

PERPUSTAKAAN	YPSI UIN
HANJAL/PULI	
TGL. TERIMA :	1 Juni 2004
NO. JUDUL :	001207
NO. INV. :	5120001207001
NO. HUK. :	

TUGAS AKHIR

PENGARUH PEMBEBANAN EKSENTRIS PADA KAPASITAS KOLOM TERSUSUN PROFIL C BENTUKAN DINGIN

Diajukan sebagai Persyaratan Memperoleh
Derajat Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta



Disusun oleh :

SHIYAM PUSPITASARI (99511119)

MUGIYATI (99511435)

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2004**

HALAMAN PENGESAHAN
TUGAS AKHIR
**PENGARUH PEMBEBANAN EKSENTRIS PADA KAPASITAS
KOLOM TERSUSUN PROFIL C BENTUKAN DINGIN**

Disusun oleh :

NAMA : SHIYAM PUSPITASARI

No. Mhs : 99511119

NAMA : MUGIYATI

No. Mhs : 99511435

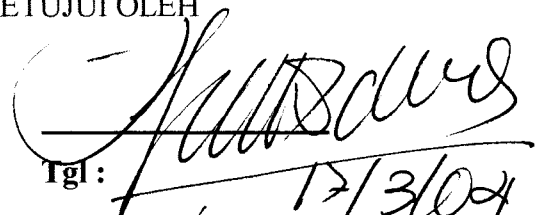
TELAH DIPERIKSA DAN DISETUJUI OLEH

Ir. H. Suharyatmo, MT

Dosen Pembimbing I

Ir. Fathkurrohman. N S, MT

Dosen Pembimbing II


Tgl : 17/3/04

Tgl : 16/03-2004

MOJITO

....., ALLAH MENINGGIKAN ORANG · ORANG YANG BERIMAN
DIANTARA KAMU DAN ORANG · ORANG YANG DIBERI ILMU
PENGETAHUAN, BEBERAPA DERAJAT LEBIH TINGGI.

(Q.S. AL MUJAADILAH : 11)

..... KATAKANLAH : ' ADAKAH SAMA ORANG · ORANG YANG
MENGETAHUI DENGAN ORANG · ORANG YANG TIDAK
MENGETAHUI ? SESUNGGUHNYA ORANG YANG BERAKALLAH
YANG DAPAT MENERIMA PELAJARAN.

(Q.S. AZ ZUMAR : 9)

AKAL DAN BELAJAR ITU SEPERTI JIWA DAN RAGA, TANPA
RAGA, JIWA HANYALAH UDARA HAMPAS, TANPA JIWA , RAGA
ADALAH KERANGKA TANPA MAKNA.

(KHALIL GIBRAN)

KATA PENGANTAR

Assalamu 'alaikum Wr.Wb.

Dengan mengucapkan syukur Alhamdulillah kehadiran Allah SWT, atas segala rahmat, hidayah dan karunia-Nya, maka penyusun dapat menyelesaikan tugas akhir dan menyusun laporan ini. Tugas akhir ini diselesaikan untuk melengkapi syarat memperoleh jenjang kesarjanaan Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam menyusun tugas akhir ini, penyusun telah banyak mendapatkan bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, maka dari itu dalam kesempatan ini perkenankanlah kami menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. H. Suharyatmo, MT, selaku Dosen Pembimbing I.
2. Bapak Ir. Fatkhurrohman N, MT, selaku Dosen Pembimbing II.
3. Bapak Ir. H. 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. Bapak Ir. Tri Fajar Budiyo, MT, selaku Dosen Tamu.
6. Para Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

7. Yang tercinta Bapak, Ibu, Kakak, dan Adik-adikku atas semangat, dorongan dan harapannya.
8. Teman-teman yang telah banyak memberikan bantuan dan dorongan.

Kepada semua pihak yang tersebut diatas, kami hanya dapat mendoakan dan berharap semoga segala bantuan dan amal kebajikannya diterima Allah SWT.

Walaupun telah berusaha semaksimal mungkin, penyusun menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu saran dan kritik yang bersifat membangun sangat penyusun harapkan.

Akhir kata besar harapan kami semoga tugas akhir ini bermanfaat khususnya bagi kami dan semua pihak yang membutuhkan pada umumnya. Amin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, 20 Februari 2004

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
MOTTO	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR SIMBOL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
ABSTRAKSI	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Manfaat Penelitian	2
1.4. Batasan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
BAB III LANDASAN TEORI	
3.1. Kolom Tunggal	8
3.2. Pembebanan Eksentris Pada Profil Tunggal	11

4.5.4. Pengujian Kuat Tarik Profil dan Plat	38
---	----

BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Uji Kuat Material Profil C dan Plat	40
5.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Kelom Tersusun	40
5.2.1. Hubungan Beban-Lendutan (P - Δ) Hasil Penelitian	41
5.2.2. Analisis Data Hubungan Beban – Lendutan (P - Δ) Hasil Penelitian	42
5.2.3. Hubungan Momen-Kelengkungan (M- Φ) Hasil Penelitian	42
5.2.4. Analisis Data Hubungan Momen – Kelengkungan (M- Φ) Hasil Penelitian	43
5.3. Pembahasan	44
5.3.1. Hasil Uji Kuat Tarik Baja	44
5.3.2. Hubungan Kekakuan – Eksentrisitas	44
5.3.3. Hubungan Beban Kritis (P_{cr}) dengan Eksentrisitas (e)	45
5.3.4. Hubungan $\frac{e}{d}$ dengan $\frac{P}{P_y}$	47

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan	49
6.2. Saran	50

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR SIMBOL

A	= luas penampang, mm^2
a	= jarak pusat berat kedua profil (jarak sumbu elemen-elemen batang tersusun), mm
A _h	= luas penampang dua plat kopel, mm^2
b	= tinggi profil, mm
d	= lebar penampang kedua profil (benda uji), mm
E	= modulus elastisitas, kg/cm^2
e	= eksentrisitas, mm
E _t	= modulus tangen, kg/cm^2
E _r	= modulus reduksi, kg/cm^2
F _{cr}	= tegangan kritis, kg/cm^2
F _y	= tegangan leleh, kg/cm^2
G	= koefisien geser, kg/cm^2
H	= tinggi plat melintang, mm
h'	= lebar sayap profil, mm
I	= momen kelembaman, mm^4
I _c	= momen kelembaman batang tunggal, mm^4
I _h	= momen kelembaman plat kopel, mm^4
I _x	= momen kelembaman terhadap sumbu x, mm^2
I _y	= momen kelembaman terhadap sumbu y, mm^2
k	= koefisien tekuk
L	= panjang kolom, mm
L ₁	= jarak antara tengah – tengah batang melintang, mm
L _e	= panjang efektif, mm
L _{ex}	= panjang tekuk batang arah tegak lurus sumbu x-x, mm

L_{ey}	= panjang tekuk batang arah tegak lurus sumbu y-y, mm
M	= momen, kg.cm
M	= jumlah batang tunggal yang membentuk batang tersusun
P	= beban, kg
P_{maks}	= beban maksimum, kg
P_{cr}	= beban kritis, kg
r_y	= jari-jari kelembaman batang terhadap sumbu y-y, mm
r_x	= jari-jari kelembaman batang terhadap sumbu x-x, mm
r_{min}	= jari-jari kelembaman batang tunggal yang terkecil, mm
t	= tebal profil, mm
T	= tebal plat melintang, mm
Y_{i-1}	= pelenturan pada titik $i - 1$
Y_i	= pelenturan pada titik i
Y_{i+1}	= pelenturan pada titik $i + 1$
α (Alpha)	= sudut yang dibentuk grafik hubungan $(M-\Phi)$
β (Beta)	= faktor bentuk
Δ (Delta)	= lendutan, mm
θ (Theta)	= sudut yang dibentuk oleh grafik hubungan Beban lendutan
K	= kekakuan
λ (Lambda)	= kelangsingan
λ_1	= kelangsingan batang tunggal
λ_{ix}	= kelangsingan idiil pada arah tegak lurus sumbu x-x
λ_{iy}	= kelangsingan idiil pada arah tegak lurus sumbu y-y
λ_c	= parameter kelangsingan
μ (Mu)	= angka poisson
π (Pi)	= konstanta pi
Φ (Phi)	= kelengkungan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Batang Lurus dibebani gaya tekan aksial	7
Gambar 3.2. Grafik Tegangan menurut persamaan Euler, Modulus tangen dan Modulus tereduksi	10
Gambar 3.3. Kolom dengan Beban P dan Eksentrisitas e	11
Gambar 3.4. Sumbu Bahan dan Sumbu Bebas Bahan Pada Kolom Tersusun	14
Gambar 3.5. Batang Tersusun dihubungkan dengan Plat Melintang	15
Gambar 3.6. Kolom Tersusun dengan Beban Tekan Eksentris	19
Gambar 3.7. Kerusakan Kolom akibat Tekuk Lokal	22
Gambar 3.8. Koefisien Tekuk Elastis untuk Tekanan pada Plat Segi Empat Datar	24
Gambar 3.9. Hubungan antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{d}$	26
Gambar 3.10. Hubungan antara Beban (P) dan Lendutan (Δ).....	27
Gambar 3.11. Penurunan yang terjadi akibat beban (P)	28
Gambar 3.12. Hubungan Momen – Kelengkungan (M- Φ)	30
Gambar 4.1. Flow Chart Metodologi Penelitian	31
Gambar 4.2. Model Benda Uji	34
Gambar 4.3. Benda Uji Tampak Atas	37
Gambar 4.4. Benda Uji Tampak Samping	37

Gambar 4.5. Diagram Tegangan-Regangan Baja Struktur.....	38
Gambar 4.6. Benda Uji untuk Uji Kuat Tarik	38
Gambar 5.1. Grafik Regresi Hubungan Beban --Lendutan kelima Benda Uji	41
Gambar 5.2. Hubungan Momen - Kelengkungan (M- Φ) Hasil Pengujian	43
Gambar 5.3. Grafik Hubungan eksentrisitas (e) dengan Kekakuan	45
Gambar 5.4. Grafik Hubungan Beban Maksimum dan (e) Beban	46
Gambar 5.5. Grafik Hubungan $\frac{e}{d}$ dengan $\frac{P}{P_y}$	48

DAFTAR TABEL

5.1. Hasil Pengujian Kuat Tarik Bahan	40
5.2. Analisis Kekakuan dari Hubungan Beban – Lendutan.....	42
5.3. Analisis Faktor Kekakuan dari Hubungan Momen – Kelengkungan	43
5.4. Analisis Hasil Uji Kuat Tarik Baja	44
5.5. Perhitungan $\frac{e}{d}$ dan $\frac{P}{P_y}$ Hasil Pengujian	47

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perencanaan Kolom Tersusun	L1-01 s.d.L1-08
Lampiran 2	Perhitungan Teoritis Kapasitas Kolom Tersusun Akibat Pembebanan Eksentris	L2-01 s.d.L2-07
Lampiran 3	Tabel dan Grafik Hasil Penelitian	L3-01 s.d.L3-23
Lampiran 4	Gambar dan Dokumentasi Saat Pengujian	L4-01 s.d.L4-03

ABSTRAKSI

Beban tekan eksentris yang bekerja pada kolom tersusun menimbulkan momen yang besarnya sama dengan perkalian gaya (P) dengan eksentrisitas (e). Momen yang terjadi pada kolom tersusun mengakibatkan kapasitas kolom tersusun menjadi berkurang.

Penelitian eksperimental kolom tersusun dari profil C bentukan dingin yang menerima beban eksentris bertujuan untuk mengetahui perilaku kolom tersusun, yaitu besarnya kapasitas desak kolom (P_{cr}), kekakuan berdasarkan hubungan beban – lendutan ($P-\Delta$), faktor kekakuan (EI) berdasarkan hubungan momen-kelengkungan ($M-\Phi$), hubungan tanpa dimensi antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{d}$ dan pola kegagalannya.

Hasil eksperimental menunjukkan bahwa untuk eksentrisitas $0,1d$; $0,2d$ $0,3d$ dan $0,4d$ kapasitas kolom menjadi sebesar 90,46 % ; 80,91 %; 68,98 % dan 61,82 % dari kapasitas kolom (P_{cr}) yang menerima beban sentris, sedangkan hubungan beban-lendutan ($P-\Delta$) dan hubungan momen-kelengkungan ($M-\Phi$) untuk eksentrisitas semakin besar mempunyai perilaku yang semakin kaku dan nilai faktor kekakuan (EI) yang semakin besar, dan pola kegagalannya berupa tekuk lokal.

Kata kunci : kolom tersusun, eksentrisitas (e), pelenturan (momen), kapasitas desak dan tekuk.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam struktur nyata gaya tekan eksentris merupakan kondisi yang paling umum dijumpai. Eksentrisitas terjadi karena ketidaktepatan pembebanan atau pembengkokan awal.

Pembebanan kolom secara eksentris ini akan menimbulkan gaya lain berupa momen lentur (M), selain beban aksial itu sendiri. Tegangan yang terjadi pada penampang kolom merupakan interaksi antara tegangan desak dengan tegangan lentur. Karena tegangan kritis pada kolom (F_{cr}) tetap maka besarnya momen akan mengurangi kapasitas kolom (P_{cr}).

Kondisi pembebanan tekan eksentris pada kolom tunggal telah lazim diteliti, sedangkan informasi untuk kolom tersusun masih kurang, sehingga timbul pemikiran untuk melakukan penelitian tentang pengaruh eksentrisitas beban terhadap kapasitas tekan kolom tersusun profil C bentukan dingin. Penggunaan kolom tersusun dalam keadaan khusus mungkin lebih hemat dibandingkan profil tunggal untuk kolom panjang yang menerima beban berat, karena jarak antar profil dapat diatur sehingga menghasilkan momen inersia (I) yang besar.

Persoalan yang mungkin timbul dari kolom tersusun profil C bentukan dingin adalah masalah instabilitas. Karena kolom tersusun profil Lip Light Channel

bentukan dingin merupakan profil gelas yang tipis, sehingga dapat mengalami kegagalan dini berupa pembengkokan atau tekuk. Tekuk inilah yang biasanya merusak suatu elemen struktur yang mengalami gaya desak. Oleh karena itu perlu diketahui kapasitas kolom dan bentuk kegagalan kolom tersusun akibat pembebanan eksentris.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui kapasitas kolom tersusun profil C bentukan dingin akibat pembebanan eksentris.
2. Mengetahui nilai kekakuan kolom tersusun akibat pembebanan eksentris.
3. Memperoleh kurva hubungan momen-kelengkungan ($M-\Phi$) dan faktor kekakuan (EI).
4. Mengetahui hubungan tanpa dimensi yaitu rasio $\frac{P}{P_y}$ terhadap $\frac{e}{d}$.
5. Mengetahui ragam kegagalan kolom tersusun profil C bentukan dingin akibat pembebanan eksentris.

1.3. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi tentang kapasitas dan perilaku kolom tersusun profil C bentukan dingin akibat pembebanan tekan eksentris.

1.4. Batasan Penelitian

Pada penelitian ini yang diteliti balok kolom dengan menggunakan batasan masalah sebagai berikut :

1. Benda uji pada penelitian ini berupa kolom tersusun dari profil C bentukan dingin yang dipasang (front to front) dan plat -- plat yang berfungsi sebagai batang perangkai melintang (plat kopel) dengan alat sambung las.
2. Beban yang bekerja pada benda uji adalah beban aksial eksentris yang bekerja pada sumbu x.
3. Benda uji berupa kolom tersusun profil C bentukan dingin dengan variasi letak eksentrisitas beban terhadap pusat berat. Nilai eksentrisitas kolom terdiri dari 0; 0,1d ; 0,2d ; 0,3d ; dan 0,4d. Panjang kolom (L), penampang kolom (b/d), jarak antar plat kopel (L_1) adalah sama.
4. Jenis struktur adalah kolom dengan kedua ujungnya ditumpu sederhana (sendi) dan kolom tidak bergoyang ($k=1$) dan dianggap tidak ada tahanan lateral diantara dukungan.
5. Sambungan menggunakan las dengan asumsi kekuatan las mempunyai kekuatan penuh atau disamakan dengan kekuatan bahan.
6. Tenggangan residu tidak ditinjau.
7. Tegangan maksimum (F_{cr}) yang terjadi pada setiap benda uji dianggap sama dengan tegangan maksimum (F_{cr}) pada saat kolom tersusun menerima beban secara konsentris.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Edward G. Nawi (1985) mengemukakan bahwa kolom merupakan elemen vertikal yang memikul sistem lantai struktural. Elemen ini merupakan elemen yang mengalami tekan dan pada umumnya disertai dengan momen lentur. Pendapat yang sama juga dikemukakan oleh *Crawly, Stanley W, M, Arch, dkk, Ferdinand L. Singer dan Andrew Pytel (1985), Gere dan Thimosenko (2000)*.

Gere dan Thimosenko (2000) mengemukakan bahwa besarnya tegangan kritis kolom sebanding dengan modulus elastis, dan berbanding terbalik dengan kuadrat kelangsingan batang.

Kolom tersusun adalah gabungan dua batang tunggal atau lebih, satu dengan yang lain dihubungkan (dirangkai) bersama – sama dengan menggunakan batang penghubung. Batang – batang penghubung dapat berupa batang diagonal, batang melintang atau kombinasi batang diagonal dan melintang (*Padosbajayo, 1994*).

Akibat pembebanan eksentris yaitu beban bekerja tidak tepat pada titik berat penampang kolom, mengakibatkan terjadinya momen lentur disamping gaya aksial. Momen yang timbul akibat beban eksentris tersebut sebesar M , yang didapat dari beban (P) dikalikan dengan jarak beban ke pusat berat penampang kolom (e). Momen lentur dapat bersumbu tunggal (uniaxial) seperti kolom eksterior bangunan bertingkat banyak dan kolom bersumbu banyak (biaksial) apabila lenturnya terjadi

terhadap sumbu X dan sumbu Y seperti kolom yang terletak di pojok bangunan. (Salmon, Charles G).

Semua beban kolom sejauh ini diasumsikan bekerja secara sentris. Asumsi ini tepat ketika beban bekerja sampai puncak kolom dimana ketika sebuah pertemuan balok kolom terdapat balok di keempat sisinya. Tetapi bila pada pertemuan balok kolom hanya terdapat tiga balok pada pertemuan balok kolom tersebut, maka terdapat ketidaksimetrisan potongan kolom dan akan terjadi kondisi pembebanan eksentris pada kolom bangunan gedung (Crawly, Stanley W, M, Arch, dkk).

Pengaruh geser terhadap pengurangan kekuatan kolom sebanding dengan besarnya deformasi yang ditimbulkan oleh gaya geser. Perampang berbandan solid memiliki deformasi geser yang lebih kecil daripada kolom tersusun. Pengaruh gaya geser yang kecil pada kolom berbandan solid dapat diabaikan dengan aman. Namun pengaruh geser sebaiknya tidak diabaikan untuk kolom tersusun (Salmon dan Johnson, 1990).

Salmon dan Johnson (1990) mengemukakan bahwa tegangan kritis elemen plat besarnya adalah sebanding dengan koefisien tekuk plat, modulus elastis dan berbanding terbalik dengan kuadrat rasio b/t .

Menurut Salmon dan Johnson, 1990 Kegagalan pada kolom tersusun dapat berupa tekuk lokal atau tekuk keseluruhan, dimana tekuk keseluruhan terjadi apabila tegangan kritis (F_{cr}) kolom tersusun $<$ tegangan kritis (F_{cr}) plat. Tekuk keseluruhan pada kolom dipengaruhi oleh harga kelangsingan batang (kl/r). Tekuk lokal adalah tekuk yang terjadi pada salah satu elemen penyusun tampang suatu struktur. Tekuk lokal menyebabkan elemen yang tertekuk tidak dapat lagi menanggung penambahan

beban, dengan kata lain efisiensi penampang berkurang. Keruntuhan akibat tekuk lokal ini terjadi pada batang yang langsing dimana tegangan kritis (F_{cr}) yang dimiliki oleh pelat jauh dibawah tegangan lelehnya.

Gere dan Thimosenko (2000) mengemukakan hubungan momen-kelengkungan dalam bentuk kurva bilinear. Hubungan momen dengan faktor kekakuan (EI) dalam persamaan $\Phi = M/EI$ berbanding lurus dengan momen dan berbanding terbalik dengan faktor kekakuan.

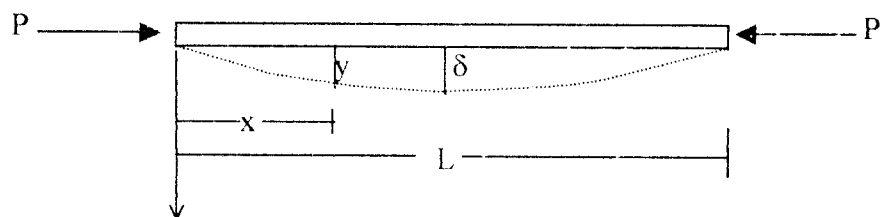
Penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai kajian pustaka adalah penelitian yang dilakukan oleh **Aguskiswanto (2003)** dengan judul **Kuat Tekan Kolom tersusun dari Profil C Bentukan Dingin dengan Variasi Jarak Batang Perangkai Melintang (Plat Kopel)**. Dimana tujuan penelitian ini adalah mencari kuat tekan maksimum kolom tersusun.

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Kolom Tunggal

Gere dan Timoshenko, (2000) menyatakan Leonard Euler adalah orang yang pertamakali memformulasikan ekspresi beban tekuk kritis elastis pada kolom langsing yang penampangnya solid dengan kedua ujungnya sendi. Kolom yang dibebani gaya tekan aksial dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini :



Gambar 3.1. Batang Lurus dibebani gaya tekan aksial

Sebuah batang lurus yang panjangnya L , dan kedua ujungnya dibebani gaya aksial (P), akan mengakibatkan batang yang semula lurus menjadi melengkung seperti Gambar 3.1.

Apabila ditinjau penampang yang terletak pada jarak (x) dari ujung kiri dengan pelenturan (y), maka gaya tekan aksial (P) dan pelenturan (y) pada penampang batang tersebut akan menimbulkan momen . Besarnya momen yang terjadi adalah :

$$M = -P \cdot y \dots\dots\dots(3.1)$$

Persamaan defleksi lendutan untuk kurva elastis :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$= -\frac{P}{EI} \cdot y \rightarrow \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI} y = 0 \dots\dots\dots(3.3)$$

Dengan mengambil $k^2 = \frac{P}{EI}$, maka persamaan 3.3 berubah menjadi :

$$\frac{d^2y}{dx^2} + k^2 y = 0 \dots\dots\dots(3.4)$$

Penyelesaian dari persamaan 3.4 adalah :

$$y = A \sin kx + B \cos kx \dots\dots\dots(3.5)$$

dimana A dan B adalah konstanta integrasi yang didapat dari syarat-syarat batas yaitu defleksi adalah nol ($y=0$) apabila $x = 0$ dan $x = L$.

$$y(0) = A \sin 0 + B \cos 0 = 0 \dots\dots\dots(3.6)$$

Untuk $B = 0$, maka persamaan 3.5 menjadi :

$$y = A \sin kx \dots\dots\dots(3.7)$$

Kondisi batas kedua yaitu defleksi adalah nol apabila $x = L$, maka persamaan 3.7 menjadi :

$$A \sin kL = 0 \text{ dapat dipenuhi apabila } kL = 0, \pi, 2\pi$$

$$\sin kL = \sin n\pi \dots\dots\dots(3.8)$$

$$\sqrt{\frac{P}{EI}} \cdot L = n\pi \dots\dots\dots(3.9)$$

$$P = \frac{n \pi^2 EI}{L^2} \dots\dots\dots(3.10)$$

Tetapi karena yang dicari adalah harga terkecil dari beban kritis atau beban Euler maka n dari persamaan (3.10) diambil 1. Persamaan beban kritis (P_{cr}) elastis adalah sebagai berikut :

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \dots\dots\dots(3.11)$$

dengan : E (modulus elastis), I (momen inersia), L (panjang kolom dari ujung sendi ke ujung sendi), dan π (konstanta ≈ 3.141593).

Persamaan (3.11) memperlihatkan dengan jelas bahwa kapasitas tekan suatu kolom berbanding terbalik dengan kuadrat panjang elemen, berbanding lurus dengan modulus elastisitas material dan momen inersia penampang melintang. Menggunakan persamaan (3.11) dapat diprediksi bahwa apabila suatu kolom menjadi semakin panjang, beban yang dapat menimbulkan tekuk pada kolom menjadi semakin kecil .

Persamaan Euler selalu menggunakan modulus elastis yang harganya tetap, sedangkan keruntuhan kolom pendek dan kolom sedang, terjadi setelah penampangnya tidak elastis, ini berarti terdapat perubahan nilai modulus, dari modulus elastis yang harganya tetap ke modulus elastis yang harganya berubah-ubah. Karena persamaan Euler selalu menggunakan modulus elastis, maka batas berlakunya sampai dengan batas proporsional, diatas batas tersebut persamaan Euler tidak dapat digunakan, dan berlaku rumus teori tangen modulus.

Teori tange modulus membahas keruntuhan kolom di atas batas proporsional (kondisi inelastis). Teori ini dikemukakan oleh *Friedrick enggeser* (*Salmon dan Johnson, 1990*) dengan memodifikasi rumus Euler. Dimana beban tekuk kritis kolom pada saat inelastis adalah :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_t \cdot I}{L^2} \dots\dots\dots(3.12)$$

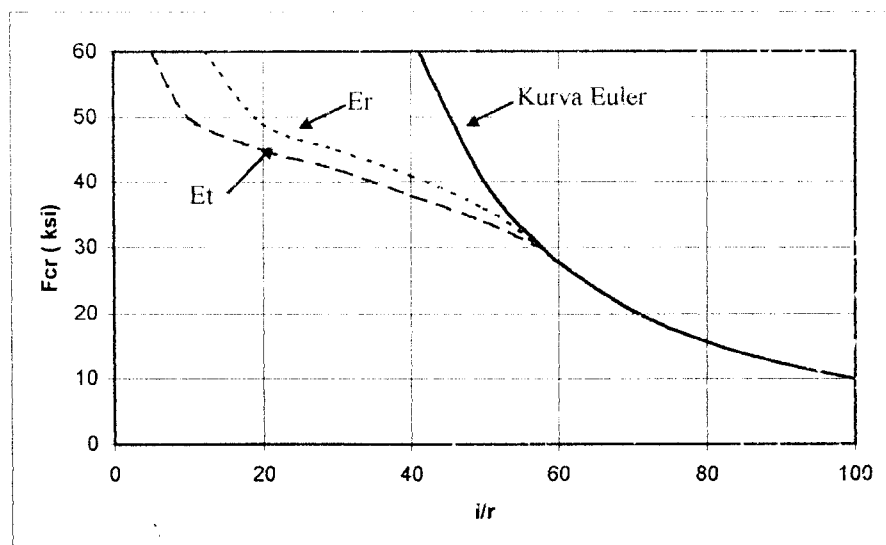
dengan E_t = modulus elastis tange

Pada teori tange modulus ini mengabaikan pembalikan regangan yang terjadi pada penampang kolom, sehingga teori ini diperbaiki dengan teori modulus ganda yang dikemukakan *Engesser* (*Salmon dan Johnson, 1990*) , yaitu :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E_r \cdot I}{L^2} \dots\dots\dots(3.13)$$

dengan E_r = modulus elastis tereduksi

Perbandingan nilai E , E_t dan E_r pada perhitungan tegangan kritis dapat dilihat pada gambar 3.2..

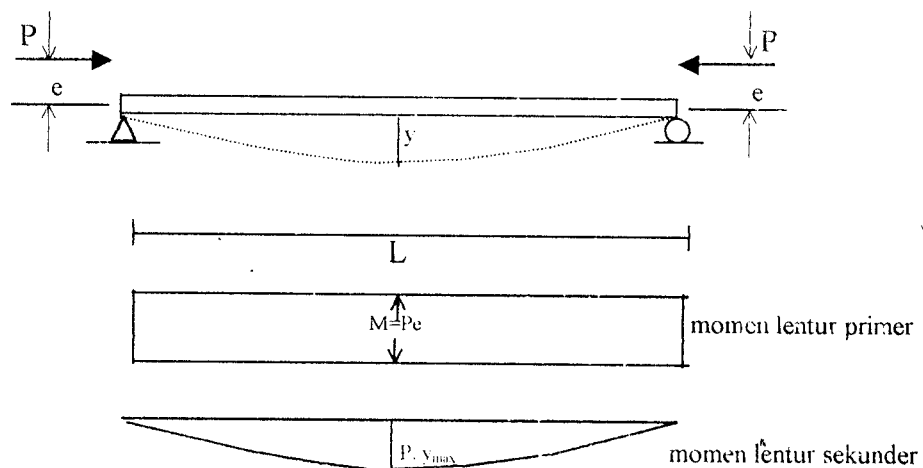


Gambar 3.2. Grafik tegangan menurut persamaan Euler, modulus tange dan modulus tereduksi (*Padosbajayo, 1991*)

Dari gambar 3.2 tampak bahwa tegangan kritis kolom yang menggunakan modulus tangen (E_t) berada di bawah tegangan yang menggunakan modulus tereduksi.

3.2. Pembebanan Eksentrisitas Pada Profil Tunggal

Bila pada suatu batang diberi beban dengan eksentrisitas (e) yang diukur dari sumbu batang, maka beban tekan aksial eksentris ini ekuivalen dengan beban sentris (P) dan momen ($M = P \cdot e$). Momen ini ada sejak beban tersebut diterapkan sehingga kolom mulai terdefleksi pada saat mulai diberi beban. Untuk menganalisis batang yang diberi beban eksentris dapat dilihat pada gambar 3.3 dibawah ini :



Gambar 3.3. Kolom dengan Beban P dan eksentrisitas e

Salah satu rumus batang tekan yang memperhitungkan pengaruh eksentrisitas awal (Gambar 3.3) adalah rumus Secant, (*Salmon dan Johnson, 1990*). Persamaan diferensial untuk kurva elastis adalah :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} = - \frac{P \cdot y}{EI} \dots\dots\dots(3.14)$$

$$y_{\max} = e \left(\frac{\sin^2 k \left(\frac{L}{2} \right)}{\cos k \left(\frac{L}{2} \right)} + \cos k \left(\frac{L}{2} \right) \right) = e \cdot \sec \frac{kL}{2} \dots\dots\dots (3.20)$$

Tegangan maksimum yang terjadi pada kolom yang dibebani eksentris terdiri dari tegangan akibat tekan dan lentur :

$$F_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot e \cdot C}{I} = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot y_{\max} \cdot C}{A \cdot r^2} \dots\dots\dots (3.21)$$

$$= \frac{P}{A} \left(1 + \frac{y_{\max} \cdot C}{r^2} \right) \dots\dots\dots (3.22)$$

$$= \frac{P}{A} \left(1 + \frac{e \cdot C}{r^2} \cdot \sec \left(\sqrt{\frac{P}{EI}} \cdot \frac{L}{2} \right) \right) \dots\dots\dots (3.23)$$

$$P = \frac{F_{\max} \cdot A}{\left(1 + \frac{e \cdot C}{r^2} \sec \frac{L}{r} \sqrt{\frac{P}{EI}} \right)} \dots\dots\dots (3.24)$$

dengan c merupakan jarak pusat berat ke serat terluar penampang .

Persamaan pada 3.24 sukar digunakan karena variabel P berada diruas kiri dan diruas kanan, padahal variabel tersebut baru akan dicari sehingga penyelesaiannya dilakukan dengan “ trial and error”.

3.3. Kolom Tersusun

Menurut *Padoshajayo (1991)* kolom tersusun adalah kolom gabungan dua batang tunggal atau lebih, dimana batang yang satu dengan yang lain dihubungkan bersama-sama menggunakan batang-batang penghubung sedemikian rupa sehingga membentuk satu kesatuan. Batang penghubung dapat berupa batang melintang (plat),

batang diagonal atau kombinasi batang diagonal dengan melintang. Selain itu penghubung dapat juga berupa pelat menerus. Hubungan batang dengan penghubungnya dapat dilaksanakan dengan baut atau las.

Pada profil tersusun jarak batang antara batang tunggal yang satu dengan batang tunggal yang lain dapat diatur sedemikian rupa sehingga diperoleh penampang batang tersusun yang mempunyai jari-jari inersia yang besar.

Sumbu bahan adalah sumbu yang memotong semua elemen komponen struktur itu, sedangkan sumbu bebas bahan adalah sumbu yang sama sekali tidak atau hanya memotong sebagian dari elemen komponen struktur tersebut (Gambar 3.4). Pada komponen struktur tersusun yang terdiri dari beberapa elemen yang dihubungkan dengan elemen penghubung, kekuatannya harus dihitung terhadap sumbu bahan dan sumbu bebas bahan.

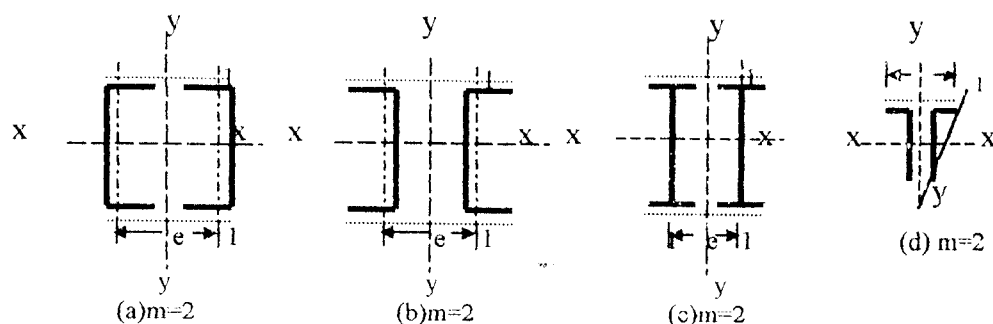
Nilai m untuk penampang batang tersusun yang satu sumbunya sumbu bahan ditunjukkan pada gambar 3.4 sebagai berikut :

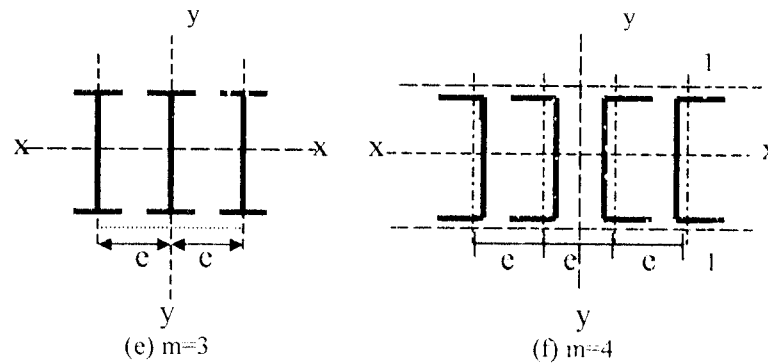
$x - x$ adalah sumbu bahan,

$y - y$ adalah sumbu bebas bahan,

$1 - 1$ adalah sumbu minimum dari elemen komponen struktur,

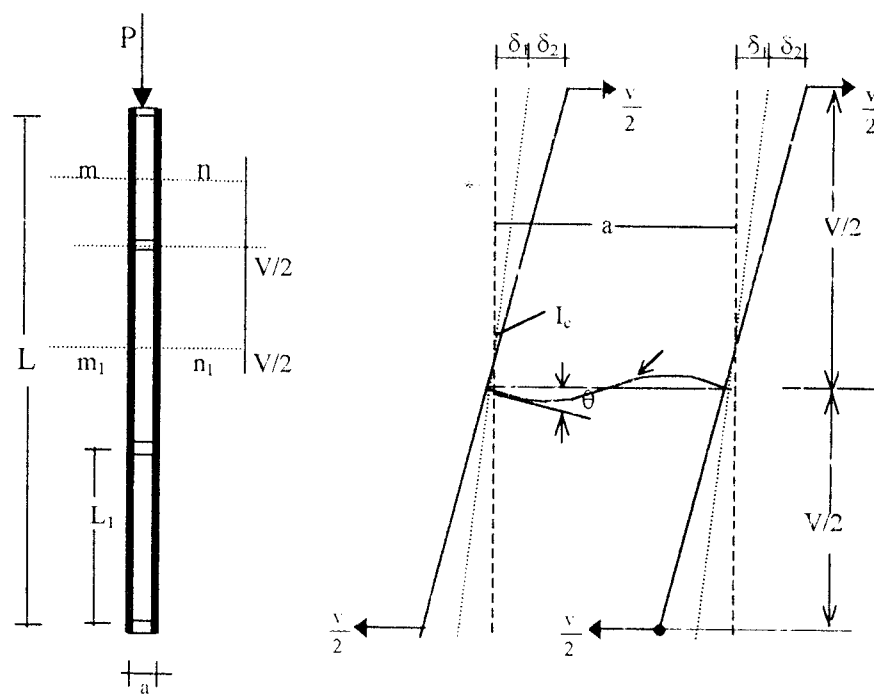
--- adalah pelat kopel.





Gambar 3.4. Sumbu Bahan dan Sumbu Bebas Bahan Pada Kolom Tersusun
(Kuzmanovic and Willems, 1977)

3.4. Pengaruh Geser Pada Kolom Tersusun Pada saat Pembebanan Sentris



Gambar 3.5. Batang Tersusun dihubungkan dengan plat melintang

Salmon dan Johnson (1990) mengemukakan bahwa bila batang mengalami lentur akibat gaya tekan aksial, pada penampang batang tersebut bekerja komponen gaya yang arahnya tegak lurus terhadap sumbu batang. Komponen gaya ini disebut

gaya geser. Besarnya pengaruh geser terhadap pengurangan kekuatan kolom sebanding dengan besarnya deformasi yang ditimbulkan oleh gaya geser. Untuk penampang berbadan pejal atau solid pengaruh geser sangat kecil sehingga dapat diabaikan, sedangkan pada kolom tersusun geser mempengaruhi besarnya kapasitas kolom sehingga pengaruh geser pada kolom tersusun perlu diperhitungkan.

Sebuah batang tersusun terdiri dari dua buah profil C bentukan dingin dengan batang penghubung berupa plat melintang atau plat kopel (Gambar 3.5), batang tersebut dibebani beban aksial P dan pengaruh P pada penampang batang timbul pengaruh lintang atau geser (V). Untuk mengetahui perubahan tempat akibat V ditinjau potongan $m-n$ sampai dengan potongan (m_1-n_1) dianggap profil mempunyai titik belok dipotongan tersebut, (*Padosbajayo, 1991*). Sehingga pelenturan profil dapat dinyatakan dengan :

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

dengan : δ_1 = pelenturan akibat momen pada plat melintang (plat kopel)

δ_2 = pelenturan akibat momen pada profil

Pada ujung – ujung plat melintang bekerja kopel gaya ($V.L/2$). Sehingga dapat dihasilkan persamaan untuk sudut rotasi di ujung-ujung plat adalah :

$$\theta = \frac{V.L_1.a}{12EI_h} \quad \dots\dots\dots(3.26)$$

EI_h adalah kekakuan batang melintang (plat kopel), dan (I_h) adalah momen kelembaman plat kopel. Untuk plat kopel dimuka dan dibelakang yang tebalnya (T), maka persamaan momen kelembaman plat kopel (I_h) adalah

$$I_h = 2 \left(\frac{1}{12} T \cdot H^3 \right) \dots\dots\dots(3.27)$$

Perubahan tempat akibat momen plat kopel adalah :

$$\delta_1 = \frac{\theta \cdot L_1}{2} = \frac{V \cdot L_1^2 \cdot a}{24EI_h} \dots\dots\dots(3.28)$$

Perubahan tempat akibat momen pada profil, diperoleh dengan anggapan balok sepanjang $(L_1/2)$ sebagai kantilever. Sehingga persamaannya adalah :

$$\delta_2 = \frac{V}{2} \left(\frac{L_1}{2} \right) \frac{1}{3EI_h} = \frac{V \cdot L_1^3}{48EI_c} \dots\dots\dots(3.29)$$

dengan: EI_c = kekakuan lentur profil C

I_c = momen kelembaman batang tunggal

Untuk persamaan gaya lintang pada plat kopel adalah $(V \cdot L_1)/a$, dan persamaan untuk regangan geser pada plat kopel adalah :

$$\frac{\beta \cdot V \cdot L_1}{a \cdot A_h \cdot G} \dots\dots\dots(3.30)$$

dengan: A_h = luas dua plat kopel

β = faktor kekakuan

Persamaan beban kritis untuk kolom tersusun dengan memasukkan pengaruh geser pada perangkai horisontal/plat kopel adalah :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{L_1 \cdot a}{12EI_h} + \frac{L_1^2}{24EI_c} + \frac{\beta \cdot L_1 \cdot 2(1+\mu)}{a \cdot A_h \cdot E} \right]} \dots\dots\dots(3.31)$$

Persamaan 3.31 memperlihatkan bahwa beban kritis kolom tersusun dipengaruhi oleh modulus elastis (E), inersia (I), panjang batang, jarak antar plat kopel (L_1), jarak antar pusat berat profil (a), inersia plat (I_h), dan modulus geser (G).

Tegangan kritis kolom didapat dengan membagi persamaan 3.31 dengan luas penampang (A) menjadi :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{AL^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{L_1 \cdot a}{12EI_h} + \frac{L_1^2}{24EI_c} + \frac{\beta \cdot L_1 \cdot 2(1+\mu)}{a \cdot A_h \cdot E} \right]} \quad (3.32)$$

$$\text{dengan } \alpha = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{L_1 \cdot a}{12EI_h} + \frac{L_1^2}{24EI_c} + \frac{\beta L_1 \cdot 2(1+\mu)}{a \cdot A_h \cdot E} \right]}$$

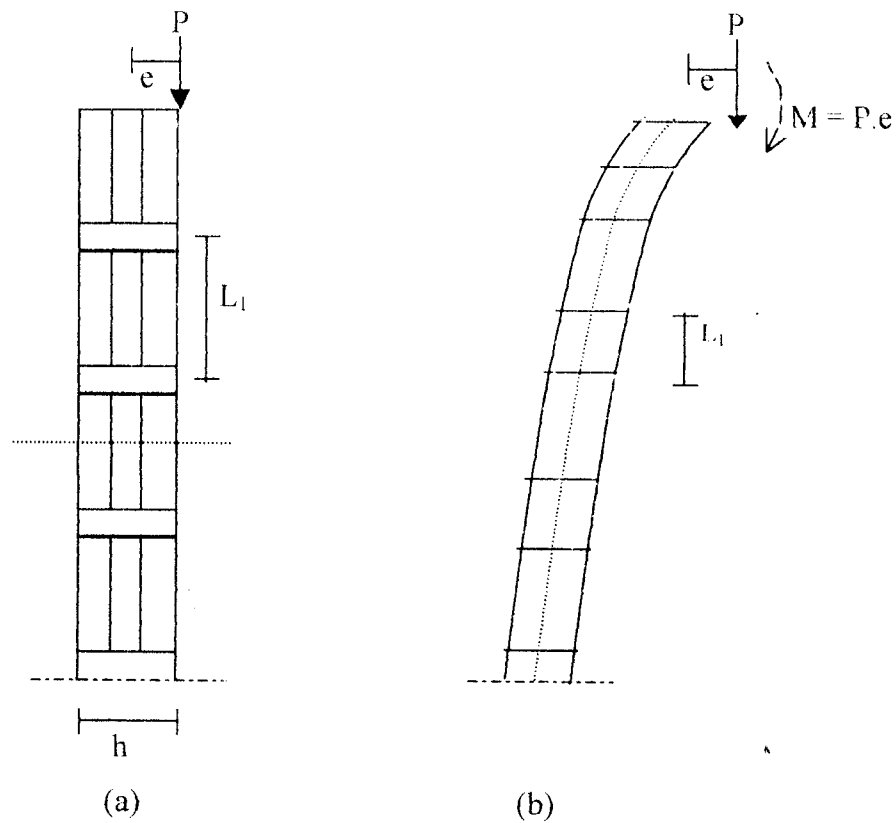
$$F_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{\alpha^2 AL^2} \quad (3.33)$$

Persamaan 3.31 dan 3.32 digunakan untuk menghitung beban kritis (P_{cr}) dan tegangan kritis (F_{cr}) pada saat kolom menerima beban secara terpusat (konsentris). Untuk kolom yang menerima beban secara eksentris maka besarnya momen yang terjadi harus diperhitungkan.

3.5. Pembebanan Eksentris Pada Kolom Tersusun

Ferdinand L. Singer dan Andrew Pytel, (1985) mengemukakan perilaku pembebanan yang bekerja pada kolom mempengaruhi timbulnya gaya – gaya yang bekerja pada penampang kolom. Beban aksial yang bekerja secara eksentris akan menimbulkan gaya lain selain gaya aksial berupa gaya momen yang disebabkan oleh eksentrisitas.

Prinsip tegangan yang dihasilkan oleh perilaku beban yang bekerja secara eksentris pada kolom tersusun ditunjukkan pada gambar 3.6 berikut ini :



Gambar 3.6. Kolom Tersusun dengan Beban Tekan eksentris

Pada saat kolom tersusun diberi beban sebesar P dan sejauh e dari pusat berat penampang, sehingga pada penampang (m-n) bekerja interaksi gaya antara tegangan yang ditimbulkan oleh gaya tekan aksial (f_a) dan momen yang terjadi (f_b). Besarnya gaya yang ditimbulkan oleh P adalah :

$$f_a = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(3.34)$$

Tegangan yang ditimbulkan akibat momen lentur adalah :

$$f_b = \frac{M.C_x}{I_y} \dots\dots\dots(3.35)$$

dengan $M = P \cdot e$, maka persamaan 3.35 berubah menjadi :

$$f_b = \frac{P \cdot e \cdot C_x}{I_y} \dots\dots\dots(3.36)$$

Besarnya tegangan kritis (F_{cr}) pada penampang kolom yang bekerja beban secara eksentris adalah :

$$F = \frac{P}{A} + \frac{P \cdot e \cdot C_x}{I_y} \dots\dots\dots(3.37)$$

Dengan mengasumsikan bahwa tegangan kritis (F_{cr}) maksimum yang terjadi adalah tegangan kritis (F_{cr}) kolom pada saat menerima beban secara sentris (persamaan 3.32), maka untuk berbagai macam nilai eksentrisitas persamaan 3.37 menjadi :

$$\frac{\pi^2 \cdot EI}{AL^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{L_1 \cdot a}{12EI_h} + \frac{L_1^2}{24EI_c} + \frac{\beta \cdot L_1 \cdot 2(1+\mu)}{a \cdot A_h \cdot E} \right]} = P \left(\frac{1}{A} + \frac{e \cdot C_x}{I_y} \right) \dots\dots\dots(3.38)$$

untuk mencari besarnya nilai beban kritis kolom (P_{cr}) maka persamaan 3.38 menjadi:

$$P = \frac{\frac{\pi^2 \cdot EI}{AL^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2} \left(\frac{L_1 \cdot a}{12EI_h} + \frac{L_1^2}{24EI_c} + \frac{\beta \cdot L_1 \cdot 2(1+\mu)}{a \cdot A_h \cdot E} \right)}}{\left(\frac{1}{A} + e \cdot \frac{C_x}{I_y} \right)} \dots\dots\dots(3.39)$$

dengan $\alpha = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 EI}{L^2} \left[\frac{L_1 \cdot a}{12EI_h} + \frac{L_1^2}{24EI_c} + \frac{\beta L_1 \cdot 2(1+\mu)}{a \cdot A \cdot E} \right]}$, maka persamaan 3.39

menjadi :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{A \cdot L^2} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{A} + e \cdot \frac{C_x}{I_y} \right)} \quad (3.40)$$

Dari persamaan 3.40 terlihat bahwa semakin besar eksentrisitas (e), maka beban kritis (P_{cr}) kolom semakin kecil.

3.6. Kegagalan Pada Kolom Tersusun

Suatu kolom bila mendapat beban yang terus bertambah maka pada saat beban mencapai taraf tertentu maka elemen tersebut akan mengalami ketidakstabilan sehingga terjadi tekuk. Pada saat terjadi tekuk kolom tidak mempunyai kemampuan lagi untuk menerima beban tambahan. Sedikit saja penambahan beban akan menyebabkan kolom tersebut runtuh. Dengan demikian kapasitas kolom adalah besarnya beban yang menyebabkan kolom tersebut mengalami tekuk. Macam tekuk (kegagalan) pada kolom dapat berupa :

3.6.1. Kegagalan Karena Leleh

Kegagalan ini akan terjadi apabila tegangan kritis kolom melebihi tegangan hancur (leleh) material (F_y). Besarnya beban leleh adalah :

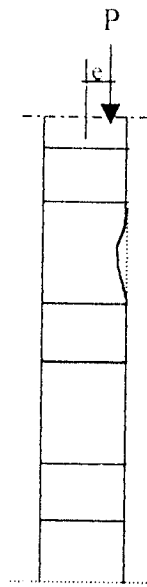
$$P_y = A_g \cdot F_y \quad (3.41)$$

Jenis kegagalan ini hanya terjadi pada kolom pendek. Sedangkan pada kolom panjang kegagalannya ditentukan oleh tekuk karena ketidakstabilan kolom.

3.6.2. Tekuk Lokal

Oleh karena profil tersusun terdiri dari elemen – elemen plat, kekuatan penampang kolom yang didasarkan pada angka kelangsingan keseluruhan hanya

dapat tercapai jika elemen plat tersebut tidak tertekuk setempat. Tekuk setempat elemen plat dapat mengakibatkan kehancuran penampang keseluruhan yang terlalu dini, atau paling sedikit menyebabkan tegangan menjadi tak merata dan mengurangi kekuatan keseluruhan. Kerusakan kolom akibat tekuk lokal dapat dilihat pada gambar 3.6 sebagai berikut :



Gambar 3.7. Kerusakan akibat tekuk lokal

Tekuk lokal yang perlu ditinjau adalah stabilitas lentur plat. Persamaan diferensial umum tekuk plat homogen yang dikemukakan oleh *Salmon dan Johnson (1994)*, adalah :

$$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2) \left(\frac{b}{t}\right)^2} \dots \dots \dots (3.42)$$

Dimana k adalah konstanta yang tergantung pada distribusi tegangan, kondisi tepi dan rasio panjang dengan lebar plat, sedangkan μ adalah rasio poisson, dan b/t adalah rasio lebar dengan ketebalan. Syarat terjadi tekuk lokal adalah :

$$F_{cr \text{ plat}} < F_{cr \text{ tekuk keseluruhan}}$$

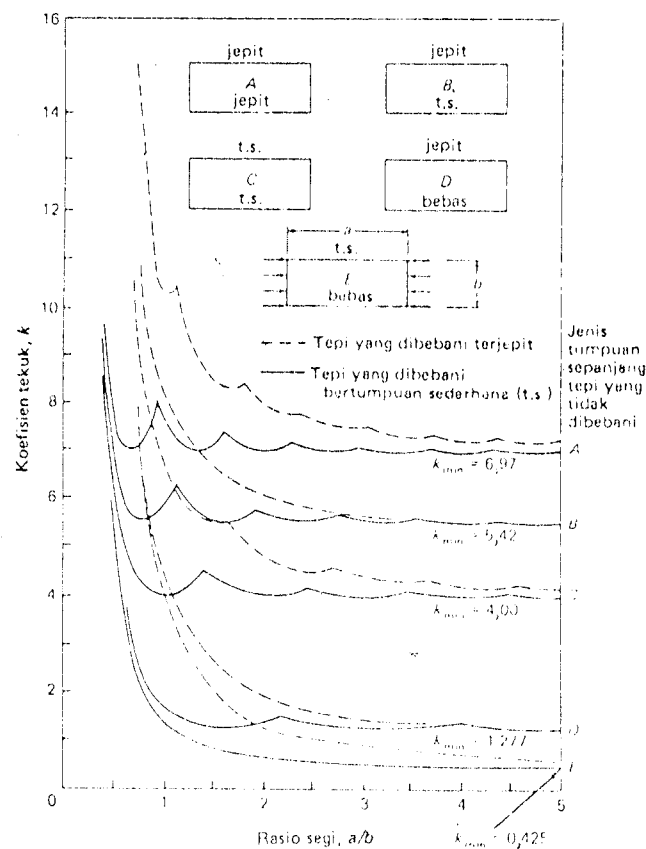
$$k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} < F_{cr}$$

$$(b/t) < 0,6198 \sqrt{\frac{E}{F_{cr}}} \dots\dots\dots(3.43)$$

Pada persamaan 3.43 terlihat bahwa nilai F_{cr} sangat dipengaruhi oleh koefisien tekuk (k) dan nilai rasio lebar terhadap tebal (b/t). Nilai k pada persamaan 3.46 tergantung pada jenis bebannya, yaitu :

1. elemen yang menerima beban tekan pada sayap $k = 0,425$ dan badan $k = 4$
2. elemen yang menerima beban lentur nilai koefisien tekuk $k = 39,7$

Karena koefisien tekuk (k) untuk elemen yang menerima tekan lebih kecil daripada lentur, maka akan sangat berpengaruh. Sedangkan koefisien tekuk (k) akibat lentur dapat diabaikan. Nilai k untuk plat akibat gaya tekan dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut :



Gambar 3.8. Koefisien Tekuk Elastis untuk tekanan pada plat segi empat datar.

3.6.3. Tekuk Keseluruhan

Salmon dan Johnson, (1990) mengemukakan bahwa tekuk keseluruhan terjadi pada kolom apabila tidak terjadi tekuk lokal sebelum kekuatan penuh kolom berdasarkan rasio kelangsingan (kl/r) keseluruhan tercapai. Tekuk keseluruhan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4.43.

Dimana harga F_{cr} keseluruhan adalah tegangan kritis pada kolom tersusun akibat pembebanan eksentris seperti pada persamaan 3.32.

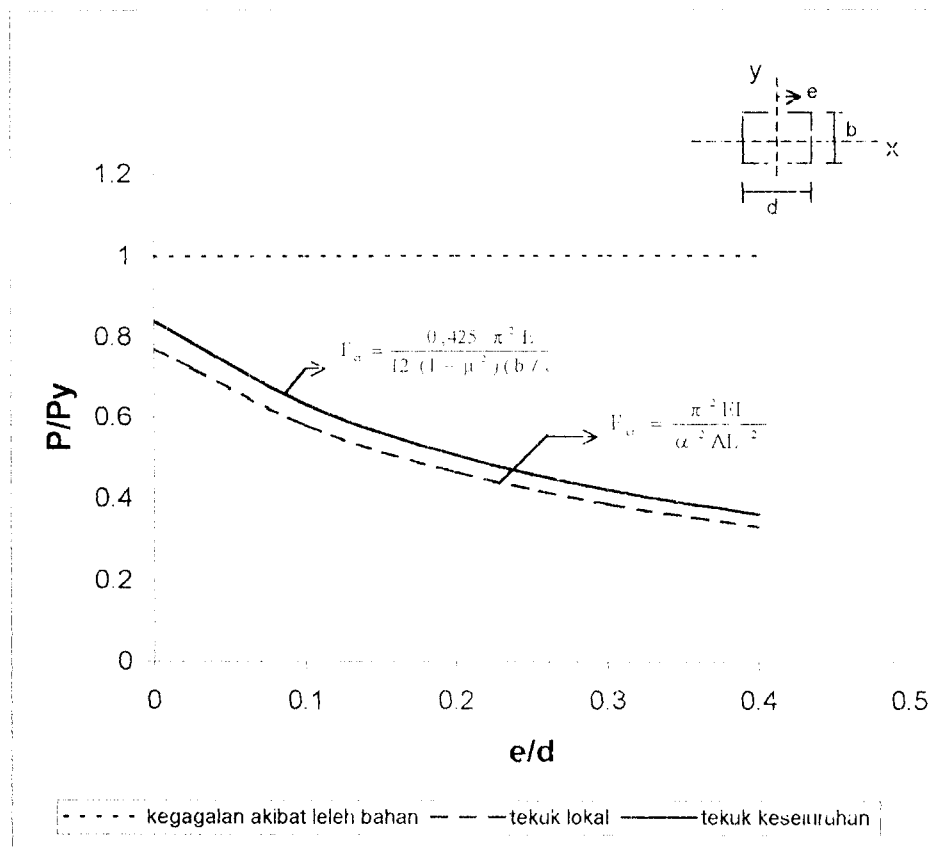
3.7. Hubungan Tanpa dimensi Antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{d}$

Hasil perhitungan beban (P) kolom untuk variasi eksentrisitas (persamaan 3.40) dibandingkan dengan nilai beban pada saat leleh (P_y) dengan menggunakan persamaan 3.41, maka akan didapat rasio $\frac{P}{P_y}$. Rasio $\frac{e}{d}$ didapat dari besarnya eksentrisitas (e) beban dibagi lebar penampang ($d=100$ mm).

Dalam penelitian ini nilai tegangan kritis (F_{cr}) yang digunakan sebagai batasan yaitu :

1. Tegangan kritis kolom (F_{cr}) akibat leleh bahan ($F_y = 240$ Mpa).
2. Tegangan kritis kolom (F_{cr}) akibat tekuk keseluruhan (persamaan 3.32).
3. Tegangan kritis kolom (F_{cr}) pada saat tekuk lokal (persamaan 3.42).

Grafik hubungan antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{d}$ dapat dilihat pada gambar 3.9 sebagai berikut :



Gambar 3.9.
Hubungan antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{d}$

Dari gambar 3.9 dapat diketahui bahwa semakin besar eksentrisitas beban maka besarnya beban kritis yang dapat diterima kolom semakin kecil

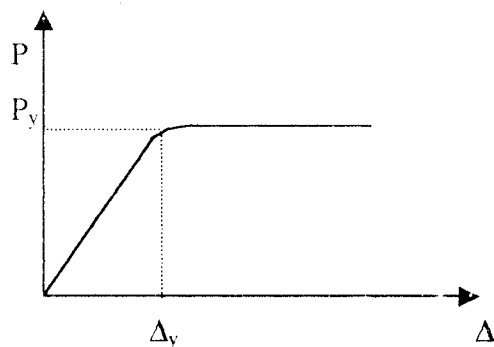
3.8. Hubungan antara Beban dan Lendutan

Kekakuan struktur (K) didefinisikan sebagai rasio beban dan lendutan yang dinyatakan dengan :

$$K = \frac{P}{\Delta} \quad (3.44)$$

Tampak bahwa kekakuan berbanding terbalik dengan lendutan. Apabila suatu struktur diberi beban aksial (P) dan lendutan (Δ) yang terjadi diukur maka kekakuan dapat dihitung.

Pada saat pembebanan mencapai beban P_{max} maka akan terjadi momen batas yang menimbulkan mekanisme keruntuhan sehingga penampang ini akan mengalami lendutan (Δ).



Gambar 3.10. Hubungan antara beban (P) dan lendutan (Δ)

Dar

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1}}{2}$$

3.9. Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (Φ)

Faktor kekakuan (EI) didefinisikan sebagai rasio momen dan kelengkungan (*Bruneau dkk, 1978; Beedle, 1958*) yang dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$EI = \frac{M}{\Phi} \dots \dots \dots (3.45)$$

Pemberian beban aksial (P) dari struktur akan didapatkan perpindahan yang diukur pada tiga titik distrik yang berurutan yang dengan jarak yang sama (Δx), dimana tiga titik distrik tersebut diberi notasi y_{i+1} , y_i dan y_{i-1} seperti terlihat pada gambar 3.11 :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(2\Delta y)}{\Delta x^2}$$

dari persamaan (3.48) didapatkan :

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{(\Delta_x)^2} \dots\dots\dots(3.49)$$

dimana nilai $\frac{d^2 y}{dx^2} = \Phi = \frac{M}{EI}$, sehingga persamaan kelengkungan dapat dicari dengan

rumus :

$$\Phi = \frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(3.50)$$

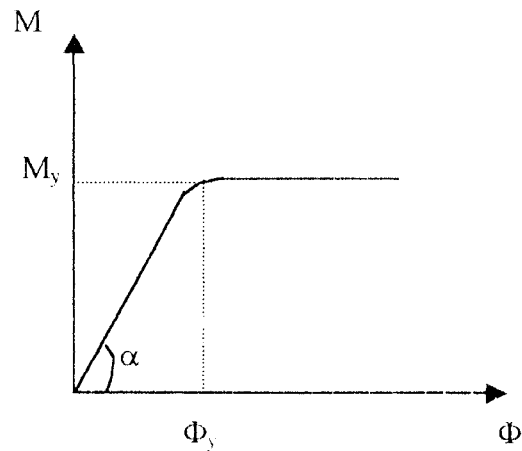
karena $\frac{dy}{dx}$ kecil, maka dengan menggunakan metode *central difference* dianggap

mendekati dengan nol, sehingga didapat kelengkungan dengan rumus :

$$\Phi = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \dots\dots\dots(3.51)$$

Dari persamaan (3.51) maka dapat dicari faktor kekakuan EI setelah momen (M) dan kelengkungan (Φ) diketahui.

Grafik hubungan momen dan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 3.12 sebagai berikut :



Gambar 3.12 Hubungan antara momen (M) dan kelengkungan (Φ)

Gambar 3.12 menunjukkan hubungan antara momen-kelengkungan. Tampak bahwa pada grafik hubungan momen kelengkungan akan membentuk sudut (α), dimana :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{M}{\Phi} \dots\dots\dots (3.51)$$

$$EI = \operatorname{tg} \alpha \dots\dots\dots (3.52)$$

3.10. Hipotesis

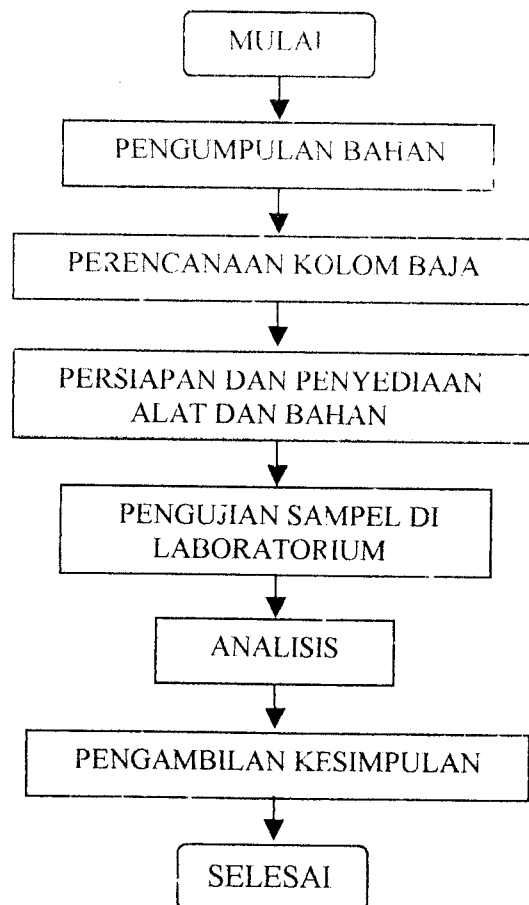
Pembebanan kolom secara eksentris (e) dapat mempengaruhi kapasitas suatu kolom. Semakin besar nilai eksentrisitas maka besarnya beban kritis (P_{cr}) yang dapat diterima oleh suatu kolom semakin kecil.

BAB IV

METODELOGI PENELITIAN

4.1. Metode Penelitian

Metode penelitian adalah urutan pelaksanaan penelitian dalam rangka mencari jawaban atas permasalahan penelitian yang diajukan dalam penulisan tugas akhir. Prosedur penelitian seperti pada flowchart gambar 4.1 dibawah ini :



Gambar 4.1. Flowchart metodologi penelitian

4.2. Bahan dan Peralatan Penelitian

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

4.2.1. Bahan Penelitian

a. Baja profil

Baja profil yang digunakan adalah baja profil C72x40x10x2 mm sebagai kolom tersusun.

b. Batang Perangkai

Batang perangkai melintang menggunakan plat baja dengan tebal (T) 2,3 mm dan tinggi (H) 100 mm.

c. Las

Sambungan las menggunakan kekuatan tarik maksimal.

4.2.2. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

a. Jangka Sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur ketebalan profil dan plat (benda uji).

b. Loading Frame

Alat ini digunakan untuk menempatkan benda uji, pada penelitian ini digunakan Loading Frame dari bahan baja profil WF 450x200x9x14.

c. Hidrolic Jack

Alat ini digunakan untuk memberikan pembebanan pada pengujian kuat tekan kolom dengan beban sentris P yang mempunyai kapasitas maksimum 20 ton dengan ketelitian pembacaan sebesar 0,25 ton.

d. Dial Gauge

Dial gauge digunakan untuk mengukur besarnya lendutan yang terjadi dengan kapasitas lendutan maksimum 50 mm dengan ketelitian pembacaan dial 0.01 mm.

e. Dukungan sendi

f. Mesin Uji Kuat Tarik

Mesin uji kuat tarik digunakan untuk mengetahui kuat tarik baja. Alat yang digunakan adalah *Universal Testing Material* (UTM) merk Shimadzu tipe UMH-30 dengan kapasitas 30 ton.

4.3. Model Benda Uji

Benda uji berupa kolom tersusun profil C bentukan dingin dengan variasi letak eksentrisitas beban terhadap pusat berat dengan panjang kolom (L) sebanyak 5 buah. Panjang kolom, penampang kolom dan jarak antara pusat berat profil adalah sama. Adapun ukuran benda uji adalah :

Tabel 4.1 Ukuran Benda Uji Kolom Tersusun

Benda Uji	Profil C Bentukan Dingin				Plat		L ₁ (mm)	a (mm)	(e) (mm)
	L (mm)	B (mm)	h' (mm)	T (mm)	H (mm)	T (mm)			
I	3000	72	40	2	100	2,3	260	7.2048	0
II	3000	72	40	2	100	2,3	260	7.2048	10
III	3000	72	40	2	100	2,3	260	7.2048	20
IV	3000	72	40	2	100	2,3	260	7.2048	30
V	3000	72	40	2	100	2,3	260	7.2048	40

4.4. Prosedur Penelitian

Tahap – tahap prosedur penelitian adalah sebagai berikut :

1. Tahap perumusan masalah

Tahap ini meliputi perumusan terhadap topik penelitian, perumusan tujuan, dan pembatasan masalah.

2. Tahap perumusan teori

Tahap ini merupakan tahap pengkajian pustaka terhadap teori yang melandasi penelitian serta ketentuan – ketentuan yang dijadikan acuan dalam pelaksanaan penelitian.

3. Tahap pelaksanaan penelitian

a. Pengumpulan bahan

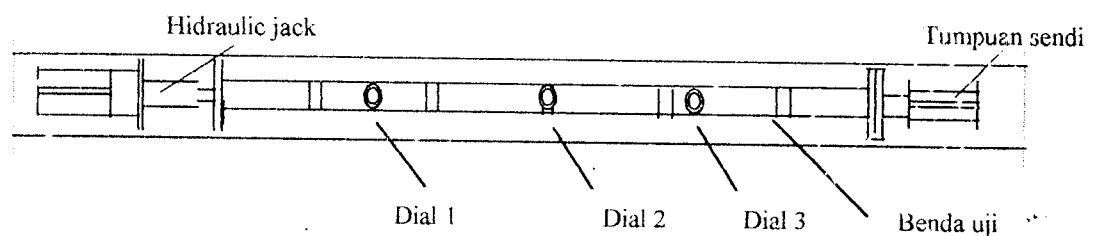
b. Pembuatan benda uji

c. Persiapan peralatan

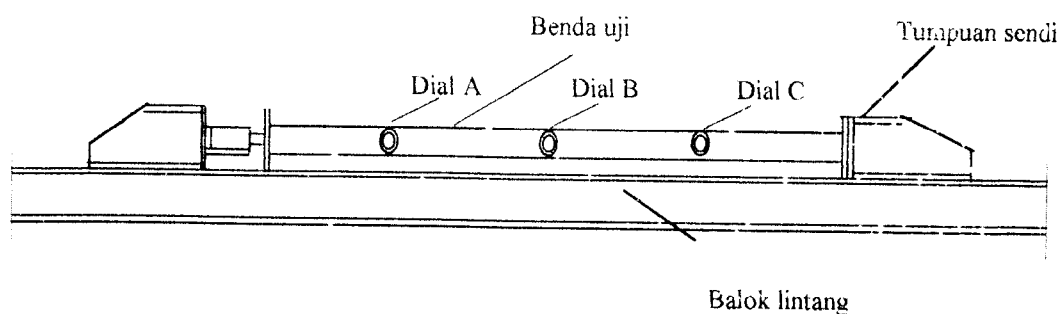
d. Pengujian benda uji di Laboratorium Mekanika Teknik UII

4.5.2. Setting Peralatan

Sebelum pengujian dilaksanakan, terlebih dahulu dilakukan setting terhadap peralatan yang akan dipergunakan sebagai berikut: Benda uji diletakkan diantara dukungan sendi dengan posisi tidur. Perletakan benda uji dengan posisi tidur dikarenakan terbatasnya tinggi dari Loading Frame yang kurang dari 3 meter. Selanjutnya pada salah satu dukungan sendi dipasang Hidrolik Jack. Dial Gauge diletakkan pada dua sisi yaitu bagian badan dan sayap kolom, hal ini dilakukan untuk menjaga tekuk yang terjadi, dimana arah tekuk kolom yang terjadi pada penampang ada kemungkinan yaitu searah sumbu x atau searah sumbu y.



Gambar 4.3 Benda uji tampak atas



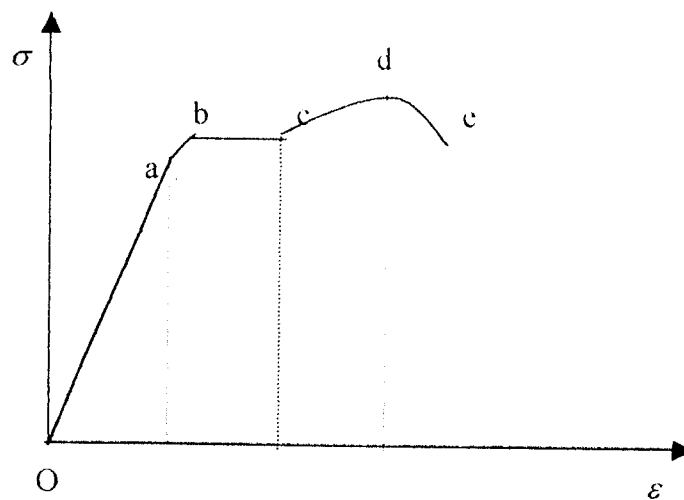
Gambar 4.4 Benda uji tampak samping

4.5.3. Proses Pengujian Kapasitas Kolom Tersusun Akibat Pembebanan Eksentris

Proses pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi beberapa tahap yaitu, pengujian dengan menggunakan *Dial Gauge* yang dilakukan untuk mendapatkan lendutan yang terjadi. Proses pelaksanaan pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan lendutan yang terjadi. Proses pelaksanaan pengujian ini dengan cara memompa Hidraulic Jack untuk pembebanan secara bertahap dengan kelipatan 3,5 kN. Pembacaan lendutan pada *Dial Gauge* dilakukan setiap kenaikan pembebanan 3,5 kN. Proses ini dilakukan berulang kali sampai benda uji mengalami kerusakan akibat tekuk.

4.5.4. Pengujian Kuat Tarik Profil dan Plat

Pengujian kuat tarik dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Data yang diambil pada pengujian tarik adalah beban luluh awal, beban maksimum.

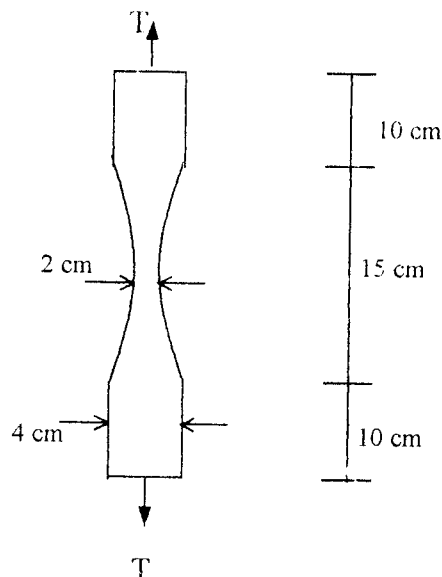


Gambar 4.5. Diagram Tegangan – Regangan baja struktural

Hubungan antara tegangan dan regangan pada 0-a linier, sedang diatas titik a diagram tidak linier lagi, sehingga titik a disebut sebagai batas sebanding (tegangan batas sebanding F_p), sedikit diatas titik a merupakan batas elastis bahan, pada titik b baja mulai leleh, titik b disebut tegangan leleh. Pada umumnya tegangan di titik a dan di titik b relatif cukup dekat, sehingga seringkali kedua tegangan itu dianggap sama yaitu sebesar σ_b . Pada saat leleh baja masih mampu menghasilkan gaya perlawanan sampai terjadi pengerasan regangan yaitu pada titik c, kurva akan naik lagi sampai dicapai kuat tarik (*tensile strength*) di titik e.

Benda uji yang akan digunakan dalam penelitian dibuat terlebih dahulu kemudian diuji di laboratorium, benda uji tersebut berupa :

- Dua benda uji kuat tarik baja yang diambil dari profil C, dengan tebal 2 mm
- Dua benda uji kuat tarik baja yang diambil dari kuat tarik plat, dengan tebal plat 2,3 mm.



Gambar 4.6. Benda uji untuk uji kuat tarik

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Uji Kuat Material Profil C dan Plat

Hasil uji pendahuluan meliputi dimensi benda uji, beban leleh (P_y), dan beban maksimum atau beban ultimit (P_u). Hasil uji pendahuluan digunakan untuk menentukan tegangan leleh (F_y) dan tegangan ultimit (F_u).

Pelaksanaan pengujian kuat tarik profil C dan Plat dilakukan di laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Fakultas Sipil dan perencanaan Universitas Islam Indonesia. Dari hasil pengujian kuat tarik didapat hasil pada tabel 5.1 sebagai berikut :

Tabel 5.1. Hasil Pengujian Kuat Tarik Bahan

Benda Uji	Beban Leleh (P_y) (kN)	Beban Ulitimit(P_u) (kN)
Sampel 1 Profil C	10,80	11,50
Sampel 2 Profil C	8,95	9,20
Sampel 1 Plat	12,55	14,20
Sampel 2 Plat	12,30	14,75

5.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Kolom Tersusun

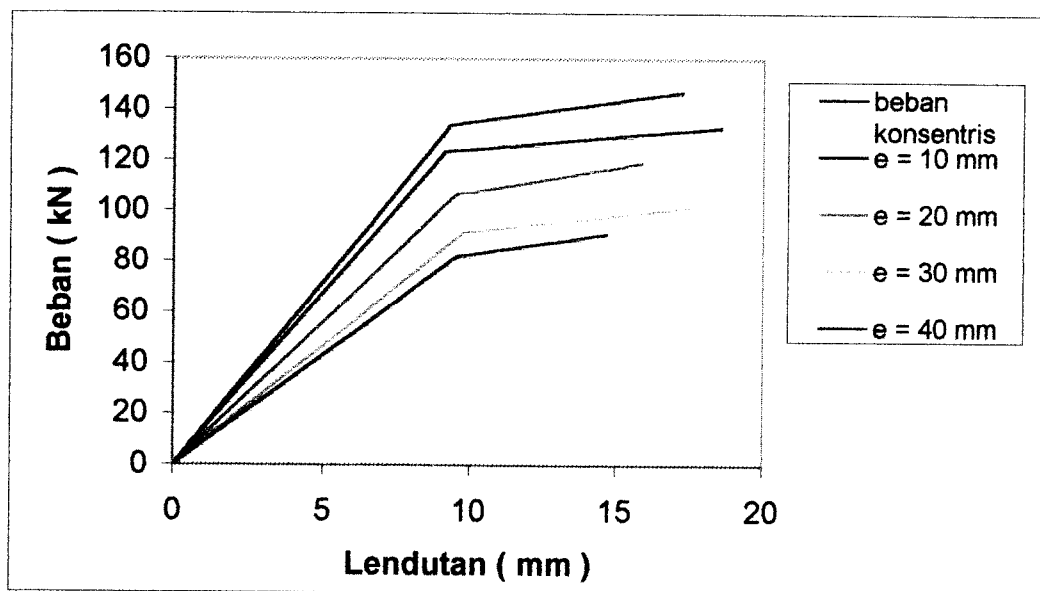
Pengujian kuat tekan kolom tersusun dilakukan dengan menggunakan alat dukungan Loading Frame dan alat pembebanan Hidraulic Jack di Laboratorium

Bahan Konstruksi Teknik Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Struktur dibebani beban aksial sentris secara bertahap dengan kenaikan sebesar 3,5 kN, pada setiap tahap pembebanan dicatat lendutan yang terjadi. Hasil yang didapatkan dari pengujian berupa besarnya beban yang bekerja dan defleksi

5.2.1. Hubungan Beban Lendutan (P - Δ) Hasil Penelitian

Pengujian kuat tekan kolom tersusun diberikan beban aksial eksentris secara bertahap dengan kenaikan sebesar 3,5 kN, kemudian pada setiap tahap pembebanan besarnya pembebanan dan lendutan dicatat. Pencatatan besarnya lendutan yang terjadi dilakukan pada pembacaan masing – masing dial gauge yang dipasang dengan jarak tiap 750 mm pada masing – masing benda uji. Hasil pengujian dapat dilihat pada lampiran 2.

Dari hasil penelitian kelima benda uji dapat dibuat grafik regresi hubungan beban – lendutan seperti pada gambar 5.1.



Gambar 5.1. Grafik Regresi Hubungan Beban – Lendutan Kelima Benda Uji

5.2.2. Analisis Data Hubungan Beban- Lendutan ($P-\Delta$) Hasil Penelitian

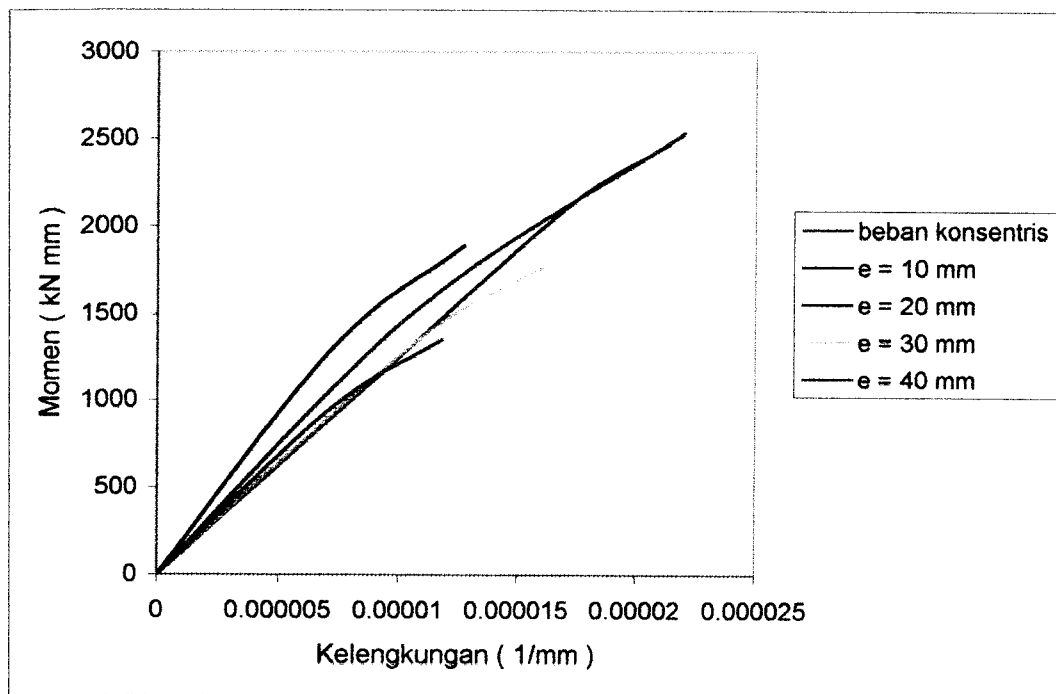
Data hasil pengamatan grafik hubungan beban-lendutan kelima benda uji seperti gambar 5.1 dapat disimpulkan tentang kekakuan kolom tersusun dari profil C bentukan dingin dengan variasi letak eksentrisitas beban terhadap pusat berat profil dalam tabel 5.2.

Tabel 5.2. Analisis Kekakuan dari Hubungan Beban-Lendutan

Benda Uji	Beban Maks (P_{max}) (kN)	Lendutan (Δ) (mm)	Kekakuan (P/Δ) (kN/mm)
$e = 0$ mm	133,8198	9,324	14,352
$e = 10$ mm	123,3063	9,139	13,491
$e = 20$ mm	106,1483	9,495	11,179
$e = 30$ mm	91,4369	9,756	9,372
$e = 40$ mm	81,9333	9,524	8,603

5.2.3. Hubungan Momen – Kelengkungan ($M-\Phi$) Hasil Pengujian

Data hasil pengujian diperoleh grafik hubungan beban-lendutan ($P-\Delta$) sehingga dapat dicari momen (M) kelengkungan (Φ). Dari gambar grafik hubungan momen-kelengkungan keempat benda uji pada gambar 5.6 dapat digunakan untuk mencari faktor kekakuan (EI).



Grafik 5.2. Hubungan Momen Kelengkungan Kelima Benda Uji

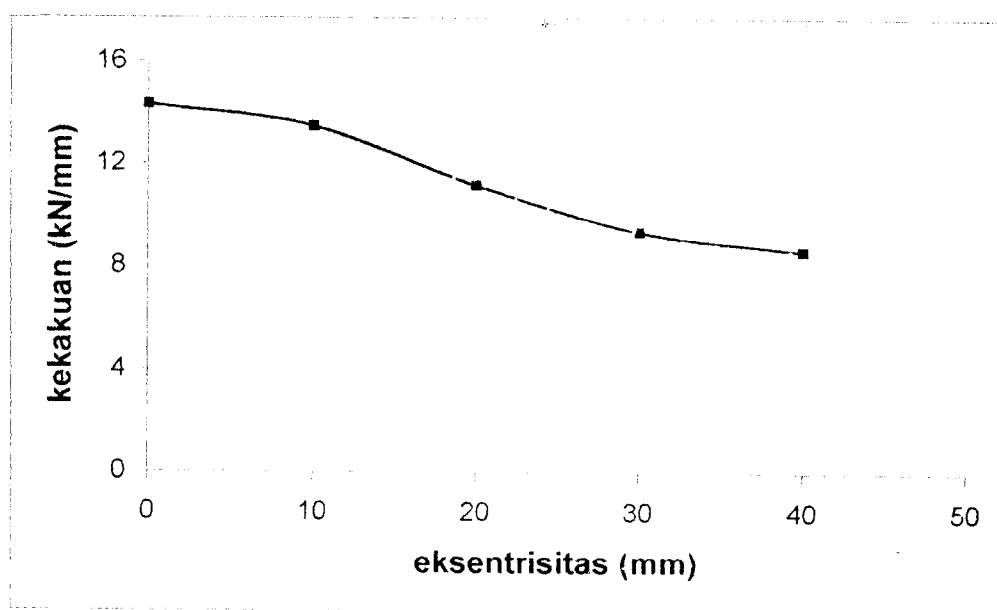
5.2.4. Analisis Data Hubungan Momen-Kelengkungan ($M-\Phi$) Hasil Pengujian

Hasil pengamatan grafik hubungan momen-kelengkungan pada Gambar 5.2 dapat dicari faktor kekakuan kolom tersusun dari profil C bentukan dengan variasi jarak eksentrisitas beban terhadap pusat berat profil seperti pada tabel 5.3.

Tabel 5.3 Analisis Faktor Kekakuan dari Hubungan Momen – Kelengkungan

Benda Uji	Momen (M) (kN mm)	Kelengkungan (Φ) (1/mm)	EI = M/Φ (kN mm ²)
E = 0 mm	1491,945	0,0000105	142.090.000
e = 10 mm	2050,000	0,0000166	123.493.975,9
e = 20 mm	1312,960	0,0000073	181.011.397
e = 30 mm	1332,800	0,0000107	124.560.747,7
e = 40 mm	945,840	0,00000071	132.674.989,5

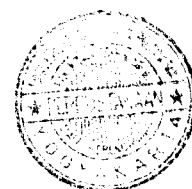
mempunyai kekakuan sebesar 14,352 kN/mm, benda uji kedua dengan ($e = 10$ mm) mempunyai kekakuan sebesar 13,491 kN/mm, benda uji ketiga dengan ($e = 30$ mm) mempunyai kekakuan sebesar 11,179 kN/mm, benda uji keempat dengan ($e = 40$ mm) mempunyai kekakuan sebesar 9,372 kN/mm, dan benda uji kelima dengan ($e = 50$ mm) mempunyai kekakuan sebesar 8,603 kN/mm. Hubungan antara kekakuan dengan eksentrisitas dapat dilihat pada gambar 5.3 sebagai berikut :



Gambar 5.3. Grafik hubungan eksentrisitas (e) dengan kekakuan

5.3.3. Hubungan Beban Kritis (P) dengan Eksentrisitas (e)

Dari grafik hubungan beban lendutan hasil pengujian kuat tekan kolom tersusun dengan variasi letak beban terhadap pusat beratnya pada kelima benda uji seperti terlihat pada gambar 5.3. terlihat bahwa semakin besar nilai eksentrisitas beban terhadap pusat beratnya maka semakin kecil kemampuan kolom menahan beban.



5.3.4. Hubungan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ dengan $\left(\frac{e}{d}\right)$

Dari data hubungan beban (P) dengan eksentrisitas beban (e) pada tabel 5.2 dapat dibuat hubungan antara $\left(\frac{e}{d}\right)$ dengan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$. Dimana d merupakan lebar dari penampang (100 mm) dan P_y merupakan beban leleh dari kolom. Beban leleh (P_y) dicari dengan menggunakan rumus :

$$P_y = F_y \times A$$

Dimana F_y adalah hasil uji tegangan leleh baja = 243,125 MPa,

dan A = Luas Penampang = 656 mm².

$$P_y = 243,125 \times 656$$

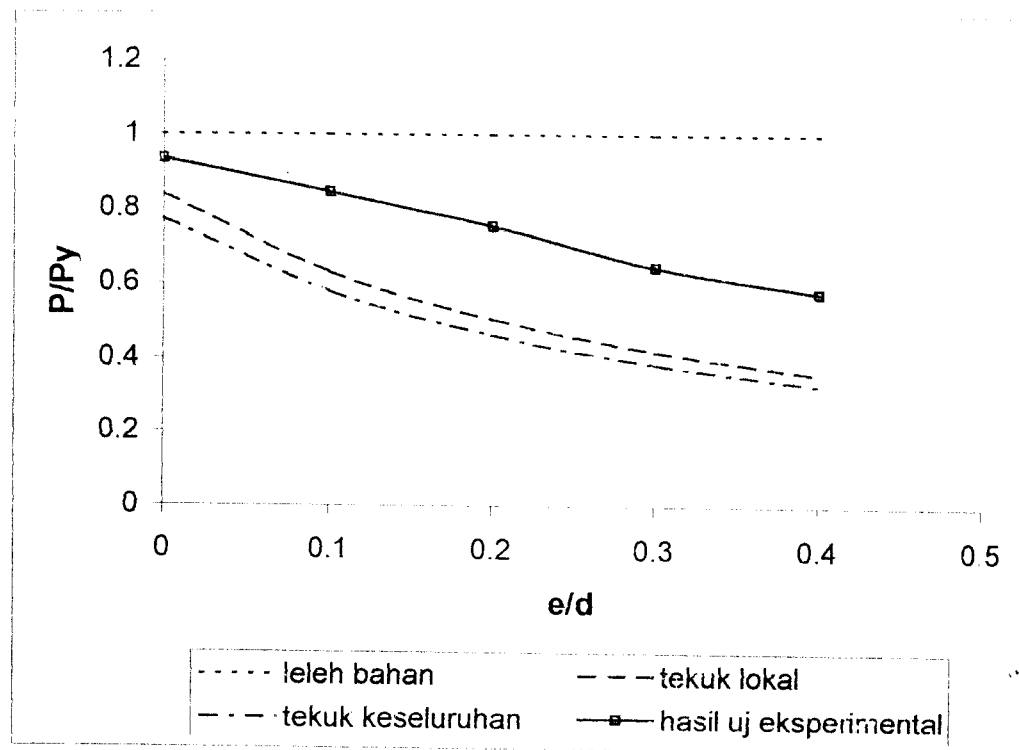
$$P_y = 159490 \text{ N} = 159,49 \text{ kN}$$

Hasil perhitungan $\left(\frac{e}{d}\right)$ dengan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ untuk masing -- masing kolom ditampilkan pada tabel 5.5.

Tabel 5.5. Perhitungan $\left(\frac{e}{d}\right)$ dengan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ dari hasil pengujian kolom tersusun

Benda Uji	Beban Kritis (P_{cr}) (kN)	$\frac{e}{d}$	$\frac{P}{P_y}$
e = 0 mm	147	0,0	0,9216879
e = 10 mm	133	0,1	0,8339081
e = 20 mm	119	0,2	0,7461283
e = 30 mm	101,5	0,3	0,6364035
e = 40 mm	91	0,4	0,5705687

Tabel 5.5 dapat ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan $\left(\frac{e}{d}\right)$ dengan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ seperti pada gambar 5.5.



Gambar 5.5. Grafik Hubungan $\left(\frac{e}{d}\right)$ dengan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$

Pada gambar 5.5 terlihat bahwa untuk eksentrisitas 0,1d; 0,2d 0,3d dan 0,4d kapasitas kolom tersusun menjadi sebesar 90,46 % ; 80,91 %; 68,98 % dan 61,82 % dari kapasitas kolom (P_{cr}) yang menerima beban sentris

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang diuraikan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan tentang kuat tekan kolom tersusun dari profil C bentukan dingin dengan variasi eksentrisitas beban (e), panjang kolom dan jarak pusat berat kedua profil (a) konstan adalah sebagai berikut :

1. Semakin besar eksentrisitas maka beban kritis kolom (P_{cr}) akan semakin kecil dibandingkan dengan kolom yang menerima beban konsentris. Untuk eksentrisitas $0,1d$, $0,2d$, $0,3d$ dan $0,4d$ kapasitas kolom menjadi sebesar 90,46 % ; 80,91 %; 68,98 % dan 61,82 % dari kapasitas kolom (P_{cr}) yang menerima beban sentris.
2. Semakin besar jarak eksentrisitas beban maka nilai kekakuan semakin kecil, kekakuan paling besar pada benda uji 1 (beban konsentris) sebesar 14,352 kN/mm, sedangkan untuk $e = 10$ mm, 20 mm, 30 mm, dan 40 mm kekakuan kolom masing-masing sebesar 13,491 kN/mm, 11,179 kN/mm, 9,372 kN/mm , dan 8,603 kN/mm .

3. Semakin besar jarak eksentrisitas beban maka faktor kekakuan semakin kecil, faktor kekakuan paling besar adalah $142.090.000 \text{ kN.m}^2$ untuk kolom yang menerima beban konsentris.
4. Semakin besar nilai $\frac{e}{d}$, maka $\frac{P}{P_y}$ akan semakin kecil. Untuk benda uji dengan eksentrisitas $0d$ (beban konsentris); $0,1d$; $0,2d$; $0,3d$; dan $0,4d$ maka besarnya P/P_y untuk masing-masing adalah $0,922$; $0,834$; $0,746$; $0,636$ dan $0,571$.
5. Kegagalan pada kelima benda uji berupa tekuk lokal. Pada benda uji 1, 2, 4 dan 5 kerusakan pada badan, dan pada benda uji 3 kerusakannya pada sayap.

6.2. Saran

Pada penelitian ini masih banyak kekurangan, banyak hal yang masih bisa diteliti lebih lanjut. Kekurangan yang perlu diperhatikan pada penelitian eksperimental lebih lanjut tentang kuat tekan kolom tersusun dari profil C bentukan dingin dengan nilai eksentrisitas beban adalah :

1. Perlu diadakan penelitian untuk kolom tersusun dengan nilai eksentrisitas beban tetap, variasi pada kelangsingan kolom (kl/r).
2. Perlu diadakan penelitian untuk kolom tersusun dari profil C yang disusun secara back to back dengan beban eksentris.
3. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut tentang kolom tersusun dengan batang perangkai diagonal atau gabungan yang menerima beban eksentris.

4. Proses penyetingan alat perlu diperhatikan, guna mendapatkan hasil penelitian yang maksimal dengan keterbatasan alat yang ada.
5. Ketelitian pembacaan dial gauge, terutama pada saat pembebanan sudah mencapai beban maksimum atau beban kritis guna mendapatkan data lendutan yang lebih akurat.
6. Perlu diadakan penelitian tentang koefisien tekuk plat untuk profil C.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus Kiswanto, 2003, *Kuat Tekan Kolom Tersusun dari Profil C Bentukkan Dingin dengan Variasi Jarak Batang Perangkai Melintang (Plat Kopel)*, Tugas Akhir JTS Fakultas Teknik Sipil UMY, Yogyakarta.
- Gere And Timoshenko, 2000, *Mekanika Bahan*, Penerbit Erlangga Jakarta.
- Jensen/Chenoweth, 1983, *Kekuatan Bahan Terapan*, Edisi kedua, Erlangga Jakarta.
- PADOSBAJAYO, 1991, *Bahan Kuliah Pengetahuan Dasar Struktur Baja*, PADOSBAJAYO, Yogyakarta.
- POPOV E.P, 1983, *Mekanika Teknik*, Erlangga Jakarta.
- Salmon Charles G, dan Johnson John E, 1994, *Struktur Baja Disain dan Perilaku 1*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Salmon Charles G, dan Johnson John E, 1994, *Struktur Baja Disain dan Perilaku 2*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Schodek Daniel L, 1998, *STRUKTUR*, PT Refika Aditama, Bandung.
- Singer Ferdinand L, dan Pytel Andrew, 1995, *Ilmu Kekuatan Bahan*, Edisi kedua, Erlangga Jakarta.
- Spiegel L, And Limburnner, G.F., 1991, *Desain Baja Struktural Terapan*, PT Eresco, Bndung.



FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
JL. KALIJURANG KM.14.4 TELP. 895042
EMAIL: FTSP.UH.AC.ID JOGIAKARTA KODE POS 55584

FM-UII-AA-FPL-09

KARTU PESERTA TUGAS AKHIR

NO.	NAMA	NO. MHS.	BID. STUDI
1	Shuyam Puspitasari	99 511 119	Teknik Sipil
2	Mugivati	99 511 435	

JUDUL TUGAS AKHIR :

Pengaruh Pembebanan Eksentris Pada Kapasitas Kolom Tersusun

PERIODE IV : JUNI - NOPEMBER
TAHUN : 2003 - 2004

No.	Kegiatan	Bulan Ke :					
		Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nop.
1.	Pendaftaran						
2.	Penentuan Dosen Pembimbing						
3.	Pembuatan Proposal						
4.	Seminar Proposal						
5.	Konsultasi Penyusunan TA.						
6.	Sidang-Sidang						
7.	Pendadaran.						

DOSEN PEMBIMBING I
DOSEN PEMBIMBING II

: Suharyatno, Ir, H, MT.....
: Fatkhurrohman N, Ir, MT..



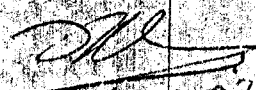
Yogyakarta, 06 Oct 03.....
a.n. Dekan,

(.....Ir. H. Munachir, M.P.....)

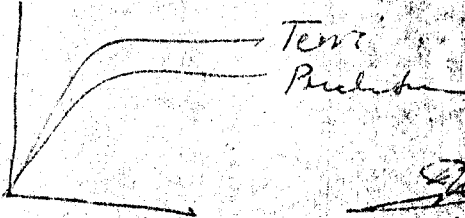
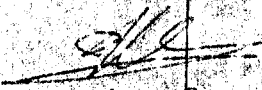
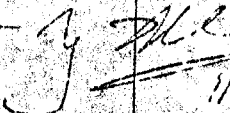
Catatan.

Seminar :
Sidang :
Pendadaran :

CATATAN KONSULTASI TUGAS AKHIR

NO	TANGGAL	CATATAN KONSULTASI	TANDA TANGAN
		<p>ft bilakas land teori mengemb hal yg merangkai sketsa - Tugan → pusta yg vianaris - Car. ferr, uraian bresenris - bsd + 17. profil; dersi don dpt → hufwos</p>	 12/10-2003
	20/10/03	<p>Perbaiki landasan teori turpitoris → di keruk dari Analisa Nener oxe</p>	 20/10-2003
	30/10/03	<p>diapli Seurita Hsil poulit wupin fawb app hufwos</p>	 31/10-2003
	15/11/03	<p>tulis & vrentri e → fca Laigutle - profil (kals 908)</p>	 17/10-2004
		<p>tugur → kesugur $\begin{matrix} 5 \times \\ 4 \times \end{matrix}$ $\begin{matrix} 5 \times ? \\ 4 \times ? \end{matrix}$ lumen kor</p>	 17/10-2004
	19/11/04	<p>R = 2</p>	 25/10-2004

CATATAN KONSULTASI TUGAS AKHIR

NO	TANGGAL	CATATAN KONSULTASI	TANDA TANGAN
	26/1/04	Lanjutan a/b	
	29/1/04	Acc biapha Sidang/b	
		 <p align="right">  14/2-2004 </p>	
		Cat & bed Postab — — — — — Tension Tensi	 11/03-2004
		Disentha ke BP Rikardarjuna 107 Proxim parea padeana Deyabahu Cuking	 23/02-2004

LAMPIRAN 1

PERENCANAAN KOLOM TERSUSUN

**KUAT TEKAN KOLOM TERSUSUN PROFIL C BENTUKAN DINGIN
DENGAN VARIASI LETAK EKSENTRISITAS BEBAN TERHADAP PUSAT
BERAT PENAMPANG**

A. Data Perencanaan Benda Uji

Ketentuan-ketentuan dalam perencanaan kolom tersusun pada kelima benda uji untuk penelitian pengujian kuat tekan, adalah sebagai berikut :

1. Profil baja yang digunakan untuk perencanaan kolom tersusun adalah profil baja C bentukan dingin 2 (72 x 40 x 10 x 2) mm dengan panjang 3000 mm dan plat baja ukuran (100 x 2,3) mm.
2. Variasi pada kelima benda uji terletak pada variasi jarak eksentrisitas beban terhadap pusat berat profil gabungan, dimana panjang kolom (L) dan penampang profil gabungan adalah konstan. Variasi jarak eksentrisitas beban untuk tiap benda uji adalah :
 - a. Benda uji I dengan eksentrisitas beban = 0 mm dari pusat berat penampang profil gabungan.
 - b. Benda uji II dengan eksentrisitas beban = 10 mm dari pusat berat penampang profil gabungan.
 - c. Benda uji III dengan eksentrisitas beban = 20 mm dari pusat berat penampang profil gabungan.
 - d. Benda uji IV dengan eksentrisitas beban = 30 mm dari pusat berat penampang profil gabungan.
 - e. Benda uji V dengan eksentrisitas beban = 40 mm dari pusat berat penampang profil gabungan.
3. Perletakan dukungan berupa sendi di kedua ujungnya.
4. Pengujian menggunakan pembebanan aksial desak eksentris dan bekerja secara bertahap.

$$Y_a = Y_b$$

$$Y_a = \frac{72}{2} = 36 \text{ mm}$$

$$X_a = \frac{Q_y}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n \Delta A_i}$$

$$\begin{aligned} X_a &= \frac{(38.2)21 + (72.2)1 + (38.2)21 + (8.2)39 + (8.2)39}{(38.2)2 + (72.2)1 + (8.2)2} \\ &= \frac{4584}{328} = 13,976 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_b &= 40 - X_a \\ &= 40 - 13,976 = 26,024 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. Perhitungan Momen Inersia

a. Momen Inersia terhadap sumbu y – y

$$I_y = \left(\frac{1}{12} \cdot b^3 \cdot h \right) + \left[A \cdot (\text{jarak titik berat ke pusat penampang})^2 \right]$$

$$\begin{aligned} I_{y1} &= \left(\frac{1}{12} \cdot 38^3 \cdot 2 \right) + \left[38 \cdot 2 \left(26,024 - \frac{38}{2} \right)^2 \right] \\ &= 12.894,913 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{y2} &= \left(\frac{1}{12} \cdot 2^3 \cdot 72 \right) + \left[2 \cdot 72 \cdot \left(13,976 - \frac{2}{2} \right)^2 \right] \\ &= 24.294,227 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{y3} &= \left(\frac{1}{12} \cdot 38^3 \cdot 2 \right) + \left[38 \cdot 2 \left(26,024 - \frac{38}{2} \right)^2 \right] \\ &= 12.894,913 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{y4} &= \left(\frac{1}{12} \cdot 2^3 \cdot 8 \right) + \left[2 \cdot 8 \cdot \left(26,024 - \frac{2}{2} \right)^2 \right] \\ &= 10.024,543 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$r_x = \sqrt{\frac{I_{x \text{ total}}}{A}} = \sqrt{\frac{281.397,332}{328}} = 29,2902 \text{ mm}$$

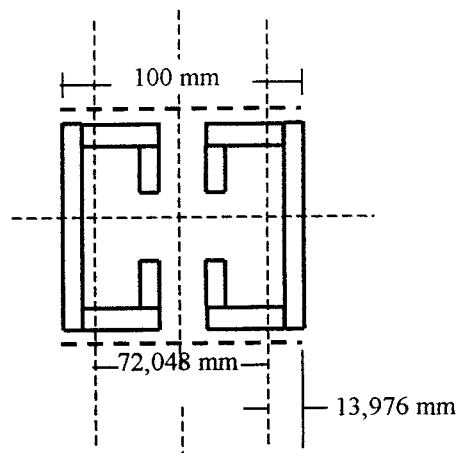
C. Perencanaan Batang Tersusun

Dengan mengacu pada peraturan Jerman bila jarak antar pusat berat kedua profil (a) lebih besar dari tinggi profil, maka kekuatan plat kopel beserta pelengkapanya tinggal 80%.

Karena itu supaya tidak mengalami reduksi menjadi 80%, maka jarak pusat berat kedua profil dibuat = tinggi profil (72 mm).

$$x - 2 \cdot 13,976 = 72 \longrightarrow x = 72 + 27,952, \text{ maka } x = 99,952 = 100 \text{ mm}$$

$$a = x - 27,952 = 72,048 \text{ mm}$$



Gambar L1.2 Jarak Pusat Berat Kedua Profil

1. Perhitungan Inersia Batang Tersusun

a. Momen Inersia terhadap sumbu y-y

$$I_y = 2 \left[70133,139 + \left\{ 328 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 72,048 \right)^2 \right\} \right]$$

$$= 991.576,2239 \text{ mm}^4$$

2. Syarat $\lambda_x \geq 1,2 \cdot \lambda_1$

$$\lambda_x = \frac{L_{ex}}{r_x} = \frac{(1) \cdot (3000)}{29,2902} = 102,4233$$

$$1,2 \cdot \lambda_1 = 1,2 \cdot 17,781 = 21,3372 < \lambda_x = 102,4223 \quad (\text{ok})$$

3. Syarat $\lambda_{iy} \geq 1,2 \cdot \lambda_1$

Kelangsingan idiil pada arah tegak lurus sumbu bebas bahan y-y (λ_{iy})

$$\lambda_{iy} = \sqrt{\lambda_y^2 + \frac{m}{2} \lambda_1^2} \geq 1,2 \cdot \lambda_1$$

$$\lambda_y = \frac{L_{ey}}{r_y} = \frac{(1) \cdot (3000)}{38,8786} = 77,1633$$

$$\lambda_1 = \frac{260}{14,6226} = 17,781$$

$$\lambda_{iy} = \sqrt{77,1633^2 + \frac{2}{2} \cdot 17,781^2} = 79,1855$$

$$1,2 \cdot \lambda_1 = 1,2 \cdot 17,781 = 21,3372 < \lambda_{iy} = 79,1855 \quad (\text{ok})$$

LAMPIRAN 2
PERHITUNGAN TEORITIS KAPASITAS
KOLOM TERSUSUN AKIBAT
PEMBEBANAN EKSENTRIS

$$P = \frac{P_{\max}}{\left(\frac{1}{A} + \frac{e \cdot C_x}{I_y} \right)}$$

Contoh Perhitungan untuk benda uji 2 :

dengan nilai $e = 10 \text{ mm}$, $C_x = 50 \text{ mm}$, $A = 656 \text{ mm}^2$ dan $I_y = 991.576,2239 \text{ mm}^4$

$$P = \frac{0,1852}{\left(\frac{1}{656} + \frac{10 \cdot 50}{991.576,2239} \right)}$$

$$P = 91,2926 \text{ kN}$$

Dengan cara yang sama akan didapat besarnya beban kritis untuk masing-masing benda uji sebagai berikut :

Tabel L2.1 Hasil Perhitungan Teoritis Beban kritis pada saat Tekuk Keseluruhan

Benda uji	Beban Kritis (kN)
$e = 0 \text{ mm}$	121,4915
$e = 10 \text{ mm}$	91,2926
$e = 20 \text{ mm}$	73,1178
$e = 30 \text{ mm}$	60,9782
$e = 40 \text{ mm}$	52,2956

B. Perhitungan Tegangan Bahan Kolom Tersusun Dari Profil C

Profil yang digunakan untuk kelima benda uji sama, yaitu profil C bentukan dingin (72 x 40 x 10 x 2)mm.

C. Hubungan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ dengan $\left(\frac{e}{d}\right)$ Teoritis

Dari data hubungan beban (P) dengan eksentrisitas beban (e) diatas dapat dibuat hubungan antara $\left(\frac{e}{d}\right)$ dengan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$. Dimana h merupakan lebar dari penampang (100 mm) dan P_y merupakan beban leleh dari kolom. Beban leleh (P_y) dicari dengan menggunakan rumus :

$$P_y = F_y \times A$$

Dimana Tegangan leleh (F_y) baja = 240 Mpa = 0,24 KN/mm²

dan A= Luas Penampang = 656 mm².

$$P_y = 0,24 \times 656$$

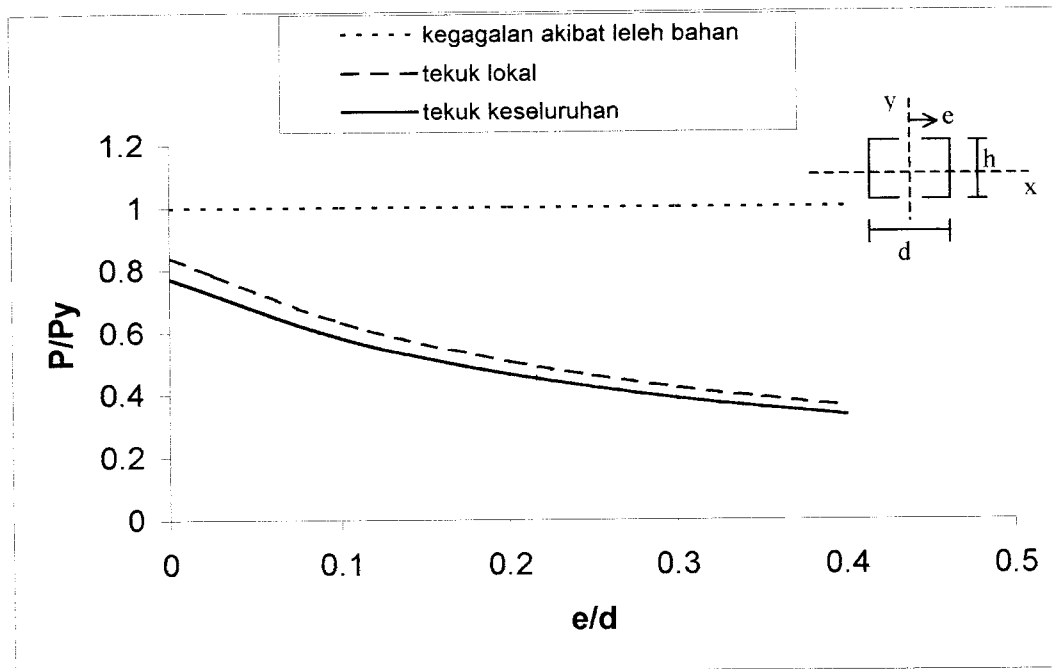
$$P_y = 157,44 \text{ KN}$$

Hasil perhitungan $\frac{e}{d}$ dengan $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ untuk masing – masing kolom ditampilkan pada tabel L2.3

Tabel L2.3. Perhitungan Teoritis $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ dengan $\left(\frac{e}{d}\right)$

Benda uji	$\frac{e}{h}$	$\frac{P}{P_y}$ tekuk keseluruhan	$\frac{P}{P_y}$ tekuk lokal
e = 0 mm	0	0,7716	0,8402
e = 10 mm	0,1	0,5799	0,6313
e = 20 mm	0,2	0,4644	0,5056
e = 30 mm	0,3	0,3873	0,4217
e = 40 mm	0,4	0,3321	0,3615

Dari tabel L2.3 dapat dibuat grafik hubungan antara $\left(\frac{P}{P_y}\right)$ dengan $\left(\frac{e}{d}\right)$ sebagai berikut :



Gambar L2.1. Grafik hubungan antara P/P_y dan e/h

D. Perbandingan Beban Kritis (P) Hasil Pengujian dengan Teoritis

Perbandingan beban kritis hasil pengujian dengan beban kritis teoritis dapat ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik berikut ini :

Tabel L2.4 Perbandingan Beban kritis hasil lapangan dengan teoritis

Benda uji	Pcr penelitian (kN)	Pcr tekuk keseluruhan (kN)	Pcr tekuk lokal (kN)
$e = 0 \text{ mm}$	147	121,4915	132,2907
$e = 10 \text{ mm}$	133	91,2926	99,4074
$e = 20 \text{ mm}$	119	73,1178	79,6171
$e = 30 \text{ mm}$	101,5	60,9782	66,3984
$e = 40 \text{ mm}$	91	52,2956	56,9440

LAMPIRAN 3

TABEL DAN GRAFIK HASIL PENELITIAN

UJI PENDAHULUAN

1. Hasil Pengujian Tegangan Leleh dan Tegangan Ultimit Profil C

a. Sampel I

Beban Leleh = 10500 N

Beban maksimum = 11500 N

Perhitungan

Lebar (l) = 20 mm

Tebal (t) = 2 mm

$$\begin{aligned}\text{Tegangan leleh baja (Fy)} &= \frac{P_y}{A_o} \\ &= \frac{10500}{40} = 262,5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan ultimit baja (Fu)} &= \frac{P_u}{A_o} = \frac{10800}{40} \\ &= 287,5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

b. Sampel II

Beban Leleh = 8950 N

Beban maksimum = 9200 N

Perhitungan

Lebar (l) = 20 mm

$$= \frac{14200}{46}$$

$$= 308,696 \text{ MPa}$$

a. Sampel II

Beban leleh 12300 N

Beban maksimum = 14750 N

Perhitungan

Lebar (l) = 20 mm

Tebal (t) = 2,3 mm

$A_0 = l \times t = 46 \text{ mm}^2$

$$\text{Tegangan leleh baja (Fy)} = \frac{P_y}{A_0}$$

$$= \frac{12300}{46} = 267,3913 \text{ MPa}$$

$$\text{Tegangan ultimit baja (Fu)} = \frac{P_u}{A_0}$$

$$= \frac{14750}{46} = 320,652 \text{ MPa}$$

Tabel L3.1 Hasil Pengujian Kuat Tarik Bahan

Jenis Pengujian	Sampel I (MPa)	Sampel II (MPa)	Fy rata – rata (MPa)
Tegangan leleh profil C	262,500	223,750	243,125
Tegangan leleh plat	272,826	267,391	270,109

Tabel L3.2 Hasil Pengujian Tegangan Ultimit Bahan

Jenis Pengujian	Sampel I (MPa)	Sampel II (MPa)	Fy rata – rata (MPa)
Tegangan ultimit profil C	287,500	230,000	258,750
Tegangan ultimit plat	308,696	320,652	314,674

Tabel Beban Lendutan Benda Uji 1 ($e = 0$ mm)

No	Beban (kN)	Dial A (mm)	Dial B (mm)	Dial C (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00
2	3.5	0.21	0.255	0.175
3	7	0.40	0.50	0.278
4	10.5	0.42	0.66	0.545
5	14	0.535	0.825	0.67
6	17.5	0.68	1.00	0.86
7	21	1.10	1.37	1.00
8	24.5	1.16	1.66	1.35
9	28	1.20	2.06	1.50
10	31.5	1.55	2.155	1.70
11	35	1.91	2.35	1.75
12	38.5	1.99	2.69	2.15
13	42	2.16	2.90	2.30
14	45.5	2.34	3.11	2.46
15	49	2.555	3.38	2.62
16	52.5	2.745	3.60	2.81
17	56	3.06	3.84	2.995
18	59.5	3.09	4.00	3.13
19	63	3.29	4.26	3.31
20	73.5	3.84	4.92	3.61
21	84	4.03	4.99	3.77
22	94.5	4.575	5.66	3.98
23	105	5.24	6.52	4.60
24	115.5	6.21	6.80	5.515
25	126	7.28	9.21	6.50
26	136.5	8.86	10.93	7.90
27	147	11.2	17.23	10.86

Hubungan Beban Lendutan Benda Uji 2 ($c = 10 \text{ mm}$)

No	Beban (kN)	Dial A (mm)	Dial B (mm)	Dial C (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00
2	3.5	0.09	0.29	0.07
3	7	0.15	0.513	0.12
4	10.5	0.28	0.93	0.19
5	14	0.59	1.32	0.39
6	17.5	0.88	1.75	0.68
7	21	1.03	1.90	0.79
8	24.5	1.17	2.03	0.904
9	28	1.36	2.23	1.109
10	31.5	1.56	2.76	1.40
11	35	1.75	2.91	1.465
12	38.5	1.85	3.15	1.76
13	42	1.98	3.29	1.86
14	45.5	2.08	3.58	1.96
15	49	2.19	3.88	2.00
16	52.5	2.39	4.035	2.14
17	56	2.58	4.10	2.245
18	59.5	2.70	4.63	2.56
19	63	2.90	4.98	2.785
20	66.5	2.96	5.12	2.80
21	70	3.02	5.26	2.86
22	73.5	3.15	5.61	3.02
23	77	3.35	5.96	3.16
24	80.5	3.46	6.10	3.40
25	84	3.68	6.54	3.49
26	87.5	3.86	6.82	3.68
27	91	3.98	7.08	3.80
28	94.5	4.06	7.35	3.92
29	98	4.21	7.46	4.09
30	101.5	4.39	7.69	4.12
31	105	4.56	7.89	4.36
32	108.5	4.62	7.90	4.44
33	112	4.73	8.03	4.50
34	115.5	4.98	8.39	4.82
35	119	5.00	8.45	4.86
36	122.5	5.05	8.53	5.00
37	126	6.89	11.98	6.80
38	129.5	8.21	14.12	8.00
39	133	13.45	18.56	12.42

Hubungan Momen – Kelengkungan Benda Uji 2 (e = 10 mm)

No	Beban (kN)	Dial A (mm)	Dial B (mm)	Dial C (mm)	Momen (M) $P * \Delta$ (kN.mm)	Kelengkungan (1/ cm) $\frac{(y_1 - 2y_2 + y_3)}{\Delta^2}$
1	0	0.00	0.00	0.00	0	0
2	3.5	0.09	0.29	0.07	1.015	7.47E-07
3	7	0.15	0.513	0.12	3.591	1.34E-06
4	10.5	0.28	0.93	0.19	9.765	2.47E-06
5	14	0.59	1.32	0.39	18.48	2.95E-06
6	17.5	0.88	1.75	0.68	30.625	3.45E-06
7	21	1.03	1.90	0.79	39.9	3.52E-06
8	24.5	1.17	2.03	0.904	49.735	3.53E-06
9	28	1.36	2.23	1.109	62.44	3.54E-06
10	31.5	1.56	2.76	1.40	86.94	4.55E-06
11	35	1.75	2.91	1.465	101.85	4.63E-06
12	38.5	1.85	3.15	1.76	121.275	4.78E-06
13	42	1.98	3.29	1.86	138.18	4.87E-06
14	45.5	2.08	3.58	1.96	162.89	5.55E-06
15	49	2.19	3.88	2.00	190.12	6.35E-06
16	52.5	2.39	4.035	2.14	211.8375	6.29E-06
17	56	2.58	4.10	2.245	229.6	0.000006
18	59.5	2.70	4.63	2.56	275.485	7.11E-06
19	63	2.90	4.98	2.785	313.74	7.6E-06
20	66.5	2.96	5.12	2.80	340.48	7.96E-06
21	70	3.02	5.26	2.86	368.2	8.25E-06
22	73.5	3.15	5.61	3.02	412.335	8.98E-06
23	77	3.35	5.96	3.16	458.92	9.62E-06
24	80.5	3.46	6.10	3.40	491.05	9.49E-06
25	84	3.68	6.54	3.49	549.36	1.05E-05
26	87.5	3.86	6.82	3.68	596.75	1.08E-05
27	91	3.98	7.08	3.80	644.28	1.13E-05
28	94.5	4.06	7.35	3.92	694.575	1.19E-05
29	98	4.21	7.46	4.09	731.08	1.18E-05
30	101.5	4.39	7.69	4.12	780.535	1.22E-05
31	105	4.56	7.89	4.36	828.45	1.22E-05
32	108.5	4.62	7.90	4.44	857.15	1.2E-05
33	112	4.73	8.03	4.50	899.36	1.21E-05
34	115.5	4.98	8.39	4.82	969.045	1.24E-05
35	119	5.00	8.45	4.86	1005.55	1.25E-05
36	122.5	5.05	8.53	5.00	1044.925	1.25E-05
37	126	6.89	11.98	6.80	1509.48	1.83E-05
38	129.5	8.21	14.12	8.00	1828.54	2.14E-05
39	133	13.45	18.56	12.42	2468.48	0.00002

Tabel Momen – Kelengkungan Benda Uji 3 (e = 20 mm)

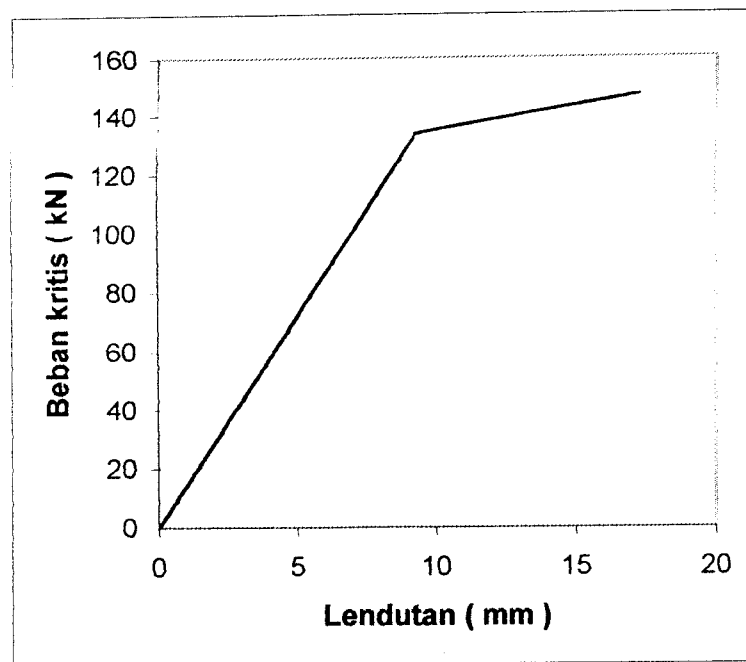
No	Beban (kN)	Dial A (mm)	Dial B (mm)	Dial C (mm)	Momen (M) $P * \Delta$ (kN.mm)	Kelengkungan (1/ cm) $\frac{(y_1 - 2y_2 + y_3)}{\Delta^2}$
1	0	0	0	0	0	0
2	3.5	0.4	0.39	0.22	1.365	2.84444E-07
3	7	0.7	0.8	0.58	5.6	5.68889E-07
4	10.5	0.8	0.98	0.69	10.29	8.35556E-07
5	14	0.98	1.27	0.72	17.78	1.49333E-06
6	17.5	1.25	1.71	1.12	29.925	1.86667E-06
7	21	1.57	2.16	1.48	45.36	2.25778E-06
8	24.5	1.96	2.48	1.62	60.76	2.45333E-06
9	28	2.31	2.66	2.24	74.48	1.36889E-06
10	31.5	2.67	3.1	2.6	97.65	1.65333E-06
11	35	3.12	3.45	2.98	120.75	1.42222E-06
12	38.5	3.24	3.68	3.08	141.68	1.84889E-06
13	42	3.67	3.94	3.14	165.48	1.90222E-06
14	45.5	4.08	4.21	3.14	191.555	2.13333E-06
15	49	4.46	4.52	3.28	221.48	2.31111E-06
16	52.5	4.64	4.74	3.56	248.85	2.27556E-06
17	56	4.81	5.1	4.02	285.6	2.43556E-06
18	59.5	5.1	5.37	4.38	319.515	0.00000224
19	63	5.37	5.62	4.82	354.06	1.86667E-06
20	66.5	5.84	5.88	4.98	391.02	1.67111E-06
21	70	5.88	6.09	5.24	426.3	1.88444E-06
22	73.5	6.24	6.32	5.69	464.52	1.26222E-06
23	77	6.24	6.77	6.08	521.29	2.16889E-06
24	80.5	6.25	7.14	6.18	574.77	3.28889E-06
25	84	6.27	7.46	6.25	626.64	4.26667E-06
26	87.5	6.64	7.81	6.37	683.375	0.00000464
27	91	7	8.12	6.89	738.92	4.17778E-06
28	94.5	7.25	8.59	7.11	811.755	5.01333E-06
29	98	7.85	8.96	7.42	878.08	4.71111E-06
30	101.5	8.04	9.28	7.84	941.92	4.76444E-06
31	105	8.78	9.81	8.26	1030.05	4.58667E-06
32	108.5	9.08	10.45	8.68	1133.825	5.58222E-06
33	112	9.54	11.38	9.14	1274.56	7.25333E-06
34	115.5	10.62	13.56	9.48	1566.18	0.00001248
35	119	12.32	15.87	12.24	1888.53	1.27644E-05

Tabel Hubungan Beban Lendutan Benda Uji 4 ($e = 30 \text{ mm}$)

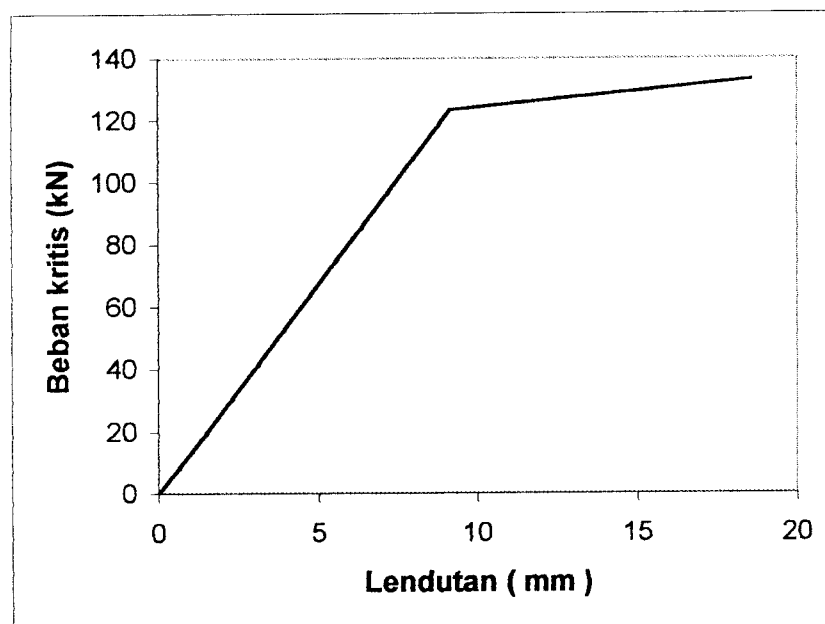
No	Beban (kN)	Dial A (mm)	Dial B (mm)	Dial C (mm)
1	0	0.00	0.00	0.00
2	3.5	0.31	0.35	0.15
3	7	0.50	0.60	0.40
4	10.5	0.89	0.93	0.60
5	14	1.19	1.32	0.86
6	17.5	1.50	1.75	1.00
7	21	1.78	2.23	1.35
8	24.5	2.10	2.68	1.65
9	28	2.40	3.05	2.00
10	31.5	2.66	3.27	2.25
11	35	3.00	3.68	2.60
12	38.5	3.28	4.00	2.98
13	42	3.60	4.38	3.32
14	45.5	3.90	4.95	3.65
15	49	4.16	5.26	3.80
16	52.5	4.45	5.60	4.00
17	56	4.91	5.98	4.26
18	59.5	5.06	6.30	4.86
19	63	5.36	6.80	5.12
20	66.5	5.53	7.16	5.36
21	70	5.90	7.60	5.80
22	73.5	6.00	7.75	5.98
23	77	6.26	8.24	6.32
24	80.5	6.60	8.54	6.46
25	84	7.00	8.92	6.79
26	87.5	7.40	9.24	7.30
27	91	7.65	9.58	7.56
28	94.5	10.30	12.58	9.10
29	98	10.65	13.60	10.50
30	101.5	13.00	17.50	12.86

Tabel Beban Lendutan Benda Uji 5 ($e = 40 \text{ mm}$)

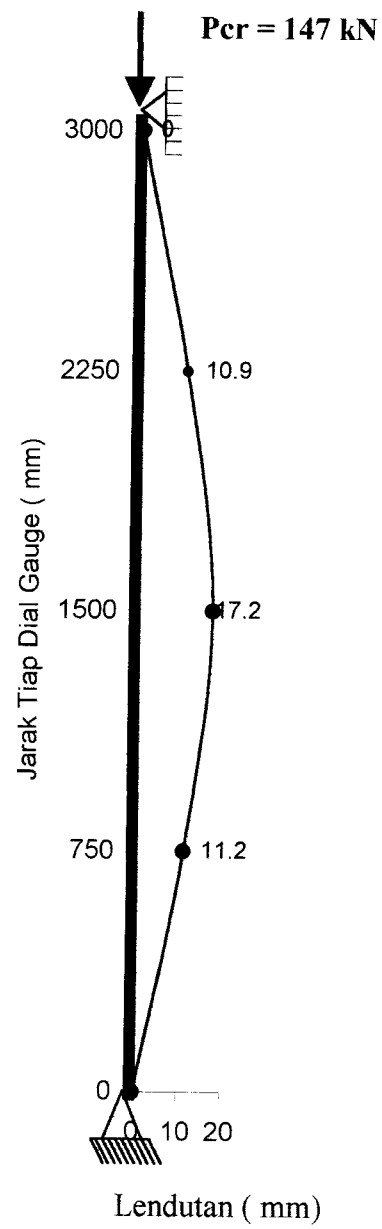
No	Beban (kN)	Dial A (mm)	Dial B (mm)	Dial C (mm)
1	0	0	0	0
2	3.5	0.5	0.5	0.3
3	7	0.7	0.64	0.36
4	10.5	0.8	0.7	0.38
5	14	0.86	0.84	0.56
6	17.5	0.91	1.04	0.68
7	21	1.38	1.46	0.76
8	24.5	1.62	1.64	1.28
9	28	1.85	1.82	1.64
10	31.5	2.08	2.22	1.94
11	35	2.18	2.64	2.06
12	38.5	2.64	3.19	2.38
13	42	3.23	3.56	2.67
14	45.5	3.64	4.14	3.01
15	49	4.125	4.68	3.12
16	52.5	4.85	5.12	3.76
17	56	5.79	5.88	4.08
18	59.5	6.24	6.22	4.45
19	63	6.78	6.81	5.76
20	66.5	7.15	7.24	6.18
21	70	7.58	7.88	6.46
22	73.5	8.46	9.22	7.68
23	77	8.94	9.75	8.12
24	80.5	9.42	10.08	8.45
25	84	9.64	11.26	8.87
26	87.5	10.04	12.02	9.03
27	91	12.23	14.87	10.85

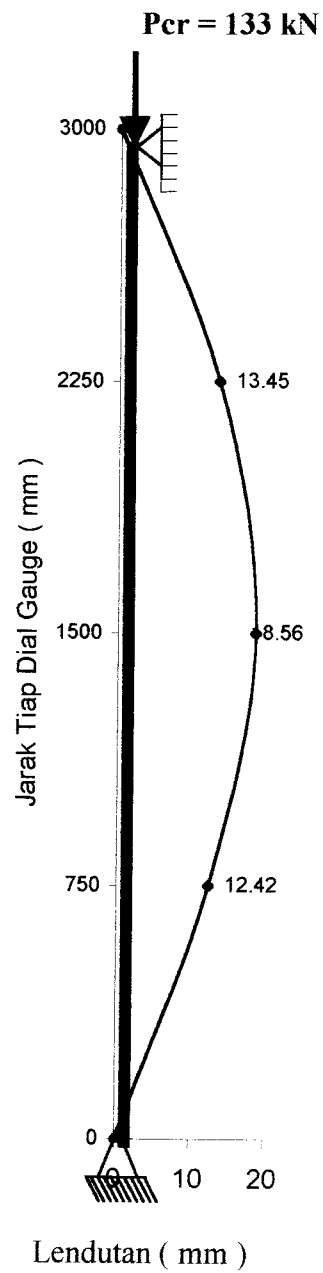


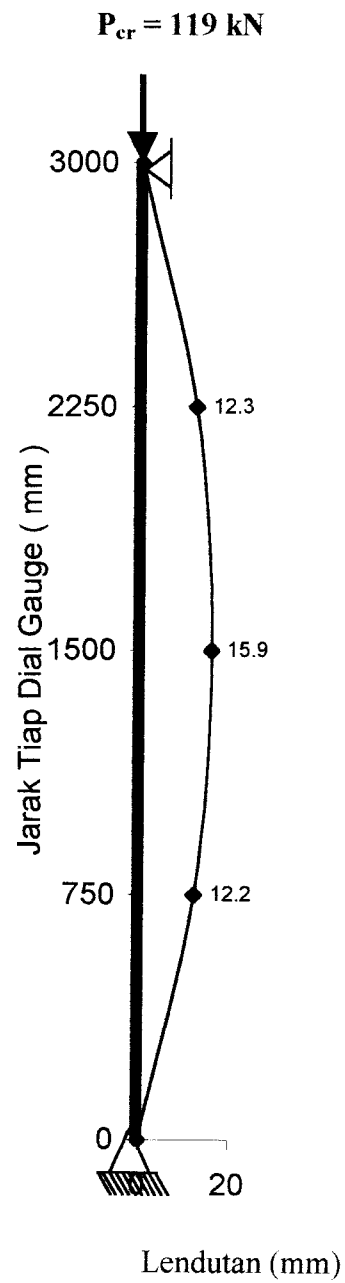
Grafik Regresi Beban Lendutan Benda Uji 1 ($e = 0$ mm)

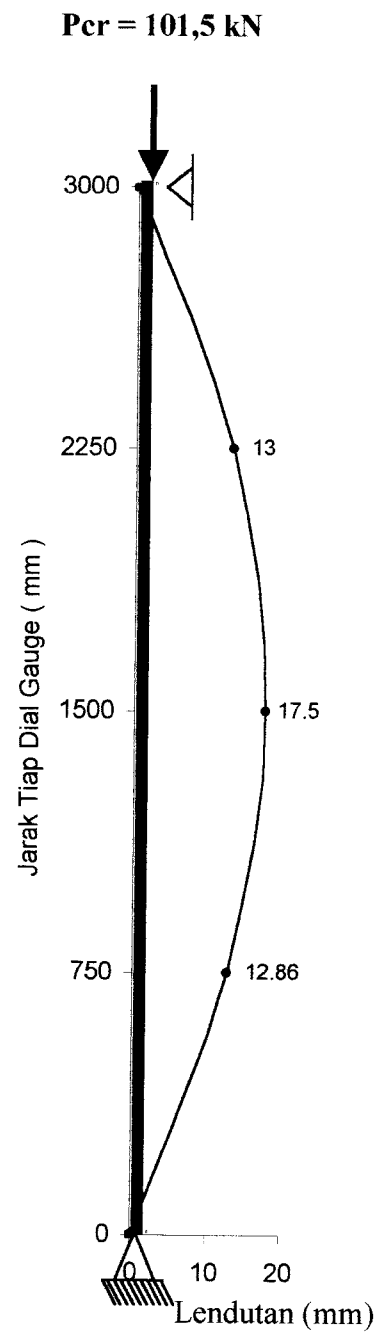


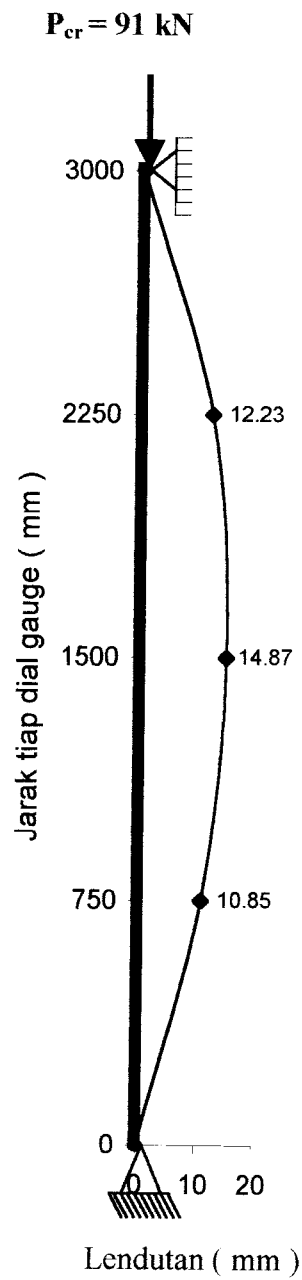
Grafik Regresi Beban Lendutan Benda Uji 2 ($e = 10$ mm)

Kurva Lendutan Maksimal Benda Uji I ($e = 0$ mm)

Kurva Lendutan Maksimal Benda Uji II ($e = 10 \text{ mm}$)

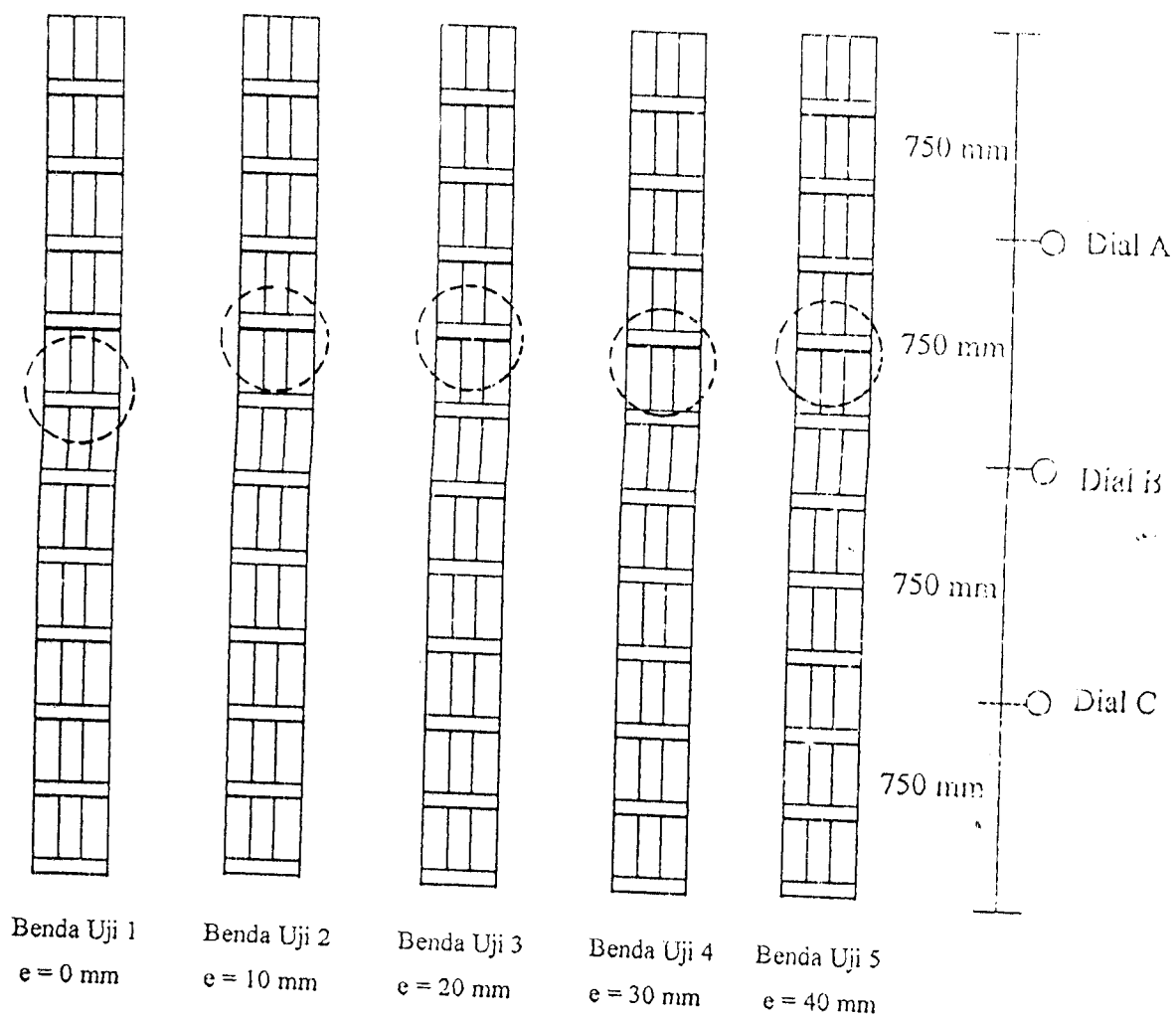
Kurva Lendutan Maksimal Benda Uji III ($e = 20$ mm)

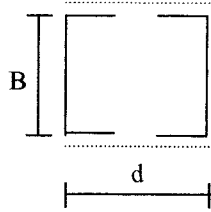
Kurva Lendutan Maksimal Benda Uji IV ($e = 30 \text{ mm}$)

Kurva Lendutan Maksimal Benda Uji V ($e = 40 \text{ mm}$)

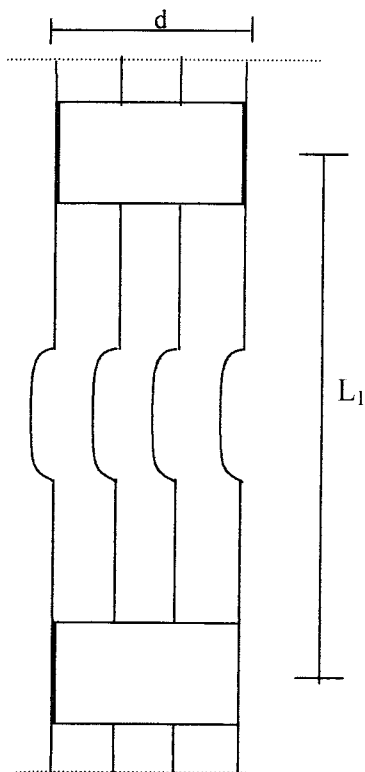
POLA KERUSAKAN YANG TERJADI PADA SETIAP BENDA UJI

Daerah terjadi tekuk pada setiap benda uji ditunjukkan pada bagian gambar yang dilingkari dibawah ini.

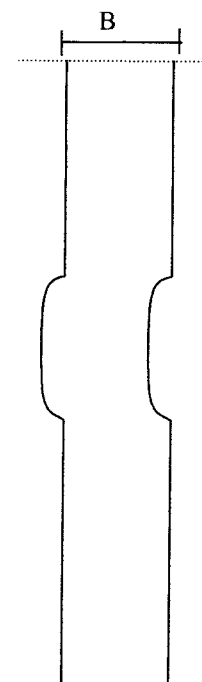




Penampang benda uji

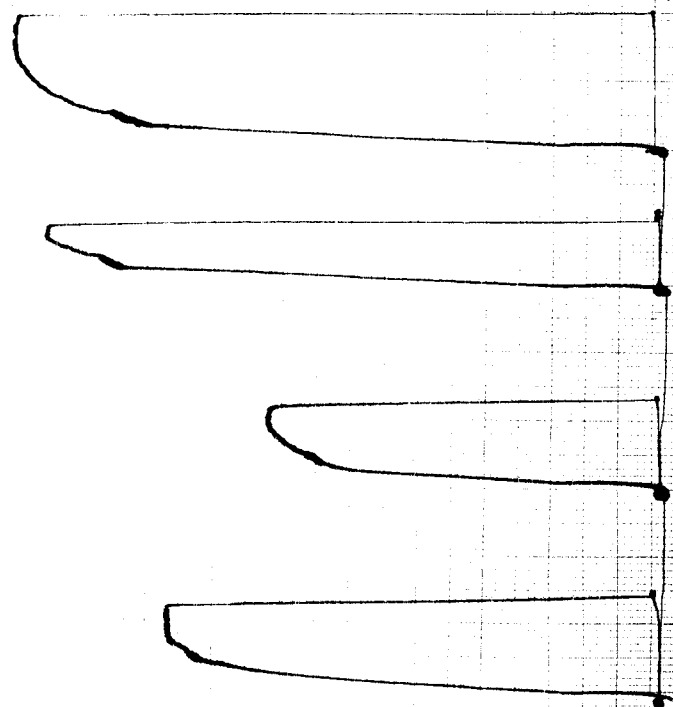


Kerusakan benda uji 1, 2, 4 dan 5



Kerusakan pada benda uji 3

Gambar Pola Kerusakan Benda Uji



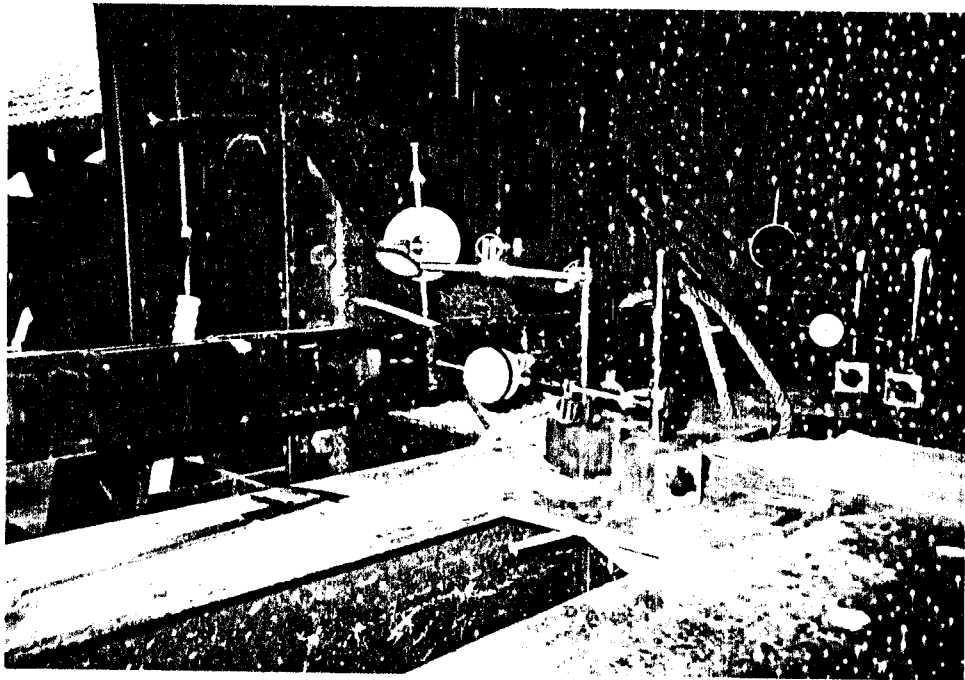
LAMPIRAN 4

GAMBAR DAN DOKUMENTASI SAAT PENGUJIAN

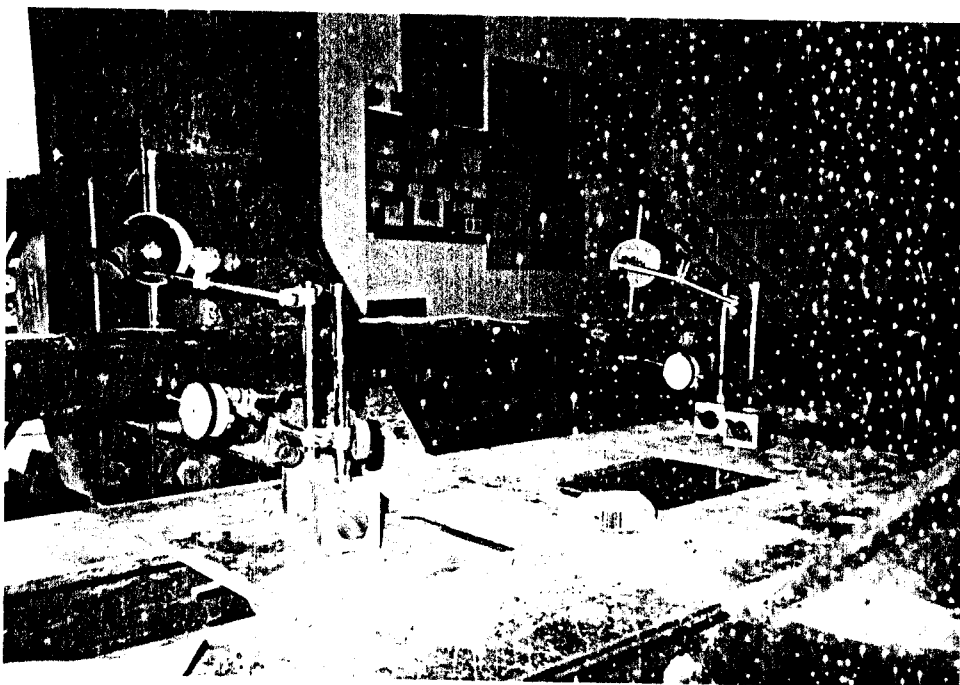
Gambar Seting Peralatan



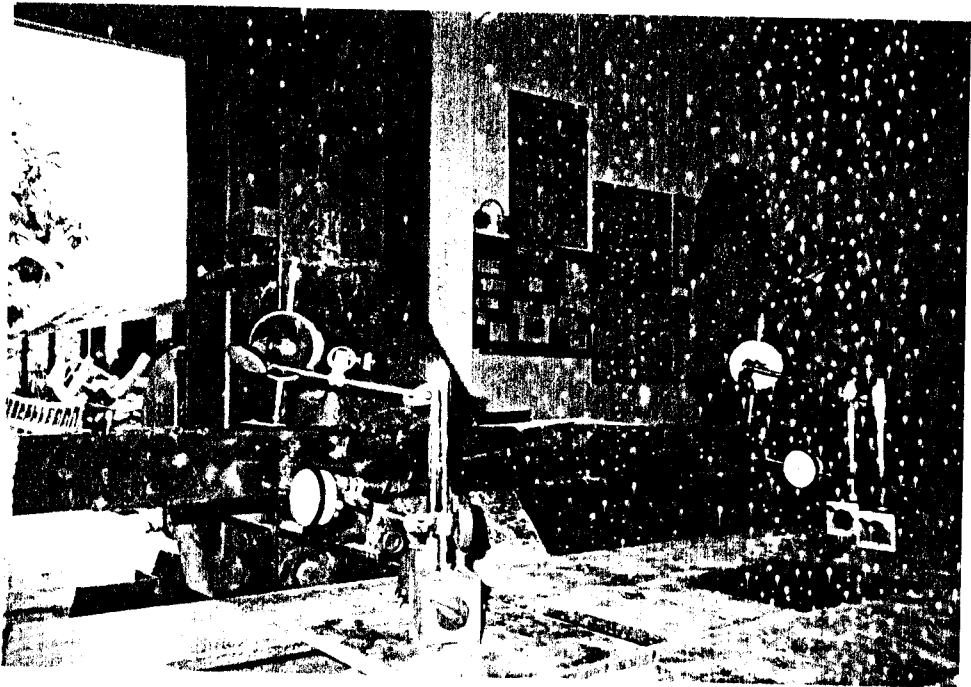
Gambar Kerusakan Pada Benda uji



Gambar Kerusakan pada Benda Uji 2



Gambar Kerusakan pada Benda uji 3



Gambar Kerusakan pada Benda uji 4



Gambar Kerusakan pada Benda uji 5