PERPUSTAKAAN FTSP UII
HADIAH/BELI
TGL. TERIMA : 05 - 12 - 2007
NO. JUDUL : 2703
NO. INV. : 5120002703001
NO. INDUK : 002703

KAPASITAS KOLOM PENDEK BANGUN NON PRISMATIS DENGAN PERANGKAI DIAMOND AKIBAT PEMBEBANAN EKSENTRIS





Disusun Oleh :

Nama : SAFRIZAL

No. Mhs : 01 511 190

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

JOGJAKARTA

2007

MILIK PERPUSTAKAAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN
PERENCANAAN UII YOGYAKARTA

LEMBAR PENGESAHAN
PROPOSAL TUGAS AKHIR

KAPASITAS KOLOM PENDEK BANGUN NON PRISMATIS DENGAN PERANGKAI DIAMOND AKIBAT PEMBEBANAN EKSENTRIS



Disusun oleh :

Nama : SAFRIZAL
No. Mhs : 01 511 190

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Ir. Fathkurrohman N, MT
Dosen Pembimbing

Tanggal : 25-10-2007

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

Assalamu 'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas karunia dan rahmat-Nya hingga penyusun dapat melaksanakan dan menyusun laporan Tugas Akhir ini dengan baik.

Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat menempuh jenjang pendidikan Strata Satu (S-1) pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Dalam menyusun laporan, sebelumnya penyusun telah melakukan pengujian pada Laboratorium Mekanika Rekayasa Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Selama melaksanakan dan menyusun laporan Tugas Akhir, penyusun mendapatkan banyak bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, dalam kesempatan ini penyusun menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. H. Ruzardi, MS, selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia,
2. Bapak Ir. H. Faisol, MS., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil dan Perencanaan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia,

3. Bapak Ir. Fatkhurrohman N., MT., selaku Dosen Pembimbing,
4. Papa dan Mama Tercinta, yang selalu berdoa untuk keberhasilan penyusun, hingga sampai pada penghujung studi ini
5. Saudaraku, Andrian dan Weni, makasih atas supportnya, dan
6. Rekan-rekan yang telah banyak memberikan bantuan dan dorongan kepada penyusun, serta semua pihak yang telah banyak membantu terselesaikannya Tugas Akhir ini, yang tidak mungkin penyusun sebutkan satu persatu.

Atas segala budi dan amal baik yang telah diberikan, penyusun hanya dapat memanjatkan do'a, semoga segala amal dan kebajikannya mendapatkan imbalan yang setimpal dari Allah SWT, Amien.

Penyusun menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini belum dapat dikatakan sempurna karena masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penyusun mengaharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini. Penyusun berharap semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Wassalamu 'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, Mei 2007

Penyusun

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....

HALAMAN PENGESAHAN .....

MOTTO DAN PERSEMBAHAN i

KATA PENGANTAR ii

DAFTAR ISI iv

DAFTAR TABEL viii

DAFTAR GAMBAR x

DAFTAR LAMPIRAN xiii

DAFTAR LAMBANG DAN NOTASI xiv

ABSTRAKSI xvi

BAB I. PENDAHULUAN .....

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Tujuan Penelitian 2

1.3. Manfaat Penelitian 3

1.4. Batasan Masalah 3

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA 4

BAB III. LANDASAN TEORI .....

3.1. Kolom 8

3.2. Kolom Tunggal 8

3.2.1. Tekuk elastis..... 8

3.2.2 Tekuk tidak elastis..... 11

3.2.2.a Modulus Tangen..... 11

3.2.2.b Modulus tereduksi..... 12

3.2.3 Geser kolom tunggal..... 18

3.2.4 Kolom tunggal dengan pembebanan eksentris..... 20

3.3. Kolom tersusun 22

3.3.1. Kolom tersusun prismatis..... 23

3.3.2. Kolom tersusun non prismatis perangkai diamond 28

3.3.3 Kolom tersusun nonprismatis perangkai diamond dengan pembebanan eksentris..... 33

3.4. Kuat tekan..... 36

3.4.1 Tekuk keseluruhan..... 36

3.4.2.Tekuk lokal..... 37

3.4.3 Hubungan tekuk lokal dan tekuk keseluruhan..... 38

3.5 Hubungan tanpa dimensi antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{a}$ 39

3.6 Hipotesis..... 40

BAB IV METODE PENELITIAN 41

4.1. Metodologi penelitian..... 41

4.2. Bahan dan alat yang digunakan..... 42

4.2.1. Bahan..... 42

4.2.2 Peralatan penelitian..... 42

4.3. Model benda uji..... 46

4.4.1 Benda uji pendahuluan..... 46

4.4.2 Benda uji kolom tersusun..... 46

4.4. Prosedur penelitian 46

4.5. Pelaksanaan penelitian 49

4.5.1. Pembuatan benda uji 49

4.5.2. Setting peralatan..... 49

4.5.3 Pembebanan benda uji..... 51

4.5.4 Pengujian kuat tarik profil dan plat..... 51

BAB V. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 53

5.1. Hasil pengujian 53

5.1.1 Hasil uji pendahuluan..... 53

5.1.1.1.Uji tarik baja siku dan pelat 54

5.1.1.2. Uji kuat geser sambungan las 55

5.1.1.3. Hasil pengujian kuat tekan kolom tersusun 55

5.2. Pembahasan 61

5.2.1 Uji kuat tarik baja..... 61

5.2.2 Uji kuat geser sambungan las..... 62

5.2.3 Uji kuat tekan kolom tersusun bangun nonprismatis.... 63

5.3 Perhitungan teoritis dengan hasil pengujian..... 63

5.4. Perhitungan modulus tangen dan modulus reduksi..... 71

5.5 Kegagalan kolom..... 74

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN 77

6.1. Kesimpulan 77

6.2. Saran 78

DAFTAR PUSTAKA .....

LAMPIRAN.....

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tabel tekuk plastis almunium *Chen* (1976).....16

Tabel 3.2. Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm).....32

Tabel 3.3 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm).....33

Tabel 3.4 Perbandingan nilai k dengan jenis tumpuan.....38

Tabel 5.1 Hasil pengujian kuat tarik bahan 54

Tabel 5.2 Hasil pengujian kuat geser.....55

Tabel 5.3 Beban versus deformasi kolom pendek bangun non prismatis.....57

Tabel 5.4 Beban versus deformasi kolom pendek bangun prismatis 59

Tabel 5.5 Analisis hasil uji kuat tarik baja 62

Tabel 5.6 Hasil pengujian kuat tarik las 63

Tabel 5.7 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm).....64

Tabel 5.8 Hasil perhitungan beban kritis dengan nilai E.....64

Tabel 5.9. Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm).....65

Tabel 5.10. Tabel tekuk plastis alumunium 65

Tabel 5.11. Hasil perhitungan beban kritis dengan nilai Et 66

Tabel 5.12 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm).....66

Tabel 5.13 Hasil perhitungan beban kritis dengan nilai Er 67

Tabel 5.14 Tabel perbandingan beban kritis E,Et dan Er teori dengan hasil pengujian 67

Tabel 5.15 Tabel perhitungan beban kritis persamaan 5.7.....69

Tabel 5.16 Perbandingan beban kritis persamaan 5.7 terhadap beban leleh 69

Tabel 5.17 Tabel perbandingan beban kritis persamaan 5.10 terhadap beban leleh dengan modulus tangen.....72

Tabel 5.18 Perbandingan beban kritis persamaan 5.11 terhadap beban leleh dengan modulus tereduksi.....73

Tabel 5.19 Pola kegagalan kolom.....76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Batang lurus di bebani gaya tekan aksial..... 8

Gambar 3.2. Hubungan tegangan regangan..... 11

Gambar 3.3. Konsep Modulus Tereduksi.....13

Gambar 3.4. Tekuk kolom, konsep modulus tereduksi.....13

Gambar 3.5. Model kolom *Shanley(1974)*.....15

Gambar 3.6. Grafik tegangan berdasar persamaan *Euler*.....15

Gambar 3.7. Pengaruh Beban (P) yang menyebabkan Gaya Geser.....18

Gambar 3.8. Kolom dengan beban P dan eksentris e.....21

Gambar 3.9. Profil kolom tersusun dengan profil siku.....23

Gambar 3.10 Kolom bangun yang dibebani gaya aksial 24

Gambar 3.11 Kolom tersusun yang dibebani gaya aksial dengan perangkai diamond 33

Gambar 3.12 Kolom bangun perangkai diamond dengan pembebanan eksentris..34

Gambar 3.13 Grafik hubungan antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{a}$.....40

Gambar 4.1 Flowchart metodologi penelitian.....41

Gambar 4.2 Universal testing machine *Shimatzu* UMH30.....43

Gambar 4.3. Bentuk fisik loading frame.....44

Gambar 4.4 Dial gauge.....45

Gambar 4.5 Hidraulic jack.....45

Gambar 4.6 Benda Uji Untuk Uji Kuat Tarik 46

Gambar 4.7 Benda Uji Untuk kuat Tarik Las.....46

Gambar 4.8 Model uji kolom pendek non prismatis perangkai diamond.....47

Gambar 4.9 Model uji kolom pendek prismatis perangkai diamond.....47

Gambar 4.10 Model benda uji dan penempatan dial gauge.....50

Gambar 4.11 Diagram tegangan regangan baja struktural.....51

Gambar 5.1. Diagram tegangan regangan uji tarik element pelat profil siku.....54

Gambar 5.2. Diagram tegangan regangan uji tarik pelat baja diameter 7mm.....55

Gambar 5.3. Benda uji kolom pendek bangun non prismatis dan penempatan dial gauge.....56

Gambar 5.4. Benda uji kolom pendek bangun prismatis dan penempatan dial gauge 57

Gambar 5.5 Grafik hubungan P/Py versus deformasi dengan e/a = 0.....60

Gambar 5.6 Grafik hubungan P/Py versus deformasi dengan variasi e/a 60

Gambar 5.7. Benda uji kuat tarik bahan 61

Gambar 5.8 Benda uji kuat tarik las.....62

Gambar 5.9. Grafik non dimensional P/Py versus e/a bervariasi 67

Gambar 5.10 Grafik non dimensional P/Py versus Kl/r dengan e/a = 0.....68

Gambar 5.11 Grafik non dimensional P/Py versus e/a bervariasi 70

Gambar 5.12 Grafik non dimensional P/Py versus Kl/r dengan e/a= 0.....70

Gambar 5.13. Grafik non dimensional P/Py versus e/a bervariasi.....73

Gambar 5.14. Grafik non dimensional P/Py versus Kl/r dengan e/a = 0 74

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 = Perhitungan sifat penampang dan tegangan leleh baja (fy) hasil uji

Lampiran 2 = Foto Pengujian

DAFTAR SIMBOL

A	: Luas profil
Ad	: Luas penampang satu batang diagonal
Ab	: Luas penampang satu batang horizontal
a	: Jarak antar profil dari tepi terluar bahan
b	: Lebar profil
b/t	: Rasio lebar terhadap tebal
d	: Panjang batang diagonal
E	: Modulus Elastisitas
Et	: Modulus tangen
Er	: Modulus reduksi
Fcr	: Tegangan kritis
Fy	: Tegangan leleh
h	: Panjang batang horizontal
k	: Koefisien tekuk plat
K	: Faktor tekuk keseluruhan
L	: Panjang batang keseluruhan
c	: Panjang elemen batang yang dibatasi oleh ujung-ujung batang penghubung
P	: Beban
Pcr	: Beban kritis

r	: Radius girasi
t	: Tebal profil
μ	: Angka poisson
I	: Inersia kolom tersusun
σ	: Tegangan
λ	: Kelangsingan

ABSRAKSI

Kapasitas tekan profil tunggal terbatas karena ukuran terbatas Penggabungan empat profil siku dengan batang perangkai melintang diagonal menggunakan empat profil siku diharapkan dapat meningkatkan kapasitas kolom tersebut. Dalam penelitian ini digunakan model kolom tersusun dengan variasi perangkai diamond.

Penelitian eksperimental ini menggunakan 2 model kolom, yaitu 3 sampel kolom nonprismatis dengan perbandingan penampang kecil(ho) berbanding penampang besar (hm) = 0.625 dan 1 sampel kolom prismatis, dengan perbandingan rasio ho/hm = 1, panjang batang konstan sebesar 1800 mm. Kolom non prismatis dilakukan pengujian dengan 3 macam pembebanan yaitu dengan rasio e/a = o (konsentris), e/a = 0.107, dan e/a = 0,214. Sementara kolom prismatis hanya dilakukan pembebanan konsentris (e/a = 0). Dimana (e) adalah eksentrisitas beban terhadap titik pusat, (a) adalah jarak terpendek antar batang tepi.Tumpuan yang digunakan berupa tumpuan sederhana dengan anggapan tumpuan sendi-sendi dengan nilai k = 1, model kolom diuji dengan memberikan pembebanan aksial tekan sentris dengan kenaikan sebesar 4KN. Penelitian ini ditujukan untuk mencari rasio perbandingan beban kritis kolom nonprismatis perangkai diamond berbanding dengan beban leleh (P_{cr} / P_y) dengan pembebanan sentris dan eksentris.

Dari hasil penelitian eksperimental kolom pendek bangun nono prismatis dengan pembebanan sentir dan eksentris, didapatkan kesimpulan bahwa kolom mengalami tekuk lokal pada elemen plat. Rasio perbandingan beban kritis kolom nonprismatis dan kolom prusmatis perangkai diamond berbanding dengan beban leleh (P_{cr} / P_y)masing-masing sampel kolom adalah, non prismatis e/a = 0, (P_{cr} / P_y) = 0.63, non prismatis e/a = 0,107, (P_{cr} / P_y) = 0.46, non prismatis e/a = 0.214, (P_{cr} / P_y) = 0.55, prismatis e/a = 0, (P_{cr} / P_y) = 0.52.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Struktur tekan (kolom) dapat dibuat dari profil tunggal maupun profil tersusun (gabungan). Kapasitas tekan profil tunggal terbatas karena ukuran penampang yang tersedia terbatas, karena itu tidak mencukupi untuk memikul beban besar. Untuk beban besar diperlukan ukuran penampang yang lebih besar, persoalan seperti ini dapat diselesaikan menggunakan profil tersusun. Kolom tersusun digunakan untuk mendapatkan kolom yang efisien, kapasitas dan kekakuan besar. Kolom tersusun pendek bangun non prismatis adalah gabungan dua profil atau lebih yang dirangkai menjadi satu kesatuan dengan variasi jarak antar batang tunggal, dan menggunakan batang-batang perangkai guna mendapatkan kolom dengan kekuatan besar. Kapasitas kolom tersusun nonprismatis dipengaruhi oleh banyak faktor antara lain bentuk dan ukuran profil, jumlah profil, jarak antar profil, konfigurasi antar batang perangkai, panjang kolom, kondisi ujung-ujung kolom. Beban yang bekerja secara eksentris mengakibatkan gaya yang dipikul oleh batang tepi tidak sama sehingga berpengaruh kepada kapasitas kolom. Semakin besar jarak beban terhadap pusat berat kolom maka kapasitas akan semakin berkurang. Kapasitas kolom bangun nonprismatis menarik diteliti karena kolom bangun nonprismatis memiliki momen inersia bervariasi. Momen inersia berpengaruh pada kekuatan maupun kekakuan kolom. Pada sisi bawah, momen inersia maksimum, pada sisi atas

inersia minimum. Variasi batang diamond menyebabkan panjang tekuk profil tunggal bervariasi. Perangkai diamond adalah perangkai yang berbentuk diamond untuk tiap jarak yang berbeda.

Pada kolom tersususun, peristiwa tekuk dapat terjadi, yang mengakibatkan efisiensi penampang pada kolom tersusun berkurang. Keruntuhan akibat tekuk terjadi pada batang yang langsing, dimana tegangan kritis (F_{cr}) yang dimiliki oleh pelat jauh di bawah tegangan lelehnya. Kolom bangun nonprismatis dapat di susun dengan menggunakan batang-batang perangkai. Batang perangkai dapat disusun secara diagonal, melintang dan kombinasi melintang diagonal. Dalam penelitian ini digunakan variasi kombinasi yaitu perangkai diamond.

Penelitian ini dikhususkan pada kolom tersusun bangun non prismatis empat profil siku dengan perangkai diamond yang dipengaruhi oleh nilai ho/hm, dan pembebanan eksentris, hm merupakan bentang terpanjang dari perangkai melintang sedangkan ho merupakan bentang terpendek dari perangkai melintang. Penelitian ini juga untuk meneliti apakah kolom bangun non prismatis terjadi tekuk lokal atau tekuk keseluruhan (all buckling).

1.2. Tujuan Penelitian

1.3. Tujuan penelitian eksperimental adalah :

1. Mengetahui rasio beban kritis terhadap beban leleh (Pcr/Py) kolom pendek bangun non prismatis empat profil siku dengan konfigurasi perangkai diamond yang memikul beban sentris dan eksentris

2. Mengetahui jenis kegagalan kolom tersusun bangun non prismatis perangkai diamond

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian eksperimental ini diharapkan mendapat manfaat sebagai berikut :

1. Mengembangan pengetahuan tentang kapasitas tekan kolom pendek bangun non prismatis dengan variasi perangkai diamond
2. Memberikan informasi tentang kapasitas tekan kolom pendek bangun non prismatis dengan beban sentris dan eksentris
3. Sebagai bahan pertimbangan dalam merencanakan kolom pendek bangun non prismatis

1.5. Batasan Masalah

Penelitian eksperimental kolom non prismatis dibatasi pada masalah :

1. Kolom pendek tersusun bangun non prismatis terbuat dari empat profil siku dengan konfigurasi perangkai diamond
2. Kolom dibebani dengan aksial sentris dan eksentris
3. Hubungan perangkai antar batang tunggal menggunakan las

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Kapasitas tekan kolom dipengaruhi banyak faktor, diantaranya adalah kelangsingan. Semakin langsing suatu kolom, kuat tekannya semakin kecil. Kelangsingan juga berpengaruh pada ragam keruntuhan. Berdasarkan ragam keruntuhan, kolom dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu kolom langsing (*slender column*), kolom sedang dan kolom pendek *(stocky column*). Kolom langsing dan sedang, runtuh akibat tekuk, kolom pendek runtuh akibat tegangan leleh terlampaui (***Padosbajoyo ,1992***)

Kolom pendek adalah kolom yang mempunyai kelangsingan (KL/r) $\leq$ 20 Tegangan kritis kolom pendek ditetapkan sama dengan tegangan leleh (F_y). Pada metode perancangan elastis, digunakan tegangan tekuk ijin yang nilainya sama dengan tegangan dasar. ***(Padosbajoyo, 1992)***

Kekuatan batang tekan dipengaruhi oleh faktor tekuk *(buckling)* atau lenturan mendadak akibat ketidakstabilan, terjadi sebelum kekuatan batang sepenuhnya tercapai. Kapasitas kolom dipengaruhi oleh stabilitas kolom terhadap tekuk. Tekuk yang terjadi pada kolom yang tersusun dari pelat adalah tekuk keseluruhan dan tekuk lokal ***(Salmon dan Johnson, 1994)***

Analisis untuk kuat tekan batang secara matematis dilakukan pertama kali oleh ***Leonhard Euler (1744)***, dimana *Euler* menyelidiki tekuk kolom langsing dan menentukan beban kritisnya. Beban kritis (P_{cr}) adalah harga beban aksial dimana kolom dapat mengalami defleksi lateral kecil tanpa adanya perubahan gaya aksial. Dengan demikian, beban kritis menunjukkan batas antara kondisi stabil dan tidak stabil. Jika ($P<P_{cr}$), maka struktur stabil, jika ($P>P_{cr}$), maka struktur tidak stabil (***Gere dan Timoshenko, 2000***).

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 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)***

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

Kapasitas tekan profil tunggal terbatas karena penampang yang tersedia terbatas, karena itu tidak mencukupi untuk memikul beban besar. Untuk beban besar diperlukan ukuran penampang yang lebih besar, persoalan seperti ini dapat diselesaikan menggunakan profil tersusun. Kolom tersusun digunakan untuk mendapatkan kolom yang efisien, kapasitas dan kekakuan besar. Dari hasil penilitian didapatkan kesimpulan bahwa kuat tekan kolom tersusun non prismatis dari profil siku dengan perangkai diagonal dan horizontal dipengaruhi oleh nilai ho/hm, semakin besar nilai ho/hm maka nilai Pcr (beban kritis) akan semakin kecil, kegagalan yang terjadi pada kolom tersusun non prismatis adalah tekuk keseluruhan (all buckling). Beban kritis hasil pengujian berada dibawah beban kritis pada teori Friedich Bleich, hasil pengujian ini disebabkan karena batang perangkai yang terlalu tipis sehingga tidak dapat menerima beban secara maksimal. (***Ike Merdekawati ,Kapasitas tekan kolom tersusun non prismatis, UII yogyakarta ,2006)***

Profil Light Lipped Channal bentukan dingin banyak dipakai sebagai komponen struktur ringan yang memikul beban kecil seperti balok atap. Tinggi penampang profil Light Lipped Channal biasanya kurang dari 200mm dan ternuat dari plat tipis sehingga memilki rasio b/t cukup besar. Hal tersebut mengakibatkan penampang rawan akan terjadinya tekuk. Untuk itu diperlukan pembentukan balok susun dari profil Light Lipped Channal bentukan dingin dan pelat, yang diharapkan mampu memikul beban aksial yang cukup besar dan

efisien dan mampu meningkatkan kapasitas dari elemen-elemen penyusun kolom tersebut. Dari hasil penelitian didapatkan kesimpulan bahwa hasil pengujian laboratorium berada dibawah hitungan teoritis *Bleich* dengan menggunakan modulus tangen dan modulus tereduksi. ***(L.Kholid Karyadi (97 511 229) dan Yousef Al Azhar (97 511 205), Kuat tekan kolom tersusun dari profil c bentukan dingin dengan batang perangkai diagonal,UII Yogyakarta, 2003)***

Persoalan yang mungkin timbul dari kolom tersusun empat profil siku adalah kegagala kolom baja yang diakibatkan oleh tegangan lelehnya terlampaui. Kegagalan yang diakibatkan oleh tekuk ada dua macam yaitu overall buckling dan local buckling. Batang yang mengalami tekuk memiliki penampang yang tidak kompak dan elemen penampangnya langsing. Untuk mendapatkan kolom dengan kapasitas besar maka dibuat kolom tersusun atau kolom dari profil gabungan. Salahsatu dari kolom tersusun yang banyak digunakan terbuat dari empat profil siku yang dirangkai dengan batang diagonal. Dari hasil penelitian didapatkan kesimpulan bahwa semakin besar eksentrisitas maka beban kritis akan semakin kecil, semakin besar rasio e/r maka rasio P_{cr} / P_y akan semakin kecil, kegagalan pada semua benda uji berupa tekuk lokal. (***Radyo Wijoyo Danubroto (03 511 082), Kapasitas kolom tersusun empat profil siku dengan perangkai diagonal akibat pembebanan eksentris,UII Yogyakarta, 2007)***

BAB III

LANDASAN TEORI

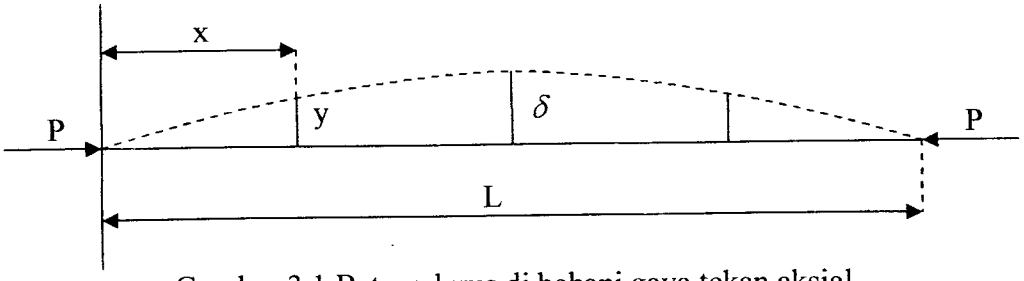
3.1.Kolom

Komponen struktur tekan pada baja dapat dibuat dari profil tunggal atau profil bangun (*built up*). Kapasitas tekan dan kekakuan profil tunggal terbatas karena ukuran penampang baja yang tersedia terbatas. Pada kolom dengan beban besar dan memerlukan kekakuan besar, kapasitas profil tunggal tidak memenuhi. Persoalan seperti diatas dapat diselesaikan dengan menggunakan kolom profil gabungan (bangun), kolom bangun digunakan untuk mendapatkan kolom yang lebih efisien dalam menahan beban dengan kapasitas yang besar.

3.2 Kolom Tunggal

3.2.1.Tekuk elastis

Kolom tunggal adalah komponen struktur tekan yang terbuat dari satu profil. Kapasitas tekan kolom tunggal terbatas karena ukuran penampang terbatas. Akibat pengaruh beban, kolom tunggal dapat melentur.



Gambar 3.1 Batang lurus di bebani gaya tekan aksial

Gambar 3.1 menunjukkan sebuah batang lurus yang kedua ujungnya sendi, di bebani gaya tekan aksial (P) akibatnya batang melengkung. Anggap penampang batang yang letaknya x dari ujung kiri mengalami pelenturan sebesar y. Akibat beban P dan pelenturan (y) dipenampang tersebut bekerja momen lentur *Padosbajoyo (1992)*,.

$$M = -P.y \tag{3.1}$$

Karena $M = EI\frac{d^2y}{dx^2}$, maka persamaan 3.1 menjadi :

$$EI\frac{d^2y}{dx^2} = -Py \tag{3.2a}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{P}{EI}y \tag{3.2b}$$

Masing-masing ruas persamaan 3.2a dikalikan dengan 2dy diperoleh :

$$EI\frac{dy}{dx}\frac{dy}{dx}(2dy) = -2.P.y.dy \tag{3.3}$$

Jika masing-masing ruas persamaan 3.3 diintegralkan, diperoleh :

$$EI\left(\frac{d^2y}{dx^2}\right) = -P.y^2 + C_1 \tag{3.4}$$

Pada y = δ, $\frac{dy}{dx} = 0$, sehingga $0 = -P.y^2 + C_1$

Subtitusi C_1 kedalam persamaan 3.4, maka diperoleh :

$$\frac{dy}{\sqrt{\delta^2 - y^2}} = \sqrt{\frac{P}{EI}}dx \tag{3.5}$$

Masing-masing ruas diintegralkan, diperoleh :

$$arc.\sin\frac{y}{\delta} = x\sqrt{\frac{P}{EI}} + C_2 \tag{3.5a}$$

Pada x = 0, pelenturan (y) = 0. sehingga $C_2 = 0$. Persamaan 3.5[a] menjadi :

$$arc.\sin\frac{y}{\delta} = x\sqrt{\frac{P}{EI}} \tag{3.5b}$$

$$\sin x\sqrt{\frac{P}{EI}} = \frac{y}{\delta} \tag{3.5c}$$

Pada x = L, pelenturan (y) = 0, persamaan 3.5c menjadi :

$$P = \frac{(n\pi)^2 EI}{L^2} \tag{3.6}$$

Untuk n = 0 persamaan 3.6 tidak bernilai, karena P = 0. Nilai P terkecil diperoleh bila n = 1, sedangkan P disebut sebagai beban kritis (P_{cr}). Dengan memasukkan nilai n = 1 kedalam persamaan 3.6 didapat persamaan :

$$P = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \tag{3.7}$$

Persamaan 3.7 dibagi dengan luas penampang (A), diperoleh tegangan kritis :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \tag{3.8}$$

Dalam persamaan 3.8, (KL/r) menunjukkan kelangsingan batang, K adalah faktor panjang efektif, $r = \sqrt{I/A}$ (jari-jari inersia) dan I adalah momen inersia. Tampak bahwa tegangan kritis batang berbanding terbalik dengan kuadrat kelangsingan. Semakin langsing suatu batang, maka beban kritis semakin kecil.

Tekuk elastis terjadi pada kolom langsing dengan kelangsingan (KL/r) > λc , λc adalah kelangsingan ideal kolom, dengan kelangsingan batas (λc) :

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \tag{3.9}$$

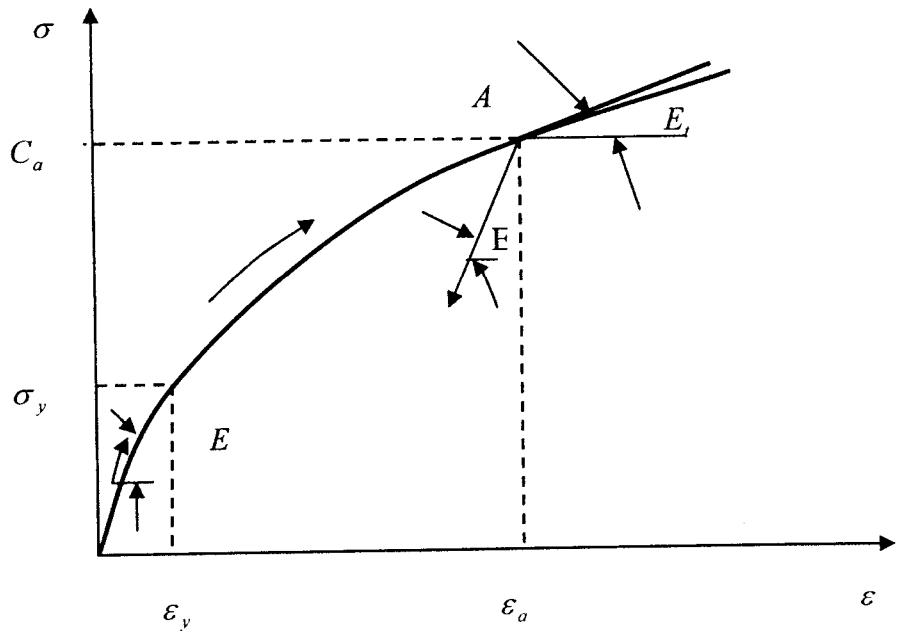
3.2.2 Tekuk tidak elastis

Terdapat beberapa teori mengenai tekuk tidak elastis, diantaranya adalah teori modulus tangen yang dikemukakan oleh *Engesser* (1889) dan teori modulus ganda atau teori modulus tereduksi yang juga dikemukakan oleh *Engesser* (1895).

3.2.2.a. Modulus Tangen

Tegangan kritis untuk keruntuhan tidak elastis dapat ditentukan dengan konsep modulus tangen dan modulus tereduksi. *Salmon dan Johnson* (1990), oleh karena kolom dengan panjang yang umum tertekuk pada saat sejumlah seratnya menjadi inelastis, maka modulus elastisitas ketika tertekuk lebih kecil dari harga awalnya. Inilah dasar pemikiran dari *Engesser, Consider, dan Shanley.*

Menurut *Engesser* (1889) yang dikemukakan oleh *Gere* dan *Timoshenko*, kolom tetap lurus sampai sesaat sebelum runtuh dan modulus elastistas pada saat runtuh adalah tangen sudut garis singgung pada kurva tegangan regangan. Hubungan tersebut tampak pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Hubungan tegangan regangan

Beban kritis yang digunakan dalam teori ini sama persis dengan persamaan tekuk elastis, persamaan (3.8), perbedaan yang ada adalah dengan mengganti modulus elastisitas E dengan modulus tangen E_t. Sehingga persamaan 3.8 menjadi :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E_t}{(KL/r)^2} \qquad (3.9)$$

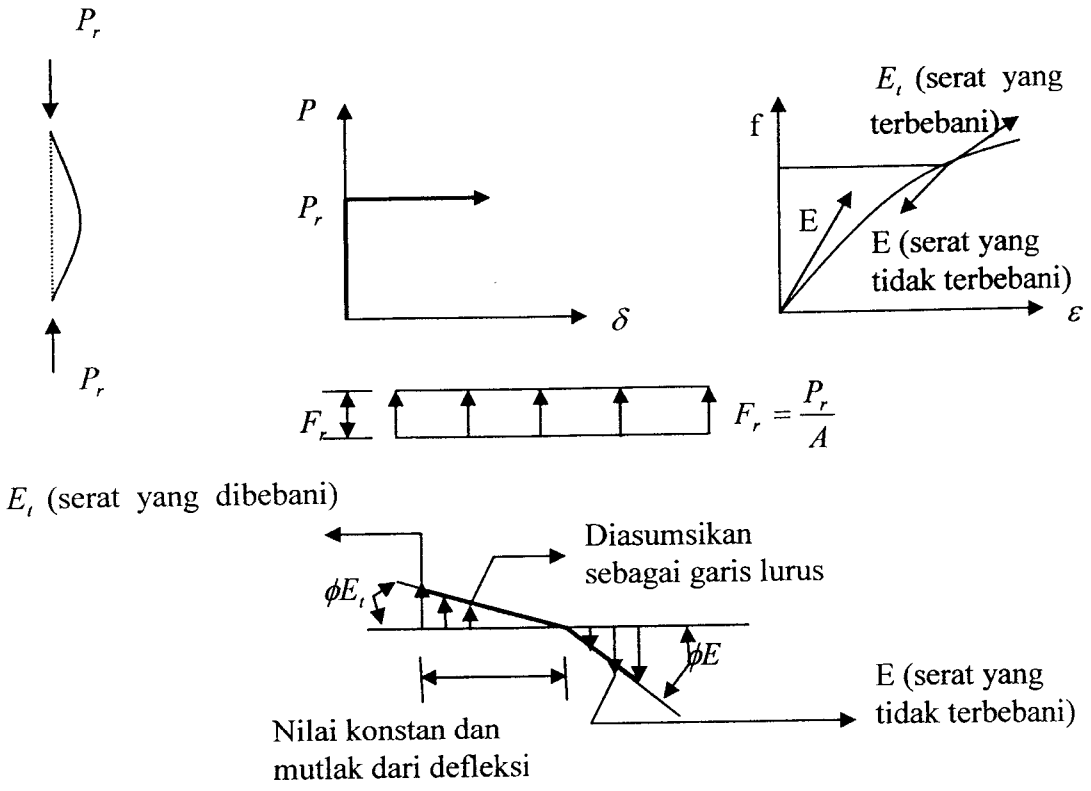
Menurut Padosbajoyo (1992), tegangan kritis maksimum untuk tekuk tidak elastis ditetapkan sama dengan tegangan leleh. Sehingga dengan mengasumsikan bahwa $F_{cr} = F_y$ maka nilai modulus tangen (Et) adalah:

$$E_t = \frac{Fy(KL/r)^2}{\pi^2} \qquad (3.10)$$

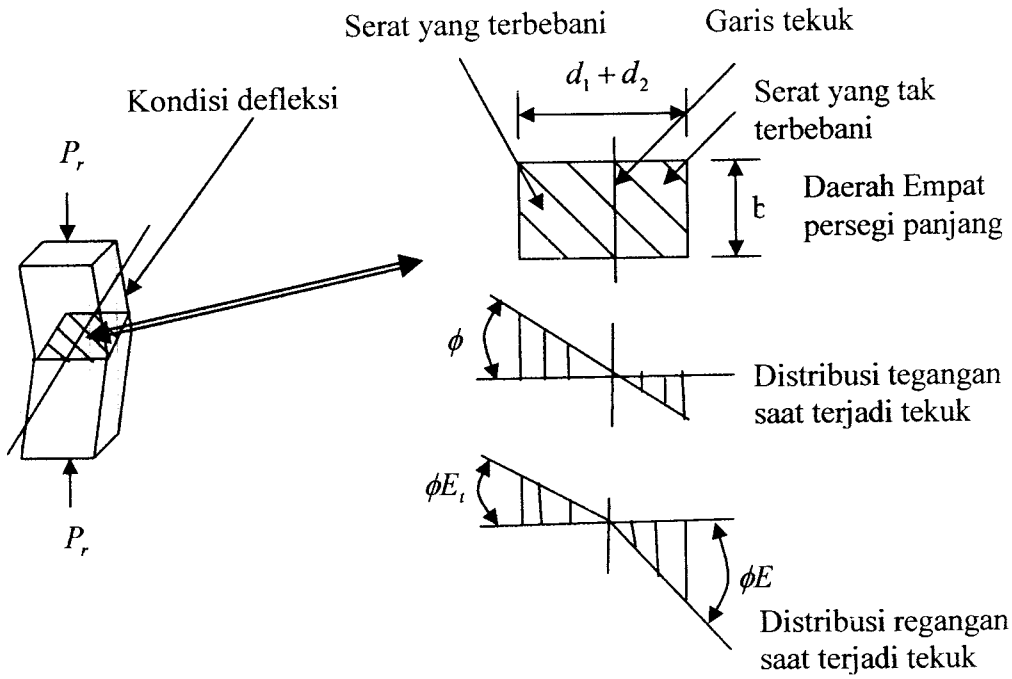
3.2.2.b Modulus Tereduksi

Walau teori modulus tangen mudah untuk digunakan dan memberikan beban kritis yang mendekati hasil penelitian, namun konsep dasar dari teori tersebut tidak sepenuhnya benar karena tidak memperhitungkan perilaku kolom secara lengkap.

Jasinski mengkritik bahwa pembalikan regangan yang terjadi pada batang tidak ikut diperhitungkan. *Engesser* (1895) mengakui kesalahan tersebut dan merubah teorinya dengan alasan bahwa selama melentur, sejumlah serat mengalami kenaikan regangan, sementara beberapa serat tidak dibebani. Untuk itu harga modulus yang berlainan harus dipergunakan, dan memunculkan teori baru yaitu teori *Modulus Tereduksi.* Penjelasan Teori modulus tereduksi dapat dilihat pada Gambar 3.3. dan 3.4 :



Gambar 3.3 Konsep Modulus Tereduksi



Gambar 3.4 Tekuk kolom, konsep modulus tereduksi

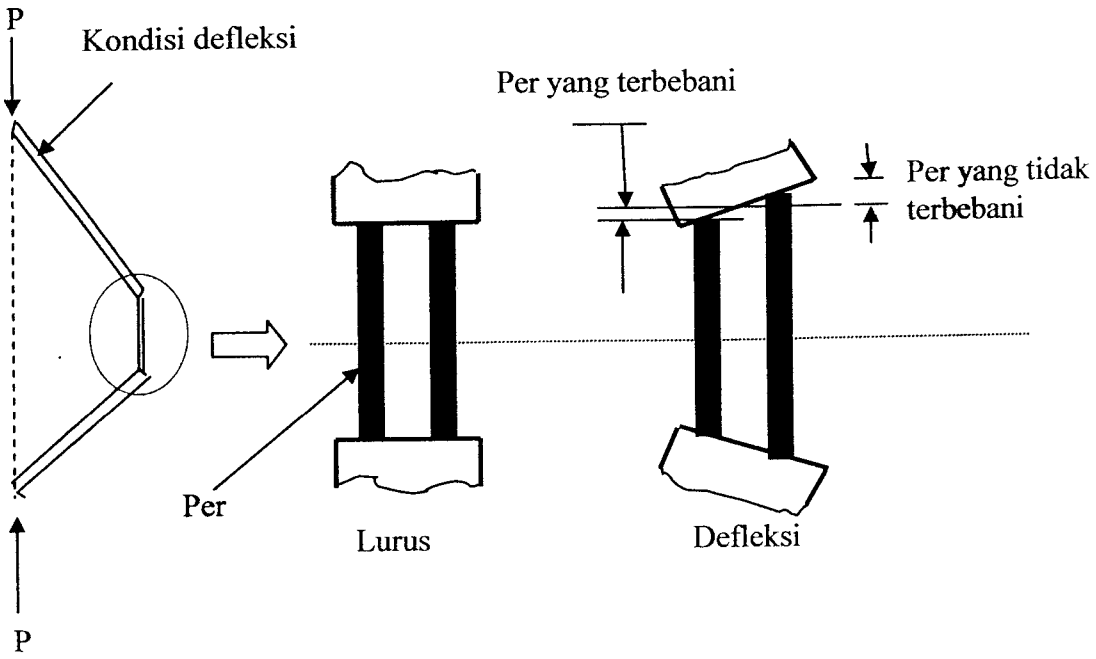
Adapun persamaan modulus tereduksi menurut Gere dan Timoshenko (1961) dapat dilihat pada persamaan 3.11 dan 3.12

$$E_r = \frac{4E.E_t}{(\sqrt{E} + \sqrt{E_t})^2} \qquad (3.11)$$

$$E_r = \frac{2E.Et}{E + Et} \qquad (3.12)$$

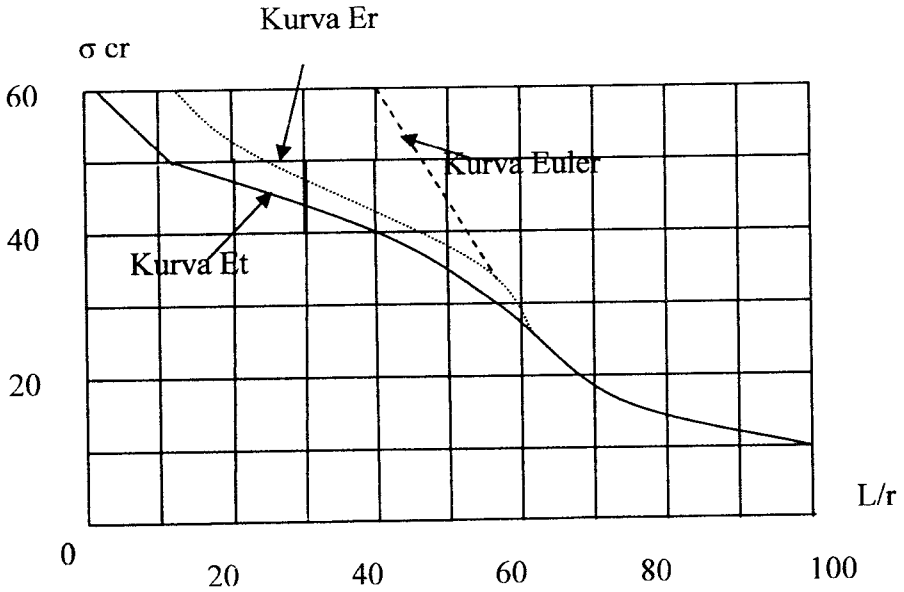
Teori tangen modulus selalu memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan teori modulus tereduksi. *Shanley*(1947) menjelaskan alasan kenapa teori modulus tangen memiliki nilai lebih dekat dengan kondisi aslinya dengan menggunakan 2 batang kolom ideal, yang dikenal dengan *Shanley model*. *Shanley* menjelaskan bahwa perbedaan utama dari teori modulus tereduksi adalah bahwa hanya momen tekuk yang meningkat, sementara gaya aksial yang terjadi konstan. Teori *Shanley* (1974) dapat dilihat pada Gambar 3.5.

Pada Gambar 3.5 terlihat bahwa kedua ujung bagian yang padat dihubungkan dengan per pada bagian tengah. Tingkah laku dari per dipakai untuk mempelajari tingkah laku dari kolom. Shanley (1947) menyatakan bahwa ketika mencapai beban kritis modulus tangen,tidak ada yang bisa mencegah kolom untuk mengalami tekuk secara simultan dengan meningkatkan beban aksial. Pernyataan ini dapat dinyatakan sebagai konsep baru tingkah laku kolom.



Gambar 3.5. Model kolom *Shanley(1974)*

Perbandingan nilai Et dan Er pada perhitungan tegangan kritis dapat dilihat pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Grafik tegangan berdasar persamaan *Euler*

Dari gambar 3.6 tampak bahwa tegangan kritis kolom yang menggunakan modulus tangen (Et) berada dibawah tegangan kritis yang menggunakan modulus tereduksi (Er).

Dikarenakan sifat baja menyerupai sifat almunium, maka modulus tangen dan modulus reduksi baja dapat juga dicari dari perbandingan kelangsingan baja terhadap almunium. Seperti pada tabel 3.1 tekuk plastis almunium yang dikemukakan oleh *Chen* (1976) :

Tabel 3.1 Tabel tekuk plastis almunium *Chen* (1976)

Stress σ (ksi)	Tangen modulus		Modulus reduksi	
	Et (ksi)	l/r	Er (ksi)	l/r
10	10600	105	10600	105
20	10600	72.5	10600	72.5
30	10600	59	10600	59
40	10600	51	10600	51
45	3000	26	5100	33.5
50	1000	14	2300	21.3
55	500	9.5	1300	15.3
60	400	8.1	1100	13.5

Tekuk tidak elastis terjadi pada batang tekan dengan kelangsingan (KL/r) $\leq \lambda c$. Tegangan kritis untuk tekuk tidak elastis umumnya diturunkan dari hasil penelitian. Tegangan kritis maksimum ditetapkan sama dengan tegangan leleh.
Bentuk umum persamaan tegangan kritis AISC adalah :

$$F_{cr} = F_y - k\left[\frac{KL}{r}\right]^n \qquad (3.13)$$

dengan: k dan n adalah konstanta.

Turunan persamaan 3.13 ke perubahan (KL/r), adalah:

$$\frac{dF_{cr}}{d(KL/r)} = -k.n\left[\frac{KL}{r}\right]^{n-1} \qquad (3.14)$$

$$\frac{dF_{cr}}{d(KL/r)} = -2\frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \quad \text{untuk } (KL/r) > \lambda_c \qquad (3.15)$$

Untuk (KL/r) = λ_c dapat di cari dengan mensubsitusikan persamaan (3.13) dengan persamaan (3.14) maka :

$$k.\lambda_c^{\,n} + \frac{\pi^2 E}{\lambda_c^{\,2}} - F_y = 0 \qquad (3.16)$$

Turunan persamaan 3.16 ke perubahan (KL/r), adalah:

$$\frac{dF_{cr}}{d(KL/r)} = -k.n\,[\lambda_c]^{n-1} \qquad (3.17)$$

Dari persamaan 3.15 dan persamaan 3.17 diperoleh :

$$-k.n\,\lambda_c^{\,n-1} = -2\,\frac{\pi^2 E}{\lambda_c^{\,3}} \qquad (3.18)$$

atau

$$k.n\,\lambda_c^{\,n-1} - 2\,\frac{\pi^2 E}{\lambda_c^{\,3}} = 0 \qquad (3.19)$$

Berdasarkan hasil tes, nlai n yang sesuai untuk kolom baja adalah 2. Nilai k dan λ_c dapat ditentukan dengan persamaan 3.16 dan persamaan 3.19

$$2.k\,\lambda_c^{\,n-1} - 2\,\frac{\pi^2 E}{\lambda_c^{\,3}} = 0 \qquad (3.20)$$

diperoleh

$$k = \frac{\pi^2 E}{\lambda_c^{\,4}} \qquad (3.21)$$

Subtitusi persaman 3.18 ke dalam persamaan 3.16, diperoleh :

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{(F_y)^2}} \qquad (3.22)$$

Subsitusi k dan λ_c ke dalam persamaan 3.13 untuk (KL/r) = λ_c diperoleh :

$$F_{cr} = F_y - \frac{\pi^2 E}{\lambda_c^{\,4}}\lambda_c^{\,2} \text{ atau } F_{cr} = F_y - \frac{\pi^2 E}{\lambda_c^{\,2}} \qquad (3.23)$$

$$F_{cr} = F_y - \frac{\pi^2 E.F_y}{2.\pi^2.E}$$

$$F_{cr} = 0.5 F_y$$

$$0.5\ F_{cr} = F_y - k.F_{cr}$$

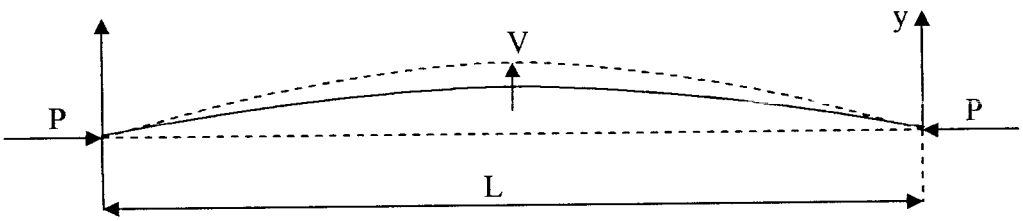
diperoleh k = 0,5.

Persamaan tegangan kritis untuk kolom dengan kelangsingan $0 \leq (KL/r) \leq \lambda_c$

$$F_{cr} = F_y \left(1 - \frac{(KL/r)^2}{2\lambda_c^{\ 2}} \right) \qquad (3.24)$$

3.2.3 Geser kolom tunggal

Gambar 3.7 menunjukan sebuah kolom tunggal yang dibebani gaya tekan (P). Akibat pengaruh beban (P), kolom melentur dan di dalam penampangnya timbul gaya geser (V).



Gambar 3.7 Pengaruh Beban (P) yang menyebabkan gaya geser

Pelenturan akibat gaya tekan ditunjukkan dengan garis lengkung penuh sedangkan pelenturan akibat gaya lintang dinyatkan dengan garis putus-putus.

Ditinjau penampang batang yang letaknya x dari ujung bawah. Andaikan pelenturan akibat beban (P), dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{P.y}{EI} \qquad (3.25)$$

Gaya geser (V) yang timbul pada penampang batang adalah :

$$V = \frac{Mx}{dx} \qquad \text{atau} \qquad V = P.\frac{dy}{dx} \tag{3.26}$$

Kemiringan (slop) yang terjadi akibat gaya geser adalah :

$$\theta = \frac{Tegangan\ Geser}{Modulus\ Geser} \tag{3.27}$$

memperhtungkan faktor bentuk (β) diperoleh :

$$\theta = \frac{\beta.v}{A.G} \qquad \text{atau} \qquad \theta = \frac{\beta}{A.G} P.\frac{dy}{dx} \tag{3.28}$$

dengan:

G = Modulus Geser

$$= \frac{E}{2(1+\mu)}$$

μ = nilai banding poison (poison ratio)

Pelenturan akiba gaya lintang dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{\beta}{A.G} P.\frac{d^2y}{dx^2} \tag{3.29}$$

Pelenturan total (akibat P dan V) adalah :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{P}{EI} y + \frac{\beta P}{A.G}\frac{d^2y}{dx^2}. \tag{3.30}$$

atau

$$\frac{d^2y}{dx^2} + \frac{1}{EI\left(1 - \frac{\beta P}{A.G}\right)}. \tag{3.31}$$

Penyelesaian persamaan diatas adalah :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{A.G} \frac{\pi^2 EI}{L^2}\right)}. \qquad (3.32)$$

dengan : $\frac{\pi^2 EI}{L^2} = P_e$ (beban tekuk euler)

$\frac{1}{\left(1 + \frac{\beta}{A.G} \frac{\pi^2 EI}{L^2}\right)}$ merupakan efek gaya geser

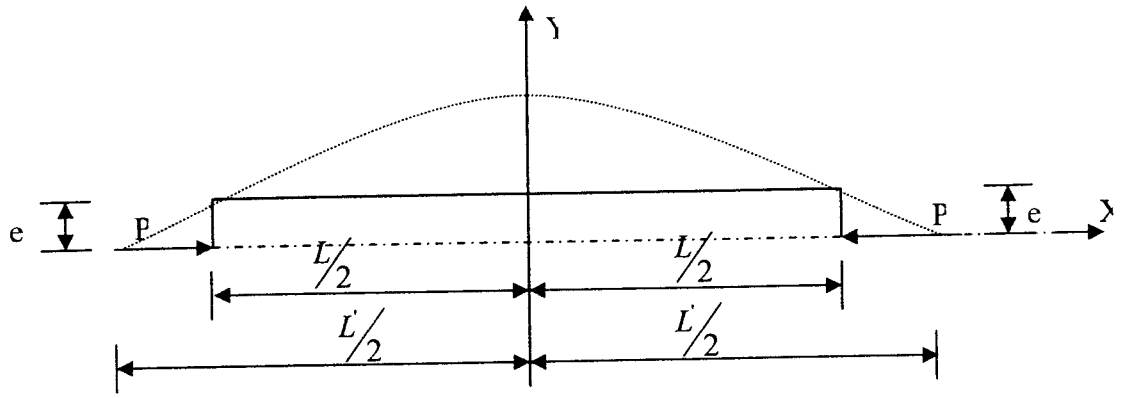
andaikan $\frac{\beta}{A.G} = \frac{1}{p_d}$; persamaan 3.32 dapat dinyatakan dengan persamaan 3.33,

$$P_{cr} = P_e \frac{1}{\left(1 + \frac{P_e}{P_d}\right)}. \qquad (3.33)$$

Dari persamaan 3.33 terlihat bahwa nilai geser kolom tunggal sangat kecil, sehingga pengaruh pada beban kritis yang didapatkan juga kecil.

3.2.4 Kolom tunggal dengan pembebanan eksentris

Bila pada suatu batang diberi beban dengan eksentrisitas (e) yang diukur dari sumbu batang, maka beban tekan aksial eksentrisitas ini ekuivalen dengan beban sentris (P) dan momen (M=P.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 3.8 :



Gambar 3.8 Kolom dengan beban P dan eksentris e

Salah satu rumus batang tekan yang memperhitungkan pengaruh eksentrisitas awal (Gambar 3.8) adalah rumus Secant (*Padosbajayo,1992*), Persamaan pelenturan kolomadalah sebagai berikut :

$$y = \delta \sin\left(x\sqrt{\frac{P}{EI}} \right) \tag{3.34}$$

Karena $\sqrt{\frac{P}{EI}} = \frac{\pi}{L}$, maka persamaan 3.34 dapat dinyatakan dengan :

$$y = \delta \sin\left(x\frac{\pi}{L} \right) \tag{3.35}$$

Jika sumbu koordinat melalui tengah-tengah kolom, maka panjang kolom ekuivalen (L') menjadi ;

$$y = e\frac{\cos \pi x}{\cos\left(\frac{\pi L}{2L} \right)} \tag{3.36}$$

Harga L' diperoleh dari persamaan Euler, dimana $\frac{\pi}{L'} = \sqrt{\frac{P}{EI}}$. Bila nilai $\frac{\pi}{L'}$ disubtitusikan kedalam persamaan 3.36, diperoleh :

$$y = e\frac{\cos\left(x\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}{\cos\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)} \tag{3.37}$$

Turunan kedua dari persamaan 3.36 menunjukkan persamaan garis lengkung, yaitu :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{eP}{EI}\frac{\cos\left(x\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)}{\cos\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)} \tag{3.38}$$

Dari persamaan garis elastis, momen lentur maksimum diperoleh pada x = 0 ;

$$M = -P.e.\sec\left(\frac{L}{2}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right) \tag{3.39}$$

Tegangan maksimum akibat kombinasi gaya tekan dan momen lentur adalah :

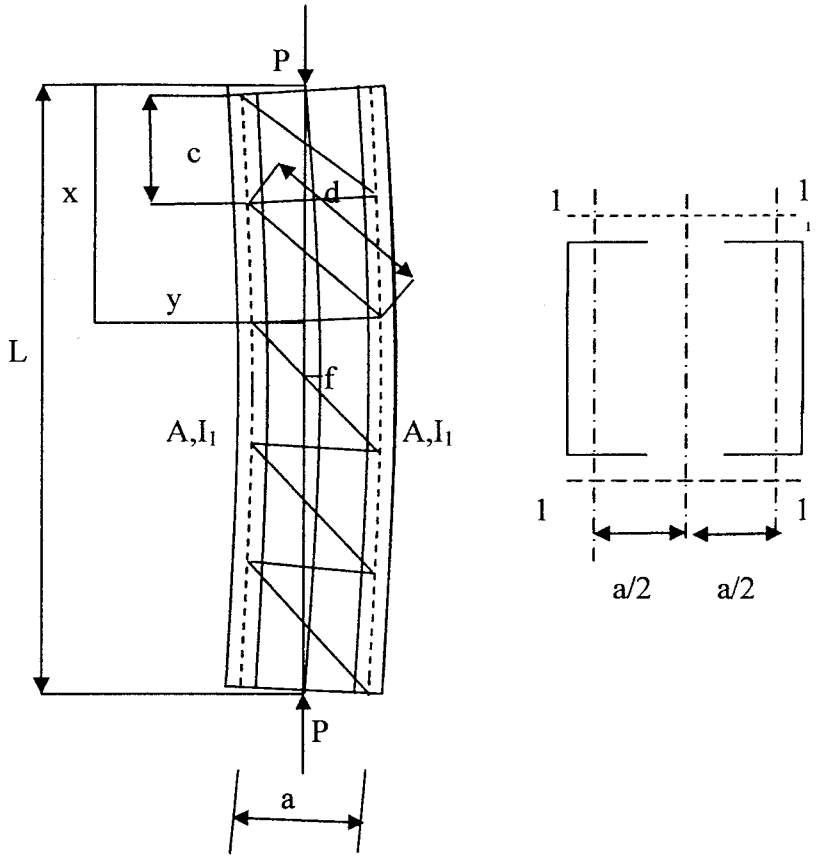
$$F_{mak} = \frac{P}{A} + \frac{M.C}{I} \tag{3.40}$$

Karena I = A.i², maka dengan menggunakan (M) pada persamaan 3.38, persamaan 3.39 menjadi :

$$F_{mak} = \frac{P}{A}\left(1 + \frac{e.c}{i^2}\sec\left(\frac{L}{2.i}\sqrt{\frac{P}{EI}}\right)\right) \tag{3.41}$$

3.3 Kolom tersusun

Kolom bangun adalah gabungan dua batang atau lebih, dimana batang yang satu dengan batang yang lain dihubungkan sedemikian rupa sehingga membentuk satu kesatuan. Kolom tersebut dibuat dari beberapa profil dengan penampang tetap dan tidak tetap dengan konfigurasi batang perangkai.Beberapa bentuk konfigurasi batang perangkai ditunjukkan pada Gambar 3.9:



Gambar 3.10 Kolom bangun yang dibebani gaya aksial
(*Frederich Bleich*,1952)

Es = Energi regangan

Bagian ½(2$\frac{F^2c}{E_tA}$) adalah energi regangan yang bekerja pada batang tunggal atau batang tepi

Bagian kedua persamaan ½($\frac{D^2d}{EA_d}$) = energi regangan yang bekerja pada batang diagonal

Bagian ketiga persamaan ½($\frac{B^2a}{EA_b}$) = energi regangan yang bekerja pada batang tranversal

c adalah jarak antar pias/panel perangkai

d adalah panjang batang diagonal

a adalah jarak antar batang tepi

Ad adalah luas penampang sepasang batang diagonal(2 batang)

Ab adalah luas penampang batang transversal

Momen pada penampang yang berjarak x dari ujung atas kolom dinyatakan dengan persamaan 3.43:

$$M_x = P_c y = P_c f.\sin\frac{\pi x}{L} \tag{3.43}$$

Gaya geser adalah turunan pertama momen sehingga

$$Q_x = \frac{dM_x}{dx} = P_c f \frac{\pi}{L}\cos\frac{\pi\chi}{L} \tag{3.44}$$

Gaya pada batang tepi(F), yaitu gaya geser dibagi dengan jarak antar batang tepi (a) menjadi :

$$F = \frac{M_x}{a} = \pm P_c \frac{f}{a}\sin\frac{\pi x}{L} \tag{3.45}$$

Gaya yang bekerja pada batang diagonal (D) yaitu tegangan geser dikali dengan perbandingan jarak diagonal dan transversal, sehingga dimasukan dalam persamaan menjadi:

$$D = Q_x \frac{d}{a} = \pm P_c f \frac{d}{a}\frac{\pi}{L}\cos\frac{\pi x}{L} \tag{3.46}$$

Gaya yang bekerja pada batang transversal (B) yaitu tegangan geser dikali dengan perbandingan jarak transversal dan transversal, sehingga dimasukan dalam persamaan menjadi:

$$B = Q_x = \pm P_c f \frac{\pi}{L}\cos\frac{\pi x}{L} \tag{3.47}$$

Dengan anggapan $\frac{\pi x}{L} = \frac{2r-1}{2n}\pi$,dimana r =1,2,3,....n-1 dan n adalah jumlah pias/panel dan r adalah jumlah kelengkungan, sehingga :

$$E_s = \frac{P_c^2 f^2}{2}\frac{c}{a^2}\frac{2}{E_t A}\sum_{r=1}^{n}\sin^2\frac{2r-1}{2n}\pi + \frac{P_c^2 f^2}{2}\frac{d^3}{a^2}\frac{\pi^2}{L^2}\frac{L}{EA_d} + \sum_{r=1}^{n}\cos^2\frac{2r-1}{2n}\pi$$
$$+ \frac{P_c^2 f^2}{2}\frac{\pi^2}{L^2}\frac{L}{EA_b} + \sum_{r=1}^{n}\cos^2\frac{2r-1}{n}\pi$$

Momen inersia $I_0 = A.a^2/2$,maka :

$$\frac{P_c^2 f^2}{2}\frac{c}{a^2}\frac{2}{E_t A} = \frac{P_c^2 f^2}{2}\frac{c}{E_t I_0}$$

$$\sum_{r=1}^{n}\sin^2\frac{2r-1}{2n}\pi = \sum_{r=1}^{n}\cos^2\frac{2r-1}{2n}\pi = \frac{n}{2} = \frac{1}{2c} \qquad (3.48)$$

Bentuk persamaan energi tegangan Es adalah :

$$E_s = P_e^2\frac{f^3 L}{4}\left(\frac{1}{E_t I_0} + \frac{d^3}{ca^2}\frac{\pi^2}{L^2}\frac{1}{EA_d} + \frac{a}{c}\frac{\pi^2}{L^2}\frac{1}{EA_b}\right) \qquad (3.49)$$

Persamaan gaya luar (W) :

$$W = P_c\Delta L = \frac{P_c}{2}\int_0^1 y'^2 dx \qquad (3.50)$$

Karena $y' = (\pi/L) f\cos(\pi x/L)$,hsetela di integralkan didapat :

$$W = P_c\frac{\pi^2 f^2}{4L} \qquad (3.51)$$

Subsitusi (E_s) dan (W) dari Persamaan (3.49 dan 3.51) kedalam persamaanadalah :

$$\frac{\pi^2}{L} - P_c L\left(\frac{1}{E_t I_0} + \frac{\pi^2}{L^2}\frac{d^3}{ca^2}\frac{1}{EA_d} + \frac{\pi^2}{L^2}\frac{a}{c}\frac{1}{EA_b}\right) = 0 \qquad (3.52)$$

Persamaan 3.59 diturunkan dan didapat persamaan beban kritis (*Fredrich Bleich*) :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI_0}{L^2}\frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI_0}{L^2}\frac{1}{Ech^2}\left(\frac{d^3}{A_d} + \frac{a^3}{A_b}\right)} \qquad (3.53)$$

Jika perangkai sangat kaku, $A_d = A_b = \infty$, maka bagian kedua penyebut akan bernilai = 0, sehingga persamaa 3.43 akan kembali menjadi persamaan beban kritis Euler $\frac{\pi^2 EI}{L}$, dimana beban kritis kolom bangun tersebut mempunyai momen inersia $I_0 = A.a^2/2$. Momen sebenarnya dari penampang kolom adalah :

$$I = I_0 + 2\,I_1$$

Dengan subsitusi I pada I_0 didapat persamaan beban kritis kolom bangun prismatis yaitu:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{(K.k_1.L)^2} \qquad (3.54)$$

Dengan mengasumsikan kolom dengan tumpuan sendi-sendi maka K(faktor tekuk) = 1, sehingga persamaan 3.61 menjadi :

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{(k_1.L)^2} \qquad (3.55)$$

$$k_1 = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 E_t I_0}{L^2}\frac{1}{E.ch^2}\left[\frac{d^3}{Ad} + \frac{a^3}{Ab}\right]} \qquad (3.56)$$

Dengan k1 merupakan faktor geser, E adalah modulus elastis kolom, L adalah panjang kolom, I_0 adalah inersia batang perangkai ($I_0 = Aa^2/2$), d adalah panjang batang diagonal, h adalah panjag batang horizontal ,A_b adalah luas penampang batang horizontal, A_d adalah luas penampang dua batang diagonal.

Dari persamaan (3.53) dapat kita lihat bahwa semakin besar luas penampang batang diagonal (A_d) maka nilai k akan semakin kecil dan P_{cr} akan semakin besar. semakin panjang elemen batang yang dibatasi oleh ujung-ujung batang penghubung (c)maka nilai k akan semakin kecil dan P_{cr} akan semakin besar dan tegangan kritis (F_{cr})akan semakin membesar.

3.3.2 Kolom tersusun nonprismatis perangkai diamond

Pada persamaan 3.42 yang dikemukakan oleh *Bleich (1952)* maka untuk kondisi batang perangkai diamond yang dibebani gaya aksial (Gambar 3.9) mempunyai persamaan energi regangan:

$$E_s = \frac{1}{2}\left(2\sum\frac{F^2c}{E_tA} + \sum\frac{D^2d}{EA_d}\right) \tag{3.57}$$

Es = Energi regangan

Bagian pertama persamaan ½(2$\frac{F^2c}{E_tA}$) = energi regangan yang bekerja pada batang tepi.

Bagian kedua persamaan ½($\frac{D^2d}{EA_d}$) = energi regangan yang bekerja pada batang diagonal

c adalah jarak antar pias/panel perangkai

d adalah panjang batang diagonal

Ad adalah luas penampang sepasang batang diagonal(2 batang)

Momen pada penampang yang berjarak x dari ujung atas kolom dinyatakan dengan persamaan :

$$M_x = P_c y = P_c f.\sin\frac{\pi x}{L} \tag{3.58}$$

Gaya geser adalah turunan pertama momen sehingga

$$Q_x = \frac{dM_x}{dx} = P_c f\frac{\pi}{L}\cos\frac{\pi x}{L} \tag{3.59}$$

Gaya yang bekerja pada batang tepi (F), yaitu persamaan 3.65 dibagi dengan jarak antar batang tepi (a) menjadi :

$$F = \frac{M_z}{a} = \pm P_c \frac{f}{a} \sin \frac{\pi x}{L} \tag{3.60}$$

Gaya yang bekerja pada batang diagonal (D) yaitu tegangan geser dikali dengan perbandingan jarak diagonal dan transversal, sehingga dimasukan dalam persamaan menjadi:

$$D = Q_x \frac{d}{a} = \pm P_c f \frac{d}{a} \frac{\pi}{L} \cos \frac{\pi x}{L} \tag{3.61}$$

Gaya yang bekerja pada batang transversal (B) yaitu tegangan geser dikali dengan perbandingan jarak transversal dan transversal, dimasukan dalam persamaan menjadi:

$$B = Q_x = \pm P_c f \frac{\pi}{L} \cos \frac{\pi x}{L} \tag{3.62}$$

Dengan anggapan $\frac{\pi x}{L} = \frac{2r-1}{2n}\pi$,dimana r =1,2,3,....n-1 dan n adalah jumlah pias dan r adalah jumlah kelengkungan sehingga :

$$V = \frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{c}{a^2} \frac{2}{E_t A} \sum_{r=1}^{n} \sin^2 \frac{2r-1}{2n}\pi + \frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{d^3}{a^2} \frac{\pi^2}{L^2} \frac{1}{EA_d} \sum_{r=1}^{n} \cos^2 \frac{2r-1}{2n}\pi \tag{3.63}$$

Momen inersia penampang $I_0 = A.a^2 / 2$ (3.64)

Dengan memasukan persamaan 3.64 ke persamaan 3.63 untuk nilai F yaitu gaya aksial untuk batang tepi di dapat persamaan :

$$\frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{c}{h^2} \frac{1}{E_t A} = \frac{P_c^2 f^2}{2} \frac{c}{E_t I_0} \tag{3.65}$$

Persamaan 3.65 dapat disederhanakan menjadi:

$$\sum_{r=1}^{n} \sin^2 \frac{2r-1}{2n}\pi = \sum_{r=1}^{n} \cos^2 \frac{2r-1}{2n}\pi = \frac{n}{2} = \frac{L}{2c} \tag{3.66}$$

Sehingga subtitusi persamaan 3.65 dan 3.63 ke dalam persamaan 3.54 menjadi:

$$E_s = P_e^{\,2} \frac{f^2 L}{4}\left(\frac{1}{E_t I_0} + \frac{d^3}{ch^2}\frac{\pi^2}{L^2}\frac{1}{EA_d}\right) \tag{3.67}$$

Kerja W adalah gaya kali perpindahan sehingga:

$$W = P_c \Delta L = \frac{P_c}{2}\int_0^1 y'^2\, dx \tag{3.68}$$

Dengan $y' = (\pi / L) f \cos(\pi x / L)$,setelah di integralkan didapat :

$$W = P_c \frac{\pi^2 f^2}{4L} \tag{3.69}$$

Subsitusi (E_s) dan (W) dari Persamaan (3.67) dan (3.69) untuk E_s -W= 0 adalah :

$$\frac{\pi^2}{L} - P_c L\left(\frac{1}{E_t I_0} + \frac{\pi^2}{L^2}\frac{d^3}{ch^2}\frac{1}{EA_d}\right) = 0 \tag{3.70}$$

Sehingga Persamaan beban kritis kolom prismatis perangkai diamond adalah

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I_0}{L^2}\frac{1}{1 + \dfrac{\pi^2 E I_0}{L^2}\dfrac{1}{Ech^2}\dfrac{d^3}{A_d}} \tag{3.71}$$

Dari Persamaan (3.71) nilai P_{cr} akan semakin besar bila panjang batang diagonal (d) atau horisontal (a) di bagi dengan luas penampang diagonal(A_d) atau horisontal (A_b) makin kecil. Jika perangkai sangat kaku, $A_d = A_b = \infty$, persamaan (3.71) akan menjadi tegangan kritis $\pi^2 E_t I_0 / I^2$ dimana tegangan kritis kolom

(3.71) akan menjadi tegangan kritis $\pi^2 E_t I_0 / I^2$ dimana tegangan kritis kolom tersusun tersebut mempunyai momen inersia $I_0 = A.a^2/2$. Momen sebenarnya dari penampang kolom adalah :

$$I = 4I_0 + 4\,I_1$$

Dengan subsitusi I pada I_0 pada persamaan (3.71) didapat persamaan Kritis Kolom Tersusun Prismatis Dengan Perangkai Diagonal yaitu:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{(Kk_1 L)^2} \tag{3.72}$$

Dengan mengasumsikan kolom dengan tumpuan sendi-sendi, maka persamaan 3.72 menjadi:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_t I}{(k_1 L)^2} \tag{3.73}$$

$$k_1 = \sqrt{1 + \frac{\pi^2 E\ I_0}{L^2} \frac{1}{Ech^2} \frac{d^3}{A_d}} \tag{3.74}$$

Dimana k1 merupakan faktor geser, E adalah modulus elastis kolom, L adalah panjang kolom, I_0 adalah inersia batang perangkai ($I_0 = A.a^2/2$), d adalah panjang batang diagonal, aadalah panjag batang horizontal ,A_b adalah luas penampang satu batang horizontal, A_d adalah luas penampang satu batang diagonal.

Dari persamaan (3.71) dapat kita lihat bahwa semakin besar luas penampang batang diagonal (A_d) maka nilai k akan semakin kecil dan P_{cr} akan semakin besar. semakin panjang elemen batang yang dibatasi oleh ujung-ujung batang penghubung (c)maka nilai k akan semakin kecil dan P_{cr} akan semakin besar dan tegangan kritis (F_{cr})akan semakin membesar.

Perbedaan antara kolom non prismatis dengan kolom prismatis adalah penggunaan nilai μ (angka poison). Nilai ini berfungsi sebagai reduksi beban kritis.

Angka poison (μ), merupakan nilai hasil perbandingan (rasio) antara ho dan hm. Persamaan untuk mencari angka poison dapat dilihat pada persamaan 3.75 :

$$\mu = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{h_0}{h_m}\right)^2 \left[\frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{\left(\log_e h_0 - \log_e h_m\right)^2}\right] \qquad (3.75)$$

Hubungan nilai ho/hm dan nilai μ dari persamaan perangkai diamond yang diadopsi dari *Bleich* (1952) dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

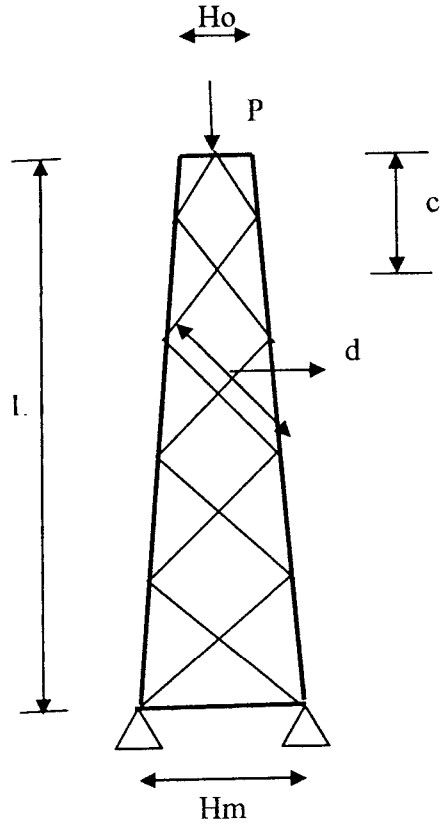
Tabel 3.2 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm)

ho/hm	0	0.1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
μ	0,025	0,173	0,263	0,433	0,618	0,804	1

Dengan memasukkan nilai μ kedalam persamaan 3.71, didapat persamaan beban kritis kolom non prismatis perangkai diamond, yaitu :

$$P_{cr} = \mu \frac{\pi^2 E\, I_0}{L^2} \frac{1}{1 + \dfrac{\pi^2 E\, I_0}{L^2} \dfrac{1}{Ech^2} \dfrac{d^3}{A_d}} \qquad (3.76)$$

Dari persamaan 3.83 terlihat bahwa semakin besar nilai μ, maka beban kritis akan semakin besar, dan semakin nilai μ maka beban kritis yang dihasilkan juga semakin kecil.

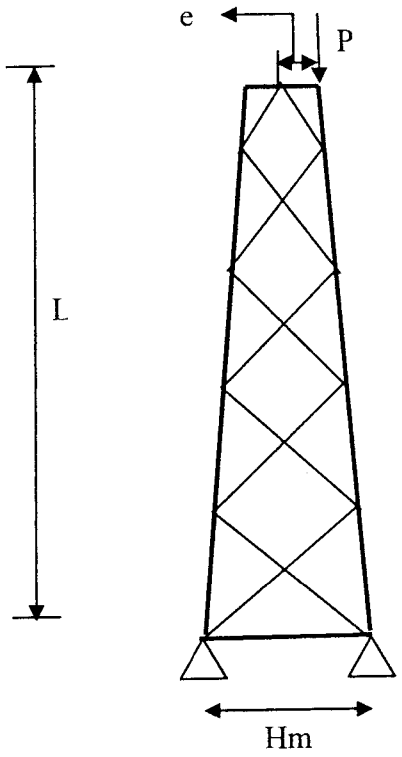


Gambar 3.11 Kolom tersusun yang dibebani gaya aksial dengan perangkai diamond

3.3.3 Kolom bangun nonprismatis perangkai diamond dengan pembebanan eksentris

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 – gaya selain gaya aksial berupa gaya momen yang disebabkan oleh eksentrisitas

Pembebanan eksentris pada kolom tersusun ditunjukkan pada gambar 3.12 berikut ini :



Gambar 3.12. Kolom bangun perangkai diamond dengan pembebanan eksentris

Pada saat kolom bangun diberi beban sebesar P dan sejauh e dari pusat berat panampang, sehingga pada panampang (m-n) bekerja interaksi gaya antara tegangan yang ditimbulkan oleh gaya tekan aksial (fa) dan momen yang terjadi (fb). Besarnya gaya yang ditimbul kan oleh P adalah :

$$f_a = \frac{P}{A} \tag{3.77}$$

Tegangan yang ditimbulkan akibat momen lentur adalah :

$$f_b = \frac{M.C_x}{I_y} \tag{3.78}$$

Dengan M=P.e, maka persamaan 3.85 berubah menjadi

hm

$$f_b = \frac{P.e.C_x}{I_y} \tag{3.79}$$

Besarnya tegangan kritis (Fcr) pada penampang kolom yang bekerja beban secara eksentris adalah:

$$F = \frac{P}{A} + \frac{P.e.C_x}{I_y} \tag{3.80}$$

Dengan mengasumsikan bahwa tegangan kritis (Fcr) maksimum yang terjadi adalah tegangan kritis (Fcr) kolom pada saat menerima beban secara sentris , maka untuk berbagai macam nilai eksentrisitas persamaan 3.76 menjadi:

$$P_{cr} = \frac{\mu\pi^2 EI_0}{L^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E\ I_0}{L^2} \frac{1}{Ech^2} \frac{d^3}{A_d}} = P\left(\frac{1}{A} + \frac{e.C_x}{I_y}\right) \tag{3.81}$$

Untuk mencari besaranya nilai beban kritis kolom (Pcr) maka Persamaan 3.81 menjadi:

$$P_{cr} = \frac{\mu\pi^2 E\ I_0}{L^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI_0}{L^2} \frac{1}{Ech^2} \frac{d^3}{A_d}} \frac{1}{\left(1 + \frac{e.C_x}{r^2}\right)} \tag{3.82}$$

Tabel 3.3 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm)

ho/hm	0	0.1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
μ	0,025	0,173	0,263	0,433	0,618	0,804	1

Dari persamaan 3.89 terlihat bahwa semakin besar nilai eksentrisitas (e), maka beban kritis (Pcr) kolom semakin kecil.

3.4. Kuat Tekan

Kekuatan tekan suatu struktur kolom dalam menahan gaya tekan dipengaruhi oleh banyak factor, antara lain sifat bahan, geometri penampang, dan kelangsingan. Faktor yang dibahas dalam penelitian ini adalah factor geometri penampang yang diwakili dengan rasio b/t dan factor kelangsingan yang diwakili dengan rasio L/r. Rasio b/t berpengaruh pada kekuatan struktur kolom terhadap tekuk keseluruhan

3.4.1. Tekuk keseluruhan

Menurut persamaan *Euler* dikemukakan oleh *Lambert Tall* (1974), beban kritis kolom diturunkan dari persamaan pelenturan sebuah batang lurus yang semua seratnya tetap elastis hingga batang tersebut tidak mampu lagi menahan penambahan beban, batang tersebut memiliki dukungan sederhana pada ujung-ujungnya dan diberi gaya aksial tekan sentris.

Persamaan garis elastis untuk kolom yang ujung-ujungnya sendi-sendi ditunjukkan dengan persamaan 3.83

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \qquad (3.83)$$

Persamaan diatas memperlihatkan dengan jelas kapasitas pikul beban suatu kolom selalu berbanding terbalik derngan kuadrat panjang tekuk, sebanding dengan modulus elastis material dan momen inersia penampang. Semakin panjang kolom maka semakin kecil beban yang dapat menyebabkan kolom tersebut tertekuk, sebaliknya semakin pendek kolom maka semakin besar beban yang dapat menyebabkan kolom tersebut tertekuk

3.4.2 Tekuk lokal

Apabila beban bekerja eksentris, maka distribusi tegangan yang timbul tidak akan merata. Efek beban eksentris menimbulkan momen lentur pada elemen yang berinteraksi dengan tegangan tekan langsung. Bahkan, apabila beban itu mempunyai eksentrisitas yang relatif besar, maka diseluruh bagian penampang yang bersangkutan dapat terjadi tegangan tekuk.

Akan tetapi pada beban dengan besar tertentu suatu batang yang lurus, homogen dan dibebani secara sentries akan menjadi tidak stabil. Hal ini berarti dengan beban tersebut suatu kolom akan mulai melentur, meskipun tidak ada beban lentur yang bekerja.

Menurut *Lambert Tall*, tekuk lokal adalah tekuk yang terjadi pada salah satu elemen penyusun tampang suatu struktur. Elemen kolom tersusun memiliki rasio b/t besar, sehingga memungkinkan terjadinya tekuk lokal. Tekuk lokal menyebabkan elemen yang tertekuk tidak dapat lagi menganggung penambahan beban, dengan kata lain efisiensi penampang berkurang. Keruntuhan akibat tekuk lokal ini terjadi pada batang yang langsing dimana tegangan kritis yang dimilik oleh plat jauh dibawah tegangan lelehnya.

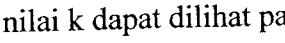
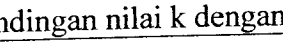
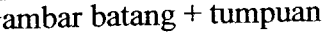
Persamaan umum tegangan tekuk elastis plat menurut *Salmon dan Johnson* (1994) adalah :

$$F_{cr} = k\frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \qquad (3.84)$$

Dari persamaan 3.91 tampak bahwa nilai Fcr dipengaruhi oleh koefisien tekuk plat (k) dan rasio lebar terhadap tebal (b/t). Semakin besar rasio b/t maka semakin kecil kekuatan plat. Semakin besar nilai k maka semakin kecil kekuatan pelat, sehingga menyebabkan tekuk lokal baik pada sayap maupun badan. Kerusakan akibat

tekuk dapat dicegah dengan cara memperkecil rasio b/t dan meningkatkan nilai k. Perbandingan jenis tumpuan dan nilai k dapat dilihat pada Tabel 3.4

Tabel 3.4. Perbandingan nilai k dengan jenis tumpuan

Jenis tumpuan	Gambar batang + tumpuan	k
Kedua tumpuan sendi		4.00
Kedua tumpuan jepit		6.97
Salahsatu tumpuan sendi		0.425
Salahsatu tumpuan jepit		1.277
Satu tumpuan sendi dan satu tumpuan jepit		5.42

3.4.3 Hubungan tekuk lokal dan tekuk keseluruhan

Tekuk lokal dan tekuk lentur dapat terjadi secara bersamaan apabila tegangan kritis plat sama dengan tegangan kritis kolom keseluruhan, seperti pada persamaan :

$$F_{cr}\,pelat = F_{cr}\,keseluruhan \tag{3.85}$$

Maka,

$$F_{cr}\,keseluruhan = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \tag{3.86}$$

sehingga :

$$(KL/r) = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{F_{cr}\,plat}} \tag{3.87}$$

dengan memasukkan persamaan (3.83)kedalam persamaan (3.87), maka :

$$(KL\ /\ r) = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\frac{k\pi^2 E}{12\,(1-\mu^2)(b/t)^2}}} \tag{3.88}$$

$$(KL/r) = (b/t)\sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \tag{3.89}$$

Dengan μ baja =0,3, sehingga :

$$(KL/r) = \frac{3{,}3045(b/t)}{\sqrt{k}} \qquad (3.90)$$

Dari persamaan (3.90) dapat diambil kesimpulan bahwa pada profil baja yang sama apabila semakin panjang batang tersebut maka KL/r akan semakin besar, sehingga Fcr keseluruhan akan semakin kecil bahkan bisa lebih kecil dari Fcr plat, sehingga keruntuhan kolom diakibatkan oleh tekuk keseluruhan kolom. Sebaliknya, pada profil baja yang sama apabila semakin pendek batang tersebut, maka kL/r akan semakin kecil sehingga Fcr keseluruhan akan semakin besar bahkan bisa lebih besar dari Fcr plat, sehingga keruntuhan kolom disebabkan oleh tekuk lokal kolom.

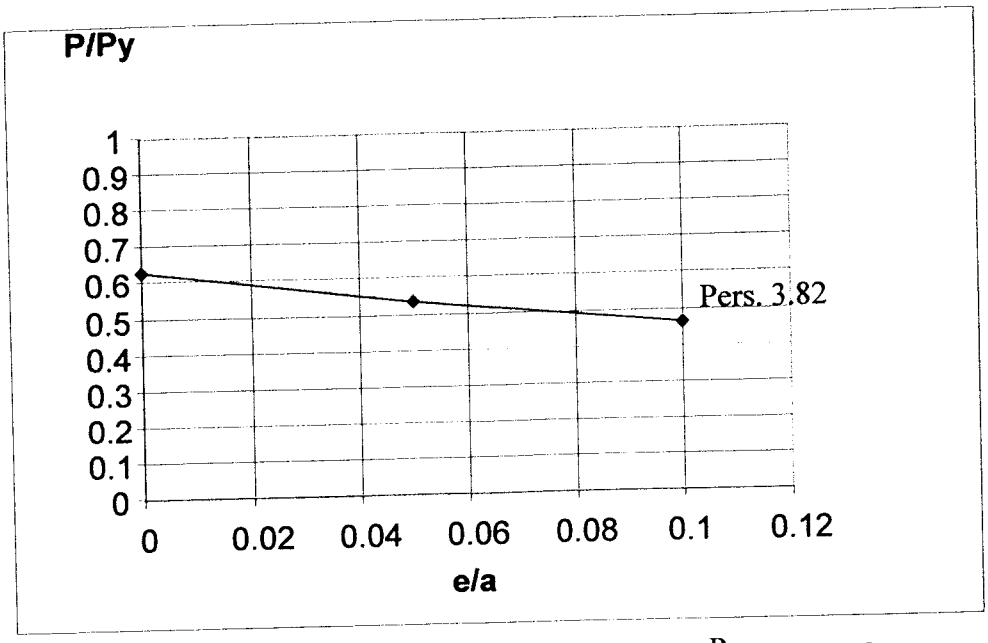
3.5. Hubungan tanpa dimensi antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{a}$

Hasil perhitungan beban (P) kolom untuk variasi eksentrisitas dibandingkan dengan nilai beban pada saat leleh (Py), maka akan didapat rasio $\frac{P}{P_y}$ dengan rasio $\frac{e}{a}$.

Rasio $\frac{e}{a}$ didapat dari besarnya eksentrisitas (e) beban dibagi lebar penampang pendek(a).

Dalam penelitian ini nilai tegangan kritis (Fcr) yang digunakan sebagai batasan yaitu :Tegangan kritis kolom (Fcr) akibat leleh bahan (Fy = 396.1 MPa)

Persamaan 3.89 dapat dinyatakan dalam bentuk grafik hubungan antara $\frac{P}{P_y}$ berbanding $\frac{e}{a}$ sepert pada Gambar 3.9 sebagai berikut



Gambar 3.12 Grafik hubungan antara $\frac{P}{P_y}$ dengan $\frac{e}{a}$

Dari gambar 3.12 dapat diketahui bahwa semakin besar eksentrisitas beban maka besarnya beban kritis yang dapat diterima kolom semakin kecil.

3.6 Hipotesis

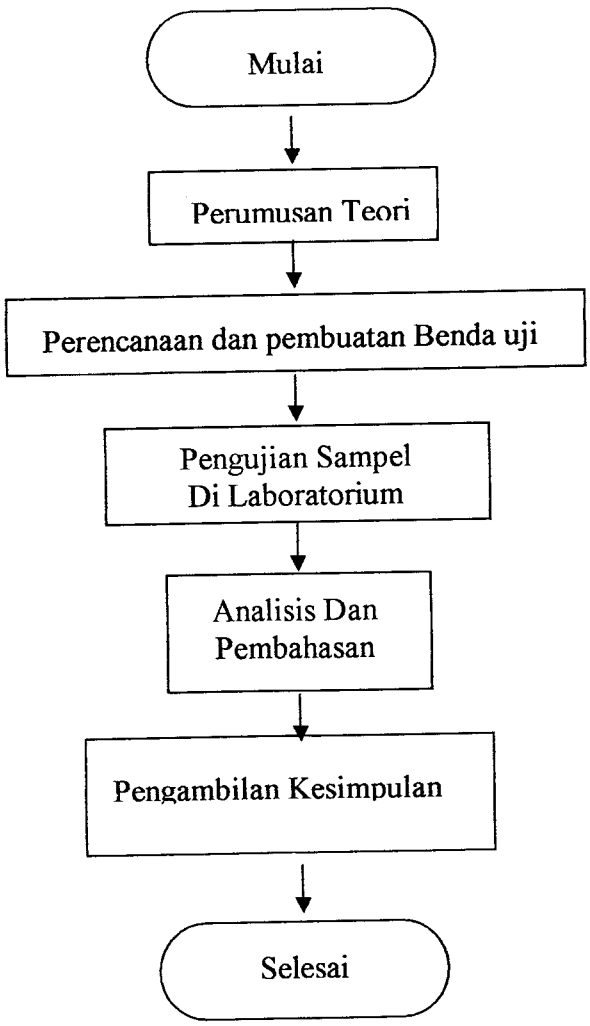
Pada kolom tersusun dengan perangkai melintang dan diagonal dengan memberikan variasi h_0/h_m pada akan mempengaruhi nilai μ , semakin besar nilai h_0/h_m mengakibatkan nilai P_{cr} (beban kritis) semakin besar dan akan mengakibatkan tegangan kritis yang besar. Tegangan kritis lebih besar dari tegangan keseluruhan akan terjadi tekuk keseluruhan *(overall buckling)*. Pembebanan kolom secara eksentris (e) dapat mempengaruhi kapasitas suatu kolom. Semakin besar nilai eksentrisitas maka besarnya beban kritis (Pcr) yang dapat diterima suatu kolom semakin kecil. Perangkai yang digunakan dapat berfungsi sebagi penguat,sehingga memperkecil tekuk lokal yang terjadi.

BAB IV

METODE PENELITIAN

4. 1 Metodologi Penelitian

Metode penelitian adalah suatu urutan atau tata cara pelaksanaan penelitian dalam rangka mencari jawaban atas permasalahan penelitian yang akan dilakukan.



Gambar 4.1 Flowchart metodologi penelitian

4.2 Bahan dan Alat yang digunakan

Untuk kelancaran penelitian diperlukan beberapa peralatan dan bahan yang digunakan sebagai sarana untuk mencapai maksud dan tujuan penelitian. Adapun bahan dan alat yang dipergunakan adalah sebagai berikut.

4.2.1 Bahan

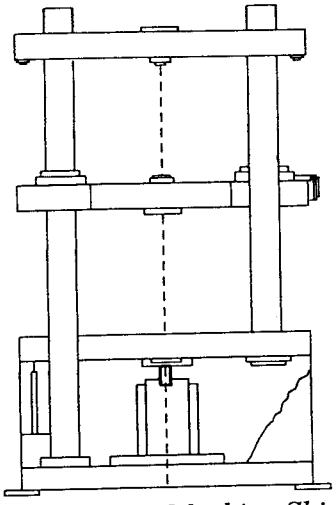
Bahan yang digunakan untuk benda uji adalah baja. Siku dan baja pelat yang di hubungkan dengan alat sambung las.

4.2.2 Peralatan Penelitian

Peralatan-peralatan yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah:

a. Mesin Uji Kuat Tarik

Digunakan untuk mengetahui kuat tarik baja. Pada penelitian ini digunakan *UNIVERSAL TESTING MACHINE (UTM)* merk *SHIMATSU* type UMH 30, dengan kapasitas 30 ton, seperti pada Gambar 4.2

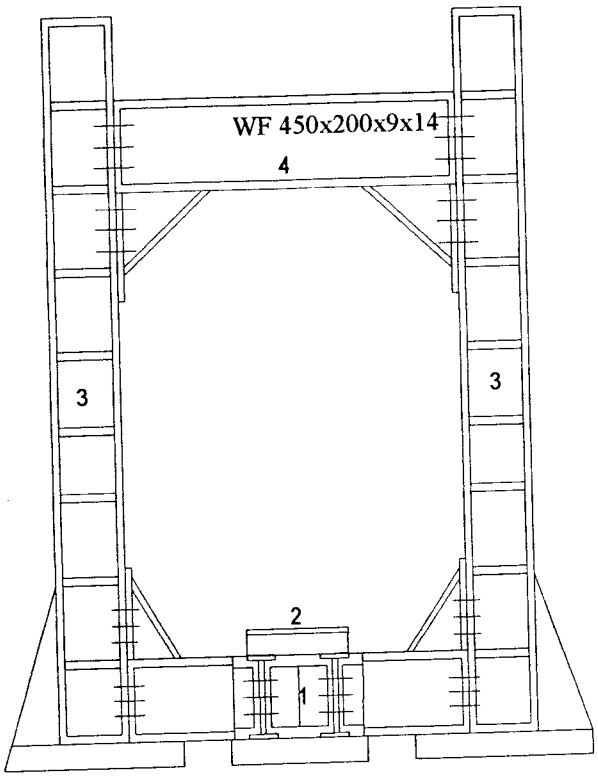


Gambar 4.2. *Universal Testing Machine Shimitzu UMH30*

b. Loading Frame

Bentuk dasar *Loading Frame* berupa portal segi empat yang berdiri diatas 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 mm. Posisi balok portal dapat diatur untuk menyesuaikan dengan bentuk dan ukuran model yang akan diuji dengan cara melepas sambungan baut.

Untuk menempatkan benda uji pada penelitian ini digunakan Loading Frame dari bahan profil WF 450x200x9x14. Seperti pada Gambar 4.3



Gambar 4.3 Bentuk Fisik Loading Frame

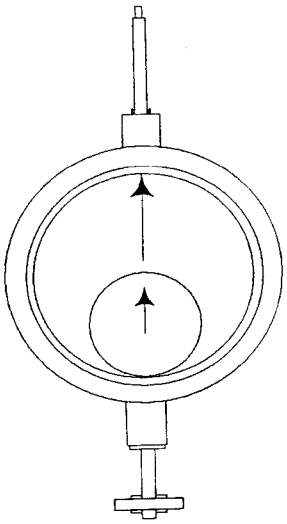
Keterangan :

1. Balok lintang
2. Dukungan
3. Kolom
4. Balok portal (bisa digeser)

c. *Dial Gauge*

Alat dengan merk *Mitutoyo* ini digunakan untuk mengukur besar lendutan yang terjadi pada benda uji. Untuk penelitian skala penuh digunakan *dial gauge* dengan kapasitas lendutan maksimum 50 mm

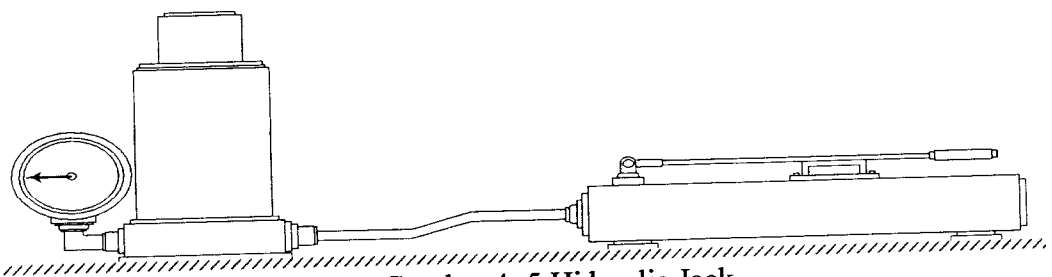
dan ketelitian 0,01 mm. Pada pengujian balok kecil dipakai dial gauge dengan kapasitas lendutan maksimum 30 mm – ketelitian 0,01.



Gambar 4. 4 Dial Gauge

d. Hidraulic Jack

Alat ini dipakai untuk memberikan pembebanan pada pengujian tekan kolom baja profil siku. Dengan kapasitas maksimum 30 ton dan ketelitian pembacaan 0,5 ton

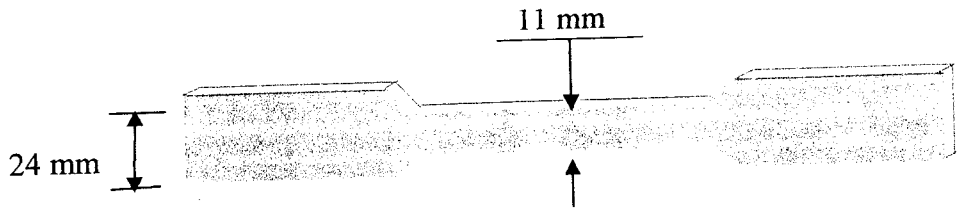


Gambar 4. 5 Hidraulic Jack

4.3. Model Benda Uji

4.3.1 Benda uji pendahuluan

Benda uji yang digunakan sebanyak dua buah, adapun bentuk dari benda uji seperti gambar berikut :



Gambar 4.6. Benda Uji Untuk Uji Kuat Tarik

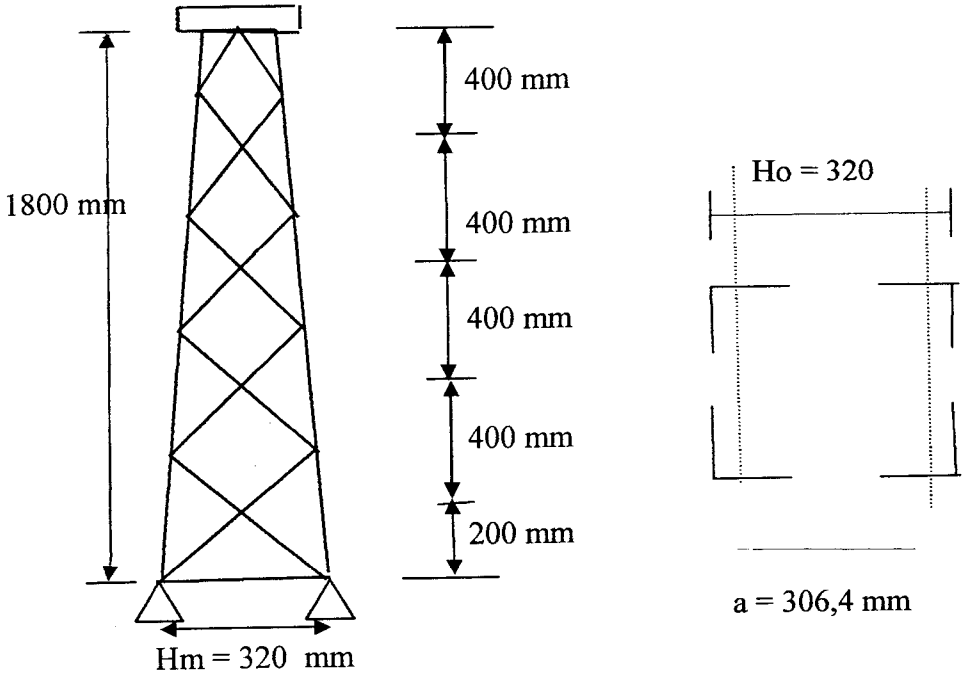
Pengujian dilakukan untuk mengetahui tegangan leleh baja *(Fy)*, dan tegangan ultimit baja *(Fu)*.



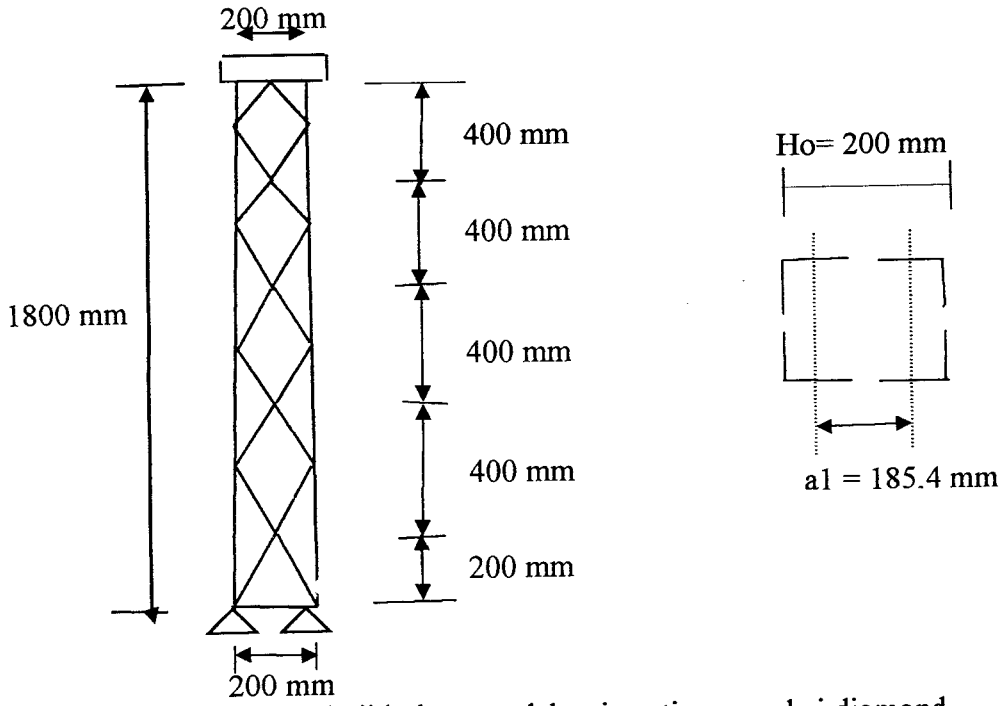
Gambar 4.7 Benda Uji Untuk kuat Tarik Las

4.3.2 Benda uji kolom tersusun

Model benda uji berupa kolom bangun non prismatis yang dirangkai secara diagonal serta plat pada sisi penumpu atas dan bawah dengan variasi ho/hm. Pada penelitian, dipakai 4 benda uji, dimana 3 benda uji merupakan kolom non prismatis dengan pembebanan sentris dan variasi pembebanan eksentris dengan jarak 10 mm dan 20 mm, dan satu benda uji merupakan kolom prismatis. Adapun model benda uji terseb mmut seperti Gambar 4.8 :



Gambar 4.8 Model uji kolom pendek non prismatis perangkai diamond



Gambar 4.9 Model uji kolom pendek prismatis perangkai diamond

4.4 Prosedur Penelitian

Tahap –tahap dalam penelitisn ini adlah 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 perencanaan dan pembuatan benda uji

   Tahap ini merupakan tahap untuk merencanakan ukuran dan dimensi dari sampel benda uji yang akan di teliti sesuia topik

4. Tahap pengujian sampel di laboratorium

   Pengujian sampel dilakukan dengan memberikan beban aksial terhadap benda uji dengan rasio e/a yang bervariasi sampai terjadi kegagalan tekuk pada sampel benda uji

5. Tahap analisis dan pembahasan

   Analisis dilakukan dengan mencatat hasil uji berupa deformasi yang terjadi, serta dilakukan pengolahan dari data yang didapatkan dari hasil pengujian

6. Tahap penarikan kesimpulan

   Dari hasil penelitian, diharapkan dapat diambil kesimpulan untuk memberikan jawban dari permasalah yang dihadapi dalam penelitian

4.5 Pelaksanaan penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan dalam beberapa tahap sebagai berikut :

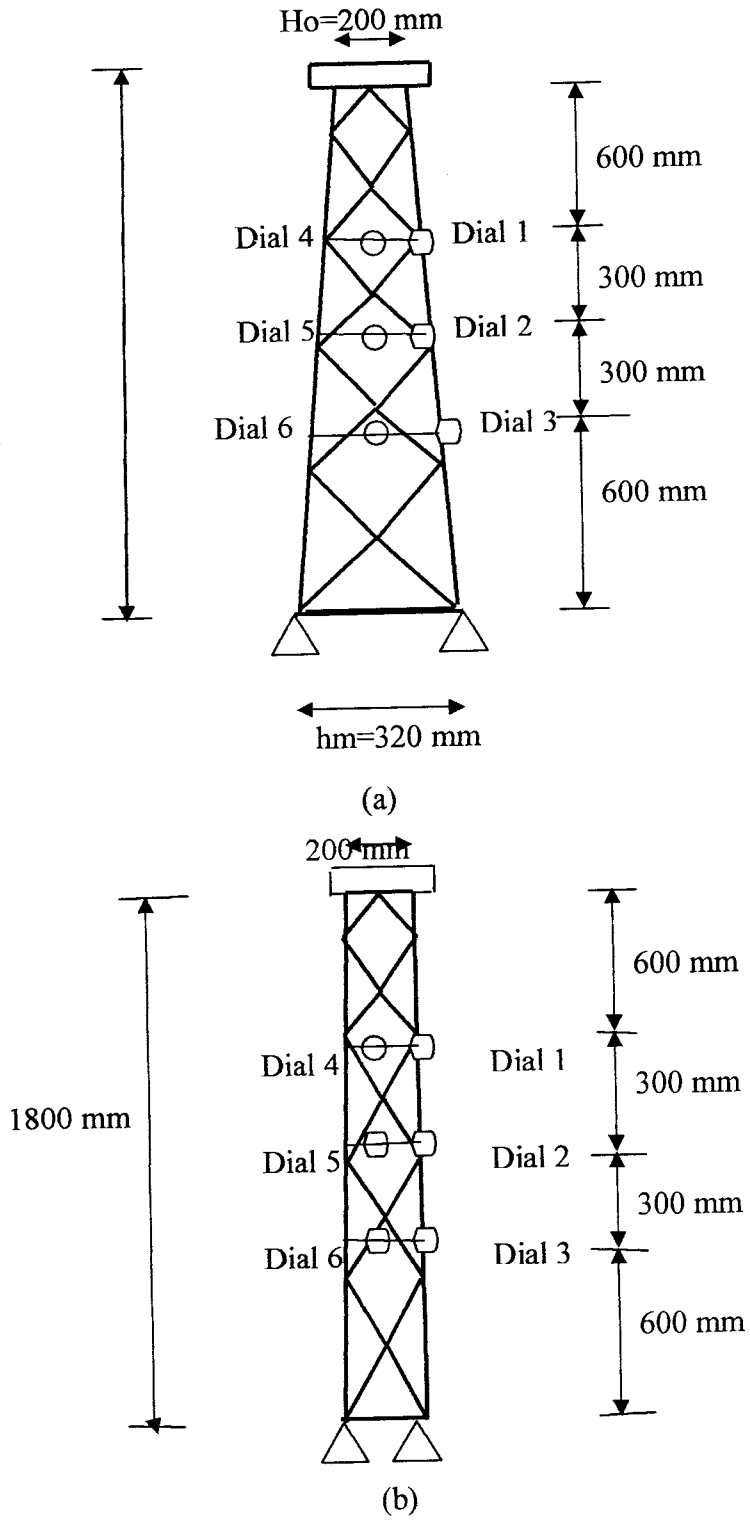
4.5.1 Pembuatan benda uji

Benda uji yang akan diteliti merupakan kolom tersusun dari empat profil siku yang dirangkai dengan BJTP 7 mm. Pada penelitian ini digunakan empat sampel benda uji dengan rasio e/a bervariasi.

4.5.2 Setting peralatan

Sebelum pengujian dilakukan, terlebih dahulu dilakukan setting alat pada sampel kolom tersusun, yaitu :

a. Benda uji dalam posisi berdiri pada loading frame
b. Pada tumpuan bagian atas dipasang pegaas yang terhubung dengan hydraulic jack, yang akan memberikan beban aksial kepada benda uji
c. Dial gauge diletakkan pada jarak 1/3L, 1/2 L, dan 2/3L. Seperti tampak pada gambar 4.10



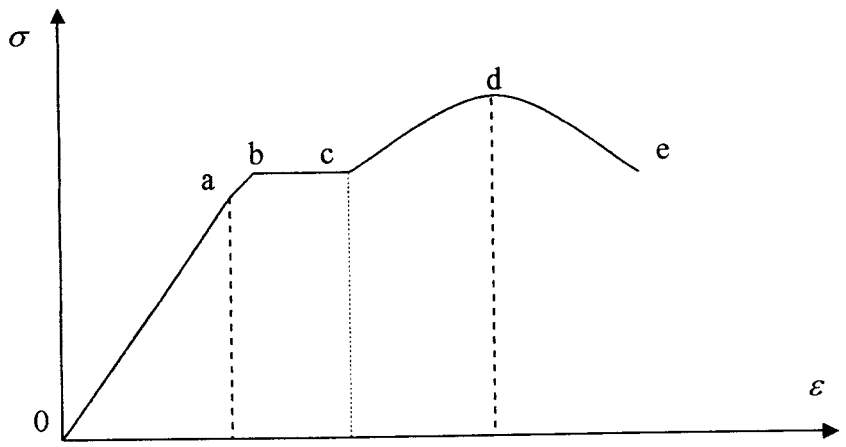
Gambar 4.10. Model benda uji dan penempatan dial gauge

4.5.3 Pembebanan benda uji

Pengujian kolom dilakukan dengan pembebanan eksentris dengan rasio e/a = 0, e/a = 0,107, dan e/a = 0,214. Proses pembebanan dilakukan dengan memompa hydraulic jack dengan pembebanan konstan sebesar 4 KN. Pada setiap kenaikan beban, dilakukan pembacaan pada dial gauge. Tahapan ini dilakukan secara kontinu sampai beban tidak dapat meningkat lagi sebagai tanda benda uji telah mencapai beban maksimum dan telah mengalami kegagalan tekuk.

4.5.4 Pengujian kuat tarik profil dan plat

Pengujian kua tarik dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil da Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Data yang diambil adalah beban luluh dan beban maksimum. Grafik tegangan regangan baja struktural dapat dilihat pada Gambar 4.11



Gambar 4.11 Diagram tegangan regangan baja struktural

Hubungan tegangan regangan antara 0 – a berupa garis linier, sehingga disebut sebagai batas sebanding (proporsional limit). Tegangan yang trjadi pada titik ini disebut tegangan batas sebanding. Sedikit diatas titik a terdapat titik batas elastis bahan. Pada saat mulai terjadi pengerasan regangan di titik c, kurva naik lagi sampai dicapai kuat tarik (tensile strenght) dititik d. Kurva akan mengalami penurunan dan terjadi spesimen retak (fracture) dititik e.

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Hasil pengujian

Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian penduhuluan dan uji kuat tekan kolom tersusun. Adapun uji pendahuluan berupa uji kuat tarik baja, uji kuat geser sambungan las, dan uji tekan profil siku yang sesuai dengan elemen yang digunakan sebagai komponen kolom tersusun non prismatis. Pengujian ini berguna untuk mengetahui kekuatan bahan yang dipakai, dan hasil pengujian akan digunakan untuk mengetahui perilaku kolom non prismatis untuk menerima beban aksial tekan sentris dan eksentris.

5.1.1 Hasil uji pendahuluan

Hasil uji pendahuluan meliputi dimensi benda uji, beban leleh (Py), beban maksimum atau beban ultimit (Pu), dan beban pada saat putus. Hasil uji pendahuluan digunakan untuk menentukan tegangan leleh (Fy) dan tegangan ultimit (Fu) yang berguna untuk mengetahui perilaku kolom. Uji pendahuluan juga meliputi pengujian kekuatan sambungan las dan kuat tekan profil siku.

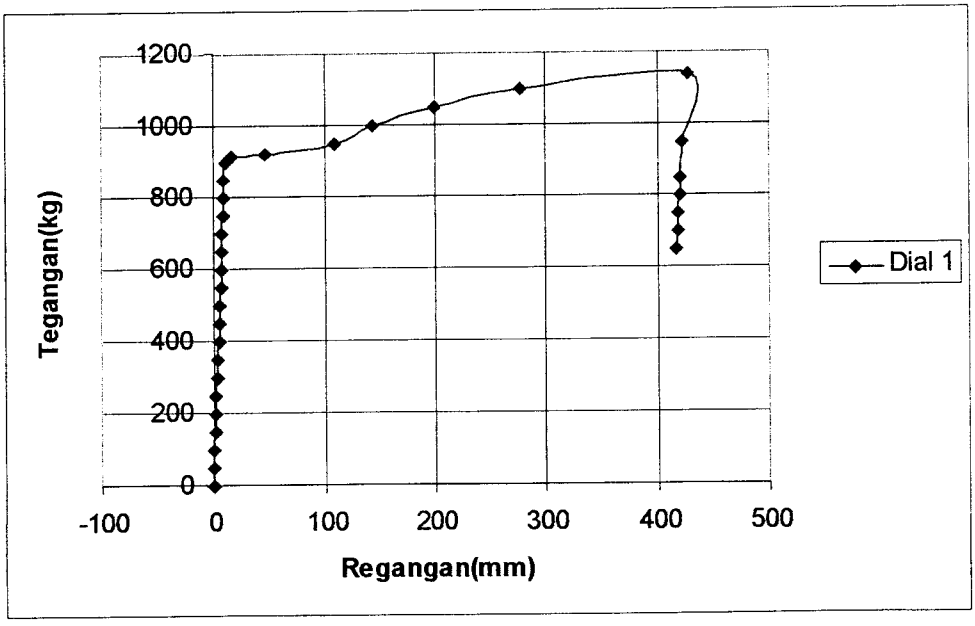
5.1.1.1 Hasil uji tarik baja siku dan pelat

Pengujian kuat tarik material baja siku dilakukan dengan dua buah sampel uji berupa plat dari profil situ sebagai sampel 1 dan plat arah diagonal dan melintang yang berupa tulangan sebagai sampel 2 dibentuk dengan standar pengujian kuat tarik baja.

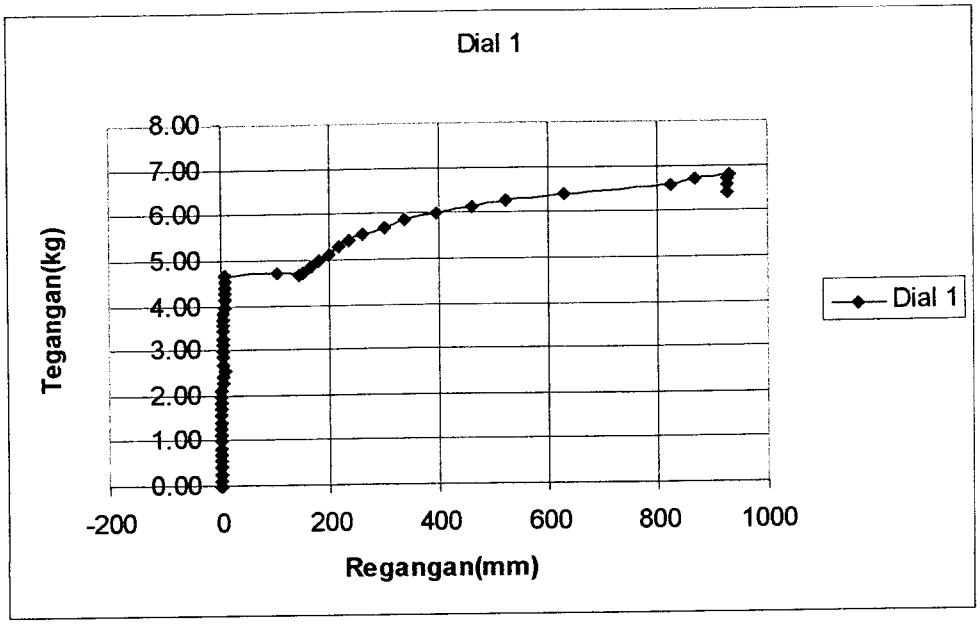
Adapun pengujian kuat tarik baja dapat dilihat pada Tabel 5.1 sebagai berikut :

Tabel 5.1 Hasil pengujian kuat tarik bahan

Benda uji	A(mm²)	P leleh (KN)	Pu maks (KN)	P putus (KN)	Fy(Mpa)
sampel 1	23.1	9.15	11.4	6.5	396.1
sampel 2	38.465	16.45	13.9	20.0	427.7



Gambar 5.1 Diagram tegangan regangan uji tarik element pelat profil siku



Gambar 5.2 Diagram tegangan regangan uji tarik pelat baja bulat diameter 7 mm

5.1.1.2 Hasil uji kuat geser sambungan las

Uji las geser dilakukan guna mengetahui tegangan ultimit las yang digunakan pada sambungan benda uji, hasil uji geser las ditunjukan Tabel 5.2

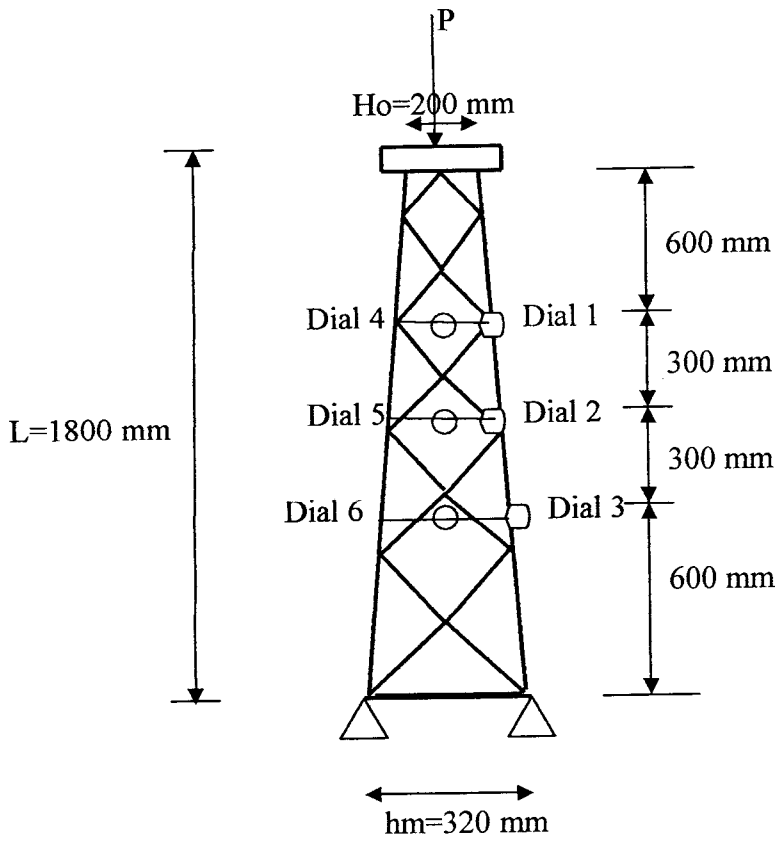
Tabel 5.2 Hasil pengujian kuat geser

Benda uji	Lebar(mm)	Tebal(mm)	Pu(KN)
Sampel 1	24	2.1	15.7

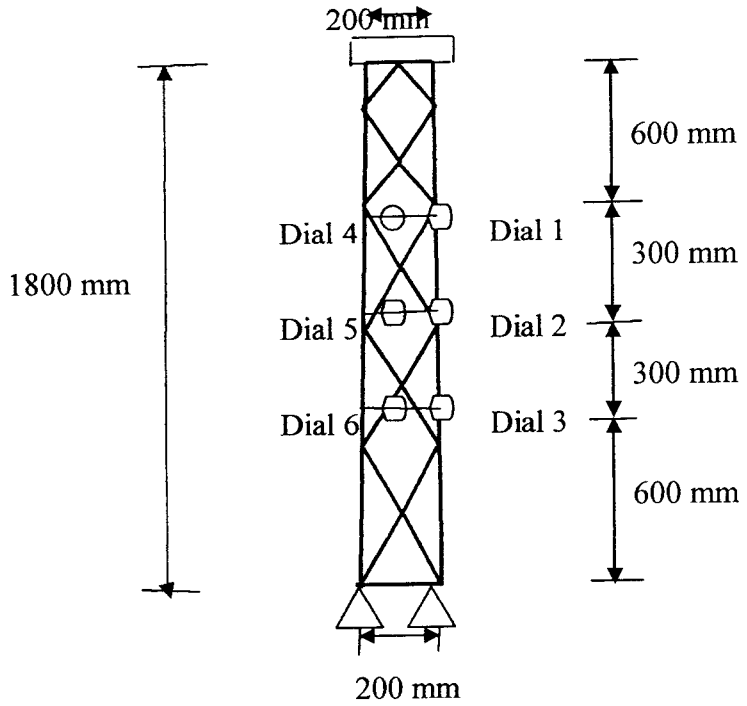
5.1.1.3 Hasil pegujian kuat tekan kolom tersusun

Pengujian kuat tekan kolom bangun dilakukan dengan alat dukungan *Loading Frame* dan alat pembangkit beban berupa *Hidraulic Jack* di Laboratorium Mekanika Rekayasa Fakultas Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Struktur dibebani tekan aksial sentris dan aksial eksentris secara bertahap dengan kenaikan sebesar 4 kN.

Lendutan yang terjadi pada tempat - tempat yang telah ditentukan,diukur melalui pembacaan skala pada dial gauge Dial gauge dipasang pada jarak 1/3L(600mm),1/2L(900mm) dan 2/3L(1200mm), dari panjang bentang keseluruhan(1800mm). Pada pengujian dengan pembebanan sentris dipakai 6 buah dial, sementara untuk pembebanan eksentris dipakai 3 buah dial. Pemasangan dial pada benda uji dapat dilihat pada Gambar 5.3



Gambar 5.3. Benda uji kolom pendek bangun non prismatis dan penempatan dial gauge



Gambar 5.4. Benda uji kolom pendek bangun prismatis dan penempatan dial gauge

Hasil pengujian laboratorium dapat dilihat pada Tabel (5.3) hasil pengujian tekan kolom bangun dengan lendutan arah lateral dan Gambar (5.4) grafik lendutan maksimum.

Tabel 5.3 Beban versus deformasi kolom pendek bangun non prismatis

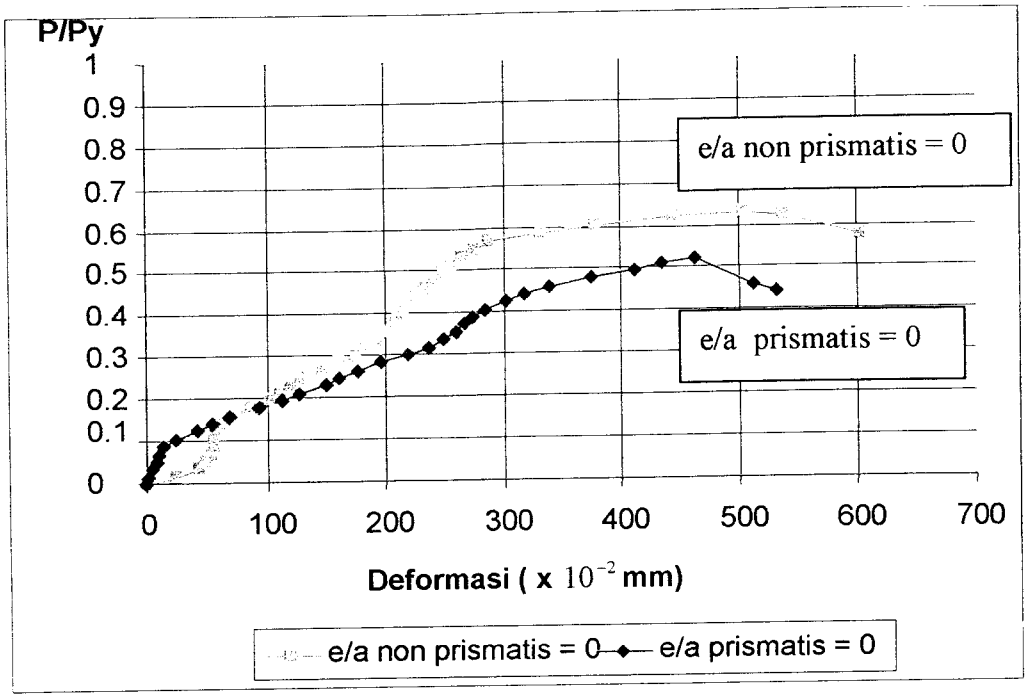
Beban(kg)	e/h 0.05			Beban(kg)	e/h 0.1			Beban(kg)	Sentris Non Prismatis		
	Dial 1	Dial 2	Dial 3		Dial 1	Dial 2	Dial 3		Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	40	15	24	400	3	0	1	400	25	7	13
800	50	43	43	800	9	2	2	800	45	15	25
1200	62	55	51	1200	11	6	3	1200	50	19	40
1600	67	59	56	1600	13	8	6	1600	54	28	46
2000	71	65	58	2000	16	9	7	2000	56	37	51
2400	77	70	59	2400	18	9	7	2400	57	46	55
2800	84	76	61	2800	22	10	7	2800	59	57	58

Lanjutan Tabel 5.3

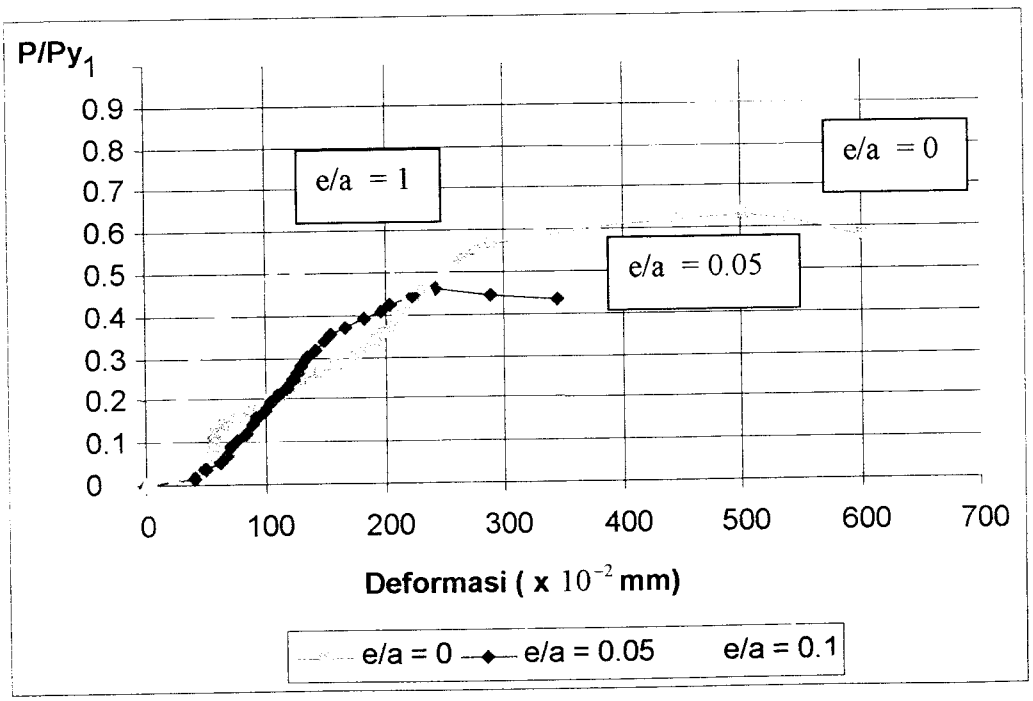
3200	89	80	64	3200	22	11	9	3200	65	68	63
3600	93	84	67	3600	26	12	10	3600	77	82	69
4000	99	88	71	4000	28	14	14	4000	87	84	73
4400	105	93	75	4400	29	16	16	4400	102	86	81
4800	110	100	80	4800	31	18	19	4800	111	90	89
5200	117	103	84	5200	33	21	20	5200	120	94	99
5600	122	105	88	5600	34	23	21	5600	129	99	108
6000	125	112	91	6000	35	25	22	6000	146	101	114
6400	129	116	98	6400	37	26	23	6400	160	107	121
6800	134	120	104	6800	40	28	24	6800	175	111	134
7200	142	127	112	7200	42	31	27	7200	184	120	144
7600	148	134	119	7600	45	33	30	7600	193	129	154
8000	154	151	130	8000	49	36	33	8000	199	137	157
8400	166	159	139	8400	54	40	35	8400	208	140	161
8800	183	173	152	8800	60	43	38	8800	211	145	164
9200	196	183	165	9200	65	46	41	9200	215	147	169
9600	204	190	183	9600	69	49	45	9600	220	151	171
10000	224	200	210	10000	77	53	50	10000	226	155	173
10400	243	215	225	10400	83	55	54	10400	234	157	176
10000	289	233	300	10800	92	60	67	10800	241	166	178
9800	345	287	325	11200	106	68	76	11200	249	178	181
				11600	125	75	87	11600	257	200	184
				12000	147	85	102	12000	265	210	201
				12300	178	125	152	12400	276	223	221
				10600	222	170	201	12800	288	230	243
				10200	237	185	234	13200	332	265	286
								13600	378	287	331
								14000	445	319	410
								14200	504	345	560
								14000	538	378	589
								13000	602	490	670

Tabel 5.4 Beban versus deformasi kolom pendek bangun prismatis

Beban(kg)	Sentris Prismatis		
	Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0
400	2	3	4
800	5	6	7
1200	9	9	11
1600	11	24	17
2000	15	37	26
2400	25	41	40
2800	42	47	45
3200	55	56	56
3600	69	62	67
4000	94	72	86
4400	113	85	99
4800	128	98	111
5200	150	115	126
5600	161	123	135
6000	177	143	148
6400	196	155	161
6800	220	167	179
7200	237	192	190
7600	250	216	224
8000	260	222	229
8400	267	231	237
8800	274	242	248
9200	285	249	260
9600	302	259	269
10000	318	266	277
10400	339	277	287
10800	375	293	298
11200	411	312	326
11600	435	325	385
11800	463	378	433
10300	512	440	489
10000	532	495	512



Gambar 5.5. Grafik hubungan P/Py versus deformasi dengan e/a = 0

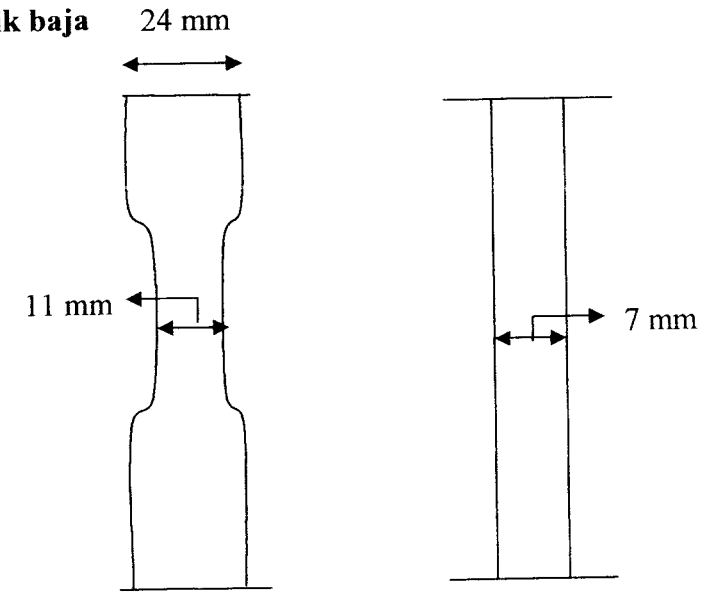


Gambar 5.6. Grafik hubungan P/Py versus deformasi dengan variasi e/a

5.2 Pembahasan

Data yang diperoleh dari hasil penelitian di laboratorium pada uji tarik digunakan untuk mendapatkan beban leleh , dan beban maksimum atau beban ultimit. Tegangan leleh didapatkan dengan membagi beban leleh dengan luas penampang (Fy = Py/A). Tegangan ultimit (Fu) didapatkan dengan membagi beban maksimum dengan lusa penampang (Pu = Pu/A). Kekuatan las didapatkan dengan membagi beban maksimum dengan panjang las, sehingga kekuatan las persatuan panjang (per millimeter) diketahui dengan cara tersebut, sedangkan pada uji tekan digunakan untuk mencari beban kritis (P_{cr}) maksimum yang terjadi akibat dari gaya tekan aksial.

5.2.1 Uji kuat tarik baja



Gambar 5.7 Benda uji kuat tarik bahan

Uji tarik yang dilakukan dengan menggunakan UMH digunakan untuk mengetahui kuat maksimum dari beban yang diberikan pada benda uji dan

pengujian kuat tarik dan tegangan maksimum baja pada benda uji Gambar (5.7) menunjukan mutu baja yang digunakan untuk struktur.

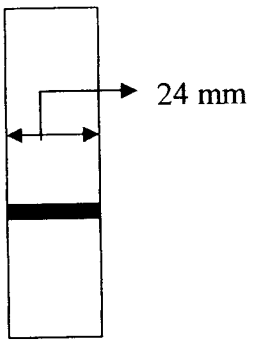
Dari hasil pengujian kuat tarik Tabel (5.1) didapat analisis untuk mencari tegangan leleh (Fy) dan tegangam ultimit (Fu) yang ditunjukkan pada Tabel 5.5 sebagai berikut

Tabel 5.5 Analisis hasil uji kuat tarik baja

Benda uji	A(mm²)	P leleh (KN)	Pu maks (KN)	P putus (KN)	Teg leleh(Mpa)
sampel 1	23.1	9.15	11.4	6.5	396.1
sampel 2	38.465	16.45	13.9	20	427.7

Pada bahan profil tulangan polos yang terjadi lebih besar bila dibandingkan dengan profil siku dapat dilihat pada grafik milimeter (terlampir).

5.2.2 Uji kuat geser sambungan las



Gambar 5.8 Benda uji kuat tarik las

Uji las geser dilakukan guna mengetahui tegangan ultimit las yang digunakan pada sambungan benda uji, hasil uji geser ditunjukan pada Tabel 5.6

$$P_{cr} = \frac{\mu\pi^2 E\ I}{l^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 EI_0}{l^2} \frac{1}{Ech^2} \frac{d^3}{A_d}} \frac{1}{\left(1 + \frac{e.C_x}{r^2}\right)} \quad (5.1)$$

Dengan nilai μ adalah

$$\mu = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{h_0}{h_m}\right)^2 \left[\frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{(\log_e h_0 - \log_e h_m)^2}\right] \quad (5.2)$$

Tabel 5.7 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm)

ho/hm	0	0.1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
μ	0,025	0,173	0,263	0,433	0,618	0,804	1

Kolom sampel 2 (ho/hm = 0,625), μ=0,6394, menggunakan 4 profil siku 25x25x3mm,

A gabungan= 385,56 mm^2,E = 200000 Mpa, L = 1800mm, c = 400 mm, Ix=Iy gabungan = 9071684 mm^4. Maka didapat dalam hasil perhitungan dalam Tabel 5.8

Tabel 5.8 Hasil perhitungan beban kritis dengan nilai E

Sampel	ho/hm	μ	Ë(Mpa)	e/a	KL/r	Ix(mm^4)	A(mm^2)	rx=ry(mm)	Pcr(KN)
1	0.62	0.639	2.E+05	0	153.4	9071684	385	153.4	3528
2	0.62	0.639	2.E+05	0.107	153.4	9071684	385	153.4	3515
3	0.62	0.639	2.E+05	0.214	153.4	9071684	385	153.4	3502
4	1	1	2.E+05	0	93,5	3371565	385	93.5	2052

Beban kritis (Pcr) secara teori dapat ditentukan berdasarkan kekuatan kolom menahan tekuk keseluruhan dengan menggunakan persamaan tekuk. Persamaan yang digunakan untuk mengetahui beban kritis (Pcr) pada teori modulus tangen dasar *Chen* , 1952 adalah pada persamaan:

$$P_{cr} = \frac{\mu\pi^2 E_t I}{l^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_t I_0}{l^2} \frac{1}{Ech^2} \frac{d^3}{A_d} \left(1 + \frac{e.C_x}{r^2}\right)} \frac{1}{} \quad (5.3)$$

Dengan nilai μ adalah

$$\mu = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{h_0}{h_m}\right)^2 \left[\frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{(\log_e h_0 - \log_e h_m)^2}\right] \quad (5.4)$$

Tabel 5.9 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm)

ho/hm	0	0.1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
μ	0,025	0,173	0,263	0,433	0,618	0,804	1

Nilai Et yang digunakan adalah nilai perbandingan Et dan l/r pada tabel 5.10 dibawah ini

Tabel 5.10 Tabel tekuk plastis alumunium

	Tangen modulus		Modulus reduksi	
Stress σ (ksi)	Et (ksi)	l/r	Er (ksi)	l/r
10	10600	105	10600	105
20	10600	72.5	10600	72.5
30	10600	59	10600	59
40	10600	51	10600	51
45	3000	26	5100	33.5
50	1000	14	2300	21.3
55	500	9.5	1300	15.3
60	400	8.1	1100	13.5

Kolom sampel 2 (ho/hm = 0,625), =0,6394, menggunakan 4 profil siku 25x25x3mm,

A gabungan= 385,56 mm^2,E = (500/10600)*200000= 9433.96 Mpa, L = 1800mm, c = 400 mm, Ix=Iy gabungan = 9071684 mm^4. Maka didapat dalam hasil perhitungan dalam Tabel 5.11

Tabel 5.11 Hasil perhitungan beban kritis dengan nilai Et

Sampel	ho/hm	μ	Ë(Mpa)	KL/r	L(mm)	e/a	Ix(mm^4)	A(mm²)	rx=ry(mm)	Pcr(KN)
1	0.62	0.639	9.E+03	11.7	1800	0	9071684	385	153.4	166.416
2	0.62	0.639	9.E+03	11.7	1800	0.107	9071684	385	153.4	165.806
3	0.62	0.639	9.E+03	11.7	1800	0.214	9071684	385	153.4	166.416
4	1	1	9.E+03	19.3	1800	0	3371565	385	93,5	96.792

Beban kritis (Pcr) secara teori dapat ditentukan berdasarkan kekuatan kolom menahan tekuk keseluruhan dengan menggunakan persamaan tekuk. Persamaan yang digunakan untuk mengetahui beban kritis (Pcr) pada teori modulus ganda *Chen* , 1952 adalah pada persamaan:

$$P_{cr} = \mu \frac{\pi^2 E_r I}{l^2} \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 E_r I_0}{l^2} \frac{1}{Ech^2} \frac{d^3}{Ad}} \frac{1}{\left(1 + \frac{e.y}{r^2}\right)} \quad (5.5)$$

Nilai Er yang digunakan adalah nilai perbandingan Er dan l/r pada tabel 3.10 ,dengan nilai μ adalah

$$\mu = \frac{1}{4}\left(1 - \frac{h_0}{h_m}\right)^2 \left[\frac{1}{\pi^2} + \frac{4}{\left(\log_e h_0 - \log_e h_m\right)^2}\right] \quad (5.6)$$

Tabel 5.12 Nilai k pada berbagai rasio (ho/hm)

ho/hm	0	0.1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
μ	0,025	0,173	0,263	0,433	0,618	0,804	1

Kolom sampel 2 (ho/hm = 0,6231), μ=0,6394, menggunakan 4 profil siku 25x25x3mm,

A gabungan= 385,56 mm^2,E = (1100/10600)*200000 = 20754.751 Mpa, L = 1800mm, c = 400 mm, Ix=Iy gabungan = 8976247 mm^4. Maka didapat dalam hasil perhitungan dalam Tabel 5.13

Tabel 5.13 Hasil perhitungan beban kritis dengan nilai Er

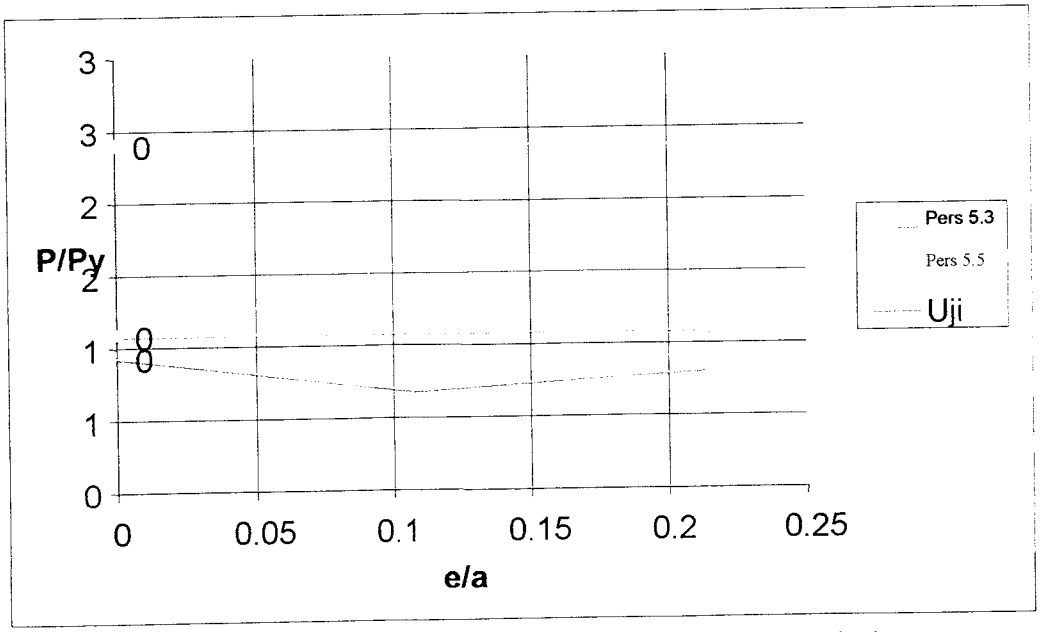
Sampel	ho/hm	μ	Ë(Mpa)	KL/r	e/a	cx	Ix(mm^4)	rx=ry(mm)	Pcr(KN)
1	0.62	0.639	2.08E+04	11.7	0	4.33	9071684	153.4	366.11
2	0.62	0.639	2.08E+04	11.7	0.107	4.33	9071684	153.4	364.77
3	0.62	0.639	2.08E+04	11.7	0.214	4.33	9071684	153.4	363.44
4	1	1	2.08E+04	19.3	0	4.33	3371565	93,5	212.94

Hasil perbandingan beban kritis teori dan beban kritis pengujian dapat dilihat pada tabel 5.14

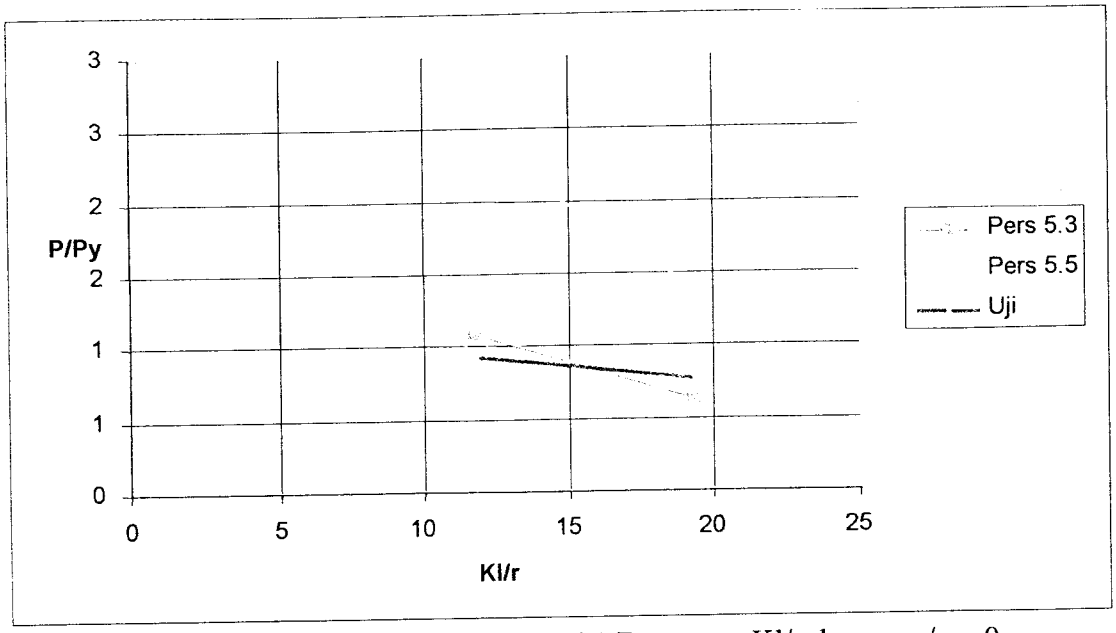
Tabel 5.14 Tabel perbandingan beban kritis E,Et dan Er teori dengan hasil pengujian

no	Pcr teori Et	Pcr teori Er	Pcr uji	Py	P/Py Et	P/Py Er	P/Py uji
1	166.416	366.11	142	152720	1.089678	2.397295	0.93
2	165.806	364.77	104	152720	1.085682	2.388505	0.68
3	166.416	363.44	123	152720	1.089678	2.379779	0.81
4	96.792	212.94	118	152720	0.633783	1.394326	0.77

Data dari Tabel 5.13 dan 5.14 dapat ditampilkan dalam bentuk grafik perbandingan beban kritis (P_{cr}) teoritis dengan beban kritis (P_{cr}) hasil pengujian , seperti pada Gambar 5.9 dan 5.10



ambar 5.9 Grafik non dimensional P/Py versus e/a bervariasi



Gambar 5.10 Grafik non dimensional P/Py versus Kl/r dengan e/a = 0

Hasil pengujian yang dilakukan dilaboratorium benda uji mengalami banyak pengaruh diantaranya proses pembuatan benda uji dan proses pengujian yang dilakukan, sehingga hasil yang didapat pada proses pengujian tidak dapat diambil secara maksimum. Rumus 5.3 tidak bisa digunakan dalam perhitungan karena kelangsingan benda uji lebih kecil dari kelangsingan batas yaitu $\frac{Kl}{r} < \lambda_c$

Maka persamaan yang digunakan adalah persamaan kolom pendek 5.7 sedangkan persamaan Euler hanya digunakan untuk kolom langsing dengan $\frac{Kl}{r} > \lambda_c$

$$F_{cr} = F_y\left[1 - \frac{(KL/r)^2}{2\lambda_c^2}\right] \qquad (5.7)$$

Dengan perhitungan sampel 1 dengan ho= 400 mm dan Hm = 320 mm dan panjang L=1800 mm , A gabungan= 568 mm^2,E = 200000 Mpa, Igabungan 13207805 mm^4

Dari sampel $\frac{kL}{r} = \frac{1800mm}{153,4mm} = 11,7$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{Fy}} = 99.78$$

Dengan tegangan leleh baja 396.1 Mpa maka

$$F_{cr} = 396.1\left[1 - \frac{(11.7)^2}{2.99,78_c^2}\right] = 393.36 \text{ N/mm}^2$$

Perhitungan sampel dapat dilihat pada Tabel 5.13:

Benda Uji	E Mpa	KL/r	e/a	Ix(mm^4)	A gab(mm^2)	rx=ry(mm)	λc	Fcr (N/mm2)	Pcr teori(N)
1	2E+05	11.7	0	9071684	385	153.4	99.78	393.36	151664.4
2	2E+05	11.7	0.107	9071684	385	153.4	99.78	254.20	98007.48
3	2E+05	11.7	0.214	9071684	385	153.4	99.78	235.73	90887.83
4	2E+05	19.3	0	3371565	385	93,5	99.78	272.55	105084.9

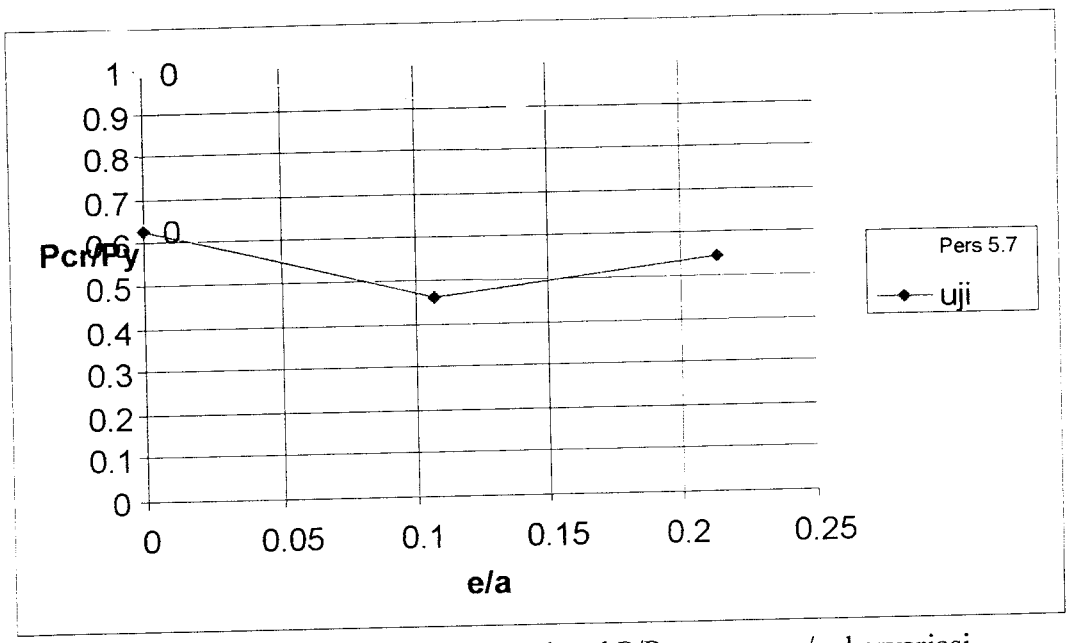
Tabel 5.15 Tabel perhitungan beban kritis persamaan 5.7

Hasil perbandingan beban kritis teori dan beban kritis pengujian dapat diliha t pada Tabel 5.16

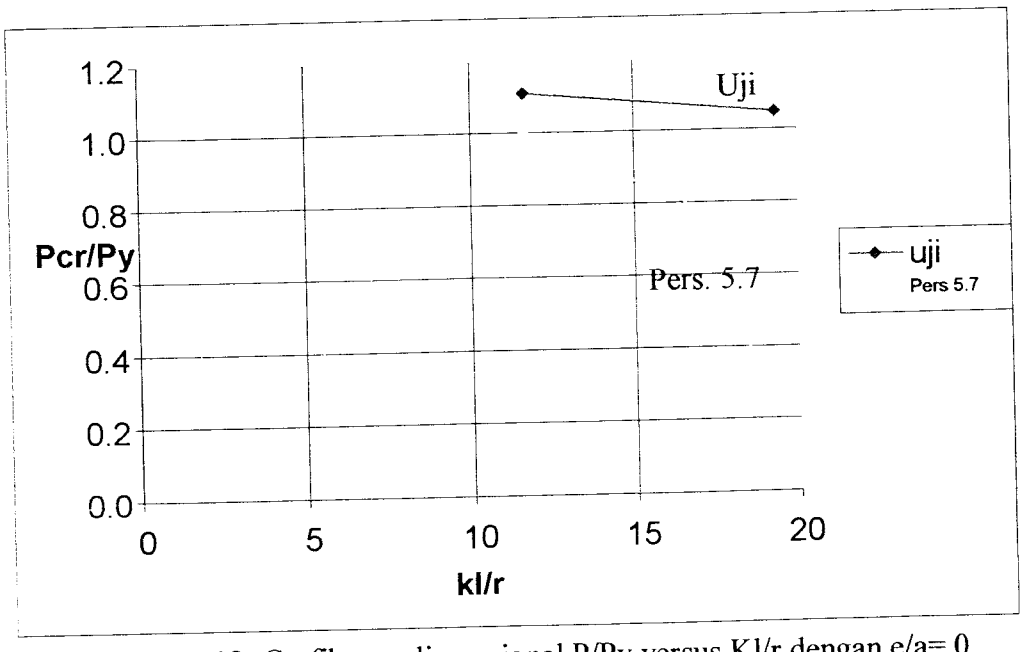
Tabel 5.16 Perbandingan beban kritis persamaan 5.7 terhadap beban leleh

Benda uji	Kl/r	rx=ry	λc	Pcr		P/PY	
				uji	teori	uji	teori
1	11.7	153.4	99.78	142000	151664.4	0.93	0.993
2	11.7	153.4	99.78	104000	98007.48	0.68	0.642
3	11.7	153.4	99.78	123000	90887.83	0.81	0.595
4	19.3	93,5	99.78	118000	105084.9	0.77	0.688

Data dari Tabel 5.14 dapat ditampilkan dalam bentuk grafik perbandingan beban kritis (P_{cr}) teoritis dengan beban kritis (P_{cr}) hasil pengujian seperti pada Gambar 5.9 dan 5.10



Gambar 5.11. Grafik non dimensional P/Py versus e/a bervariasi



Gambar 5.12 Grafik non dimensional P/Py versus Kl/r dengan e/a= 0

Dari grafik 5.11 terlihat bahwa hasil pengujian mengalami kenaikan nilai e sebanding dengan kenaikan nilai Pcr. Ini dapat disebabkan karena adanya kesalahan dalam pelaksanaan pengujian. Sehingga diperlukan benda uji yang lebih banyak.

5.4 Perhitungan modulus tangen dan modulus tereduksi

Beban kritis untuk tekuk elastis hanya berlaku untuk kolom yang relatif panjang, sedangkan pada kolom menengah kita membutuhkan teori tekuk inelastis untuk mendapatkan modulus tangent dan modulus tereduksi di dapatkan dari persamaan 5.8

$$F = \frac{\pi^2 E_t}{(kL/r)^2} \tag{5.8}$$

Maka

$$E_t = \frac{F_{cr}(kL/r)^2}{\pi^2} \tag{5.9}$$

Untuk mendapatkan nilai modulus tangen nilai Fcr diasumsikan sama dengan Fy, maka persamaan menjadi:

$$E_t = \frac{Fy(KL/r)^2}{\pi^2} \tag{5.10}$$

Pada pengujian kuat tekan kolom , tegangan lekeh benda uji (Fy) = 396.1 Mpa , maka nilai E_t adalah

$$E_t = \frac{396.1(11,7)^2}{\pi^2}$$

$$= 5493,85 \text{ Mpa}$$

Sedangkan nilai E_r adalah

$$E_r = \frac{2E.E_t}{E + E_t} \qquad (5.11)$$

$$= \frac{2*2*10^5 * 5493,85}{2.10^5 + 5493,85}$$

$$E_r = 10693,94 \text{ Mpa}$$

Dari hasil perhitungan tampak bahwa modulus tereduksi lebih besar dari modulus tangen, hal ini disebabkan karena modulus tereduksi merupakan pembaharuan dari modulus tangen yang menganggap bahw terjadinya pembalikan regangan pada saat batang berubah bentuk dari posisi lurus menjadi posisi lengkung. Hal ini selaras dengan perubahan yang dilakukan oleh *Engesser* terhadap perhitungan modulus tangen.

(*Salmon dan Johnson*, 1990)

Maka untuk pengujian denagn modulus tangen dan modulus tereduksi dapat dilihat pada tabel 5.17 , tabel 5.18

Tabel 5.17 Tabel perbandingan beban kritis persamaan 5.10 terhadap beban leleh dengan modulus tangen

modulus tangen

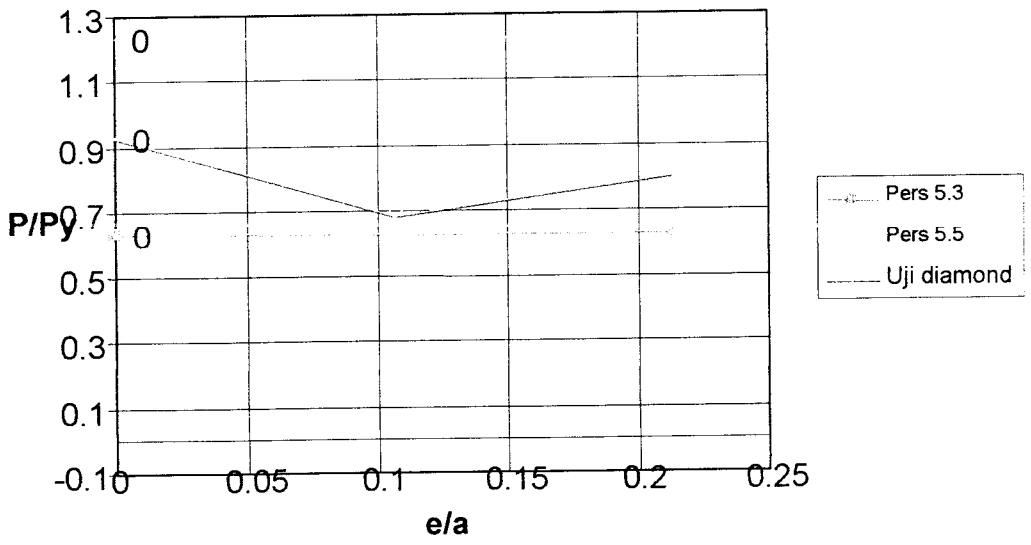
no	ho/hm	μ	E Mpa	e/a (mm)	Ix(mm^4)	A gab(mm^2)	rx=ry(mm)	Pcr (KN)	Kl/r	Py(N)	P/PY
1	0.62	0.64	5493	0	9071684	385	153.4	96.91	11.7	152720	0.6346
2	0.62	0.64	5493	0.107	9071684	385	153.4	96.56	11.7	152720	0.6322
3	0.62	0.64	5493	0.214	9071684	385	153.4	96.20	11.7	152720	0.6299
4	1	1	5493	0	3371565	385	93,5	56.37	19.3	152720	0.3691

Tabel 5.18 Perbandingan beban kritis persamaan 5.11 terhadap beban leleh dengan modulus tereduksi

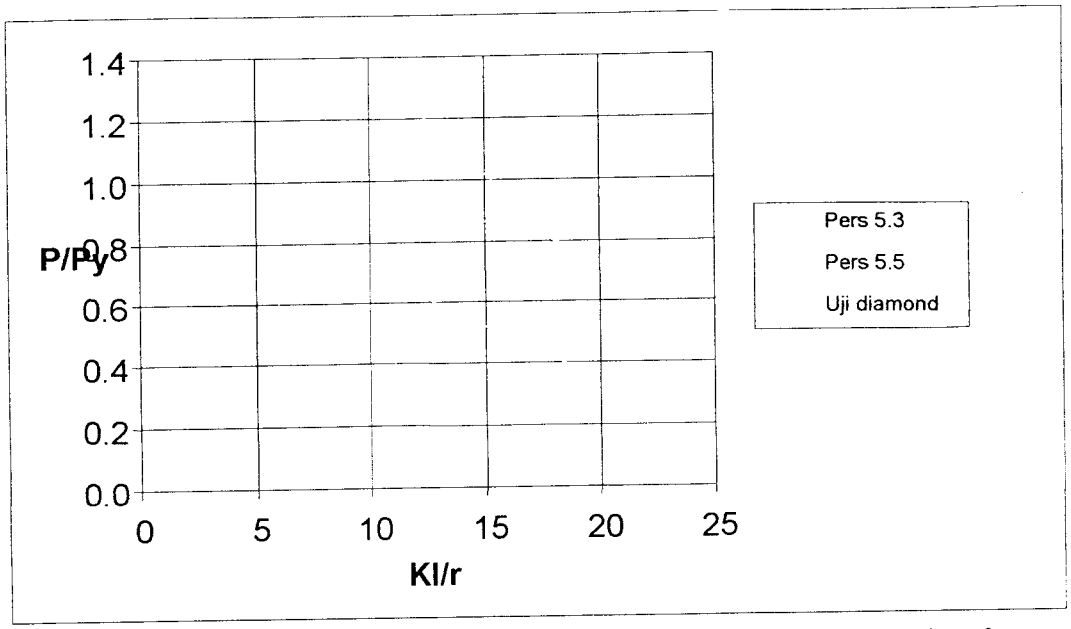
modulus tereduksi

no	ho/hm	μ	E Mpa	e/a (mm)	Ix(mm^4)	A gab(mm²)	rx=ry(mm)	Pcr (KN)	Kl/r	Py(N)	P/PY
1	0.62	0.64	10693	0	9071684	385	153.4	188.64	11.7	152720	1.2352149
2	0.62	0.64	10693	0.107	9071684	385	153.4	187.95	11.7	152720	1.2306869
3	0.62	0.64	10693	0.214	9071684	385	153.4	187.26	11.7	152720	1.2261909
4	1	1	10693	0	3371565	385	93,5	109.72	19.3	152720	0.718432

Data dari Tabel 5.15 dan 5.16 dapat ditampilkan dalam bentuk grafik perbandingan beban kritis (P_{cr}) teoritis dengan beban kritis (P_{cr}) hasil pengujian seperti pada Gambar 5.13 dan 5.14



Gambar 5.13. Grafik non dimensional P/Py versus e/a bervariasi



Gambar 5.14. Grafik non dimensional P/Py versus Kl/r dengan e/a = 0

5.5 **Kegagalan kolom**

Menurut persamaan *Euler* yang dikemukakan oleh *Salmon and Jonshon* untuk menetapkan persyaratan desain, kriteria kinerja harus ditentukan. Berdasarkan hasil penelitian, maka kegagalan yang terjadi adalah tekuk lokal pada elemen plat, seperti terlihat pada gambar LII.9 – LII.14. Tekuk lokal pada komponen kolom secara logis dapat dicegah sebelum kolom mencapai kekuaan penuh berdasarkan rasia kerampingan keseluruhannya KL/r. :

Kolom pada pengujian kuat tekan kolom tersusun nonprismatis dengan perangkai diamond memiliki Pcr = 142 KN, dengan luas penampang A = 96,39 mm^2. Dengan nilai b =24 mm dan tebal t = 2.1 mmdan memiliki rasio b/t = 11.4

Dikarenakan kolom terbuat dari 4 profil siku, maka tegangan pada saat kritis sebesar :

$$F_{cr} = \frac{P}{4A} = \frac{142000}{4.96,39} = 368,3 \text{ MPa}$$

Dengan rasio b/t = 11.4, maka :

$$F_{cr} = k\frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(b/t)^2} \tag{5.12}$$

maka :

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

$$k = \frac{12.368,3(1-0,64^2)(11.4)^2}{\pi^2 200000}$$

k = 0,171

Dari hasil perhitungan terlihat bahwa k = 0,0171 < k = 0.425 (Tabel 3.4). Hal ini dapat disebabkan karena profil yang digunakan kurang besar, yang menyebabkan beban kritis dan rasio nilai (b/t) yang dihasilkan juga tidak mencukupi untuk mencapai nilai k ideal sbesar 0,425.

Dari hasil pengujian di dapat F_{cr} hasil adalah 368,3 Mpa < dari tegangan leleh (Fy) hasil uji = 396.1 Mpa (Lampiran 2, perhitungan tegangan leleh) , maka ditarik kesimpulan bahwa kolom mengalami kegagalan tekuk.

Dari persamaan (3.4)

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} \tag{5.13}$$

Dengan memperoleh nilai k=1 (asumsi sendi-sendi), maka perhitungan tegangan kiritis untuk satu elemen plat dengan batasan antar batang perangkai (c) = 400 mm

dan r min = 4,03 mm (Lampiran 1,perhitungan r min) maka perhitungan tegangan kritis adalah

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 2.10^5}{(400/4{,}03)^2} = 200{,}36\,\text{Mpa}$$

dari hasil perhitungan F_{cr} = 200,36 Mpa< Fy = 396.1 MPa

sehingga kolom mengalami kegagalan tekuk lokal pada elemen plat.

Dari nilai F_{cr} elemen plat dan F_{cr} batasan (b/t) profil maka didapat nilai nilai F_{cr} elemen plat lebih kecil, sehingga nilai ini dijadikan dasar terjadinya tekuk elemen plat pada kolom. Pola kegagalan kolom hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.19

Tabel 5.19 Pola kegagalan kolom

Benda uji	E(Mpa)	Pcr(N)	A(mm²)	Fcr b/t(MPa)	Fcr plat(MPa)	Fy(MPa)	Pola kegagalan
e/a = 0	200000	142000	385.56	368.30	200.36	396.1	Tekuk lokal elemen plat
e/a = 0,107	200000	104000	385.56	269.74	200.36	396.1	Tekuk lokal elemen plat
e/a = 0,214	200000	123000	385.56	319.02	200.36	396.1	Tekuk lokal elemen plat
e/a = 0(prismatis)	200000	118000	385.56	306.05	200.36	427.7	Tekuk lokal elemen plat

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari penjelasan serta uraian dalam pembahasan tugas akhir ini, kesimpulan dan saran yang dapat diajukan adalah sebagai berikut:

6.1 Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan kesimpulan berdasarkan hasil pengujian laboratorium dan pengolahan data hasil pegujian. Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah:

1. Kuat tekan kolom pendek bangun non prismatis dari profil siku dengan perangkai diagonal dipengaruhi oleh nilai e/a, semakin besar nilai e/a maka nilai Pcr (beban kritis) akan semakin kecil
2. Rasio beban kritis berbanding beban leleh(P/Py) dengan kekuatan kolom yamg didapatkan dari hasil penelitian adalah : non prismatis e/a = 0, P/Py = 0.63, non prismatis e/a = 0.107, P/Py = 0.46, non prismatis e/a = 0.214, P/Py = 0.55, prismatis e/a = 0, P/Py = 0.52.
3. Kegagalan yang terjadi pada kolom tersusun non prismatis setelah dilakukan pengujian adalah tekuk lokal pada elemen plat

6.2 Saran

Penelitian ini masih banyak kekurangannya, banyak hal yang masih bisa diteliti lebih lanjut, kekurangan yang perlu diperhatikan pada penelitian selanjutnya adalah:

1. Benda uji yang digunakan masih kurang, sehingga data yang diperoleh dari hasil pengujian masih kurang
2. Perlu diadakan penelitian untuk kolom non prismatis dari profil siku dengan variasi jarak yang berbeda
3. Perlu diadakan penelitian untuk bentuk penampang yang sama tetapi memiliki dimensi yang berbeda
4. Perlu diadakan penelitian dengan benda uji sesuai dengan batas kelangsingan ideal
5. Perlu diadakan penelitian untuk niai poison (μ) yang sesuai dengan jenis perangkai

DAFTAR PUSTAKA

Charles G. Salmon dan John E. Johnson, Wira, **STRUKTUR BAJA**, Erlangga, Jakarta, 1994.

Lambert Tall, **STRUCTURAL STEEL DESIGN**, Second Edition, The Real Press Company, New York,1997.

Friedich Bleich, **BUCKLING STRENGTH OF METAL STRUCTURES**, Mc Graw Hill Book Company inc, NewYork, 1952.

Padosbajayo, **PENGETAHUAN DASAR STRUKTUR BAJA**, edisi kedua ,Yogyakarta, 1992.

James M. Gere dan Stephen P. Timoshenko, Hans J. Wospakrik, **MEKANIKA BAHAN**, Edisi kedua, Erlangga, Jakarta,1987.

WF Chen dan T. Atsuta, **THEORY OF BEAM COLUMNS**,Volume 2, Mc Graw Hill Inc,New York,1976.

Penelitian Ike Merdekawati (01 511 048), **KAPASITAS TEKAN KOLOM TERSUSUN NON PRISMATIS,** UII yogyakarta ,2006.

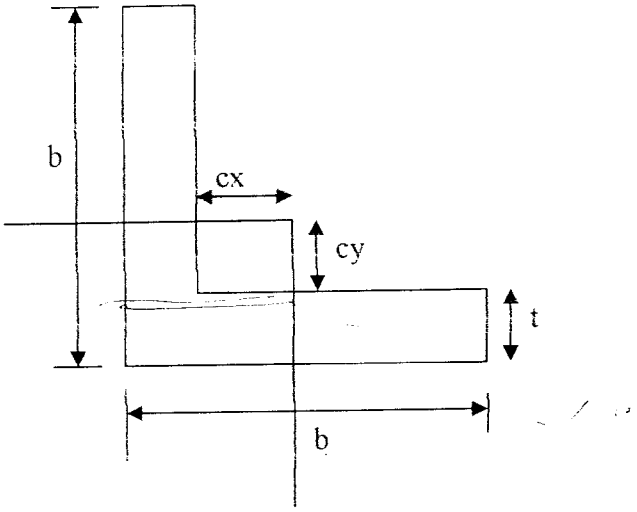
Penelitian

Penelitian Radyo Wijoyo Danubroto (03 511 082), **KAPASITAS KOLOM TERSUSUN EMPAT PROFIL SIKU DENGAN PERANGKAI DIAGONAL AKIBAT PEMBEBANAN EKSENTRIS**,UII Yogyakarta, 2007

LAMPIRAN I

PERHITUNGAN SIFAT PENAMPANG

Perhitungan dimensi profil tunggal **25 x 25 x 3** mm



Gambar LI.1 Profil tunggal L

$A = b \times t + (b-t) \times t$

$= 24 \times 2.1 + (24-2.1) \times 2.1 = 96.39 \text{ mm}^2$

cx = cy

Statis momen terhadap sisi bawah

$$= \frac{b * t * 0,5 * b + (b - t) * t * 0,5 * t}{b * t + (b - t) * t}$$

$$= \frac{24 * 2.1 * 0,5 * 24 + (24 - 2.1) * 2.1 * 0,5 * 2.1}{24 * 2.1 + (24 - 2.1) * 2.1}$$

= 6.8 mm

Statis momen terhadap sisi atas

= 24 – 6,8

= 17,2 mm

cx = cy = 6.8 – 2.1 = 4,7 mm

Ix = Iy

= (1/12)*b³*t + b*t*(0,5t + (cx atau cy))² + (1/12)*b*t³ + (b-t)*t*(0,5t + (cx atau cy))²

= (1/12)*24³*2.1 + 24*2.1*(0,5*2.1 + 4,7)² + (1/12)*24*2.1³ + (24-2.1)*2.1*(0,5*2.1 + (4,7)²

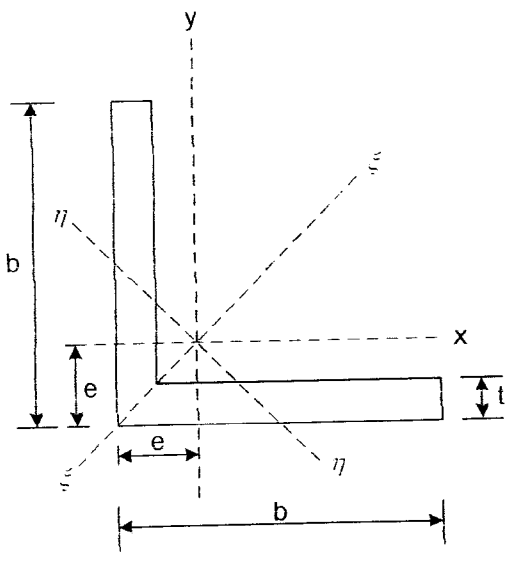
= 5624.6 mm⁴

Dari tabel AISC didapat Ix = Iy = 7900 mm⁴

$$rx = ry = \sqrt{\frac{(Ixatau Iy}{A}} = \sqrt{\frac{5624\ .6}{96\ .39}}$$

= 7,64 mm

Menghitung Imin



Gambar LI.2 Garis netral profil L

$$\text{Im}in = \frac{Ix + Iy}{2} - \sqrt{\left[\frac{Ix - Iy}{2}\right]^2 + (\Sigma x.y.A)^2}$$

$$\text{r min} = \sqrt{\frac{\text{Im}in}{A}}$$

Tabel LI-1.Perhitungan I_{xy}

Bagian	A(mm²)	X(mm)	Y(mm)	A.X.Y
I	(24.2,1) = 50,4	(6,8-(0,5.2,1)) = -5,75	(17,2-(0,5.24))= 5,2	50,4.-5,75.5,2 = -1506,96
II	(24-2,1).2,1 = 45,99	(17,2(0,5.(17,2-2,1) = 9,65	6,8 - (0,5.2,1) = -5,75	45,99.9,65 5,75=2551,87
			Σ A.X.Y	-4058,83

$$\text{Im}in = \frac{5624.6 + 5624.6}{2} - \sqrt{\left[\frac{5624.6 - 5624.6}{2}\right]^2 + (-4058.83)^2}$$

$$= 1565,77 \text{ mm}^4$$

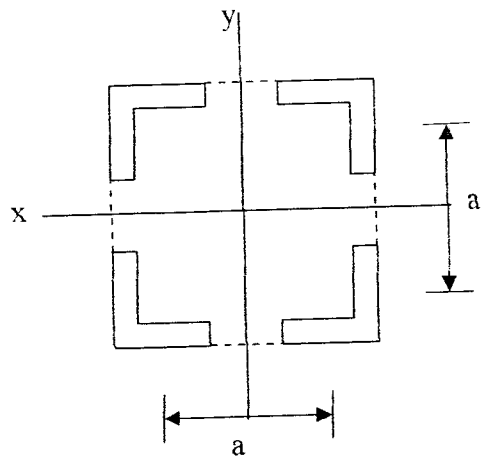
$$\text{r min} = \sqrt{\frac{1565,77}{96,39}}$$

$$= 4,03 \text{ mm}$$

Untuk kolom bangun non prismatis jarak antar batang perangkai adalah c = 400 mm

$$\frac{c = L1}{r \text{ min}} = \frac{400}{3.32} = 120,48$$

Perhitungan dimensi profil tunggal gabungan hm = 320 mm



Gambar LI.3 Profil tunggal gabungan

$A = 4 \times A_{tunggal}$

$= 4 \times 96.39$

$= 385,56$ mm

$Ix_{gab} = Iy_{gab}$

$= 4\ (Ix = Iy) + 4\ A_{tunggal} * 0,5\ a^2$

$= 4 * 5624.6 + (385,56 * (160 - 6,8)^2)$

$= 9071684,134\ mm^4$

$$rx_{gab} = ry_{gab} = \sqrt{\frac{9071684,134}{385,56}} = 153.4 \text{ mm}$$

Perhitungan dimensi profil tunggal gabungan hm = 200 mm

$A = 4 \times A_{tunggal}$

$= 4 \times 96.39$

$= 385,56$ mm

$Ix_{gab} = Iy_{gab}$

$= 4 (Ix = Iy) + 4 A_{tunggal} * 0,5 a^2$

$= 4 * 5624.6 + (385,56 *(100 - 6,8)^2)$

$= 3371565.1$ mm^4

$$rx_{gab} = ry_{gab} = \sqrt{\frac{3371565,1}{385,56}} = 93.5 \text{ mm}$$

PERHITUNGAN

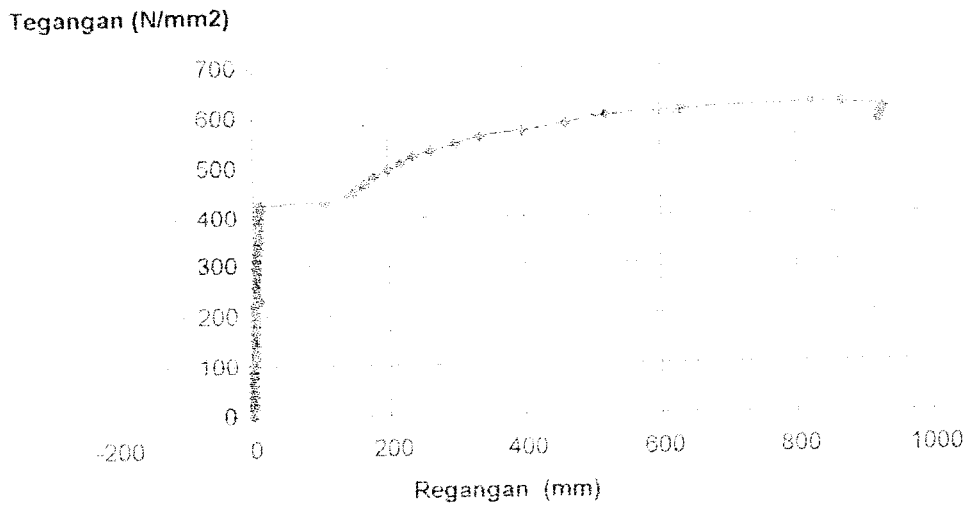
TEGANGAN LELEH BAJA (FY) HASIL UJI

Sampel 1 = Profil siku 25.25.3

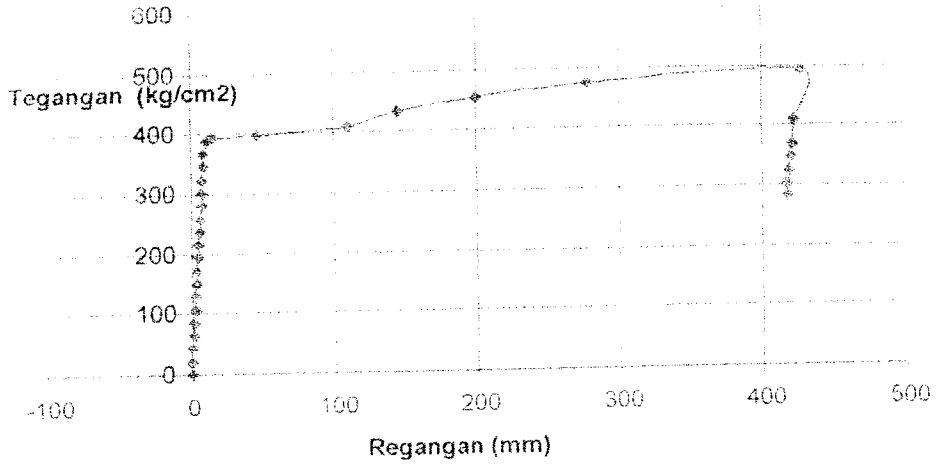
Sampel 2 = Profil tulangan polos 7 mm

Tabel LI.2 hasil pengujian kuat tarik bahan

Benda uji	P leleh (KN)	P maks (KN)	P putus (KN)
sampel 1	9,15	11,40	6,50
sampel 2	16,45	23,90	20,00



Gambar LI.4 Diagram tegangan regangan uji tarik baja bulat diameter 7 mm



Gambar LI.3 Diagram tegangan regangan uji tarik element pelat profil siku

Sampel 1

A=b*t

=11*2.1

$= 23.1\ mm^2$

$$\text{Teg. leleh} = \frac{Pluluh}{A} = \frac{9150N}{(23.1)mm^2} = 396.1N/mm^2$$

Sampel 2

$A=(1/4)*\pi*D^2$

$=(1/4)*\pi*(7^2)$

$=38{,}465\ mm^2$

$$\text{Teg. leleh} = \frac{Pluluh}{A} = \frac{16450N}{(38{,}465)mm^2} = 427{,}66N/mm^2$$

HASIL PENGUJIAN

KOLOM PRISMATIS dan NONPRISMATIS

Tabel LI-3 Beban versus deformasi kolom pendek bangun non prismatis

Beban(kg)	e/h 0.05			Beban(kg)	e/h 0.1			Beban(kg)	Sentris Non Prismatis		
	Dial 1	Dial 2	Dial 3		Dial 1	Dial 2	Dial 3		Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	40	15	24	400	3	0	1	400	25	7	13
800	50	43	43	800	9	2	2	800	45	15	25
1200	62	55	51	1200	11	6	3	1200	50	19	40
1600	67	59	56	1600	13	8	6	1600	54	28	46
2000	71	65	58	2000	16	9	7	2000	56	37	51
2400	77	70	59	2400	18	9	7	2400	57	46	55
2800	84	76	61	2800	22	10	7	2800	59	57	58
3200	89	80	64	3200	22	11	9	3200	65	68	63
3600	93	84	67	3600	26	12	10	3600	77	82	69
4000	99	88	71	4000	28	14	14	4000	87	84	73
4400	105	93	75	4400	29	16	16	4400	102	86	81
4800	110	100	80	4800	31	18	19	4800	111	90	89
5200	117	103	84	5200	33	21	20	5200	120	94	99
5600	122	105	88	5600	34	23	21	5600	129	99	108
6000	125	112	91	6000	35	25	22	6000	146	101	114
6400	129	116	98	6400	37	26	23	6400	160	107	121
6800	134	120	104	6800	40	28	24	6800	175	111	134
7200	142	127	112	7200	42	31	27	7200	184	120	144
7600	148	134	119	7600	45	33	30	7600	193	129	154
8000	154	151	130	8000	49	36	33	8000	199	137	157
8400	166	159	139	8400	54	40	35	8400	208	140	161
8800	183	173	152	8800	60	43	38	8800	211	145	164
9200	196	183	165	9200	65	46	41	9200	215	147	169
9600	204	190	183	9600	69	49	45	9600	220	151	171
10000	224	200	210	10000	77	53	50	10000	226	155	173
10400	243	215	225	10400	83	55	54	10400	234	157	176
10000	289	233	300	10800	92	60	67	10800	241	166	178
9800	345	287	325	11200	106	68	76	11200	249	178	181
				11600	125	75	87	11600	257	200	184
				12000	147	85	102	12000	265	210	201
				12300	178	125	152	12400	276	223	221
				10600	222	170	201	12800	288	230	243
				10200	237	185	234	13200	332	265	286
								13600	378	287	331
								14000	445	319	410
								14200	504	345	560
								14000	538	378	589
								13000	602	490	670

Tabel LI.4 Beban versus deformasi kolom pendek bangun nonprismatis

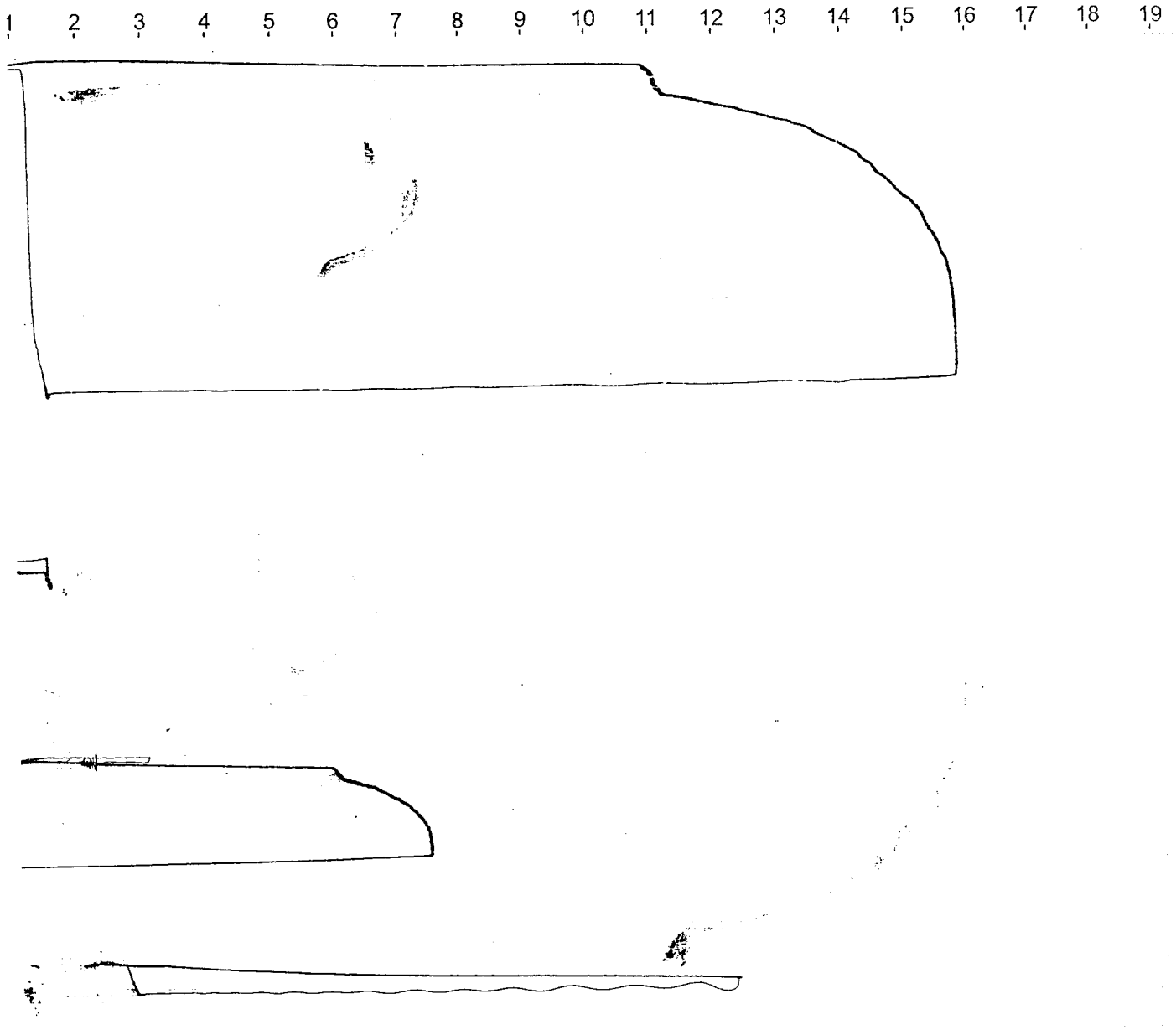
Beban(kg)	Sentris Prismatis		
	Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0
400	2	3	4
800	5	6	7
1200	9	9	11
1600	11	24	17
2000	15	37	26
2400	25	41	40
2800	42	47	45
3200	55	56	56
3600	69	62	67
4000	94	72	86
4400	113	85	99
4800	128	98	111
5200	150	115	126
5600	161	123	135
6000	177	143	148
6400	196	155	161
6800	220	167	179
7200	237	192	190
7600	250	216	224
8000	260	222	229
8400	267	231	237
8800	274	242	248
9200	285	249	260
9600	302	259	269
10000	318	266	277
10400	339	277	287
10800	375	293	298
11200	411	312	326
11600	435	325	385
11800	463	378	433
10300	512	440	489
10000	532	495	512

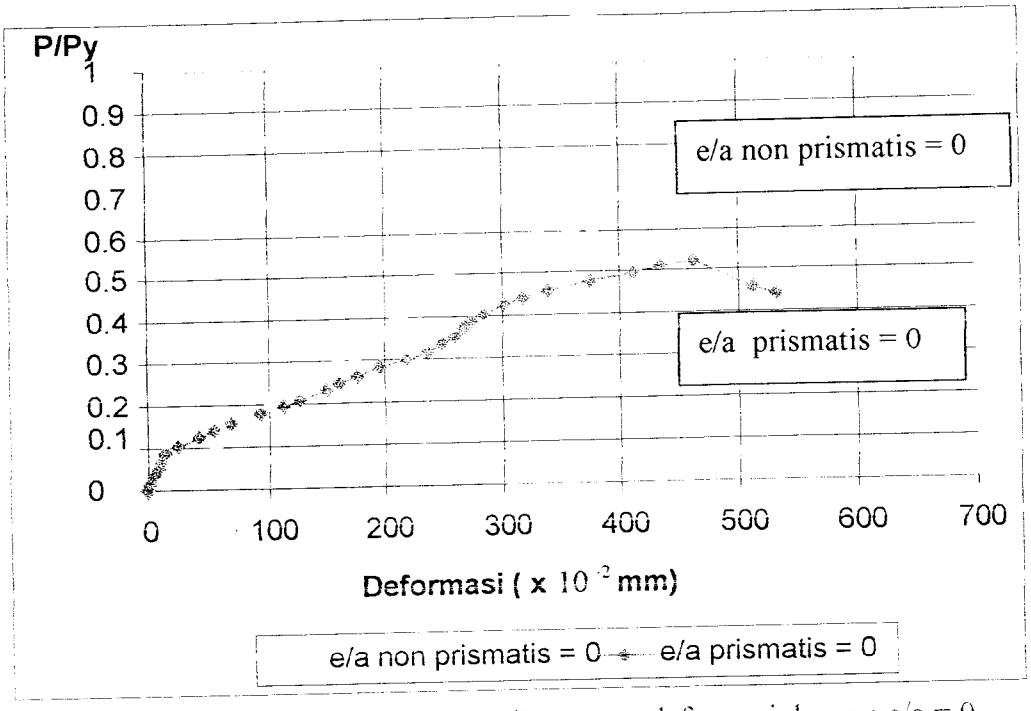
npiran surat No: /ka.Lab/ /LBKT/ /

RAFIK TARIK BAJA

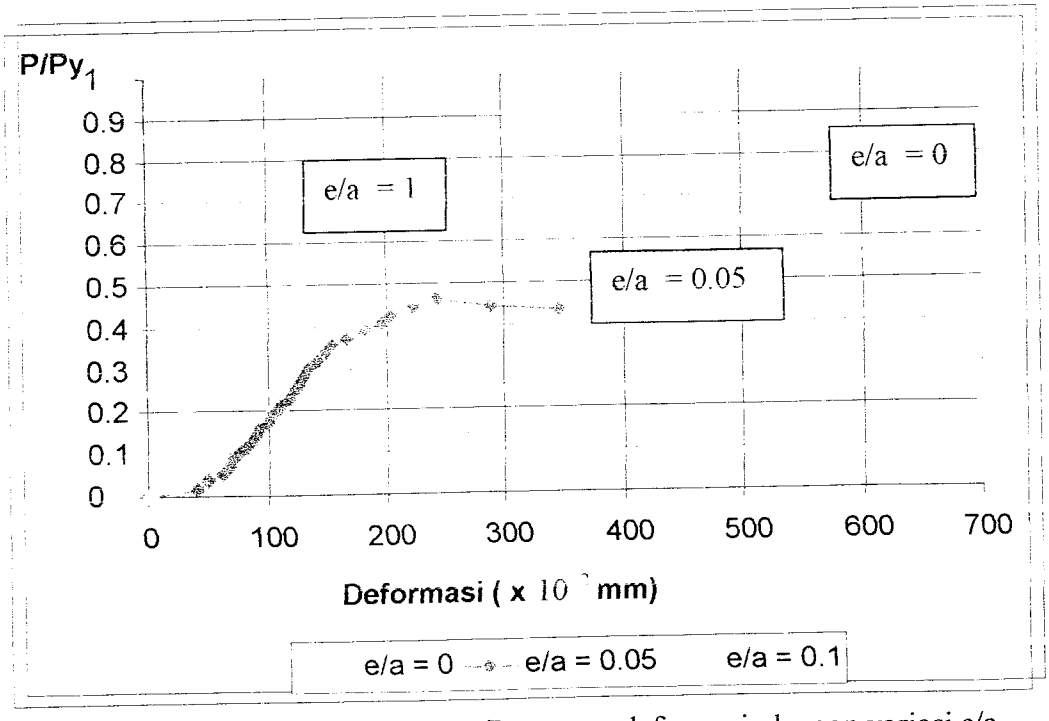
yek : Tugas Akhir Frisca & Safrizal

Catatan:





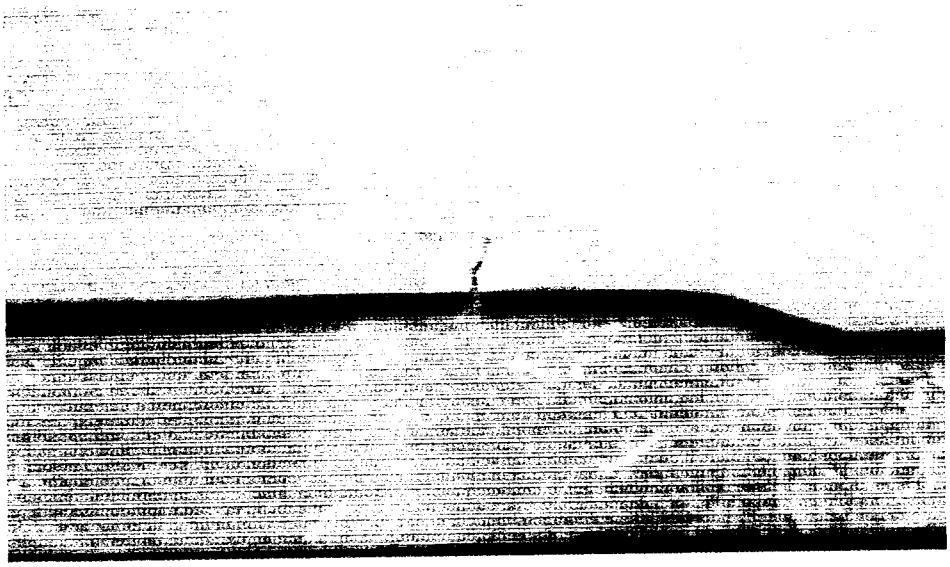
Gambar LI.4. Grafik hubungan P/Py versus deformasi dengan e/a = 0



Gambar LI.5. Grafik hubungan P/Py versus deformasi dengan variasi e/a

LAMPIRAN II

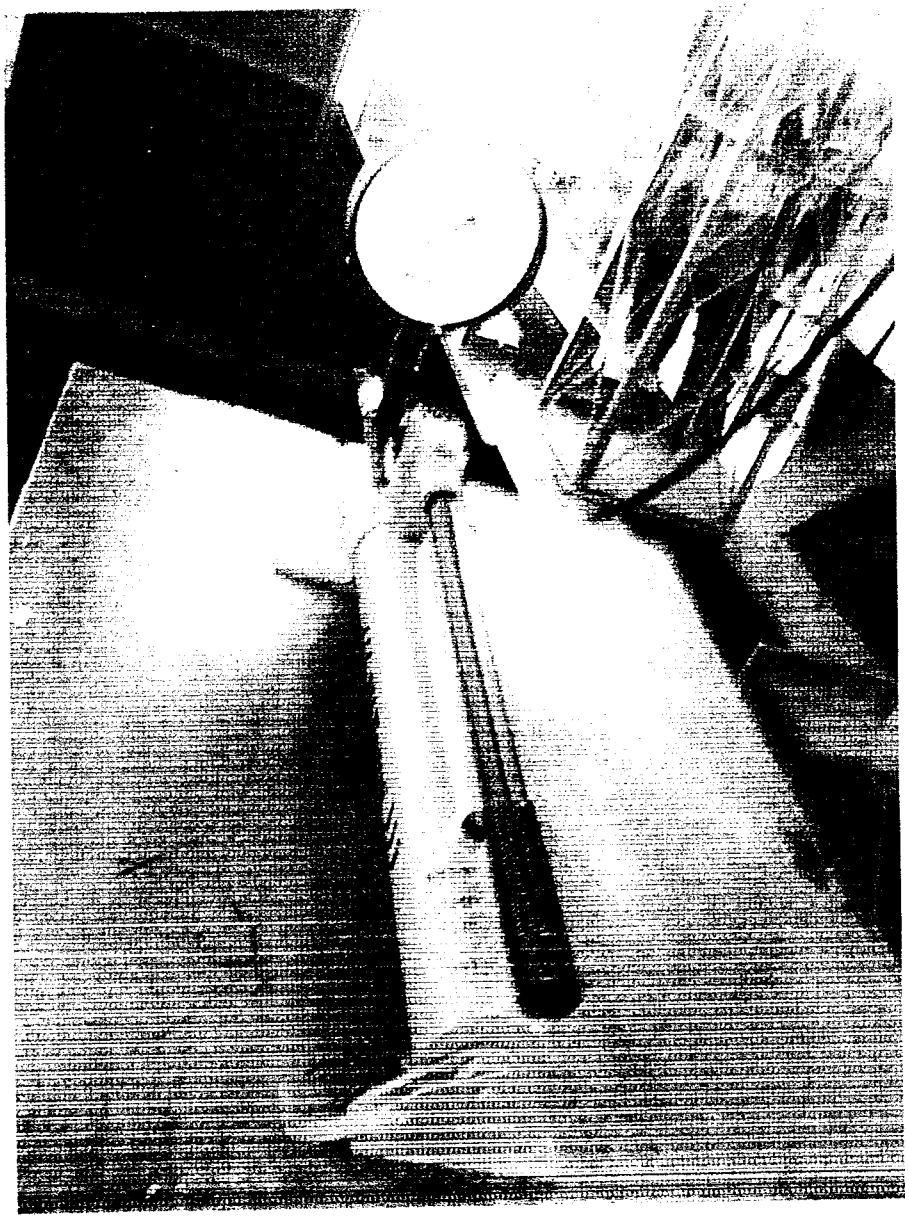
FOTO – FOTO PENGUJIAN



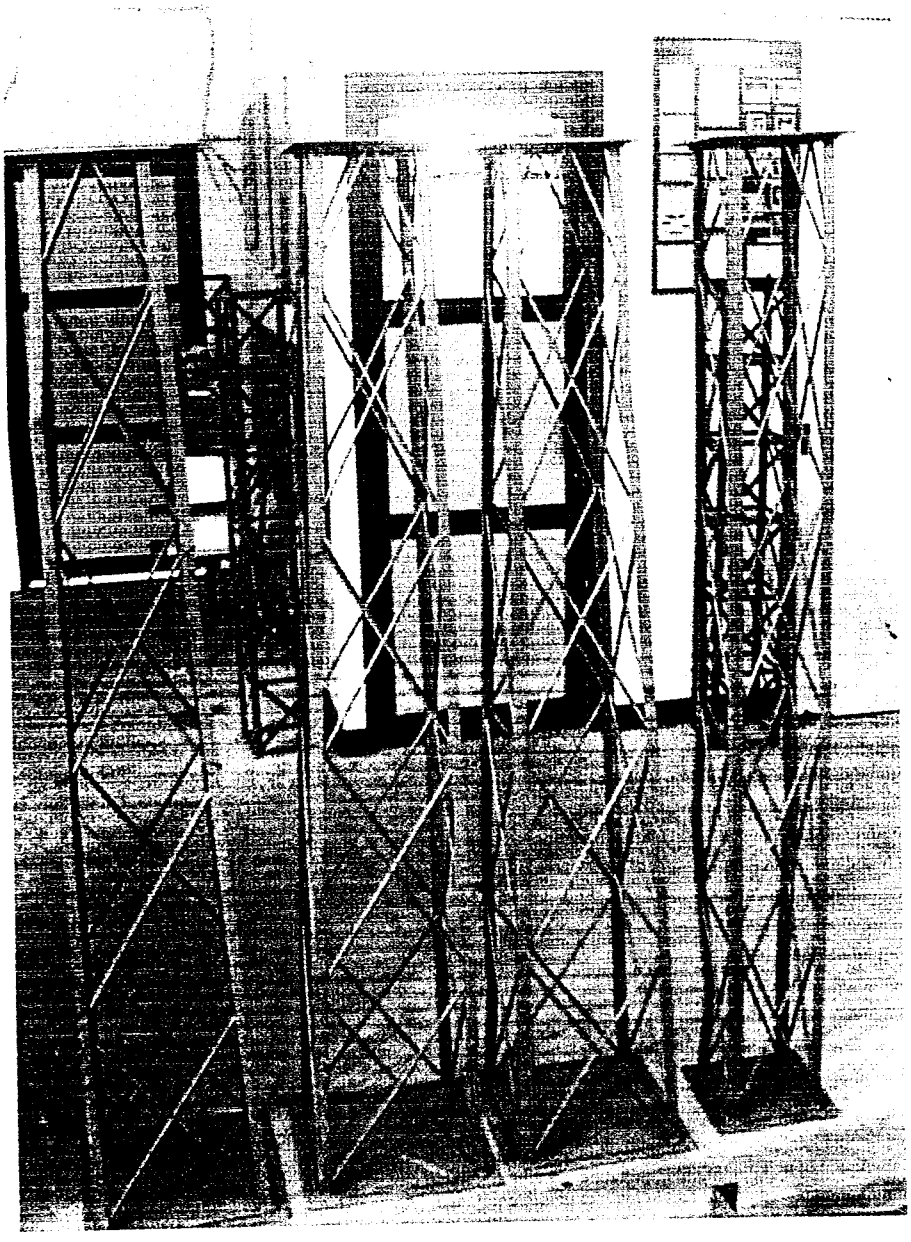
Gambar LII.1. Foto benda uji kuat tarik baja



Gambar LII.2. Foto benda uji sambungan las



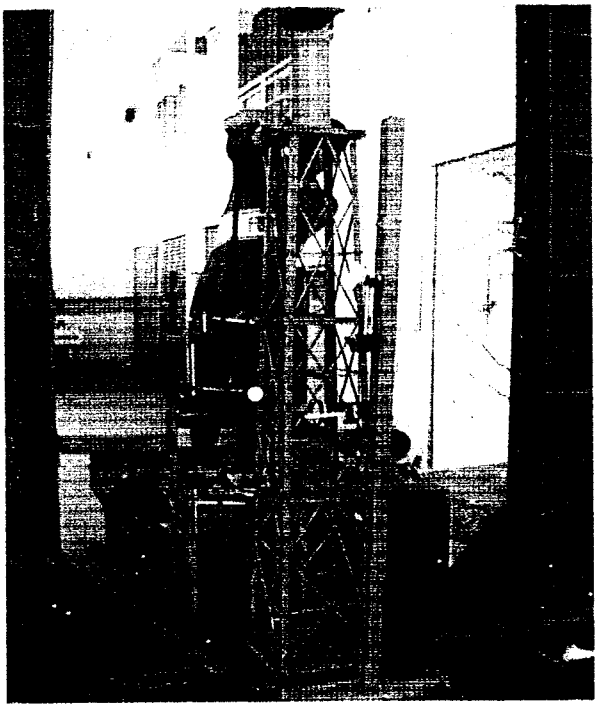
Gambar LII.4. Foto hydraulic Jack



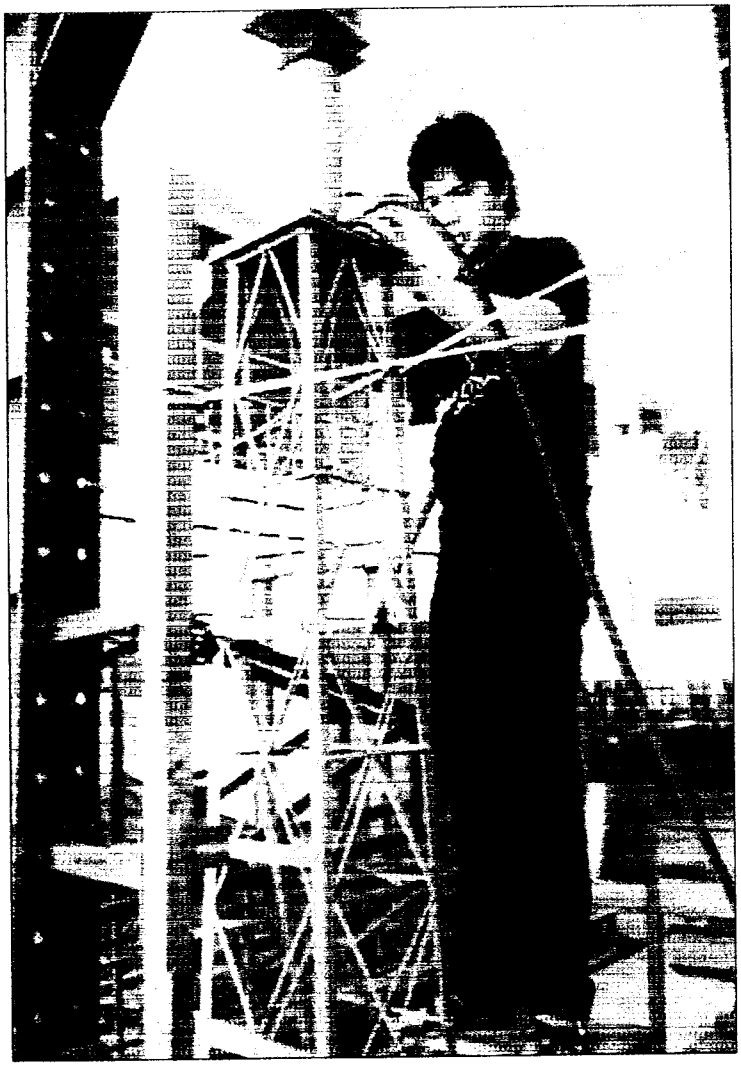
Gambar LII.4. Foto benda uji kolom pendek bangun prismatis dan non prismatis



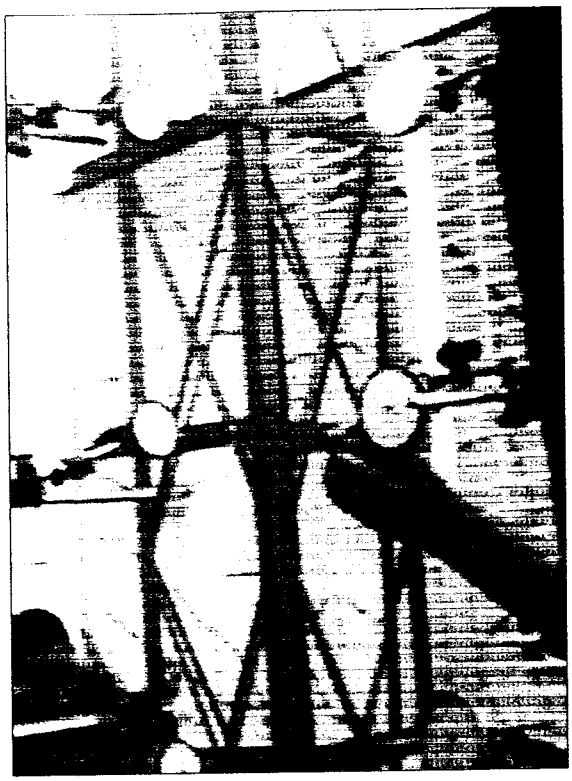
Gambar LII.5. Foto pemasangan benda uji pada Loading Frame



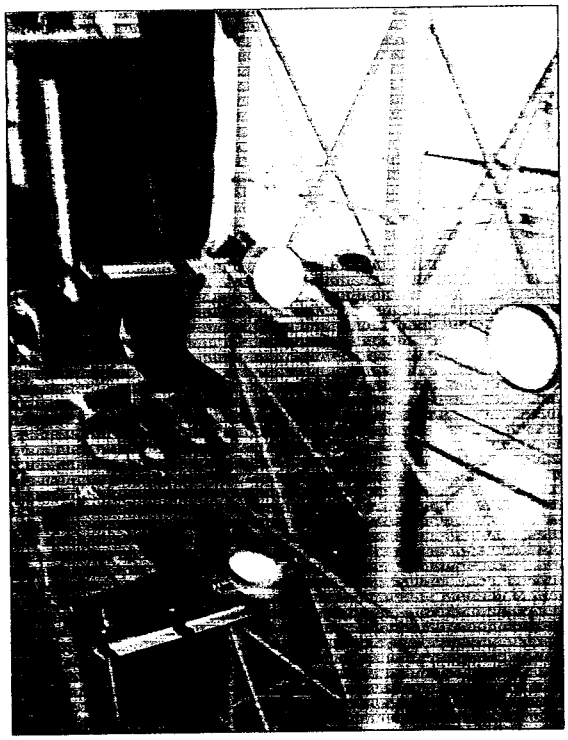
Gambar LII.6. Foto pemasangan benda uji pada Loading Frame



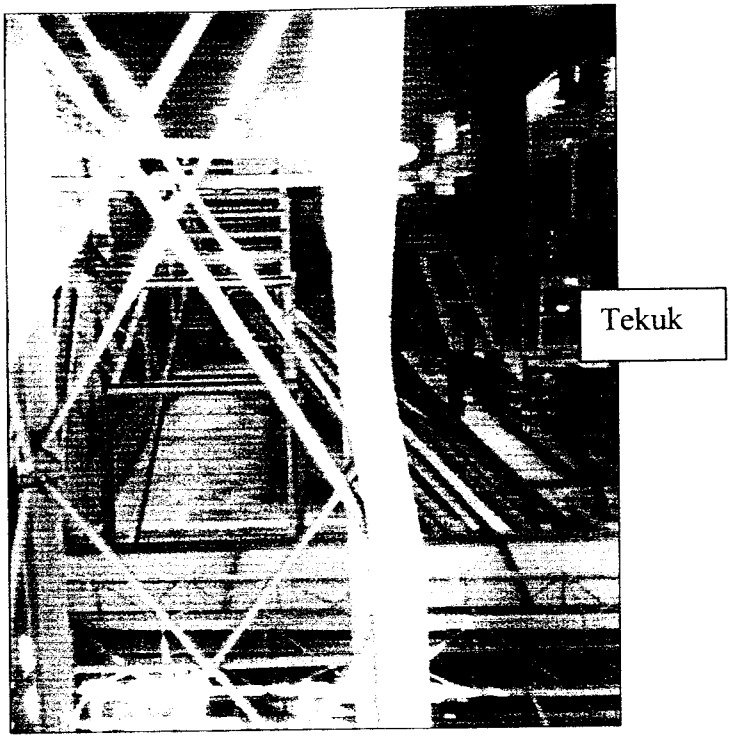
Gambar LII.6. Foto pemasangan benda uji pada Loading Frame



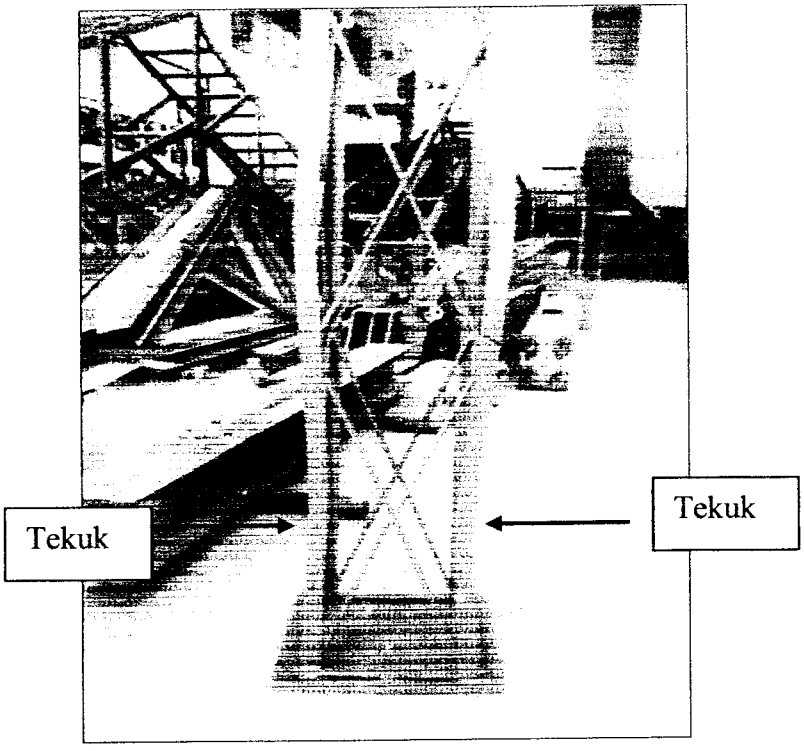
Gambar LII.7. Foto pemasangan Dial Gauge



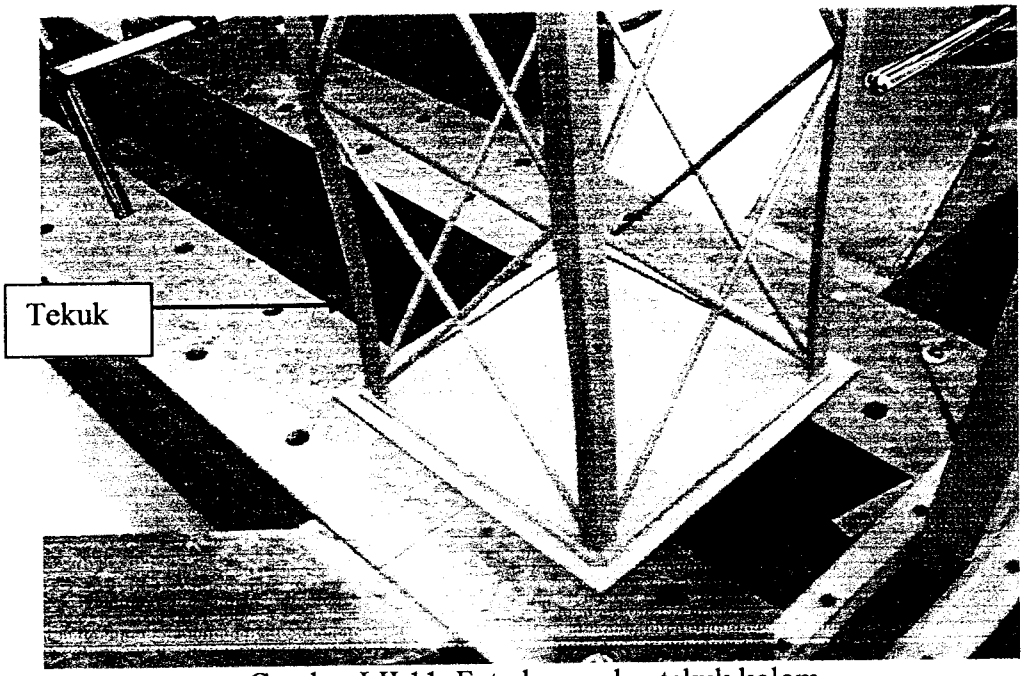
Gambar LII.8. Foto pemasangan dial gauge



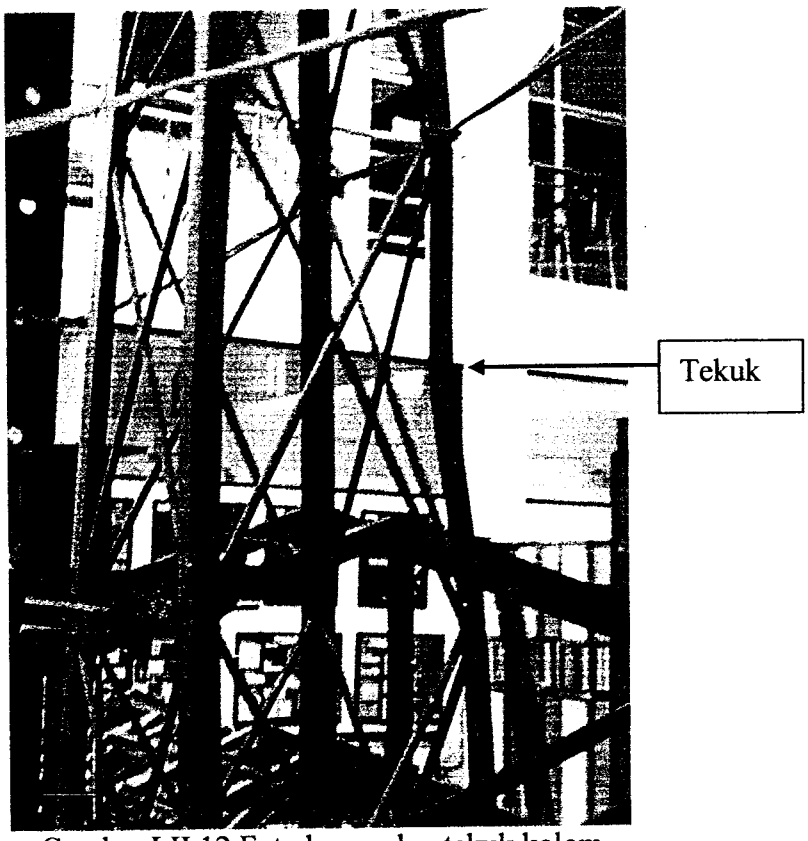
Gambar LII.9 Foto kegagalan tekuk kolom



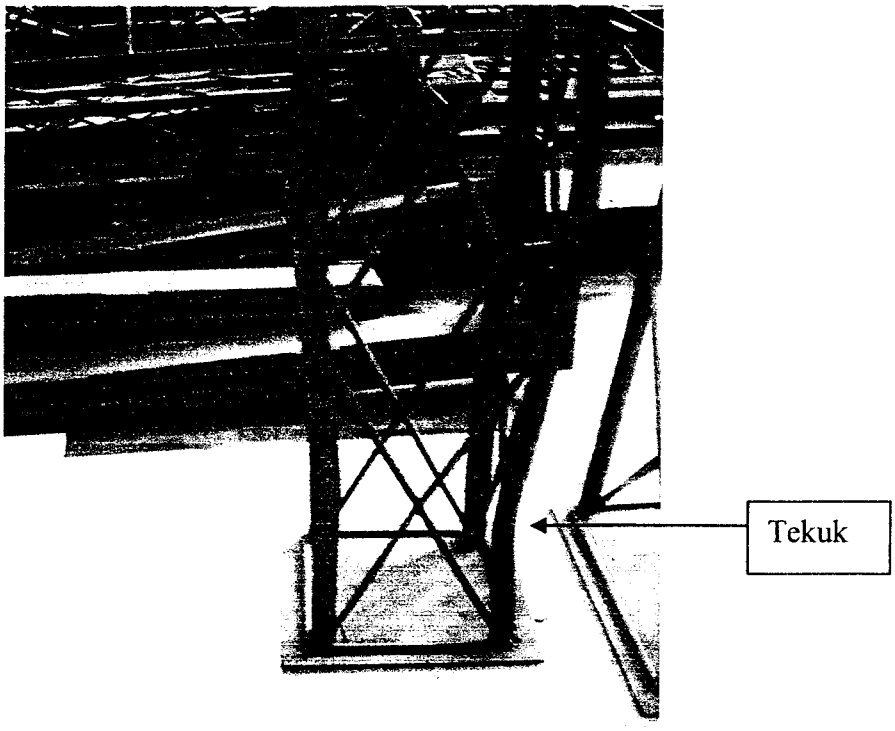
Gambar LII.10. Foto kegagalan tekuk kolom



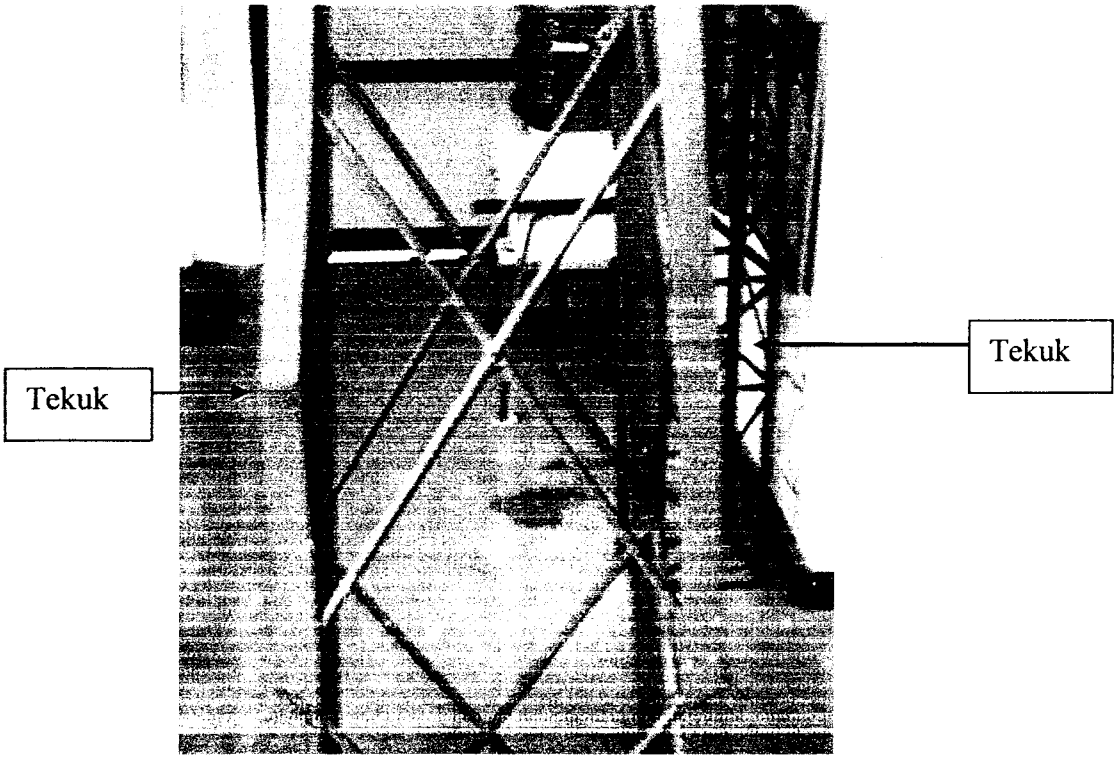
Gambar LII.11. Foto kegagalan tekuk kolom



Gambar LII.12 Foto kegagalan tekuk kolom



Gambar LII.13 Foto kegagalan tekuk kolom



Gambar LII.14 Foto kegagalan tekuk kolom