

**TUGAS AKHIR
PENELITIAN LABORATORIUM**

**PERILAKU BALOK BADAN TERBUKA PROFIL C
BENTUKAN DINGIN DENGAN PERKUATAN**



disusun oleh :

MILIK PERPUSTAKAAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN
PERENCANAAN UII YOGYAKARTA

Andi Nur Istiyanto

No.Mhs.: 95 310 133

Prasetyo Widhi Suputro

No.Mhs.: 95 310 253

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA**

2001

**TUGAS AKHIR
PENELITIAN LABORATORIUM**

**PERILAKU BALOK BADAN TERBUKA PROFIL C
BENTUKAN DINGIN DENGAN PERKUATAN**

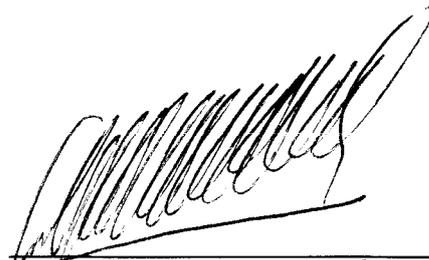
disusun oleh :

**Andi Nur Istiyanto
No.Mhs.: 95 310 133**

**Prasetiyo Widhi Suputro
No.Mhs.: 95 310 253**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

**Ir. H. A. Kadir Aboe, MS.
Dosen Pembimbing I**



Tanggal: 04-04-2002

**Ir. H. Fatkhurrohman N., MT.
Dosen Pembimbing II**



Tanggal :

untuk
ibu, bapak dan keluargaku
tercinta

“..... Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan) yang lain. Dan hanya kepada Tuhanmulah kamu berharap.....”

[QS. Alam Nasyrah (94), 6-8]

“Sesungguhnya Allah menyukai apabila salah seorang diantara kalian mengerjakan suatu pekerjaan maka dikerjakan dengan baik dan sempurna.”

[HR. Baihaqi]

“Kekuatan kuat, yang keras dan terus menerus, dapat digunakan oleh yang terkecil dari kita dan jarang gagal mencapai tujuannya, karena kekuatan yang diam bertumbuh semakin besar bersama waktu tanpa dapat ditahan.”

[Goethe]

“No metter whatever you choose. The consequence is a **MUST**”

[Reza Syarief]

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr, Wb.

Segala puja dan puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyusun Tugas Akhir dan menyusun laporannya. Sholawat dan salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad saw. beserta keluarga, sahabat, dan orang yang mengikutinya hingga hari kiamat.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai derajat Sarjana S-1, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan Tugas Akhir yang berjudul “Perilaku Balok Badan Terbuka Profil C Bentukkan Dingin dengan Perkuatan”, penulis telah berusaha semaksimal mungkin untuk memperoleh hasil yang sebaik-baiknya sesuai dengan kemampuan dan pengetahuan yang ada pada penulis serta berpegang pada buku-buku referensi, pedoman dan petunjuk yang terpakai. Penulis sadar bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna, mengingat keterbatasan pengetahuan dan pengalaman yang ada pada penulis, untuk itu kritik dan saran dari berbagai pihak sangat penulis harapkan untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Selama menyelesaikan Tugas Akhir ini penulis telah banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. H. A. Kadir Aboe, MS., selaku Dosen Pembimbing I tugas akhir,
2. Bapak Ir. H. Fatkhurrohman N., MT., selaku Dosen Pembimbing II tugas akhir,
3. Bapak Ir. Widodo, MSCE, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia,
4. Bapak Ir. H. Munadhir, MS., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia,
5. Orang Tua kami tercinta, untuk do'a, motivasi dan pengertian yang tidak ada habisnya hingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dan studi ini,
6. Teman-teman yang telah banyak memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis, serta semua pihak yang tidak mungkin penulis sebutkan satu persatu.

Atas budi dan amal baik yang telah diberikan, penulis hanya dapat memanjatkan do'a, semoga Allah SWT memberikan kebahagiaan dunia dan akhirat atas bantuan yang tak ternilai. Amin.

Selanjutnya penulis berharap, semoga hasil yang diperoleh dari penelitian ini bermanfaat bagi penelitian-penelitian selanjutnya.

Wassalamu'alaikum Wr, Wb.

Yogyakarta, Maret 2002

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
DAFTAR NOTASI.....	xv
INTISARI	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan.....	2
1.3. Manfaat.....	2
1.4. Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
BAB III LANDASAN TEORI.....	7
3.1. Pendahuluan	7
3.2. Batang Tarik.....	10
3.3. Batang Tekan.....	11
3.3.1. Tegangan Kritis Pelat yang Menerima Tekanan Merata.....	12

3.3.2. Batas Rasio Lebar terhadap Tebal Pelat dalam Perencanaan Tegangan kerja	14
3.4. Tekuk Kolom.....	18
3.5. Penempatan Pengaku Lateral (<i>Bracing</i>).....	19
3.6. Alat Sambung Las	22
3.6.1. Kekuatan Nominal Las	22
3.7. Perkuatan Pelat	23
3.8. Hubungan Momen dengan Kelengkungan.....	24
3.9. Kekakuan.....	29
3.10. Daktilitas	31
3.11. Hipotesa.....	33
BAB IV METODE PENELITIAN	34
4.1. Metode Penelitian	34
4.2. Persiapan Bahan dan Alat.....	35
4.2.1. Bahan.....	35
4.2.2. Peralatan Penelitian	35
4.3. Model Benda Uji	39
4.4. Pembuatan Benda Uji.....	40
4.5. Pengujian Benda Uji.....	41
4.5.1. Pengujian Kuat Tarik Baja	41
4.5.2. Pengujian Kuat Geser Las	41
4.5.3. Pengujian Kuat Kuat Lentur.....	42
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	44

5.1. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja dan Kuat Geser Las	44
5.2. Hasil Pengujian Kuat Lentur Baja Balok Badan Terbuka.....	44
5.2.1. Hubungan Beban Lendutan Hasil Pengujian	44
5.2.2. Analisa Data Hubungan Beban Lendutan	47
5.2.3. Hubungan Momen Kelengkungan Hasil Pengujian.....	48
5.2.4. Analisa Data Hubungan Momen Kelengkungan.....	49
5.3. Analisa Kerusakan pada Benda Uji.....	51
5.4. Pembahasan.....	51
5.4.1. Kuat Lentur Balok Berdasar Hubungan Beban-Lendutan	51
5.4.2. Daktilitas Simpangan ditinjau dari Hubungan Beban-Lendutan..	53
5.4.3. Kuat Lentur Balok ditinjau dari Hubungan Momen- Kelengkungan.....	53
5.4.4. Daktilitas Kelengkungan ditinjau dari Hubungan Momen-Kelengkungan.....	55
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	56
6.1. Kesimpulan.....	56
6.2. Saran.....	57

DAFTAR GAMBAR

3.1. Gaya batang yang terjadi	7
3.2.a. Pembebanan balok badan terbuka dengan perkuatan	8
3.2.b. Diagram momen balok badan terbuka dengan perkuatan	8
3.2.c. Diagram geser balok badan terbuka dengan perkuatan	8
3.3.a. Potongan melintang balok badan terbuka tanpa perkuatan	9
3.3.b. Potongan melintang balok badan terbuka dengan perkuatan	9
3.4. Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada pelat segi empat datar	13
3.5. Perbandingan antara tekuk pelat dengan tekuk kolom	14
3.6. Defleksi tekuk pelat pada sayap (jepit-bebas)	16
3.7. Defleksi tekuk pelat pada badan (jepit-jepit)	17
3.8. Tegangan pada balok dengan lateral support pada jarak tertentu	20
3.9. Deformasi balok dalam lenturan	25
3.10. Defleksi pada balok badan terbuka	27
3.11. Hubungan momen (M) dan kelengkungan (ϕ)	28
3.12.a. Lendutan pada balok	30
3.12.b. Kekakuan dari grafik beban-lendutan	30
3.13. Kekakuan dari grafik momen-kelengkungan	31
3.14. Grafik hubungan beban-lendutan	32
3.15. Grafik hubungan momen-kelengkungan	33
4.1. Flowchart metode penelitian	34

4.2 . <i>Universal Testing Material Shimatsu UMH30</i>	36
4.3. Bentuk fisik <i>Loading Frame</i>	37
4.4. Dukungan sendi dan rol.....	38
4.5. <i>Hidraulic Jack</i>	38
4.6. <i>Dial Gauge</i>	39
4.7. Balok badan terbuka tanpa perkuatan	40
4.8. Balok badan terbuka dengan perkuatan	40
4.9. Benda uji untuk uji kuat tarik baja	41
4.10. Benda uji untuk uji kekuatan las	42
5.1. Grafik hubungan beban-lendutan dari keempat benda uji.....	45
5.2. Grafik hubungan beban-lendutan dari kedua variasi benda uji	47
5.3. Grafik hubungan momen-kelengkungan dari keempat benda uji	48
5.4. Grafik hubungan momen-ke'engkungan dari kedua variasi benda uji.....	50

DAFTAR TABEL

3.1. Nilai rasio lebar terhadap tebal profil C	18
5.1. Hasil pengujian kuat tarik baja dan kuat geser las	44
5.2. Analisa kekakuan dari hubungan beban-lendutan.....	46
5.3. Analisa daktilitas lendutan dari hubungan beban-lendutan.....	46
5.4. Analisa kekakuan dari hubungan momen-kelengkungan.....	49
5.5. Analisa daktilitas kelengkungan dari hubungan momen-kelengkungan.....	49

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran I Kartu Peserta Tugas Akhir
- Lampiran II Perhitungan Rencana Profil
- Lampiran III Data Pengujian
- Lampiran IV Data SAP 90
- Lampiran V Foto Hasil Penelitian

DAFTAR NOTASI

- A_e = luas bersih efek
- A_g = luas penampang lintang bruto
- b = lebar
- b/t = rasio lebar terhadap tebal
- C = gaya tekan
- d = jarak
- E = modulus elastis baja ($2 \cdot 10^5$ Mpa)
- EI = kekakuan lentur
- F_{cr} = tegangan kritis (Mpa)
- F_u = tegangan tarik ultimit
- F_y = tegangan leleh
- F_{exx} = kekuatan tarik material elektroda
- F_u = kekuatan tarik logam dasar
- k = koefisien tekuk
- L = jarak, panjang bentang
- M = momen
- P = beban
- R_{nw} = kekuatan nominal per satuan panjang las, namun tidak melebihi
kekuatannominal per satuan panjang material dasar didekatnya
- T_n = kekuatan nominal batang tarik
- t_e = dimensi leher efektif

t = tebal material dasar di sepanjang las

μ = angka poisson

λ_c = parameter kelangsingan

ϵ = regangan

σ = tegangan

ρ = jari-jari girasi

$\mu_{\text{simpangan}}$ = daktilitas simpangan

$\mu_{\text{kelengkungan}}$ = daktilitas kelengkungan

Δ = lendutan

Δ_u = lendutan akhir daerah *post-elastic*

Δ_y = lendutan pada pertama leleh

ϕ = kelengkungan

ϕ_u = kelengkungan pada akhir daerah *post-elastic*

ϕ_y = kelengkungan pada pertama leleh

ϕ = faktor resistensi (untuk las, ϕ adalah sama dengan faktor untuk material yang dihubungkannya 0,75 untuk keadaan retakan)

ϕ_t = faktor resistensi tarik

INTISARI

Balok badan terbuka (*open-web joist*) dari profil C canai dingin (bentukan dingin atau *cold-formed steel*) sering digunakan sebagai struktur lentur seperti balok anak dan gording. Profil C memiliki rasio lebar terhadap tebal (b/t) besar sehingga rawan terhadap bahaya tekuk pada tegangan rendah. Tekuk yang terjadi dapat berupa tekuk lokal pada sayap (*flens local buckling*) dan tekuk lokal pada badan (*web local buckling*) profil C. Bahaya tekuk dapat dihindari dengan meningkatkan tegangan kritis pada komponen yang menerima momen maksimum dan gaya geser maksimum. Penambahan perkuatan pada balok badan terbuka untuk meningkatkan kapasitas lentur menarik untuk diteliti.

Penelitian eksperimental ini merupakan usaha untuk mengetahui perilaku lentur balok badan terbuka yang mempunyai dua variasi yaitu dengan perkuatan dan tanpa perkuatan yang dapat dilihat dari hubungan beban-lendutan ($P-\Delta$) dan hubungan momen-kelengkungan ($M-\phi$).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan pelat perkuatan pada balok badan terbuka hanya memberikan peningkatan yang relatif kecil pada nilai kekuatan (8,33 %), kekakuan (dari tinjauan hubungan beban-lendutan 2,77 % dan dari tinjauan momen-kelengkungan 19,03 %) dan daktilitas (dari tinjauan hubungan beban-lendutan 3,93 % dan dari tinjauan hubungan momen-kelengkungan 5,69 %). Hal ini disebabkan batang horisontal yang berupa profil C memiliki rasio lebar terhadap tebal (b/t) relatif besar sehingga mengalami keruntuhan pada tegangan rendah, tegangan kritis profil C (96,674 Mpa) 57,83 % lebih rendah dari tegangan lelehnya (229,25 Mpa).

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Balok badan terbuka (*open-web joist*) adalah balok pemikul lantai yang pelat badannya terdiri dari rangka batang. Balok badan terbuka dapat berupa rangkaian profil C yang merupakan profil bentukan dingin. Profil bentukan dingin (*cold-formed steel*) adalah profil yang dibentuk dalam keadaan dingin dari bahan pelat dengan tebal tidak lebih dari 1 in. Balok badan terbuka dari profil C bentukan dingin sering digunakan sebagai struktur lentur seperti balok anak dan gording. Bagian balok yang menerima gaya tekan perlu mendapat perhatian karena elemen-elemen pembentuk penampang relatif langsing atau rasio lebar terhadap tebal (b/t) besar sehingga bahaya tekuk (*buckling*) dapat terjadi pada tegangan yang rendah. Tekuk yang terjadi dapat berupa tekuk lokal pada sayap (*flens local buckling*) profil C, tekuk lokal pada badan (*web local buckling*) profil C.

Bahaya tekuk dapat dihindari dengan meningkatkan tegangan kritis pada komponen yang menerima tekan, dengan cara menambahkan perkuatan pada tempat-tempat yang menerima momen maksimum dan gaya geser maksimum.

Penambahan perkuatan pada balok badan terbuka untuk meningkatkan kapasitas lentur menarik untuk diteliti. Penelitian eksperimental diperlukan untuk

meningkatkan kapasitas balok badan terbuka profil C bentukan dingin dengan perkuatan yang berupa pelat.

1.2. Tujuan

Mempelajari perilaku tekuk lentur balok badan terbuka yang berupa rangkaian profil C bentukan dingin dan besi tulangan bulat tanpa perkuatan dan dengan perkuatan, perilaku tersebut yaitu .

1. Memperoleh kurva hubungan beban-lendutan ($P-\Delta$) dan momen-kelengkungan ($M-\phi$).
2. Membandingkan kuat lentur balok badan terbuka tanpa perkuatan dan dengan perkuatan.
3. Membandingkan kekakuan balok badan terbuka tanpa perkuatan dan dengan perkuatan.

1.2. Manfaat

Manfaat yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Sebagai salah satu pertimbangan dalam perencanaan struktur balok badan terbuka menggunakan profil C bentukan dingin dengan perkuatan dan tanpa perkuatan.
2. Untuk mendapatkan data perencanaan dan pemodelan yang lebih akurat pada perancangan struktur balok badan terbuka menggunakan profil C bentukan dingin dengan perkuatan dan tanpa perkuatan.

1.2. Batasan Masalah

Karena terdapat banyak variasi bentuk balok badan terbuka, maka penelitian ini dibatasi :

1. Balok badan terbuka yang disusun dari profil C bentukan dingin sebagai batang tepi dengan dimodifikasi, yaitu : 2 sampel tanpa perkuatan, dan 2 sampel dengan perkuatan.
2. Balok diasumsikan dengan tumpuan sederhana (sendi dan rol).
3. Beban transversal diasumsikan melalui pusat geser dan tidak memperhitungkan tekuk puntir lateral pada balok.
4. Penelitian ini hanya meninjau kuat lentur saja.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Peristiwa tekuk pada komponen struktur dari pelat baja dapat terjadi dalam bentuk tekuk keseluruhan dan tekuk lokal (*local buckling*). Tekuk keseluruhan merupakan fungsi dari kelangsingan (Kl/r). Tekuk setempat dapat terjadi lebih dahulu pada salah satu elemen penyusun penampang sebelum tegangan kritis terlampaui. (*Salmon dan Johnson, 1990*)

Bila sebuah pelat dipengaruhi langsung oleh desakan, lenturan, atau tegangan geser atau oleh gabungan tegangan-tegangan ini maka pelat tersebut dapat menekuk secara setempat sebelum seluruh bagian konstruksi mengalami kegagalan. (*Bowles, 1985*).

Semakin besar rasio lebar terhadap tebal (b/t) suatu plat, tegangan kritisnya semakin rendah sehingga tekuk lokal yang terjadi jauh dibawah tegangan lelehnya. (*Bresler dkk, 1967*). Pendapat yang sama juga dikemukakan oleh (*Englekirk, 1994*), (*Bowles, 1985*), (*Salmon dan Johnson, 1990*)

Kuat lentur plat pada umumnya berkaitan dengan sayap dan badan profil. Badan balok yang ramping dapat menyebabkan berbagai persoalan. (*Salmon dan Johnson, 1990*), yaitu :

1. Tekuk akibat lemur pada bidang badan balok akan mengurangi efisiensi badan balok itu untuk memikul bagian elastis dari momen lentur.
2. Tekuk sayap tekan dalam arah vertikal karena kurangnya kekuatan badan balok untuk mencegah terjadinya tekuk sedemikian rupa.
3. Tekuk karena geser.

Tekuk setempat elemen pelat dapat mengakibatkan kehancuran penampang keseluruhan yang terlalu dini, atau paling sedikit menyebabkan tegangan menjadi tidak merata dan mengurangi kekuatan keseluruhan. (*Salmon dan Johnson, 1990*).

Penambahan perkuatan pada *open-web joist* akan meningkatkan kekuatan batas dari struktur tersebut. Perkuatan tersebut berupa dua buah plat yang biasanya dipasang pada tiap sisi, tebal dari pelat tersebut tidak boleh kurang dari tebal minimum dan tingginya harus memenuhi dari tinggi keseluruhan struktur tersebut. Tampang bersih dari perkuatan harus disediakan berdasarkan kekuatan untuk menahan geser dan momen lentur dengan aman. (*Bresler dkk, 1967*)

Elemen-elemen pengaku dipasang menempel pada dua bidang permukaan pelat atau hanya satu bidang permukaan saja. Bahan elemen pengaku sebaiknya dibuat minimal kekuatan bahannya sama dengan pelat yang diperkuat. (*PADOSBAJAYO, 1992*), (*Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia, 1984*).

Pada umumnya pengaku yang dipakai adalah yang dipasang menempel pada bidang permukaan pelat, baik dalam arah memanjang (sejajar sumbu batang) maupun dalam arah tegak (tegak lurus sumbu batang). (*Gideon Hadi Kusuma, 1985*).

Pengaku-pengaku tengah mempunyai peranan ganda yaitu meningkatkan tahanan tekuk dan bekerja sebagai batang desak seperti pada aksi rangka batang. (Galambos, 1980).

Las harus mentransmisikan seluruh beban dari satu batang ke batang lainnya, las pun harus didimensi sesuai dengan bahan dan dibentuk dari material elektroda yang tepat. Untuk keperluan desain, las *fillet* diasumsikan mentransmisikan beban melalui tegangan geser pada area efektif. (Salmon dan Johnson, 1992).

Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu lendutan satuan. (Gere dan Timoshenko, 1985). Kekakuan lentur (*flexural stiffness*) EI didefinisikan sebagai momen per unit kelengkungan (West, 1980).

Kemampuan dari suatu bahan untuk mengalami perubahan bentuk melewati batas elastis disebut daktilitas. (Englekirk, 1994). Pendapat yang sama juga dikemukakan oleh (Lynn S Beedle, 1958).

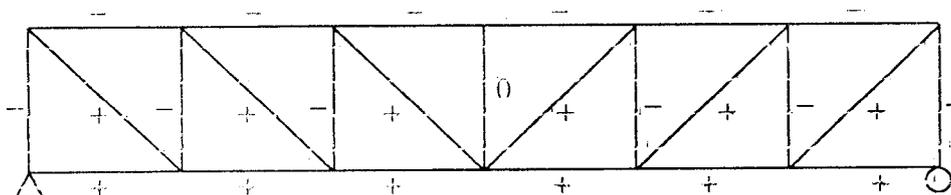
Daktalitas didefinisikan sebagai besaran yang mencerminkan kemampuan struktur atau elemen struktur untuk melakukan perubahan bentuk elasto-plastis tanpa mengalami keruntuhan dan biasanya dinyatakan dengan suatu rasio antara perubahan bentuk elasto-plastis total dari struktur atau elemen struktur sebelum runtuh terhadap perubahan bentuknya pada batas elastis. (Wahyudi dan Syahril, 1997)

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Pendahuluan

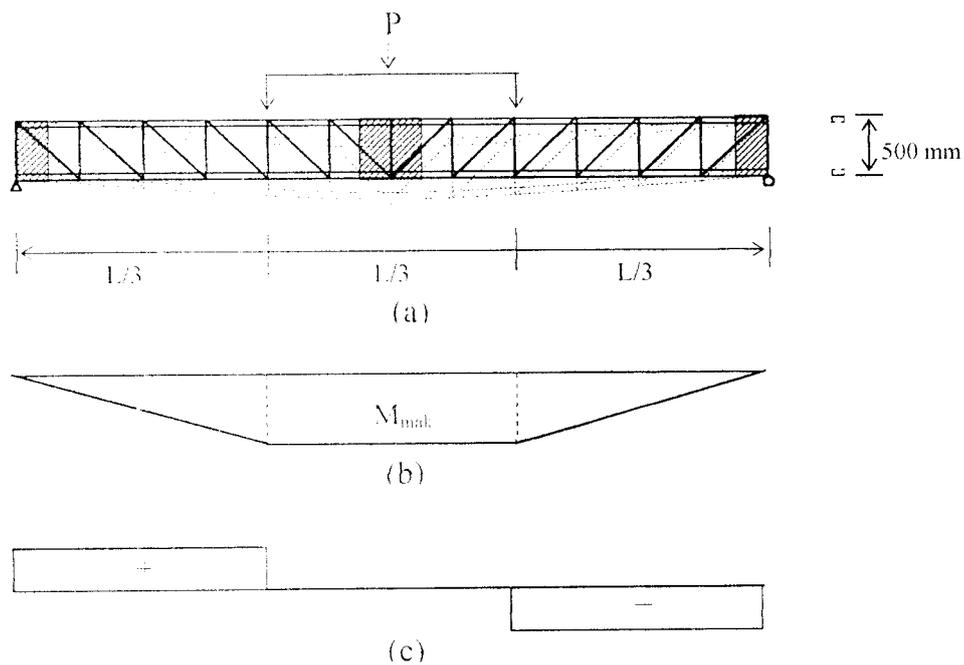
Struktur balok badan terbuka dengan tumpuan sederhana dapat dipandang sebagai struktur rangka batang, seperti tampak pada Gambar (3.1) batang tepi atas dan vertikal menerima gaya tekan, batang tepi bawah dan diagonal menerima gaya tarik. Batang-batang pada balok badan terbuka (batang tepi atas) yang menerima gaya tekan perlu mendapat perhatian, karena profil C bentukan dingin rawan terjadi tekuk.



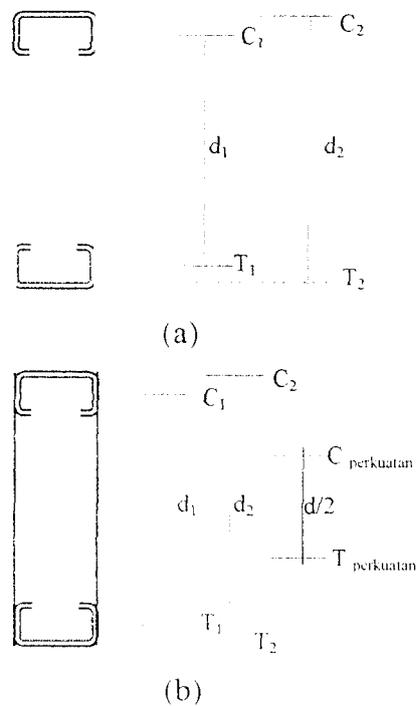
Gambar 3.1. Gaya batang yang terjadi

Bila struktur menerima beban transversal, maka pada struktur tersebut akan bekerja momen, gaya geser dan mengalami deformasi. Dalam penelitian ini pembebanan diletakkan pada setiap sepertiga panjang balok, dengan maksud untuk mendapatkan

lenturan murni (*pure bending flexure*) dimana sepanjang bagian balok yang mengalami momen maksimum tidak dipengaruhi oleh gaya geser. Perkuatan pada tepi untuk menahan gaya geser, perkuatan pada tengah untuk menahan momen, seperti tampak pada Gambar (3.2.).



Gambar 3.2. Balok badan terbuka dengan perkuatan (a) Pembebanan. (b) Diagram Momen. (c). Diagram Geser



Gambar 3.3. Potongan melintang balok badan terbuka
 (a) tanpa perkuatan.
 (b) dengan perkuatan.

Dari Gambar (3.3.) menunjukkan distribusi tegangan pada balok badan terbuka, sehingga menghasilkan persamaan keseimbangan :

$$C = T \quad (3.1)$$

Sehingga dapat dituliskan bahwa besarnya momen dalam adalah sama dengan hasil kali antara resultan gaya tekan (C) terhadap jarak dari titik tangkap gaya tekan ke titik tangkap gaya tarik (T). Gaya tekan yang terjadi pada balok badan terbuka perlu diperhatikan, karena profil C canai dingin rawan terjadi tekuk.

Jika gaya tekan C merupakan total gaya tekan berdasarkan tegangan yang terjadi (F_{cr}) dikalikan dengan luas profil C, yaitu :

$$C = F_{cr} \cdot A \quad (3.2)$$

Mengacu pada Gambar (3.3.a), momen nominal balok badan terbuka tanpa perkuatan adalah :

$$Mn = C_1 \cdot d_1 + C_2 \cdot d_2 \quad (3.3)$$

Mengacu pada Gambar (3.3.b), momen nominal balok badan terbuka dengan perkuatan adalah :

$$Mn = (C_1 \cdot d_1 + C_2 \cdot d_2) + \frac{1}{4} b \cdot d^2 \cdot F_y \quad (3.4)$$

Dari persamaan (3.4) menunjukkan bahwa perkuatan pada balok badan terbuka akan meningkatkan momen nominal.

3.2. Batang Tarik

Menurut *Salmon dan Johnson, 1992*, batang tarik adalah batang yang mengalami tegangan tarik aksial akibat beban kerja pada ujung-ujung batang. Desain komponen tarik merupakan persoalan yang paling sederhana dibanding perencanaan struktur lain. Meskipun stabilitas bukan merupakan kriteria utama dalam mendesain batang tarik, namun batang tarik yang terlalu panjang akan mempunyai lendutan yang besar sekali yang disebabkan oleh berat batang tarik itu sendiri. Pada balok badan terbuka, batang tarik terletak pada batang diagonal (yang berupa besi tulangan) dan batang horisontal bawah (yang berupa profil C).

Desain kekuatan nominal untuk batang tarik diambil nilai terkecil dari persamaan (3.5) dan (3.6).

Kekuatan desain $\phi_t T_n$ berdasarkan pada kriteria leleh (pelelehan pada penampang bruto) yang merupakan kegagalan daktil, seperti pada persamaan (3.5).

$$\phi_t T_n = \phi_t F_y A_g = 0,90 F_y A_g \quad (3.5)$$

Atau pada kriteria *fractur* (retakan pada penampang bersih) yang merupakan kegagalan getas, seperti pada persamaan (3.6).

$$\phi_t T_n = \phi_t F_u A_e = 0,75 F_u A_e \quad (3.6)$$

keterangan : ϕ_t = faktor resistensi tarik

T_n = kekuatan nominal batang tarik

F_y = tegangan leleh

F_u = tegangan tarik ultimit

A_g = luas penampang lintang bruto

A_e = luas bersih efektif

3.3. Batang Tekan

Batang tekan merupakan batang dari suatu rangka batang yang mengalami gaya tekan aksial searah panjang batangnya. Pada balok badan terbuka profil C bentukan dingin batang tekannya adalah batang vertikal dan batang horisontal atas.

Keruntuhan batang tekan pada profil C bentukan dingin mungkin dapat terjadi berupa keruntuhan yang diakibatkan oleh terjadinya tekuk lokal. Tekuk lokal menyebabkan elemen yang tertekuk tidak dapat lagi menanggung bagian beban yang harus diterimanya. Keruntuhan akibat tekuk lokal ini terjadi pada batang yang

langsing dimana tegangan kritis (F_{cr}) yang dimiliki oleh pelat jauh dibawah tegangan lelehnya (F_c).

3.3.1. Tegangan Kritis Pelat yang Menerima Tekanan Merata

Salmon dan Johnson, 1990, mengemukakan tegangan tekuk elastik teoritik untuk pelat dinyatakan sebagai :

$$F_{cr} = k \cdot \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (3.7)$$

Keterangan : F_{cr} = tegangan kritis (Mpa)

k = koefisien tekuk

E = modulus elastis baja ($2 \cdot 10^5$ Mpa)

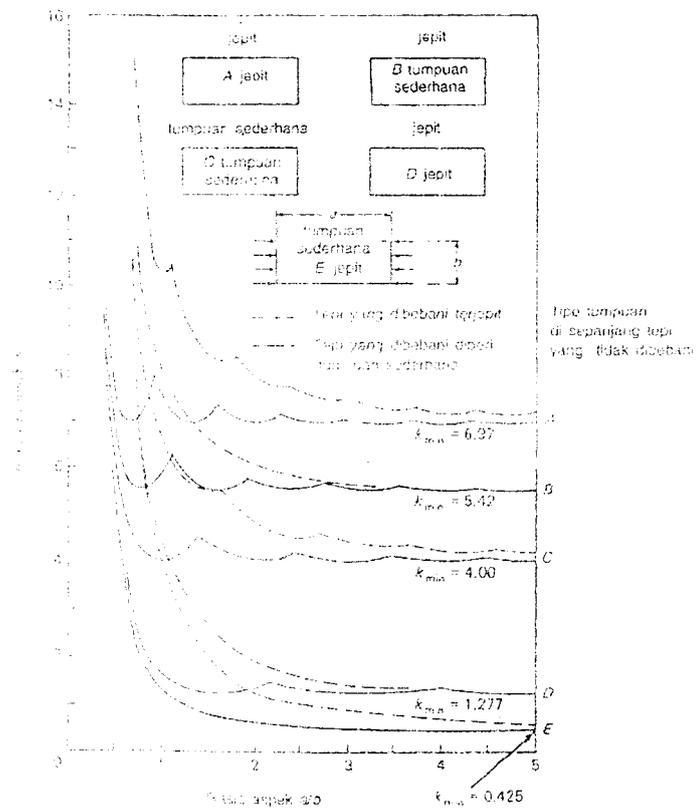
μ = angka poisson

b/t = rasio lebar terhadap tebal

dari persamaan (3.7) diatas tampak bahwa nilai F_{cr} dipengaruhi oleh koefisien tekuk (k) dan rasio lebar terhadap tebal (b/t).

Nilai rasio lebar terhadap tebal b/t (pada sayap) atau h/t (pada badan) dari profil C bentukan dingin yang besar menyebabkan F_{cr} semakin rendah, sehingga menyebabkan tekuk lokal baik pada sayap maupun badan. Kerusakan akibat tekuk dapat dicegah dengan cara memperkecil rasio lebar terhadap tebal (b/t) dan meningkatkan nilai koefisien tekuk (k).

Koefisien tekuk (k) merupakan fungsi dari jenis tegangan (tekanan merata pada dua tepi yang berlawanan) dan kondisi tumpuan tepi (tumpuan sederhana pada keempat tepi), serta rasio aspek a/b . Seperti ditunjukkan pada Gambar (3.4).



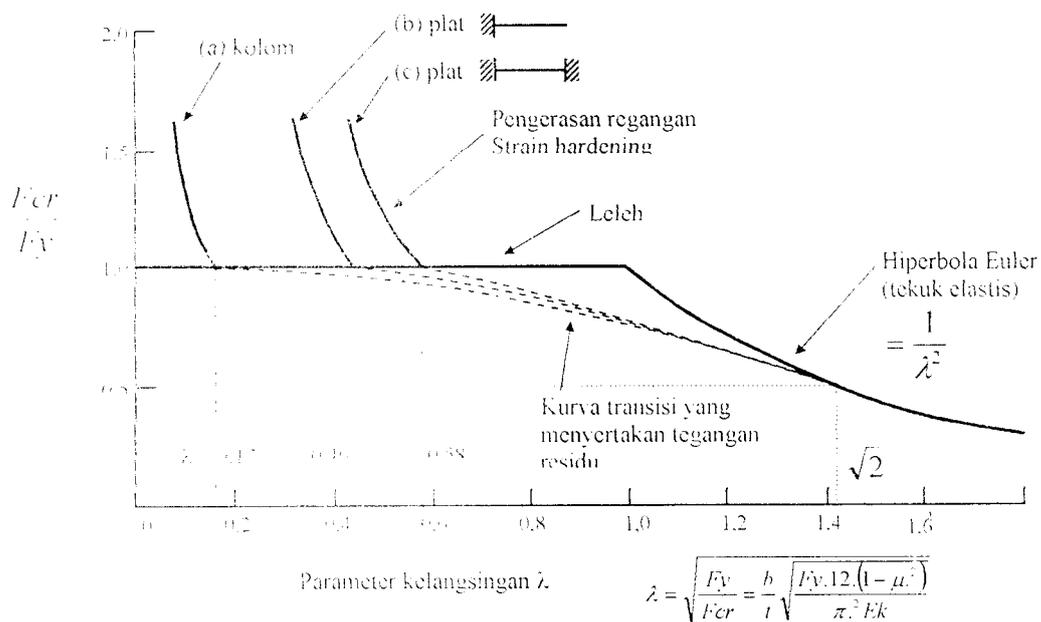
Gambar 3.4. Koefisien tekuk elastis untuk tekanan pada pelat segi empat datar (diadaptasi dari Gerard dan Becker, *Handbook of Structural Stability, Part I - Buckling of Flat Plates*).

Nilai k dipengaruhi oleh perbandingan a/b dan kondisi dari tepi-tepi pelat dimana semakin besar nilai a/b maka nilai k akan mendekati konstan.

3.3.2. Batas Rasio Lebar terhadap Tebal Pelat dalam Perencanaan Tegangan Kerja

Kerja

Salmon dan Johnson, 1990, mengemukakan bahwa kekuatan pelat yang sebenarnya dinyatakan oleh kurva transisi antara kurva Euler dan titik dimana mulai terjadi pengerasan regangan, seperti pada Gambar (3.5) karena pelat seperti halnya profil tempa mengandung tegangan sisa.



Gambar 3.5. Perbandingan antara tekuk plat dengan tekuk kolom (Diadaptasi dari Geerhard Haaijer dan Bruno Thurlimann, *On Inelastic Buckling In Steel*).

Dari Gambar (3.5), apabila dibandingkan antara kolom (kurva a) dan pelat (kurva b dan c), terlihat bahwa pelat mencapai kondisi pengerasan regangan pada harga λ_c yang relatif lebih tinggi. Hal ini berarti tegangan kritis yang dicapai oleh pelat jauh

lebih rendah dari tegangan kritis kolom. Sesungguhnya nilai λ_c tersebut kurang tepat untuk kondisi pada profil C bentukan dingin, hal ini dikarenakan profil ini memiliki penampang yang relatif tipis sehingga tumpuan jepitnya tidak dapat mengekang tepi pelat secara sempurna. Namun karena belum ada penelitian lebih lanjut tentang λ_c untuk plat yang relatif tipis maka $\lambda_c = 0,46$ dan $0,58$ tetap dipakai dalam penelitian ini. Pada saat memperhitungkan perilaku tak elastis, maka modulus elastis yang digunakan untuk menghitung tegangan harus berupa modulus singgung (E_t).

Dengan mendefinisikan parameter kelangsingan sebagai:

$$\lambda = \sqrt{\frac{F_y}{F_{cr}}} \quad (3.8)$$

dapat ditulis dalam bentuk :

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{F_{cr}}{F_y} \quad (3.9)$$

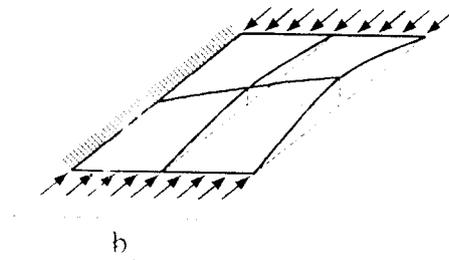
maka, Persamaan (3.9) untuk pelat menjadi

$$\lambda^2 = \left(\frac{b}{t}\right)^2 F_y \left[\frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 E} \right] \frac{1}{k} \quad (3.10)$$

$$\frac{b}{t} = \left(\frac{\lambda^2 \pi^2 E}{12 F_y (1-0,3^2) k} \right)^{0.5} \quad (3.11)$$

$$\frac{b}{t} = 425 \lambda_c \sqrt{\frac{k}{F_y (\text{Mpa})}} \quad (3.12)$$

λ_c harus dibatasi agar tercapai pengerasan regangan tanpa adanya tekuk pelat. Untuk elemen tanpa pengaku (pelat dengan satu tepinya bebas) seperti ditunjukkan pada Gambar (3.6) harga $\lambda_c = 0,46$.



Gambar 3.6. Defleksi tekuk pelat pada sayap (jepit-bebas).

Bila harga $\lambda_c = 0,46$ dimasukkan ke dalam Persamaan (3.12), maka

$$\frac{b}{t} = \left(\frac{\lambda_c^2 \pi^2 E}{12 I_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5} \quad (3.13)$$

$$\frac{b}{t} = \left(\frac{(0,46)^2 \pi^2 2 \cdot 10^5}{12 I_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5} \quad (3.14)$$

$$\frac{b}{t} = 195,6 \sqrt{\frac{k}{I_y (\text{Mpa})}} \quad (3.15)$$

Mengambil keadaan batas yang sesuai, untuk nilai $k = 0,67$

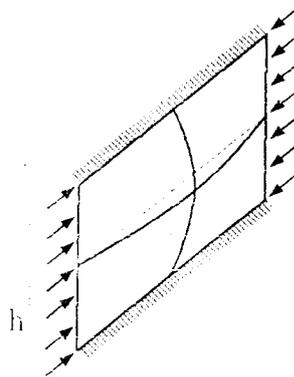
$$\frac{b}{t} = 195,6 \sqrt{\frac{0,67}{I_y (\text{Mpa})}} \quad (3.16)$$

$$\frac{b}{t} = \frac{171}{\sqrt{f'_y} \text{ (Mpa)}} \quad (3.17)$$

Batas rasio b/t pada sayap untuk menghindari tekuk adalah : $\frac{b}{t} \leq \frac{171}{\sqrt{240} \text{ (Mpa)}} = 11$

Untuk pelat dengan kondisi tumpuan tepi jepit-jepit, seperti ditunjukkan pada

Gambar (3.7) harga $\lambda_c = 0.58$



Gambar 3.7. Defleksi tekuk pelat pada Badan (jepit-jepit)

Bila harga $\lambda_c = 0.58$ dimasukkan ke dalam Persamaan (3.12), maka

$$\begin{aligned} \frac{b}{t} &= \left(\frac{\lambda_c^2 \pi^2 E'}{12 f'_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5} \\ \frac{b}{t} &= \left(\frac{(0,58)^2 \pi^2 2 \cdot 10^5}{12 f'_y (1 - 0,3^2)} k \right)^{0,5} \\ \frac{b}{t} &= 246,5 \sqrt{\frac{k}{f'_y \text{ (Mpa)}}} \quad (3.18) \end{aligned}$$

batas rasio h/t pada badan untuk menghindari tekuk adalah: $\frac{h}{t} \leq \frac{500}{\sqrt{f'_y} \text{ (Mpa)}}$

Berdasarkan tabel profil konstruksi baja menunjukkan bahwa profil C bentukan dingin mempunyai rasio lebar terhadap tebal seperti terlihat dalam Tabel (3.1).

Tabel 3.1. Nilai rasio lebar terhadap tebal profil C

a x b x c	T (mm)	b/t	H/t
100 x 50 x 20	2,3	21,7	43,5
	3,2	15,6	31,3
125 x 50 x 20	2,3	21,7	54,3
	3,2	15,6	39
150 x 65 x 20	2,3	28,3	62,2
	3,2	20,3	46,9
200 x 75 x 20	2,3	32,6	87
	3,2	23,4	62,5

Dari Tabel (3.1) nilai rasio lebar terhadap tebal b/t (pada sayap) atau H/t (pada badan) dari profil C canai dingin rawan terhadap bahaya tekuk.

3.4. Tekuk Kolom

Bowles, 1981, mengemukakan bahwa bagian konstruksi desak vertikal dalam sebuah konstruksi lazimnya diidentifikasi sebagai kolom, pendapat serupa juga dikemukakan oleh *Salmon dan Johnson, 1990*. Keruntuhan akibat tekuk apabila

tegangan pada seluruh penampang masih alam kondisi elastis, tekuk dapat dihitung dengan persamaan tekuk Euler seperti pada persamaan (3.19) berikut ini

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad 3.19$$

Keterangan : F_{cr} = tegangan kritis (Mpa)

E = modulus elastis baja ($2 \cdot 10^5$ Mpa)

KL/r = rasio kelangsingan

K = faktor panjang efektif

L = panjang batang

r = radius girasi $\sqrt{I/Ag}$

Dari persamaan (3.19) dapat diketahui bahwa semakin langsing suatu batang kemungkinan terjadi tekuk akan semakin besar.

3.5. Penempatan Pengaku Lateral (*Bracing*)

Berdasarkan asumsi bahwa beban transversal dikenakan secara vertikal melalui pusat geser dan tidak memperhitungkan tekuk puntir lateral pada penelitian ini, maka perlu ditambahkan pengaku lateral (*bracing*) dengan interval tertentu agar kegagalan akibat tekuk puntir lateral dapat dicegah.

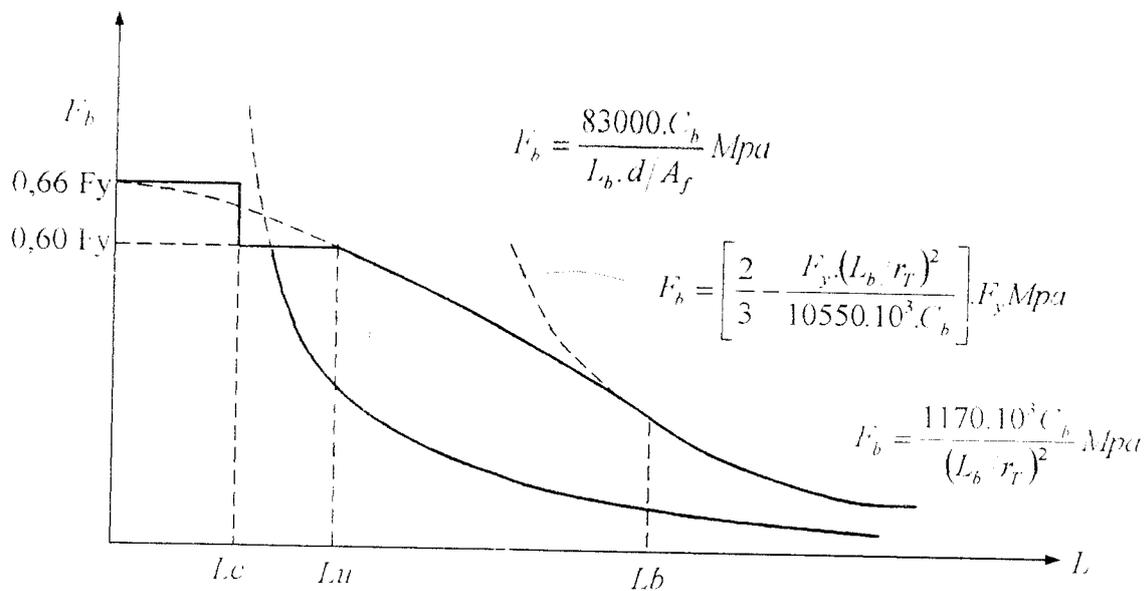
Pengaku lateral (*bracing*) pada struktur dua tumpuan sederhana (*simple beam*) akan diperlukan bila syarat kompak pada struktur tersebut tidak terpenuhi. Adapun

syarat kompak dari suatu struktur adalah apabila memenuhi persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$\text{Sayap: } \frac{bf}{2tf} \leq \frac{170}{\sqrt{F_y}} \text{ Mpa} \quad 3.20$$

$$\text{Badan: } \frac{d}{tw} \leq \frac{1690}{\sqrt{F_y}} \text{ Mpa} \quad 3.21$$

Apabila syarat kompak tersebut di atas tidak terpenuhi maka struktur tersebut harus diberi pengaku lateral, dengan ketentuan jarak sebagai berikut (gambar 3.8).



Gambar 3.8. Tegangan pada balok dengan *lateral support* pada jarak tertentu

Dari gambar (3.8) dapat dilihat bahwa :

1. Apabila : $L < L_c$

Maka tegangan ijin maksimal dipakai : $F_b = 0,66 F_y$

L_c diambil nilai terkecil dari :

$$L_c = \frac{200 \cdot b_f}{\sqrt{F_y}} \text{ Mpa} \quad 3.22$$

$$L_c = \frac{138000}{(d/A_f) \cdot F_y} \text{ Mpa} \quad 3.23$$

2. Apabila : $L_c < L < L_u$

Maka tegangan ijin maksimal dipakai : $F_b = 0,60 F_y$

L_u diambil nilai terbesar dari :

$$L_u = \frac{2900}{(d/A_f) \cdot F_y} \text{ Mpa} \quad 3.24$$

$$L_u = r_t \sqrt{\frac{14800 \cdot C_b}{F_y}} \text{ Mpa} \quad 3.25$$

dimana : $r_t = \sqrt{\frac{I_x}{A_f + \frac{1}{6} A_w}}$

3. Apabila : $L_u < L < r_t \sqrt{\frac{510000 \cdot C_b}{F_y}} \text{ Mpa}$

Maka tegangan F_b diambil nilai terbesar dari persamaan :

$$F_b = \left[\frac{2}{3} - \frac{F_y \cdot (L_b / r_t)^2}{10550 \cdot 10^3 \cdot C_b} \right] \cdot F_y \text{ Mpa} \quad 3.26$$

$$F_b = \frac{83000 \cdot C_b}{L \cdot (d/A_f)} \text{ Mpa} \quad 3.27$$

3.6. Alat Sambung Las

Pengelasan merupakan proses penggabungan beberapa material (biasanya logam) dengan pemanasan sampai temperatur yang sesuai sedemikian rupa sehingga bahan-bahan tersebut melebur menjadi satu material.

Elektrode las saat ini paling umum digunakan untuk pekerjaan konstruksi. Arus listrik dialirkan melalui batang elektrode pada batang yang akan disambung. Hubungan pendek yang terjadi mengakibatkan elektrode dan batang yang disambung meleleh bersama-sama sehingga menyatu. Elektroda las dibungkus dengan bahan yang apabila melumer akan menghasilkan gas dan kerak yang melindungi sambungan terhadap oksidasi lebih lanjut. Pada penelitian ini kami menggunakan pengelasan dengan tipe las *fillet* (las sudut) dengan alasan las sudut ini kurang membutuhkan presisi pada pengepasannya karena masing-masing bagian cukup ditumpang tindihkan. Lagipula, pinggiran bagian-bagian yang disambungkan jarang membutuhkan persiapan khusus seperti pemotongan miring atau pengirisan tegak, karena kondisi pinggiran hasil pemotongan dengan api atau pengirisanpun sudah memadai.

3.6.1. Kekuatan Nominal Las

Menurut *Salmon dan Johnson, 1992*, Kekuatan desain per satuan panjang las fillet didasarkan atas resistensi geser melalui leher las sebagai berikut:

$$\phi R_{ns} = 0,75 t_e (0,60 F_{EXX}) \quad \text{las } \textit{fillet} \quad (3.28)$$

namun persamaan (3.28) tidak boleh kurang dari kekuatan patahan (*rupture*) geser dari logam dasar di dekatnya, yaitu :

$$\phi \cdot R_{mw} = 0.75t(0.60F_u) \quad \text{logam dasar} \quad (3.29)$$

Keterangan :

R_{mw} = kekuatan nominal per satuan panjang las, namun tidak melebihi kuatannominal per satuan panjang material dasar didekatnya

ϕ = faktor resistensi (untuk las, ϕ adalah sama dengan faktor untuk material yang dihubungkannya 0,75 untuk keadaan retakan)

t_e = dimensi leher efektif

F_{ew} = kekuatan tarik material elektroda

t = tebal material dasar di sepanjang las

F_u = kekuatan tarik logam dasar

3.7. Perkuatan Pelat

Padoshujayo, 1992, mengemukakan bahwa dari tinjauan terhadap bahaya tekuk pelat dapat diketahui apakah pelat aman dari bahaya tekuk atau tidak. Bila ada bahaya tekuk dapat dilakukan penggantian pelat dengan menggunakan pelat yang lebih tebal atau memperkuat pelat dengan memasang elemen-elemen pengaku. Elemen-elemen pengaku dipasang menempel pada dua bidang permukaan pelat atau hanya satu bidang permukaan pelat saja. Bahan elemen pengaku sebaiknya dibuat minimal kekuatan bahanya sama dengan pelat yang diperkuat.

Pemasangan perkuatan perlu memperhatikan beberapa hal agar perkuatan tersebut dapat berfungsi secara efektif, yaitu :

- a) Perkuatan dapat mengubah pola lipatan pelat sehingga akan diperoleh tegangan kritis yang lebih tinggi. Ini dapat terjadi jika kekakuan badan adalah cukup besar untuk dapat menimbulkan titik balik di tempat-tempat perkuatan dipasang. Pada kejadian ini pelat dapat dianggap bersendi pada pengaku-pengaku tersebut.
- b) Perkuatan dapat memperbesar kekakuan pelat dalam arah pengaku, sehingga tegangan kritis yang lebih besar dapat dicapai tanpa perubahan pola lipatan.

3.8. Hubungan Momen dengan Kelengkungan

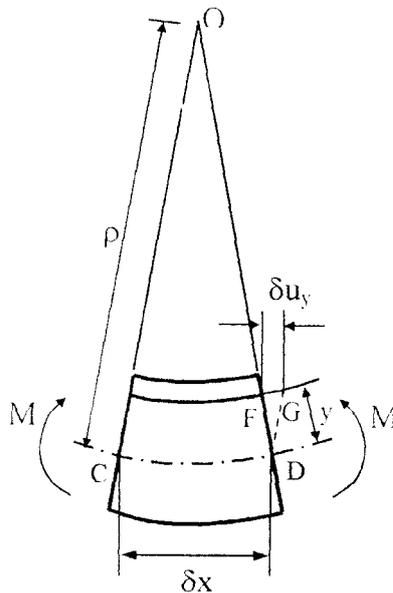
Tung Au dan Christiano, 1987, mengemukakan bahwa jika pada suatu balok mengalami lentur, maka bentuk perubahan dari sumbu netral disebut dengan kurva elastis (*elastic curve*). Memperhatikan elemen kecil δx , seperti ditunjukkan pada Gambar (3.9). Jika y sebagai titik ordinat dari sumbu netral elemen, berharga positif ketika titik tersebut diatas sumbu netral. Dengan mengasumsikan bahwa bagian tersebut akan tetap datar selama terdeformasi. Tegangan lentur σ pada serat sejauh y dari garis netral untuk bahan yang bersifat elastis linier adalah sebagai berikut :

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (3.30)$$

dengan M adalah momen pada bagian tersebut dan I adalah momen inersia tampang. Tanda negatif menunjukkan gaya tekan. Gambar (3.9) menunjukkan perpotongan O disebut dengan pusat kelengkungan (*center of curvature*) dan jarak sejauh ρ dari

perpotongan O menuju sumbu netral disebut dengan jari-jari kelengkungan (*radius of curvature*). Untuk serat pada jarak sejauh y dari sumbu netral, panjang awal dari elemen δx memendek menjadi δu_y , dan regangan pada serat tersebut sama dengan $\epsilon = \delta u_y / \delta x$. Dengan δx mendekati nol,

$$\epsilon = -\frac{du_y}{dx} \quad (3.31)$$



Gambar 3.9. Deformasi balok dalam lenturan

dari segitiga OCD dan FGD didapatkan

$$\frac{\delta u_y}{y} = \frac{\delta x}{\rho} \text{ atau } \frac{du_y}{dx} = \frac{y}{\rho} \quad (3.32)$$

dari persamaan (3.31) dan (3.32) didapat :

$$\epsilon = -\frac{y}{\rho} \quad (3.33)$$

untuk bahan elastis memakai hukum Hooke,

$$\sigma = \epsilon E = -\frac{Ey}{\rho} \quad (3.34)$$

dengan menyamakan persamaan (3.30) dan (3.34), hubungan momen kelengkungan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{\rho} \quad (3.35)$$

Pada dasarnya hubungan gaya-deformasi dengan M adalah gaya dan kelengkungan $1/\rho$ merupakan hasil dari perubahan bentuk. Besaran EI sebagai faktor kekakuan (*flexural rigidity*) atau *bending stiffness* dari balok. Dalam koordinat kartesian kurva kelengkungan didefinisikan

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (3.36)$$

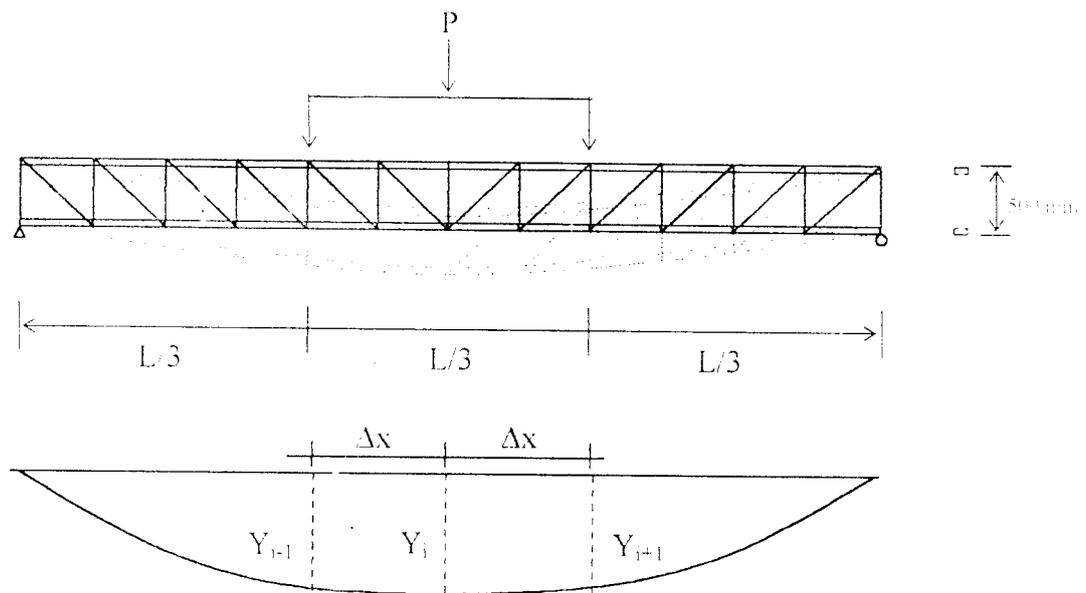
karena kemiringan dy/dx dari kurva elastis adalah sangat kecil, maka

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 = 0$$

Sehingga persamaan (3.36) dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \phi = \frac{M}{EI} \quad (3.37)$$

Dari pengujian kuat lentur balok badan terbuka, akan didapatkan defleksi pada titik-titik distrik seperti pada Gambar (3.9) *Fatkhurrahman N., 1991*, mengemukakan pendekatan kemiringan menggunakan metode *Central Differences*. Mengacu pada Gambar (3.10).



Gambar 3.10. Defleksi pada balok badan terbuka

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_2 - y_1}{\Delta x} \quad (3.38)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta_x^2} \quad (3.39)$$

$$\phi = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{\Delta_x^2} \quad (3.40)$$

Dari persamaan (3.40) tampak bahwa kelengkungan dapat dicari dengan bantuan tiga titik seperti ditunjukkan pada Gambar (3.10). Mengacu pada Gambar (3.10) didapat momen maksimum (M) sebesar :

$$M = \frac{1}{6} PL \quad (3.41)$$

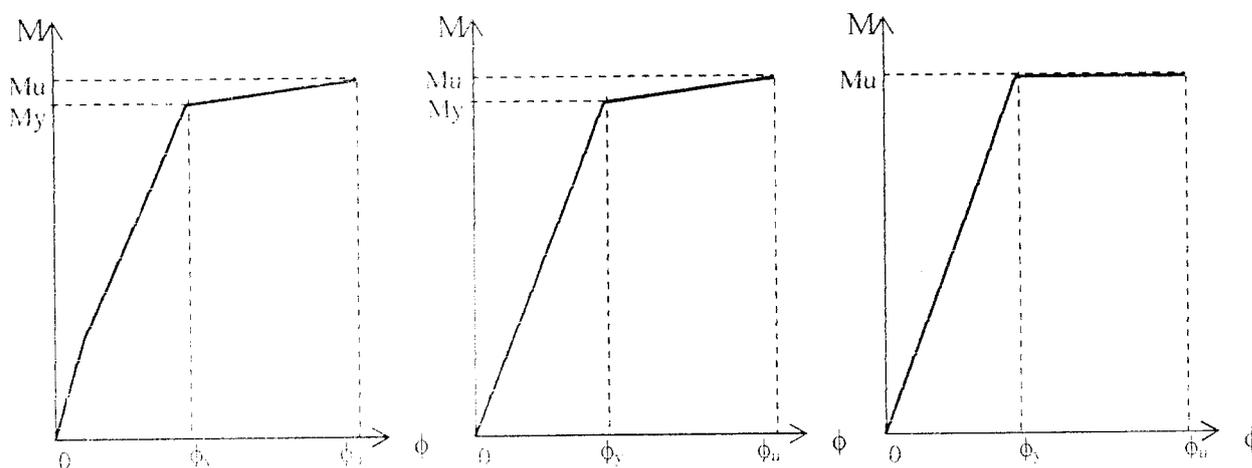
Dengan mengacu pada persamaan (3.37) dan (3.41) akan didapat hubungan momen dengan kelengkungan sebagai berikut.

$$EI = \frac{M}{\phi} \quad (3.42)$$

$$M = EI\phi \quad (3.43)$$

$$M = EI \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (3.44)$$

Hubungan momen-kelengkungan ($M-\phi$) yang ideal menurut *Park dan Paulay, 1975*, ditunjukkan pada grafik tri-linier, kemudian berubah menjadi kurva bilinear. Seperti ditunjukkan pada Gambar (3.11) :



Gambar 3.11. Hubungan Momen (M) dan kelengkungan (ϕ).

Pada saat pembebanan telah tercapai pada P_{\max} dan terjadi momen batas yang menimbulkan mekanisme kerutuhan maka penampang ini akan terus berdeformasi tanpa menghasilkan daya tahan tambahan. Sudut regangan ϕ akan elastis seluruhnya setelah itu keadaan tidak stabil dan lendutan tidak terkendali Gambar (3.11). Karena profil canai dingin mempunyai tegangan kritis yang jauh dibawah tegangan lelehnya ($F_{cr} < F_y$) maka $M_n < M_v$, dimana :

$$M_n = F_{cr} \times I \times L < M_v = F_y \times A \times L \quad (3.45)$$

3.9. Kekakuan

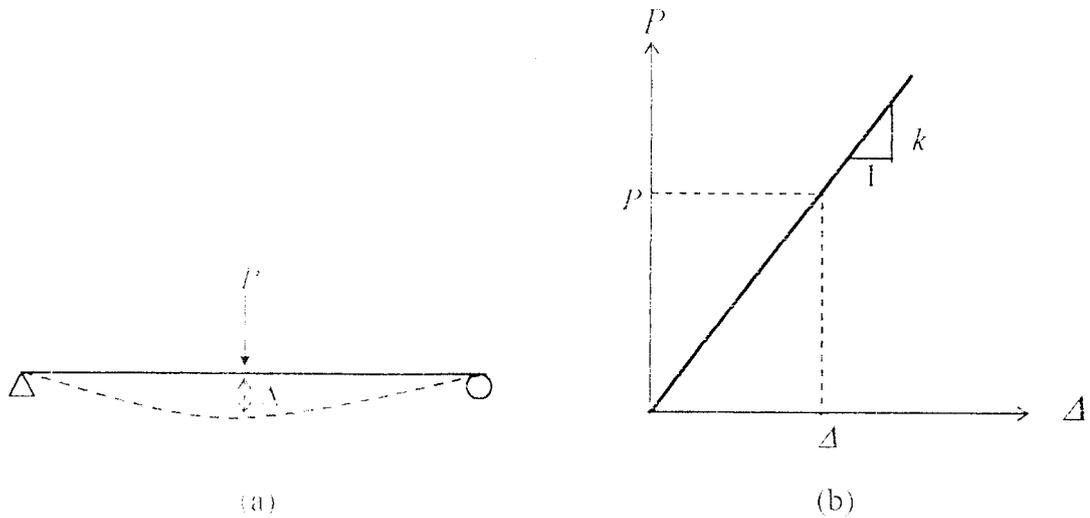
Menurut *Gere dan Timoshenko, 1985*, kekakuan (k) didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu lendutan satuan. Pendapat yang sama dikemukakan oleh *West, 1980*. Dengan memperhatikan Gambar (3.12.a) menunjukkan bahwa beban (P) yang bekerja pada struktur menyebabkan terjadinya lendutan (Δ). Besarnya lendutan sesuai dengan beban yang bekerja sehingga struktur bersifat elastis linier. Gambaran dari hubungan beban dengan lendutan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar (3.12.b). Kemiringan dari lengkung yang dihasilkan disebut sebagai kekakuan (*stiffness*), dan dapat dirumuskan sebagai :

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (3.46)$$

Keterangan : k = kekakuan

P = beban

Δ = lendutan



Gambar 3.12. (a) Lendutan pada balok
(b) Kekakuan dari grafik beban- lendutan

Untuk balok dalam keadaan lentur murni kekakuan lentur (*flexural stiffness*) EI didefinisikan sebagai momen per unit kelengkungan, dan dapat dirumuskan sebagai :

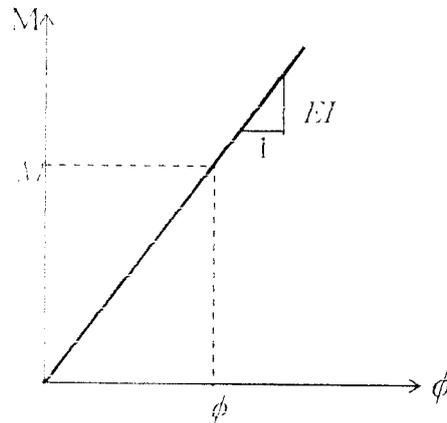
$$EI = \frac{M}{\phi} \quad (3.47)$$

Keterangan : EI = kekakuan lentur

M = momen

ϕ = kelengkungan

Kekakuan lentur (EI) yang didapatkan dari hubungan momen-kelengkungan ditunjukkan pada Gambar (3.13)



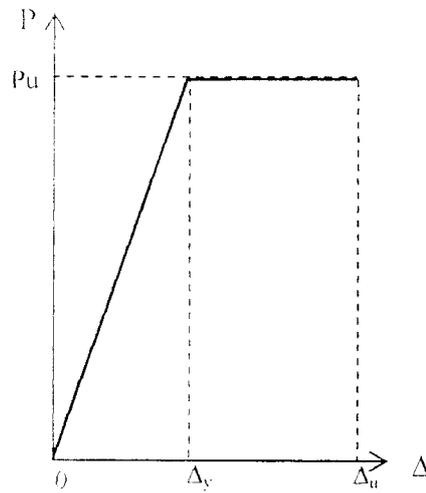
Gambar 3.13. Kekakuan dari grafik momen-kelengkungan

3.10. Daktilitas

Englekirk, 1994, mengemukakan bahwa suatu bahan dikatakan daktil ketika bahan tersebut dapat menahan deformasi purna luluh. Daktilitas (μ) didapatkan dengan membagi deformasi yang telah dicapai dengan deformasi pada saat luluh.

Menurut *Park dan Paulay, 1975*, daktilitas merupakan rasio dari deformasi ultimit dengan deformasi pada saat pertama luluh.

Dalam penelitian, setelah didapat besarnya lendutan, maka daktilitas simpangan dapat dicari dari grafik hubungan beban-lendutan seperti ditunjukkan pada Gambar (3.14) yaitu perbandingan antara Δ_u dan Δ_y .



Gambar 3.14. Grafik hubungan beban-lendutan

$$\mu_{\text{simpangan}} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3.48)$$

dimana : $\mu_{\text{simpangan}}$ = daktilitas simpangan

Δ_u = lendutan akhir daerah *post-elastic*

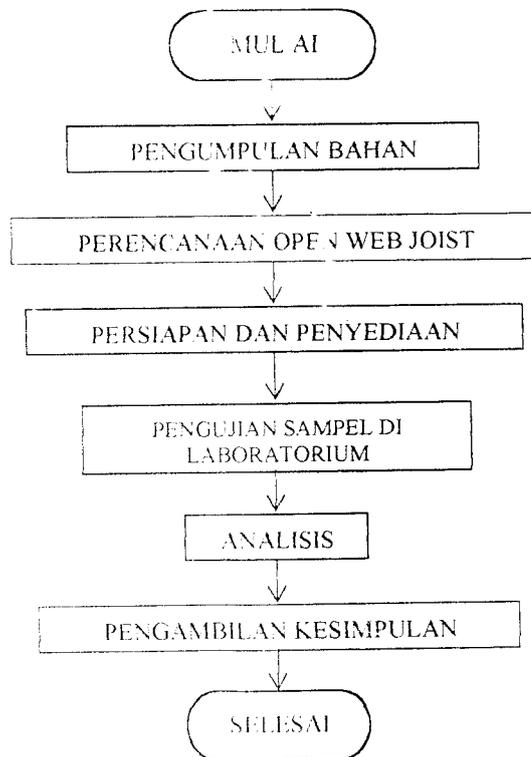
Δ_y = lendutan pada pertama leleh

Sedangkan daktilitas kelengkungan diperoleh dari grafik hubungan momen-kelengkungan, seperti ditunjukkan pada Gambar (3.15) yaitu perbandingan antara ϕ_u dan ϕ_y .

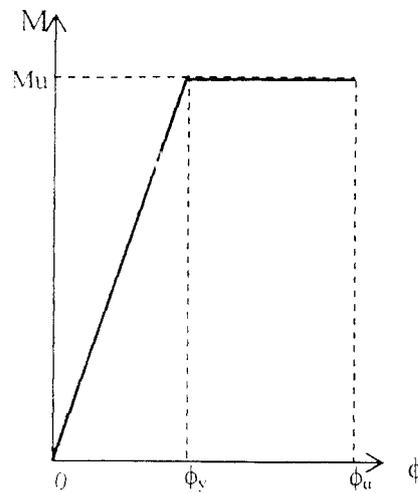
BAB IV METODE PENELITIAN

4.1. Metode Penelitian

Metode penelitian ini adalah suatu cara pelaksanaan penelitian dalam rangka mencari jawaban atas permasalahan penelitian yang diajukan dalam penulisan tugas akhir. Jalannya penelitian dapat dilihat dari flowchart pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Flowcart metode penelitian



Gambar 3.15. Grafik hubungan momen-kelengkungan

$$\mu_{\text{kelengkungan}} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (3.49)$$

dimana : $\mu_{\text{kelengkungan}}$ = daktilitas kelengkungan

ϕ_u = kelengkungan pada akhir daerah *post-elastic*

ϕ_y = kelengkungan pada pertama leleh

3.11. Hipotesa

Dengan memperhatikan latar belakang, tujuan penelitian, tinjauan pustaka, dan landasan teori bahwa :

1. Balok badan terbuka tanpa perkuatan akan mengalami tekuk lokal maupun tekuk lateral.
2. Penambahan perkuatan pada balok badan terbuka akan meningkatkan tegangan kritis pada komponen yang menerima tekan.

4.2. Persiapan Bahan dan Alat

Sebelum melaksanakan penelitian perlu diadakan persiapan bahan dan alat yang akan digunakan sebagai sarana mencapai maksud dan tujuan penelitian.

4.2.1. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

a. Baja profil

Baja profil yang digunakan adalah baja profil C bentukan dingin C100x50x2,3 sebagai batang horisontal.

b. Pelat baja

Pelat baja tebal 3 mm digunakan sebagai perkuatan pada struktur balok badan terbuka.

c. Las

Sambungan las menggunakan Elektroda E70XX dengan kekuatan tarik maksimum $F_u = 70$ Ksi (482,65 Mpa).

d. Batang pengisi

Batang pengisi atau badan balok menggunakan baja tulangan polos dengan diameter 12 mm.

e. Profil siku

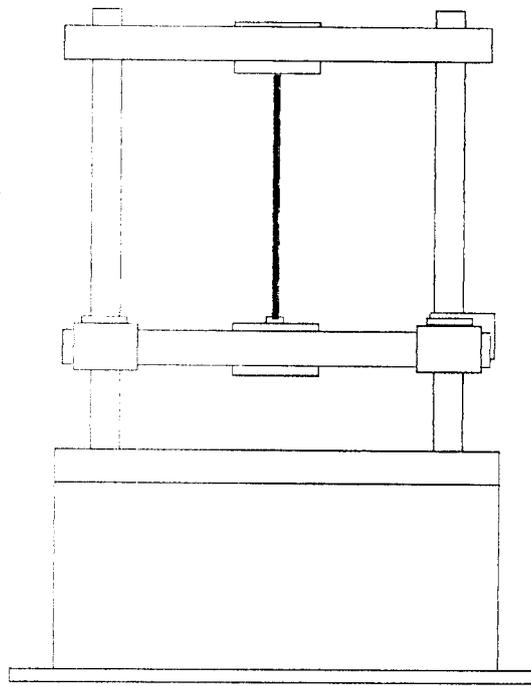
Profil siku L50x50x4 dan L40x40x3 digunakan untuk *bracing*.

4.2.2 Peralatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan beberapa peralatan sebagai sarana mencapai maksud dan tujuan. Adapun peralatan tersebut terdiri dari :

a. Mesin Uji Kuat Tarik

Digunakan untuk mengetahui kuat tarik baja. Alat yang digunakan yaitu Universal Testing Material (UTM) merk Shimadzu type UMH-30 dengan kapasitas 30 ton, seperti pada Gambar (4.2).

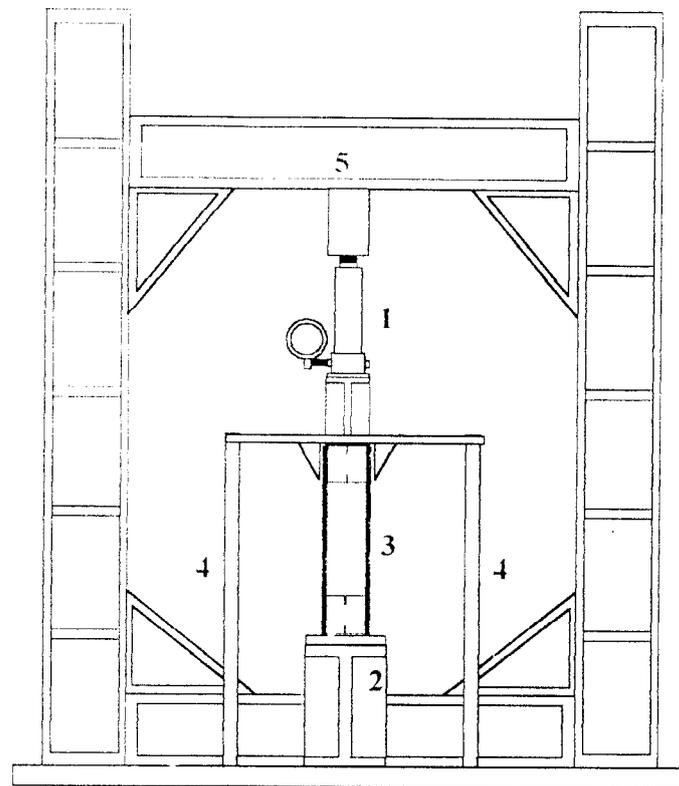


Gambar 4.2. *Universal Testing Material Shimadzu UMH30*

b. *Loading Frame*

Untuk keperluan uji pembebanan digunakan *loading frame*, dari bahan baja profil WF 450x200x9x14, seperti pada Gambar (4.3). Bentuk dasar *Loading Frame* berupa portal segi empat yang berdiri di atas lantai beton (*rigid floor*) dengan perantara pelat dasar dari besi setebal 14 mm. Agar *Loading Frame* tetap stabil, pelat dasar dibaut ke lantai beton dan kedua kolomnya dihubungkan oleh

balok WF 450x200x9x14. Posisi balok portal dapat diatur untuk menyesuaikan dengan bentuk dan ukuran model yang akan diuji.



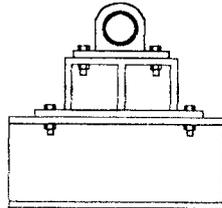
Keterangan :

- | | |
|-------------------|-------------------------|
| 1. Hydraulic Jack | 4. Bracing |
| 2. Dukungan | 5. Baja WF 450x200x9x14 |
| 3. Benda uji | |

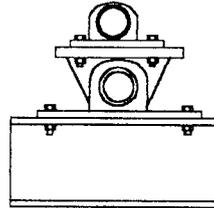
Gambar 4.3. Bentuk fisik *Loading Frame*

c. Dukungan sendi dan rol

Dukungan sendi dipasang pada salah satu dukungan balok badan terbuka dan dukungan rol dipasang pada dukungan lainnya, seperti pada Gambar (4.4).



(a.) Dukungan Sendi

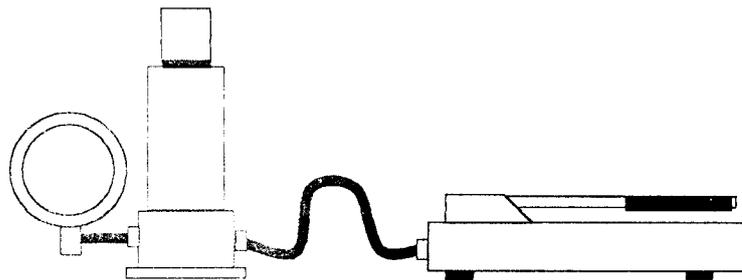


(b.) Dukungan Rol

Gambar 4.4. Dukungan Sendi dan Rol

d. *Hydraulic Jack*

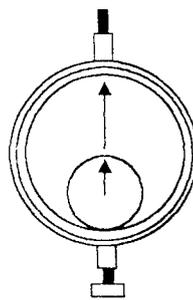
Alat ini digunakan untuk memberikan pembebanan pada pengujian desak balok badan terbuka dengan beban sentris P yang mempunyai kapasitas maksimum 20 ton dengan ketelitian pembacaan sebesar 0,25 ton. Alat tersebut dapat dilihat pada gambar (4.5)



Gambar 4.5. *Hydraulic Jack*

e. *Dial Gauge*

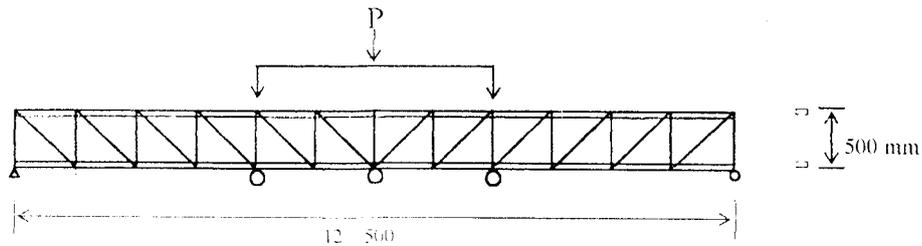
Dial Gauge digunakan untuk mengukur besarnya lendutan yang terjadi dengan kapasitas lendutan maksimum 50 mm dengan ketelitian pembacaan *dial* 0,01 mm, seperti pada Gambar (4.6). Pada penelitian tugas akhir ini digunakan *Dial Gauge* sebanyak tiga buah.



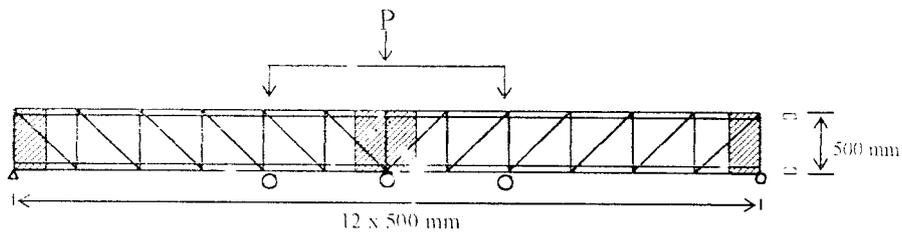
Gambar 4.6. *Dial Gauge*

4.3. Model Benda Uji

Model benda uji dalam penelitian ini berupa balok badan terbuka dengan panjang 6 m, merupakan balok yang disusun dari profil C bentukan dingin C100x50x2,3 sebagai batang horizontal, besi tulangan diameter 12 mm sebagai batang vertikal (badan balok) dan pelat tebal 3 mm sebagai perkuatan. Benda uji dibuat sebanyak dua buah sampel untuk masing-masing variasi. Jadi jumlah seluruhnya ada empat buah benda uji. Bentuk model benda uji balok badan terbuka tanpa perkuatan dan dengan perkuatan dapat dilihat pada Gambar (4.7) dan Gambar (4.8)



Gambar 4.7. Balok badan terbuka tanpa perkuatan.



Gambar 4.8. Balok badan terbuka dengan perkuatan.

4.4. Pembuatan Benda Uji

Setelah persiapan bahan dan perhitungan dimensi balok badan terbuka, maka selanjutnya adalah pembuatan benda uji sesuai dengan tahapan-tahapan sebagai berikut :

1. Bahan-bahan yang telah disiapkan diukur sesuai dengan rencana.
2. Profil C100x50x2,3 dengan panjang 6 m (batang horisontal) dirangkaikan menggunakan las dengan besi tulangan diameter 12 mm sebagai badan balok dengan panjang 0,5 m (batang vertikal) dan 0,71 m (batang diagonal) menjadi balok badan terbuka.

3. Untuk balok badan terbuka dengan perkuatan ditambahkan pelat baja tebal 3 mm pada tengah bentang dan masing-masing ujung bentang. Pelat perkuatan dipasang secara berpasangan pada sisi luar profil C.

4.5. Pengujian Benda Uji

Sebelum pengujian benda uji, terlebih dahulu dilakukan uji pendahuluan pada bahan-bahan yang digunakan untuk membuat balok badan terbuka, yaitu meliputi: pengujian kuat tarik baja dan pengujian kuat geser las. Setelah itu baru dilaksanakan pengujian pada benda uji, yang dilakukan secara bertahap disesuaikan dengan jumlah benda yang akan di uji.

4.5.1 Pengujian Kuat Tarik Baja

Pengujian kuat tarik baja dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Tegangan tarik baja dapat diketahui dengan membagi batas luluh awal dengan luas rata-rata dari luasan benda uji. Benda uji untuk kuat tarik baja dibuat seperti pada (Gambar 4.9).



Gambar 4.9. Benda uji untuk uji kuat tarik baja

4.5.2 Pengujian Kuat Geser Las

Pengujian kuat geser las untuk mengetahui kuat ultimit las listrik yang digunakan dalam pengelasan benda uji. Tegangan ultimit las dapat diketahui

dengan membagi kuat tarik las dengan luas rata-rata dari luasan las benda uji. (Gambar 4.10)



Gambar 4.10. Benda uji untuk uji kekuatan las

4.5.3 Pengujian Kuat Lentur

Sebelum pengujian dilaksanakan, terlebih dahulu dilakukan *setting* terhadap peralatan yang akan digunakan, sebagai berikut :

Dukungan rol dan dukungan sendi (Gambar 4.4.) diletakkan pada *loading frame* (Gambar 4.3.) pada posisi 3 meter dari pusat *loading frame*, yang dipergunakan untuk menumpu benda uji dengan panjang 6 meter. Kemudian pengaku lateral (*bracing*) ditempatkan pada sisi kiri dan kanan benda uji untuk menahan benda uji agar tidak mengalami tekuk lateral ke arah samping. Selanjutnya *Hydraulic Jack* (Gambar 4.5.) diletakkan diatas balok sepanjang 2 meter yang berfungsi sebagai pembagi beban agar diperoleh dua pusat beban yang membebani benda uji, dan tiga buah *Dial Gauge* (Gambar 4.6.) diletakkan di bawah benda uji seperti pada Gambar 4.2. dan Gambar 4.3.

Setelah proses *setting* peralatan selesai kemudian dilaksanakan pengujian kuat lentur pada benda uji. Proses pengujian yang dilakukan meliputi 2 tahap pengujian, yaitu :

1. Pengujian dengan menggunakan *Hydraulic Jack* dilakukan untuk mendapatkan lendutan yang terjadi kemudian diukur dengan menggunakan *Dial Gauge*. Proses

pelaksanaan pengujian ini yaitu : *Hidraulic Jack* dipompa untuk mendapatkan beban bertahap, yaitu kelipatan dari 2,5 kN. Pada setiap kelipatan beban 2,5 kN, pemompaan *Hidraulic Jack* dihentikan dilanjutkan pembacaan dan pencatatan *Dial Gauge*. Proses ini dilakukan hingga pada batas kekuatan tertentu sampai dengan maksimum, sehingga benda uji akan mengalami leleh sampai terjadi kerusakan pada benda uji.

2. Pengukuran Dengan *Stick* atau Batang

Pengujian *stick* merupakan kelanjutan dari pengujian dengan *Hidraulic Jack*, pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan beban maksimal yang dapat ditahan oleh benda uji dan lendutan maksimal yang terjadi. Proses pengujian *stick* yaitu : Mula-mula *stick* diberi tanda berupa garis, kemudian *Hidraulic Jack* dipompa sebanyak tiga atau empat kali dan dilakukan pemberian tanda garis pada *stick*. Selanjutnya dilakukan pembacaan dan pencatatan penurunan yang terjadi pada benda uji tersebut. Proses ini dilakukan terus hingga benda uji tidak mampu lagi menahan beban yang diberikan dari *Hidraulic Jack*.

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja dan Kuat Geser Las

Pelaksanaan pengujian kuat tarik baja dan kuat geser las dilakukan di Laboratorium Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Dari pengujian didapatkan hasil pada Tabel (5.1) sebagai berikut :

Tabel 5.1. Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja dan Kuat Geser Las

No.	Jenis Pengujian	F_y (Mpa)
1.	Kuat tarik pelat profil	229,25
2.	Kuat tarik pelat perkuatan	315,56
3.	Kuat tarik baja tulangan	481,88
4.	Kuat geser las	345,94

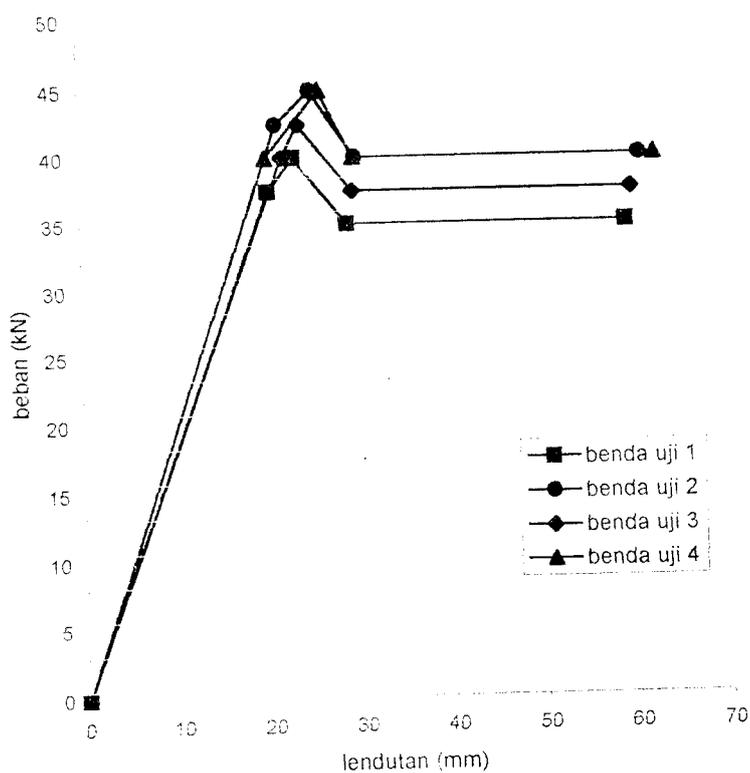
5.2. Hasil Pengujian Kuat Lentur Baja Balok Badan Terbuka

Pelaksanaan pengujian kuat lentur baja dilakukan di Laboratorium Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Dari hasil pengujian didapat grafik hubungan beban-lendutan dan momen-kelengkungan.

5.2.1. Hubungan Beban-Lendutan Hasil Pengujian

Pada pengujian kuat lentur ini, benda uji balok badan terbuka diberikan dua beban yang terletak setiap sepertiga bagian panjang. Secara bertahap balok badan

terbuka tersebut diberi kenaikan beban sebesar 250 kg (2,5 kN), kemudian pada setiap tahap pembebanan, lendutan yang terjadi dicatat. Data hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran. Dari data hasil pengujian pada keempat sampel balok badan terbuka dapat dibuat grafik hubungan beban-lendutan seperti pada Gambar (5.1).



Gambar 5.1. Grafik hubungan beban-lendutan dari keempat benda uji



5.2.2. Analisa Data Hubungan Beban-Lendutan

Dari data hasil pengamatan grafik hubungan beban-lendutan pada Gambar (5.1), dapat disimpulkan tentang kekakuan balok badan terbuka pada beban ultimit dalam Tabel (5.2).

Tabel 5.2. Analisa kekakuan dari hubungan beban-lendutan

Benda uji	Beban (P) kN	Lendutan (Δ) mm	Kekakuan (P/ Δ) kN/m	Kekakuan Rata-rata kN/m	Kekakuan Rata-rata (%)
Benda Uji 1 (Tanpa Perkuatan)	40.0	23,09	1732,352	1742,438	97,23
Benda Uji 3 (Tanpa Perkuatan)	42.5	24,24	1752,523		
Benda Uji 2 (Dengan Perkuatan)	45.0	25,09	1793,543	1792,116	100
Benda Uji 4 (Dengan Perkuatan)	45.0	25,13	1790,688		

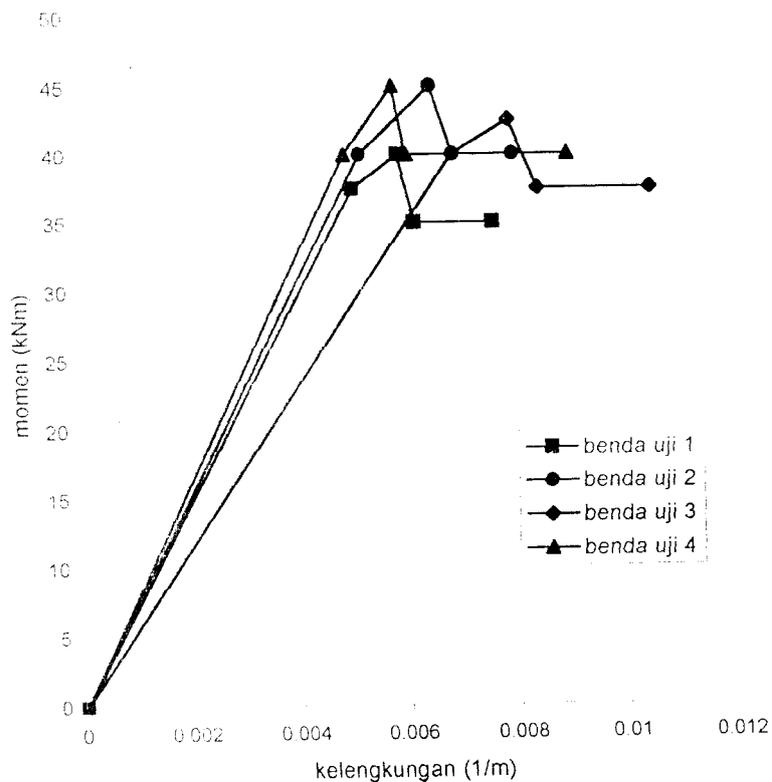
Dari data dalam Tabel (5.2) dapat diamati dan diteliti pengaruh pelat perkuatan pada kekuatan lentur balok badan terbuka dan lendutan yang terjadi pada benda uji. Selain itu, dari Gambar (5.1) dapat dicari daktilitas lendutan yang disajikan dalam Tabel (5.3).

Tabel 5.3. Analisa daktilitas lendutan dari hubungan beban-lendutan

Benda uji	Beban (P) kN	Lendutan (Δ_y) mm	Lend. maks. (Δ_u) mm	Daktilitas (Δ_u/Δ_y)	Daktilitas Rata-rata	Daktilitas Rata-rata (%)
Benda Uji 1 (Tanpa Perkuatan)	40.0	20,30	23,09	1,137	1,124	96,07
Benda Uji 3 (Tanpa Perkuatan)	42.5	21,83	24,25	1,110		
Benda Uji 2 (Dengan Perkuatan)	45.0	21,23	25,09	1,182	1,170	100
Benda Uji 4 (Dengan Perkuatan)	45.0	21,72	25,13	1,157		

5.2.3. Hubungan Momen Kelengkungan Hasil Pengujian

Dari data hasil penelitian diperoleh grafik hubungan beban-lendutan ($P-\Delta$) sehingga dapat dicari momen (M) dan kelengkungan (ϕ). Hubungan grafik $M-\phi$ dapat digunakan untuk mencari nilai kekakuan. Dari data hasil pengujian pada keempat sampel balok badan terbuka dapat dibuat grafik hubungan momen-kelengkungan seperti pada Gambar (5.3).



Gambar 5.2. Gambar hubungan momen-kelengkungan dari keempat benda uji

5.2.4. Analisa Data Hubungan Momen-Kelengkungan

Dari hasil pengamatan Grafik hubungan momen-kelengkungan pada Gambar (5.2) dapat dicari kekakuan balok badan terbuka, seperti pada Tabel (5.4).

Tabel 5.4. Analisa kekakuan dari hubungan momen-kelengkungan

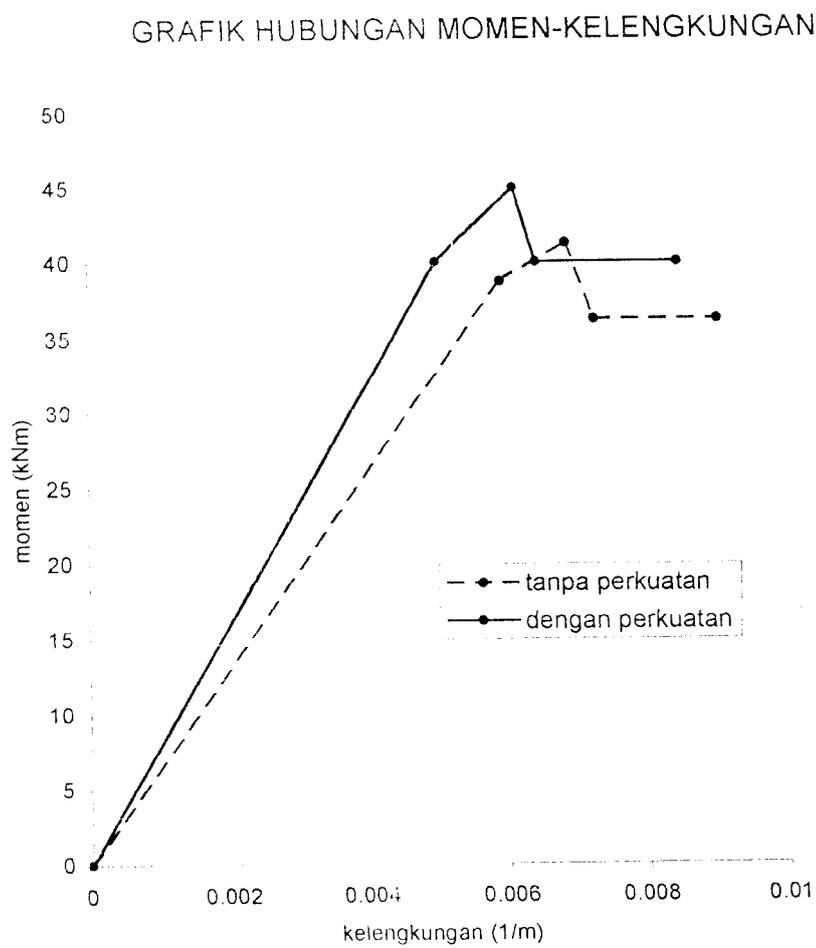
Benda uji	Momen (M) kNm	Kelengkungan (ϕ) 1/m	EI = M/ ϕ kNm ²	EI Rata-rata	EI Rata-rata (%)
Benda Uji 1 (Tanpa Perkuatan)	40,0	0,00582	6872,852	6002,851	80,97
Benda Uji 3 (Tanpa Perkuatan)	42,5	0,00828	5132,850		
Benda Uji 2 (Dengan Perkuatan)	45,0	0,00644	6987,577	7413,649	100
Benda Uji 4 (Dengan Perkuatan)	45,0	0,00574	7839,721		

Dari Gambar (5.2) juga dapat dicari daktilitas kelengkungan balok badan terbuka seperti dalam Tabel (5.5).

Tabel 5.5. Analisa daktilitas kelengkungan dari hubungan momen-kelengkungan

Benda uji	M kNm	ϕ_y 1/m	ϕ_u 1/m	Daktilitas ϕ_u / ϕ_y	Daktilitas rata-rata	Daktilitas rata-rata (%)
Benda Uji 1 (Tanpa Perkuatan)	40,0	0,00498	0,00582	1,169	1,160	94,31
Benda Uji 3 (Tanpa Perkuatan)	42,5	0,00682	0,00785	1,151		
Benda Uji 2 (Dengan Perkuatan)	45,0	0,00511	0,00644	1,260	1,230	100
Benda Uji 4 (Dengan Perkuatan)	45,0	0,00482	0,00574	1,191		

Berdasarkan hasil analisa dari keempat benda uji balok badan terbuka, grafik hubungan momen-kelengkungan dapat dikelompokkan lagi menjadi dua variasi benda uji yaitu balok badan terbuka tanpa perkuatan dan dengan perkuatan seperti ditunjukkan pada Gambar (5.4).



Gambar 5.4. Grafik hubungan momen-kelengkungan dari kedua variasi benda uji.

5.3. Analisa Kerusakan pada Benda Uji

Kerusakan yang terjadi pada balok badan terbuka tanpa perkuatan dalam penelitian ini terjadi pada bagian badan balok yang menerima gaya geser maksimal (batang vertikal pada ujung balok) dan momen maksimal (batang tepi atas dekat dengan titik pembebanan), seperti terlihat pada foto dalam lampiran Gambar (V.3). Kerusakan pada batang vertikal pada ujung bentang berupa tekuk tersebut menunjukkan bahwa batang tersebut tidak mampu menahan gaya geser. Kerusakan pada batang tepi atas berupa tekuk lokal pada profil C, disebabkan profil C memiliki rasio lebar terhadap tebal b/t (pada sayap) dan h/t (pada badan) yang besar.

Letak kerusakan yang terjadi pada balok badan terbuka dengan perkuatan dalam penelitian ini berbeda dengan balok badan terbuka tanpa perkuatan. Kerusakan tersebut terletak di tengah-tengah antara pelat perkuatan pada tengah dan pada tepi balok, seperti ditunjukkan pada foto lampiran Gambar (V.4). Kerusakan yang terjadi berupa tekuk lokal pada batang atas (profil C), pola kerusakan yang terjadi ini menunjukkan bahwa penambahan pelat perkuatan mampu menahan gaya geser maksimal pada ujung balok dan momen maksimal yang tidak dapat ditahan oleh balok badan terbuka tanpa perkuatan.

5.4. Pembahasan

5.4.1. Kuat Lentur Balok Berdasar Hubungan Beban-Lendutan

Dengan mengamati grafik hubungan beban-lendutan keempat benda uji Gambar (5.1), dapat dilihat bahwa keempat benda uji memiliki perilaku kuat lentur yang hampir sama. Mulai dari titik pangkal koordinat sampai pada titik

leleh, kurva masih tampak linier, setelah itu kurva tampak lebih condong sampai titik ultimit. Kemudian terjadi penurunan beban sampai titik tertentu, setelah itu kurva tampak datar dengan beban tetap sedangkan lendutannya mengalami peningkatan.

Balok badan terbuka dengan perkuatan (benda uji 2 dan 4) mempunyai kuat lentur yang lebih baik sebesar 8,33 % dibandingkan dengan balok badan terbuka tanpa perkuatan (benda uji 1 dan 3). Hal ini ditunjukkan dari grafik hubungan beban-lendutan dimana balok badan terbuka dengan perkuatan mampu menahan beban maksimum (P_{maks}) rata-rata sebesar 45 kN, sedangkan balok badan terbuka tanpa perkuatan mampu menahan beban maksimum (P_{maks}) rata-rata sebesar 41,25 kN.

Dari data tabel hubungan beban-lendutan dapat dipakai juga untuk mencari kekakuan (P/Δ). Pada pengujian ini nilai kekakuan keempat sampel berbeda-beda yang kemudian dirata-rata untuk dua variasi yaitu balok badan terbuka dengan perkuatan dan tanpa perkuatan Tabel (5.2), dan dapat diketahui penurunan nilai kekakuan dari balok tersebut.

Untuk balok variasi 1 yaitu balok badan terbuka tanpa perkuatan, rata-rata beban maksimumnya adalah 41,25 kN dan mempunyai nilai kekakuan rata-rata sebesar 1742,438 kN/m. Sedangkan untuk balok variasi 2 yaitu balok badan terbuka dengan perkuatan rata-rata beban maksimumnya adalah 45 kN dan nilai kekakuan rata-ratanya adalah 1792,116 kN/m. Dengan balok variasi kedua sebagai pembandingnya, maka dapat dilihat bahwa balok badan terbuka tanpa

perkuatan mengalami penurunan beban maksimum sebesar 8,33 % dan nilai kekakuan mengalami penurunan sebesar 2,77 %.

5.4.2. Daktalitas Simpangan ditinjau dari Hubungan Beban-Lendutan

Berdasarkan pengamatan dari grafik hubungan beban-lendutan yang kemudian dianalisa seperti ditampilkan pada Tabel (5.3), dapat dilihat daktalitas rata-rata balok dengan dua variasi (balok badan terbuka tanpa perkuatan dan dengan perkuatan) kemudian daktalitas rata-rata balok badan terbuka tersebut dapat dibandingkan.

Pada balok variasi 1 yaitu balok badan terbuka tanpa perkuatan, untuk dua sampel didapatkan daktalitas rata-rata sebesar 1,124. Dan untuk balok variasi 2 (balok badan terbuka dengan perkuatan) didapat daktalitas rata-rata sebesar 1,170. Dengan balok variasi 2 (balok badan terbuka dengan perkuatan) sebagai pembandingnya terlihat bahwa balok badan terbuka tanpa perkuatan mengalami penurunan daktalitas sebesar 3,93 %. Dari Tabel (5.3) terlihat bahwa daktalitas simpangan yang terjadi pada balok badan terbuka dengan perkuatan dan tanpa perkuatan masih relatif kecil (tidak daktil) hal ini disebabkan tekuk lokal yang terjadi pada profil C balok badan terbuka.

5.4.3. Kuat Lentur Balok ditinjau dari hubungan Momen-Kelengkungan

Dengan mengamati grafik hubungan momen-kelengkungan keempat benda uji Gambar (5.2), dapat dilihat bahwa keempat benda uji memiliki perilaku kuat lentur yang hampir sama. Mulai dari titik pangkal koordinat sampai pada titik leleh kurva masih tampak linier, setelah itu kurva tampak lebih condong sampai titik ultimit. Kemudian terjadi penurunan momen sampai titik tertentu, setelah itu

kurva tampak datar dengan momen tetap sedangkan kelengkungannya mengalami peningkatan.

Balok badan terbuka dengan perkuatan (benda uji 2 dan 4) mempunyai kuat lentur lebih besar dibandingkan balok badan terbuka tanpa perkuatan (benda uji 1 dan 3). Hal ini ditunjukkan dari grafik hubungan momen-kelengkungan dimana balok badan terbuka dengan perkuatan mampu menahan momen maksimum rata-rata (M_{maks}) sebesar 45 kNm, sedangkan balok badan terbuka tanpa perkuatan mampu menahan momen maksimum rata-rata (M_{maks}) sebesar 41,25 kNm.

Dari data tabel hubungan momen-kelengkungan dapat dipakai juga untuk mencari kekakuan, sehingga diperoleh kekakuan pada balok badan terbuka tanpa perkuatan dan balok badan terbuka dengan perkuatan, seperti ditunjukkan dalam Tabel (5.4), kemudian dengan mengambil balok variasi 2 (balok badan terbuka dengan perkuatan) sebagai pembandingnya maka dapat diketahui prosentase penurunan kekakuan balok variasi 1.

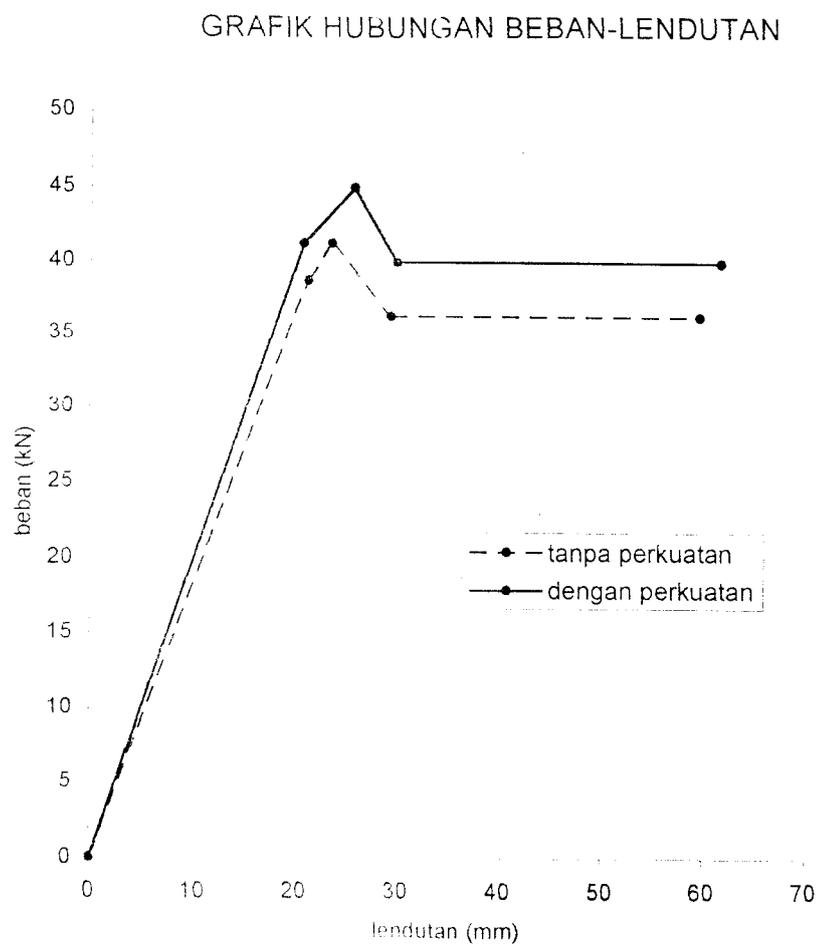
Pada balok variasi 1 (balok badan terbuka tanpa perkuatan) mempunyai faktor kekakuan rata-rata sebesar $6002,851 \text{ kNm}^2$ pada beban maksimum rata-rata yang menimbulkan momen maksimum rata-rata sebesar 41,25 kNm. Sedangkan untuk balok variasi 2 (balok badan terbuka dengan perkuatan) kekakuan rata-ratanya adalah $7413,649 \text{ kNm}^2$ pada beban maksimum rata-rata yang menimbulkan momen maksimum rata-rata sebesar 45 kNm. Dapat dilihat bahwa balok badan terbuka tanpa perkuatan mengalami penurunan faktor kekakuan sebesar 19.03 % dibandingkan balok badan terbuka dengan perkuatan.

5.4.4. Daktalitas Kelengkungan ditinjau dari Hubungan Momen-Kelengkungan

Berdasarkan pengamatan pada grafik hubungan momen-kelengkungan yang kemudian di analisa seperti ditampilkan pada Tabel (5.5), dapat dilihat daktalitas rata-rata balok dengan 2 variasi (balok badan terbuka dengan perkuatan dan tanpa perkuatan) dan kemudian daktalitas kedua variasi tersebut dapat dibandingkan.

Untuk balok variasi 1 (balok badan terbuka tanpa perkuatan), dari dua sampel didapatkan nilai daktalitas rata-rata sebesar 1,160. Dan untuk balok variasi 2 (balok badan terbuka dengan perkuatan) untuk dua sampel didapatkan nilai daktalitas rata-rata sebesar 1,230. Dengan mengambil balok variasi 2 sebagai pembandingnya, balok badan terbuka tanpa perkuatan mengalami penurunan daktalitas rata-rata sebesar 5,69 %. Dari tabel (5.5) terlihat bahwa daktalitas kurvatur yang terjadi pada balok badan terbuka dengan perkuatan dan tanpa perkuatan masih relatif kecil (tidak daktil) hal ini disebabkan tekuk lokal terjadi pada profil C balok badan terbuka.

Berdasarkan hasil analisa dari keempat benda uji balok badan terbuka, grafik hubungan beban-lendutan dapat dikelompokkan lagi menjadi dua variasi benda uji yaitu balok badan terbuka tanpa perkuatan dan dengan perkuatan seperti ditunjukkan pada Gambar (5.2).



Gambar 5.2. Grafik hubungan beban-lendutan dari kedua variasi benda uji.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan tentang perilaku balok badan terbuka tanpa perkuatan dan dengan perkuatan, yaitu sebagai berikut :

1. Penambahan pelat perkuatan pada balok badan terbuka hanya memberikan peningkatan yang relatif kecil pada nilai kekuatan (8,33 %), kekakuan (dari tinjauan hubungan beban-lendutan 2,77 % dan dari tinjauan hubungan momen-kelengkungan 19,03 %) dan daktilitas (dari tinjauan hubungan beban-lendutan 3,93 % dan dari tinjauan hubungan momen-kelengkungan 5,69 %).
2. Kerusakan yang terjadi pada batang horisontal (batang tepi atas dan bawah) balok badan terbuka yang berupa profil C adalah tekuk lokal pada sayap dan badan. Hal ini terjadi karena profil C memiliki rasio lebar terhadap tebal (b/t) relatif besar sehingga mengalami keruntuhan pada tegangan rendah, tegangan kritis profil C (96.674 Mpa) 57,83 % lebih rendah dari tegangan lelehnya (229.25 Mpa).

6.2. Saran

Untuk melakukan penelitian lebih lanjut tentang analisis perbandingan balok badan terbuka yang menggunakan profil C bentukan dingin yang terbuat dari pelat tipis perlu dipertimbangkan hal-hal sebagai berikut :

1. Pada pengujian lentur sebaiknya dilakukan variasi jarak pemasangan batang-batang vertikal pada badan balok.
2. Sebaiknya dilakukan variasi dimensi pelat perkuatan, sehingga dapat diketahui dimensi pelat perkuatan yang ekonomis.
3. Perlu dipasang pengaku yang menghubungkan antara sayap dengan sayap dari profil C, sehingga kondisi tumpuan pada sayap menjadi jepit-jepit (nilai $k=4$).
4. Perlu dicari cara untuk mengatasi kerusakan akibat tekuk lokal agar meningkatkan kemampuan balok badan terbuka dalam memikul beban dan meningkatkan daktilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Au, Tung., Christiano, Paul., 1987, STRUCTURAL ANALYSIS, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Burns, Thomas., 1995, STRUCTURAL STEEL DESIGN, Delman Publisher, New York.
- Bowles, Joseph E., 1981, STRUCTURAL STEEL DESIGN, McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Bresler, Boris., Lin, T.Y., Scalzi, John B., 1968, DESIGN OF STEEL STRUCTURES, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Englekirk, Robert., 1994, STEEL STRUCTURES CONTROLLING BEHAVIOR THROUGH DESIGN, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Gere, James M., Timoshenko, Stephen P., 1985, MEKANIKA BAHAN, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Gunawan, Rudi., 1988, Tabel Profil KONSTRUKSI BAJA, Penerbit Kanisius.
- Johnston, Bruce G., Lin, Fung-Jen., Galambos, T.V., 1980, BASIC STEEL DESIGN Second edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Park, R., Paulay, T., 1975, REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Salmon, Charles G., Johnson, John E., (diterjemahkan oleh Prihminto Widodo), 1996, STRUKTUR BAJA DESAIN DAN PERILAKU 1, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

- Saimon, Charles G., Johnson, John E., (diterjemahkan oleh Prihminto Widodo).
1996. STRUKTUR BAJA DESAIN DAN PERILAKU 2, PT Gramedia
Pustaka Utama, Jakarta.
- , 1989. MANUAL OF STEEL CONSTRUCTION ALLOWABLE
STRESS DESIGN, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago.
- , 1984. PERATURAN PERENCANAAN BANGUNAN BAJA
INDONESIA, Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan.
- West, Harry H. 1980. ANALYSIS OF STRUCTURES, John Willey & Sons,
Inc., Canada.

LAMPIRAN I

KARTU PESERTA

NAMA

BIO.SUPRI

Andi Nur Istiyanto

Prasetyo Widhi Supri

JUDUL TUGAS AKHIR

PERLEAKI STRUKTUR RANGKA BADAN TUBUH MANUSIA

TUGAS DAN CAJAL BINAAN DENYAI PERKULIAHAN

JUNI - NOPEMBER

TAHUN 2001/2002

No	Kegiatan	Juni	Juli	Agustus	Sept	Oktober	Nov
1	Pendaftaran						
2	Penelitian Dosen Pembimbing						
3	Pembuatan Proposal						
4	Seminar Proposal						
5	Konsultasi Penyusunan TA						
6	Sidang Sidang						
7	Bandudaran						

DOSEN PEMBIMBING I: Ir. H. A. Kadir, S.T., M.T.
 DOSEN PEMBIMBING II: Ir. H. A. Kadir, S.T., M.T.



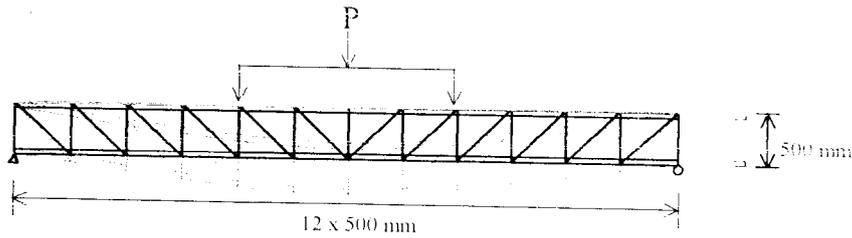
Jakarta, 1 September 2001
 dan Debit

(Handwritten Signature)

IR. H. A. KADIR, S.T., M.T.

LAMPIRAN II

Lampiran 1

Perhitungan Rencana Profil

Profil C 100 x 50 x 20 x 2,3

$$\text{Pada sayap} = \frac{b}{t} = \frac{50}{2,3} = 21,78$$

$$F_{cr.1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (b/t)^2}, k = 0,425$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 0,425}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (21,78)^2}$$

$$F_s = 161,95 \text{ Mpa}$$

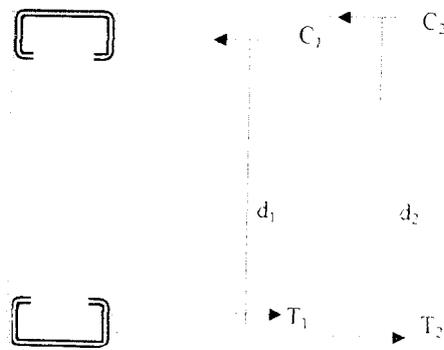
$$\text{Pada badan} = \frac{h}{t} = \frac{100}{2,3} = 43,48$$

$$F_{cr.2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (h/t)^2}, k = 4$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 10^5 \cdot 4}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (43,48)^2}$$

$$= 382,46 \text{ Mpa} > 240 \text{ Mpa}$$

$$= 240 \text{ Mpa}$$



$$\begin{aligned}
 Mn_{\text{sayap}} &= C_1 \cdot d_1 \\
 &= (2 \cdot A_f \cdot F_s) \cdot d_1 \\
 &= (2 \times 0,05 \times 0,0023 \times 161,95 \cdot 10^3) \times 0,45 \\
 &= 37,25 \times 0,45 \\
 &= 16,76 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Mn_{\text{badan}} &= C_2 \cdot d_2 \\
 &= (A_w \cdot F_y) \cdot d_2 \\
 &= (0,1 \times 0,0023 \times 240 \cdot 10^3) \times 0,5 \\
 &= 55,2 \times 0,5 \\
 &= 27,6 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Mn &= Mn_{\text{sayap}} + Mn_{\text{badan}} \\
 &= 16,76 + 27,6 \\
 &= 44,36 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$M = \frac{1}{6} \cdot P \cdot L$$

$$44,36 = \frac{1}{6} \cdot P \cdot 6$$

$$P = 44,36 \text{ kN}$$

$$= 4,436 \text{ ton} \approx 4,5 \text{ ton}$$

Diameter tulangan untuk badan :

- Batang vertikal (tekan) : 45000 N

$$\phi_c P_n = \phi_c F_{cr} A_g = 0,85 F_{cr} A_g$$

$$45000 = 0,85 \cdot 240 \cdot A_g$$

$$A_g = 220,588 \text{ mm}^2$$

$$\frac{\pi}{4} d^2 = 220,588 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 220,588}{\pi}} = 16,758 \text{ mm}$$

$$\approx 18 \text{ mm}$$

Jadi untuk komponen vertikal (tekan) membutuhkan besi dengan diameter =

$$(18/2) = 9 \text{ mm} \approx 12 \text{ mm.}$$

- Untuk batang Diagonal (tarik) : 63640 N

Akibat leleh pada penampang :

$$\phi_t T_n = \phi_t F_y A_g = 0,90 F_y A_g$$

$$63540 = 0,90 \cdot 240 \cdot A_g$$

$$A_g = 294,629 \text{ mm}^2$$

Akibat retakan pada penampang :

$$\phi_t T_n = \phi_t F_u A_e = 0,75 F_u A_e$$

$$63640 = 0,75 \cdot 481,88 \cdot A_e$$

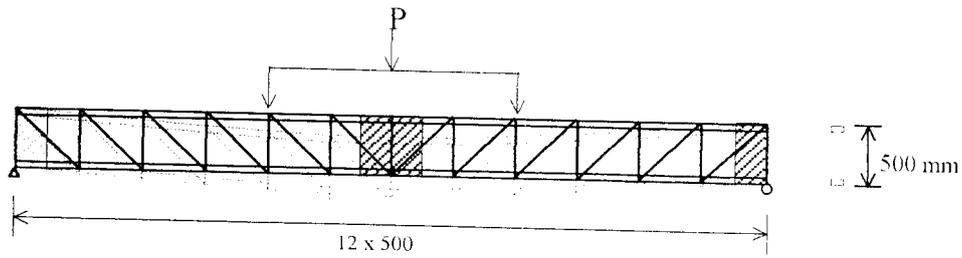
$$A_e = 175,088 \text{ mm}^2$$

Jadi luasdan yang berpengaruh adalah = $294,629 \text{ mm}^2$

$$d = \sqrt{\frac{294,629 \cdot 4}{\pi}} = 19,36 \text{ mm} \sim 20 \text{ mm}$$

Jadi untuk komponen diagonal (tarik) membutuhkan besi dengan diameter : (20/2)

= 10 mm ~ 12 mm



$$\text{Pada sayap} = \frac{b}{t} = \frac{50}{5,3} = 9,43$$

$$F_{cr.1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (b/t)^2}, k = 4$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (9,43)^2}$$

$$= 8130,99 \text{ Mpa} > 240 \text{ Mpa}$$

$$\text{Pada badan} = \frac{h}{t} = \frac{100}{2,3} = 43,48$$

$$F_{cr.2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (h/t)^2}, k = 4$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 10^5 \cdot 4}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (43,48)^2}$$

$$= 382,46 \text{ Mpa} > 240 \text{ Mpa}$$

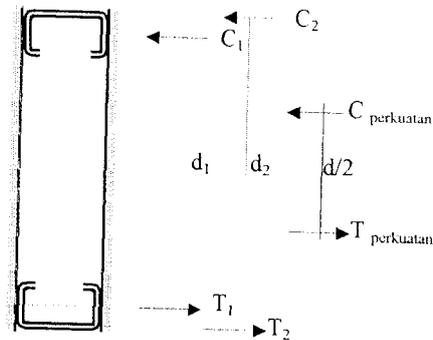
$$= 240 \text{ Mpa}$$

Pada pelat perkuatan $= \frac{h}{t} = \frac{500}{3} = 166,67$

$$F_{cr.2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot k}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (h/t)^2}, k=4$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4}{12 \cdot (1 - 0,3^2) \cdot (166,67)^2}$$

$$= 26,029 \text{ Mpa}$$



$$\begin{aligned} Mn_{\text{sayap}} &= C_1 \cdot d_1 \\ &= (2 \cdot A_f \cdot F_s) \cdot d_1 \\ &= (2 \times 0,05 \times 0,0053 \times 240 \cdot 10^3) \times 0,45 \\ &= 127,2 \times 0,45 \\ &= 57,24 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mn_{\text{badan}} &= C_2 \cdot d_2 \\ &= (A_w \cdot F_y) \cdot d_2 \\ &= (0,1 \times 0,0023 \times 240 \cdot 10^3) \times 0,5 \\ &= 55,2 \times 0,50 = 27,6 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mn_{\text{perkuatan}} &= \frac{1}{4} \cdot b \cdot d^2 \cdot F_s \cdot 2 \\ &= \frac{1}{4} \cdot 0,003 \cdot 0,5^2 \cdot 26,029 \cdot 10^3 \cdot 2 \\ &= 9,76 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Mn &= Mn_{\text{sayap}} + Mn_{\text{badan}} + Mn_{\text{perkuatan}} \\ &= 57,24 + 27,6 + 5,76 \\ &= 90,6 \text{ kNm}\end{aligned}$$

$$M = \frac{1}{6} \cdot P \cdot L$$

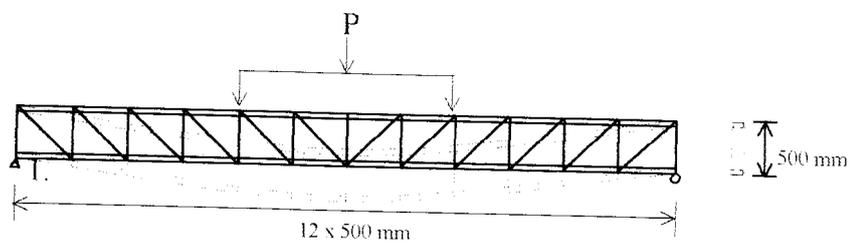
$$90,6 = \frac{1}{6} \cdot P \cdot 6$$

$$P = 90,6 \text{ kN}$$

$$= 9,06 \text{ ton}$$

Perhitungan F_y dan F_{cr}

Dari hasil uji tarik laboratorium terhadap profil C 100x50x20x2,3 diperoleh $F_y = 229,25$ Mpa



Pada hasil pengujian lentur didapatkan $P_{maks} = 4,5$ ton, dimana $P_1 = P_2 = \frac{1}{2}P = 2,25$ ton = 22,5 kN

$$\begin{aligned} M &= \frac{1}{6}PL \\ &= \frac{1}{6} \cdot 22,5 \cdot 6 \\ &= 22,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$P_{cr} = \frac{M}{h} = \frac{22,5}{0,45} = 50 \text{ kN}$$

$$A = 517,2 \text{ mm}^2 \text{ (luas profil C)}$$

$$F_{cr} = \frac{P}{A} = \frac{50000}{517,2} = 96,674 \text{ Mpa} \leq 229,25 \text{ Mpa}$$

LAMPIRAN III

Tabel Hubungan Beban Lendutan Hasil Pengujian Benda Uji 1

No.	BEBAN kN	defleksi (mm)		
		dial 1	dial 2	Dial 3
1	0.0	0.00	0.00	0.00
2	2.5	2.10	2.42	2.02
3	5.0	2.95	3.38	2.97
4	7.5	4.15	4.67	4.04
5	10.0	5.29	5.95	5.21
6	12.5	6.35	7.15	6.25
7	15.0	7.25	8.13	7.04
8	17.5	8.72	9.75	8.63
9	20.0	9.69	11.00	9.85
10	22.5	10.54	11.91	10.55
11	25.0	11.64	13.08	11.45
12	27.5	12.94	14.67	12.93
13	30.0	14.03	15.90	13.98
14	32.5	15.28	17.32	15.17
15	35.0	16.30	18.50	16.12
16	37.5	18.01	20.30	17.61
17	40.0	20.54	23.09	19.82
18	35.0	25.45	28.86	26.15
19	35.0	31.15	34.85	32.15
20	35.0	38.15	41.97	39.26
21	35.0	46.75	50.35	47.33
22	35.0	53.38	59.23	57.52

Tabel Hubungan Beban Lendutan Hasil Pengujian Benda Uji 2

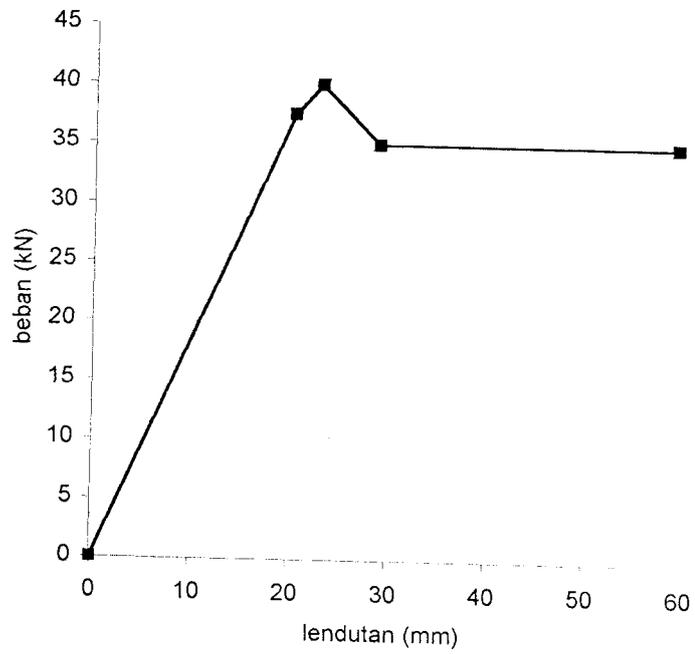
No.	BEBAN kN	defleksi (mm)		
		dial 1	dial 2	Dial 3
1	0.0	0.00	0.00	0.00
2	2.5	1.07	1.33	1.07
3	5.0	2.02	2.45	2.05
4	7.5	2.85	3.40	2.86
5	10.0	3.93	4.65	3.92
6	12.5	4.91	5.71	4.79
7	15.0	5.07	6.22	5.27
8	17.5	5.86	7.26	6.28
9	20.0	6.62	8.18	7.05
10	22.5	8.85	10.21	8.71
11	25.0	9.78	11.25	9.55
12	27.5	10.72	12.62	10.95
13	30.0	11.39	13.55	11.86
14	32.5	12.69	14.85	12.97
15	35.0	14.26	16.75	14.85
16	37.5	15.22	17.53	15.17
17	40.0	16.35	19.02	16.58
18	42.5	18.48	21.23	18.33
19	45.0	21.7	25.09	22.06
20	40.0	26.35	29.88	26.57
21	40.0	32.95	37.05	33.81
22	40.0	40.38	44.65	41.27
23	40.0	47.06	51.75	48.67
24	40.0	56.23	60.81	57.46

Tabel Hubungan Beban Lendutan Hasil Pengujian Benda Uji 3

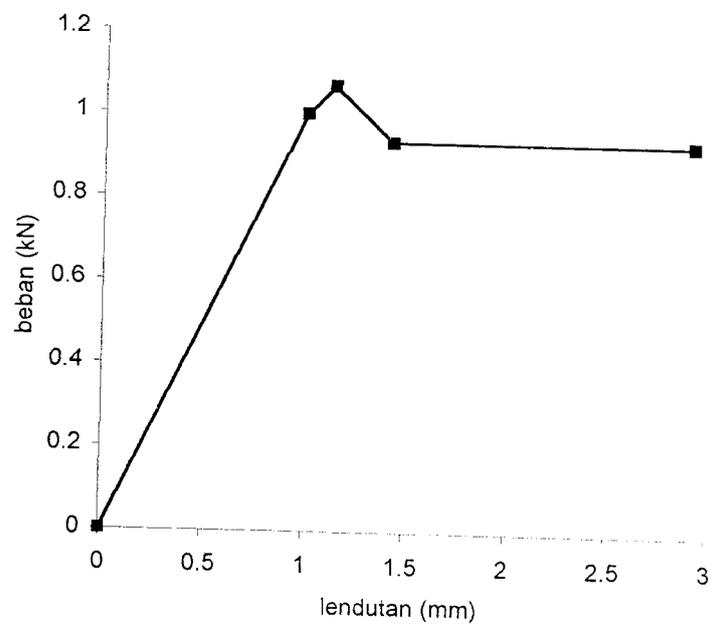
No.	BEBAN kN	defleksi (mm)		
		dial 1	dial 2	Dial 3
1	0.0	0.00	0.00	0.00
2	2.5	1.03	1.17	1.04
3	5.0	2.17	2.50	2.23
4	7.5	3.43	3.92	3.45
5	10.0	4.55	5.21	4.59
6	12.5	5.73	6.65	5.75
7	15.0	6.66	7.67	6.68
8	17.5	7.93	9.12	8.01
9	20.0	8.76	10.10	8.84
10	22.5	10.19	11.79	10.32
11	25.0	11.26	13.07	11.43
12	27.5	12.33	14.33	12.48
13	30.0	13.67	15.94	13.81
14	32.5	14.87	17.40	15.00
15	35.0	15.75	18.48	15.86
16	37.5	16.95	20.00	17.05
17	40.0	18.39	21.83	18.45
18	42.5	20.65	24.24	19.97
19	37.5	25.05	29.55	25.68
20	37.5	31.23	35.97	31.84
21	37.5	37.43	42.92	39.23
22	37.5	45.38	51.52	47.80
23	37.5	52.81	59.86	56.47

Tabel Hubungan Beban Lendutan Hasil Pengujian Benda Uji 4

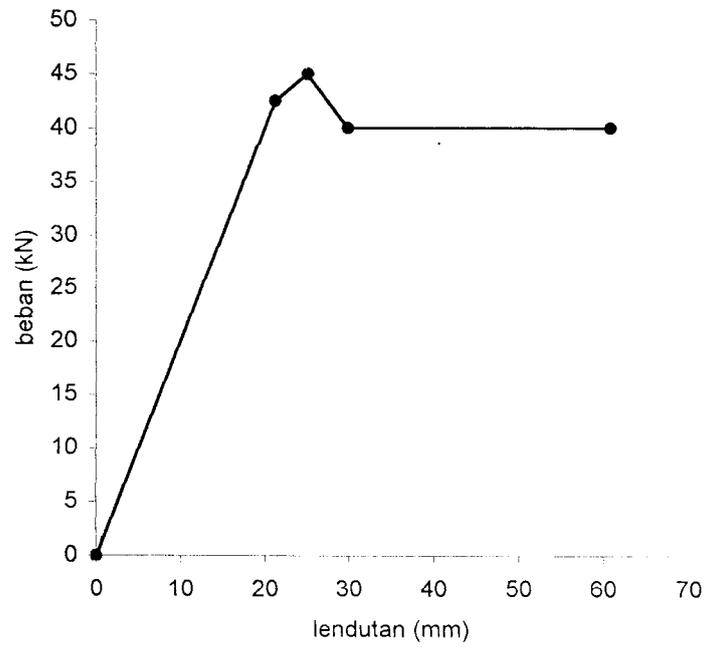
No.	BEBAN kN	defleksi (mm)		
		dial 1	dial 2	dial 3
1	0.0	0.00	0.00	0.00
2	2.5	0.88	1.00	0.91
3	5.0	1.75	1.95	1.72
4	7.5	2.95	3.35	2.88
5	10.0	3.72	4.13	3.61
6	12.5	4.89	5.45	4.76
7	15.0	5.84	6.57	5.68
8	17.5	6.68	7.79	6.89
9	20.0	7.50	8.75	7.87
10	22.5	8.75	9.80	8.39
11	25.0	9.91	11.09	9.54
12	27.5	10.40	12.29	10.95
13	30.0	11.58	13.44	11.88
14	32.5	13.51	15.20	13.10
15	35.0	14.55	16.40	14.15
16	37.5	15.57	17.55	15.20
17	40.0	17.81	20.00	17.37
18	42.5	19.46	21.72	18.93
19	45.0	22.5	25.13	22.06
20	40.0	27.05	29.65	26.27
21	40.0	34.40	37.79	34.50
22	40.0	42.25	45.55	41.32
23	40.0	48.9	52.48	47.85
24	40.0	58.35	62.38	57.48



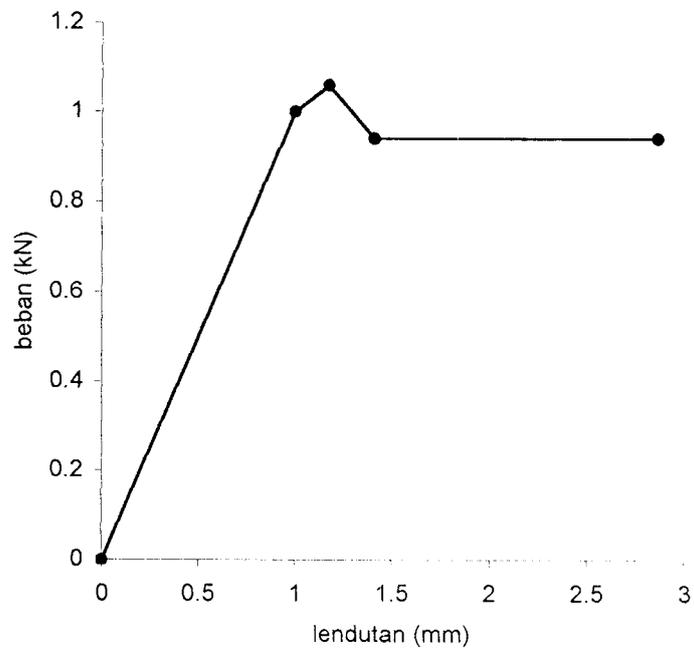
Grafik beban-lendutan benda uji 1



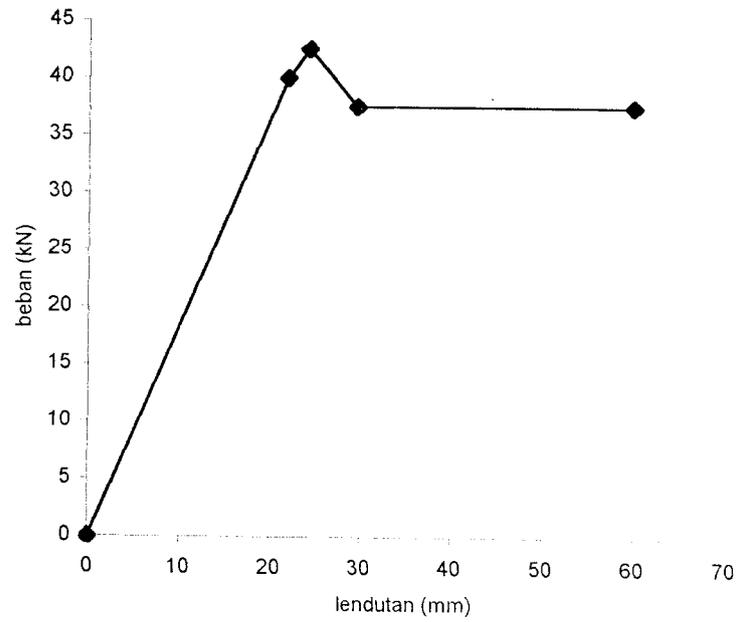
Grafik non dimensional hubungan beban-lendutan



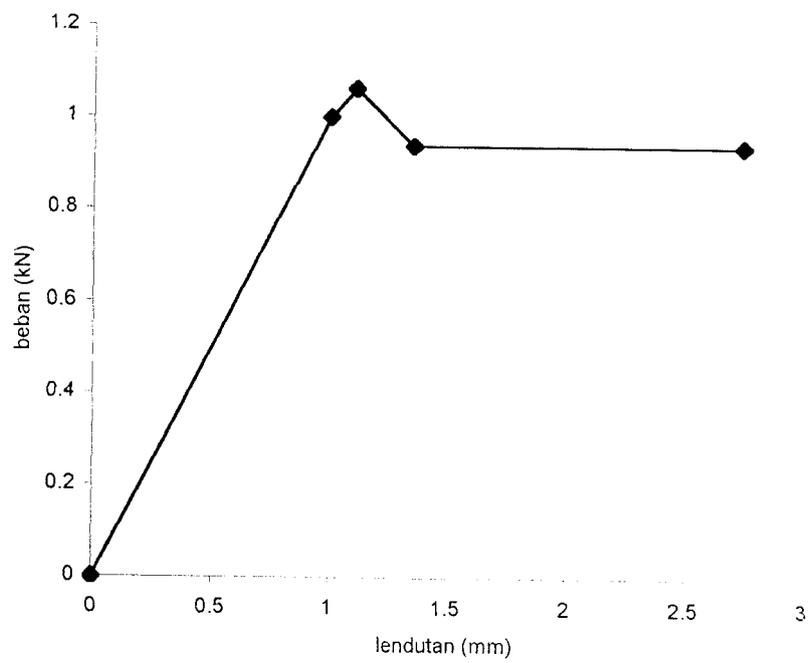
Grafik beban-lendutan benda uji 2



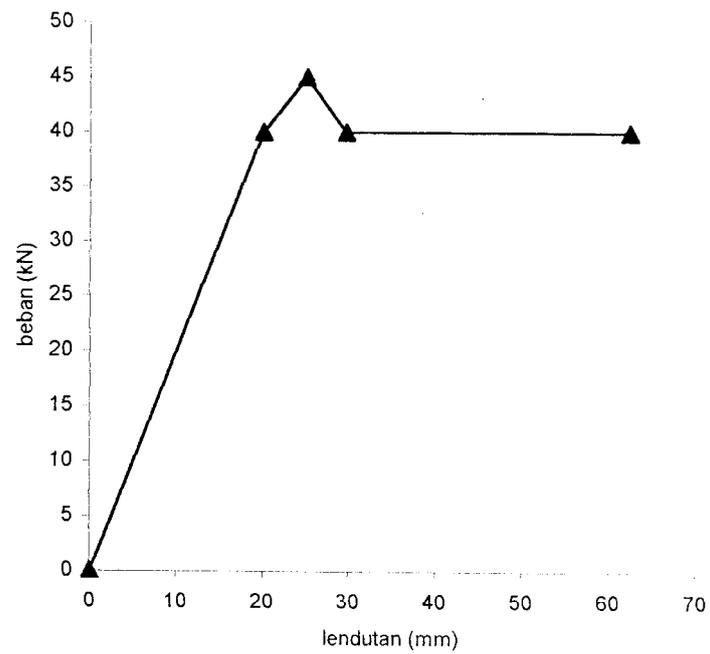
Grafik non dimensional hubungan beban-lendutan



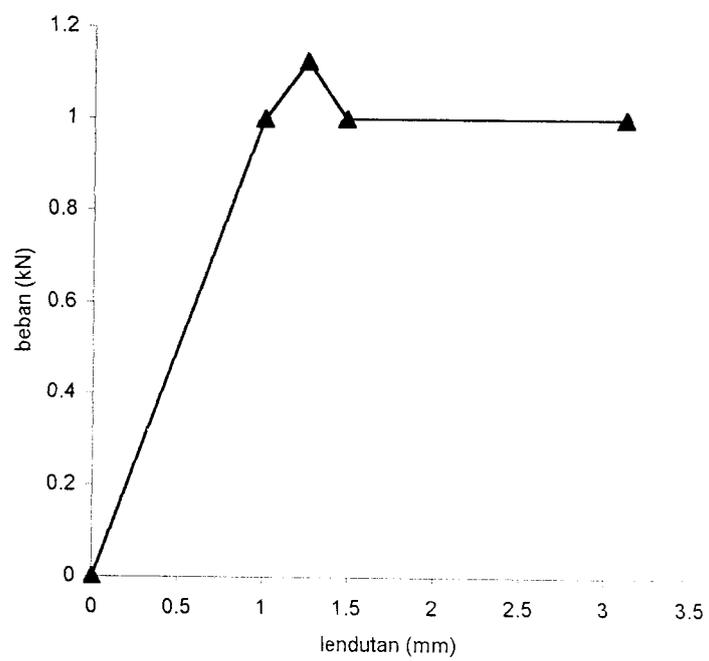
Grafik beban-lendutan benda uji 3



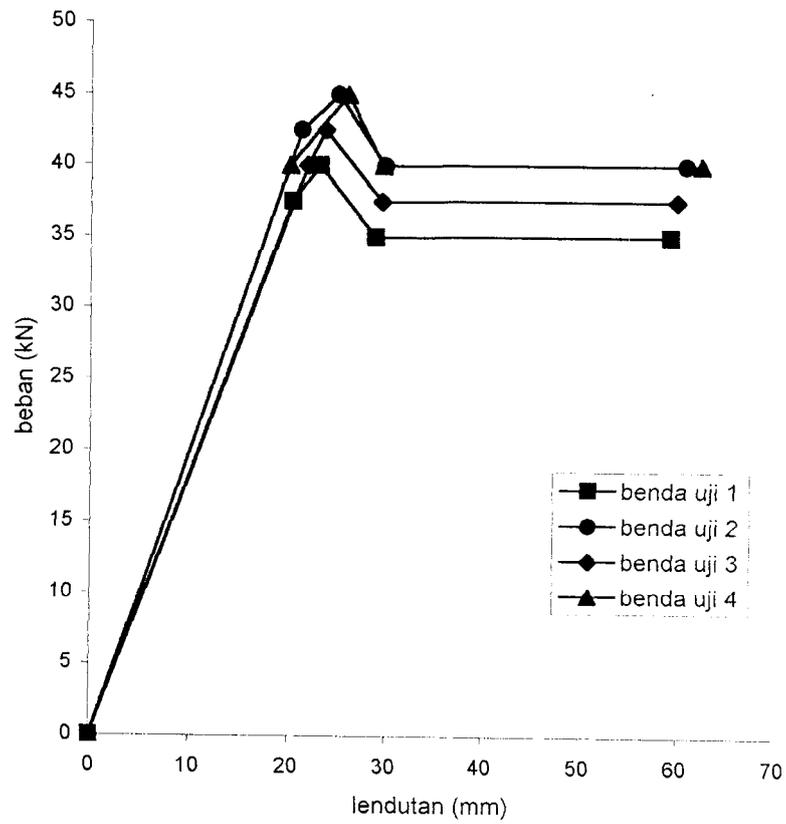
Grafik non dimensional hubungan beban-lendutan



Grafik beban-lendutan benda uji 4



Grafik non dimensional hubungan beban-lendutan



Grafik Hubungan beban-lendutan dari keempat benda uji

Tabel Hubungan Momen-Kelengkungan Benda Uji 1

No.	BEBAN KN	defleksi (mm)			MOMEN (kNm) $M = (PL) / 6$	kelengkungan (1/m)
		dial 1	dial 2	dial 3		
1	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00000
2	2.5	2.10	2.42	2.02	2.5	0.00072
3	5.0	2.95	3.38	2.97	5.0	0.00084
4	7.5	4.15	4.67	4.04	7.5	0.00115
5	10.0	5.29	5.95	5.21	10.0	0.00140
6	12.5	6.35	7.15	6.25	12.5	0.00170
7	15.0	7.25	8.13	7.04	15.0	0.00197
8	17.5	8.72	9.75	8.63	17.5	0.00215
9	20.0	9.69	11.00	9.85	20.0	0.00246
10	22.5	10.54	11.91	10.55	22.5	0.00273
11	25.0	11.64	13.08	11.45	25.0	0.00307
12	27.5	12.94	14.67	12.93	27.5	0.00347
13	30.0	14.03	15.90	13.98	30.0	0.00379
14	32.5	15.28	17.32	15.17	32.5	0.00419
15	35.0	16.30	18.50	16.12	35.0	0.00458
16	37.5	18.01	20.30	17.61	37.5	0.00498
17	40.0	20.54	23.09	19.82	40.0	0.00582
18	35.0	25.45	28.86	26.15	35.0	0.00612
19	35.0	31.15	34.85	32.15	35.0	0.0064
20	35.0	38.15	41.97	39.26	35.0	0.00653
21	35.0	46.75	50.35	47.33	35.0	0.00662
22	35.0	53.38	59.23	57.52	35.0	0.00756

Tabel Hubungan Momen-Kelengkungan Benda Uji 2

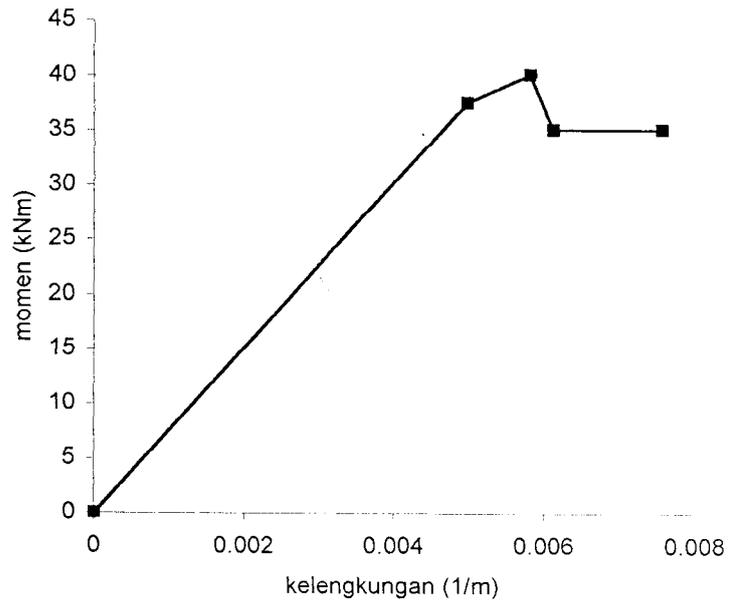
No.	BEBAN KN	defleksi (mm)			MOMEN (kNm) $M = (PL) / 6$	kelengkungan (1/m)
		dial 1	dial 2	dial 3		
1	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000000
2	2.5	1.07	1.33	1.07	2.50	0.000520
3	5.0	2.02	2.45	2.05	5.00	0.000830
4	7.5	2.85	3.40	2.86	7.50	0.001090
5	10.0	3.93	4.65	3.92	10.00	0.001450
6	12.5	4.91	5.71	4.79	12.50	0.001720
7	15.0	5.07	6.22	5.27	15.00	0.002100
8	17.5	5.86	7.26	6.28	17.50	0.002380
9	20.0	6.62	8.18	7.05	20.00	0.002690
10	22.5	8.85	10.21	8.71	22.50	0.002860
11	25.0	9.78	11.25	9.55	25.00	0.003170
12	27.5	10.72	12.62	10.95	27.50	0.003570
13	30.0	11.39	13.55	11.86	30.00	0.003850
14	32.5	12.69	14.85	12.97	32.50	0.004040
15	35.0	14.26	16.75	14.85	35.00	0.004390
16	37.5	15.22	17.53	15.17	37.50	0.004670
17	40.0	16.35	19.02	16.58	40.00	0.005110
18	42.5	18.48	21.23	18.33	42.50	0.005650
19	45.0	21.7	25.09	22.06	45.00	0.006440
20	40.0	26.35	29.88	26.57	40.00	0.006840
21	40.0	32.95	37.05	33.81	40.00	0.007340
22	40.0	40.38	44.65	41.27	40.00	0.007650
23	40.0	47.06	51.75	48.67	40.00	0.007770
24	40.0	56.23	60.81	57.46	40.00	0.007930

Tabel Hubungan Momen-Kelengkungan Benda Uji 3

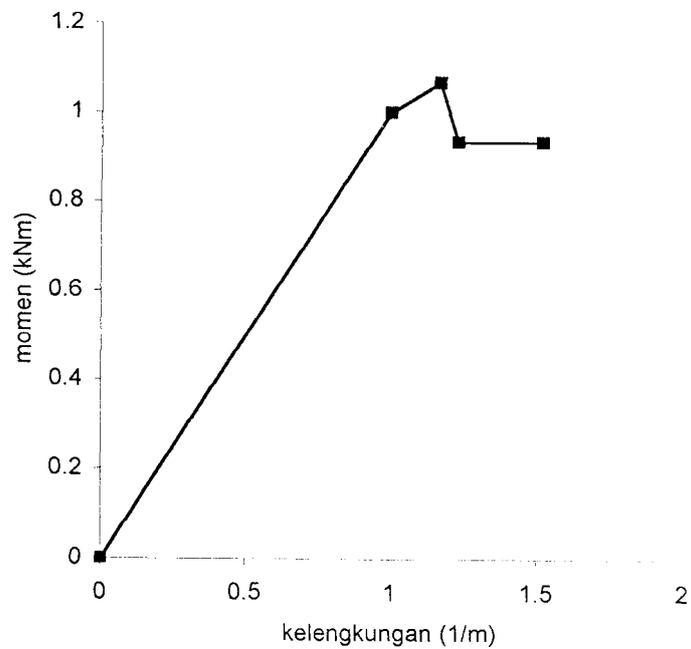
No.	BEBAN KN	defleksi (mm)			MOMEN $M = (PL) / 6$	kelengkungan (1/m)
		dial 1	dial 2	dial 3		
1	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00000
2	2.5	1.03	1.17	1.04	2.5	0.00027
3	5.0	2.17	2.50	2.23	5.0	0.00060
4	7.5	3.43	3.92	3.45	7.5	0.00096
5	10.0	4.55	5.21	4.59	10.0	0.00128
6	12.5	5.73	6.65	5.75	12.5	0.00182
7	15.0	6.66	7.67	6.68	15.0	0.00200
8	17.5	7.93	9.12	8.01	17.5	0.00230
9	20.0	8.76	10.10	8.84	20.0	0.00260
10	22.5	10.19	11.79	10.32	22.5	0.00307
11	25.0	11.26	13.07	11.43	25.0	0.00345
12	27.5	12.33	14.33	12.48	27.5	0.00385
13	30.0	13.67	15.94	13.81	30.0	0.00440
14	32.5	14.87	17.40	15.00	32.5	0.00493
15	35.0	15.75	18.48	15.86	35.0	0.00535
16	37.5	16.95	20.00	17.05	37.5	0.00600
17	40.0	18.39	21.83	18.45	40.0	0.00682
18	42.5	20.65	24.24	19.97	42.5	0.00786
19	37.5	25.05	29.55	25.68	37.5	0.00837
20	37.5	31.23	35.97	31.84	37.5	0.00887
21	37.5	37.43	42.92	39.23	37.5	0.00918
22	37.5	45.38	51.52	47.80	37.5	0.00986
23	37.5	52.81	59.86	56.47	37.5	0.01044

Tabel Hubungan Momen-Kelengkungan Benda Uji 4

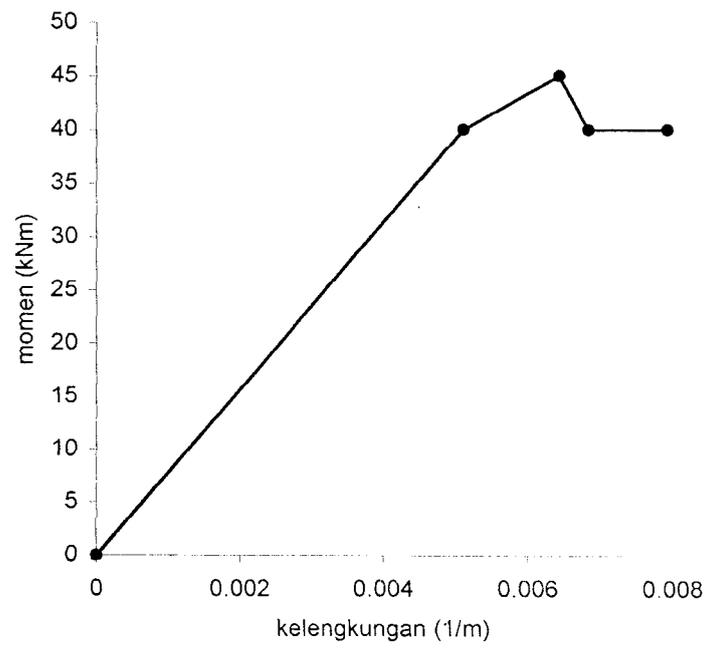
No.	BEBAN KN	defleksi (mm)			MOMEN $M = (PL) / 6$	kelengkungan (1/m)
		dial 1	dial 2	dial 3		
1	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00000
2	2.5	0.88	1.00	0.91	2.5	0.00021
3	5.0	1.75	1.95	1.72	5.0	0.00043
4	7.5	2.95	3.35	2.88	7.5	0.00087
5	10.0	3.72	4.13	3.61	10.0	0.00093
6	12.5	4.89	5.45	4.76	12.5	0.00125
7	15.0	5.84	6.57	5.68	15.0	0.00162
8	17.5	6.68	7.79	6.89	17.5	0.00201
9	20.0	7.50	8.75	7.87	20.0	0.00213
10	22.5	8.75	9.80	8.39	22.5	0.00246
11	25.0	9.91	11.09	9.54	25.0	0.00273
12	27.5	10.40	12.29	10.95	27.5	0.00323
13	30.0	11.58	13.44	11.88	30.0	0.00342
14	32.5	13.51	15.20	13.10	32.5	0.00379
15	35.0	14.55	16.40	14.15	35.0	0.00410
16	37.5	15.57	17.55	15.20	37.5	0.00433
17	40.0	17.81	20.00	17.37	40.0	0.00482
18	42.5	19.46	21.72	18.93	42.5	0.00505
19	45.0	22.5	25.13	22.06	45.0	0.00575
20	40.0	27.05	29.65	26.27	40.0	0.00598
21	40.0	34.40	37.79	34.50	40.0	0.00668
22	40.0	42.25	45.55	41.32	40.0	0.00753
23	40.0	48.9	52.48	47.85	40.0	0.00821
24	40.0	58.35	62.38	57.48	40.0	0.00893



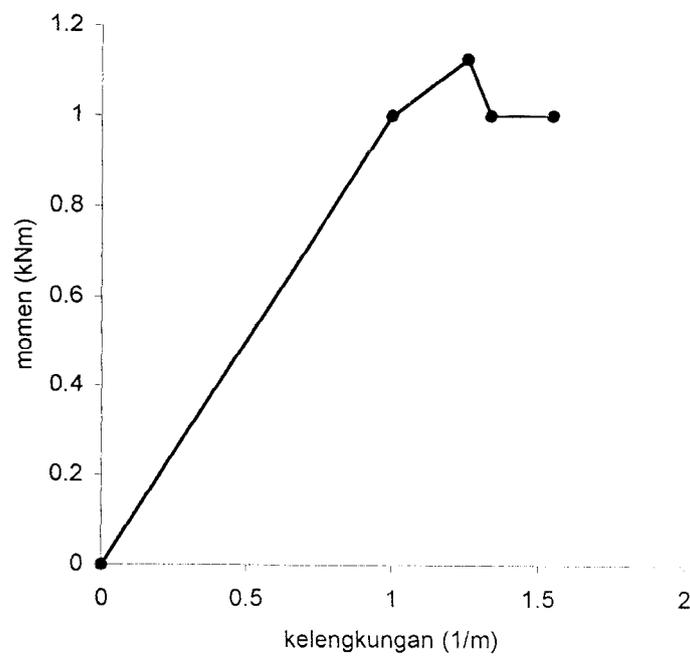
Grafik hubungan momen-kelengkungan benda uji 1



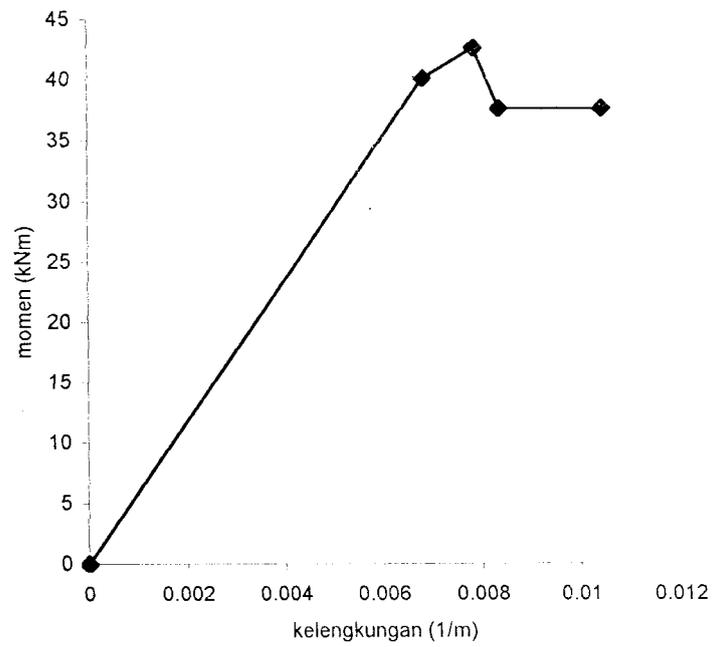
Grafik non dimensional momen-kelengkungan benda uji 1



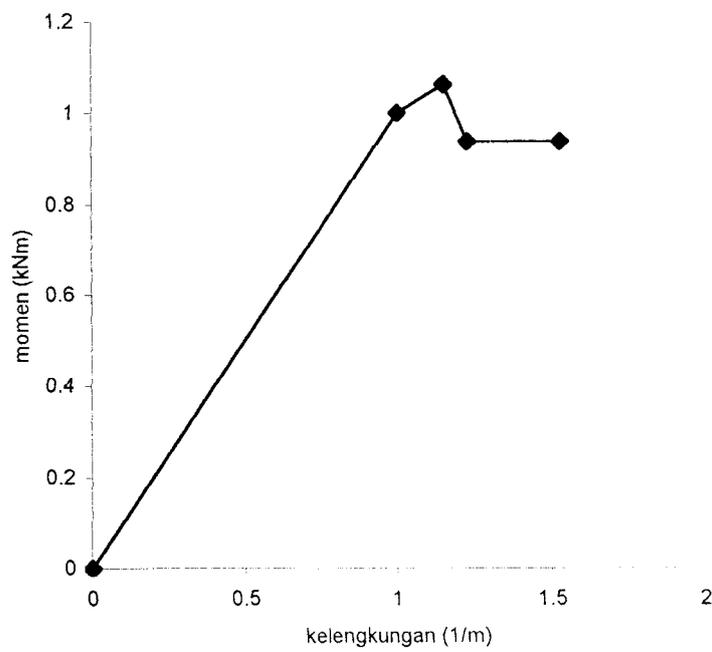
Grafik hubungan momen-kelengkungan benda uji 2



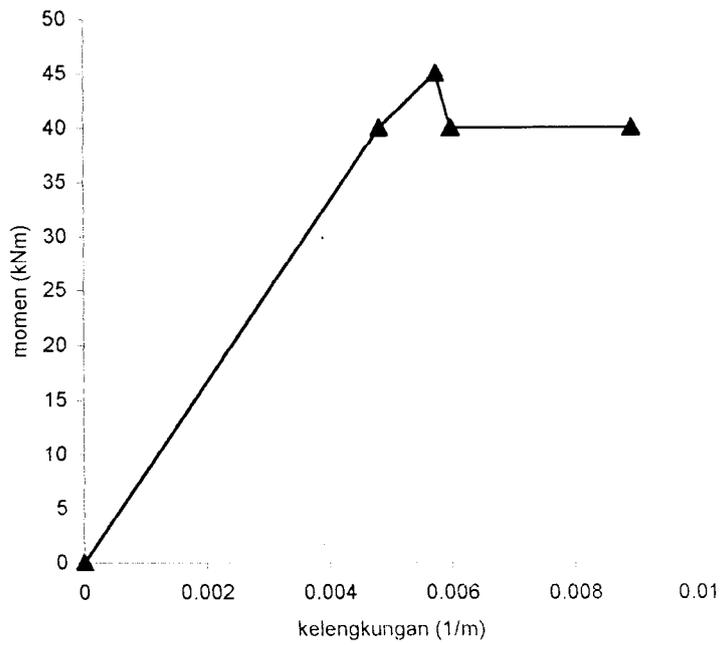
Grafik non dimensional momen-kelengkungan benda uji 2



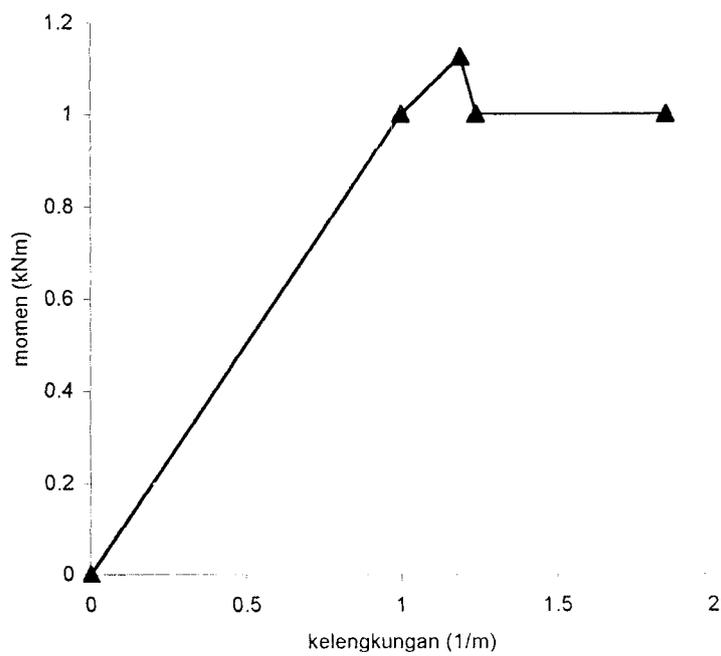
Grafik hubungan momen-kelengkungan benda uji 3



Grafik non dimensional momen-kelengkungan benda uji 3



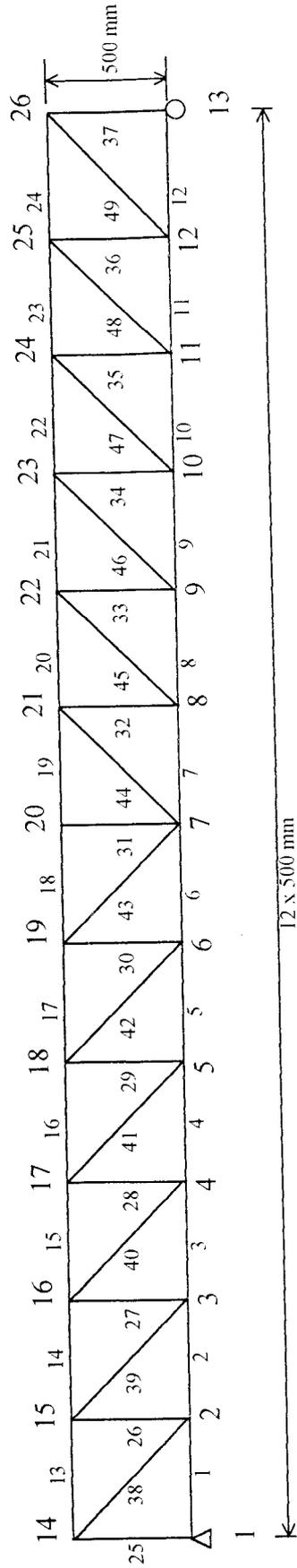
Grafik hubungan momen-kelengkungan benda uji 4



Grafik non dimensional momen-kelengkungan benda uji 4

LAMPIRAN IV

BALOK BADAN TERBUKA TANPA PERKUATAN



BALOK BADAN TERBUKA TANPA PERKUATAN
SYSTEM

L=1

RESTRAINTS

1 26 1 R=1,0,0,1,1,1
1 R=1,1,1,0,1,1
13 R=1,0,1,0,1,1

JOINTS

1 X=0 Y=0 Z=0 : BIDANG KOORDINAT Y-Z
13 Y=6000 G=1,13,1
14 Y=0 Z=500
26 Y=6000 Z=500 G=14,26,1

FRAME

NM=2

C IDENTIFIKASI JENIS ELEMEN

1 A=517.2 E=2E2 : BATANG HORIZONTAL-PROFIL C
2 A=452.4 E=2E2 : BATANG VERTIKAL DAN DIAGONAL

C BATANG HORIZONTAL

1 1 2 M=1 G=11,1,1,1 LP=3,0
13 14 15 M=1 G=11,1,1,1 LP=3,0

C BATANG VERTIKAL

25 1 14 M=2 G=12,1,1,1 LP=3,0

C BATANG DIAGONAL

38 2 14 M=2 G=5,1,1,1 LP=3,0
44 7 21 M=2 G=5,1,1,1 LP=3,0

LOADS

C BEBAN TITIK

18 L=1 F=0,0,-45
22 F=0,0,-45

BALOK BADAN TERBUKA TANPA PERKUATAN

FRAME ELEMENT FORCES

ELT ID	LOAD COND	AXIAL FORCE	DIST ENDI	1-2 PLANE SHEAR	MOMENT	1-3 PLANE SHEAR	MOMENT	AXIAL TORQ
1	1	.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
2	1	45.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
3	1	90.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
4	1	135.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
5	1	180.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
6	1	180.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
7	1	180.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
8	1	180.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
9	1	135.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
10	1	90.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
11	1	45.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
12	1	.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
13	1	-45.00						
			.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
14	1	-90.00						
			.0	.00	.00			

15		500.0	.00	.00
	1	-135.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
16				
	1	-180.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
17				
	1	-180.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
18				
	1	-180.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
19				
	1	-180.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
20				
	1	-180.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
21				
	1	-180.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
22				
	1	-135.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
23				
	1	-90.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
24				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
25				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
26				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
27				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
28				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
29				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
30				
	1	.00		

		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
31	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
32	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
33	-----			
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
34	-----			
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
35	-----			
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
36	-----			
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
37	-----			
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
38	-----			
	1	63.64		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
39	-----			
	1	63.64		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
40	-----			
	1	63.64		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
41	-----			
	1	63.64		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
42	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
43	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
44	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
45	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
46	-----			

	1	63.64			
			.0	.00	.00
		707.1		.00	.00
47	-----				
	1	63.64			
			.0	.00	.00
		707.1		.00	.00
48	-----				
	1	63.64			
			.0	.00	.00
		707.1		.00	.00
49	-----				
	1	63.64			
			.0	.00	.00
		707.1		.00	.00

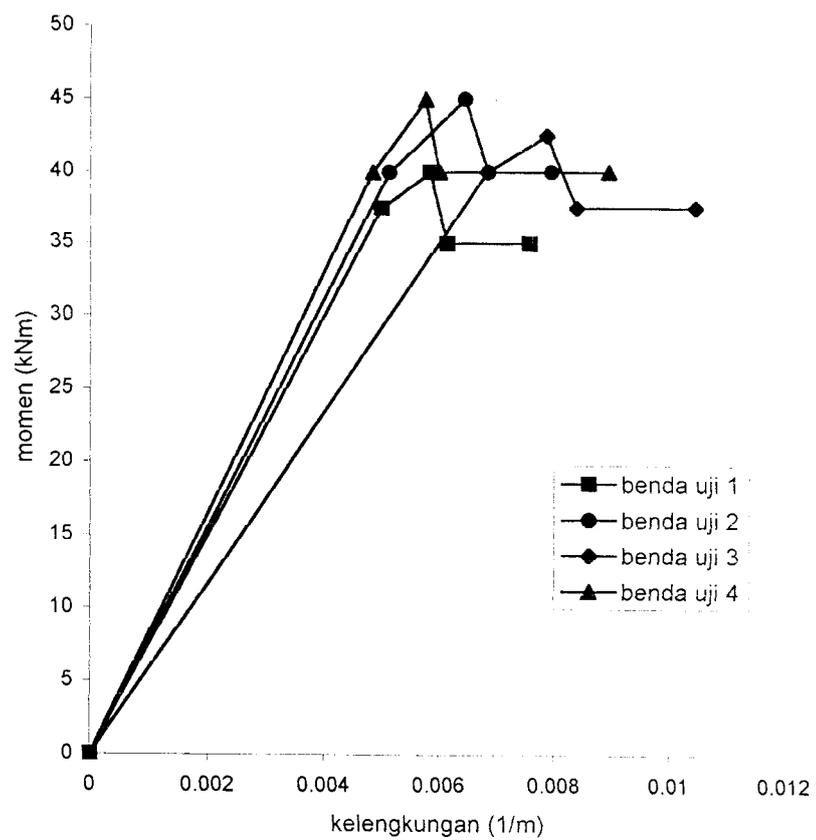
C S I / S A P 9 0 - - FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRUCTURES PAGE 1
PROGRAM: SAP90/FILE: TANPA.SOL

BALOK BADAN TERBUKA TANPA PERKUATAN

J O I N T D I S P L A C E M E N T S

LOAD CONDITION 1 - DISPLACEMENTS "U" AND ROTATIONS "R"

JOINT	U(Y)	U(Z)
1	.000000	.000000
2	.000000	-7.912586
3	.217517	-15.390137
4	.652552	-21.997619
5	1.305104	-27.299997
6	2.175174	-30.158879
7	3.045244	-31.028949
8	3.915313	-30.158879
9	4.785383	-27.299997
10	5.437935	-21.997619
11	5.872970	-15.390137
12	6.090487	-7.912586
13	6.090487	.000000
14	6.960557	-.248674
15	6.743039	-8.161260
16	6.308005	-15.638811
17	5.655452	-22.246293
18	4.785383	-27.548670
19	3.915313	-30.158879
20	3.045244	-31.028949
21	2.175174	-30.158879
22	1.305104	-27.548670
23	.435035	-22.246293
24	-.217517	-15.638811
25	-.652552	-8.161260
26	-.870070	-.248674



Grafik hubungan momen–kelengkungan dari keempat benda uji

C S I / S A P 9 0 - - FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRUCTURES PAGE 2
 PROGRAM: SAP90/FILE: TANPA.SOL

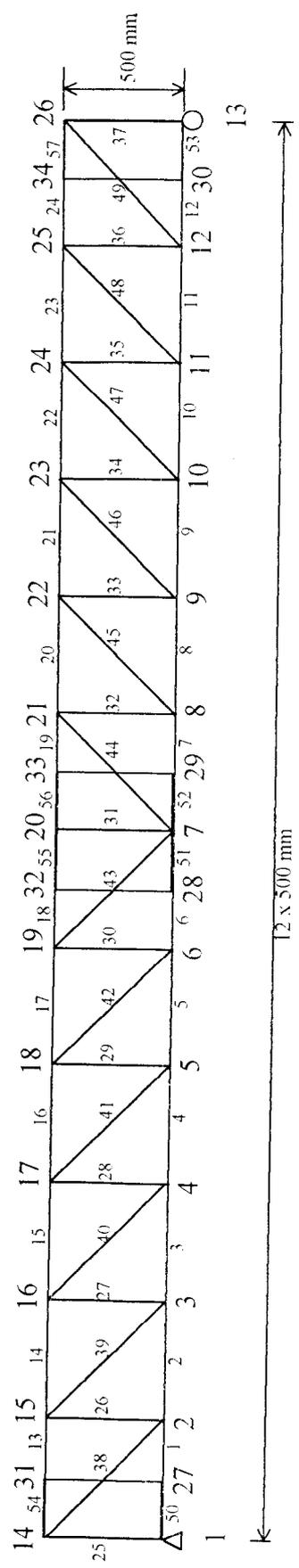
BALOK BĀDAN TERBUKA TANPA PERKUATAN

R E A C T I O N S A N D A P P L I E D F O R C E S

LOAD CONDITION 1 - FORCES "F" AND MOMENTS "M"

JOINT	F(Y)	F(Z)	M(X)
1	.0000	45.0000	.0000
2	.0000E+00	.0000E+00	.4052E-10
3	.0000E+00	.0000E+00	.3707E-10
4	.0000E+00	.0000E+00	.3121E-10
5	.0000E+00	.0000E+00	.2183E-10
6	.0000E+00	.0000E+00	.1056E-10
7	.0000	.0000	.0000
8	.0000E+00	.0000E+00	-.1136E-10
9	.0000E+00	.0000E+00	-.2280E-10
10	.0000E+00	.0000E+00	-.3174E-10
11	.0000E+00	.0000E+00	-.3742E-10
12	.0000E+00	.0000E+00	-.4069E-10
13	.0000	45.0000	.0000
14	.0000E+00	.0000E+00	.2722E-10
15	.0000E+00	.0000E+00	.3539E-10
16	.0000E+00	.0000E+00	.3195E-10
17	.0000E+00	.0000E+00	.2641E-10
18	.0000	-45.0000	.0000
19	.0000E+00	.0000E+00	.7351E-11
20	.0000	.0000	.0000
21	.0000E+00	.0000E+00	-.8047E-11
22	.0000	-45.0000	.0000
23	.0000E+00	.0000E+00	-.2693E-10
24	.0000E+00	.0000E+00	-.3230E-10
25	.0000E+00	.0000E+00	-.3556E-10
26	.0000E+00	.0000E+00	-.2405E-10
TOTAL	-.4361E-15	.1421E-13	.1196E-24

BALOK BADAN TERBUKA DENGAN PERKUATAN



BALOK BADAN TERBUKA DENGAN PERKUATAN
SYSTEM

L=1

RESTRAINTS

1	34	1	R=1,0,0,1,1,1	
1			R=1,1,1,0,1,1	: SENDI
13			R=1,0,1,0,1,1	: RCL
27	34	1	R=1,1,1,1,1,1	
14			R=1,1,1,1,1,1	
26			R=1,1,1,1,1,1	

JOINTS

1	X=0	Y=0	Z=0	: BIDANG KOORDINAT Y-Z
13		Y=6000	Z=0	G=1,13,1
14		Y=0	Z=500	
26		Y=6000	Z=500	G=14,26,1
27		Y=250	Z=0	
28		Y=2750		
29		Y=3250		
30		Y=5750		
31		Y=250	Z=500	
32		Y=2750		
33		Y=3250		
34		Y=5750		

FRAME

NM=2

C IDENTIFIKASI JENIS ELEMEN

1 A=517.2 E=2E5 : BATANG HORIZONTAL-PROFIL C
2 A=452.4 E=2E5 : BATANG VERTIKAL DAN DIAGONAL

C BATANG HORIZONTAL

1	1	2	M=1	G=11,1,1,1	LP=3,0
13	14	15	M=1	G=11,1,1,1	LP=3,0

C BATANG VERTIKAL

25	1	14	M=2	G=12,1,1,1	LP=3,0
----	---	----	-----	------------	--------

C BATANG DIAGONAL

38	2	14	M=2	G=5,1,1,1	LP=3,0
44	7	21	M=2	G=5,1,1,1	LP=3,0

SHELL

NM=1 Z=-1

C IDENTIFIKASI JENIS ELEMEN

1 E=2E5 U=0.3 W=5.55E-5 : PELAT PERKUATAN

C PELAT PERKUATAN

1	JQ=1,27,14,31	ETYPE=0	M=1	TH=6
2	JQ=28,29,32,33	ETYPE=0	M=1	TH=6
3	JQ=30,13,34,26	ETYPE=0	M=1	TH=6

LOADS

C BEBAN TITIK

18	L=1	F=0,0,-45
22		F=0,0,-45

1 C S I / S A P 9 0 - - F I N I T E E L E M E N T A N A L Y S I S O F S T R U C T U R E S P A G E
 PROGRAM: SAP90/FILE:DENGAN.F3F
 BALOK BADAN TERBUKA DENGAN PERKUATAN

F R A M E E L E M E N T F O R C E S

ELT ID	LOAD COND	AXIAL FORCE	DIST ENDI	1-2 PLANE		1-3 PLANE		AXIAL TORQ
				SHEAR	MOMENT	SHEAR	MOMENT	
1	1	-105.49	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
2	1	-60.10	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
3	1	-14.70	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
4	1	30.69	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
5	1	76.08	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
6	1	76.47	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
7	1	77.26	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
8	1	77.65	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
9	1	33.04	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
10	1	-11.57	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
11	1	-56.17	.0	.00	.00			
			500.0	.00	.00			
12	1	-100.78	.0	.00	.00			

13		500.0	.00	.00
	1	91.96		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
14				
	1	46.57		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
15				
	1	1.18		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
16				
	1	-44.22		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
17				
	1	-44.61		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
18				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
19				
	1	-45.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
20				
	1	-45.39		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
21				
	1	-45.78		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
22				
	1	-1.18		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
23				
	1	43.43		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
24				
	1	88.04		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
25				
	1	.00		
26				
	1	-45.39		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
27				

	1	-45.39		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
28	-----			
	1	-45.39		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
29	-----			
	1	-45.39		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
30	-----			
	1	-.39		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
31	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
32	-----			
	1	.39		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
33	-----			
	1	-44.61		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
34	-----			
	1	-44.61		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
35	-----			
	1	-44.61		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
36	-----			
	1	-44.61		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
37	-----			
	1	.00		
		.0	.00	.00
		500.0	.00	.00
38	-----			
	1	64.19		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
39	-----			
	1	64.19		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
40	-----			
	1	64.19		
		.0	.00	.00
		707.1	.00	.00
41	-----			

	1	64.19			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
42	-----				
	1	.55			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
43	-----				
	1	.55			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
44	-----				
	1	-.55			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
45	-----				
	1	-.55			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
46	-----				
	1	63.08			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
47	-----				
	1	63.08			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
48	-----				
	1	63.08			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	
49	-----				
	1	63.08			
		.0	.00	.00	
		707.1	.00	.00	

C S I / S A P 9 0 - - F I N I T E E L E M E N T A N A L Y S I S O F S T R U C T U R E S P A G E 1
PROGRAM: SAP90/FILE:DENGAN.SOL

BALOK BADAN TERBUKA DENGAN PERKUATAN

J O I N T D I S P L A C E M E N T S

LOAD CONDITION 1 - DISPLACEMENTS "U" AND ROTATIONS "R"

JOINT	U(Y)	U(Z)
1	.000000	.000000
2	-.000510	-.001219
3	-.000800	-.003425
4	-.000871	-.005926
5	-.000723	-.008285
6	-.000355	-.009359
7	.000014	-.009599
8	.000388	-.009404
9	.000763	-.008367
10	.000923	-.006031
11	.000867	-.003529
12	.000595	-.001293
13	.1082E-03	.0000E+00
14	.000000	.000000
15	.000445	-.001470
16	.000670	-.003675
17	.000675	-.006177
18	.000462	-.008536
19	.000246	-.009361
20	.000028	-.009599
21	-.000189	-.009402
22	-.000408	-.008614
23	-.000630	-.006277
24	-.000635	-.003775
25	-.000426	-.001539
26	.000000	.000000
27	.000000	.000000
28	.000000	.000000
29	.000000	.000000
30	.000000	.000000
31	.000000	.000000
32	.000000	.000000
33	.000000	.000000
34	.000000	.000000

CSI / SAP90 - - FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STRUCTURES PAGE 2
 PROGRAM: SAP90/FILE: DENGAN.SOL

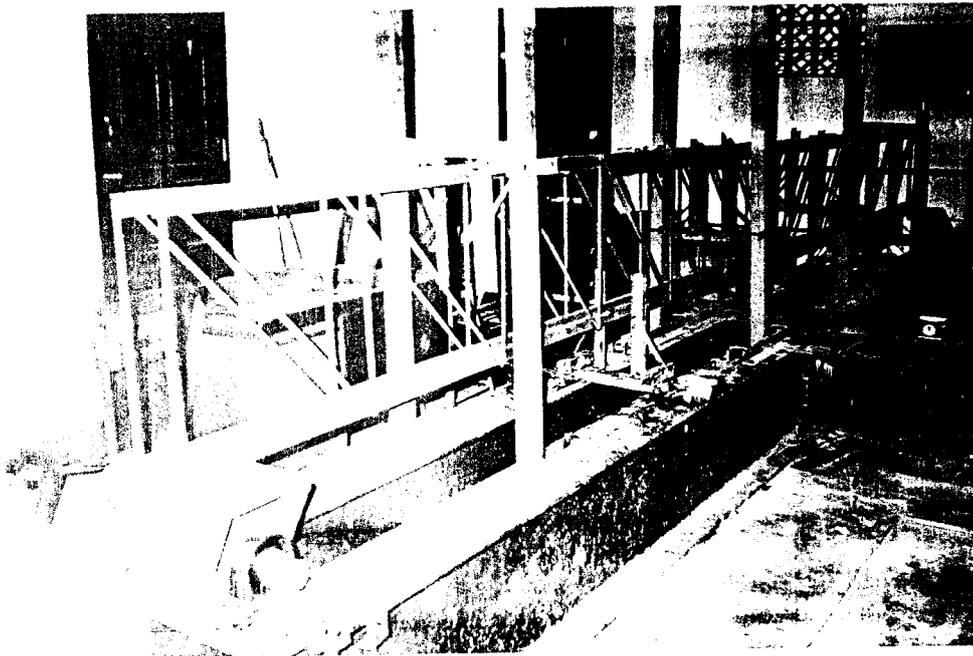
BALOK BADAN TERBUKA DENGAN PERKUATAN

REACTIONS AND APPLIED FORCES

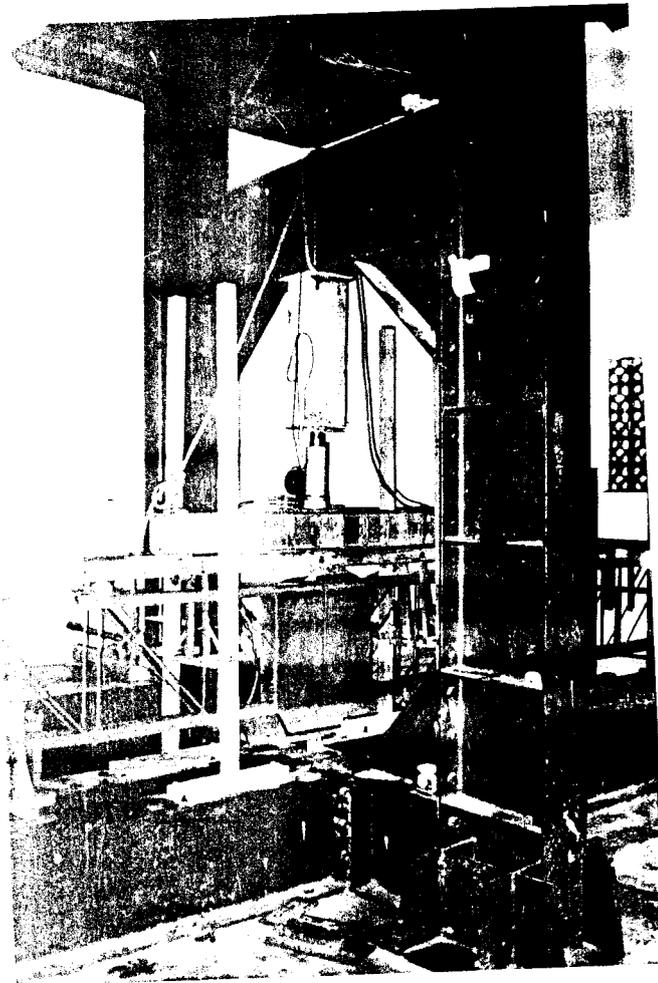
LOAD CONDITION 1 - FORCES "F" AND MOMENTS "M"

JOINT	F(Y)	F(Z)	M(X)
1	105.4891	10.4063	.0000
2	.0000	.0000	.0000
3	.0000	.0000	.0000
4	.0000	.0000	.0000
5	.0000	.0000	.0000
6	.0000	.0000	.0000
7	.0000	.0000	.0000
8	.0000	.0000	.0000
9	.0000	.0000	.0000
10	.0000	.0000	.0000
11	.0000	.0000	.0000
12	.0000	.0000	.0000
13	.0000	-9.6500	-737.3425
14	-137.3537	55.7985	.0000
15	.0000	.0000	.0000
16	.0000	.0000	.0000
17	.0000	.0000	.0000
18	.0000	-45.0000	.0000
19	.0000	.0000	.0000
20	.0000	.0000	.0000
21	.0000	.0000	.0000
22	.0000	-45.0000	.0000
23	.0000	.0000	.0000
24	.0000	.0000	.0000
25	.0000	.0000	.0000
26	174.4868	56.3511	-737.3425
27	.0000	10.4063	.0000
28	.0000	20.8125	.0000
29	.0000	20.8125	.0000
30	-85.1824	9.0692	-822.5882
31	.0000	10.4063	.0000
32	.0000	20.8125	.0000
33	.0000	20.8125	.0000
34	-57.4398	30.4625	-822.5882
TOTAL	.4974E-13	.1665E+03	-.3120E+04

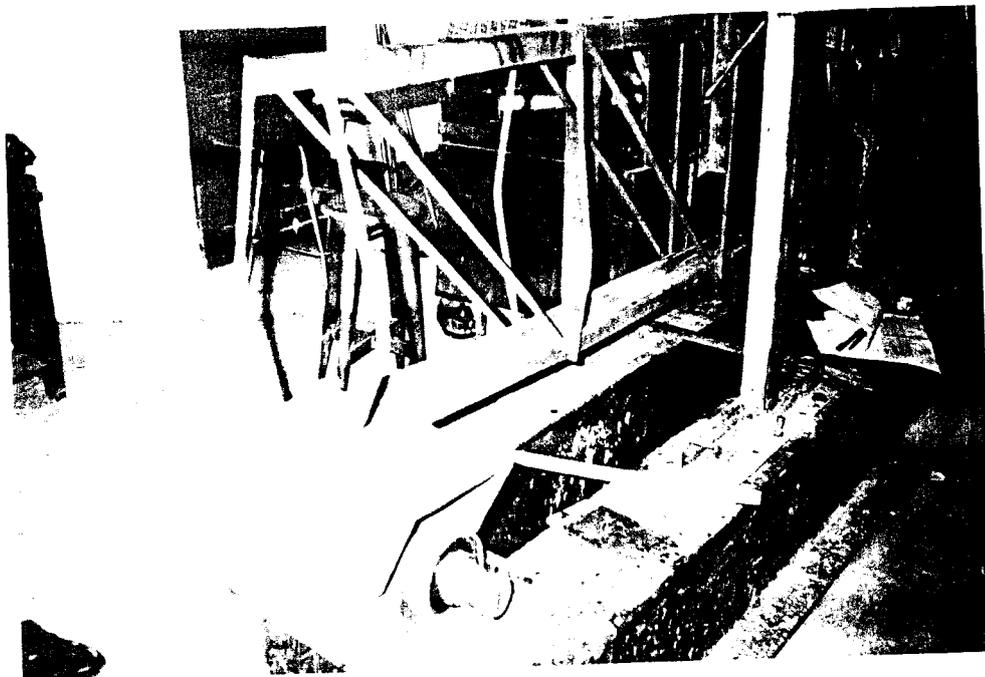
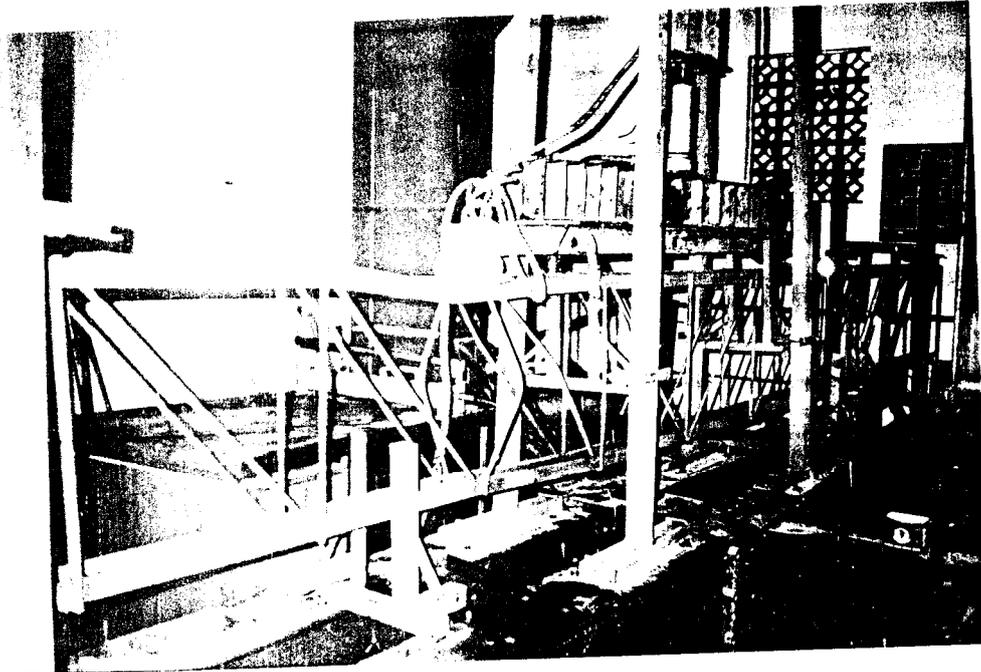
LAMPIRAN V



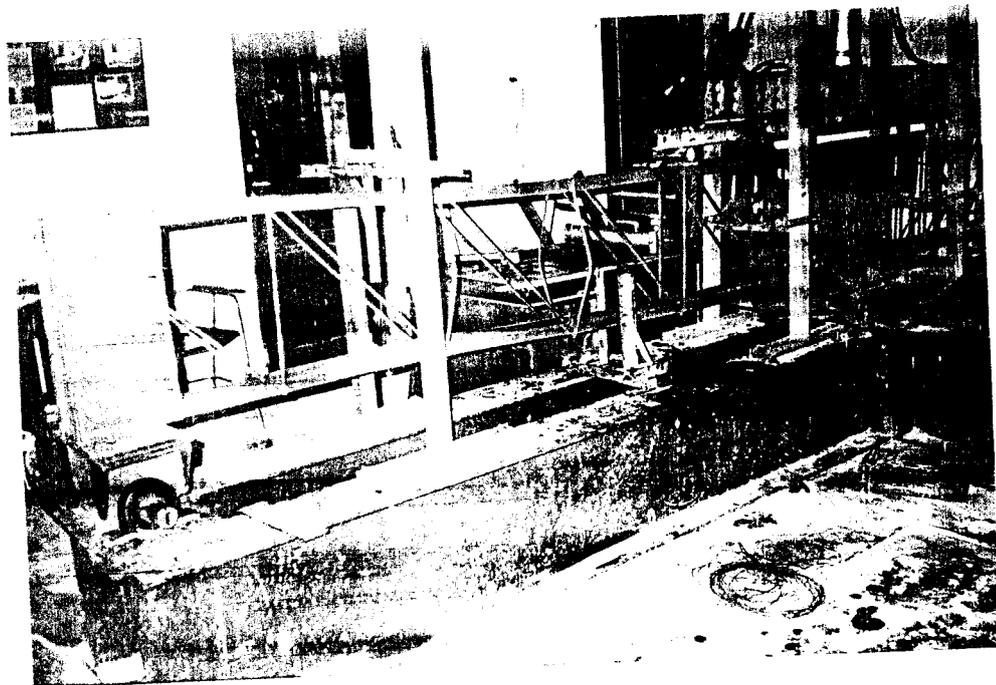
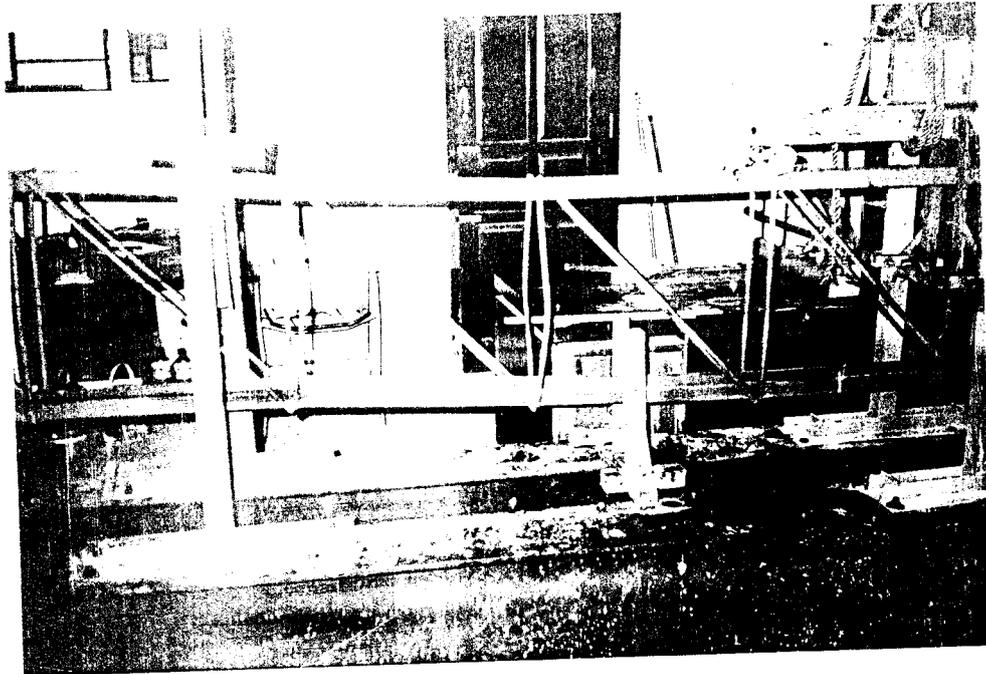
Gambar V.1. Foto *setting* balok badan terbuka sebelum dilakukan pengujian pembebanan



Gambar V.2. Foto balok badan terbuka sebelum dilakukan pengujian pembebanan



Gambar V.3. Foto kerusakan pada balok badan terbuka tanpa perkuatan



Gambar V.4. Foto kerusakan pada balok badan terbuka dengan perkuatan