilai k menggunakan *trial and error*

$$\text{Bila } k = 0,51635386$$

$$k \times d = 162,1351108 \text{ mm}$$

$$\epsilon_y = f_y/E_s = 0,002338427$$

$$\begin{aligned}\epsilon_c &= \epsilon_y \frac{k \cdot d}{d - kd} \\ &= 0,002338427 \frac{0,51635386 \times 314}{314 - 0,51635386 \times 314} \\ &= 0,002496568\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon'_s &= \epsilon_c \frac{kd - d'}{kd} \\ &= 0,002496568 \frac{0,51635386 \times 314 - 32}{0,51635386 \times 314} \\ &= 0,00200383\end{aligned}$$

$$f_s' = \epsilon_s \times \epsilon'_s = 412,8439033 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned}C_c &= 0,5 \times f'_c \times k \times d \times b \\ &= 0,5 \times 17,55 \times 0,51635386 \times 314 \times 150 \\ &= 248997,3038 \text{ N}\end{aligned}$$

$$C_s = A_s' \times f_s' = 41503,59596 \text{ N}$$

$$T = C_c + C_s = 290500,8998 \text{ N}$$

$$T = A_s \cdot f_y = 290500,8998 \text{ N}$$

$$C_c + C_s - A_s \cdot f_y = 0$$

$$290500,8998 - 290500,8998 = 0 \quad \text{Asumsi k Benar.}$$

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{C_c (0,33 \times kd) + C_s \times d'}{T} \\ &= \frac{248997,3038 (0,33 \times 0,51635386 \times 314) + 41503,59596 \times 32}{290500,8998}\end{aligned}$$

$$= 50,43224608 \text{ mm}$$

$$J_d = d - \gamma = 314 - 50,43224608 = 263,5677539$$

$$M_\gamma = A_s f_y J_d = 76566669,66 \text{ N.mm} = 76,56666966 \text{ kN.m}$$

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

$$M_\gamma = M_{\text{maks ditengah}}$$

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

$$0,6 P = 75,121$$

$$P = 125,201 \text{ kN}$$

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 $f'_c \leq 28 \text{ Mpa}$ maka $\beta_1 = 0,85$

Untuk $f'_c > 28 \text{ Mpa}$ maka $\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 - (f'_c - 30)}{7}$

Karena, $f'_c = 17,55 \text{ Mpa}$ maka $\beta_1 = 0,85$

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

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

$$= 148,0337962$$

$$\rho_b = \frac{A_{s_b}}{b \cdot d}$$

$$= \frac{0,85 \cdot f'_c}{f_y \cdot d}$$

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

$$= 0,01459859$$

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

$$\rho_{min} = \frac{1}{4} f_y = 0,00291$$

$$\rho = \frac{(A_s - A'_s)}{b \cdot d} = 0,009144$$

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

$$0,009144 < 0,01094894 \quad \text{Ok.}$$

Kontrol Tulangan Tekan Sudah Leleh atau Belum

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A'_s \cdot f'_y}{0,85 f'_c b}$$

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

$$= 101,2608759$$

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

$$\epsilon_c = 0,002496568$$

$$\begin{aligned}\epsilon_y &= \epsilon_c \frac{d-c}{c} \\ &= 0,002496568 \frac{314-119,1304}{119,1304} \\ &= 0,004083802\end{aligned}$$

$E_y > f_y/E_s = 0,002338$ Tulangan Tarik Sudah Leleh Gunakan f_y

$$\begin{aligned}\epsilon'_y &= \epsilon_c \frac{c-d'}{c} \\ &= 0,002496568 \frac{119,1304-32}{119,1304} \\ &= 0,001825957\end{aligned}$$

$E_y > f_y/E_s = 0,002338$ Tulangan Tekan Sudah Leleh Gunakan f_y

Momen nominal penampang

$$\begin{aligned}M_{nc} &= 0,85 f'_c b (d - 0,5 a) \\ &= 0,85 \times 17,55 \times 175 (314 - 0,5 \times 101,2608759) \\ &= 69626370,19 \quad = 69,62637019 \quad \text{kNm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_{ns} &= A'_s \times f'_s (d - d') \\ &= 100,53 \times 532,34902 (314 - 32) \\ &= 11704014,1 \quad = 11,7040141 \text{ Nmm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}M_0 &= M_{nc} + M_{ns} \\ &= 69,626 + 11,704\end{aligned}$$

$$= 81330384,25 \text{ Nmm} = 81,33038425$$

$$M_0 = M \text{ maks}$$

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

$$0,6 P = 79,88$$

$$P = 133,14 \text{ kN.}$$

kesimpulan beban maksimum sebesar 133,14 kN

LENDUTAN

Kondisi Ultimate

BN Akibat beban terbagi rata

$$D = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI} = \frac{5 \times 1,4125 \times 3200^4}{384 \times 23500 \times 748140250}$$

$$D = 0.10969233 \text{ mm}$$

Akibat beban P

$$D = \frac{23 \cdot P \cdot L^3}{648 \cdot EI} = \frac{23 \times 133000 \times 3200^3}{648 \times 23500 \times 748140250}$$

$$D = 8.798 \text{ mm}$$

$$\text{TOTAL} = 8.908 \text{ mm}$$

BR2

Akibat beban terbagi rata

$$D = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI} = \frac{5 \times 1,2107 \times 3200^4}{384 \times 23500 \times 542897671,2}$$

$$D = 0.12956551 \text{ mm}$$

Akibat beban P

$$D = \frac{23 \cdot P \cdot L^3}{648 \cdot EI} = \frac{23 \times 133000 \times 3200^3}{648 \times 23500 \times 542897671,2}$$

$$D = 12.125 \text{ mm}$$

TOTAL= 12.254 mm
BR3

Akibat beban terbagi rata

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

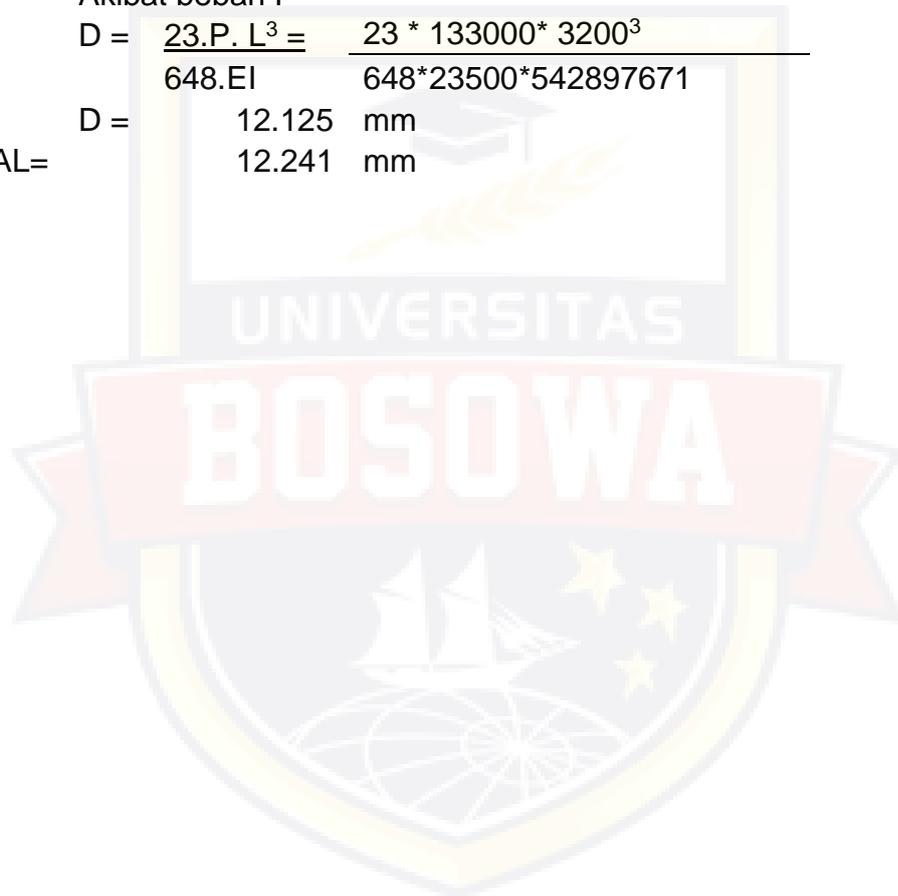
$$D = 0.11698030 \text{ mm}$$

Akibat beban P

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

$$D = 12.125 \text{ mm}$$

TOTAL= 12.241 mm



Dokumentasi



Gambar 1 Proses pembuatan balok beton



Gambar 2 Proses pembuatan balok beton



Gambar 3 Proses pembuatan balok beton



Gambar 4 Proses perawatan balok beton



Gambar 5 Proses pengujian balok beton



Gambar 6 Proses pengujian balok beton



Gambar 7 Proses pengujian balok beton



Gambar 8 Proses pengujian balok beton

