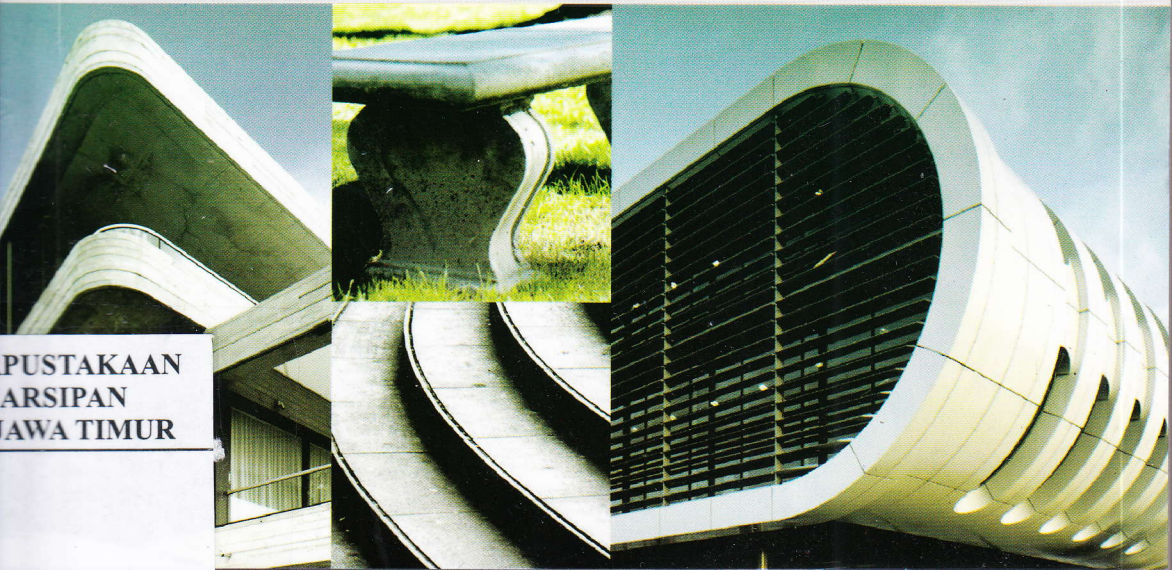




PENERBIT ANDI®

ELEMEN STRUKTUR BETON BERTULANG GEOPOLYMER



PUSTAKAAN
ARSIPAN
JAWA TIMUR

Marthin D. J. Sumajouw
Servie O. Dapas

ELEMEN STRUKTUR BETON BERTULANG GEOPOLYMER

Marthin D. J. Sumajouw

Guru Besar Teknik Sipil pada Fakultas Teknik
Universitas Sam Ratulangi Manado

Servie O. Dapas

Lektor pada Prodi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Sam Ratulangi Manado

PENERBIT ANDI Yogyakarta

Elemen Struktur Beton Bertulang Geopolymer

Oleh: Marthin D.J. Sumajouw & Servie O. Dapas

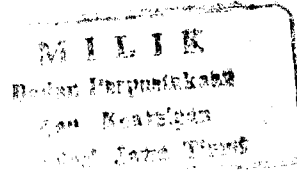
Hak Cipta © 2013 pada Penulis

Editor : Putri Christian

Setting : Alek

Desain Cover : dan_dut

Korektor : Erang Risanto



407.272/BPK/P/2014

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

Penerbit: C.V ANDI OFFSET (Penerbit ANDI)

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax. (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Percetakan: ANDI OFFSET

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax. (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Perpustakaan Nasional: Katalog dalam Terbitan (KDT)

Sumajouw, Marthin D.J.

Elemen Struktur Beton Bertulang Geopolymer/Marthin D.J. Sumajouw & Servie O. Dapas;

– Ed. I. – Yogyakarta: ANDI,

22 21 20 19 18 17 16 15 14 13

x + 146 hlm.; 16 x 23 Cm.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

ISBN: 978 – 979 – 29 – 2300 – 1

I. Judul

1. Reinforced Concrete

2. Dapas, Servie O

DDC'21 : 693.54

PRAKATA

Buku ini menjelaskan tentang penggunaan material pengganti semen sebagai bahan pengikat untuk membuat beton. Dalam hal ini Semen Portland tidak digunakan sama sekali dan diganti seluruhnya (100%) dengan abu terbang untuk membuat beton Geopolymer. Konsekuensi mengganti semen dengan abu terbang harus dipelajari dengan baik terutama menyangkut karakteristik mekanik serta penggunaannya pada elemen struktur beton bertulang seperti balok dan kolom sebelum menggunakannya pada struktur bangunan sesungguhnya.

Penulisan buku ini didasarkan pada beberapa penelitian yang dilakukan oleh kelompok peneliti pada Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil di Curtin University of Technology, Perth Australia. Tim peneliti mempelajari karakteristik mekanik jangka pendek dan jangka panjang. Hal-hal yang dipelajari antara lain efek dari berbagai parameter yang mempengaruhi kuat tekan beton Geopolymer, rangkakan dan susut serta pengaruh lingkungan abrasif terhadap beton Geopolymer, serta penggunaan material beton Geopolymer pada elemen struktur balok dan kolom. Hasil penelitian di atas menunjukkan bahwa beton Geopolymer memiliki kuat tekan yang tinggi, mengalami rangkakan dan susut yang kecil dan tahan terhadap serangan dari sulfat dan lingkungan asam. Peneliti lainnya juga telah melaporkan bahwa beton Geopolymer tahan terhadap reaksi alkali, dan memiliki ketahanan yang baik terhadap kondisi suhu tinggi atau tahan api.

Buku ini ditulis secara khusus agar pembaca dapat mempelajari sifat beton Geopolymer yang digunakan sebagai elemen struktur khususnya pada balok dan kolom beton bertulang. Kinerja dan perilaku lainnya seperti pengaruh geser, torsi dan hubungan antara balok-kolom beton bertulang Geopolymer masih perlu terus diteliti dan hasilnya diverifikasi dengan analisa geser, torsi dan kolom-balok beton bertulang konvensional.

Marthin D. J. Sumajouw

Servie O. Dapas

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	iii
DAFTAR ISI	v
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
BAB 2 LATAR BELAKANG	3
BAB 3 MATERIAL BETON GEOPOLYMER.....	9
3.1 Material Pembentuk Beton Geopolymer	9
1. Abu Terbang (Fly Ash).....	9
2. Cairan Alkalin	10
3. Superplastisizer	10
4. Agregat.....	11
5. Proporsi Campuran	11
3.2 Geopolymer.....	12
3.3 Pasta Geopolymer	14
3.4 Beton Geopolymer	17
3.5 Penggunaan Abu Terbang pada Beton Konvensional	17
3.6 Penggunaan Abu Terbang pada Beton Geopolymer	18

BAB 4 PERILAKU ELEMEN STRUKTUR BETON BERTULANG	21
4.1 Perilaku Balok Beton Bertulang.....	21
1. Lentur pada Balok.....	22
2. Kekuatan Batas Balok Lentur	23
3. Defleksi	26
4. Daktilitas	30
4.2 Perilaku Kolom Beton Bertulang	30
1. Kolom dengan Beban Aksial	30
2. Kolom dengan Kombinasi Gaya Aksial dan Lentur ...	33
3. Kolom Langsing dengan Kombinasi Beban Aksial dan Lentur	34
4. Penyederhanaan Analisa Stabilitas Kolom	36
5. Metode Pembesaran Momen.....	40
6. Tinjauan Penelitian Kolom Langsing	41
a. Rangan, Saunders, dan Seng (1992)	41
b. Basappa, Shetty, dan Rangan (1995)	41
c. Kilpatrick dan Rangan (1999).....	42
d. Lloyd dan Rangan (1996)	42
e. Sarker dan Rangan (2003)	42
BAB 5 PERILAKU ELEMEN STRUKTUR BETON BERTULANG GEOPOLYMER	43
5.1 Pengujian Laboratorium Elemen Struktur Balok dan Kolom.....	43
1. Baja Tulangan	43
a. Balok	43
b. Kolom	44

2. Konfigurasi dan Bentuk Geometri Benda Uji.....	44
a. Balok	44
b. Kolom	46
3. Pembuatan dan Perawatan Benda Uji	47
a. Balok	47
b. Kolom	51
4. Instrumentasi dan Pengujian	53
a. Balok	53
b. Kolom	56
5. Properti Beton Segar	61
5.2 Perilaku Balok Beton Bertulang Geopolymer	62
1. Sifat Umum Balok Bertulang Geopolymer	62
2. Pola Retak dan Keruntuhan.....	64
3. Momen Retak.....	64
4. Kapasitas Lentur	67
5. Defleksi	70
6. Daktilitas	76
5.3 Perilaku Kolom Beton Bertulang Geopolymer	79
1. Sifat Umum Kolom Beton Bertulang Geopolymer.....	79
2. Pola Retak dan Keruntuhan	79
3. Hubungan Beban dan Defleksi.....	81
4. Kapasitas Memikul Beban	85
5. Defleksi Kolom	86
6. Pengaruh Eksentrisitas	86
7. Pengaruh Kuat Tekan.....	87
8. Pengaruh Tulangan Longitudinal.....	88

BAB 6 KORELASI PERILAKU ELEMEN STRUKTUR BETON BERTULANG KONVENSIIONAL DENGAN BETON BERTULANG GEOPOLYMER	91
6.1 Balok Beton Bertulang Geopolymer	91
1. Momen Retak	91
2. Kapasitas Lentur	92
3. Defleksi	94
6.2 Kolom Beton Bertulang Geopolymer.....	95
1. Penyederhanaan Analisa Stabilitas Kolom	95
2. Metode Pembesaran Momen.....	96
3. Perbandingan Beban Runtuh (<i>Comparison of Test to Predicted Failure Load</i>).....	96
DAFTAR PUSTAKA.....	99
LAMPIRAN	107

BAB 1

PENDAHULUAN

Beton geopolymer yang diproduksi dengan menggunakan bahan dasar abu terbang adalah material ramah lingkungan (*environmentally friendly*) dan efisien dalam hal pemanfaatan energi (*energy-efficient*). Jenis beton ini dibuat tanpa menggunakan Semen Portland (SP) sebagai bahan pengikat. Sebagai pengganti Semen Portland digunakan abu terbang yang kaya akan silika dan alumina dicampur dengan cairan alkalin untuk dijadikan bahan pengikat.

Penelitian awal di Curtin University of Technology dilakukan untuk mengetahui properti jangka pendek (*short-term*) dan jangka panjang (*long-term*) dari beton geopolymer. Pengujian dilakukan untuk memahami efek berbagai parameter penting yang mempengaruhi kinerja beton segar (*fresh concrete*) dan kekuatan beton yang telah mengeras (*hardened concrete*). Berbagai data dikumpulkan untuk mengidentifikasi rangkakan (*creep*), susut (*shrinkage*), serta pengaruh sulfat pada beton geopolymer. Dalam penelitian itu ditemukan bahwa material geopolymer memiliki kuat tekan tinggi, mengalami *shrinkage* relatif kecil, *creep* yang cukup rendah, serta menunjukkan ketahanan yang baik terhadap serangan sulfat.

Buku ini lebih banyak menjelaskan hasil penelitian terhadap kinerja dan kekuatan elemen struktur balok dan kolom beton bertulang geopolymer berbahan dasar abu terbang. Bahan dasar tersebut dikombinasikan dengan cairan alkalin untuk menjadi bahan pengikat (*binder*) melalui pengujian

laboratorium dan analisa menurut teori dan provisi dalam standar perencanaan elemen beton bertulang. Pengujian laboratorium termasuk membuat sejumlah benda uji balok dan kolom beton bertulang dalam skala tertentu yang dianggap dapat mewakili kedua elemen struktur tersebut pada aplikasi elemen balok dan kolom untuk struktur bangunan sesungguhnya. Data hasil pengujian yang dikumpulkan berupa pola retak, lenturan/defleksi, daktilitas, kapasitas memikul beban, kurva beban-defleksi, dan model kegagalan benda uji. Analisa dilakukan untuk memprediksi kekuatan batas menggunakan teori dan metode yang saat ini digunakan dalam praktek perhitungan elemen struktur baik menggunakan teori yang lazim digunakan untuk struktur bangunan beton konvensional maupun yang diatur dalam standar perencanaan bangunan beton bertulang seperti dalam provisi AS 3600 dan ACI 318.

Hasil pengujian yang dibandingkan dengan hasil analisa menunjukkan bahwa kinerja dan kekuatan balok dan kolom beton bertulang geopolymer memiliki karakteristik yang sama dengan balok dan kolom terbuat dari beton yang menggunakan Semen Portland sebagai bahan pengikat. Dengan demikian material geopolymer dapat digunakan untuk aplikasi elemen struktur bangunan pada umumnya dengan menggunakan analisa yang terdapat pada standar perencanaan elemen struktur untuk beton Semen Portland.

• BAB 2

LATAR BELAKANG

Beton konvensional terdiri atas Semen Portland (SP), agregat kasar, agregat halus, pasir dan air. Beton jenis ini sangat umum ditemui dan dapat diproduksi secara lokal dengan menggunakan metode sederhana. Beton menjadi material yang sangat penting dan banyak digunakan untuk membangun berbagai infrastruktur seperti jembatan, jalan raya, bendungan dan sarana prasarana perkotaan lainnya. Hal ini menjadikan beton, dilihat dari segi kuantitas, menjadi sebagai material yang paling banyak digunakan manusia setelah air. Menurut Metha (1997) konsumsi dunia untuk beton sekitar 8.8 juta ton setiap tahun, dan kebutuhan material ini akan terus meningkat dari tahun ke tahun sejalan dengan meningkatnya kebutuhan sarana dan prasarana dasar manusia. Dari peningkatan penggunaan material beton, terdapat dua aspek penting yang harus diperhatikan yakni durabilitas (keawetan) material beton itu sendiri dan isu tentang gangguan lingkungan akibat produksi dari Semen Portland.

Beberapa tahun belakangan, durabilitas beton yang terbuat dari Semen Portland menjadi perhatian dari para ahli material konstruksi bangunan. Durabilitas atau keawetan beton dapat didefinisikan sebagai kemampuan untuk bertahan dari pengaruh lingkungan baik secara fisik maupun kimia yang diakibatkan oleh berbagai mekanisme disebabkan kondisi eksternal yang diakibatkan oleh lingkungan atau beban luar yang mengakibatkan terjadinya retakan pada bagian elemen struktur, atau pengaruh kondisi

internal akibat adanya berbagai bahan dan reaksi kimia pada material pembentuk beton itu sendiri. Kondisi demikian dapat mengganggu kemampuan material beton untuk bertahan terhadap lingkungan yang abrasif, reaksi kimia tertentu, atau kondisi lingkungan yang tidak kondusif dan dapat merusak material beton. Kondisi dimaksud seperti lingkungan agresif yang diakibatkan oleh adanya air laut/air garam, lingkungan yang mengandung asam klorida dan asam sulfat yang dapat memicu karbonasi/karatan, reaksi alkalin pada agregat dan sebagainya. Kondisi lingkungan seperti ini dapat merusak material beton yang pada akhirnya mempengaruhi kualitas sarana dan prasarana yang dibangun dengan mahal.

Usaha untuk memperbaiki durabilitas dapat dilakukan melalui penggunaan berbagai jenis bahan tambahan (*additives admixture*) atau *superplastiziser* dengan tujuan menyelesaikan persoalan spesifik dari durabilitas. Penggunaan material ini untuk kondisi tertentu seringkali dapat juga menimbulkan persoalan tersendiri terhadap durabilitas. Pengalaman lapangan pada berbagai struktur beton bangunan modern menunjukkan bahwa penggunaan bahan tambahan atau *superplastiziser* yang tidak sesuai atau melebihi takaran hanya akan menimbulkan kerusakan awal yang tidak diinginkan pada struktur beton itu sendiri (Malhotra dan Ramezani-pour, 1994; Metha, 1997; Metha dan Burrows, 2001).

Selain itu, dalam proses produksi Semen Portland terjadi pelepasan karbon dioksida (CO_2) yang merupakan kontributor utama pada emisi gas rumah kaca di atmosfer. Produksi setiap ton *Clinker* semen mengakibatkan terjadinya pelepasan karbon dioksida (CO_2) sebesar satu ton ke atmosfer. Secara keseluruhan, produksi semen dunia memberikan kontribusi 1,6 juta ton karbon dioksida atau sekitar 7% dari pelepasan CO_2 ke atmosfer (Metha, 2001; Malhotra, 1999; 2002).

Data lain menunjukkan bahwa kebutuhan semen terus meningkat dari waktu ke waktu sebagaimana ditunjukkan oleh Liu dan Chern (2008) bahwa konsumsi beton dunia selama periode 1995-2010 mencapai 10 – 16 juta ton. Pada tahun belakangan ini, konsumsi semen dunia sudah

mencapai angka 2,3 juta ton per tahun yang berarti sekitar 2,3 juta ton CO_2 telah dilepaskan ke atmosfer setiap tahunnya. Penggunaan Semen Portland akan terus meningkat dan setelah tahun 2013 diprediksi akan berada pada angka diatas 3,5 juta ton per tahun.

Untuk mengatasi efek buruk yang merusak lingkungan dan memperbaiki problem durabilitas pada material beton yang menggunakan Semen Portland, maka diperlukan material lainnya sebagai bahan pengganti Semen Portland untuk digunakan pada pembuatan beton. Fakta ini sudah menjadi perhatian dari organisasi-organisasi beton internasional termasuk oleh *The American Concrete Institute - ACI* (Malhotra, 2002).

Banyak jenis material hasil produksi sampingan (*by-product material*) telah digunakan untuk membuat beton diantaranya, *mill scale* (sisa produksi baja), plastik, kaca, abu terbang (*fly-ash*), cangkang kelapa sawit, *blast furnaca slag*, metakaolin, *silica fume*, dan *rice husk ash*. Sebagian besar material hasil produksi sampingan ini dibuang begitu saja di daerah terbuka dan berdampak tidak baik terhadap lingkungan. Abu terbang sebagai contoh, apabila dibuang secara terbuka dapat mengakibatkan pencemaran pada air, tanah, dan udara karena walaupun dalam jumlah sedikit, abu terbang mengandung beberapa elemen beracun seperti arsenik, vanadium, antimony, boron, dan chromium. Salah satu cara agar material hasil produksi sampingan tersebut tidak mengkontaminasi lingkungan adalah dengan menggunakan material tersebut sebagai bahan pengganti sebagian Semen Portland, atau jika memungkinkan mengganti Semen Portland secara keseluruhan dalam membuat beton.

Berbagai usaha telah dilakukan untuk mendapatkan beton yang ramah lingkungan, dan salah satunya adalah mengganti Semen Portland dengan berbagai material hasil produksi sampingan (*by-product material*) dari berbagai industri, yang antara lain menggunakan *fly ash* atau abu terbang (Davidovits, 1994). Untuk kepentingan tersebut, salah satu temuan penting adalah telah dikembangkannya penggunaan abu terbang dengan volume cukup banyak yakni sekitar 60% dicampur dengan Semen

Portland. Jenis beton ini dikenal dengan *High Volume Fly Ash Concrete* (HVFA) yang ternyata memiliki karakteristik mekanik lebih baik terutama menyangkut kinerja durabilitas dibanding dengan beton konvensional (Malhotra, 2002). Usaha lainnya untuk mendapatkan beton ramah lingkungan ialah melalui pengembangan beton dengan menggunakan bahan pengikat anorganik seperti alumina-silikat polymer atau dikenal dengan geopolymer yang merupakan sintesa dari material geologi yang terdapat pada alam atau material hasil produk sampingan industri seperti abu terbang yang kaya akan kandungan silika dan alumina (Davidovits, 1999).

Abu terbang merupakan salah satu material hasil sampingan (*by-product*) industri yang dapat digunakan untuk membuat bahan pengikat (*binders*) pada beton geopolymer. Hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) ini banyak digunakan sebagai bahan tambahan untuk memperbaiki kinerja beton. Karena abu terbang dapat meningkatkan kinerja beton, material ini sudah dikenal secara luas sebagai bahan yang digunakan tersendiri sebagaimana diuraikan pada ASTM C 595, klas F atau C, atau dicampur dengan semen (ASTM C 595 atau C 1157). Abu terbang dikategorikan dalam material “pozzolon” yakni material *siliceous* atau *aluminous* yang didalamnya terdapat sedikit sekali atau tidak sama sekali material *cementious* sebagaimana yang dimiliki Semen Portland. Material abu terbang dapat saja bereaksi secara kimia dengan cairan alkalin pada temperatur tertentu untuk membentuk material campuran yang memiliki sifat seperti semen. Abu terbang memiliki sifat pozzolonik mirip dengan material pozzolon yang secara natural terdapat di alam bebas, seperti pada abu dari gunung api atau material sedimen lainnya (ACI 232.2R-03). Material ini tersedia sangat banyak tapi penggunaannya untuk pembuatan beton masih sangat terbatas. Pada tahun 1988 perkiraan produksi abu terbang melebihi 390 juta ton setiap tahunnya, tapi pemanfaatannya masih kurang dari 15% (Malhotra, 1999). Di Amerika sendiri produksi tahunan abu terbang sekitar 63 juta ton, dan

hanya sekitar 18–20% yang digunakan oleh industri beton (ACI 232.2R-03 2003).

Abu terbang memiliki pengaruh terhadap beton segar (*fresh concrete*) dan beton yang sudah mengeras (*hardened concrete*). Pada beton segar abu terbang dapat memperbaiki *workability*, mengurangi *bleeding*, meningkatkan *pumpability*, memperpanjang *setting-time*, berfungsi sebagai *retarder*, dan *air entrainment*. Pada beton yang sudah mengeras, abu terbang dapat meningkatkan kuat tekan, modulus elastisitas, memperbaiki *creep* dan pengikatan (*bond*), mengurangi peningkatan pada proses hidrasi, tahan terhadap temperatur tinggi, dapat meningkatkan perlindungan terhadap permeabilitas dan karat, mengurangi resiko pengembangan beton akibat reaksi alkali dan silika, meningkatkan *shrinkage*, mengurangi efek *efflorescence*, dan mampu mengurangi pengembangan beton akibat efek magnesia (ACI 232.2R-03 2003). Semua keuntungan tersebut didapat melalui penambahan sejumlah volume tertentu abu terbang pada campuran beton segar yang menggunakan Semen Portland yang pada umumnya ditemukan dipasaran.

Di waktu akan datang, produksi abu terbang akan terus meningkat terutama di negara-negara seperti Cina, India, Amerika dan beberapa negara Eropa. Hanya untuk Cina dan India saja, diperkirakan bahwa pada tahun mendatang produksi abu terbang akan mencapai 780 juta ton per tahun (Malhotra, 2002). Pada saat bersamaan, kebutuhan dan usaha untuk mendapatkan beton ramah lingkungan akan terus meningkat. Sebagai contoh, setiap satu juta ton abu terbang yang digunakan untuk dijadikan bahan pengikat pada beton akan mengurangi penggunaan satu juta ton batu kapur, 0,25 juta ton *coal* dan lebih dari 80 juta unit serbuk. Itupun belum memperhitungkan pengurangan 1,5 juta ton CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer (Bhanumathidas and Kalidas, 2004).

Berdasarkan isu-isu yang disampaikan sebelumnya, dapat dipahami bahwa kebutuhan untuk mendapatkan bahan pengikat (*binder*) alternatif merupakan suatu keharusan.

BAB 3

MATERIAL BETON GEOPOLYMER

3.1 MATERIAL PEMBENTUK BETON GEOPOLYMER

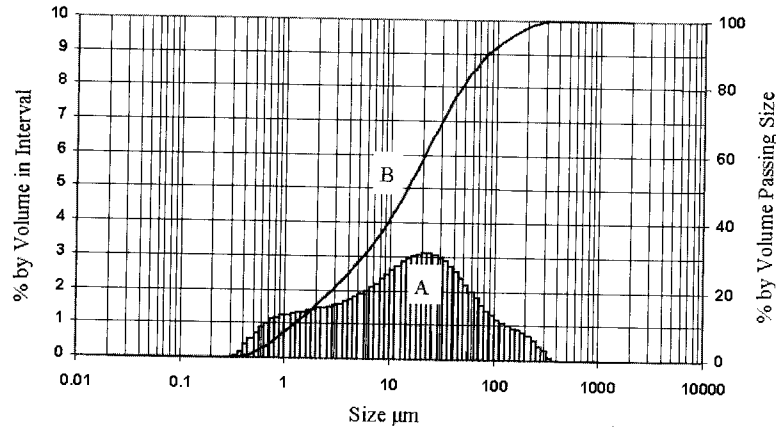
1. Abu Terbang (Fly Ash)

Beton geopolymer dibuat dengan menggunakan bahan dasar abu terbang rendah kalsium (*low-calcium fly ash*) yang menurut kategori ASTM berada pada klas F. Komposisi kimia sebagaimana diperoleh melalui test X-Ray Fluorescence (XRF) dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Komposisi kimia Abu Terbang (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	H ₂ O	LOI ^{*)}
48.0	29.0	12.7	1.76	0.39	0.55	1.67	0.89	1.69	0.5	-	1.61

^{*)}Loss on ignition



Gambar 3.1 Distribusi ukuran partikel Abu Terbang

Distribusi ukuran partikel abu terbang dapat dilihat pada Gambar 3.1 yang menunjukkan grafik A sebagai distribusi volume dalam persen, dan grafik B menunjukkan distribusi ukuran dalam persen dari volume kumulatif (*passing size*).

2. Cairan Alkalin

Kombinasi cairan sodium silikat dan sodium hidroksida digunakan untuk membantu terjadinya reaksi kimia dengan aluminium dan silika yang terdapat pada abu terbang. Cairan sodium silikat terdiri atas $\text{Na}_2\text{O} = 14,7\%$, $\text{SiO}_2 = 29,4\%$, and air = $55,9\%$ terhadap berat cairan. Sodium hidroksida dengan tingkat kemurnian komersial 97% berbentuk *pellets* dicairkan dengan menggunakan air. Konsentrasi cairan sodium hidroksida sekitar 14 molar. Melalui pemeriksaan laboratorium cairan ini memiliki 40,4% sodium hidroksida dan 50,6% air dengan perbandingan berat. Cairan alkalin dicampur satu hari sebelum cairan itu digunakan.

3. Superplastisizer

Untuk meningkatkan workabilitas dari beton segar (*fresh concrete*) digunakan *superplasticiser sulphonated-naphthalene*.

4. Agregat

Tiga jenis agregat yakni ukuran 10mm, 7mm dan pasir digunakan pada beton geopolymer. Semua agregat dalam kondisi *saturated surface dry* (SSD), dan disiapkan sesuai dengan Standar Australia AS 1141.5-2000 dan AS 1141.6-2000.

Kombinasi batu pecah sesuai dengan Standar British BS 882:1992. Modulus kehalusan (*finess modulus*) dari kombinasi batu pecah adalah 4,5. Tabel 3.2 menunjukkan kombinasi batu pecah yang digunakan.

Tabel 3.2 Kombinasi batu pecah

No. Saringan	Agregat			Kombinasi ^{*)}	BS 882:1992
	10mm	7mm	Pasir Halus		
14	100	100	100	100.00	100
10	74.86	99.9	100	92.42	95-100
5	9.32	20.1	100	44.83	30-65
2.36	3.68	3.66	100	37.39	20-50
1.18	2.08	2.05	99.99	36.34	15-40
No. 600	1.47	1.52	79.58	28.83	10-30
No. 300	1.01	1.08	16.53	6.47	5-15
No. 150	0.55	0.62	1.11	0.77	0-18

^{*)} 30% (10 mm) + 35% (7 mm) + 35% (pasir halus)

5. Proporsi Campuran

Proporsi campuran yang digunakan dalam tulisan ini diambil dari hasil penelitian oleh Hardjito *et al.* (2002; 2004b). Beberapa campuran percobaan (*trial-mix*) dibuat dan dicoba kekuatannya untuk memastikan konsistensi hasilnya sebelum membuat *specimen* atau contoh benda uji sesungguhnya. Tiga kelompok balok berbeda yang diberi nama GBI, GBII, dan GBIII dengan *mix-design* rencana kuat tekan berturut-turut 40, 50, dan 75 MPa. Detail dari campuran dapat dilihat pada Tabel 3.3. Dari

ketiga campuran berbeda tersebut dengan jelas ditunjukkan melalui penambahan jumlah air yang berbeda.

Tabel 3.3 Proporsi campuran beton geopolymer untuk balok

Material	Berat (kg/m ³)
10mm batu pecah	550
7mm batu pecah	640
Pasir halus	640
Abu Terbang	404
Cairan Sodium Hidroksida	41 (14M)
Cairan Sodium Silikat	102
Superplasticizer	6
Tambahan Air	25.5 (GBI), 17.0 (GBII), 13.5(GBIII)

3.2 GEOPOLYMER

Terminologi geopolymer pertama kali digunakan oleh Profesor Davidovits pada tahun 1978 (Davidovits, 1988) untuk menjelaskan tentang mineral polymer yang dihasilkan melalui geochemistry. Geopolymer adalah bentuk anorganik alumina-silika yang disintesa melalui material banyak mengandung Silika (Si) dan Alumina (Al) yang berasal dari alam atau dari material hasil sampingan industri. Komposisi kimia material geopolymer serupa dengan Zeolit, tetapi memiliki mikrostruktur *amorphous* (Davidovits, 1999). Selama proses sintesa, atom Silika dan Alumina menyatu dan membentuk blok yang secara kimia memiliki struktur yang mirip dengan batuan alam.

Prefiks "geo" mengacu pada material pengikat berasal dari alam seperti batuan dan mineral lainnya. Material sejenis telah diteliti oleh Glukhovsky (1950an) yang lebih dikenal dengan Semen Tanah (*soil cement*). Berbagai peneliti menggunakan nama berbeda untuk material yang memiliki kesamaan secara fisik. Perbedaan nama lebih disebabkan oleh jenis material dasar yang digunakan dan bukan pada jenis reaksi kimia.

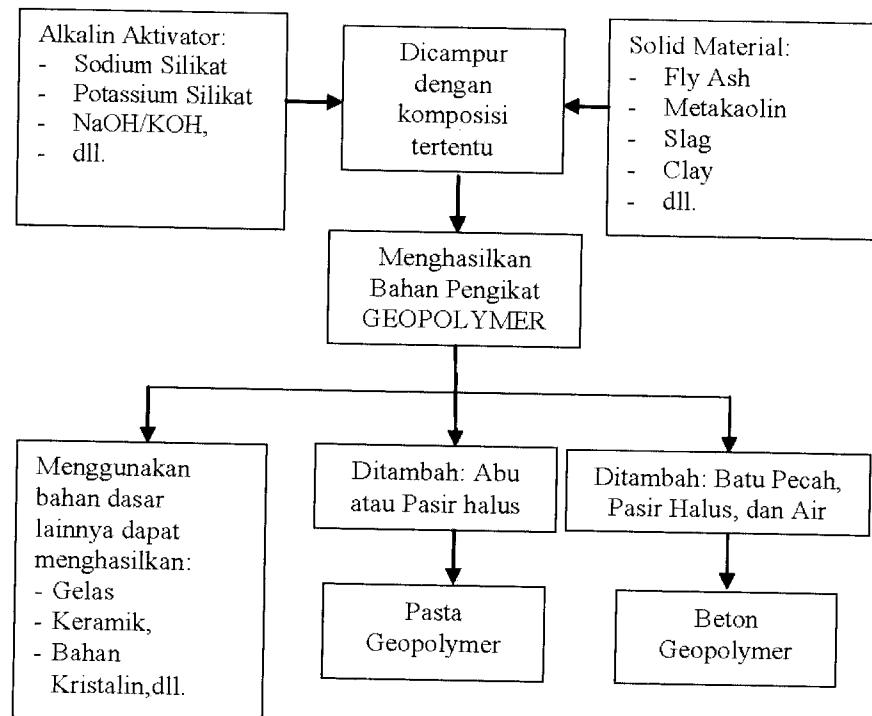
Geopolymer pada awalnya lebih dikenal berdasarkan reaksi kimia, sebagai *alkaline-activated binders*, dengan beberapa terminologi yang sesuai dengan penggunaan material ini seperti *low temperature inorganic polymer glasses*, *alkali-bonded ceramic*, *chemically bounded ceramic*, atau *alkali-activated ash*. Dalam perkembangan selanjutnya, apapun bahan dasar pembentuk material ini, terminologi geopolymer sudah sangat luas digunakan untuk merujuk pada material ini.

Bahan pengikat geopolymer adalah sistem anorganik 2-komponen yang terdiri atas:

Komponen solid yang memiliki SiO₂ dan Al₂O₃ dalam jumlah yang cukup untuk bisa bersenyawa (seperti abu terbang, pozzolon, slag dll).

Cairan alkalin sebagai komponen aktivator yang memiliki alkali hidroksida, silika, alumina, carbon dan sulfat atau kombinasi keduanya.

Pada saat komponen solid dan komponen aktivator dicampur, maka terjadi proses pengerasan yang disebabkan oleh terbentuknya *aluminosilicate network* yang bervariasi antara *amorphous* dan *crystalline*. Gambar 3.2 mengilustrasikan proses terbentuknya geopolymer untuk berbagai aplikasi.



Gambar 3.2 Proses terbentuknya Geopolymer

3.3 PASTA GEOPOLYMER

Hampir semua literatur tentang material ini pada umumnya membahas pasta geopolymer. Davidovits dan Sawyer (1985) menggunakan *furnace slag* untuk membuat pasta geopolymer. Pasta pengikat jenis ini telah dipatenkan di Amerika dengan judul *Early High-Strength Mineral Polymer* dan digunakan secara luas sebagai bahan tambahan pada jenis beton *precast*. Selain itu, jenis lain yang sudah digunakan adalah mortar siap pakai yang dalam penggunaannya hanya perlu tambahan air untuk menghasilkan pasta beton memiliki durabilitas tinggi dan kuat tekan yang tinggi dengan *setting-time* yang singkat. Material jenis ini biasanya digunakan pada bangunan yang direstorasi atau pada struktur bangunan di

bandar udara, jalan, jembatan dan bangunan infrastruktur lainnya yang memerlukan kuat tekan awal tinggi (*high early strength concrete*).

Geopolymer juga telah digunakan untuk mengganti polymer organik sebagai adesif pada perkuatan elemen struktur. Material jenis ini telah diteliti oleh Balaguru, Kurtz, and Rudolph (Balaguru *et al.*, 1997) dan menunjukkan ketahanan yang baik terhadap cahaya UV bahkan tahan terhadap api. Perbandingan bahan dasar Si-Al akan mempengaruhi karakteristik geopolymer sebagaimana pada tabel di bawah ini.

Tabel 3.4 Penggunaan geopolymer berdasarkan perbandingan Si-Al

Rasio Si-Al	Karakteristik/Aplikasi
1 : 1	Kaku, kurang baik untuk adesif: Bata dan Keramik
2 : 1	Semen Beton: <i>Waste encapsulation</i>
3 : 1	Kurang kaku, Cetakan (Foundry moulds): Tahan Api
> 3 : 1	<i>Sealants and Adhesives (resin-like)</i>
> 20 : 1 < 35 : 1	Bahan tahan panas/api: Serat Karbon Komposit

van Jaarsveld, van Deventer, and Schwartzman (1999) meneliti pasta geopolymer dengan menggunakan dua jenis abu terbang. Hasil penelitiannya menunjukkan kuat tekan setelah 14 hari sebesar 5 – 51 MPa. Beberapa faktor yang mempengaruhi kuat tekan adalah proses pencampuran dan komposisi kimia dari abu terbang. Kandungan CaO yang tinggi akan menurunkan porositas mikrostruktur material yang mengakibatkan peningkatan kuat tekan. Disamping itu, perbandingan air terhadap abu terbang juga mempengaruhi kuat tekan. Dalam penelitian tersebut juga ditunjukkan bahwa penurunan rasio air terhadap abu terbang dapat meningkatkan kuat tekan pasta geopolymer.

Palomo, Grutzeck, and Blanco (1999) meneliti pengaruh suhu perawatan (*curing temperature*), lama perawatan (*curing time*), dan perbandingan antara cairan alkalin dengan abu terbang terhadap kinerja dan kekuatan tekan pasta geopolymer. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa baik

temperatur maupun waktu perawatan mempengaruhi kuat tekan. Penggunaan cairan sodium hidroksida (NaOH) yang dicampur dengan sodium silikat (Na_2Si_3) menghasilkan kuat tekan tinggi yang dapat mencapai 60 MPa pada temperatur 85°C dengan lama perawatan selama 5 (lima) jam.

Xu dan van Deventer (2000) melakukan investigasi terhadap material pasta geopolymer untuk 15 jenis bahan mineral yang memiliki kandungan Al-Si. Mereka menemukan bahwa mineral dengan disolusi tinggi memberikan hasil kuat tekan tinggi setelah terjadi proses polymerisasi. Kandungan kalsium oksida (CaO), potassium oksida (K_2O), dan molar rasio dari Si/Al memiliki pengaruh penting pada kuat tekan pasta beton geopolymer.

Swanepoel and Strydom (2002) meneliti material pasta geopolymer dengan bahan dasar abu terbang, kaolin, cairan sodium silika, NaOH dan air. Baik waktu perawatan maupun temperatur perawatan memberikan pengaruh kepada kuat tekan, dan nilai optimum kuat tekan diperoleh pada waktu temperatur 60°C selama waktu perawatan 48 jam.

van Jaarsveld, van Deventer and Lukey (2002) mempelajari interelasi berbagai parameter yang mempengaruhi karakteristik material pasta geopolymer dengan bahan dasar abu terbang. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa properti dari material geopolymer dipengaruhi oleh proses disolusi material yang terjadi saat geopolymerisasi. Kandungan air, waktu perawatan, dan temperatur perawatan terhadap beton segar memberikan pengaruh terhadap karakteristik material geopolymer. Khusus untuk temperatur perawatan dan waktu perawatan sangat mempengaruhi kuat tekan pasta geopolymer. Pada temperatur 70°C dengan lama perawatan 24 jam terjadi peningkatan berarti pada kuat tekan pasta geopolymer, akan tetapi perawatan yang lebih lama hanya akan menurunkan kuat tekan saja.

3.4 BETON GEOPOLYMER

Beton geopolymer dibuat tanpa menggunakan semen sebagai bahan pengikat, dan sebagai pengganti digunakan abu terbang yang kaya akan Silikon (Si) dan Alumina (Al) yang dapat bereaksi dengan cairan alkalin untuk menghasilkan bahan pengikat (*binder*). Dalam buku ini, jenis abu terbang yang digunakan adalah abu terbang rendah kalsium (*low-calcium fly ash* - ASTM Class F) sebagai bahan dasar. Silika dan Alumina yang terdapat dalam abu terbang akan bereaksi dengan bantuan cairan sodium hidroksida dan sodium silikat untuk mengikat agregat, pasir dan material lainnya menjadi beton geopolymer. Informasi tentang beton jenis ini masih sangat terbatas mengingat studi dan laporan hasil penelitian belum banyak dipublikasikan.

3.5 PENGGUNAAN ABU TERBANG PADA BETON KONVENSIONAL

Abu terbang sudah digunakan sebagai material tambahan untuk semen dengan porsi tertentu (*partial replacement*) pada beton. Temuan penting yang pernah diperoleh sebagai material pengganti semen dikenal dengan *high volume fly ash (HVFA) concrete* yang menggunakan sampai 60% abu terbang, dan menghasilkan beton memiliki karakteristik mekanik yang baik terutama menyangkut kinerja durabilitas/keawetan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton HVFA memiliki durabilitas lebih baik dibanding dengan beton pada umumnya yang menggunakan Semen Portland sebagai bahan pengikat (Malhotra, 2002). Penggunaan abu terbang pada beton tidak saja memberikan keuntungan pada lingkungan tapi juga meningkatkan kinerja dan kualitas beton itu sendiri.

Di Montana State University, Amerika terdapat kelompok peneliti yang telah membuat beton dengan bahan pengikat 100% abu terbang tapi dengan jenis high-calcium (ASTM Class C). Perlengkapan *Ready-Mix* yang biasanya digunakan untuk produksi beton konvensional telah digunakan untuk pembuatan beton jenis ini. Percobaan di lapangan telah

dilakukan mulai dari pencampuran, transportasi, penuangan dan *finishing* dengan cara beton konvensional (Cross *et al.*, 2005).

3.6 PENGGUNAAN ABU TERBANG PADA BETON GEOPOLYMER

Penelitian tentang elemen struktur beton bertulang geopolymer masih sangat terbatas. Palomo *et al.* (2004) meneliti karakteristik mekanik geopolymer yang terbuat dari bahan dasar abu terbang. Dengan menggunakan benda uji berbentuk bantalan kereta api yang walaupun jumlahnya sangat terbatas, hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik mekanik sangat bergantung pada metode perawatan beton segar (temperatur dan lama perawatan). Penelitian lainnya yang terkait dengan aplikasi struktur beton geopolymer dilakukan oleh Brooke *et al.* (2005). Dilaporkan bahwa kinerja sambungan kolom-balok beton geopolymer mirip dengan elemen struktur yang sama tapi terbuat dari beton yang menggunakan Semen Portland sebagai bahan pengikatnya.

Kebutuhan untuk memahami perilaku beton geopolymer mulai dari kinerja beton segar, beton yang sudah mengeras, sampai aplikasi pada elemen struktur terus dilakukan oleh beberapa kelompok peneliti. Tahun 2001 di Curtin University of Technology dilakukan penelitian komprehensif yang mencakup mix-disain beton geopolymer, properti jangka pendek beton segar geopolymer, dan properti jangka panjang seperti rangkai, susut, ekspose terhadap serangan sulfat, dan kinerja serta kekuatan elemen struktur seperti balok dan kolom.

Hardjito *et al.* (2002) mempelajari properti mekanik dari beton geopolymer dengan bahan dasar abu terbang. Hasil studi menunjukkan bahwa sifat mekanik beton jenis ini sangat dipengaruhi oleh waktu perawatan dan temperatur perawatan terhadap beton segar. Berbagai jenis parameter yang mempengaruhi kekuatan tekan beton juga telah dipelajari (Hardjito *et al.* 2004a; 2004b). Telah dibuktikan juga bahwa *elastic constants*, dan hubungan tegangan-regangan beton geopolymer sama dengan beton

terbuat dari Semen Portland (Hardjito *et al.* 2004c). Hal lainnya yang dapat dijelaskan bahwa material ini memiliki kekuatan tekan tinggi, nilai *shrinkage* rendah, dan nilai *creep* relatif rendah, serta menunjukkan resistensi/ketahanan terhadap asam sulfat (Walloh *et al.* 2005a; 2005b). Pada bagian lanjut dari buku ini akan menjelaskan sifat mekanik dan perilaku dari elemen struktur balok dan kolom beton bertulang geopolymer dengan abu terbang sebagai bahan dasarnya (Sumajouw *et al.* 2006; 2005a; 2005b; 2005c; 2005d; 2004a).

BAB 4

PERILAKU ELEMEN STRUKTUR BETON BERTULANG

4.1 PERILAKU BALOK BETON BERTULANG

Struktur yang memikul beban, apakah beban gravitasi atau berbagai bentuk beban lainnya seperti beban mati yang diakibatkan oleh berat sendiri struktur, atau beban akibat angin, gempa bumi, perubahan temperatur, dan jenis beban lainnya dapat mengakibatkan terjadinya perubahan geometri struktur seperti lenturan, deformasi, sampai pada instabilitas elemen struktur pada sistem struktur secara keseluruhan. Elemen balok sebagai bagian dari sistem struktur, lenturan dapat saja terjadi karena deformasi yang diakibatkan adanya pembebanan pada elemen balok tersebut. Peningkatan beban secara terus menerus pada balok mengakibatkan regangan deformasi dan tegangan lentur yang terus meningkat sejalan dengan kedudukan beban luar tersebut, yang pada akhirnya dapat menggagalkan kinerja balok memikul beban saat kapasitas penampang terlampaui akibat peningkatan beban luar tersebut. Untuk inilah maka penampang balok harus direncanakan sedemikian rupa agar memiliki keamanan dan kekuatan untuk memikul beban luar yang direncanakan, serta menahan tegangan lentur tanpa terjadi keruntuhan.

Demikian halnya dengan perencanaan penampang balok beton bertulang yang harus memiliki kekuatan lentur dan daktilitas yang cukup pada kondisi beban batas. Disamping itu, balok beton bertulang tidak mengalami defleksi berlebihan atau retakan yang timbul pada saat memikul beban layan.

1. Lentur pada Balok

Teori lentur pada balok didasarkan pada asumsi (Nawy, 2003):

- Regangan terdistribusi secara linier pada penampang balok. Asumsi ini didasarkan pada prinsip dari Bernoulli's yang menyatakan bahwa penampang balok tetap berada pada kedudukan tegak lurus terhadap garis netral penampang sebelum dan sesudah terjadi lenturan pada balok tersebut.
- Regangan baja adalah sama pada semua penampang baja sebelum terjadi retak pada permukaan balok beton atau terjadi leleh pada tulangan baja.
- Beton lemah memikul beban tarik, sebagai konsekuensinya maka kekuatan tarik penampang beton diabaikan dalam melakukan analisa, dan tulangan tarik memikul semua gaya tarik pada elemen balok.

Asumsi pertama sudah ada sejak teori lentur pada balok dikembangkan. Regangan arah memanjang beton dan tulangan baja untuk semua tingkat pembebanan pada penampang balok adalah proporsional terhadap jarak ke garis netral. Asumsi kedua diperlukan untuk menyatakan beton dan tulangan baja bekerja secara satu kesatuan untuk memikul beban. Hal ini menegaskan bahwa terjadi lekatan yang sempurna antara material beton dan baja tulangan. Asumsi ketiga ditetapkan untuk kepentingan disain dan merujuk pada simplifikasi persoalan sebenarnya. Retakan awal yang terjadi saat pembebanan sebesar 1/10 dari nilai kuat tekan beton. Dengan demikian penampang beton yang berada pada zona tertarik diabaikan,

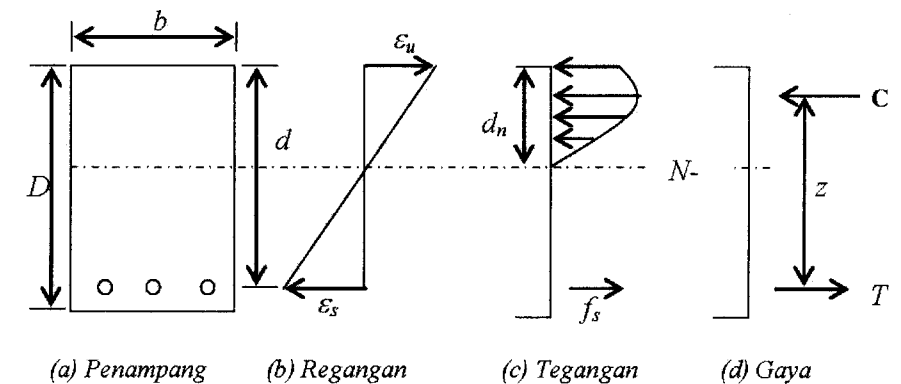
dan tulangan tarik diasumsikan memikul tegangan tarik secara keseluruhan.

2. Kekuatan Batas Balok Lentur

Dua asumsi ditetapkan untuk menurunkan teori prediksi terhadap kekuatan lentur penampang balok beton bertulang (Park and Paulay, 1975):

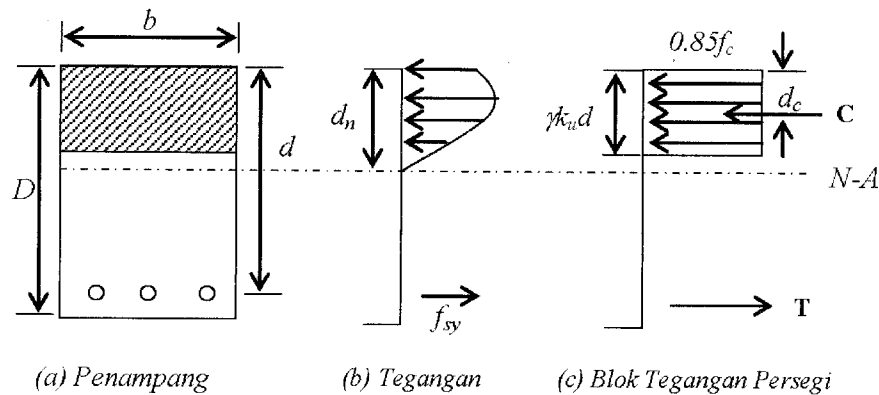
- Kurva tegangan-regangan tulangan baja harus diketahui.
- Kurva tegangan-regangan beton pada zona tertekan termasuk kedudukan (*magnitude*) dan posisinya harus diketahui.

Puncak kurva regangan tekan beton, ϵ_u , yang diperoleh melalui pengujian balok beton bertulang, kolom yang dibebani secara eksentris, dan prisma pasta beton dibebani eksentris, menunjuk nilai sekitar 0,003 (Mattock *et al.* 1961, Wang *et al.* 1978, Domingo *et al.* 1985). Nilai ini sudah diterima dan digunakan secara umum, dan diadopsi oleh berbagai standar perencanaan beton bertulang di banyak negara. Standar Australia AS 3600 juga mengadopsi nilai tersebut sebagaimana ditulis oleh Warner *et al.* (1998). Diagram tegangan-regangan untuk balok persegi dengan perencanaan *under-reinforced* pada lentur murni ditunjukkan pada Gambar 4.1 (Warner *et al.* 1998).



Gambar 4.1 Distribusi tegangan-regangan balok persegi

Kurva tegangan-regangan beton dapat diasumsikan sebagai garis parabola, dapat juga berbentuk persegi, trapesium atau bentuk apa saja. Untuk kebutuhan perencanaan sebuah alternatif kurva tegangan-regangan diusulkan oleh (Whitney 1940, Mattock *et al.* 1961) dalam bentuk geometri sederhana yang dikenal dengan diagram blok tegangan persegi. Konsep ini sangat luas digunakan pada berbagai negara dan AS 3600 sebagaimana ditulis Warner *et al.* (1998) juga mengimplementasi teori ini. Diagram blok tegangan persegi selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Blok tegangan persegi ekuivalen

Agar terjadi keseimbangan dari semua gaya horisontal pada penampang, gaya tekan C pada penampang beton dan gaya tarik T pada penampang baja harus dalam keadaan seimbang, sehingga dapat ditulis:

$$C = T \dots\dots\dots (4.1)$$

Kedudukan dan letak gaya tekan C ditunjukkan oleh parameter tunggal γ . Distribusi tegangan non-linier yang ditunjukkan melalui Gambar 4.2 (b) diganti dengan tegangan merata yang kedudukannya ditunjukkan oleh $0.85 f_c'$ (Gambar 4.2.(c)). Nilai tersebut didapat melalui penelitian pengaruh beban menerus (*sustained loads*) pada kekuatan beton (Rusch, 1960), dan telah diterima secara luas dalam praktek perencanaan bangunan beton bertulang. Dengan demikian resultan gaya tekan dapat ditulis:

$$C' = 0.85 f_c' \gamma b d_n \dots\dots\dots (4.2)$$

Nilai γ untuk beton dengan berat normal (dengan f_c' lebih kecil 50 Mpa) oleh standar AS 3600 diusulkan:

$$\gamma = 0.85 - 0.007 f_c' - 28 \dots\dots\dots (4.3)$$

dengan batasan:

$$0.65 \leq \gamma \leq 0.85$$

Batas atas 0,85 dapat digunakan jika $f_c' = 28$ MPa. Nilai γ hanya dibatasi sampai pada kuat tekan beton sebesar 50 MPa. Untuk beton yang memiliki kekuatan lebih dari 50 MPa, tegangan rata-rata dari blok tegangan ekuivalen harus lebih kecil $0.85 f_c'$. Untuk beton dengan kekuatan tekan lebih besar dari 50 MPa harus menggunakan nilai:

$$\gamma = 0.85 - 0.008 f_c' - 30 \dots\dots\dots (4.4)$$

$\alpha f_c'$ adalah kedudukan dari tegangan *uniform*, dimana:

$$\alpha = 0.85 - 0.004 f_c' - 55 \dots\dots\dots (4.5)$$

Dengan menggunakan semua parameter diatas, persamaan untuk menghitung kapasitas momen, M_u , pada balok persegi dengan tulangan tarik saja (*singly reinforcement beam*) dapat di tulis seperti berikut ini:

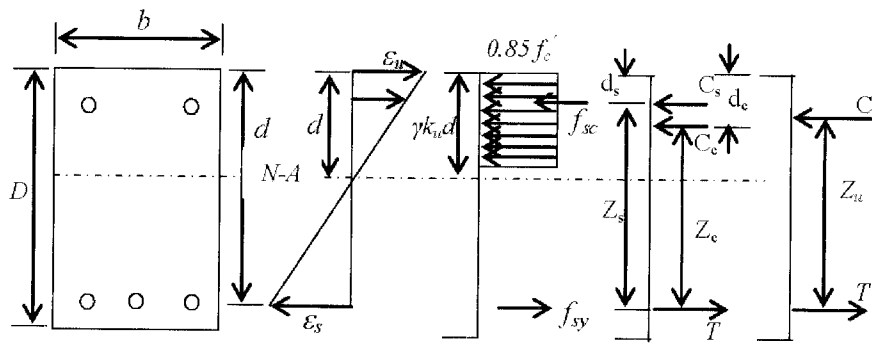
$$M_u = 0.85 f_c' \gamma k_u (1 - 0.5 \gamma k_u) b d^2 \dots\dots\dots (4.6)$$

dimana:

- f_c' = Kuat tekan beton
- γ = Rasio tinggi penampang blok tegangan tekan persegi d_n saat momen ultimate M_u
- $k_u = \frac{d_n}{d}$ Parameter garis netral

- b = lebar penampang persegi
- d = kedalaman/jarak resultante gaya tekan ke tepi luar serat tertekan

Untuk menghitung kapasitas lentur balok yang terdapat tulangan tekan (*doubly reinforcement beam*), gaya tekan beton (C_c) dan gaya tekan tulangan baja (C_s) dihitung secara tersendiri. Diagram tegangan-regangan untuk balok dengan tulangan ganda dengan memikul lentur murni ditunjukkan melalui Gambar 4.3 (Warner *et al.* 1998).



(a) Penampang (b) Regangan (c) Tegangan (d) Gaya

Gambar 4.3 Distribusi tegangan-regangan balok tulangan ganda

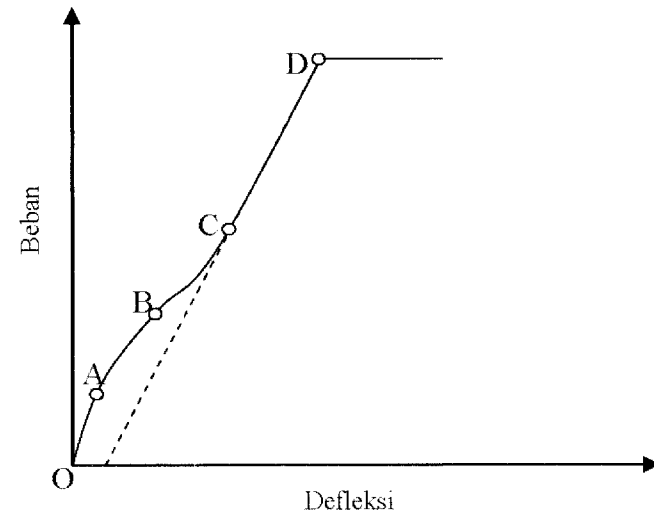
Persamaan untuk menghitung kapasitas momen dengan tinjauan pada permukaan balok yang tertekan dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_u = T_s d_{st} - C_c d_c - C_s d_{sc} \dots\dots\dots (4.7)$$

3. Defleksi

Kurva beban-defleksi pada tengah bentang balok ditunjukkan melalui Gambar 4.4 (Warner *et al.* 1998). Awalnya balok sangat kaku dan tidak terdapat retakan sedikitpun. Kurva beban-defleksi (daerah O-A) digambarkan dengan garis lurus yang mengartikan penampang dalam kondisi elastis penuh (*full elastic behaviour*). Selanjutnya, dengan meningkatnya

beban pada balok tersebut, retak-retak terjadi pada tepi permukaan balok yang tertarik dimana hal ini menunjukkan momen retak sudah dilampaui. Retak akan terus bertambah di sepanjang balok pada daerah yang tertarik sejalan dengan peningkatan beban, dan hal ini ditunjukkan oleh titik A-B. Selanjutnya, pada bagian ini terjadi sedikit penurunan garis A-B ke garis B-C yang disebabkan oleh semakin banyaknya jumlah retakan dan semakin lebarnya retak awal. Hal ini merupakan konsekuensi adanya peningkatan beban pada balok yang akan mempengaruhi penurunan kekakuan pada balok. Jika beban terus ditingkatkan, retak akan semakin menyebar mengakibatkan kurva beban-defleksi semakin landai. Pada akhirnya tulangan baja akan meleleh (D) yang digambarkan melalui penambahan defleksi yang cukup besar tanpa terjadi peningkatan beban.



Gambar 4.4 Kurva Beban-Defleksi

Defleksi pada balok dapat dihitung dengan menggunakan kurvatur (κ) yang terjadi sepanjang balok. Untuk balok elastis, kurvatur dihitung dari kekakuan lentur (EI) dan Momen (M_x):

$$\kappa_x = \frac{M_x}{EI_x} \dots\dots\dots (4.8)$$

Untuk mengetahui hubungan beban-defleksi pada Gambar 4.4, perbedaan nilai EI perlu dipertimbangkan. Sampai pada retak awal, momen inersia I_g masih berlaku dan digunakan dalam perhitungan. Setelah terjadi retak, kekakuan lentur dihitung menggunakan inersia momen retak yang lebih kecil dari nilai EI sebelum terjadi retak. Dengan demikian, nilai EI sepanjang balok bervariasi mulai dari nilai sebelum retak dimana momen lentur lebih kecil atau sama dengan momen retak (M_{cr}) sampai pada saat terjadinya retak parsial pada balok. Karena adanya pengaruh beton pada daerah tarik di antara retakan, maka pengaruh kekakuan tarik (*tension stiffening*) harus dipertimbangkan dalam menghitung kekakuan.

Branson (1963) mengembangkan persamaan sederhana untuk mengakomodasi transisi dari I_g ke I_r termasuk pengaruh *tension stiffening* untuk menghitung momen inersia efektif, I_{ef} . Pada AS 3600 (2005) dan berbagai standar menggunakan persamaan ini sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 4.9.

$$I_{ef} = I_{cr} + I_g - I_{cr} \left[\frac{M_{cr}}{M_s} \right]^3 \leq I_g \dots\dots\dots (4.9)$$

Pada Persamaan 4.9, untuk balok beton bertulang persegi, hal-hal di bawah ini berlaku:

$$I_g = \frac{bD^3}{12} ; \text{Luas momen inersia kotor dari penampang balok pada titik pusat penampang}$$

$$I_{cr} = \frac{1}{3}bd_n^3 + (n-1)A_{sc}(d_n - d_{sc})^2 + nA_{st}(d_{st} - d_n)^2 ; \text{Momen inersia dari penampang balok persegi saat terjadi retak.}$$

M_s = Momen lentur maksimum penampang

M_{cr} = Momen retak:

Perhitungan terhadap moment retak dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$M_{cr} = Z f_{cf}' - f_{cs} \dot{\geq} 0.0 \dots\dots\dots (4.10)$$

Dimana:

Z = Section modulus dari penampang sebelum retak, mengacu pada retak yang terjadi pada permukaan terluar penampang.

f_{cf}' = Kuat tarik lentur dari beton

f_{cs} = Shrinkage maksimum disebabkan oleh tegangan tarik pada penampang sebelum retak yang terjadi pada permukaan terluar penampang. Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang lebih akurat, f_{cs} dapat diambil sebesar :

$$\left(\frac{2.5 p_w}{1 + 50 p_w} E_s \epsilon_{cs} \right)$$

$$p_w = \text{Rasio tulangan} = \frac{A_{st}}{bd}$$

ϵ_{cs} = Regangan shrinkage

E_s = Modulus elastisitas tulangan baja

Defleksi yang terjadi pada balok dapat dihitung dengan mengintegrasikan Persamaan 4.9 kedalam persamaan defleksi elastis untuk balok diatas dua perletakan sederhana. Persamaan untuk menghitung defleksi balok selanjutnya dapat diekspresikan sebagai berikut:

$$\Delta_s = \frac{P/2}{24E_c I_{ef}} \frac{a}{3L^2 - 4a^2} \dots\dots\dots (4.11)$$

dimana:

Δ_s = lenturan dimana beban P berada

P = beban total

- A = Jarak geser (shear span)
- L = Bentangan balok
- E_c = Modulus elastisitas beton
- I_{ef} = Momen Inersia (sebagaimana Persamaan 4.9)

4. Daktilitas

Daktilitas diartikan sebagai kemampuan dari balok untuk memikul deformasi setelah tulangan tarik meleleh. Daktilitas balok beton bertulang dapat dinyatakan melalui daktilitas penampang atau daktilitas defleksi.

Pengukuran secara kuantitatif dari daktilitas balok (μ_d) dapat dihitung dari rasio antara defleksi maksimum (Δ_u) terhadap defleksi leleh (Δ_y) yang diekspresikan melalui Persamaan 4.12.

$$\mu_d = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \dots\dots\dots (4.12)$$

Momen leleh M_y dapat dihitung dengan menggunakan teori balok elastis (Warner et al. 1998) sebagaimana Persamaan 4.13.

$$M_y = \frac{f_y I_{cr}}{n(d - d_n)} \dots\dots\dots (4.13)$$

4.2 PERILAKU KOLOM BETON BERTULANG

1. Kolom dengan Beban Aksial

Gambar 4.5 menunjukkan kolom simetris yang memikul beban P secara aksial. Beton dan tulangan memanjang dianggap terjadi lekatan sempurna dalam satu kesatuan maka regangan longitudinal terjadi merata sepanjang penampang kolom sehingga regangan yang terjadi pada beton sama dengan regangan pada tulangan baja ($\epsilon_c = \epsilon_s$).

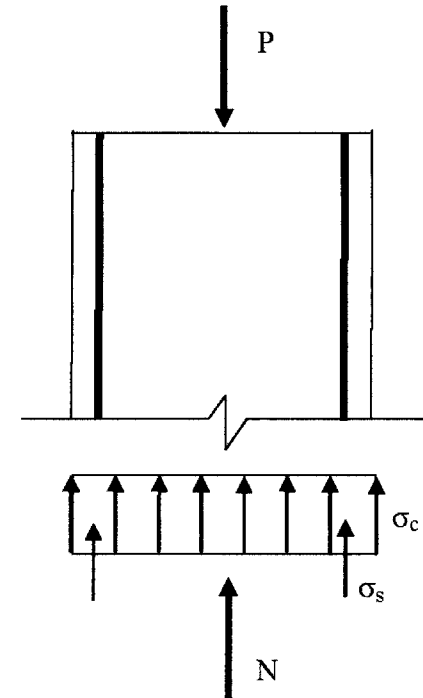
Kemampuan kolom menerima gaya aksial pada kolom pendek beton bertulang diperoleh dengan menjumlahkan kekuatan beton dan tulangan (Warner *et al.* 1998).

Gaya pada beton sebesar:

$$N_c = \sigma_c A_c \dots\dots\dots (4.14)$$

Gaya pada tulangan sebesar

$$N_s = \sigma_s A_s \dots\dots\dots (4.15)$$



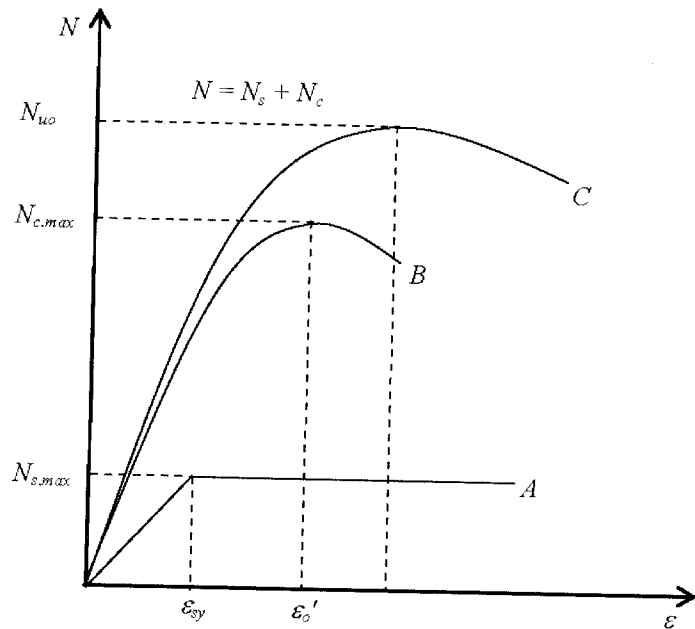
Gambar 4.5 Kolom dengan beban aksial

Gaya luar P ditopang oleh gaya dalam tekan N merupakan jumlah dari gaya dalam beton N_c dan gaya dalam tulangan memanjang N_s , yang sama dengan tegangan dikalikan dengan luas penampang. Dengan demikian

gaya total N adalah jumlah dari kedua gaya tersebut sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$N = N_c + N_s = \sigma_c A_c + \sigma_s A_s \dots\dots\dots (4.16)$$

Gambar 4.6 menunjukkan hubungan antara beban aksial N dengan regangan perpendekan aksial. Grafik A mewakili beban yang dipikul oleh tulangan, Grafik B beban yang dipikul oleh beton dan Grafik C beban total dipikul kolom.



Gambar 4.6 Beban aksial total

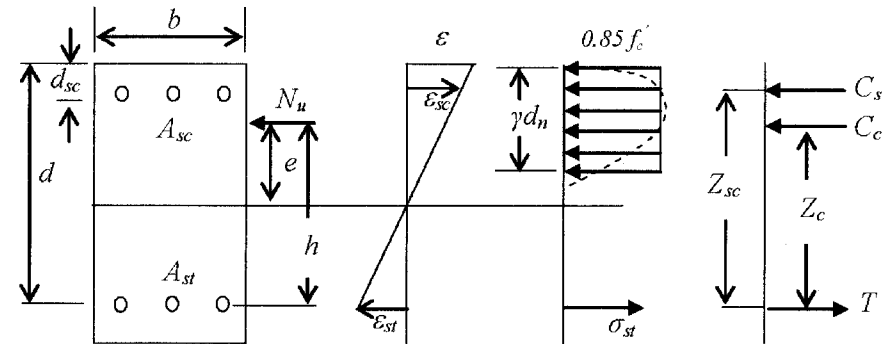
Kegagalan memikul beban terjadi saat mencapai $N = N_{uo}$. Kapasitas maksimum kolom memikul beban terjadi saat tulangan baja meleleh ($\epsilon = \epsilon_{sy}$), atau pada saat regangan maksimum beton dilampaui, $\epsilon = \epsilon_o'$. Regangan maksimum beton dicapai yang artinya kuat tekan, f_c , juga dicapai. Dalam perhitungan, digunakan nilai $0.85 f_c'$ dan bukan f_c , karena terdapat perbedaan nilai saat mengukur harga f_c . Luas penampang beton diambil luas keseluruhan (*gross cross-sectional area*), A_g . Dengan

demikian kemampuan memikul beban kolom dapat diekspresikan sebagai (Warner *et al.* 1998):

$$N_{uo} = 0.85 f_c' A_g + f_{sy} A_s \dots\dots\dots (4.17)$$

2. Kolom dengan Kombinasi Gaya Aksial dan Lentur

Disamping memikul gaya aksial tekan, hampir semua elemen struktur yang memikul gaya tekan juga menerima momen lentur diakibatkan oleh gaya aksial itu sendiri tidak berada pada garis netral penampang kolom ($M_u = N_u e$), atau kolom itu sendiri memang sudah menerima gaya momen (M_u) pada ujungnya. Dengan menggunakan prinsip yang sama untuk distribusi tegangan dan diagram blok tegangan persegi ekuivalen seperti pada balok, maka keadaan kolom yang menerima kombinasi pembebanan aksial dan lentur ditunjukkan pada Gambar 4.7 (Warner *et al.* 1998).



Gambar 4.7 Diagram tegangan-regangan kolom yang menerima gaya aksial dan momen

Gaya tekan pada beton dapat ditulis:

$$C_c = 0.85 \gamma f_c b d_n \dots\dots\dots (4.18)$$

Sedangkan gaya tarik pada tulangan:

$$ST = \sigma_{st} A_{st} \dots\dots\dots (4.19)$$

Resultan gaya dalam merupakan jumlah semua gaya horisontal dan dapat ditulis sebagai berikut:

$$N_u = C_c + C_s - T \dots\dots\dots (4.20)$$

Melalui penjumlahan momen dari semua gaya dalam dan gaya luar, yang ditinjau pada tulangan tarik memberikan persamaan:

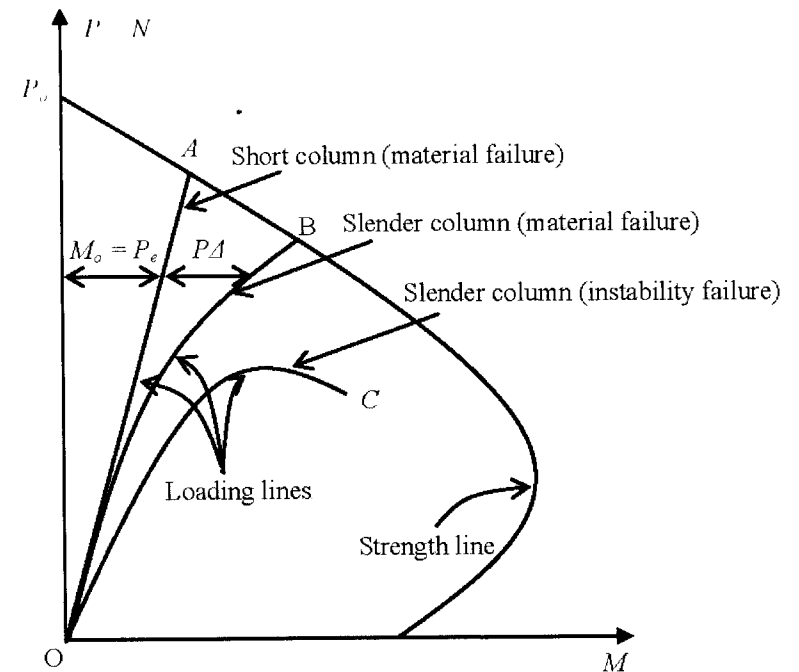
$$N_u h = C_c z_c + C_s z_{sc} \dots\dots\dots (4.21)$$

Dengan menggunakan Persamaan 4.21, kapasitas momen lentur (M_u) untuk kolom dengan kombinasi beban aksial dan lentur pada keruntuhan berimbang, keruntuhan tarik, maupun keruntuhan tekan dapat dihitung.

3. Kolom Langsing dengan Kombinasi Beban Aksial dan Lentur

Kolom langsing diartikan sebagai kolom yang kapasitas memikul bebannya tereduksi akibat pengaruh kelangsingan. Pengaruh tersebut dapat meningkatkan momen lentur yang dihasilkan melalui eksentrisitas beban (e), dan adanya defleksi arah lateral (Δ).

Kinerja kolom langsing dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain: panjang kolom, kondisi perletakan ujung, eksentrisitas beban, defleksi lateral, distribusi momen lentur dll. Kinerja kolom langsing untuk beban yang ditingkatkan secara progresif, diilustrasikan melalui diagram interaksi $P-M$ yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 (Warner *et al.* 1998).



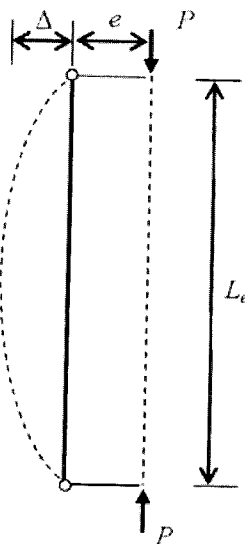
Gambar 4.8 Diagram Interaksi P-M

Bagian kurva O-A menunjukkan garis kerja gaya (*loading line*) dari kolom pendek yang memikul beban relatif kecil. Besarnya momen ialah $M=Pe$ untuk semua tahap pembebanan. Kegagalan penampang kolom terjadi saat garis kerja gaya berpotongan dengan garis kekuatan (*strength line*) kolom di titik A. Pada kolom tidak terlalu langsing, defleksi menjadi sangat berpengaruh dan mengurangi kapasitas memikul beban dari kolom tersebut. Nilai momen diekspresikan sebagai $M = P(e+\Delta)$. Kurva O-B menunjukkan urutan pembebanan, dan pada saat garis kerja gaya berpotongan dengan garis kekuatan kolom pada titik B, terjadi kegagalan pada meterial atau kapasitas penampang terlampaui. Untuk kolom langsing, kondisi menjadi tidak stabil sebelum garis kerja gaya mencapai titik perpotongan dengan garis kekuatan kolom sebagaimana ditunjukkan melalui kurva O-C. Pada titik dimana terjadi peningkatan beban hanya sedikit tapi menyebabkan peningkatan banyak pada defleksi lateral, maka

terjadi instabilitas pada kolom langsing. Pada kondisi tersebut, kekuatan material belum terlampaui dan kolom gagal memikul beban karena terjadi *buckling* pada titik tertentu, atau kegagalan akibat instabilitas geometri kolom langsing.

4. Penyederhanaan Analisa Stabilitas Kolom

Metode untuk memprediksi kemampuan kolom langsing memikul kombinasi beban aksial dan momen lentur telah dikembangkan oleh Rangan (1990). Metode ini terbukti sangat akurat dalam menganalisa kinerja kolom langsing beton bertulang dengan beban eksentrisitas satu arah – *single curvature bending* (Lloyd and Rangan 1996), dan juga untuk kolom langsing beton bertulang dengan beban eksentrisitas dua arah – *double curvature bending* (Sarker and Rangan 2003).



Gambar 4.9 Kolom langsing pin-ended

Untuk melakukan analisa kolom langsing dengan perletakan ujung *pin-ended* (Gambar 4.9), diperlukan kurva *moment-thrust-curvature*. Proses ini dilakukan dengan mentransformasikan kurva momen-kurvatur penam-

pang ke kurva *momen-defleksi* untuk setiap nilai tertentu dari *axial thrust* (Warner *et al.* 1998, Rangan 1990).

Bentuk terdefleksi dari kolom langsing diasumsikan menjadi fungsi matematika khusus dimana kurvatur, κ , pada tengah bentang memiliki keterkaitan tersendiri dengan defleksi Δ pada tengah bentang. Bentuk defleksi dari $v(x)$ diasumsikan sebagai fungsi sinus (Rangan, 1990) yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$v(x) = \Delta \sin\left(\frac{\pi x}{L_e}\right) \dots\dots\dots (4.22)$$

Dimana Δ merupakan defleksi pada tengah bentang, dan L_e merupakan panjang efektif dari kolom langsing, sehingga kurvatur dapat ditulis:

$$\kappa = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{\pi^2}{L_e^2} \Delta \sin\left(\frac{\pi x}{L_e}\right) \dots\dots\dots (4.23)$$

Pada tengah bentang $x = L_e/2$, kurvatur dapat ditulis:

$$\kappa = \left(\frac{\pi^2}{L_e^2}\right) \Delta \dots\dots\dots (4.24)$$

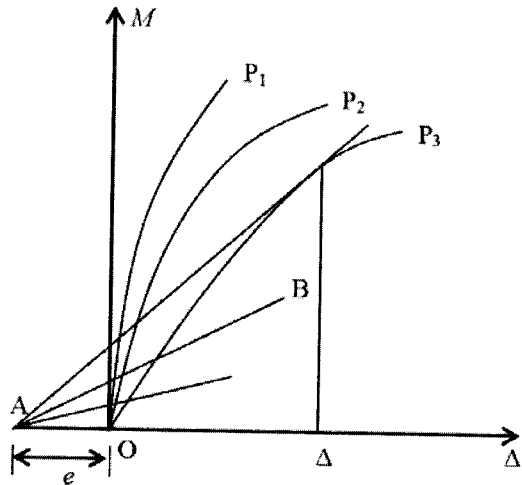
Pada kolom tertentu dengan nilai *axial thrust* tertentu, hubungan *moment-axial thrust-curvature* dikonversi ke *moment-axial thrust-deflection* menggunakan Persamaan 4.24. Urutan peningkatan nilai beban aksial dipilih berdasarkan kurva momen internal M_i versus defleksi Δ selanjutnya disusun sebagaimana ditunjukkan melalui Gambar 4.10 (Warner *et al.* 1998).

Hubungan antara M_e dan Δ dapat ditulis sebagai berikut :

$$M_e = P(e + \Delta) \dots\dots\dots (4.25)$$

Persamaan ini dapat dilihat pada Gambar 4.10 yang ditunjukkan oleh garis AB dengan kelandaian yang sama dengan P , untuk setiap nilai yang

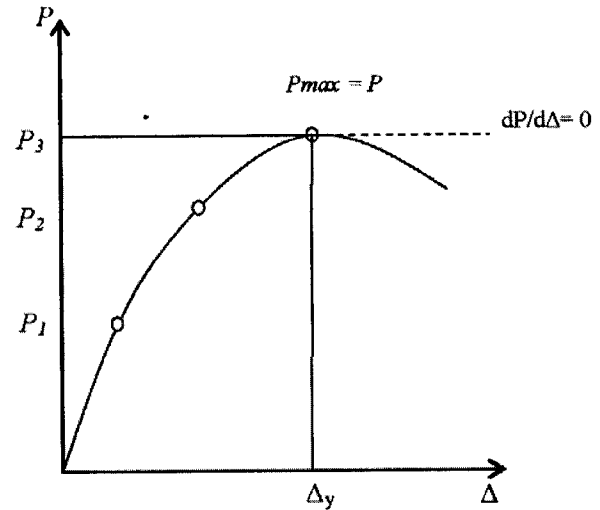
dipilih P_1, P_2, P_3 dan seterusnya. Jarak OA sama dengan jarak eksentrisitas (e).



Gambar 4.10 Hubungan antara Moment-Deflection-Axial

Melalui pemilihan sejumlah nilai *axial thrust*, seri dari suatu titik keseimbangan dapat ditentukan, kemudian hubungan antara beban aksial dan deformasi/perpindahan dapat diplot pada Gambar 4.10 (Warner *et al.* 1998). Kapasitas memikul beban aksial kolom langsing (P_{max}) dengan nilai eksentrisitas yang diketahui dapat dihitung dengan $dP/d\Delta = 0$. Nilai P_{max} diperoleh dari kurva beban puncak pada persamaan 4.11. Defleksi di tengah bentang Δ_y dapat juga diperoleh melalui nilai P_{max} . Selanjutnya kapasitas memikul beban aksial dari kolom langsing (Rangan, 1990) adalah sebagai berikut:

$$P_{max} = \frac{M_{max}}{e + \Delta_{cp} + \Delta_y} \dots\dots\dots (4.26)$$



Gambar 4.11 Kurva Beban-Defleksi

Untuk kepentingan disain, P_{max} pada Persamaan 4.26 dapat diganti dengan beban aksial terfaktor P_u untuk setiap ekuivalen harga e .

$$M_e = P_u (e + \Delta_{cp} + \Delta_y) \dots\dots\dots (4.27)$$

Dimana Δ_{cp} adalah harga defleksi akibat *creep*, dan Δ_y defleksi jangka pendek dari elemen kolom.

Selanjutnya, kapasitas memikul beban aksial kolom diberikan melalui persamaan (Rangan, 1990):

$$P_u = \frac{M_e}{e + \Delta_{cp} + \Delta_y} \dots\dots\dots (4.28)$$

Melalui Persamaan 4.28, defleksi, Δ_y , saat terjadi kegagalan memikul beban dapat dihitung melalui (Rangan, 1990):

Untuk $P_u \geq P_b$

$$\Delta_y = \Delta_{yb} \frac{P_o - P_u}{P_o - P_b} \dots\dots\dots (4.29)$$

Untuk $P_u < P_b$

$$\Delta_y = \Delta_{yo} + \Delta_{yb} - \Delta_{yo} \left(\frac{P_u}{P_b} \right) \dots\dots\dots (4.30)$$

Dimana,

$$\Delta_{yb} = \frac{(0.003 + \epsilon_y)}{d_o} \pi^2 L_e^2 \dots\dots\dots (4.31)$$

dan

$$\Delta_{yo} = \frac{1.6 \epsilon_y L_e^2}{\pi^2 d_o} \dots\dots\dots (4.32)$$

Dalam persamaan tersebut, P_b adalah kekuatan penampang kolom pada kondisi keruntuhan berimbang, P_o adalah kekuatan aksial load dari kolom langsing, ϵ_y merupakan regangan leleh tulangan baja, d_o kedalaman diukur dari tepi luar ke tulangan tarik pada sisi tertekan, dan L_e panjang efektif kolom.

5. Metode Pembesaran Momen

Timoshenko and Gere (1961) mengusulkan persamaan untuk menentukan defleksi balok-kolom memikul konsentrasi beban lateral dan beban aksial tekan. Total momen termasuk nilai momen awal yang diaplikasikan, dan momen tambahan akibat pengaruh kelangsingan kolom. Total momen dapat diekspresikan sebagaimana pada Persamaan 4.23.

$$M_{tot} = \frac{M}{1 - P/P_{cr}} \dots\dots\dots (4.33)$$

dimana:

$$P_{cr} = \pi^2 EI / L_e^2$$

Persamaan ini sudah digunakan pada berbagai standar perencanaan kolom langsing, dengan sedikit modifikasi telah digunakan oleh AS 3600 dan ACI 318 untuk perencanaan kolom langsing.

6. Tinjauan Penelitian Kolom Langsing

Studi tentang kolom langsing beton bertulang sudah sangat banyak dilakukan para peneliti. Beberapa diantaranya dapat disampaikan berikut ini.

a. Rangan, Saunders, dan Seng (1992)

Analisis dan studi eksperimental dilakukan terhadap kolom beton bertulang yang dibebani secara tekan dengan eksentrisitas tertentu. Penampang kolom 100x100mm dengan panjang efektif 2 (dua) meter. Parameter yang digunakan adalah beban aksial dengan eksentrisitas tertentu. Analisa dilakukan dengan menggunakan teori penyederhanaan stabilitas (*simplified stability analysis*) yang di publikasikan oleh Rangan (1990) untuk menghitung kapasitas beban dari kolom langsing dengan eksentrisitas tertentu. Hasil yang diperoleh menunjukkan keselarasan antara hasil test laboratorium dengan hasil analisis berdasarkan teori penyederhanaan stabilitas.

b. Basappa Shetty, dan Rangan (1995)

Bassapa Shetty dan Rangan melakukan pengujian 12 kolom dengan berbagai prosentase luas tulangan longitudinal, panjang kolom berbeda, dan eksentrisitas yang berbeda. Semua kolom dibebani sedemikian rupa agar kurvatur yang terjadi hanya pada satu arah saja. Hasil test telah dibandingkan dengan teori penyederhanaan stabilitas dan memberikan korelasi yang baik.

c. Kilpatrick dan Rangan (1999)

Kilpatrick dan Rangan mempublikasikan hasil test atas 41 kolom langsing yang terbuat dari kombinasi antara beton dan pipa baja. Test parameter adalah eksentrisitas beban dan kelangsingan kolom. Kolom dibebani sedemikian rupa agar berperilaku baik kurvatur tunggal (*single curvature*) maupun kurvatur ganda (*double curvature*). Teori penyederhanaan analisa stabilitas digunakan untuk menghitung kapasitas kolom langsing. Hasil test laboratorium sejalan dengan hasil perhitungan.

d. Lloyd dan Rangan (1996)

Lloyd dan Rangan meneliti kinerja dari kolom langsing terbuat dari beton mutu tinggi yang dibebani dengan gaya aksial eksentrisitas. Studi ini juga melakukan analisis terhadap perilaku kolom dengan menggunakan teori penyederhanaan stabilitas. Sejumlah 36 kolom langsing dibebani dengan kurvatur satu arah dengan parameter adalah kuat tekan, rasio tulangan longitudinal, dan beban aksial eksentrisitas. Analisa dilakukan dengan menggunakan teori penyederhanaan stabilitas dan dibandingkan dengan hasil test laboratorium. Korelasi yang baik ditemukan antara hasil test dan analisis.

e. Sarker dan Rangan (2003)

Delapan belas kolom langsing terbuat dari beton mutu tinggi di test dengan kurvatur pada satu dan dua arah secara tersendiri. Tinggi kolom 1,5m dan penampang 175x175mm. Test variabel terdiri atas beban aksial eksentrisitas pada arah yang berbeda di kedua ujung kolom, dan kuat tekan. Rasio eksentrisitas pada kolom atas dan bawah bervariasi antara +1 sampai -1 pada semua seri dari benda uji. Hasil laboratorium dibandingkan dengan perhitungan menggunakan teori penyederhanaan stabilitas. Korelasi antara hasil test dan perhitungan sangat baik.

**BAB
5**

**PERILAKU
ELEMEN STRUKTUR BETON
BERTULANG GEOPOLYMER**

**5.1 PENGUJIAN LABORATORIUM ELEMEN STRUKTUR
BALOK DAN KOLOM**

1. Baja Tulangan

a. Balok

Empat diameter berbeda digunakan sebagai tulangan longitudinal. Contoh baja tulangan diuji pada laboratorium untuk mendapatkan nilai leleh dan kapasitas kekuatan baja. Hasil pengujian diberikan sebagai berikut:

Tabel 5.1 Properti tulangan balok

Diameter (mm)	Luas Nominal (mm ²)	Kuat Leleh (MPa)	Kuat Putus (MPa)
12	110	550	680
16	200	560	690
20	310	560	675
24	450	557	660

b. Kolom

Tulangan longitudinal dengan diameter 12mm (N12 *deformed bar*) digunakan pada benda uji elemen struktur kolom. Baja polos diameter 6mm digunakan sebagai sengkang. Untuk mengetahui kekuatan tulangan, tiga contoh tulangan ditest untuk mendapatkan tegangan leleh dan tegangan batas/ultimate baja tersebut.

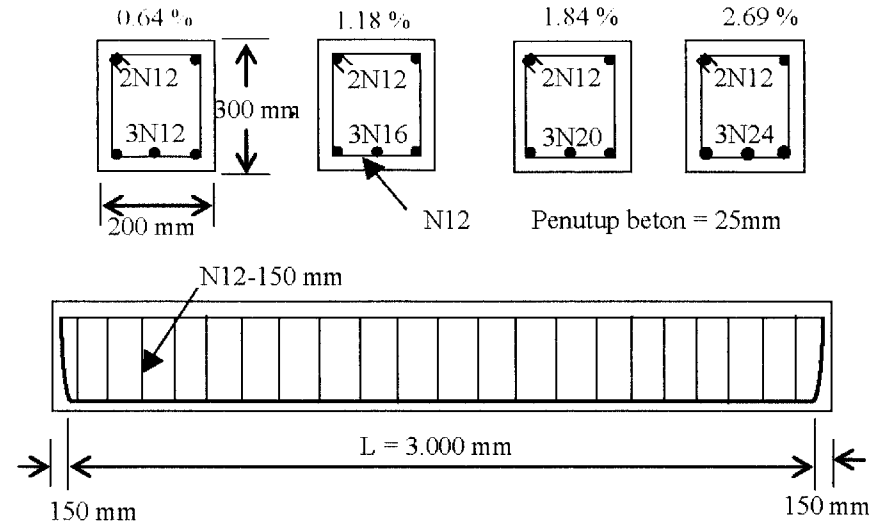
Tabel 5.2 Properti tulangan kolom

Diameter (mm)	Luas Nominal (mm ²)	Tegangan Leleh (MPa)	Tegangan Batas (MPa)
6	28	570	660
12	110	519	665

2. Konfigurasi dan Bentuk Geometri Benda Uji

a. Balok

Semua balok memiliki penampang 200mmx300mm dengan panjang balok 3300mm dan diletakkan pada perletakan sederhana dengan bentang 3000mm. Balok direncanakan untuk gagal memikul beban melalui kegagalan lentur (*flexural mode failure*). Empat rasio penulangan berbeda digunakan pada benda uji balok. Selimut beton antara tulangan dengan tepi luar beton 25mm untuk semua permukaan. Geometri dan detail penampang balok dan baja tulangan ditunjukkan pada Gambar 5.1, dan detail benda uji ditunjukkan pada Tabel 5.3.



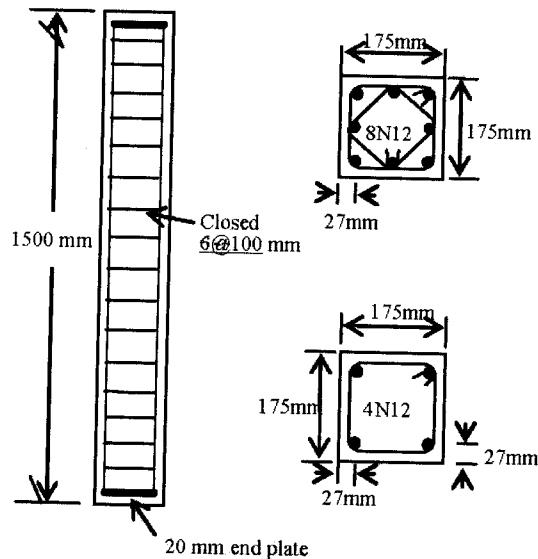
Gambar 5.1 Geometri balok dan detail penulangan

Tabel 5.3 Detail balok

Seri	Balok	Dimensi Balok (mm)	Tulangan Longitudinal		Rasio Tulangan Tarik (%)
			Tekan	Tarik	
1	GBI-1	200x300x3300	2N12	3N12	0.64
	GBI-2	200x300x3300	2N12	3N16	1.18
	GBI-3	200x300x3300	2N12	3N20	1.84
	GBI-4	200x300x3300	2N12	3N24	2.69
2	GBII-1	200x300x3300	2N12	3N12	0.64
	GBII-2	200x300x3300	2N12	3N16	1.18
	GBII-3	200x300x3300	2N12	3N20	1.84
	GBII-4	200x300x3300	2N12	3N24	2.69
3	GBIII-1	200x300x3300	2N12	3N12	0.64
	GBIII-2	200x300x3300	2N12	3N16	1.18
	GBIII-3	200x300x3300	2N12	3N20	1.84
	GBIII-4	200x300x3300	2N12	3N24	2.69

b. Kolom

Semua kolom memiliki penampang 175x175mm dengan panjang 1500mm. Enam kolom diberi empat tulangan longitudinal dan enam lainnya diberikan delapan tulangan longitudinal dengan diameter 12mm. Konfigurasi ini memberikan rasio tulangan berturut-turut 1,47% dan 2,95%. Selimut Beton 15mm antara tulangan longitudinal dan tepian permukaan beton untuk semua sisi kolom. Geometri dan detail penulangan benda uji kolom beton bertulang geopolymer ditunjukkan pada Gambar 5.2, dan detail kolom pada Tabel 5.4. Karena penggunaan pada ujung kolom *end assemblages*, (Killpatrick, 1998) untuk kepentingan pengetesan, maka panjang efektif kolom diukur dari ujung-ke-ujung adalah 1684mm.



Gambar 5.2 Geometri dan penulangan kolom

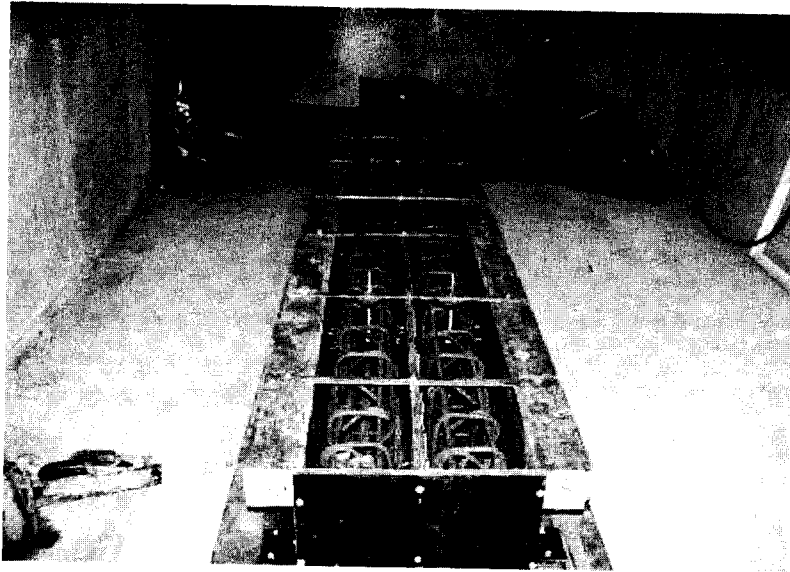
Tabel 5.4 Detail kolom

Kolom No.	Dimensi Penampang (mm)	Tulangan Lateral (Sengkang)	Tulangan Longitudinal	Ratio Penulangan (%)
GCI-1	175x175x1500	6@100mm	4N12	1.47
GCI-2	175x175x1500	6@100mm	4N12	1.47
GCI-3	175x175x1500	6@100mm	4N12	1.47
GCII-1	175x175x1500	6@100mm	8N12	2.95
GCII-2	175x175x1500	6@100mm	8N12	2.95
GCII-3	175x175x1500	6@100mm	8N12	2.95
GCIII-1	175x175x1500	6@100mm	4N12	1.47
GCIII-2	175x175x1500	6@100mm	4N12	1.47
GCIII-3	175x175x1500	6@100mm	4N12	1.47
GCIV-1	175x175x1500	6@100mm	8N12	2.95
GCIV-2	175x175x1500	6@100mm	8N12	2.95
GCIV-3	175x175x1500	6@100mm	8N12	2.95

3. Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

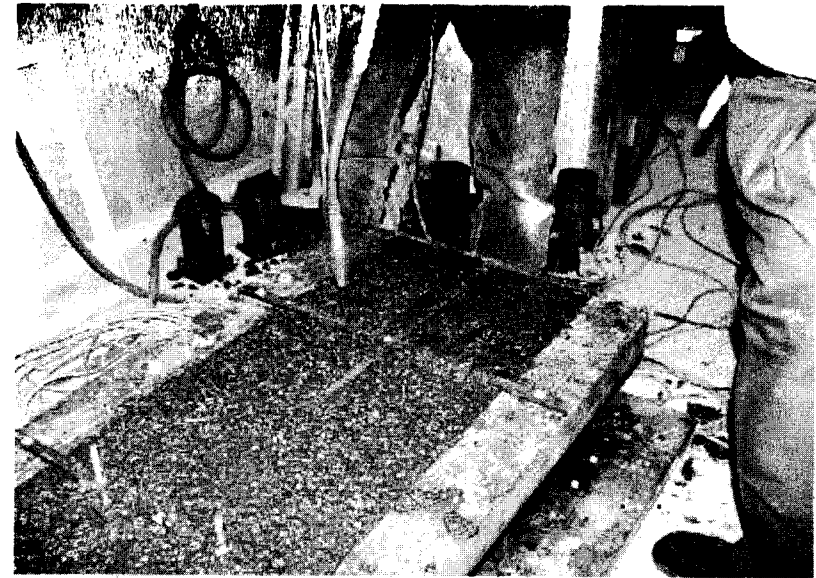
a. Balok

Agregat kasar dan pasir dalam kondisi SSD dimasukkan kedalam panci pencampur (*pan mixer*) bersama-sama dengan abu terbang dan di campur selama tiga menit. Selanjutnya dimasukkan cairan alkalin bersama dengan *superplasticizer* dan air ekstra. Pencampuran terus dilanjutkan untuk tambahan empat menit.



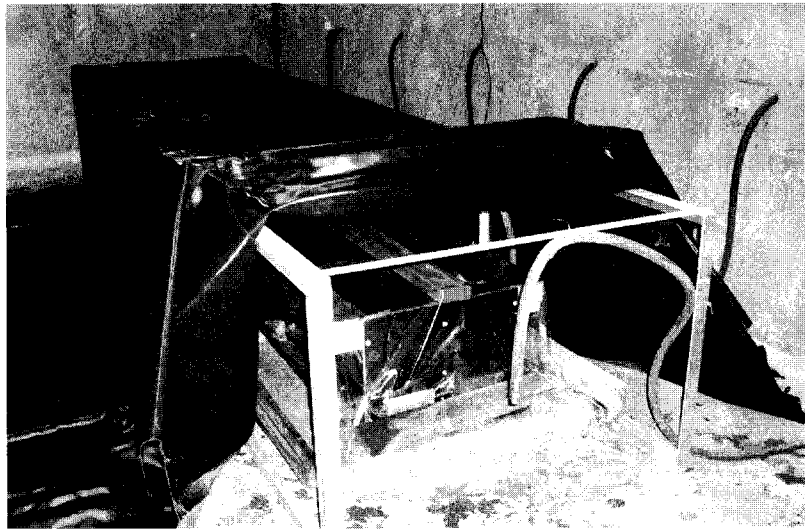
Gambar 5.3 Cetakan dan tulangan baja

Selesai mencampur, beton mudah dimasukkan ke dalam cetakan yang di dalamnya sudah terdapat tulangan sesuai dengan yang direncanakan. Pada semua balok, beton dimasukkan dalam dua lapisan secara horisontal. Setiap lapis beton dipadatkan dengan menggunakan tongkat pemadat internal (*internal stick compacter*). Karena keterbatasan *mixer* di laboratorium maka pencampuran dilakukan enam kali untuk mendapatkan dua buah balok beton bertulang geopolymer. Untuk setiap pencampuran, sejumlah silinder dengan ukuran 100mm x 200mm juga telah dibuat untuk pengujian kuat tekan setiap balok yang dibuat. Setiap silinder di uji pada hari yang sama pada saat balok beton bertulang geopolymer juga diuji. *Slump* dari setiap campuran beton segar juga diukur untuk mengamati konsistensi campuran yang dibuat pada waktu berbeda. Gambar 5.3 menunjukkan cetakan dan tulangan longitudinal balok, dan Gambar 5.4 menunjukkan proses pemadatan dengan menggunakan stik pemadat getar.



Gambar 5.4 Pemadatan pada pencetakan balok

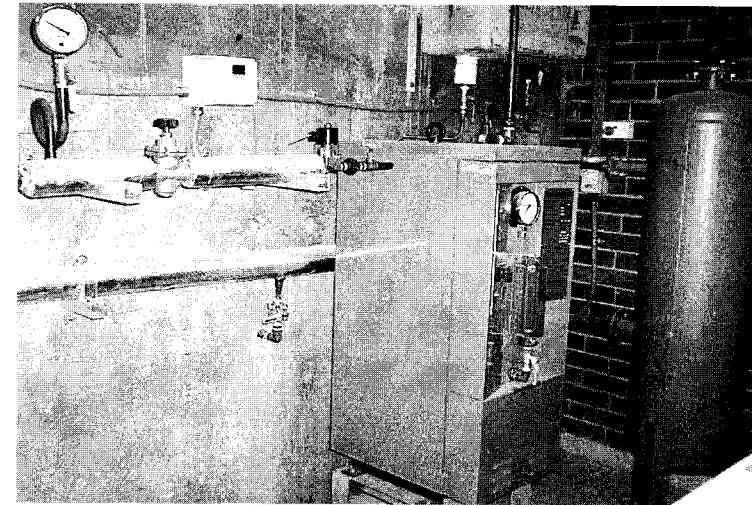
Selesai pengecoran, semua benda uji disimpan pada tempat tertentu dengan kondisi temperatur ruangan selama tiga hari. Dalam penelitian pendahuluan ditemukan bahwa memperlambat/menunda perawatan beton segar untuk beberapa hari akan meningkatkan kuat tekan beton geopolymer (Hardjito *et al.* 2005). Setelah didiamkan selama tiga hari, benda uji dimasukkan pada *steam-curing chamber* (Gambar 5.5) dengan suhu 60°C selama 24 jam.



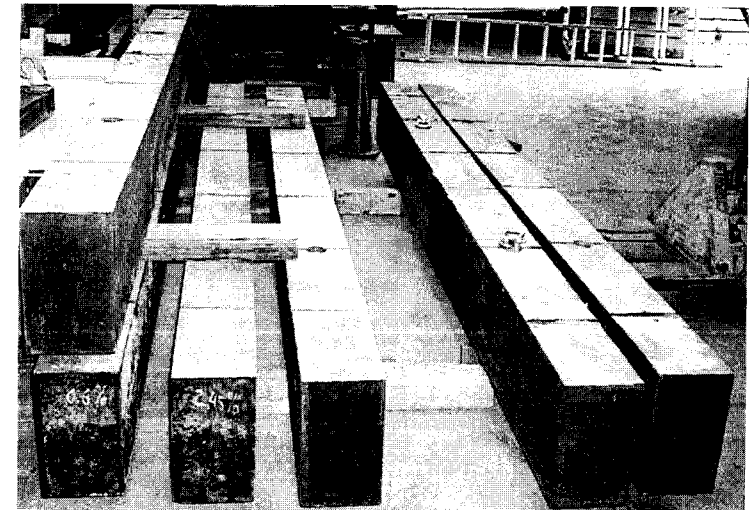
Gambar 5.5 Steam Curing Chamber

Untuk menjaga suhu didalam chamber tetap konstan, dipasang peralatan katup solenoid dengan bantuan kontroler temperatur digital dan dilengkapi *thermocouple* pada instalasi *boiler* (mesin pemanas uap Gambar 5.6). Digital kontroler akan membuka secara otomatis katup solenoid untuk mensuplai uap panas masuk kedalam chamber, dan akan tertutup secara otomatis apabila suhu didalam chamber telah mencapai suhu yang diinginkan. Untuk menghindari kondensasi terhadap benda uji, lembaran plastik digunakan sebagai penutup permukaan benda uji.

Setelah proses perawatan, semua benda uji baik balok maupun silinder dikeluarkan dari chamber dan dibiarkan kering pada suhu ruangan selama sehari, kemudian benda uji dilepaskan dari cetaknya. Selanjutnya, semua benda uji dibiarkan pada suhu ruangan untuk menunggu pengetesan. Suhu ruangan bervariasi antara 25° sampai 35°C.



Gambar 5.6 Instalasi Pemanas Uap (Steam Boiler System)

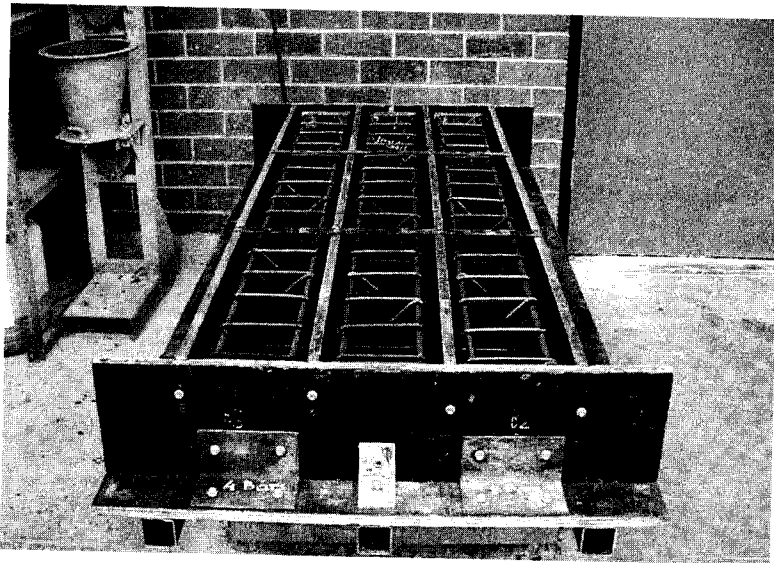


Gambar 5.7 Balok setelah Demoulding

b. Kolom

Agregat kasar dan agregat halus termasuk pasir dibuat dalam keadaan SSD. Semua agregat dan abu terbang dicampur dalam *mixer* selama tiga menit. Selanjutnya cairan alkalin dimasukkan ke dalam campuran ber-

samaan dengan air tambahan kemudian dilanjutkan pencampuran selama empat menit. Beton segar dimasukkan dalam cetakan setelah selesai proses pencampuran. Semua kolom dicor secara horisontal menggunakan cetakan kayu dengan tiga lapisan horisontal. Setiap lapisan dipadatkan secara manual dengan menggunakan *rod bar*, dan digetar di atas meja pemadat selama 30 detik. Pada setiap kelompok campuran, diambil sejumlah contoh untuk pembuatan silinder ukuran 100x200mm untuk pengujian kuat tekan. Gambar 5.8 menunjukkan pengaturan kolom yang terletak di atas meja getar.

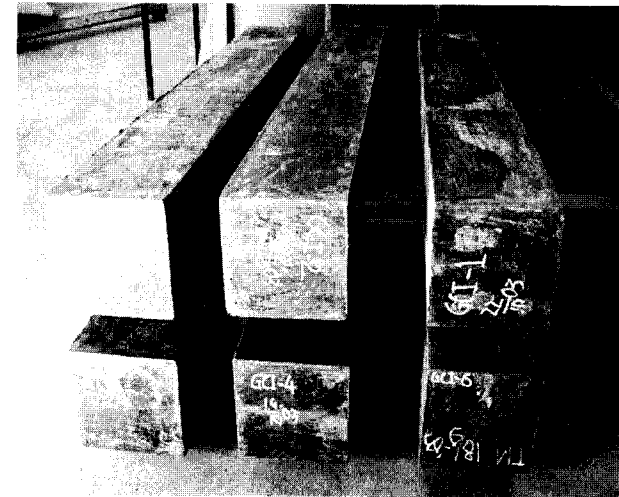


Gambar 5.8 Cetakan dan penulangan kolom

Setelah pengecoran, benda uji kolom dan silinder untuk seri GC-I dan GC-II langsung dimasukkan dalam *steam chamber* dengan suhu 60°C selama 24 jam. Sedangkan kolom geopolymer dengan seri GC-III dan GC-IV dibiarkan pada suhu ruangan untuk tiga hari sebelum dimasukkan dalam *curing chamber* dengan suhu 60°C selama 24 jam. Prosedur perawatan kolom beton bertulang geopolymer sama dengan perawatan yang dilakukan pada balok beton bertulang geopolymer. Untuk menghindari

terjadinya kondensasi pada benda uji, maka penutup plastik digunakan untuk melindungi permukaan kolom.

Selesai proses perawatan, benda uji kolom bersama dengan silinder dikeluarkan dari *steam chamber* dan dibiarkan pada suhu ruangan selama 24 jam sebelum dilepaskan dari cetakan. Benda uji dibiarkan pada suhu ruangan sampai pada saat pengujian (Gambar 5.9). Temperatur pada laboratorium bervariasi antara 25° dan 35°C pada periode tersebut.

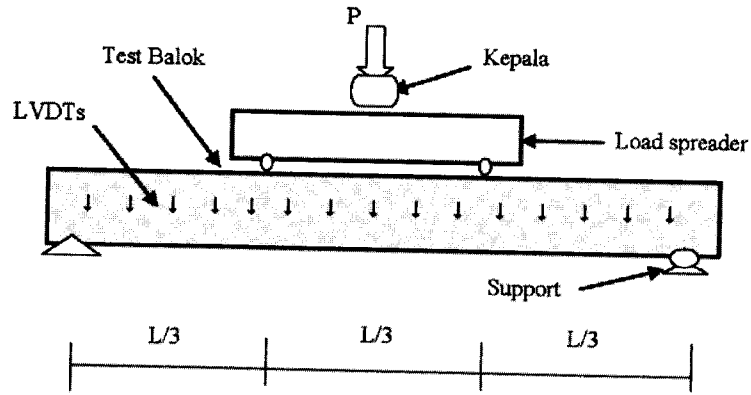


Gambar 5.9 Kolom setelah dilepaskan dari cetakan

4. Instrumentasi dan Pengujian

a. Balok

Semua balok diuji dengan menggunakan mesin pengujian Universal dengan kapasitas 2500 kN. Balok beton geopolymer diletakkan pada dua perletakan sederhana dengan bentang 3000mm. Dua beban terpusat ditempatkan secara simetris sepanjang bentang balok. Jarak antar beban tersebut 1000mm. Konfigurasi pengujian diperlihatkan pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Balok diatas dua perletakan

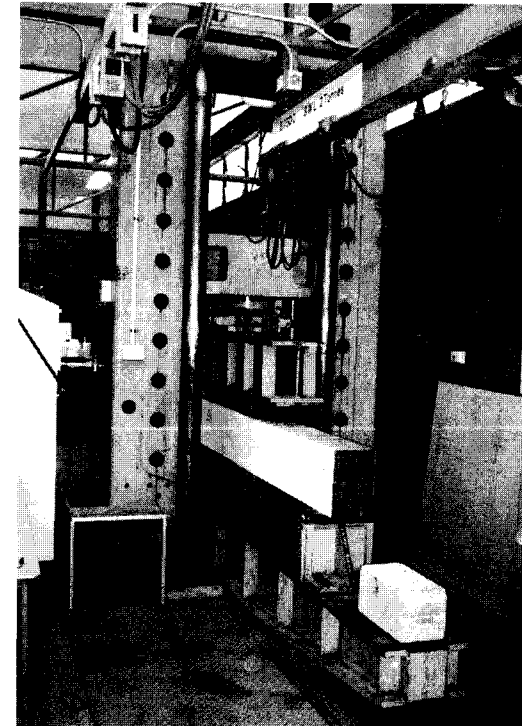
Digital data akuisisi digunakan untuk merekam informasi selama pengujian berlangsung. *Linear Variable Data Transformers* (LVDTs) digunakan untuk mengukur defleksi yang terjadi pada semua titik yang diinginkan sepanjang bentangan balok. Semua LVDT dikalibrasi setiap kali melaksanakan pengujian. Hubungan secara linier dianggap terjadi antara luaran LVDT dalam satuan *milli-volts (mV)* dengan gerakan sesungguhnya dalam satuan *millimetres (mm)*. Kalibrasi LVDT menggunakan *Milling Machine*. Semua LVDT dihubungkan pada alat ini, dan gerakannya diukur dengan *dial gauge*. Luaran LVDT diperoleh dalam *milli-volts (mV)* dikorelasikan oleh *dial gauge* ke satuan *millimetres (mm)*.

Semua benda uji harus dalam keadaan bersih sebelum ditempatkan pada mesin pengujian. Pada lokasi dimana akan diletakkan LVDT harus dalam keadaan rata untuk menghindari bacaan yang salah atau perolehan data yang keliru akibat tidak rata permukaan balok pada titik dimana LVDT berada. Semua benda uji balok dicat warna putih untuk mempermudah pengamatan terjadinya retak-ratak rambut di lokasi tertentu. Gerakan benda uji diatur sedemikian rupa sehingga secara konstan bergerak dengan kecepatan tetap 0,5mm/menit. Pencatatan dan rekaman data bervariasi antara 10 sampai 100 sampel per detik. Pencatatan lebih tinggi/banyak diambil saat beban puncak akan dicapai agar pengamatan

terhadap hubungan beban dan defleksi saat terjadi keruntuhan dapat diamati dengan baik.

Semua LVDT diletakkan pada lokasi yang telah ditentukan sepanjang bentangan balok untuk memonitor defleksi yang terjadi selama pembebanan. Sebelum dibebani, semua sistem pada mesin pengumpul data dicek dan bacaan awal harus berada pada status nol.

Gambar grafik baik yang naik maupun turun untuk menunjukkan hubungan beban dan defleksi terekam dengan baik selama pengujian berlangsung. Pengambilan data untuk grafik menurun (*softening part*) setelah beban maksimum akan terus dilakukan sampai LVDT mencapai batas pengukurannya, atau sampai *data logger* sudah tidak merekam data karena benda uji sudah hancur.

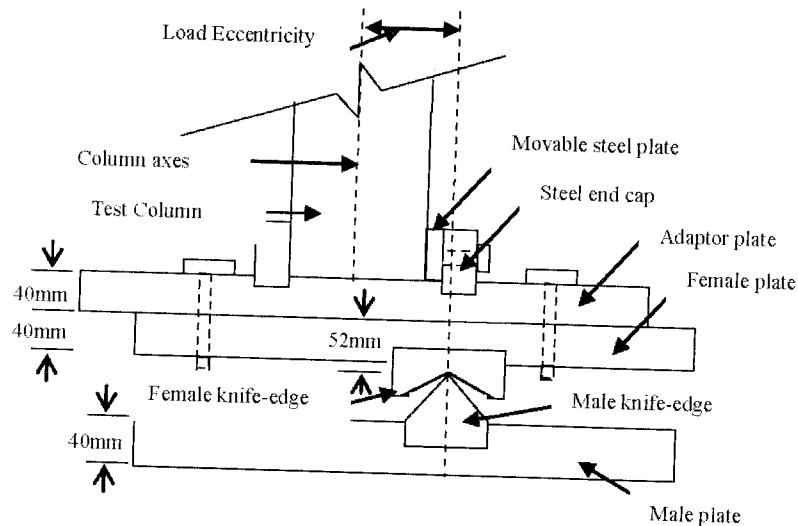


Gambar 5.11 Balok yang siap diuji

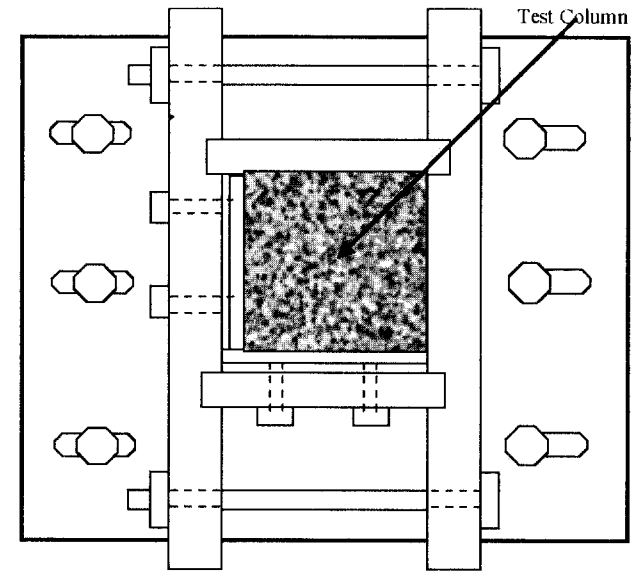
b. Kolom

Semua benda uji kolom diuji dengan menggunakan mesin Universal berkapasitas 2500kN. Peralatan yang dibuat secara khusus (*End Assemblages*) dipasang pada kedua ujung kolom untuk mengakomodir perilaku kolom yang dibebani secara eksentrisitas pada semua level pembebanan selama berlangsungnya pengujian.

Setiap ujung dari alat tersebut terdapat tiga baja tebal 40mm. Alat ini dipasang sedemikian rupa pada mesin Universal dan dibaut dengan kaku pada kedua ujung plat dari mesin universal. *Plat Male* memiliki *male knife-edge* yang dipasang bersesuaian dengan *female knife-edge* yang dibaut pada plat *female*. Ujung dari kedua *knife-edge* dibuat sedemikian rupa untuk meminimalkan gesekan antara keduanya. Plat adaptor memiliki sejumlah lubang untuk memberikan konfigurasi variasi beban eksentrisitas yang diinginkan dari 0 sampai 65mm dengan interval 5mm. Saat posisi *end assemblages* telah terpasang pada mesin pengujian, maka plat *male* dan *female* akan berada pada posisi relatif terhadap plat mesin. Detail dari *end assemblages* ditunjukkan pada Gambar 5.12 dan 5.13.

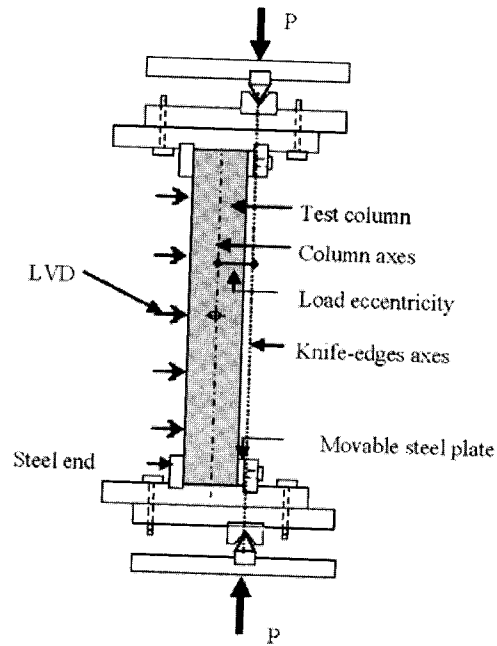


Gambar 5.12 End assemblage



Gambar 5.13 Potongan atas dari End Assemblage

End Assemblages menstimulasikan perletakan sendi pada kedua ujung kolom, dan telah sukses digunakan pada beberapa penelitian kolom dengan berbagai perilaku beban eksentrisitas diantaranya penelitian oleh Kilpatrick dan Rangan 1999; Lloyd dan Rangan 1996; Sarker dan Rangan 2003. Plat baja ditempatkan pada kedua ujung kolom dan dibuat sedemikian rupa untuk menghindari terjadinya kehancuran yang tidak diinginkan pada daerah ujung-ujung kolom yang sedang diuji. Secara lengkap *End Assemblage* ditunjukkan pada Gambar 5.14.



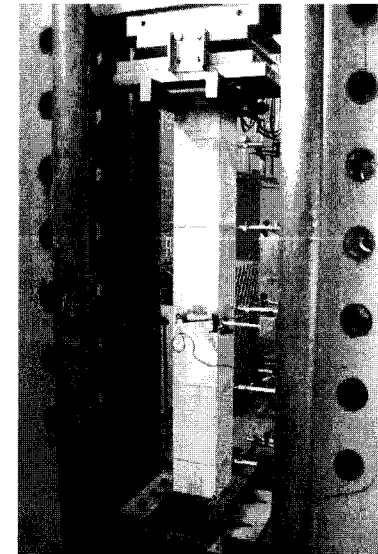
Gambar 5.14 End Assemblage dan benda uji kolom

Unit data akuisisi yang bekerja secara otomatis digunakan untuk mengumpulkan data selama pengujian berlangsung. Enam LVDT ditempatkan sepanjang benda uji kolom dimana lima LVDT ditempatkan pada lokasi yang sudah dipilih untuk mengambil data defleksi kolom pada permukaan kolom yang tertarik (*tension face*), dan satu LVDT diletakkan tegak lurus pada permukaan kolom untuk mengontrol gerakan kolom pada bidang yang ingin dipertahankan.

Untuk menghindari terjadinya pembebanan tidak merata akibat tidak rata nya ujung permukaan kolom, maka diperlukan perlakuan khusus pada kedua ujung permukaan kolom agar menjadi rata sebelum memasang benda uji pada *End Assemblages*. Sebelum memasang kolom pada mesin penguji, *End Assemblages* telah diatur untuk mengakomodir seberapa besar eksentrisitas yang diinginkan pada pengujian tersebut. Garis yang melalui bagian tengah *knife-edges* menunjukkan letak eksentrisitas beban (Gambar 5.14).

Plat dasar terlebih dahulu ditempatkan pada bagian atas dan bawah dari plat mesin Universal. Plat *female*, bersama dengan *knife edge*-nya diletakkan pada dasar mesin dan diselaraskan dengan *male knife-edge*. Selanjutnya benda uji diletakkan pada bagian bawah. Setelah benda uji berada dan berdiri pada tempatnya di bagian bawah, plat mesin dinaikkan perlahan sampai ujung atas kolom masuk pada tempatnya di atas *End Assemblage*. Agar letak kolom tetap berada pada tempat yang diinginkan, maka beban sebesar 20kN diaplikasikan pada benda uji untuk menahan benda uji tetap pada tempatnya. Setelah posisinya sudah sesuai dengan yang diinginkan, maka semua baut penahan dikencangkan sebelum pemasangan instrumen pengujian lainnya seperti LVDT.

LVDT dipasang pada lokasi dimana data yang diperlukan akan direkam. Pada kasus ini LVDT dipasang untuk memonitor dan merekam defleksi pada arah lateral kolom. Pengujian dilakukan melalui aplikasi beban aksial tekan dengan eksentrisitas tertentu. Pembebanan diberikan secara konstan dengan kecepatan 0,3mm /menit sampai kolom tersebut hancur. Gambar 5.15 menunjukkan kolom yang siap diuji.



Gambar 5.15 Kolom yang berada pada Mesin Universal

Kecepatan pengambilan data bervariasi antara 10 sampai 100 sampel setiap detik. Kecepatan lebih tinggi diatur untuk pengambilan data pada saat kolom mendekati beban runtuh. Hal ini menjamin tersedianya data akurat untuk mendapatkan kurva *load-deflection* yang baik saat terjadi beban puncak. Baik kurva yang menanjak maupun kurva menurun (*softening*) dari kurva *load-deflection* dapat terekam dengan baik pada semua pengujian kolom beton bertulang geopolymer.

Setelah kolom dicor dan ditempatkan pada cetaknya, beberapa contoh campuran diambil dan dimasukkan dalam silinder, serta sebagiannya lagi digunakan untuk pengujian Slump. Pengecoran, pemadatan, dan proses perawatan dari semua silinder dilakukan sama seperti benda uji kolom. Semua benda uji untuk kepentingan berbeda ditest pada waktu yang sama. Nilai rata-rata Slump dari beton segar, kuat tekan dan kepadatan beton yang telah mengeras diberikan pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Beban eksentrisitas dan properti kolom

Serie	Kolom	Eksentrisitas Beban (mm)	Slump (mm)	Kuat Tekan (MPa)	Kepadatan/ Density (kg/m ³)
I	GCI-1	15	240	42	2243
	GCI-2	35	240	42	2243
	GCI-3	50	240	42	2243
II	GCI-1	15	240	43	2295
	GCI-2	35	240	43	2295
	GCI-3	50	240	43	2295
III	GCI-1	15	219	66	2342
	GCI-2	35	219	66	2342
	GCI-3	50	219	66	2342
IV	GCI-1	15	212	59	2313
	GCI-2	35	212	59	2313
	GCI-3	50	212	59	2313

5. Properti Beton Segar

Contoh beton segar dari setiap kelompok pengecoran diambil untuk pengujian *Slump Test* (Gambar 5.16), dan sebagian dimasukkan pada silinder berukuran 100x200mm untuk pengetesan kuat tekan. Data test Slump memberikan indikasi bahwa walaupun pengecoran berbeda dalam beberapa kelompok tapi nilai Slump yang konsisten mengindikasikan bahwa beton segar dalam keadaan yang sama. Nilai rata-rata hasil test Slump ditunjukkan pada Tabel 5.6.



Gambar 5.16 Pengujian Slump untuk beton segar

Semua benda uji silinder dipadatkan dan diperlakukan sama dengan benda uji balok, dan test kuat tekan dilaksanakan bersamaan dengan pengetesan balok beton bertulang geopolymer. Paling sedikit lima silinder dibuat bersamaan dengan pengecoran benda uji balok. Data kuat tekan menunjukkan nilai yang konsisten untuk setiap pengecoran pada kelompok berbeda. Nilai rata-rata kuat tekan silinder dan berat volume beton (kepadatan) yang sudah mengeras diberikan pada Tabel 5.6

Table 5.6 Properti balok beton Geopolymer

Serie	Balok	Slump (mm)	Kuat Tekan Silinder (MPa)	Kepadatan (kg/m ³)
I	GBI-1	255	37	2237
	GBI-2	254	42	2257
	GBI-3	254	42	2257
	GBI-4	255	37	2237
II	GBII-1	235	46	2213
	GBII-2	220	53	2226
	GBII-3	220	53	2226
	GBII-4	235	46	2213
III	GBIII-1	175	76	2333
	GBIII-2	185	72	2276
	GBIII-3	185	72	2276
	GBIII-4	175	76	2333

5.2 PERILAKU BALOK BETON BERTULANG GEOPOLYMER

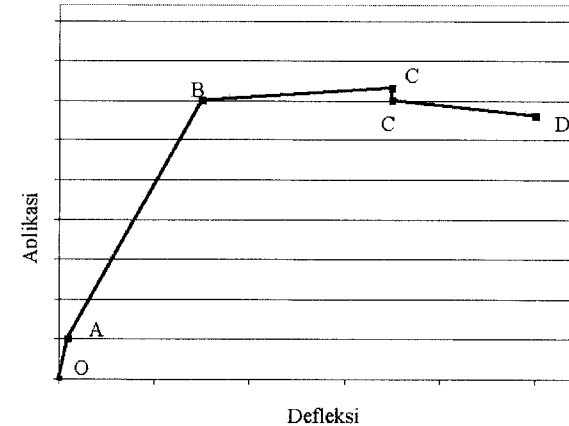
1. Sifat Umum Balok Bertulang Geopolymer

Benda uji balok ditest dengan memberikan peningkatan beban secara terus menerus hingga beban puncak dicapai, dan balok hancur akibat kegagalan memikul beban yang lebih besar. Saat pembebanan diaplikasikan pada benda uji, terjadi defleksi pada balok dan retak rambut mulai terjadi pada posisi dimana balok mengalami lentur. Aplikasi beban terus menerus akan mengakibatkan balok gagal memikul beban. Semua balok mengalami jenis kegagalan lentur.

Gambar 5.17 menunjukkan kurva *ideal load-deflection* pada tengah bentang dari balok. Peningkatan secara progresif dari defleksi di tengah bentang menunjukkan fungsi dari peningkatan beban. Kurva *load-deflection* mengindikasikan kejadian penting yang terjadi selama pengujian berlangsung. Kejadian tersebut diidentifikasi sebagai berikut: Retak awal

terjadi pada titik (A), melemahkan tulangan baja menunjukkan *yield strength* tulangan telah dicapai (B), hancurnya beton terjadi saat *compressive strength* beton di lampau yang disertai dengan terlepasnya selimut beton (C).

Titik (C') menunjukkan sedikit penurunan dari kurva yang disebabkan oleh tercapainya beban batas, dan pada saat terjadi disintegrasi pada daerah yang tertekan menunjukkan konsekuensi *buckling* terjadi pada tulangan baja pada daerah yang tertekan (D). Hubungan dari kurva *load-deflection* ini merupakan kondisi umum dan sangat tipikal terjadi pada pengujian balok terlentur (Nawy 2004; Warner *et al.* 1998).



Gambar 5.17 Kurva *ideal load-deflection* di tengah bentang balok

Perilaku semua balok saat menjalani pengujian hampir sama, walaupun semua kejadian yang digambarkan sebelumnya tidak secara jelas dapat diamati. Sebagai contoh, balok dengan rasio penulangan longitudinal 2,69% kejadian untuk titik B dan C terjadi hampir secara bersamaan sehingga kedua titik tersebut hampir berhimpitan. Semua benda uji balok beton bertulang geopolymer direncanakan sebagai balok bertulangan kurang (*under-reinforced beam*); dengan demikian tulangan tarik mencapai tegangan leleh sebelum beton mencapai kapasitas kuat tekannya, dan hal yang sama terjadi pada tulangan tekan. Pengaruh dari parameter berbeda

terhadap perilaku lentur pada benda uji balok akan dibahas pada bagian selanjutnya.

2. Pola Retak dan Keruntuhan

Sebagaimana diharapkan, retak akibat lentur dimulai pada daerah zona lentur murni di tengah bentang. Dengan dilanjutkan pemberian beban, retak awal terus melebar dan terjadi retakan baru sepanjang bentang balok yang mengarah dari bagian tengah ke bagian ujung balok. Pada kasus balok dengan luas tulangan tarik yang lebih besar, beberapa retak akibat lentur mulai naik dengan membentuk arah menyerong. Hal ini disebabkan oleh pengaruh gaya geser pada penampang balok di lokasi bentang tertentu. Lebar dan jarak retak bervariasi sepanjang bentang. Untuk semua kasus, pola retak yang terjadi sangat mirip antara balok beton bertulang geopolymer dengan pola retak balok beton bertulang beton konvensional sebagaimana dilaporkan melalui penelitian serupa.

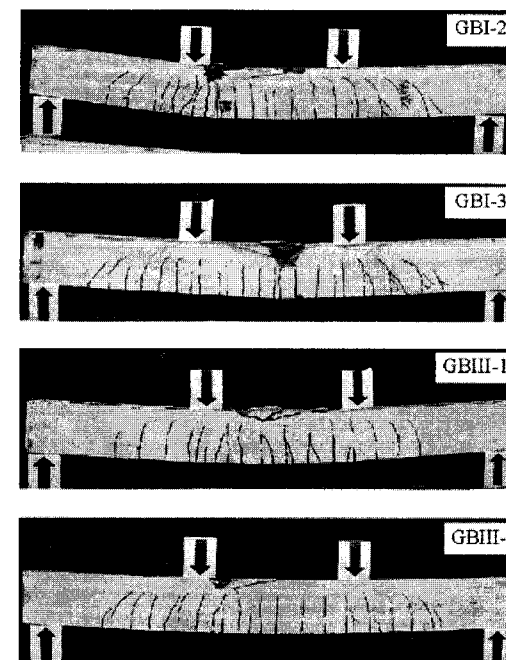
Retak di tengah bentang terus melebar sejalan dengan pembebanan yang terus diaplikasikan pada benda uji. Pada saat mendekati beban maksimum, balok melentur secara signifikan yang mengindikasikan bahwa tulangan tarik telah meleleh pada bentang bagian tengah. Kegagalan balok memikul beban terjadi pada saat bagian atas beton yang tertekan melampaui tegangan tekannya (*compressive strength*) dan hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi *buckling* pada tulangan tekan di daerah dimana nilai tegangan tekan beton terlampaui. Efek *spalling* akan terjadi jika beban terus diaplikasikan yang menunjukkan kegagalan total balok untuk memikul beban. Pola retak dan model kehancuran yang terjadi pada beberapa balok ditunjukkan melalui Gambar 5.18.

3. Momen Retak

Besarnya beban dimana retak lentur pertama kali terjadi dapat teridentifikasi. Dari data tersebut momen retak dapat dihitung, dan hasilnya ditunjukkan melalui Tabel 5.7.

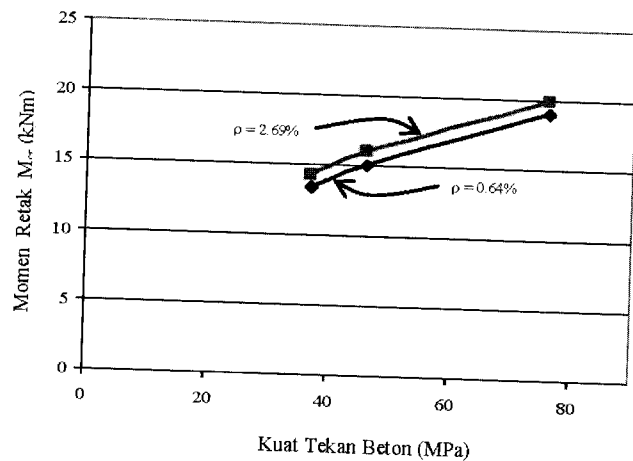
Tabel 5.7 Momen Retak

Balok	Kuat Tekan Beton (MPa)	Rasio Tulangan Tarik (%)	Momen Retak M_{cr} (kNm)
GBI-1	37	0.64	13.40
GBI-2	42	1.18	13.55
GBI-3	42	1.84	13.50
GBI-4	37	2.69	14.30
GBII-1	46	0.64	15.00
GBII-2	53	1.18	16.20
GBII-3	53	1.84	16.65
GBII-4	46	2.69	16.05
GBIII-1	76	0.64	19.00
GBIII-2	72	1.18	20.00
GBIII-3	72	1.84	21.00
GBIII-4	76	2.69	19.90

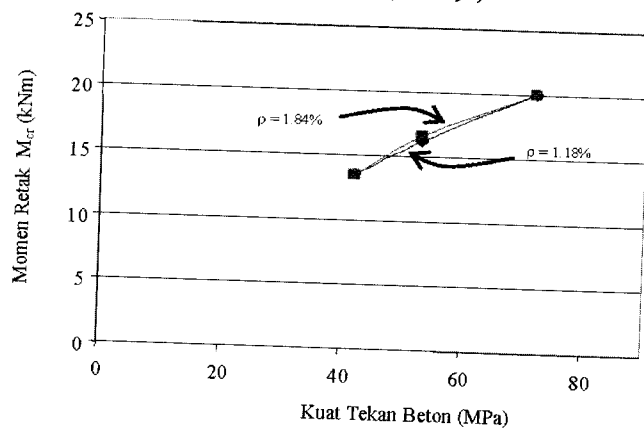


Gambar 5.18 Pola retak dan model kehancuran balok

Gambar 5.19 dan 5.20 menunjukkan variasi hubungan antara momen retak dengan kuat tekan beton. Sebagaimana diharapkan, nilai momen retak akan meningkat sejalan dengan meningkatnya nilai kuat tekan beton geopolymer. Data hasil pengujian juga mengindikasikan bahwa pengaruh tulangan longitudinal tidak terlalu relevan terhadap nilai momen retak. Kecenderungan ini memiliki kemiripan dengan nilai momen retak pada balok beton bertulang konvensional.



Gambar 5.19 Pengaruh kuat tekan terhadap momen retak (untuk $\rho = 0.64\%$ and $\rho = 2.69\%$)



Gambar 5.20 Pengaruh kuat tekan terhadap momen retak (untuk $\rho = 1.18\%$ and $\rho = 1.84\%$)

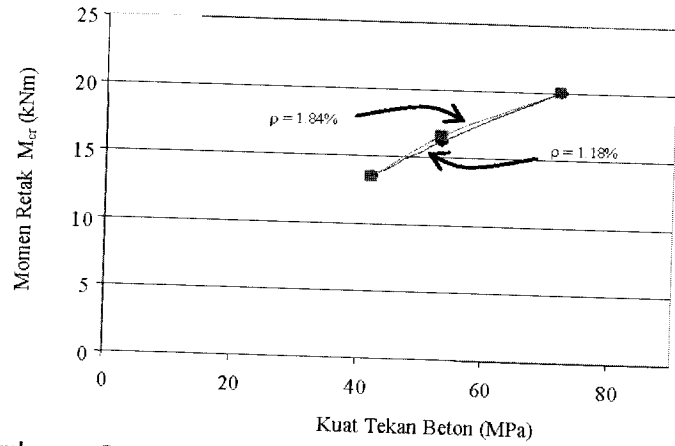
4. Kapasitas Lentur

Nilai momen maksimum yang terjadi pada saat defleksi maksimum di tengah bentang untuk setiap benda uji balok yang ditunjukkan pada Tabel 5.8.

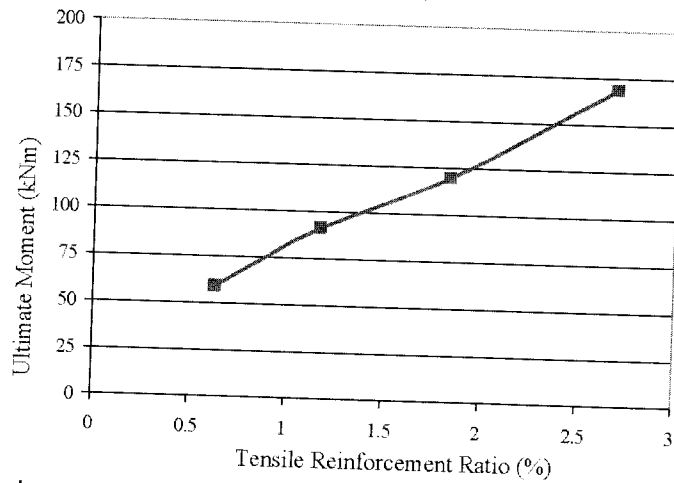
Tabel 5.8 Kapasitas lentur pengujian balok

Balok	Rasio Tulangan Tekan(%)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Defleksi di tengah bentang Saat Beban Runtuh (mm)	Momen Maksimum Hasil Pengujian (kNm)
GBI-1	0.64	37	56.63	56.30
GBI-2	1.18	42	46.01	87.65
GBI-3	1.84	42	27.87	116.85
GBI-4	2.69	37	29.22	162.50
GBII-1	0.64	46	54.27	58.35
GBII-2	1.18	53	47.20	90.55
GBII-3	1.84	53	30.01	119.0
GBII-4	2.69	46	27.47	168.7
GBIII-1	0.64	76	69.75	64.90
GBIII-2	1.18	72	40.69	92.90
GBIII-3	1.84	72	34.02	126.80
GBIII-4	2.69	76	35.85	179.95

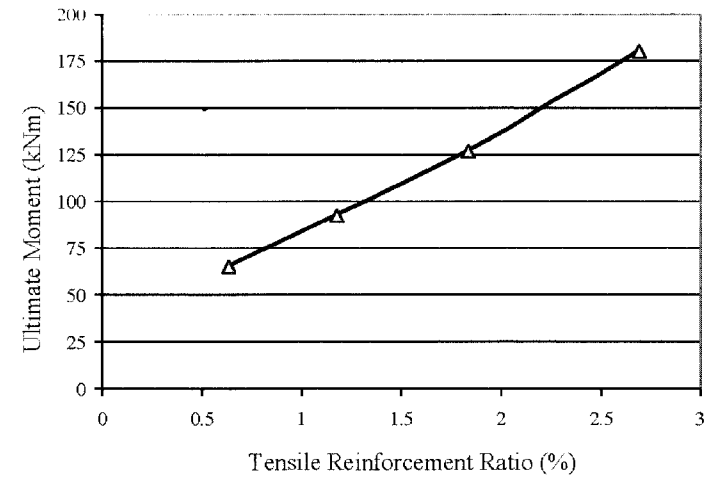
Gambar 5.21, 5.22 dan 5.23 menunjukkan pengaruh tulangan tekan terhadap kapasitas lentur balok. Kecenderungan dari hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur balok meningkat sejalan dengan peningkatan rasio tulangan tekan, yang artinya luasan tulangan mempengaruhi kapasitas lentur sebagaimana yang diharapkan sebelum dilakukan pengujian. Karena semua balok direncanakan dengan pola keruntuhan *under-reinforced*, maka peningkatan kapasitas lentur terjadi secara proporsional dengan penambahan luas tulangan tekan.



Gambar 5.21 Pengaruh rasio tulangan tekan terhadap kapasitas lentur balok (untuk seri GB-I)

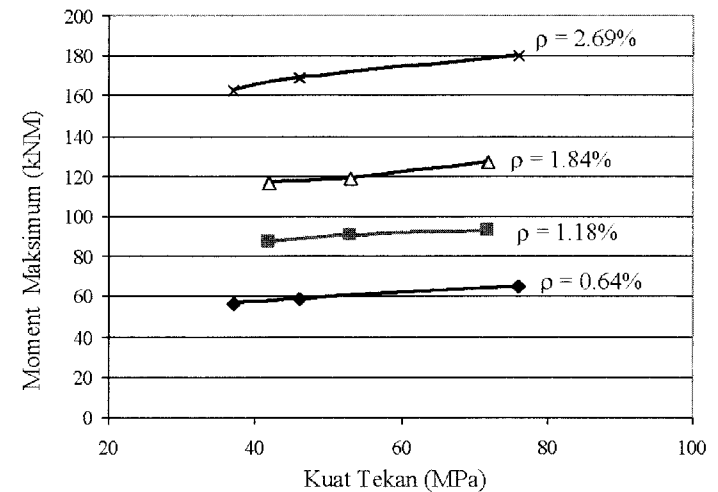


Gambar 5.22 Pengaruh rasio tulangan tekan terhadap kapasitas lentur balok (untuk seri GB-II)



Gambar 5.23 Pengaruh rasio tulangan tekan terhadap kapasitas lentur balok (untuk seri GB-III)

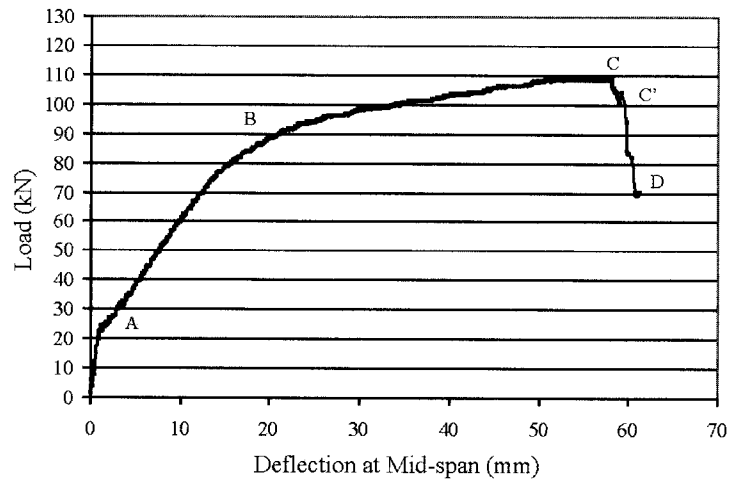
Kapasitas lentur dari balok juga dipengaruhi oleh kuat tekan beton sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.18. Karena balok direncanakan untuk runtuh pada kondisi *under-reinforced* maka pengaruh kuat tekan beton sangat marginal sebagaimana ditunjukkan melalui gambar berikut ini.



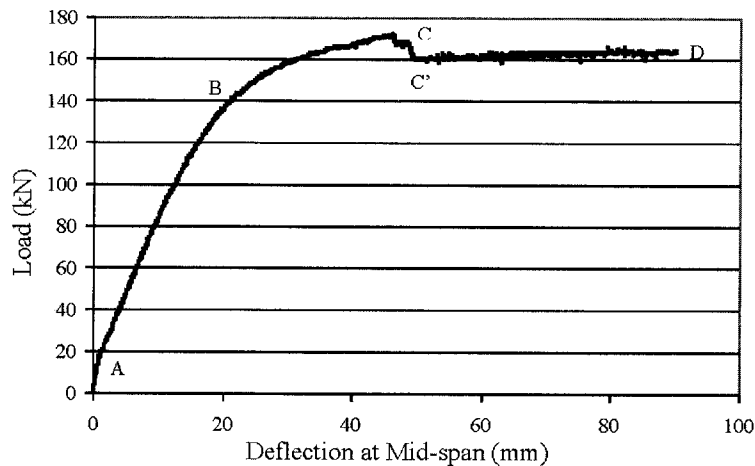
Gambar 5.24 Pengaruh kuat tekan beton terhadap kapasitas lentur balok

5. Defleksi

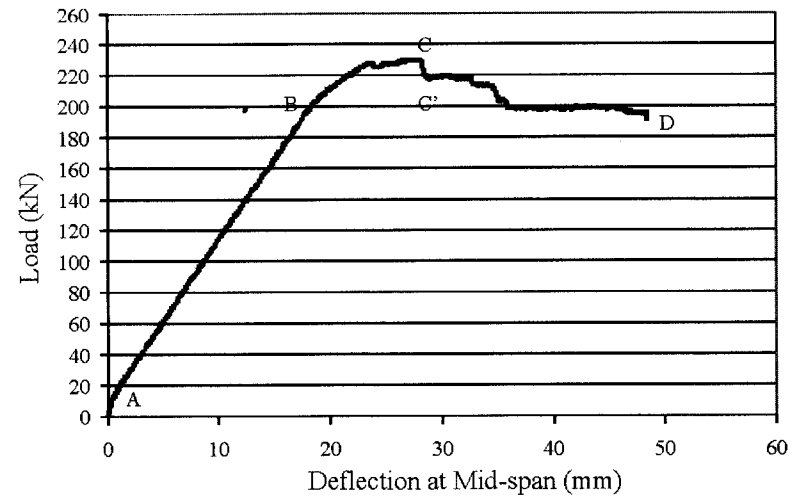
Kurva hubungan antara beban dan defleksi pada tengah bentang ditunjukkan pada Gambar 5.25 sampai Gambar 5.36. Data lengkap diberikan pada Lampiran A dan Lampiran B. Kejadian pada titik-titik penting sebagaimana dijelaskan pada Gambar 5.17 juga di tandai pada setiap grafik pada gambar-gambar berikut ini.



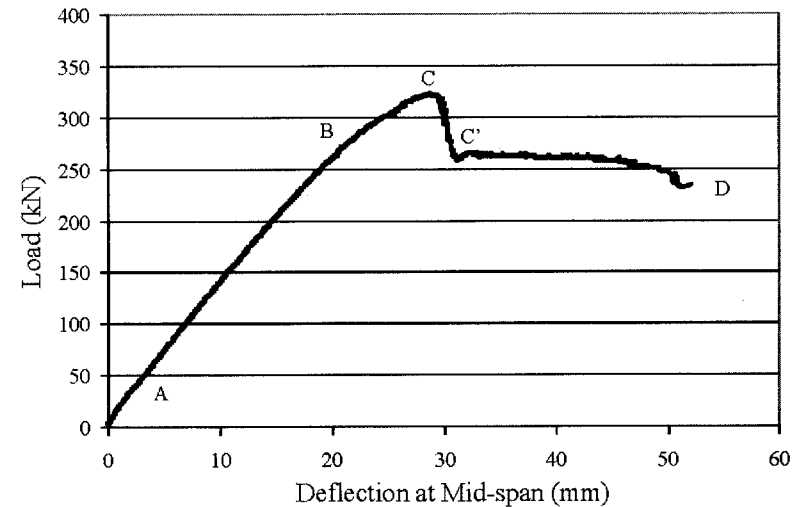
Gambar 5.25 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBI-1



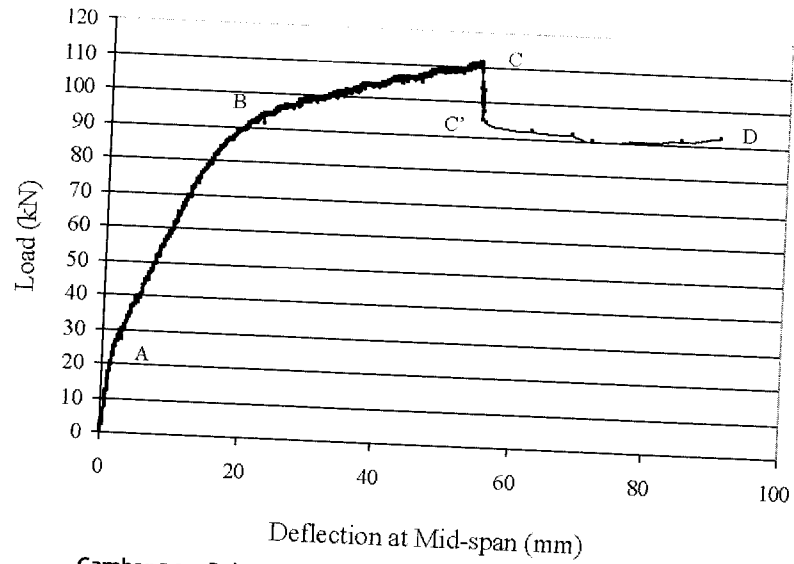
Gambar 5.26 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBI-2



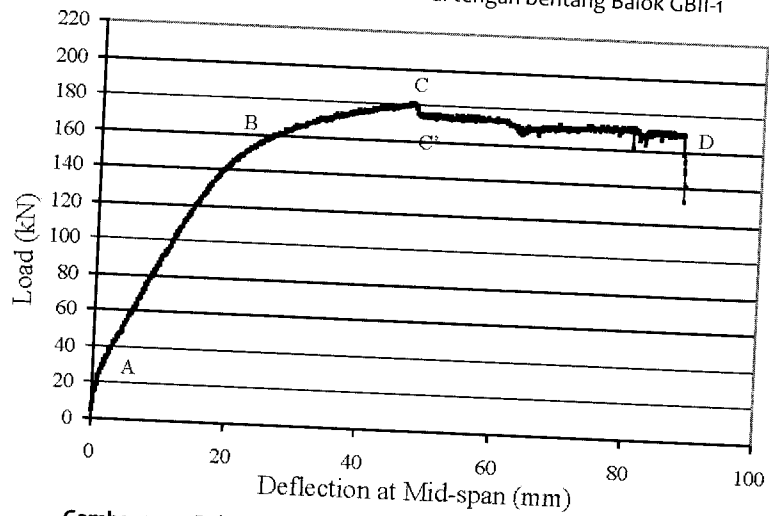
Gambar 5.27 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBI-3



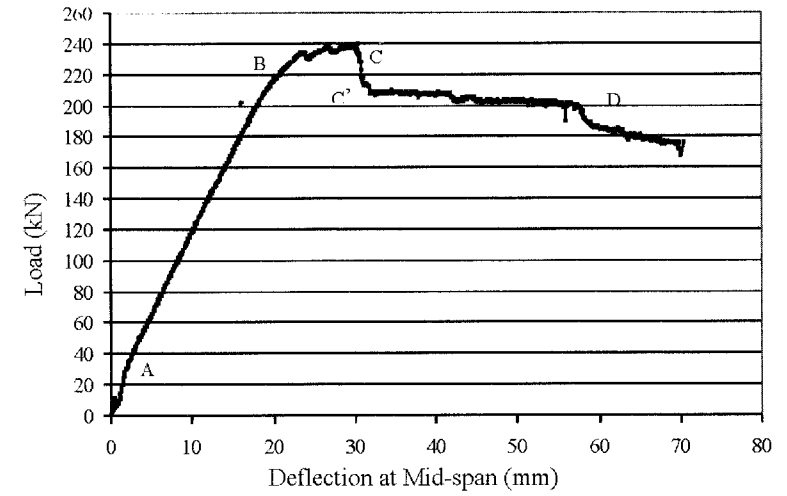
Gambar 5.28 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBI-4



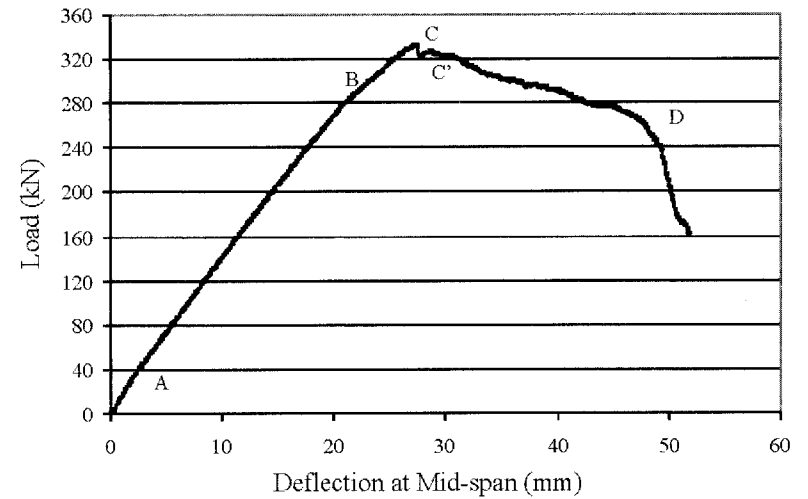
Gambar 5.29 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBII-1



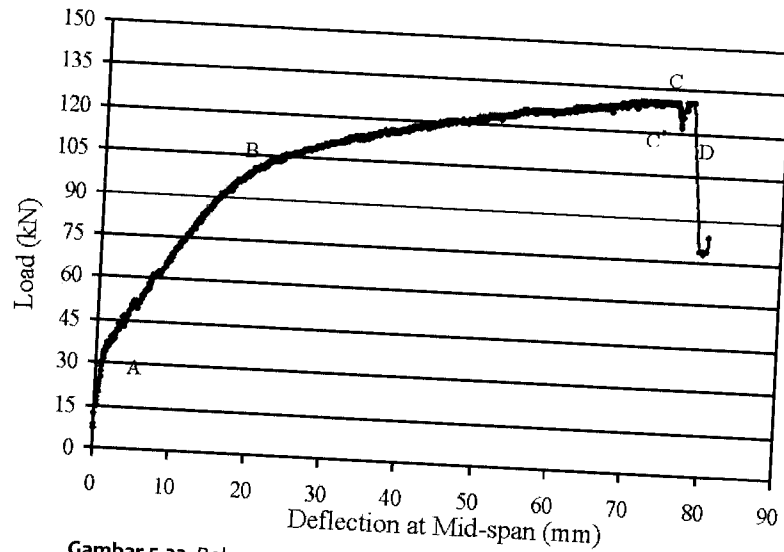
Gambar 5.30 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBII-2



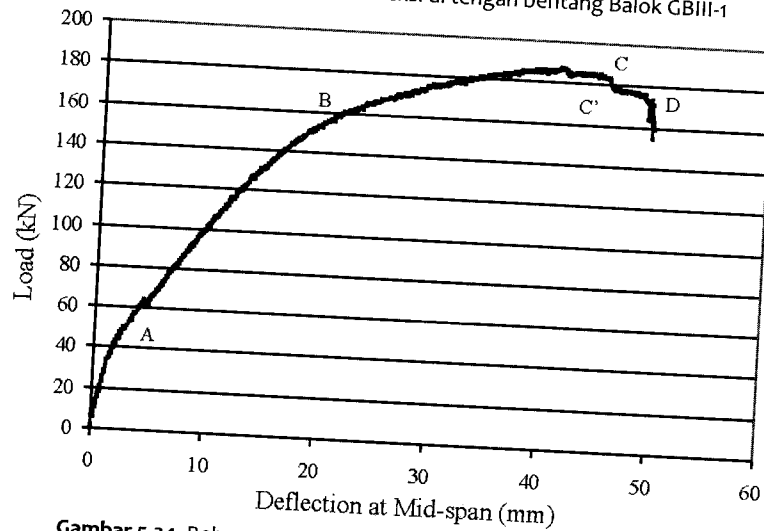
Gambar 5.31 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBII-3



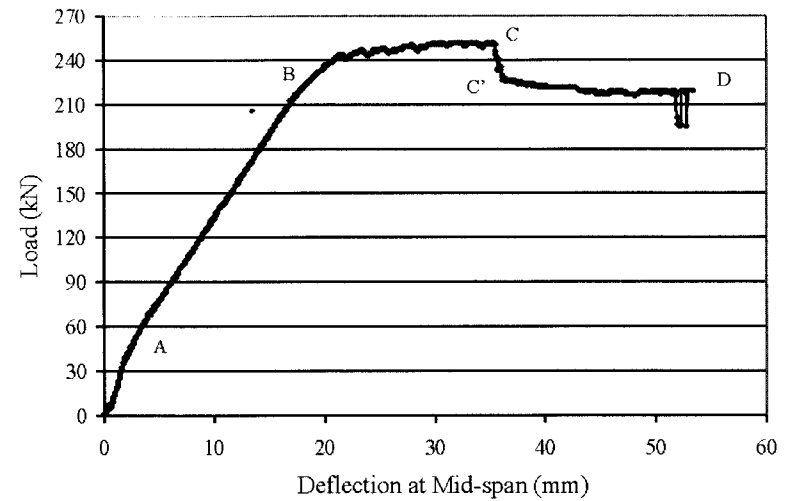
Gambar 5.32 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBII-4



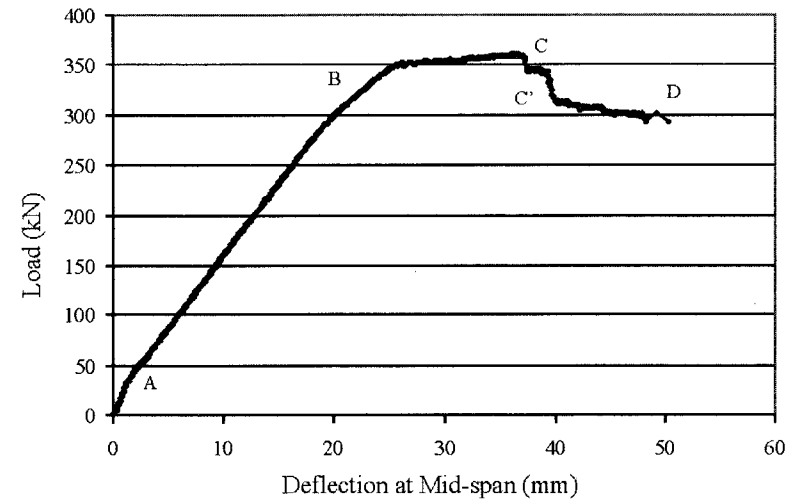
Gambar 5.33 Beban versus Defleksi di tengah bentang Balok GBIII-1



Gambar 5.34 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBIII-2



Gambar 5.35 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBIII-3



Gambar 5.36 Beban versus defleksi di tengah bentang Balok GBIII-4

Data hasil pengujian diplot pada Gambar 5.25 sampai Gambar 5.36 juga digunakan untuk mendapatkan defleksi dari beban layan atau *service load* (P_s) dan beban runtuh atau *failure load* (P_u). Untuk perhitungan, beban layan diambil sebesar $P_u/1,5$. Hasil perhitungannya adalah sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.9.

Tabel 5.9 Defleksi balok pada berbagai tingkat pembebanan

Balok	Rasio Tulangan Tarik (%)	Kuat Tekan Beton (MPa)	P pada beban Layan - P _s (kN)	Δ _s (mm)	Beban Runtuh - P _u (kN)	Δ _u (mm)
GBI-1	0.64	37	75	13.49	112.6	56.63
GBI-2	1.18	42	117	15.27	175.3	46.01
GBI-3	1.84	42	156	13.71	233.7	27.87
GBI-4	2.69	37	217	15.60	325.0	29.22
GBII-1	0.64	46	78	14.25	116.7	54.27
GBII-2	1.18	53	121	14.38	181.1	47.20
GBII-3	1.84	53	159	13.33	238.0	30.01
GBII-4	2.69	46	225	16.16	337.4	27.47
GBIII-1	0.64	76	87	14.10	129.8	69.75
GBIII-2	1.18	72	124	12.55	185.8	40.69
GBIII-3	1.84	72	169	12.38	253.6	34.02
GBIII-4	2.69	76	240	14.88	359.89	35.85

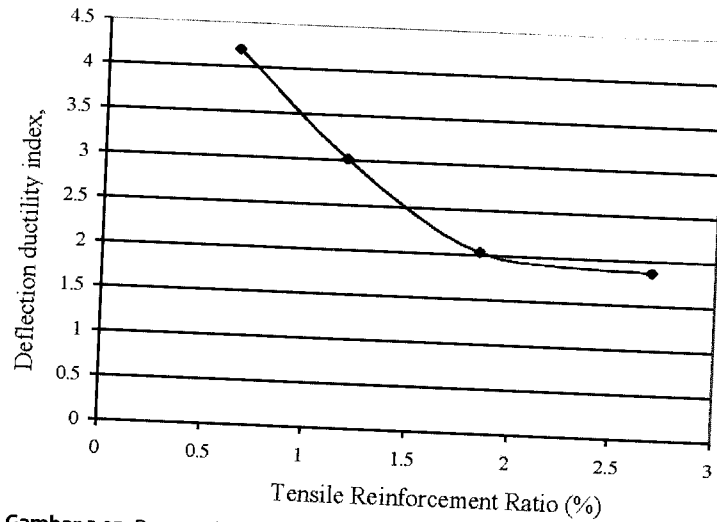
6. Daktilitas

Daktilitas balok diperoleh melalui perhitungan rasio antara defleksi pada Momen ultimate/batas, Δ_u dan defleksi pada momen leleh, Δ_y. Untuk itu M_y dihitung menggunakan teori elastis sebagaimana Persamaan 4.13. Defleksi yang terjadi pada M_y and M_u ditentukan oleh kurva *load-deflection* yang ditunjukkan pada Gambar 5.25 sampai Gambar 5.36. Indeks daktilitas μ_d selanjutnya dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.12. Tabel 5.10 memberikan nilai indeks daktilitas untuk semua benda uji balok beton bertulang geopolymer.

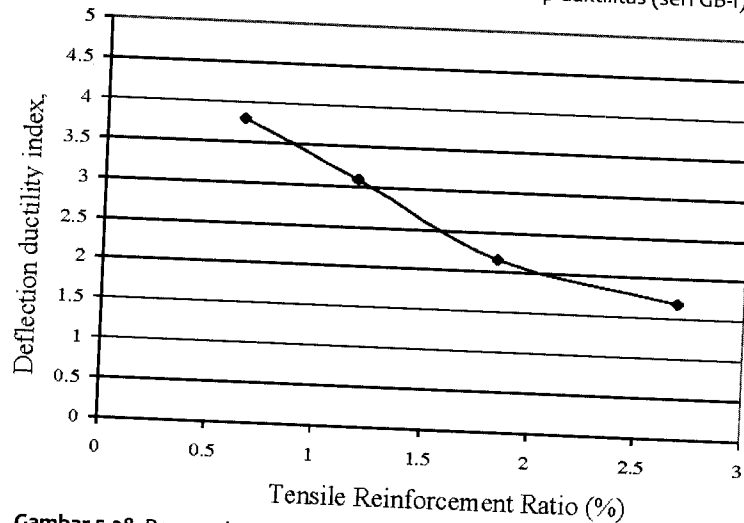
Tabel 5.10 Daktilitas balok

Balok	Kuat Tekan Beton (MPa)	Δ _y (mm)	Δ _u (mm)	Indeks Daktilitas μ _d = Δ _u /Δ _y
GBI-1	37	13.49	56.63	4.20
GBI-2	42	15.27	46.01	3.01
GBI-3	42	13.71	27.87	2.03
GBI-4	37	15.60	29.22	1.87
GBII-1	46	14.25	54.27	3.80
GBII-2	53	14.38	47.20	3.28
GBII-3	53	13.33	30.01	2.25
GBII-4	46	16.16	27.47	1.70
GBIII-1	76	14.10	69.75	4.95
GBIII-2	72	12.55	40.69	3.24
GBIII-3	72	12.38	34.02	2.74
GBIII-4	76	14.88	35.85	2.41

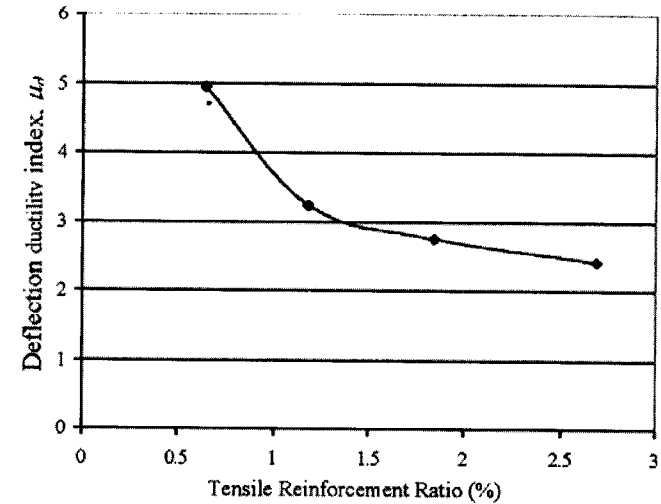
Gambar 5.37 sampai Gambar 5.39 menunjukkan pengaruh tulangan tekan terhadap indeks daktilitas. Hal ini menunjukkan bahwa indeks daktilitas mengecil pada keadaan luas tulangan tekan bertambah. Indeks daktilitas meningkat tinggi untuk rasio tulangan tekan lebih kecil dari 2%, sedangkan daktilitas hampir tidak dipengaruhi pada rasio tulangan tekan lebih besar dari 2%. Kecenderungan ini sama seperti yang diteliti pada balok beton bertulang konvensional sebagaimana hasil penelitian dari Rashid dan Mansur (2005), dan Ahmad dan Baker (1991).



Gambar 5.37 Pengaruh rasio tulangan tekan terhadap daktilitas (seri GB-I)



Gambar 5.38 Pengaruh rasio tulangan tekan terhadap daktilitas (seri GB-II)



Gambar 5.39 Pengaruh rasio tulangan tekan terhadap daktilitas (seri GB-III)

5.3 PERILAKU KOLOM BETON BERTULANG GEOPOLYMER

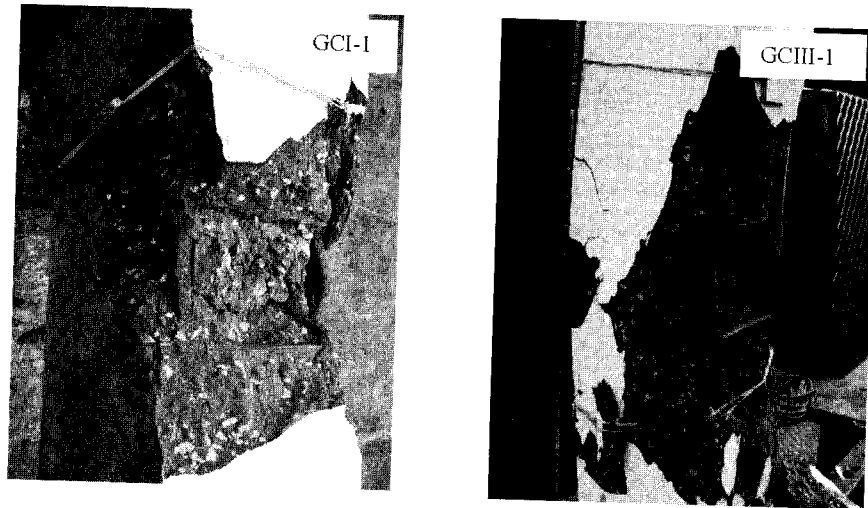
1. Sifat Umum Kolom Beton Bertulang Geopolymer

Semua kolom diuji dengan dibebani secara monoton pada nilai eksentrisitas tertentu sampai terjadi kegagalan elemen. Eksentrisitas beban, kuat tekan beton, dan rasio tulangan longitudinal mempengaruhi kapasitas beban dari semua benda uji kolom beton bertulang geopolymer. Kapasitas beban meningkat sejalan dengan peningkatan kuat tekan dan rasio tulangan longitudinal. Kapasitas pembebanan kolom akan menurun saat nilai eksentrisitas bertambah besar.

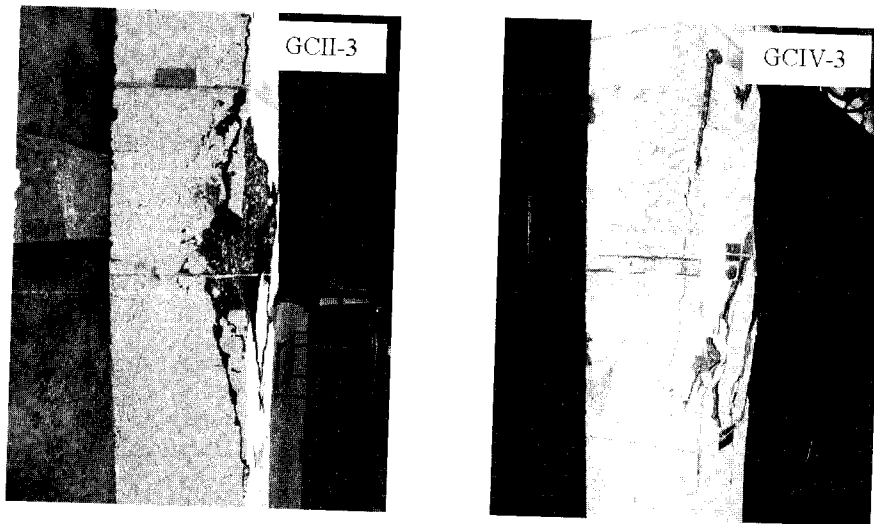
2. Pola Retak dan Keruntuhan

Pada semua kasus, retak awal terjadi pada tengah bentang kolom di daerah/permukaan tertarik. Pada saat beban bertambah, retak tersebut membesar dan retakan baru lainnya terjadi sepanjang permukaan kolom pada daerah tertarik. Lebar dan panjang retak tergantung pada lokasi mana retak itu berada. Retakan pada tengah bentang yang merupakan

retak awal akan semakin lebar saat mendekati kegagalan kolom memikul aplikasi beban. Beberapa jenis retak yang tipikal dan kehancuran benda uji kolom dapat dilihat pada Gambar 5.40 dan 5.41.



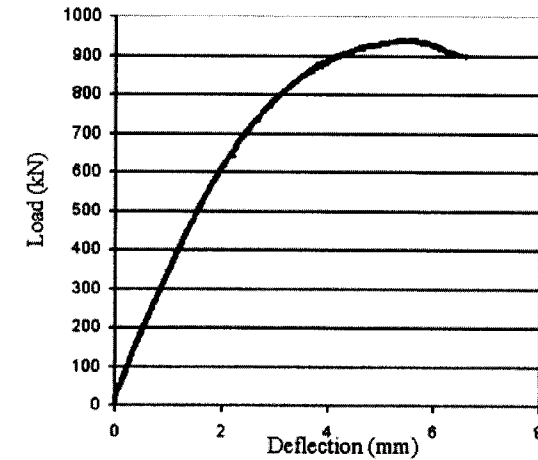
Gambar 5.40 Kehancuran Kolom GCI-1 dan GCIII-1



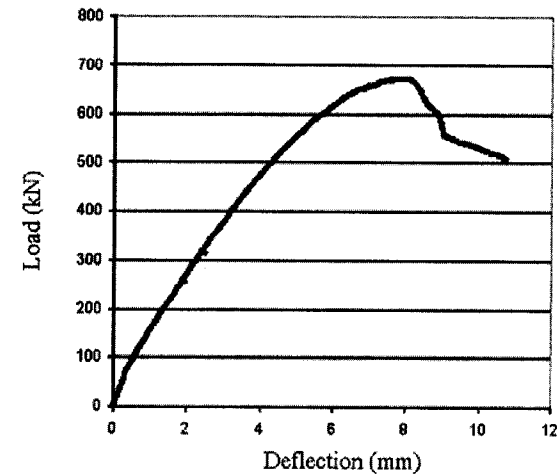
Gambar 5.41 Kehancuran Kolom GCII-3 and GCIV-3

3. Hubungan Beban dan Defleksi

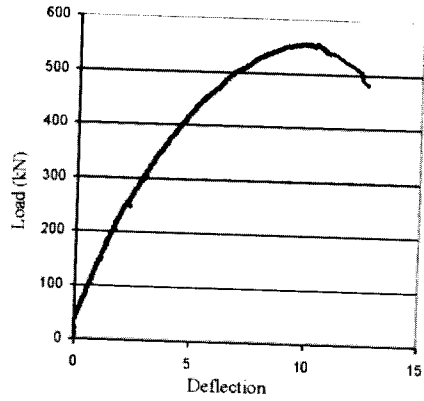
Kurva hubungan antara beban dan defleksi kolom yang telah diuji dapat dilihat pada Gambar 5.42 sampai Gambar 5.53. Data lengkap terdapat pada Lampiran A dan Lampiran B. Sebagaimana diprediksi, defleksi pada beban runtuh mengecil saat eksentrisitas beban menurun. Defleksi menurun pada rasio tulangan baja dan kuat tekan ditingkatkan.



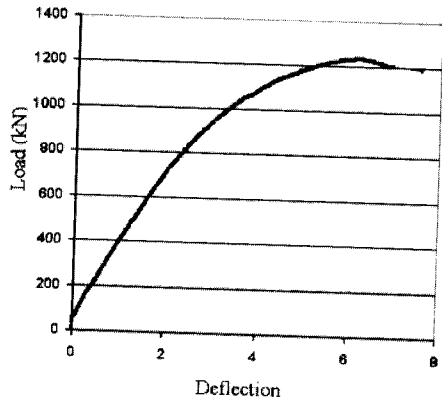
Gambar 5.42 Kurva Beban dan Defleksi di tengah bentang Kolom (GCI-1)



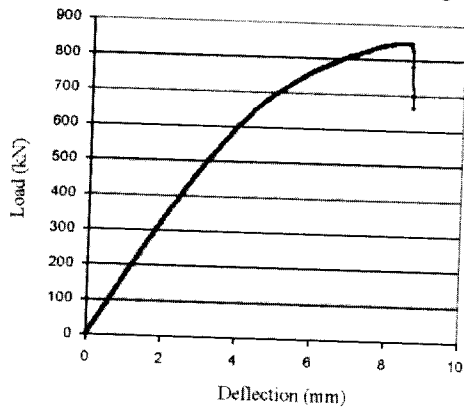
Gambar 5.43 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCI-2)



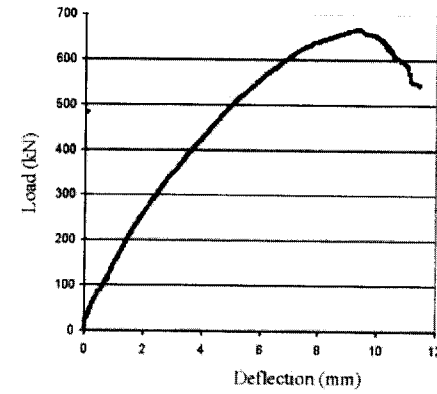
Gambar 5.44 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCI-3)



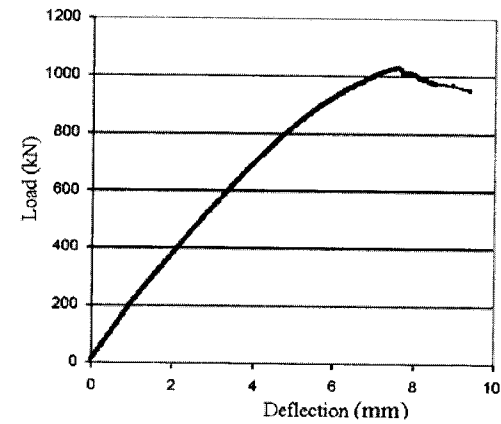
Gambar 5.45 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCII-1)



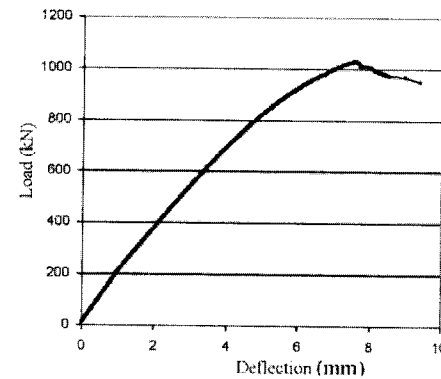
Gambar 5.46 Kurva Beban dan Defleksi di tengah bentang Kolom (GCII-2)



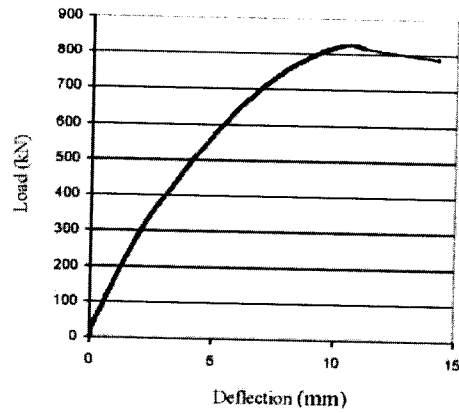
Gambar 5.47 Kurva Beban dan Defleksi di tengah bentang Kolom (GCII-3)



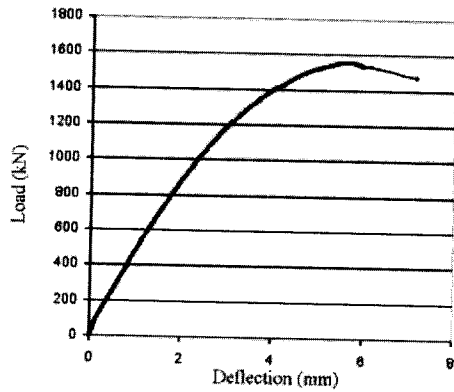
Gambar 5.48 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCIII-1)



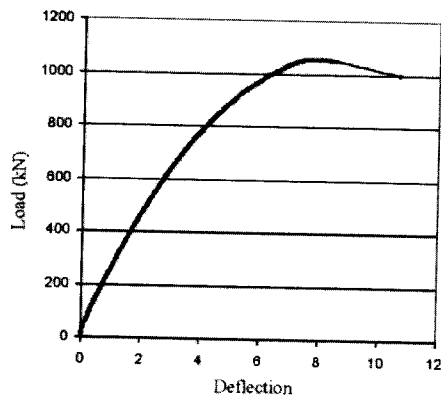
Gambar 5.49 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCIII-2)



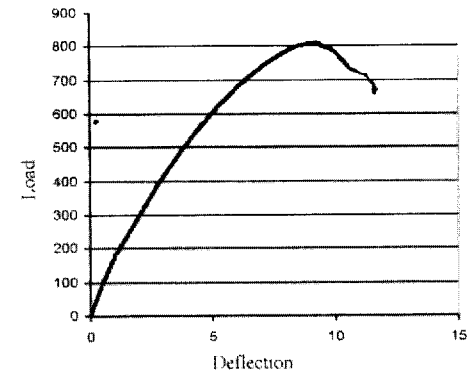
Gambar 5.50 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCI-3)



Gambar 5.51 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCI-1)



Grafik 5.52 Kurva Beban dan Defleksi di tengah bentang Kolom (GCI-2)



Grafik 5.53 Kurva beban dan defleksi di tengah bentang Kolom (GCI-3)

4. Kapasitas Memikul Beban

Hasil pengujian diberikan pada Tabel 5.11 dimana kapasitas memikul beban setiap kolom sangat dipengaruhi oleh eksentrisitas beban, kuat tekan beton dan rasio tulangan longitudinal. Sesuai dengan yang diharapkan, saat eksentrisitas beban diperkecil, maka kapasitas kolom memikul beban meningkat. Kapasitas memikul beban juga naik, manakala kuat tekan beton dan rasio tulangan longitudinal membesar.

Table 5.11 Hasil Pengujian Kolom

Kolom No.	Kuat Tekan Beton (MPa)	Eksentrisitas beban (mm)	Tulangan Longitudinal		Pada saat Hancur/Gagal	
			Tulangan	Rasio (%)	Beban Hancur (kN)	Defleksi pada tengah bentang saat beban hancur
GCI-1	42	15	4Y12	1.47	940	5.44
GCI-2	42	35	4Y12	1.47	674	8.02
GCI-3	42	50	4Y12	1.47	555	10.31
GCI-1	43	15	8Y12	2.95	1237	6.24
GCI-2	43	35	8Y12	2.95	852	9.08
GCI-3	43	50	8Y12	2.95	666	9.40
GCI-1	66	15	4Y12	1.47	1455	4.94

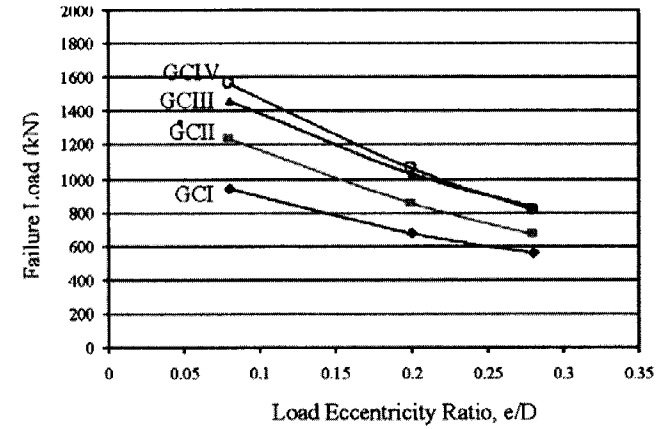
Kolom No.	Kuat Tekan Beton (MPa)	Eksentrisitas beban (mm)	Tulangan Longitudinal		Pada saat Hancur/Gagal	
			Tulangan	Rasio (%)	Beban Hancur (kN)	Defleksi pada tengah bentang saat beban hancur
GCIH-2	66	35	4Y12	1.47	1030	7.59
GCIH-3	66	50	4Y12	1.47	827	10.70
GCIV-1	59	15	8Y12	2.95	1559	5.59
GCIV-2	59	35	8Y12	2.95	1057	7.97
GCIV-3	59	50	8Y12	2.95	810	9.18

5. Defleksi Kolom

Defleksi sepanjang bentang pada kolom untuk setiap variasi pembebanan dapat dilihat pada Lampiran A dan Lampiran B. Data ini didapatkan melalui LVDT yang ditempatkan pada lokasi tertentu sepanjang bentangan kolom. Hubungan antara beban versus defleksi didapati tidak linier. Sebagaimana yang diharapkan, defleksi di tengah bentang kolom menurun saat eksentrisitas beban kecil. Kolom dengan rasio penulangan yang tinggi terdefleksi lebih kecil dibanding dengan kolom yang memiliki rasio tulangan longitudinal rendah. Dengan kata lain semakin tinggi rasio tulangan longitudinal maka semakin kecil defleksi yang terjadi ditengah bentang kolom beton bertulang geopolymer.

6. Pengaruh Eksentrisitas

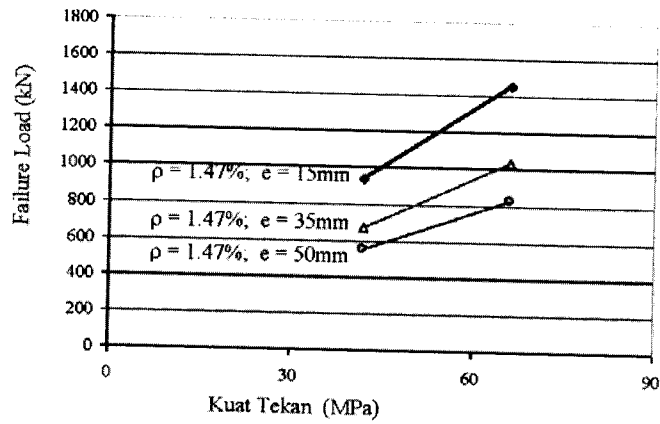
Gambar 5.54 menunjukkan hubungan antara beban runtuh dengan eksentrisitas beban pada kolom yang diuji, dimana beban runtuh mengecil saat eksentrisitas beban diperbesar.



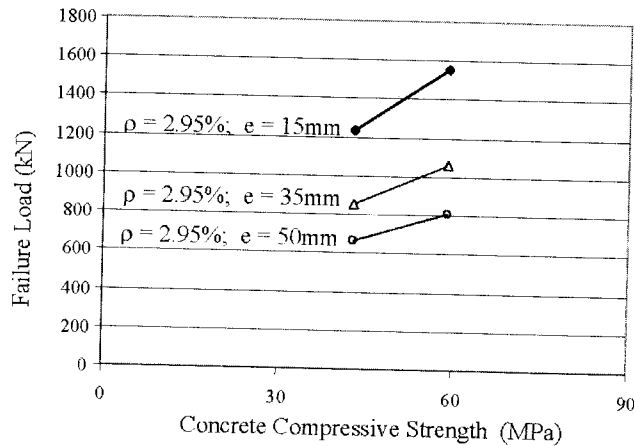
Gambar 5.54 Pengaruh eksentrisitas

7. Pengaruh Kuat Tekan

Pengaruh kuat tekan beton pada kemampuan kolom untuk memikul beban dapat dilihat pada Gambar 5.55 dan 5.56. Kedua grafik tersebut menunjukkan kolom dengan kuat tekan tinggi memberikan kapasitas memikul beban yang tinggi juga. Kuat tekan tinggi meningkatkan kekakuan kolom sehingga kapasitas memikul beban juga meningkat. Selanjutnya, kapasitas memikul beban yang tinggi dapat dijelaskan melalui hubungan beban-defleksi. Karena defleksi merupakan faktor utama penentu kapasitas memikul beban dari kolom, maka semakin tinggi defleksi mengakibatkan terjadi penurunan pada kemampuan memikul beban kolom.



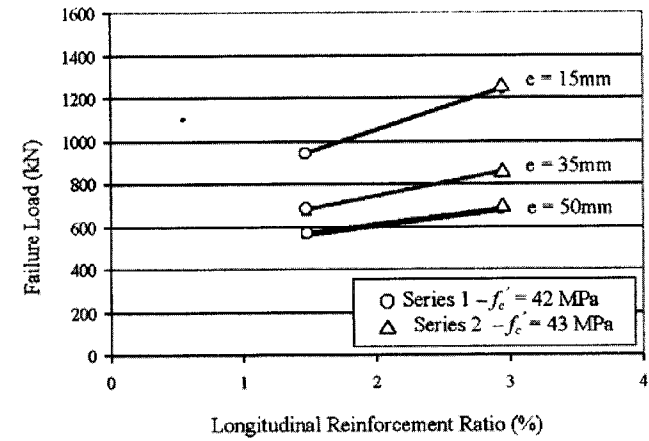
Gambar 5.55 Pengaruh kuat tekan pada kekuatan kolom (seri GCII dan GCIII)



Gambar 5.56 Pengaruh kuat tekan pada kekuatan kolom (seri GCII dan GCIV)

8. Pengaruh Tulangan Longitudinal

Pengaruh rasio tulangan longitudinal terhadap beban runtuh ditampilkan pada Gambar 5.57. Sebagaimana diharapkan, peningkatan rasio tulangan longitudinal akan meningkatkan beban runtuh kolom tersebut.



Gambar 5.57 Pengaruh tulangan longitudinal

BAB 6

KORELASI PERILAKU ELEMEN STRUKTUR BETON BERTULANG KONVENSIONAL DENGAN BETON BERTULANG GEOPOLYMER

6.1 BALOK BETON BERTULANG GEOPOLYMER

1. Momen Retak

Nilai teoritis momen retak M_{cr} diperoleh melalui Persamaan 4.10. Dalam hitungan ini kekuatan lentur tekan sebesar $0.6\sqrt{f_c}$ (Pasal 6.1.1.2, AS 3600), dan regangan akibat *shrinkage* didasarkan pada data regangan hasil pengujian oleh Wallah *et al.* (2004) untuk *heat-cured low-calcium fly ash-based geopolymer* yang merupakan jenis beton geopolymer yang sama digunakan pada elemen balok dan kolom. Perhitungan momen retak dibandingkan dengan momen retak hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 6.1. Nilai rata-rata hasil pengujian dan hasil hitungan momen retak sebesar 1,35 dengan standar deviasi sebesar 0,088.

Tabel 6.1 Korelasi hasil pengujian dan hasil perhitungan momen retak

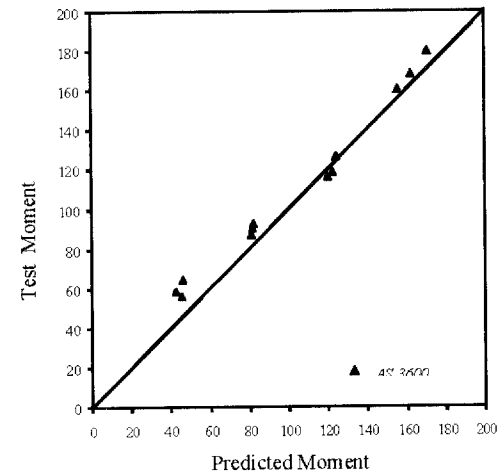
Balok	Rasio Tulangan Tekan (%)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Momen pada Retak Awal (1 st Crack - M_{cr}) (kNm)	Perhitungan Momen Retak (kNm)	Ratio Test/Pred
GBI-1	0.64	37	13.40	10.39	1.28
GBI-2	1.18	42	13.55	10.86	1.24
GBI-3	1.84	42	13.50	10.61	1.27
GBI-4	2.69	37	14.30	9.66	1.48
GBII-1	0.64	46	15.00	11.65	1.28
GBII-2	1.18	53	16.20	12.27	1.32
GBII-3	1.84	53	16.65	12.02	1.38
GBII-4	2.69	46	16.05	10.91	1.47
GBIII-1	0.64	76	19.00	15.13	1.25
GBIII-2	1.18	72	20.00	14.43	1.38
GBIII-3	1.84	72	21.00	14.18	1.48
GBIII-4	2.69	76	19.90	14.39	1.38
Average					1.35
Standard Deviation					0.088

2. Kapasitas Lentur

Kekuatan lentur balok dihitung dengan menggunakan provisi AS 3600 sebagaimana dibahas pada Bab 4 (bagian 4.1.1). Nilai hasil pengujian dibandingkan dengan hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 6.2 dan Tabel 6.3. Untuk balok dengan rasio tulangan tekan sebesar 1,18%, 1,84% dan 2,69% memiliki hasil yang sebanding antara pengujian dan hasil perhitungan. Sedangkan untuk balok GBI-1, GBII-1 dan GBIII-1, dengan rasio tulangan tekan 0,64%, hasil perhitungan sangat konservatif mengingat tidak diperhitungkan adanya *strain hardening* tulangan baja pada lentur maksimum. Secara keseluruhan, rasio rata-rata antara hasil pengujian terhadap hasil perhitungan sebesar 1,11 dengan standar deviasi sebesar 0,135.

Tabel 6.2 Perbandingan momen batas antara hasil pengujian dengan perhitungan menurut AS 3600

Balok	Rasio Tulangan Tekan (%)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Defleksi tengah Bentang pada Beban Runtuh (mm)	Momen Batas (kNm)		Rasio Pengujian/Perhitungan
				Pengujian	Perhitungan	
GBI-1	0.64	37	56.63	56.30	45.17	1.24
GBI-2	1.18	42	46.01	87.65	80.56	1.09
GBI-3	1.84	42	27.87	116.85	119.81	0.98
GBI-4	2.69	37	29.22	160.50	155.31	1.03
GBII-1	0.64	46	54.27	58.35	42.40	1.28
GBII-2	1.18	53	47.20	90.55	81.50	1.11
GBII-3	1.84	53	30.01	119.0	122.40	0.97
GBII-4	2.69	46	27.47	168.7	162.31	1.04
GBIII-1	0.64	76	69.75	64.90	45.69	1.42
GBIII-2	1.18	72	40.69	92.90	82.05	1.13
GBIII-3	1.84	72	34.02	126.80	124.17	1.02
GBIII-4	2.69	76	35.85	179.95	170.59	1.05
Rata-rata						1.11
Standar Deviasi						0.135



Gambar 6.1 Perbandingan hasil pengujian dan perhitungan momen batas

Tabel 6.3 Perbandingan hasil pengujian dan perhitungan defleksi

Balok	P_s (kN)	$\Delta_{exp.}$ (mm)	$\Delta_{cal.}$ (mm)	Rasio= $\Delta_{exp.}/\Delta_{cal.}$
GBI-1	75	13.49	11.88	1.17
GBI-2	117	15.27	12.49	1.25
GBI-3	156	13.71	12.41	1.14
GBI-4	217	15.60	14.21	1.14
GBII-1	78	14.25	11.91	1.21
GBII-2	121	14.38	12.58	1.20
GBII-3	159	13.33	12.36	1.14
GBII-4	225	16.16	14.18	1.17
GBIII-1	87	14.10	12.07	1.21
GBIII-2	124	12.55	12.41	1.08
GBIII-3	169	12.38	12.59	1.05
GBIII-4	240	14.88	14.16	1.10
Rata-rata				1.15
Standar Deviasi				0.059

3. Defleksi

Defleksi maksimum pada tengah bentang akibat beban layan dihitung menurut *Elastic Bending Theory* untuk disain kemampuan layan (*serviceability design*) sesuai standar AS 3600. Menurut standar tersebut perhitungan untuk defleksi akibat beban jangka pendek harus mempertimbangkan pengaruh momen retak, *tension stiffening*, dan properti *shrinkage* dari beton. Dalam perhitungan ini, momen retak diambil dari nilai yang terdapat pada Tabel 6.1. Modulus elastisitas beton, E_c , diinterpolasi dari data pengukuran laboratorium yang dilaporkan oleh Hardjito and Rangan (2005) yang menggunakan jenis beton geopolymer yang sama digunakan pada balok beton bertulang geopolymer.

Defleksi maksimum pada beban layan dihitung melalui persamaan defleksi elastis melalui persamaan 4.11. Momen inersia efektif, I_{ef} , dihitung menggunakan Persamaan 4.9. Perbandingan antara hasil perhitungan

dan hasil pengujian defleksi pada beban layan diberikan pada Tabel 6.3. Rasio rata-rata antara hasil pengujian dan hasil perhitungan sebesar 1,15 dengan standar deviasi 0,059.

6.2 KOLOM BETON BERTULANG GEOPOLYMER

Kapasitas memikul beban dari kolom dihitung berdasarkan analisis penyederhanaan stabilitas, dan metode pembesaran momen yang direkomendasikan oleh AS 3600 dan ACI 318. Program komputer telah dibuat untuk memudahkan perhitungan menggunakan ketiga metode diatas.

1. Penyederhanaan Analisis Stabilitas Kolom

Analisis penyederhanaan stabilitas yang diusulkan oleh Rangan (1990) dan saat ini sudah digunakan secara luas untuk menghitung kapasitas memikul beban elemen struktur kolom telah digunakan untuk menghitung kapasitas memikul beban dari kolom. Penjelasan singkat metode ini diberikan pada Bab 4 sub-bagian 4.2.4. Langkah-langkah berikut ini menunjukkan cara perhitungan metode tersebut. Pada perhitungan ini, *creep* akibat defleksi jangka panjang (*long-term*) sudah termasuk yang diperhitungkan. Jadi, Δ_{cp} diambil nol untuk kolom yang diuji. Prosedur perhitungan adalah sebagai berikut:

1. Dengan diketahuinya penampang kolom, dan properti material maka diagram interaksi N dan M dapat digambar. Analisis lentur yang biasanya digunakan pada perhitungan balok atau kolom digunakan untuk menghitung diagram interaksi tersebut sebagaimana dijelaskan melalui Warner *et al.* (1998).
2. Perkirakan nilai dari beban runtuh, P_u .
3. Ambil $P_u = N$ dan tentukan nilai M dari diagram interaksi untuk penampang kolom bersangkutan. Ambil harga $M = M_e$.

4. Hitung Δ_p dari Persamaan 4.29 dan 4.30, pilih mana yang sesuai dengan kondisi yang ada.
5. Untuk kedua nilai M_e and Δ_p , Hitung P_u dengan Persamaan 4.28.

Gunakan nilai of P_u yang baru diperoleh tersebut dan ulangi lagi proses 3 – 6 sampai memperoleh hasil yang konvergen.

2. Metode Pembesaran Momen

Prosedur untuk menghitung kapasitas memikul beban dari kolom dapat menggunakan metode pembesaran momen yang terdapat pada standar AS 3600 dan ACI 318 yang dijelaskan sebagai berikut:

1. Gambarkan diagram interaksi (N-M) untuk penampang kolom dan properti material dari kolom yang akan dianalisa.
2. Asumsi nilai coba-coba P_u .
3. Tentukan $P_u = N$, dan melalui diagram interaksi tentukan nilai M yang berkaitan dengan nilai N. Ambil $M = M_e$.
4. Untuk nilai M_e yang ada, hitung beban runtuh, P_u dengan menggunakan persamaan metode pembesaran momen yang diusulkan oleh AS 3600 maupun ACI 318.

Gunakan nilai P_u yang didapat untuk mengulangi langkah ke 3-5 sampai memperoleh hasil yang konvergen.

3. Perbandingan Beban Runtuh (Comparison of Test to Predicted Failure Load)

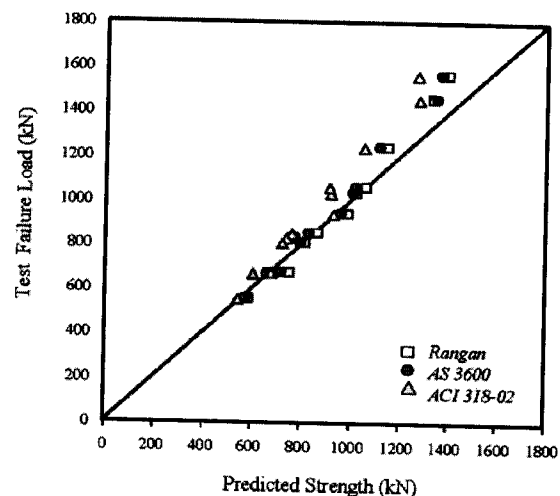
Beban runtuh hasil analisis dibandingkan dengan beban runtuh hasil pengujian dan dapat dilihat pada Tabel 6.4. Harga rata-rata beban runtuh hasil pengujian terhadap hasil analisis menurut Rangan (1990) sebesar 1,01 dengan standar deviasi 6,6%. Sementara menurut AS 3600 sebesar 1,03 dengan standar deviasi 5,9%, sedangkan menurut ACI 318-02 sebesar 1,11 dengan standar deviasi 7,7%. Pada Gambar 6.2 ditunjukkan

hubungan antara hasil perhitungan dan hasil pengujian dalam sebuah diagram perbandingan. Hasil ini menunjukkan bahwa metode perhitungan yang umum digunakan untuk menghitung kapasitas beban kolom beton bertulang konvensional dapat juga diaplikasikan untuk mengevaluasi kapasitas memikul beban kolom beton bertulang geopolymer.

Tabel 6.4 Perbandingan hasil pengujian dengan perhitungan beban runtuh

	f'_c (MPa)	e (mm)	ρ (%)	Beban Runtuh Pengujian (kN)	Perhitungan Teoritis Beban Runtuh (kN)			Rasio Beban Runtuh*		
					Rangan	Kolom	ACI 318-02	1	2	3
GCI-1	42	15	1.47	940	988	962	926	0.95	0.98	1.01
GCI-2	42	35	1.47	674	752	719	678	0.90	0.94	0.99
GCI-3	42	50	1.47	555	588	573	541	0.94	0.97	1.03
GCII-1	43	15	2.95	1237	1149	1120	1050	1.08	1.10	1.18
GCII-2	43	35	2.95	852	866	832	758	0.98	1.02	1.12
GCII-3	43	50	2.95	666	673	665	604	0.99	1.00	1.10
GCIII-1	66	15	1.47	1455	1336	1352	1272	1.09	1.08	1.14
GCIII-2	66	35	1.47	1030	1025	1010	917	1.00	1.02	1.12
GCIII-3	66	50	1.47	827	773	760	738	1.07	1.09	1.12
GCIV-1	59	15	2.95	1559	1395	1372	1267	1.11	1.14	1.23
GCIV-2	59	35	2.95	1057	1064	1021	911	0.99	1.04	1.16
GCIV-3	59	50	2.95	810	815	800	723	0.99	1.01	1.12
Mean								1.01	1.03	1.11
Standar Deviasi								0.066	0.059	0.077

*1 = Test/ Rangan; 2 = Test/AS3600; 3 = Test/ACI318-02



Gambar 6.2 Perbandingan hasil pengujian dan perhitungan beban runtuh

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 318-02 (2002) "Building Code Requirements for Structural Concrete." Dilaporkan oleh ACI Committee 318, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- ACI 232.2R-03 (2003) "Use of Fly Ash in Concrete." Dilaporkan oleh ACI Committee 232, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Ahmad, S.H., and Barker, R. (1991) "Flexural Behaviour of Reinforced High-Strength Lightweight Concrete Beams." *ACI Structural Journal*, V.88:1, pp.69-77
- Balaguru, P N, Kurtz, S, & Rudolph, J. (1997) "Geopolymer for Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams." The State University of New Jersey Rutgers, Geopolymer Institute:5.
- Basappa, S., and Rangan, B.V. (1996) "Failure Load on High-Strength Concrete (HSC) Columns Under Eccentric Compression." *Australian Civil/Structural Engineering Trns*, Vol.CE39, No.1, pp.19-30
- Bhanumathidas, N. and Kalidas, N. (2004) "Fly ash for Sustainable Development." *Ark communications*, Chennai.

- Branson, D.E. (1963) "Instantaneous and Time-Dependent Deflections of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams." Report No. 7, Alabama Highway Research Report, Bureau of Public Roads, pp.1-78
- Brooke, N.J., Keyte, L.M., South, W., Megget, L.M., and Ingham, J.M. (2005) "Seismic Performance of 'Green Concrete' Interior Beam-Column Joints." In Proceeding of Australian Structural Engineering Conference (ASEC), September 2005, Newcastle.
- Cheng, T. W. and Chiu J.P. (2003) "Fire-resistant Geopolymer Produced by Granulated Blast Furnace Slag." *Minerals Engineering* 16(3): pp. 205-210.
- Cross, D., Stephens, J., and Vollmer, J. (2005) "Field Trials Of 100% Fly Ash Concrete." *Concrete International*, Vol.27:9, pp.47- 51
- Davidovits, J. & Sawyer, J. L. (1985) Early high-strength mineral, US Patent No.4, 509,985, 1985.
- Davidovits, J. (1988) "Soft Mineralurgy and Geopolymers." In proceeding of Geopolymer 88 International Conference, the Université de Technologie, Compiègne, France.
- Davidovits, J. (1994) "High-Alkali Cements for 21st Century Concretes. in Concrete Technology, Past, Present and Future." In proceedings of V. Mohan Malhotra Symposium. 1994. Editor: P. Kumar Metha, ACI SP- 144. pp. 383-397.
- Davidovits, J. (1999) "Chemistry of geopolymer systems, terminology." In Proceedings of Geopolymer '99 International Conferences, France.
- Domingo, J., Carreira, J., and Chu, K.H. (1985) "Stress-Strain Relationship for Plain Concrete in Compression." *ACI Journal* No.82-72, pp.797-804
- Gourley, T. (2000) "Inorganic Polymer." Personal Communication.

- Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V. (2002) "Study on Engineering Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete." *Journal of the Australasian Ceramic Society*, vol. 38, no. 1, pp. 44-47.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. & Rangan B. V. (2004a) "Properties of Geopolymer Concrete with Fly Ash as Source Material: Effect of Mixture Composition." In Proceedings of the Seventh CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Las Vegas, SP-222-8, pp. 109-118.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. & Rangan B. V. (2004b) "On the development of fly ash based geopolymer concrete." Technical paper No. 101-M52, *ACI Material Journal*, Vol. 101, No. 6, November-December, American Concrete Institute.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. & Rangan, B. V. (2004c) "The Stress-Strain Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete." In *Development in Mechanics of Structures & Materials*, vol. 2, Eds. A.J. Deeks and Hong Hao, A.A. Balkema Publishers - The Netherlands, pp. 831-834.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J. & Rangan, B. V. (2005) "Effect of Mixing Time and Rest Period on the Engineering Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete." In proceeding of Geopolymer 2005 Fourth International Conference, Saint-Quentin, France.
- Hardjito, D. and Rangan, B. V. (2005) "Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete." Research Report GC-1, Faculty of Engineering and Computing, Curtin University of Technology.

- Kilpatrick, A. E. and Rangan, B.V. (1999) "Test on High-Strength Concrete-Filled Steel Tubular Columns." *ACI Structural Journal*, Vol. 96:2, pp.268-274
- Lloyd, N.A., and Rangan, B.V. (1996) "Studies on high-strength concrete columns under eccentric compression." *ACI Structural Journal*, Vol.93:6, pp. 631-638.
- Malhotra, V. M. (2002) "Introduction: Sustainable development and concrete technology, ACI Board Task Group on Sustainable Development." *ACI Concrete International*, 24(7); 22.
- Malhotra, V. M. (1999) "Making concrete 'greener' with fly ash." *ACI Concrete International*, 21, pp. 61-66.
- Malhotra, V. M. and Ramezani-pour A.A. (1994). "Fly Ash in Concrete." Ottawa, Ontario, Canada, CANMET.
- Mattock, A.H., Kriz, L.B., and Hognested, E.N. (1961) "Rectangular Stress Distribution in Ultimate Strength Design." *Journal of the American Concrete Institute*, Proc. Vol. 57:8, pp.875-928.
- Metha, P. K. (2001) "Reducing the environmental impact of concrete." *ACI Concrete International*, 23(10); pp. 61-66.
- Metha, P. K. (1997) "Durability-critical issue for the future." *ACI Concrete International*, Vol.19, pp. 27-33.
- Mehta, P. K. and R. W. Burrows (2001) "Building Durable Structures in the 21st Century." *ACI Concrete International* 23(03), pp. 57-63.
- Nawy, E.G. (2003) "Reinforced Concrete; A Fundamental Approach." Fifth Edition, New Jersey, Prentice Hall.
- Palomo, A., Fernandez-Jimenez, A., Lopez-Hombrados, C., Lleyda, J.L. (2004) "Precast Elements Made of Alkali-Activated Fly Ash Concrete. Eighth CANMET/ACI International Conference on Fly

- Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete", Las Vegas, USA.
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999) "Alkali-activated fly ash cement for future." *Cement and Concrete Research*, 29(8); pp.1323-1329.
- Park, R., and Paulay, T. (1975) "Reinforced Concrete Structure." John Wiley & Sons, Inc.
- Rangan, B.V. (1990) "Strength of Reinforced Concrete Slender Columns." *ACI Structural Journal*, Vol. 87. No.1, pp. 32-38.
- Rangan, B.V., Saunders, P., and Seng E.J. (1991) "Design of High-Strength Concrete Columns." *ACI Special Publication SP-128*, Vol.128:11, pp.851-862.
- Rashid, M.A., and Mansur, M.A. (2005) "Reinforced High-Strength Concrete Beams in Flexure." *ACI Structural Journal*, Vol.102:3,pp.462-471
- Rusch, H. (1960) "Research toward a General Flexural Theory for Structural Concrete.", *ACI Journal*, Proceedings Vol.57, pp.1-28
- Sarker P.K., and Rangan, B.V. (2003) "Reinforced concrete columns under unequal load eccentricities." *ACI Structural Journal*, Vol.100:4, 519-528.
- Standards Australia (2005) "Concrete Structures." Draft Australian Standard to be AS3600-200x, Committee-BD-002-Concrete Structures, Standards Australia
- Standards Australia (2001) "Concrete Structures, AS3600-2001", Standards Australia.
- Standards Australia (2000). "Methods for Sampling and Testing Aggregate." Method 5: Particle Density and Water Absorption of Fine Aggregates, Standards Australia: 8.

- Standards Australia (2000). "Methods for Sampling and Testing Aggregates." Method 6.1.: Particle Density and Water Absorption of Coarse Aggregate - Weighing in Water Method: 8.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2006, 'Fly Ash-based Geopolymer Concrete: Study of Slender Reinforced Columns', *Journal of Materials Science*. 2006
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2005a, 'Flexural Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Beams', *In Proceeding of Concrete 2005, Concrete Institute of Australia 22nd Biennial Conference*, Melbourne, Australia.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2005b, 'Behaviour and Strength of Reinforced Fly Ash-Based Geopolymer Concrete Beams', *In Proceeding of ASEC 2005, Australian Structural Engineering Conference*, Newcastle, Australia.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2005c, 'Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: An Application for Structural Members', *In Proceeding of the World Congress GEOPOLYMER 2005: Geopolymer; Green Chemistry and Sustainable Development solutions*, Saint-Quentin, France.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2005d, 'Behaviour of Geopolymer Concrete Columns Under Equal Load Eccentricities', *In Proceeding of the Seventh International Symposium on Utilisation of High Strength/High Performance Concrete*, American Concrete Institute, Washington DC, USA.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2004a, 'Behaviour and Strength of Geopolymer Concrete Column', *In Proceeding of The 18th Australasian Conference on the*

- Mechanics of Structures & Materials (ACMSM)*, Perth, A.A. Balkema Publishers, The Netherlands, Perth, Australia.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2004b, 'Geopolymer Concrete for a Sustainable Future', *In Proceeding of Green Processing 2004*, The Australian Institute of Mining and Metallurgy, Fremantle, Western Australia.
- Swanepoel, J. C. & Strydom, C. A. (2002) "Utilisation of fly ash in geopolymeric material." *Journal of Applied Geochemistry*, 17:pp.1143-1148.
- Timoshenko S.P., and Gere, J.M. (1961) "Theory of Elastic Stability." McGraw-Hill International.
- van Jaarsveld, J. G. S., van Deventer, J. S. J., & Schartzman, A.(1999) "The potential use of geopolymer materials to immobilise toxic metals: Part II, Material and leaching characteristics." *Mineral Engineering*, 12(1),pp.75-91.
- van Jaarsveld, J. G. S., van Deventer J. S. J., & Lukey, G. C. (2002) "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite-based geopolymers." *Chemical Engineering Journal*, 4001:1-11.
- Wallah, S. E., Hardjito D., Sumajouw, D. M. J., and Rangan, B. V. (2005a) "Sulfate and Acid Resistance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete." *In Proceeding of Australian Structural Engineering Conference (ASEC)*, September 2005, Newcastle.
- Wallah, S. E., Hardjito, D., Sumajouw D. M. J., and Rangan, B. V. (2005b) "Creep and Drying Shrinkage Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete." *In proceedings of the 22nd Biennial Conference Concrete 2005*, Melbourne.

- Wang, P.T., Shah, S.P., and Naaman, A.E. (1978) "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression." ACI Journal, No.11:Proc. V.75,pp.603-611.
- Warner, R.F., Rangan, B.V., Hall, A.S., & Faulkes, K. A. (1998) "Concrete Structures," Melbourne, Longman.
- Whitney, C.S. (1940) "Plastic Theory of Reinforced Concrete Design." Proceedings of the ASCE, Vol. 66, pp. 1749-1780.
- Xu, H and van Deventer J.S.J (2000) "The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals." International Journal of Mineral Processing 59(3): 247-226.

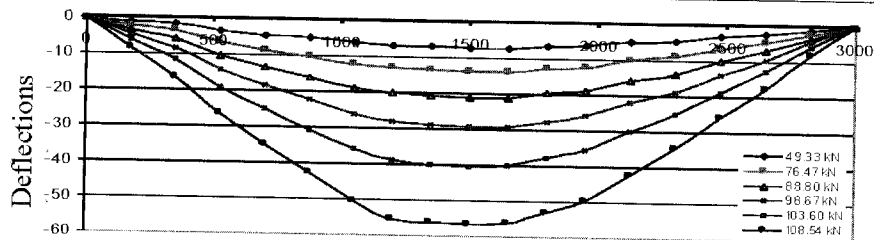
LAMPIRAN

LAMPIRAN A: DATA HASIL PENGUJIAN

A.1. Balok

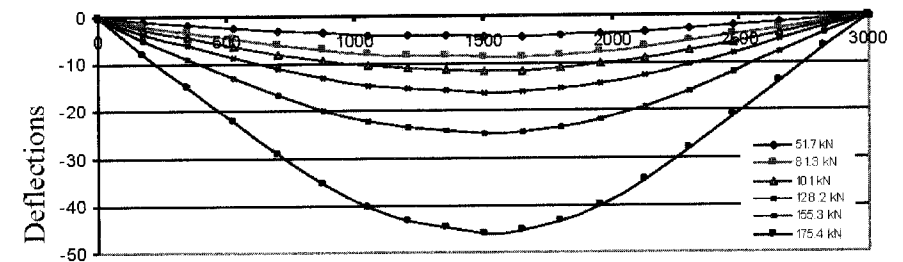
Tabel A.1.1 Data Balok GBI-1

No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	1.26808	0.05652	23	58.66466	9.60919
2	4.84453	0.16957	24	61.48495	10.28749
3	7.26598	0.28262	25	64.23471	11.07883
4	10.42894	0.39567	26	67.31746	11.87018
5	13.1384	0.50872	27	71.25543	12.77457
6	16.29312	0.62177	28	74.35072	13.79202
7	19.47046	0.79135	29	79.14042	15.60081
8	22.16735	1.01744	30	83.65507	17.52264
9	24.62191	1.69574	31	88.04538	19.84015
10	26.7406	2.43056	32	92.78078	23.34468
11	28.99707	2.82623	33	96.00191	27.58403
12	31.67653	3.33495	34	99.52293	33.80175
13	33.85866	3.9002	35	102.9841	39.96293
14	34.65616	4.18282	36	106.5204	48.89383
15	36.84353	4.8046	37	108.4633	56.63771
16	39.46952	5.25679	38	106.0878	58.16387
17	42.22905	6.04814	39	103.1854	58.6726
18	44.90665	6.55686	40	99.90723	59.01174
19	46.91574	6.95253	41	93.74011	59.74656
20	49.61722	7.63083	42	83.25602	59.91614
21	52.43358	8.2526	43	69.89394	61.15968
22	55.50402	8.87437			



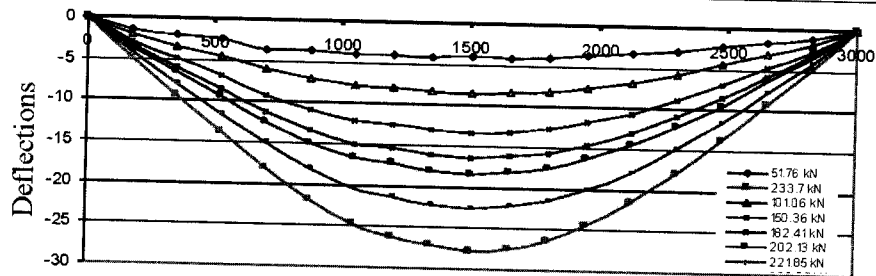
Tabel A.1.2 Data Balok GBI-2

No.	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No.	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	1.69155	0.05652	24	103.4624	13.17025
2	6.81629	0.33915	25	107.5254	13.79202
3	11.9101	0.56525	26	111.3975	14.41379
4	15.38975	0.84787	27	115.7272	15.26166
5	19.81434	1.35659	28	120.382	16.22258
6	24.2657	1.86531	29	125.3862	17.24002
7	28.85328	2.60013	30	129.8094	18.37051
8	32.20113	2.93928	31	133.6075	19.38796
9	36.82648	3.56105	32	140.6102	21.42285
10	41.58893	4.18282	33	146.2565	23.79688
11	45.73151	4.8046	34	151.0943	25.83177
12	50.26197	5.42637	35	157.0723	29.27977
13	54.78097	6.04814	36	162.1396	33.4626
14	59.35846	6.66991	37	165.1509	37.41932
15	64.22453	7.23516	38	168.0708	42.22392
16	68.79757	7.85693	39	171.1852	46.01107
17	73.11982	8.30912	40	170.8942	46.18064
18	77.52289	9.04395	41	167.6121	47.19809
19	82.04387	9.72224	42	167.2152	47.93291
20	85.47618	10.17444	43	165.5045	48.66773
21	89.98622	10.85273	44	163.0107	49.00688
22	94.29515	11.53103	45	159.9441	50.25042
23	98.67381	12.43542	46	162.8118	90.04378



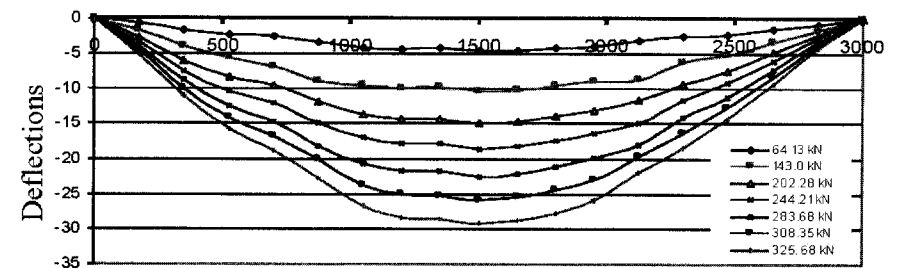
Tabel A.1.3 Data Balok GBI-3

No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	1.69523	0.05652	24	150.4005	13.62244
2	8.60178	0.33915	25	156.2042	14.18769
3	14.56613	0.6783	26	162.7485	14.86598
4	20.74164	1.18702	27	169.5216	15.43123
5	26.66542	1.75226	28	175.146	15.99648
6	32.25399	2.37404	29	182.5465	16.7313
7	38.05109	2.88276	30	188.0969	17.29655
8	43.92188	3.448	31	194.2278	17.69222
9	49.88509	4.01325	32	199.8892	18.48356
10	56.15009	4.5785	33	204.9627	19.16186
11	70.33842	5.93509	34	209.852	20.12278
12	76.40172	6.50034	35	214.5034	20.80107
13	82.46311	7.06558	36	219.5492	21.98809
14	88.58877	7.63083	37	222.4729	22.60986
15	95.14021	8.2526	38	226.5843	23.40121
16	101.3649	8.87437	39	229.3742	27.86666
17	107.8505	9.49614	40	218.9758	28.60148
18	113.8728	10.00486	41	212.7581	33.2365
19	119.2309	10.57011	42	208.7568	34.81919
20	125.2842	11.13536	43	202.6267	35.72358
21	130.4609	11.64408	44	197.1503	44.9371
22	136.6502	12.26585	45	194.9757	46.68937
23	144.5721	13.00067	46	190.2067	48.49816



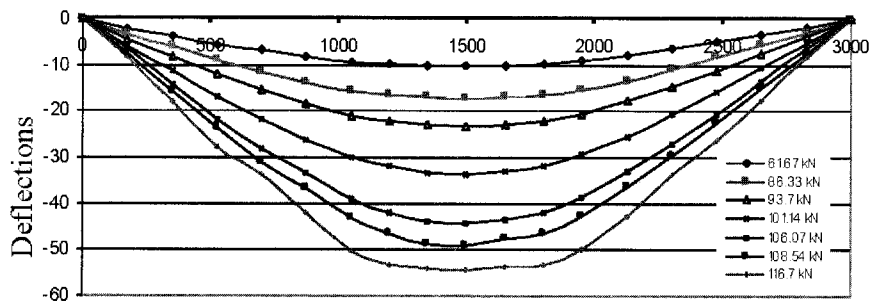
Tabel A.1.4 Data Balok GBI-4

No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	1.90407	0.05652	24	212.14868	15.88343
2	10.21979	0.4522	25	221.68271	16.61825
3	19.10043	1.01744	26	238.41333	18.08789
4	28.48619	1.69574	27	247.42456	18.93576
5	38.30102	2.43056	28	256.55188	19.78363
6	46.58322	3.10886	29	266.03383	20.68802
7	55.7146	3.78715	30	274.14871	21.59242
8	64.13797	4.40892	31	282.11738	22.44029
9	72.85799	5.03069	32	290.35052	23.34468
10	80.52036	5.65247	33	298.35025	24.58823
11	88.55124	6.21771	34	306.72526	26.05787
12	96.20696	6.78296	35	312.65381	26.67964
13	106.00179	7.5743	36	316.14517	27.41446
14	114.12787	8.13955	37	318.06073	27.86666
15	122.23866	8.7048	38	320.48986	29.22325
16	130.44379	9.38309	39	308.72736	29.78849
17	139.14834	10.00486	40	291.08772	30.12764
18	147.67432	10.62664	41	263.95242	32.21906
19	155.90461	11.36146	42	259.01874	38.15414
20	163.51659	11.9267	43	251.61819	47.02851
21	181.08471	13.28329	44	249.15135	48.21553
22	189.94707	14.01812	45	246.68451	49.5156
23	197.15286	14.69641	46	231.88344	52.05921



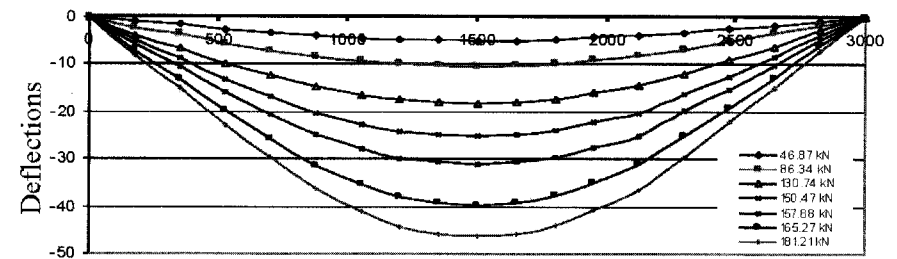
Tabel A.1.5 Data Balok GBII-1

No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	0.28948	0.02101	23	85.05404	17.14708
2	4.04816	0.21014	24	88.66342	18.8912
3	8.14633	0.48331	25	91.17326	20.84546
4	12.37534	0.71446	26	92.13666	21.45486
5	16.14333	0.88257	27	94.09252	23.97649
6	20.41527	1.2398	28	97.87571	28.11616
7	24.18712	1.66007	29	98.30004	28.36832
8	28.77986	2.41656	30	100.7178	33.7478
9	32.00731	3.42521	31	103.6075	38.01356
10	36.19535	4.09765	32	107.5759	46.81824
11	40.18361	5.4215	33	107.9842	47.5327
12	43.31321	5.75772	34	108.1712	48.73048
13	47.08457	6.74536	35	109.8171	52.40786
14	50.70016	7.48083	36	110.8359	54.15198
15	53.95433	8.09023	37	111.1233	54.27806
16	57.39927	8.90976	38	108.8714	54.32009
17	61.33474	10.04449	39	104.9771	54.50921
18	64.13797	10.6749	40	99.94976	54.59327
19	70.15707	12.10382	41	96.70033	54.63529
20	73.51199	12.94436	42	94.54862	55.25863
21	77.85807	14.3943	43	92.87569	62.35478
22	81.64774	15.73917	44	90.21586	71.52214



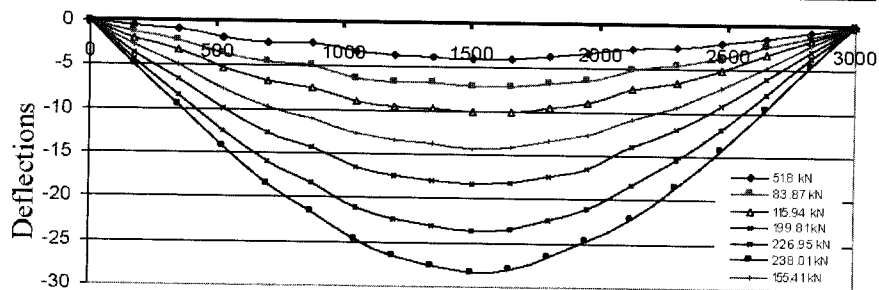
Tabel A.1.6 Data Balok GBII-2

No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	4.65122	0.05652	24	110.6179	13.22677
2	9.14376	0.2261	25	115.7511	14.07464
3	14.55017	0.4522	26	121.3837	15.14861
4	20.17666	0.73482	27	127.6123	16.2791
5	24.96683	1.01744	28	132.8786	17.1835
6	29.0284	1.52617	29	138.4857	18.65314
7	32.3094	1.80879	30	144.5714	20.06625
8	37.8956	2.48708	31	150.0085	22.04462
9	42.10101	3.22191	32	156.6989	24.92737
10	46.37893	3.78715	33	162.1725	28.03623
11	50.36177	4.3524	34	166.2376	30.86246
12	54.7871	4.97417	35	170.9975	35.10181
13	59.00647	5.59594	36	174.6903	38.83244
14	63.52568	6.27424	37	179.3666	47.19809
15	69.02061	6.89601	38	173.6648	48.27206
16	73.20778	7.46126	39	171.5655	55.90289
17	77.90497	8.19608	40	170.7908	61.55535
18	82.47012	8.87437	41	170.0865	69.01661
19	86.75148	9.55267	42	168.854	84.67393
20	91.78582	10.34401	43	167.6215	88.0089
21	96.13586	11.13536	44	154.3104	88.34804
22	100.8064	11.75713	45	147.197	88.40456
23	105.4133	12.32238	46	140.5063	88.51762



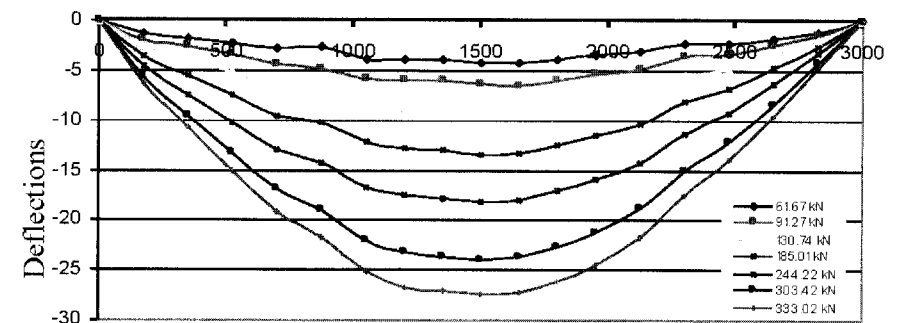
Tabel A.1.7 Data Balok GBII-3

No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	0.40564	0.05652	24	155.0992	13.62244
2	8.21674	0.16957	25	162.6915	14.41379
3	15.11975	1.18702	26	170.3648	15.14861
4	22.25007	1.46964	27	178.8902	15.99648
5	28.58093	1.80879	28	186.3483	16.7313
6	34.63737	2.20446	29	194.3043	17.52264
7	40.65446	2.76971	30	200.8993	18.20094
8	46.66424	3.22191	31	206.8612	18.93576
9	53.93468	4.01325	32	213.0151	19.78363
10	60.04794	4.63502	33	220.8458	21.02717
11	66.5556	5.25679	34	226.7025	22.10114
12	72.85088	5.82204	35	231.3087	23.06206
13	79.07791	6.38729	36	235.4507	26.51007
14	85.21392	6.95253	37	239.1071	30.46679
15	91.20582	7.51778	38	232.5338	30.63636
16	105.3886	8.81785	39	212.533	31.20161
17	111.2838	9.43962	40	210.9355	31.82338
18	117.9102	10.00486	41	206.2402	35.61053
19	123.0236	10.51359	42	202.1318	42.28045
20	129.7423	11.13536	43	199.6668	54.94197
21	136.8812	11.75713	44	186.7254	59.12479
22	142.6105	12.3789	45	183.0279	62.00755
23	148.6626	13.0572	46	175.0166	70.3732



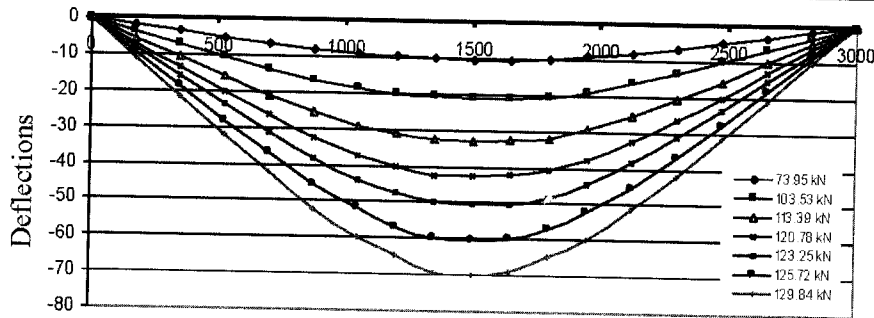
Tabel A.1.8 Data Balok GBII-4

No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	0.70481	0.05652	24	206.4095	15.09208
2	9.14847	0.6783	25	214.8358	15.77038
3	18.70529	1.18702	26	224.1066	16.44868
4	27.60074	1.75226	27	232.7571	17.1835
5	36.37551	2.31751	28	241.2575	17.80527
6	45.74876	3.05233	29	250.2987	18.59661
7	55.7707	3.78715	30	258.8966	19.33143
8	62.13105	4.29587	31	266.0127	19.89668
9	70.68927	4.91765	32	275.7174	20.68802
10	79.02127	5.53942	33	283.4629	21.53589
11	87.49078	6.16119	34	293.7124	22.66639
12	96.82367	6.83948	35	306.5513	24.19255
13	105.9202	7.46126	36	315.6376	25.04042
14	116.4043	8.19608	37	321.6208	25.83177
15	125.8817	8.98742	38	326.5206	26.51007
16	135.3681	9.66572	39	330.9871	27.47098
17	144.1254	10.34401	40	325.393	28.82758
18	155.0258	11.13536	41	315.0695	31.82338
19	163.3874	11.81365	42	304.6979	34.08437
20	171.4914	12.3789	43	297.666	36.62798
21	181.0664	13.11372	44	278.0487	42.95874
22	189.4696	13.79202	45	261.4856	47.59376
23	198.3792	14.47031	46	246.6845	48.72425



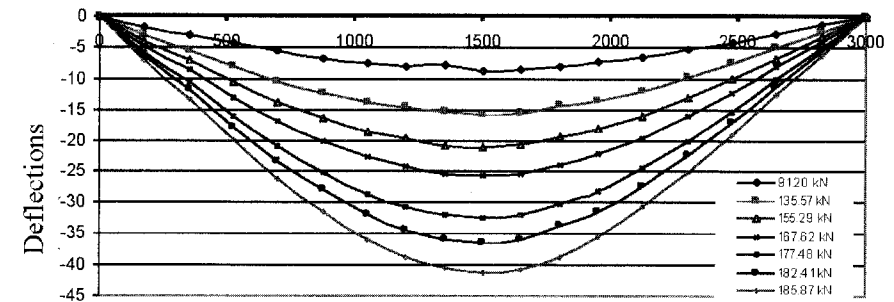
Tabel A.1.9 Data Balok GBIII-1

No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	8.60174	0.05652	24	92.24871	16.44868
2	14.50158	0.16957	25	96.01463	17.97484
3	18.04019	0.33915	26	99.72775	99.72775
4	21.70236	0.4522	27	102.7093	21.47937
5	25.06106	0.62177	28	105.6387	24.19255
6	28.59426	0.73482	29	108.2714	27.18836
7	31.0972	0.84787	30	110.3206	29.3363
8	34.89447	1.13049	31	113.0315	33.97132
9	38.86411	1.92184	32	116.0532	39.73684
10	42.2223	2.82623	33	119.7076	44.65448
11	45.64856	3.78715	34	120.8309	48.8373
12	48.83534	4.29587	35	123.3281	52.90708
13	52.60039	5.59594	36	125.6757	58.2204
14	55.91296	6.27424	37	127.4078	62.5728
15	60.1316	6.95253	38	127.0761	64.04243
16	63.2132	8.2526	39	128.4656	67.03825
17	66.45289	8.98742	40	129.956	69.75143
18	69.60553	9.72224	41	130.3504	73.93425
19	72.96465	10.45706	42	125.7161	76.19524
20	76.29445	11.47451	43	130.2437	75.29085
21	82.21797	13.11372	44	130.6462	77.15616
22	85.43247	13.84854	45	125.7161	76.19524
23	88.61754	15.14861	46	78.88071	79.98239



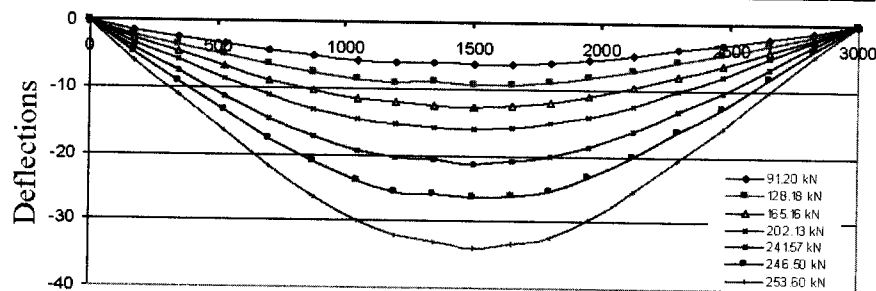
Tabel A.1.10 Data Balok GBIII-2

No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	Beban Total P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	5.66955	0.05652	24	122.4395	13.11372
2	9.57775	0.28262	25	127.6071	14.01812
3	14.9852	0.4522	26	132.3887	15.09208
4	21.82637	0.73482	27	137.425	16.10953
5	26.98818	0.96092	28	142.0469	16.9574
6	31.32439	1.13049	29	147.3731	18.20094
7	36.33625	1.46964	30	152.3931	19.50101
8	41.46293	1.86531	31	157.1452	20.8576
9	46.57594	2.31751	32	162.1686	22.89249
10	51.48259	2.93928	33	165.3619	24.7578
11	56.36127	3.448	34	170.0329	26.96226
12	61.62555	4.46545	35	173.3989	28.99715
13	65.28457	5.08722	36	177.4816	32.04948
14	71.09643	5.82204	37	181.2739	34.81919
15	77.22242	6.55686	38	183.9376	37.3628
16	82.73727	7.34821	39	185.8542	40.92385
17	87.99057	7.96998	40	184.3109	42.84569
18	91.20582	8.59175	41	183.6441	44.71101
19	96.24623	9.21352	42	183.1049	45.05015
20	101.6942	10.00486	43	181.7883	45.50235
21	107.016	10.73969	44	176.1464	47.70681
22	112.2234	11.58755	45	169.0301	49.34603
23	117.569	12.26585	46	157.7614	49.62865



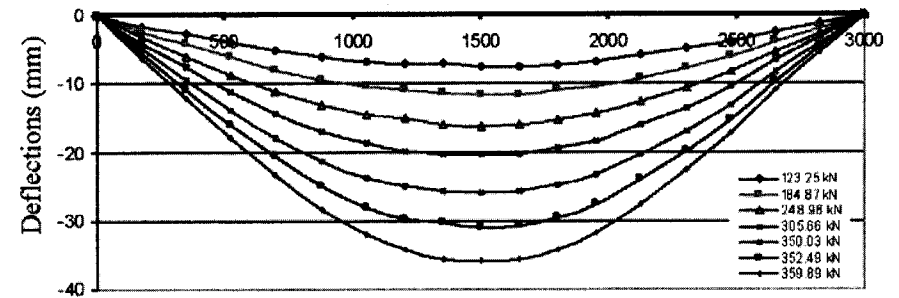
Tabel A.1.11 Data Balok GBIII-3

No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	1.7148	0.05652	24	154.0423	11.87018
2	9.4437	0.73482	25	162.7956	12.605
3	15.47125	1.01744	26	170.3241	13.33982
4	21.86368	1.24354	27	176.5187	13.84854
5	28.15315	1.46964	28	183.3165	14.47031
6	34.58655	1.69574	29	191.2409	15.14861
7	41.31993	2.14794	30	198.5911	15.77038
8	47.73179	2.54361	31	207.1075	16.56173
9	53.25079	2.88276	32	212.9548	17.1835
10	59.90395	3.448	33	220.1429	17.97484
11	73.6852	4.63502	34	228.4121	18.93576
12	79.6098	5.20027	35	234.2945	19.95321
13	85.27547	5.70899	36	237.0858	20.34888
14	91.37015	6.27424	37	243.3906	21.42285
15	97.45337	6.78296	38	250.4799	35.49749
16	103.1201	7.29168	39	239.518	35.83663
17	111.096	8.0265	40	226.0004	37.02365
18	117.4066	8.59175	41	221.0974	42.39349
19	123.6683	9.15699	42	218.2718	48.55468
20	131.3572	9.77877	43	218.7857	51.66354
21	136.4652	10.17444	44	196.3801	52.28531
22	142.4956	10.79621	45	216.9219	52.79403
23	148.4027	11.36146	46	194.7367	52.85056



Tabel A.1.12 Data Balok GBIII-4

No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)	No	BebanTotal P (kN)	Defleksi di tengah bentang (mm)
1	2.49097	0.05652	24	227.528	14.75294
2	10.71954	0.4522	25	242.9416	15.77038
3	21.05387	0.79135	26	258.6561	16.90087
4	30.50154	1.13049	27	270.9788	17.74874
5	39.82956	1.69574	28	287.8126	18.99228
6	50.78972	2.37404	29	298.0291	19.89668
7	58.45027	3.10886	30	309.0668	20.97065
8	67.37727	3.6741	31	319.0613	21.98809
9	76.55263	4.29587	32	337.2561	23.96646
10	85.20127	4.91765	33	344.8456	24.9839
11	94.05007	5.53942	34	350.9295	25.88829
12	103.0174	6.16119	35	351.9087	26.96226
13	112.4429	6.78296	36	352.1522	28.99715
14	121.1433	7.34821	37	352.4981	30.97551
15	130.6119	8.0265	38	358.2699	34.14089
16	139.9947	8.64827	39	359.5197	36.96712
17	148.6004	9.21352	40	357.976	37.24975
18	155.1514	9.66572	41	344.9661	38.0411
19	164.5696	10.28749	42	338.9405	39.39769
20	175.6433	11.07883	43	311.0036	40.58471
21	183.0656	11.58755	44	305.0465	44.31533
22	194.2692	12.3789	45	300.7327	45.05015
23	216.3796	13.96159	46	294.8259	48.21553

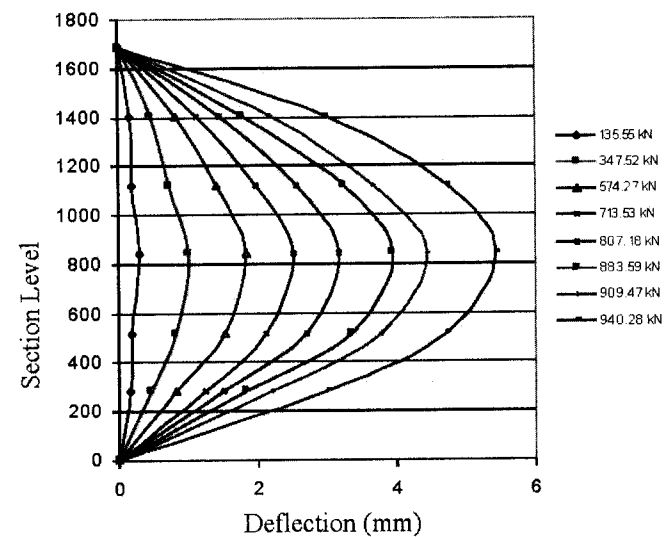


A.2 Kolom

Tabel A.2.1 Data Kolom GCI-1

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
6.73166	0.00159
40.38924	0.05719
61.25796	0.13344
84.17885	0.20016
100.8629	0.23829
132.1693	0.31454
161.2835	0.40032
203.4915	0.53376
242.0332	0.6672
260.6827	0.72439
280.2359	0.79111
310.1409	0.88643
330.0932	0.95315
359.182	1.05799
389.422	1.15331
421.7095	1.25815
450.0311	1.363
481.624	1.47738
508.0971	1.57269
532.4514	1.66801
560.0337	1.78238
581.2061	1.86817
600.8381	1.95395
627.0011	2.07786
640.7261	2.14458
658.7224	2.23036
676.9698	2.30662
691.7169	2.38287
731.3425	2.63069
750.8696	2.74506
789.0548	3.01194
800.3415	3.10726

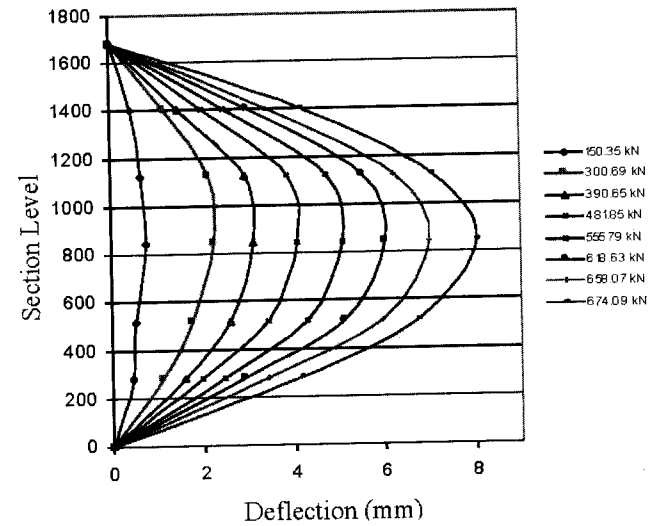
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
842.0458	3.47899
866.7514	3.7268
881.4809	3.89837
903.311	4.29869
920.564	4.64183
930.0706	4.98496
939.8707	5.44247
935.3521	5.72841
932.8874	5.8142
930.4227	5.89045
898.3817	6.59578



Tabel A.2.2 Data Kolom GCI-2

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
3.193988	0.005766
30.34285	0.149297
55.89472	0.284385
84.10775	0.427916
121.0782	0.706535
153.6738	0.976711
190.3097	1.272216
210.7315	1.466405
250.1666	1.812568
270.295	1.972985
290.218	2.141845
315.7549	2.38287
330.68	2.51631
357.2269	2.81178
375.9688	2.97382
395.7206	3.15492
410.3529	3.30742
425.8942	3.45992
440.6592	3.6029
453.6294	3.74587
470.1551	3.9365
483.4765	4.089
496.5242	4.23197
505.2627	4.34635
515.7226	4.46073
530.7569	4.65136
543.1172	4.83246
560.7526	5.09934
579.7929	5.34715
600.4958	5.69982
615.7889	5.9667
632.0576	6.27171
641.6782	6.47187
655.2218	6.89125

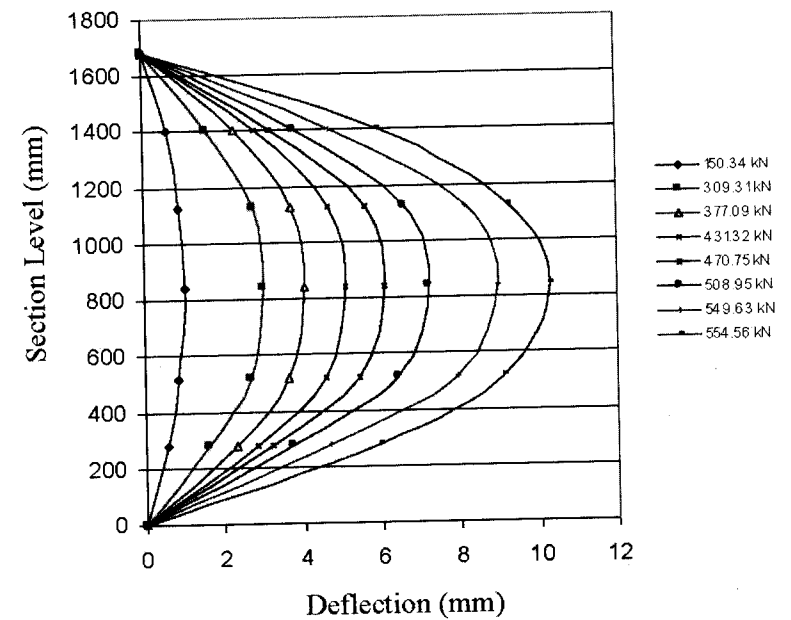
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
665.5064	7.30111
670.7054	7.64424
673.3902	8.0255
665.8787	8.19706
660.8466	8.26378
653.7606	8.3305
643.9018	8.41629
629.1136	8.5116
510.1921	10.74197



Tabel A.2.3 Data Kolom GCI-3

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
0.905411	0.000352
10.86479	0.004235
22.63496	0.008824
39.94861	0.02859
43.50188	0.05719
56.48262	0.1811
69.78171	0.30501
81.95114	0.42892
95.87667	0.54329
108.0358	0.65767
122.0025	0.78158
135.2502	0.91502
148.4979	1.03893
161.7457	1.16284
174.9934	1.30581
191.6301	1.46785
204.8779	204.8779
216.4825	1.73473
228.7546	1.8777
241.2664	2.0302
254.5483	2.23036
267.8303	2.44006
280.2711	2.59256
293.7096	2.79272
305.1088	2.95476
318.2196	3.14539
332.5286	3.33601
345.3313	3.52664
358.6133	3.7554
372.7853	3.98415
397.8723	4.44166
410.3308	4.68948
414.0337	4.7562
428.7846	5.05168

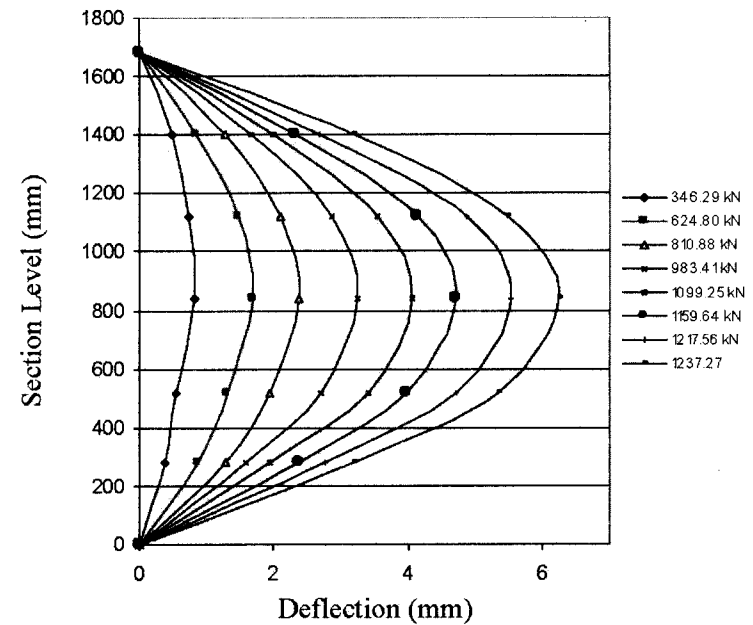
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
441.2366	5.28997
456.3795	5.65216
470.3461	6.07155
493.573	6.6339
506.0373	7.03422
520.3589	7.58705
534.2229	8.13988
554.0284	10.34164
546.5463	10.59899
539.7684	10.7515
504.0303	12.31466
481.8481	12.61013



Tabel A.2.4 Data Kolom GCII-1

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
14.78818	0.001058
56.91907	0.00953
93.00984	0.12391
131.8612	0.20969
173.9665	0.31454
213.4137	0.44798
254.6339	0.57189
296.5477	0.68627
336.431	0.80064
375.8661	0.91502
412.9393	1.0294
455.0885	1.16284
496.6362	1.30581
537.7967	1.42972
581.6683	1.55363
620.9088	1.67754
660.4088	1.82051
700.5214	1.95395
740.6411	2.09692
782.695	2.26849
824.4911	2.44006
865.2124	2.62115
900.5446	2.79272
930.0462	2.94522
960.2852	3.11679
990.3538	3.28836
1020.261	3.45992
1059.569	3.7554
1094.202	4.04134
1114.892	4.21291
1155.251	4.65136
1165.631	4.77527
1181.635	4.9659
1190.53	5.09934

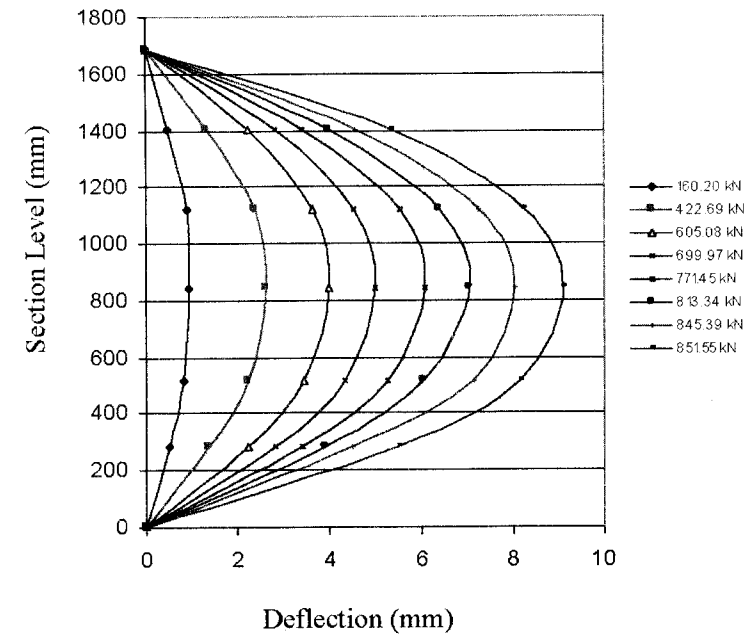
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
1199.339	5.23278
1204.796	5.32809
1216.83	5.54732
1222.046	5.67122
1226.298	5.75701
1231.239	5.87139
1236.524	6.23358
1230.91	6.38608
1226.578	6.49093
1225.099	6.51953
1218.616	6.62437
1215.403	6.67203
1194.145	7.54892



Tabel A.2.5 Data Kolom GCII-2

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
3.236493	0.009624
24.27373	0.135191
43.69272	0.251099
63.11171	0.367007
84.14894	0.492574
103.5679	0.608482
124.6052	0.73392
144.0242	0.8483
165.0614	0.97221
184.4804	1.08659
205.9782	1.22956
223.231	1.33441
245.8534	1.45831
265.1191	1.58222
284.6724	1.71566
303.7738	1.83004
325.8328	1.97301
363.8948	2.22083
383.8764	2.3638
405.4425	2.49725
424.6671	2.62115
445.7308	2.76413
465.4168	2.9071
485.3911	3.05007
503.8021	3.19304
524.9063	3.35508
543.5603	3.49805
564.631	3.66962
605.0196	3.99369
624.4954	4.17478
644.7473	4.36541
664.8842	4.56557
684.9261	4.80386
704.458	5.07074

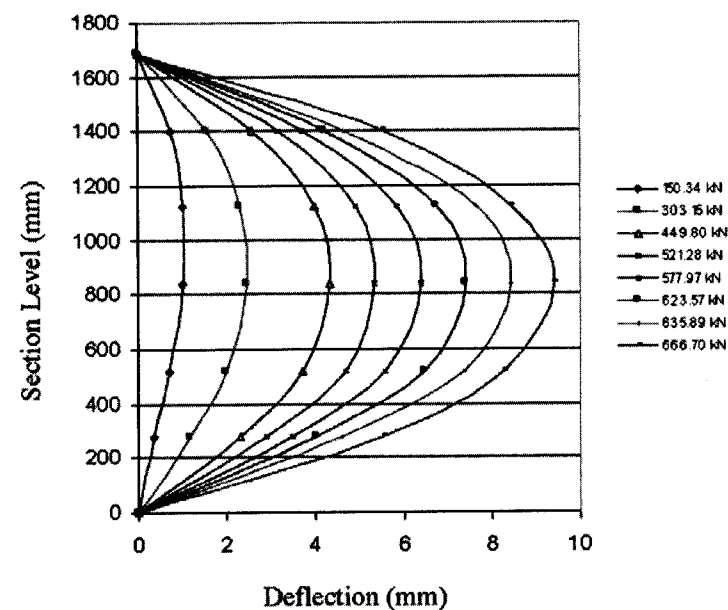
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
724.8671	5.37575
738.9789	5.57591
750.612	5.75701
770.2859	6.09061
805.3394	6.8436
825.5124	7.41548
849.0421	8.36863
838.9356	8.56879
826.0957	8.59739
783.8681	8.62598
699.6791	8.65457



Tabel A.2.6 Data Kolom GCII-3

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
2.136789	0.000537
16.46865	0.006356
32.86261	0.07625
49.74794	0.1811
65.53851	0.28594
83.25195	0.41938
95.87667	0.57189
121.5095	0.80064
138.177	0.92455
152.107	1.01987
168.4209	1.16284
184.236	1.29628
200.3446	1.42019
217.263	1.56316
233.2219	1.7252
250.6596	1.89676
266.6493	2.04927
282.2077	2.23036
297.612	2.3924
314.6595	2.5735
330.6801	2.73553
346.5979	2.94522
362.0259	3.17398
378.6389	3.36461
394.1973	3.55524
410.6457	3.76493
444.6916	4.2415
460.8981	4.4512
492.8878	4.91824
508.9597	5.15653
524.4814	5.44247
540.1135	5.71888
556.0628	5.98576
574.1445	6.3289

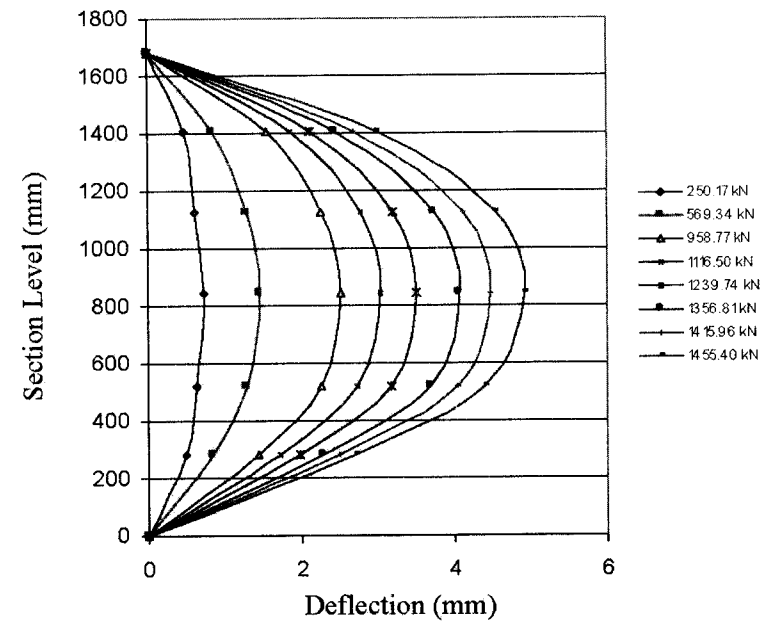
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
590.3507	6.67203
609.6928	7.08188
625.5557	7.50127
635.4707	7.78721
647.2084	8.3305
666.2895	9.37897
649.9403	9.98898
634.3511	10.26539
602.6182	10.68478
570.1663	11.05651
554.3431	11.10416
544.0816	11.4187



Tabel A.2.7 Data Kolom GCIII-1

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
4.587462	0.01175
41.287158	0.10572
77.986854	0.1997
114.68655	0.29368
151.38625	0.38765
188.08594	0.48163
224.78564	0.5756
261.48533	0.66958
298.18503	0.76355
334.88473	0.85753
371.58442	0.95151
408.28412	1.04548
444.98381	1.13946
481.68351	1.23344
527.55813	1.35091
564.25783	1.44488
600.95752	1.53886
637.29194	1.62323
673.56619	1.72014
711.20977	1.81705
746.16205	1.90184
786.23802	2.01087
824.7929	2.11989
859.28263	2.2168
897.24413	2.32582
932.58765	2.43484
972.47659	2.55598
1007.2275	2.665
1044.1791	2.78614
1079.655	2.90728
1117.539	3.04053
1154.9727	3.17378
1192.8786	3.33125
1228.0347	1228.0347

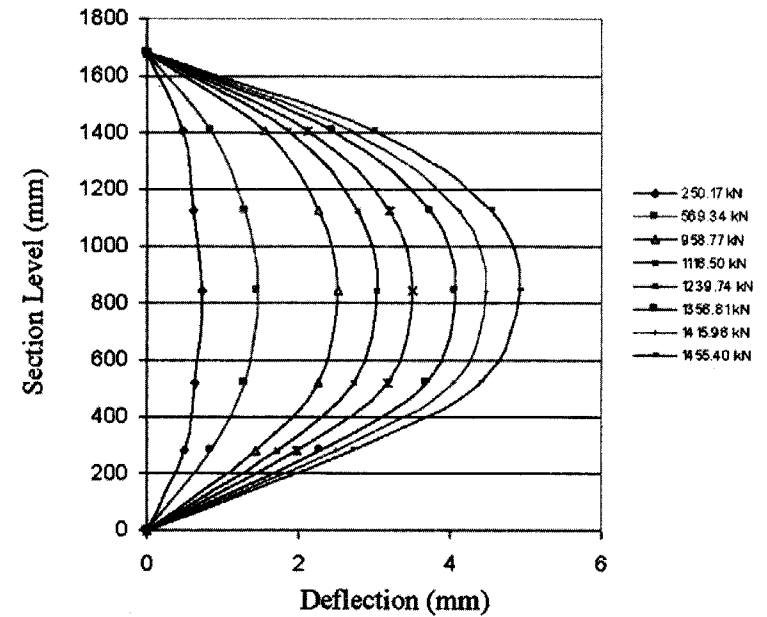
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
1264.9744	3.63409
1304.5635	3.82791
1341.0757	3.9975
1374.3564	4.17921
1401.7846	4.38514
1425.557	4.55473
1455.1291	4.93025
1447.6568	5.05139
1440.7597	5.12407
1430.1398	5.48748
1423.3619	5.57228
1414.7355	5.82666



Tabel A.2.8 Data Kolom GCIII-2

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
16.926224	0.01211
41.106544	0.13325
67.704896	0.2665
91.885216	0.38764
116.06554	0.50877
142.66389	0.64202
169.26224	0.77527
193.44256	0.89641
217.38619	1.01755
242.2444	1.16291
267.933	1.32039
290.34119	1.45364
315.68647	1.599
339.20378	1.74437
366.16139	1.90184
392.06272	2.05932
417.76596	2.20468
442.56696	2.36216
468.06402	2.51964
492.24599	2.665
519.08256	2.82248
543.67084	2.97996
567.90704	3.13743
592.93543	3.29491
617.58238	3.45239
642.72548	3.62198
668.98572	3.80369
693.28106	3.96116
718.43604	4.14287
743.14907	4.33669
768.40898	4.51839
794.36029	4.72432
815.28349	4.90603
843.23412	5.16041

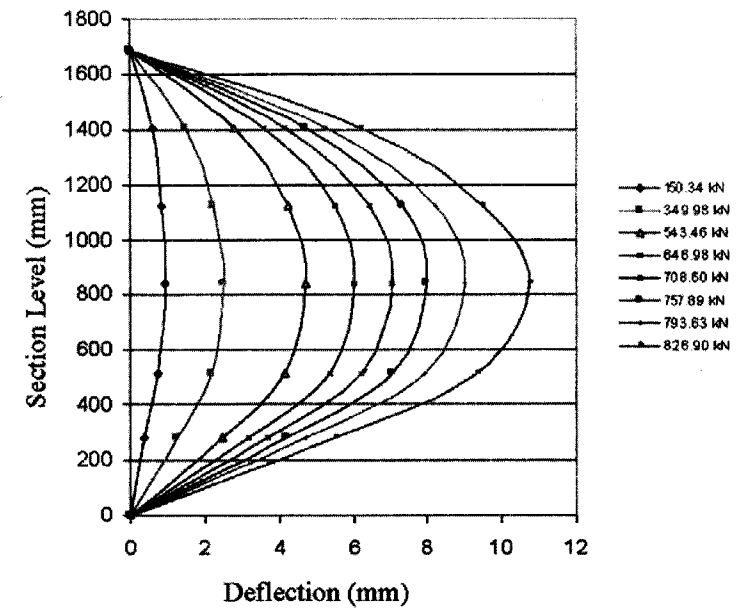
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
868.10878	5.37846
894.06845	5.62073
917.37432	5.87512
942.69971	6.16585
968.6255	6.51714
994.6542	6.88055
1016.6871	7.23185
1029.1369	7.59526
1011.5112	7.8981
992.16334	8.12826
977.25195	8.45533
953.83734	9.36385



Tabel A.2.9 Data Kolom GCIII-3

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
2.6662123	0.01211
21.044711	0.06057
44.090673	0.16959
64.355948	0.31495
84.374757	0.46032
103.86933	0.59357
125.17135	0.73893
145.94521	0.89641
165.7508	1.02966
185.02825	1.17502
204.44653	1.30827
223.95124	1.45364
244.49783	1.61112
264.54402	1.76859
285.35701	1.92607
304.6638	2.08355
324.63566	2.25314
344.56449	2.44696
364.92904	2.665
384.49256	2.88305
403.79935	3.11321
424.74927	3.33125
463.979	3.76734
484.31275	3.98539
506.18693	4.22766
524.98022	4.48205
544.69781	4.72432
566.88007	4.9666
586.84411	5.22098
606.56166	5.4996
626.44357	5.7661
650.37165	6.09316
670.89023	6.42023
692.98008	6.77153

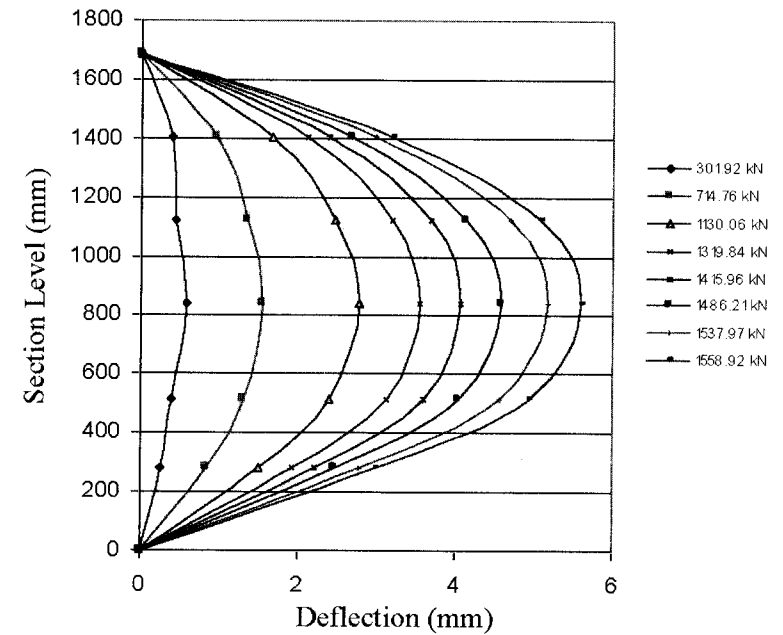
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
712.62575	7.13494
732.69935	7.52257
752.38085	7.91021
774.31576	8.45533
789.93506	8.90353
807.35598	9.40019
826.68145	10.72058
825.10438	10.79326
822.59226	10.9144
819.51141	10.98708
817.04669	817.04669
788.7027	14.22142



Tabel A.2.10 Data Kolom GCIV-1

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
5.36603	0.00727
37.56221	0.05088
75.12442	0.10175
112.68663	0.16959
150.24884	0.25439
193.17708	0.3513
230.73929	0.43609
268.3015	0.52089
305.86371	0.60568
348.79195	0.70259
386.35416	0.78739
424.38625	0.86007
463.16825	0.94486
503.19232	1.04177
543.05466	1.13868
584.09045	1.23559
624.38964	1.3325
663.25995	1.42941
703.11054	1.52632
747.18205	1.63534
783.58372	1.73225
824.50926	1.84127
866.66493	1.9503
908.63257	2.07143
948.11924	2.19257
986.94641	2.30159
1014.4715	2.38639
1054.6018	2.51964
1091.8222	2.64078
1130.2014	2.77403
1172.139	2.91939
1212.3261	3.07687
1249.1104	3.23434
1294.1006	3.42816

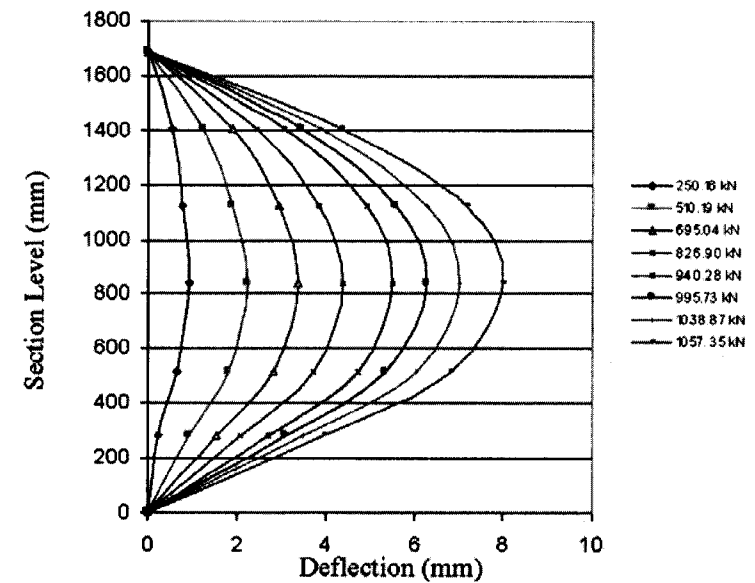
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
1329.0113	3.60987
1371.4764	3.8158
1410.4118	4.04596
1449.6607	4.33669
1481.309	4.55473
1510.7783	4.82123
1533.3695	5.11196
1558.0986	5.59651
1554.551	5.74187
1549.8829	5.82666
1533.0409	6.12951
1473.8882	7.13494



Tabel A.2.11 Data Kolom GCIV-2

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
8.9345225	0.002422
32.258521	0.03634
59.694934	0.14536
85.820712	0.24227
114.66704	0.33918
140.04755	0.4482
167.26323	0.56934
195.06308	0.69048
211.47091	0.76316
237.84315	0.8843
265.87907	1.01755
290.58766	1.13868
316.71343	1.24771
344.16117	1.38096
371.4969	1.51421
396.69281	1.63534
423.83291	1.76859
449.22709	1.90184
476.80663	2.05932
503.48261	2.20468
529.90963	2.35005
556.40512	2.49541
583.78083	2.65289
609.32762	2.79825
636.15562	2.96784
662.81363	3.13743
682.85769	3.27068
708.18931	3.44028
735.14296	3.63409
761.80854	3.84003
787.69041	4.04596
810.23637	4.23978
840.02769	4.49416
866.60008	4.74855

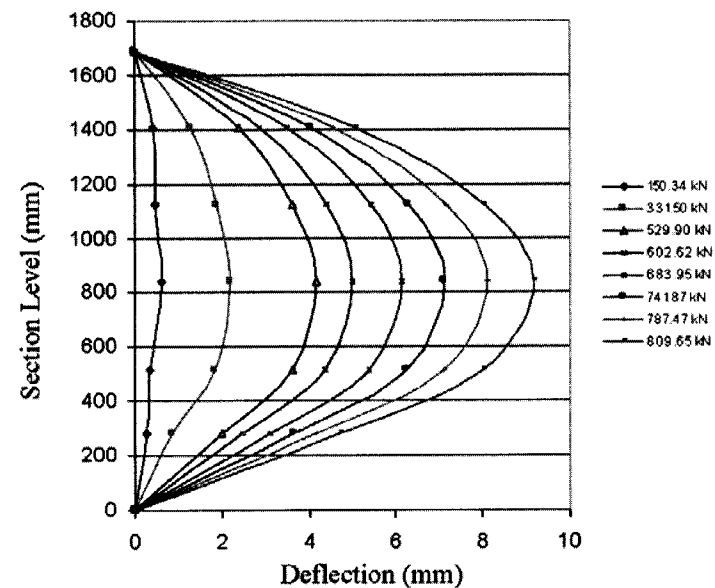
Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
892.75709	4.99082
928.60353	5.36635
954.48976	5.69341
980.40981	6.04471
1006.7256	6.44446
1030.551	6.84421
1044.3176	7.14705
1056.533	7.97078
1053.4814	8.23728
1051.1929	8.30996
1048.7281	8.49167
996.96948	10.68424



Tabel A.2.12 Data Kolom GCIV-3

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
1.720623	0.009111
22.368099	0.118443
43.015575	0.227775
63.663051	0.337107
84.310527	0.446439
104.18126	0.555771
126.10691	0.692436
146.57085	0.81999
167.03479	0.947544
187.49873	1.09023
207.96267	1.25982
228.42661	1.42941
248.89055	1.599
269.35449	269.35449
289.81843	1.93818
310.28237	2.10777
330.74631	2.27737
351.21025	2.44696
371.67419	2.61655
414.86114	3.00418
433.5811	3.18589
453.68011	3.37971
473.39767	3.57353
493.46733	3.76734
514.50528	3.9975
535.02863	4.21555
555.37815	4.44571
576.73883	4.68798
597.14106	4.94237
617.89925	5.19675
637.61259	5.45114
657.17455	5.75398
676.12407	5.99626

Beban Aksial (kN)	Defleksi di tengah Bentang (mm)
696.96443	6.32332
716.51408	6.66251
736.71708	7.02592
758.04186	7.44989
778.36468	7.8981
798.08444	8.45533
809.36826	9.18215
795.31847	9.66669
770.21747	10.15124
741.87347	10.51465
725.85297	10.84171
699.97363	11.41106
669.16498	11.64122



LAMPIRAN B DATA YANG DIGUNAKAN PADA ANALISA

Kolom

Balok

Tabel B.1.1 Data Balok

Beam	ρ (%)	A_{sc} (mm ²)	A_{st} (mm ²)	d_{sc} (mm)	d_{st} (mm)	f_{sy} (MPa)	f_c (MPa)	E_c (GPa)	ϵ_{cs} (mm/mm) $\times 10^{-6}$	Modulus of Rupture (MPa) $f_r=0.6\sqrt{f_c}$	Failure Load (kN)	Defleksi tengah bentang pada Beban Failure (mm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14
GBI-1	0.64	226	339	43	257	550	37	21.0	62.5	3.65	112.6	56.63
GBI-2	1.18	226	603	43	255	560	42	22.5	67.5	3.90	175.3	46.01
GBI-3	1.84	226	942	43	253	560	42	22.5	67.5	3.90	233.7	27.87
GBI-4	2.69	226	1356	43	251	557	37	21.0	62.5	3.65	325.0	29.22
GBII-1	0.64	226	339	43	257	550	46	23.5	72.0	4.07	116.7	54.27
GBII-2	1.18	226	603	43	255	560	53	24.4	79.0	4.37	181.1	47.20
GBII-3	1.84	226	942	43	253	560	53	24.4	79.0	4.37	238.0	30.01
GBII-4	2.69	226	1356	43	251	557	46	23.5	72.0	4.07	337.4	27.47
GBIII-1	0.64	226	339	43	257	550	76	28.6	104.0	5.23	129.8	69.75
GBIII-2	1.18	226	603	43	255	560	72	27.9	99.0	5.09	185.8	40.69
GBIII-3	1.84	226	942	43	253	560	72	27.9	99.0	5.09	253.6	34.02
GBIII-4	2.69	226	1356	43	251	557	76	28.6	104.0	5.23	359.89	35.85

Catatan:

Kolom-9 : data Modulus Elastisitas dari beton, E_c , diambil dari Hardjito and Rangan (2005); Interpolasi dilakukan seperlunya untuk disesuaikan dengan nilai kekuatan tekan.

Kolom-10 : data Shrinkage strain, ϵ_{cs} , diambil dari Wallah et al. (2005b) (observasi setelah 2-bulan); Interpolasi dilakukan jika diperlukan.

Tabel B.2.1 Data Kolom

Kolom	ρ (%)	e (mm)	$A_{st}=A_{sc}$ (mm ²)	d_{sc} (mm)	d_{st} (mm)	f_{sy} (MPa)	f_c (MPa)	Defleksi tengah bentang pada Beban Failure (mm)	Beban Failure (kN)
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11
GCI-1	1.47	15	226	27	154	519	42	5.44	940
GCI-2	1.47	35	226	27	154	519	42	8.02	674
GCI-3	1.47	50	226	27	154	519	42	10.31	555
GCII-1	2.95	15	339	27	154	519	43	6.24	1237
GCII-2	2.95	35	339	27	154	519	43	9.08	852
GCII-3	2.95	50	339	27	154	519	43	9.40	666
GCIII-1	1.47	15	226	27	154	519	66	4.94	1455
GCIII-2	1.47	35	226	27	154	519	66	7.59	1030
GCIII-3	1.47	50	226	27	154	519	66	10.70	827
GCIV-1	2.95	15	339	27	154	519	59	5.59	1559
GCIV-2	2.95	35	339	27	154	519	59	7.97	1057
GCIV-3	2.95	50	339	27	154	519	59	9.18	810