

KAJIAN EKSPERIMENTAL KASUS TEKUK KOMPONEN STRUKTUR KOLOM DENGAN MENGGUNAKAN BAJA

Dewi Ayu Setiawati

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah
teknik_dasetiawati@gmail.com

ABSTRAK

Kasus tekuk terjadi pada kondisi elastis maupun plastis dibawah pembebanan statis atau dinamis. Pada umumnya, suatu komponen struktur kolom tidak hanya bertugas menahan beban aksial vertikal saja, tetapi juga direncanakan untuk menahan kombinasi beban aksial dan momen lentur. Kondisi ini menjadi tidak optimal apabila tidak melakukan peninjauan pengaruh kelangsingan kolom sebagai bahan pertimbangan penting di dalam perencanaan kolom itu sendiri.

Jenis penelitian adalah kuantitatif dimana ruang lingkup penelitian dibatasi pada : Tipe baja struktur yang digunakan adalah besi tulangan polos dan pipa baja, dengan dimensi penampang baja struktur untuk besi tulangan polos, digunakan yang berdiameter 9,6 mm dan untuk pipa, digunakan berdiameter 21,6 mm. Panjang benda uji untuk pengujian tekuk kolom dibuat bervariasi dengan variasi panjang batang masing – masing sebesar 980 mm, 840 mm dan 750 mm. Parameter yang diteliti dalam penelitian ini adalah : Menentukan beban kritis, tegangan kritis, regangan dan elastisitas dari batang baja; Pengaruh variasi panjang terhadap timbulnya bahaya tekuk pada komponen struktur kolom bahan baja; dan Perilaku tekuk yang ditinjau dalam kondisi elastis (*elastic buckling*), geometri yang sempurna serta bahan homogen. Beban tekuk yang ditinjau adalah akibat pembebanan aksial.

Dari hasil penelitian diketahui perilaku benda uji baik pada besi tulangan maupun pada pipa baja berdasarkan hubungan beban – lendutan dengan variasi panjang 980 mm, 840 mm dan 750 mm memperlihatkan bahwa panjang batang merupakan faktor utama penyebab terjadi kegagalan komponen struktur akibat tekuk (*buckling*). Penggunaan variasi panjang menunjukkan perbedaan besarnya beban kritis pada besi tulangan maupun pipa baja. Perbandingan hasil yang diperoleh melalui analisis terhadap beban kritis dengan menggunakan metode Euler, metode Matriks Kekakuan serta verifikasi *software SAP2000* menunjukkan persen kesalahan berada dibawah 5% sehingga masih dapat diterima secara teknis. Adapun perbandingan hasil eksperimen dengan hasil analisis memperlihatkan persen kesalahan berkisar 2,4 % sampai 16,1 % lebih dari persen kesalahan yang diizinkan sebesar 5 - 10 %.

Kata Kunci : Tekuk, Komponen Struktur Kolom, Baja

PENDAHULUAN

Bangunan yang didesain terhadap beban – beban rencana yang ada, belum dapat menjamin sepenuhnya bebas dari segala risiko kegagalan bangunan, karena penyebabnya yang kompleks. Di dalam mekanika material mempunyai kaitan dengan bentuk kegagalan (*mode of failure*) yang dapat dihubungkan dengan tegangan, regangan dan keseimbangan.

Suatu bentuk kegagalan yang sangat penting adalah kondisi ketidakstabilan struktur (*instability*) atau hilangnya stabilitas kesetimbangan dengan penurunan kekakuan mendadak yang disebut tekuk (*buckling*) yang terjadi baik secara lokal maupun pada keseluruhan struktur (global). Kasus tekuk terjadi pada kondisi elastis maupun plastis di bawah pembebanan statis atau dinamis. Suatu batang struktur jika dibebani akan mengalami perubahan bentuk. Perubahan bentuk ini akan menimbulkan regangan yang disertai dengan tegangan pada elemen – elemen struktur. Selanjutnya tegangan dalam itu menghasilkan reaksi terhadap gaya – gaya yang bekerja. Jika batang struktur cukup kuat untuk memikul gaya-gaya yang bekerja, maka akan selalu ada bentuk lendutan batang yang mengakibatkan batang menjadi setimbang.

Pada umumnya, suatu komponen struktur (dalam hal ini yang kita sebut kolom) tidak hanya bertugas menahan beban aksial vertikal saja, tetapi juga direncanakan untuk menahan kombinasi beban aksial dan momen lentur. Kondisi ini menjadi tidak optimal apabila tidak melakukan peninjauan pengaruh kelangsingan kolom sebagai bahan pertimbangan penting di dalam perencanaan kolom itu sendiri. Mengingat semakin langsing atau semakin panjang suatu kolom, kekuatan penampangannya akan berkurang bersamaan dengan timbulnya kasus tekuk yang dihadapi.

BAHAN DAN METODE

Jenis penelitian adalah kuantitatif dan bersifat penelitian berdasarkan batasan masalah yang diteliti. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Beton / Bahan Bangunan Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Tadulako serta di Laboratorium Uji Bahan Prodi D3 Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Tadulako, pada bulan Desember 2017.

Alat dan bahan penelitian untuk menjawab rumusan masalah penelitian, adalah sebagai berikut dibawah ini :

1. Peralatan untuk pengujian benda uji, yang meliputi :

- a. Mesin untuk pengujian kuat tarik yaitu mesin UTM (*Universal Testing Machine*) model TN – MD serial 0014003.1/3.2/3.3 dengan kapasitas 200 kN



Gambar 1. Mesin UTM (*Universal Testing Machine*)

- b. Mesin untuk pengujian kuat tekan (*compression machine*) dengan kapasitas 2000 kN (1 DIV = 5 kN)



Gambar 2. Mesin UTM (*Universal Testing Machine*)

2. Peralatan untuk pembuatan benda uji yang meliputi :
- a. Mistar untuk mengukur panjang benda uji
 - b. Jangka sorong untuk mengukur diameter benda uji
 - c. Kunci L, digunakan pada saat pemasangan tumpuan pada ujung batang
 - d. Gergaji besi untuk memotong benda uji sesuai ukurannya
 - e. Mesin perata untuk meratakan ujung – ujung benda uji
 - f. Pada ujung batang dipasang sendi sebagai tumpuan, berupa plat yang dibentuk sedemikian rupa hampir sesuai dengan ukuran benda uji.
 - g. Plastik mencegah pergeseran akibat pengaruh pembebanan

- h. *Dial Indicator* untuk mengukur besarnya defleksi vertikal yang terjadi pada saat pembebanan
- i. Bandul, pengukur defleksi pada saat pembebanan, yang dipasang pada titik-titik netral dari benda uji.

Sedang prosedur penelitian adalah merupakan cara ilmiah untuk mendapatkan data dengan tujuan dan kegunaan tertentu, data yang diperoleh melalui penelitian adalah data empiris (teramati) dengan criteria valid, reliable dan obyektif.

Untuk mencapai sasaran penelitian, maka penulis membatasi ruang lingkup penelitian pada :

1. Tipe baja struktur yang digunakan adalah besi tulangan polos dan pipa baja.
2. Dimensi penampang baja struktur :
 - a. Besi tulangan polos, digunakan yang berdiameter 9,6 mm
 - b. Pipa, digunakan berdiameter 21,6 mm
3. Panjang benda uji untuk pengujian tekuk kolom dibuat bervariasi dengan variasi panjang batang masing – masing sebesar 980 mm, 840 mm dan 750 mm. Dalam penentuan akhir variasi panjang tersebut, dipertimbangkan beberapa hal yang menyangkut aspek efisiensi dan pertimbangan praktis bahan. Selain itu, aspek keterbatasan peralatan sangat diperhitungkan guna kemudahan dalam pembuatan benda uji serta kemudahan pada saat berlangsungnya penelitian.
4. Mengingat adanya keterbatasan, maka jumlah sampel yang digunakan dibatasi yaitu 3 buah benda uji untuk masing – masing tipe baja struktur serta variasi panjangnya sehingga jumlah keseluruhan benda uji adalah 18 buah untuk pengujian tekuk kolom.
5. Parameter yang diteliti :
 - a. Menentukan beban kritis, tegangan kritis, regangan dan elastisitas dari batang baja
 - b. Pengaruh variasi panjang terhadap timbulnya bahaya tekuk pada komponen struktur kolom bahan baja
 - c. Perilaku tekuk yang ditinjau dalam kondisi elastis (*elastic buckling*), geometri yang sempurna serta bahan homogen. Beban tekuk yang ditinjau adalah akibat pembebanan aksial.
6. Kondisi tumpuan yang digunakan adalah tumpuan sendi – sendi berupa plat yang dibentuk yang diharapkan nantinya ujung perletakan kolom dapat berputar dengan bebas.
7. Berdasarkan ukuran penampang serta hasil pengujian bahan maka besarnya beban kritis dan tegangan kritis dapat dianalisis dengan menggunakan *software SAP2000* dan

rumus pendekatan. Adapun rumus pendekatan yang digunakan yaitu formulasi Rumus Euler dan matriks kekakuan (*stiffness method*). Beban kritis dan tegangan kritis hasil analisis ini dipakai sebagai pedoman dalam melakukan eksperimen.

HASIL

A. Hasil Pengujian Benda Uji

1. Pengujian Sifat Mekanis Baja

Pengujian awal yang dilakukan adalah pengujian sifat mekanis baja dengan tujuan untuk memperoleh nilai modulus elastisitas baja. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Tadulako.

Pengujian yang dimaksudkan di sini adalah uji tarik yang dilanjutkan dengan uji tekan dan lentur. Data hasil pengujian sifat mekanis baja ini dijadikan sebagai bahan acuan pada saat pelaksanaan pengujian tekuk serta pada saat analisa data. Data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel *Hasil Pengujian Tarik, Tekan dan Lentur Besi* dan tabel *Hasil Pengujian Tekan dan Lentur Pipa* (pada lampiran).

Dari hasil pengujian tarik, tekan dan lentur besi diperoleh rerata nilai modulus elastisitas untuk besi sebesar 217491,463 N/mm² sedangkan nilai modulus elastisitas untuk pipa adalah 223917,974 N/mm². Adapun tegangan leleh maksimum untuk besi sebesar 416,978 Mpa dan tegangan leleh maksimum untuk pipa baja adalah sebesar 336,051 N/mm².

2. Pengujian Tekuk Komponen Struktur Kolom

Data hasil pengujian tekuk komponen struktur kolom bahan pipa diperoleh data – data seperti yang ditunjukkan pada tabel *Hasil Pengujian Tekuk Kolom Pipa Baja* (pada lampiran).

Dari hasil pengujian tekuk komponen struktur kolom bahan pipa diperoleh rerata beban maksimum untuk pipa dengan variasi panjang 980 mm sebesar 21333 N dan 28500 N untuk pipa dengan variasi panjang 840. Sedangkan untuk pipa dengan variasi panjang 750 mm maka diperoleh rerata beban maksimum sebesar 32667 N.

Sedangkan dari hasil pengujian tekuk komponen struktur kolom dengan bahan besi tulangan yang berdiameter 9,6 mm diperoleh data – data seperti yang ditunjukkan pada tabel *Hasil Pengujian Tekuk Kolom Pada Besi Tulangan* (pada lampiran).

Dari hasil pengujian tekuk komponen struktur kolom bahan besi diperoleh

rerata beban maksimum untuk besi dengan variasi panjang 980 mm sebesar 1000 N dan 1317 N untuk pipa dengan variasi panjang 840. Sedangkan untuk pipa dengan variasi panjang 750 mm maka diperoleh rerata beban maksimum sebesar 1733 N.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian pada kasus tekuk komponen struktur kolom dengan menggunakan baja, diketahui bahwa :

1. Hubungan Beban Terhadap Lendutan

Dengan mengamati gambar *Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi, Variasi Panjang 980 mm*, gambar *Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi, Variasi Panjang 840 mm*, dan gambar *Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi, Variasi Panjang 750 mm* (pada lampiran), diperoleh hubungan antara beban dengan lendutan. Pengujian tekuk dengan tiga kali ulangan pada masing – masing variasi panjang dan jenis spesimen, sehingga diperoleh beban kritis (beban maksimum).

Melalui bentuk-bentuk kurva beban – lendutan diperlihatkan pula perbedaan perilaku besi tulangan pada masing – masing variasi panjang. Hubungan beban – lendutan pada besi tulangan dengan variasi panjang 980 mm, 840 mm dan 750 mm dimana semakin besar variasi panjang batang besi tulangan digunakan, maka akan semakin berkurang pula kapasitas pikul beban serta kekakuannya.

Grafik hubungan beban-lendutan pada besi tulangan cenderung mempunyai keseragaman pada masing-masing kelompok variasi panjang, ditandai dengan pencapaian beban maksimum pada kedudukan yang relative sama.

Dengan mengamati gambar *Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi, Variasi Panjang 980 mm* (pada lampiran) menunjukkan bahwa adanya pola garis berhimpit dibawah beban ± 1000 N dimana besi tulangan cenderung masih dapat mempertahankan bentuk liniernya. Namun dengan adanya penambahan beban menyebabkan kondisinya menjadi tidak stabil sehingga terjadi kegagalan akibat tekuk (*buckling*).

Dari gambar *Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi, Variasi Panjang 840 mm* (pada lampiran) menunjukkan bahwa besi tulangan masih dapat mempertahankan bentuk liniernya dibawah pembebanan ± 1500 N. Sedangkan gambar *Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi, Variasi Panjang 750 mm* (pada lampiran) memperlihatkan bahwa dengan panjang 750 mm, besi tulangan masih bisa mempertahankan bentuk liniernya

sampai di bawah pembebanan ± 1700 N.

Dari ketiga gambar *Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi dengan Variasi Panjang 980 mm, 840 mm, dan 750 mm*, menunjukkan grafik perbandingan hubungan beban dan lendutan besi berdasarkan variasi panjangnya. Dari gambar tersebut terlihat adanya peningkatan beban maksimum seiring dengan pengurangan panjang batang besi yang digunakan. Semakin panjang batang yang digunakan maka akan semakin kecil beban yang dapat diterima oleh batang tersebut.

Melalui bentuk-bentuk kurva beban – lendutan diperlihatkan pula perbedaan perilaku pipa baja pada masing – masing variasi panjang. Dengan mengamati gambar *Grafik hubungan beban – lendutan pipa baja variasi panjang 980 mm* (pada lampiran) menunjukkan adanya pola garis berhimpit di bawah pembebanan ± 18000 N, hingga batas beban tersebut ketiga specimen pipa baja memperlihatkan homogenitas kekuatan. Namun dengan adanya penambahan beban menyebabkan kondisinya menjadi tidak stabil sehingga terjadi kegagalan akibat tekuk (*buckling*).

Dengan melihat gambar *Grafik hubungan beban – lendutan pipa baja variasi panjang 840 mm* (pada lampiran) memperlihatkan perilaku pipa baja dengan panjang 840 mm yang kurang homogen, terlihat dari perkembangan bentuk kemiringan kurva beban – lendutan. Sedangkan gambar *Grafik hubungan beban – lendutan pipa baja variasi panjang 750 mm* memperlihatkan hubungan beban – lendutan pipa baja dengan panjang 750 mm dimana pipa baja masih memperlihatkan pola garis berhimpit.

Dari bahasan perilaku benda uji baik pada besi tulangan maupun pada pipa baja berdasarkan hubungan beban – lendutan dengan variasi panjang 980 mm, 840 mm dan 750 mm memperlihatkan bahwa panjang batang merupakan salah satu faktor utama penyebab terjadi kegagalan komponen struktur akibat tekuk (*buckling*).

Menurut D.L Schodek (1999), semakin besar panjang batang yang digunakan, maka semakin kecil kapasitas pikul bebannya. Dengan kondisi seperti itulah maka komponen struktur akan semakin cepat untuk menekuk. Hubungan beban – lendutan dapat pula dibuat dalam grafik hubungan antara tegangan kritis dan kelangsingan. Nilai tegangan kritis diperoleh dari nilai – nilai beban, sedangkan nilai kelangsingan diperoleh dari perbandingan antara nilai panjang dengan jari – jari inersia minimum. Dari gambar *Grafik Hubungan Tegangan – Kelangsingan Pipa Hasil Analisis Numeris dan Eksperimen* dan gambar *Grafik Hubungan Tegangan – Kelangsingan Besi Tulangan Hasil Analisis Numeris dan Eksperimen* (pada lampiran) dapat diketahui dapat diperoleh besarnya kekuatan kolom. Tampak bahwa

daya pikul beban baik pada besi tulangan maupun pada pipa baja akan menjadi berkurang bila panjang tekuk batang bertambah (panjang tekuk bertambah panjang berarti kelangsingan bertambah besar).

Bentuk kurva tekuk juga memperlihatkan bahwa kegagalan pada kolom panjang atau langsing akan disebabkan oleh beban yang lebih kecil daripada beban yang menyebabkan hancurnya material. Kegagalan tersebut disebabkan oleh tekuk (*buckling*). Tegangan yang terjadi pada saat gagal lebih kecil daripada tegangan leleh material kolom tersebut.

Kurva juga memperlihatkan bahwa tegangan kritis atau izin pada komponen kolom berkurang cepat sesuai dengan pertambahan rasio kelangsingan. Menurut Gere dan Timoshenko (2000) sebuah kolom yang panjang dan langsing akan mempunyai rasio kelangsingan yang tinggi sehingga mempunyai tegangan kritis rendah.

Dari gambar Grafik *Hubungan Tegangan – Kelangsingan Pipa Hasil Analisis Numeris dan Eksperimen* dan gambar Grafik *Hubungan Tegangan – Kelangsingan Besi Tulangan Hasil Analisis Numeris dan Eksperimen* (pada lampiran) menunjukkan bahwa bagian kurva Euler yang ditandai dengan garis putus – putus merupakan beban satuan Euler yang melebihi tegangan leleh. Oleh karena itu, pada saat $L/r < 94,889$ untuk pipa dan $L/r < 76,196$ untuk besi tulangan, maka terjadi kegagalan akibat kelelahan bahan.

2. Perilaku Tekuk Komponen Struktur Kolom

Beban kritis yang menyebabkan penampang kolom mulai menekuk, juga dipengaruhi oleh kondisi ujung-ujung perletakan. Dari tabel *Hasil Analisa Perbedaan Panjang Tekuk Antara Eksak dan Eksperimen* (pada lampiran), tampak bahwa rerata panjang tekuk antara eksak dan analisis berkisar diantara 0,17 % – 0,75 %. Kecilnya persen kesalahan terhadap panjang tekuk menunjukkan bahwa elemen struktur kolom dapat dianggap berperilaku sendi atau tidak mengekang momen. Ujung yang tidak mengekang momen merupakan keadaan terlemah untuk batang tekan bila translasi salah satu ujung terhadap ujung lainnya dapat dicegah. Untuk kolom berujung sendi ini, panjang ujung sendi ekuivalen yang disebut panjang efektif sama dengan panjang sesungguhnya, yakni $K = 1,0$ (C. G. Salmon).

Dapat dikatakan, jika beban P telah mencapai P_{cr} maka kolom akan menekuk sepanjang L_n mulai dari dari ujung perletakan satu ke ujung lainnya. Dalam hal ini panjang elemen yang menekuk sama dengan panjang kolom, $L_k = L_n$. Maka factor panjang tekuk, $k_c = 1,0$.

Menurut Gere dan Timoshenko (2000), Panjang efektif L_e untuk sebuah kolom adalah panjang kolom berujung sendi ekuivalen, artinya panjang kolom berujung sendi yang mempunyai kurva defleksi yang cocok benar dengan semua atau sebagian dari kurva defleksi kolom semula.

Adapun perbedaan yang terjadi dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti eksentrisitas yang tidak terduga, idealisasi batang prismatik yang sulit dipenuhi, homogenitas batang dan dapat pula disebabkan karena kondisi tumpuan yang dipakai dalam eksperimen kurang berfungsi sebagai sendi yang sempurna.

3. Analisis kegagalan komponen struktur kolom

Selain dengan cara eksperimen, untuk menentukan besarnya beban kritis juga dilakukan dengan analisis numeris. Analisis numeris dilakukan dengan *software SAP2000*, Rumus Euler dan metode Kekakuan (*stiffness method*). Hasil – hasil analisis terhadap beban kritis kolom panjang besi dan pipa dengan berbagai cara tersebut dijadikan sebagai pembandingan terhadap besarnya beban kritis yang diperoleh dari eksperimen.

a. Analisis dengan menggunakan Rumus Euler

Hasil analisis terhadap beban kritis dan tegangan kritis dilakukan dengan persamaan beban kritis dari Rumus Euler (persamaan 26), dapat dilihat pada tabel *Hasil Analisis Menggunakan Rumus Euler* (pada lampiran).

Secara umum, dapat dilihat bahwa hasil perhitungan beban kritis secara analitis dengan menggunakan persamaan Euler untuk besi tulangan dengan panjang 980 mm diperoleh sebesar 931,847 N, untuk panjang 840 sebesar 1268,347 N sedangkan untuk panjang 750 mm beban kritisnya mengalami peningkatan menjadi 1591,015 N. Jika dibandingkan dengan hasil eksperimen maka diperoleh sebesar 6,81 % kesalahan untuk panjang 980 mm, 3,67 % untuk panjang 840 mm dan 8,21 % kesalahan untuk panjang batang 750 mm. Hasil kesalahan tersebut dapat dilihat pada tabel *Perbandingan Hasil Eksperimen Besi Tulangan Dengan Rumus Euler* (pada lampiran).

Perbandingan hasil eksperimen besi tulangan dengan Rumus Euler juga dapat dilihat dalam gambar *Grafik Hubungan Panjang dan Beban Kritis Besi Hasil Eksperimen dan Euler* (pada lampiran). Adapun Perbandingan hasil eksperimen pipa dengan analisis Rumus Euler dapat dilihat pada tabel *Perbandingan Hasil Eksperimen Pipa dengan Analisis Rumus Euler* (pada lampiran). Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa hasil perhitungan beban kritis secara analitis dengan menggunakan persamaan Euler dengan panjang 980 mm diperoleh beban kritis sebesar 17898,229 N, untuk panjang

840 sebesar 24361,479 N sedangkan untuk panjang 750 mm beban kritisnya mengalami peningkatan menjadi 30559,039 N.

Jika dibandingkan dengan hasil eksperimen diperoleh sebesar 16,1021 % kesalahan untuk panjang 980 mm, 14,5211 % untuk panjang 840 mm dan 6,4519 % penyimpangan untuk panjang batang 750 mm.

Perbandingan hasil eksperimen besi tulangan dengan Rumus Euler juga dapat dilihat dalam gambar *Grafik Hubungan Panjang dan Beban Kritis Besi Hasil Eksperimen dan Euler* (pada lampiran).

Dari bahasan di atas tampak bahwa akurasi persen kesalahan berkisar antara 2,4 % sampai 16,1%. Menurut R. Szilard (1989), biasanya kesalahan perhitungan harus tidak lebih besar dari $\pm 5\%$ dibandingkan dengan penyelesaian eksak. Akan tetapi, dalam beberapa penerapan praktis, kesalahan perhitungan sebesar 10% diizinkan. Dalam bidang teknik, metode yang memberikan hasil yang diperlukan dengan mudah tetapi memiliki kesalahan perhitungan sebesar $\pm 10\%$ hampir selalu dipilih dari pendekatan yang lebih eksak.

Berdasarkan hasil eksperimen yang lebih besar dari hasil analisis yang menggunakan Rumus Euler, dapat diduga bahwa perletakan sendi yang dipakai dalam eksperimen kurang dapat berfungsi sebagai sendi yang sempurna. Sehingga gesekan pada perletakan itu menghasilkan momen perlawanan terhadap gaya yang dikerjakan.

Asumsi yang digunakan oleh Euler yaitu berupa geometri yang sempurna, bahan yang homogen serta beban yang eksentris cenderung sulit diterapkan penggunaannya dalam pengujian. Hal-hal yang disebutkan di atas cukup mempengaruhi perbedaan antara hasil pengujian dengan hasil yang diperoleh melalui Rumus Euler. Selain itu, timbulnya perbedaan hasil dapat pula disebabkan oleh kondisi alat dan kondisi pada saat pengujian dilakukan.

b. Analisis dengan menggunakan metode kekakuan

Berdasarkan perakitan matriks elemen I dan II, dan juga penjumlahan matriks lentur dan geometri elemen I dan II dalam transformasi matrix sehubungan dengan deformasi struktur, maka diketahui beban tekuk apabila determinan $[K]=0$ dengan menyederhanakannya sesuai dengan kondisi batas deformasi.

Pada perletakan sendi – sendi, kondisi batasnya $\Delta_1 = \Delta_4 = \Delta_5 = 0$, maka dengan menghapuskan baris dan kolom 1, 4 dan 5 diperoleh matriks sebagai berikut :

$$K = \begin{bmatrix} 4 - 4\lambda & -6 + 3\lambda & 0 \\ -6 + 3\lambda & 24 - 72\lambda & 6 - 3\lambda \\ 0 & 6 - 3\lambda & 4 - 4\lambda \end{bmatrix}$$

Berdasarkan hasil analisis, dengan memperhitungkan semua besaran yang ada karena nilai eigen (*eigen value*) yang berhubungan dengan faktor beban kritis mempunyai persamaan yang kompleks, maka untuk menyelesaikan persamaan tersebut digunakan software MAPLE ver. 10 dalam bentuk nilai-nilai numeris adalah sebagai berikut :

```
Determ :      =      Determinant(K);
          Determ := 96 K 1344 I C 2328 I 2 K 1080 I 3
Digits      :      =      5;
Akar        :      =      fsolve (Determ, lambda);
          Akar := 0.082865 , 1.0000 , 1.0727
```

$$\text{Determinan } K = 96 - 1344\lambda + 2328\lambda^2 - 1080\lambda^3 = 0$$

Diperoleh akar terkecil $\lambda = 0,082865$

Maka beban kritis :

$$\lambda = \frac{P \cdot \ell^2}{30 \cdot EI} \rightarrow P_{cr} = \frac{\lambda \cdot 30 \cdot EI}{\ell^2}, \text{ maka } P_{cr} = \frac{9,944 \cdot EI}{L^2}$$

Dengan menggunakan persamaan beban kritis di atas, perbedaan antara hasil eksperimen dengan hasil analisis yang menggunakan metode kekakuan untuk besi tulangan dan pipa baja dengan panjang batang 980 mm, 840 mm dan 750 mm secara berturut – turut dapat dilihat pada tabel *Perbandingan Hasil Analisis Rumus Euler dan Metode Kekakuan* (pada lampiran).

Dari tabel *Perbandingan Hasil Analisis Rumus Euler dan Metode Kekakuan* (pada lampiran), dapat dilihat bahwa pada saat panjang besi tulangan 980 mm beban kritisnya sebesar 938,852 N. Pada saat panjang yang digunakan 840 mm, beban kritisnya sebesar 1277,882 N. Ketika panjang besi dikurangi menjadi 750 mm, maka beban kritisnya meningkat menjadi 1602,976 mm.

Begitu pula besarnya beban kritis pipa baja yang mengalami peningkatan seiring dengan semakin pendek batang yang digunakan. Dapat dilihat bahwa pada saat panjang pipa baja 980 mm beban kritisnya sebesar 18032,780 N. Pada saat panjang yang digunakan 840 mm, beban kritisnya sebesar 24544,617 N. Dan ketika panjang besi dikurangi menjadi 750 mm, maka beban kritisnya meningkat menjadi 30788,768 mm.

c. Verifikasi software SAP2000

Simulasi numerik beban kritis dilakukan dengan *software SAP2000*, dengan model kolom menggunakan material baja. Untuk mendapatkan hasil dengan tingkat ketelitian yang cukup baik (konvergen), maka dilakukan simulasi dengan variasi jumlah elemen yang berbeda. Selanjutnya dilakukan simulasi dengan *software SAP2000*. Perbandingan hasil simulasi dan hasil analisis dengan Rumus Euler selengkapnya ditampilkan dalam tabel *Perbandingan Hasil Simulasi Software Sap2000 dengan Hasil Eksperimen* (pada lampiran).

Dari hasil simulasi *SAP2000* diperoleh beban kritis rerata untuk besi tulangan dengan panjang batang 980 mm, 840 mm dan 750 mm masing – masing sebesar 931,890 N, 1268,331 N dan 1591,903 N sedangkan untuk pipa dengan panjang batang 980 mm dan 780 mm masing – masing sebesar 17867,715 N, 24292,023 N dan 30448,190 N.

Dari gambar *Grafik Hubungan % Kesalahan dan Jumlah Segmen Menggunakan Software Sap2000* (pada lampiran), menunjukkan bahwa berdasarkan hasil simulasi memperlihatkan bahwa tingkat % kesalahan pada model dengan jumlah segmen yang semakin banyak (atau model dengan ukuran yang semakin diperkecil) menjadi semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa model besi tulangan dan pipa baja dengan jumlah segmen 5, berdasarkan hasil analisis terhadap beban kritis yang diperoleh dapat diterima secara teknis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan terhadap masalah penelitian, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari bahasan perilaku benda uji baik pada besi tulangan maupun pada pipa baja berdasarkan hubungan beban – lendutan dengan variasi panjang 980 mm, 840 mm dan 750 mm memperlihatkan bahwa panjang batang merupakan faktor utama penyebab terjadi kegagalan komponen struktur akibat tekuk (*buckling*). Semakin panjang batang yang digunakan akan semakin besar kelangsingan batang tersebut sehingga akan semakin mudah untuk menekuk.
2. Penggunaan variasi panjang menunjukkan perbedaan besarnya beban kritis pada besi tulangan maupun pipa baja. Panjang besi tulangan yang bervariasi yaitu 980 mm,

840 mm dan 750 mm, memberikan rerata beban kritis masing-masing sebesar 1000 N, 1317 N dan 1733 N. Sedangkan pipa baja memberikan rerata beban kritis untuk variasi panjang 980 mm, 840 mm dan 750 mm masing-masing sebesar 21333,33 N, 28500 N dan 32666,67 N. Pada beban – beban tersebut, benda uji mulai memperlihatkan kecenderungannya untuk menekuk

3. Perbandingan hasil yang diperoleh melalui analisis terhadap beban kritis dengan menggunakan metode Euler, metode Matriks Kekakuan serta verifikasi *software SAP2000* menunjukkan persen kesalahan berada dibawah 5% sehingga masih dapat diterima secara teknis. Adapun perbandingan hasil eksperimen dengan hasil analisis memperlihatkan persen kesalahan berkisar 2,4 % sampai 16,1 % lebih dari persen kesalahan yang diizinkan sebesar 5 - 10 %. Hal ini dapat disebabkan karena asumsi yang digunakan oleh Euler yaitu berupa geometri yang sempurna, pemodelan kondisi tumpuan yang ideal, bahan yang homogen serta beban yang sentris cenderung sulit diterapkan penggunaannya dalam pengujian.

Dari ketiga kesimpulan yang ditarik oleh peneliti, maka disarankan untuk : Melakukan pengecekan kembali kelayakan alat – alat uji sebelum pelaksanaan pengujian agar mendapatkan pembacaan yang lebih akurat; Memperhatikan kembali pemilihan kelangsingan benda uji; Untuk pengujian – pengujian selanjutnya, agar lebih memperhatikan masalah pemodelan kondisi tumpuan yang ideal mengingat hal tersebut sangat sulit diterapkan dalam pengujian; dan Perlu adanya pembelajaran lebih lanjut mengenai kondisi tumpuan sendi – sendi tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 1986, ***Pengantar Praktikum Ilmu Logam***, Laboratorium Uji Konstruksi, Serpong
2. Japanese Standards Association, 1981, ***JIS Handbook 1981 Ferrous Materials and***, JIS
3. Jensen, Alfred, Harry H. Chenoweth, 1991, ***Kekuatan Bahan Terapan***, Edisi Keempat, Erlangga. Jakarta
4. Jurusan Teknik Sipil – FTSP – ITB, 2000, ***Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung***, ITB, Bandung
5. Schodeck DL, 1999, ***Struktur*** – Edisi Kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta
6. Timoshenko, S. P dan Gere, J. M. 1996, ***Mekanika Bahan***, Penerbit Erlangga, Jakarta
7. Salmon, C. G dkk, 1991, ***Struktur Baja (Disain dan Perilaku)***, Edisi Kedua, Penerbit Erlangga, Jakarta

8. Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan. 1984. **Peraturan Perencanaan Bangunan Baja Indonesia (PPBBI)**. Edisi II.

LAMPIRAN :

Tabel 1. Hasil Pengujian Tarik, Tekan Dan Lentur Besi

No.	Jenis Sampel	Jenis Pengujian	A (mm ²)	P _{max} (kN)	σ _{max} (N/mm ²)	σ _p (N/mm ²)	σ _y (N/mm ²)	ε _{maks}	ε _p	ε _y	E (N/mm ²)
1	Besi 1	Tarik	72,382	39,040	661,374	385,083	415,465	0,214	0,039	0,044	10204,988
2	Besi 2	Tarik	72,382	37,750	644,823	378,028	386,775	0,231	0,031	0,036	19662,077
3	Besi 3	Tarik	72,382	37,410	641,231	384,792	391,009	0,229	0,039	0,044	10897,579
4	Besi 1.2	Tarik	72,382	45,570	838,634	433,765	453,620	0,325	0,040	0,045	5107,296
5	Besi 2.2	Tarik	72,382	45,840	827,279	429,830	452,223	0,029	0,035	0,040	13202,669
6	Besi 3.2	Tarik	72,382	46,220	795,260	415,676	448,576	0,250	0,035	0,040	7321,787
7	Besi 1.3	Tekan	72,382	38,330	529,549	340,829	384,763	0,063	0,013	0,017	2102,620
8	Besi 2.3	Tekan	72,382	37,750	521,536	359,204	407,558	0,063	0,017	0,021	18568,077
9	Besi 3.3	Tekan	72,382	31,260	431,874	200,325	304,494	0,046	0,004	0,008	24039,028
10	Besi 1.4	Lentur	72,382	1,510	20,723	11,605	13,125	0,103	0,017	0,019	219027,392

11	Besi 2.4	Lentur	72,382	1,280	17,684	11,329	11,881	0,145	0,017	0,019	198182,877
12	Besi 3.4	Lentur	72,382	1,590	21,967	12,296	13,263	0,148	0,016	0,017	235264,121

Sumber : Data Primer, 2017

Tabel 2. Hasil Pengujian Tekan dan Lentur Pipa

No.	Jenis Spesimen	Jenis Pengujian	A (mm ²)	P _{max} (kN)	σ _{max} (N/mm ²)	σ _p (N/mm ²)	σ _y (N/mm ²)	ε _{maks}	ε _p	ε _y	E (N/mm ²)
1	Pipa ½". A	Tekan	175,301	58,690	333,598	281,003	333,598	0,019	0,015	0,002	18404,000
2	Pipa ½". B	Tekan	175,301	76,420	435,936	305,760	336,051	0,075	0,017	0,021	18235,000
3	Pipa ½". C	Tekan	175,301	59,400	338,846	284,254	328,521	0,027	0,014	0,018	19901,000
4	Pipa ½". D	Tekan	175,301	55,300	315,458	140,159	164,403	0,133	0,013	0,017	11105,000
5	Pipa ½". 1.2	Tekan	175,301	80,190	457,442	156,759	301,938	0,138	0,017	0,025	6723,526
6	Pipa ½". 2.2	Tekan	175,301	79,770	455,046	304,733	328,692	0,135	0,018	0,022	14066,050
7	Pipa ½". A	Lentur	175,301	5,980	34,113	0,008	29,492	0,058	24,872	0,011	223917,974

Sumber : Data Primer, 2017

Tabel 3. Hasil Pengujian Tekuk Kolom Pipa Baja

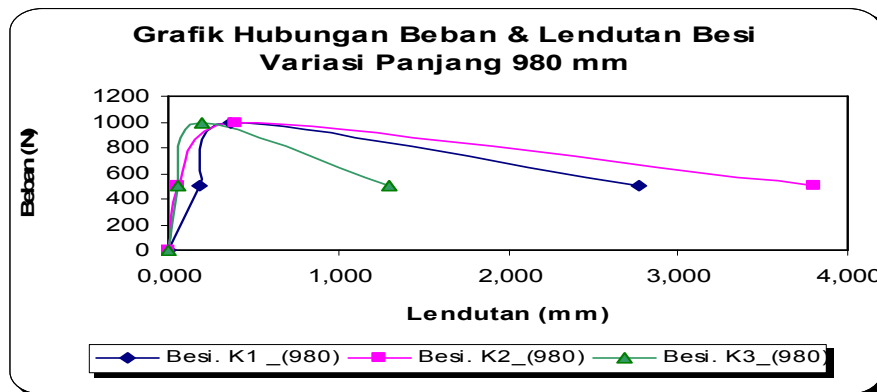
Kode Pipa	L (mm)	A (mm ²)	λ	Eksperimen	
				P _{cr} (N)	σ _{cr} (N/mm ²)
a_(980)	980	175,301	147,125	25000	142,612
b_(980)	980	175,301	147,125	19000	108,385
c_(980)	980	175,301	147,125	20000	114,089
Rerata	980	175,301	147,125	21333	121,695
a_(840)	840	175,301	126,106	30500	173,986
b_(840)	840	175,301	126,106	27000	154,021
c_(840)	840	175,301	126,106	28000	159,725
Rerata	840	175,301	126,106	28500	162,578
a_(750)	750	175,301	112,596	28000	159,725
b_(750)	750	175,301	112,596	35000	199,657
c_(750)	750	175,301	112,596	35000	199,657
Rerata	750	175,301	112,596	32667	186,346

Sumber : Data Primer, 2017

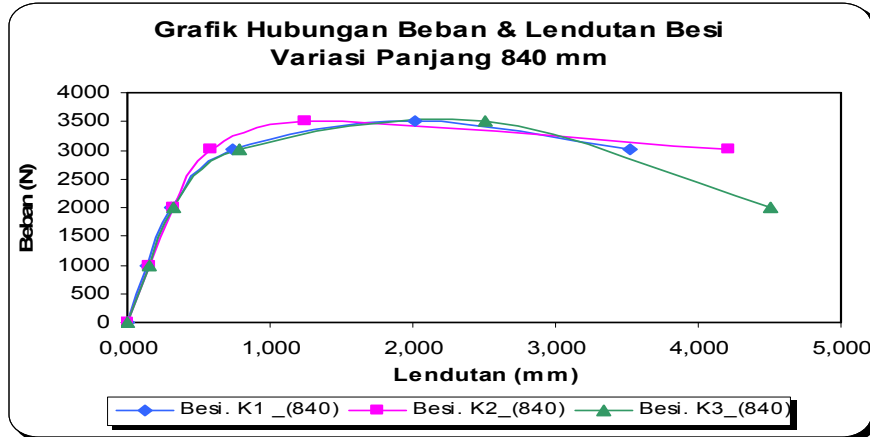
Tabel 6. Hasil Pengujian Tekuk Kolom Pada Besi Tulangan

Kode	L (mm)	A (mm ²)	λ	Eksperimen	
				P _{cr} (N)	σ_{cr} (N/mm ²)
K1_(980)	980	72,382	408	1000	13,816
K2_(980)	980	72,382	408	1000	13,816
K3_(980)	980	72,382	408	1000	13,816
Rerata	980	72,382	408	1000	13,816
K1_(840)	840	72,382	350	1300	17,960
K2_(840)	840	72,382	350	1300	17,960
K3_(840)	840	72,382	350	1350	18,651
Rerata	840	72,382	350	1317	18,190
K1_(750)	750	72,382	313	1650	22,796
K2_(750)	750	72,382	313	1750	24,177
K3_(750)	750	72,382	313	1800	24,868
Rerata	750	72,382	313	1733	23,947

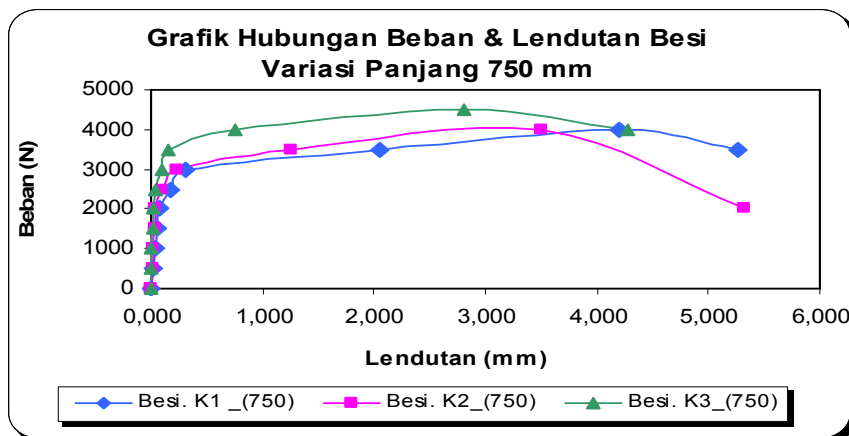
Sumber : Data Primer, 2017



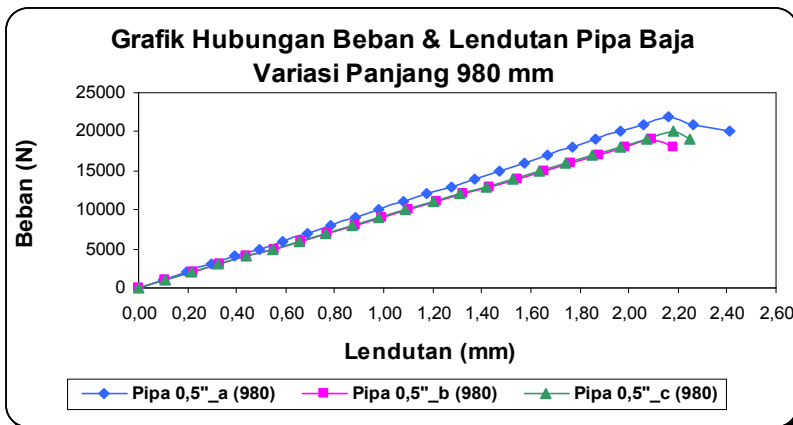
Gambar 3. Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi, Variasi Panjang 980 mm



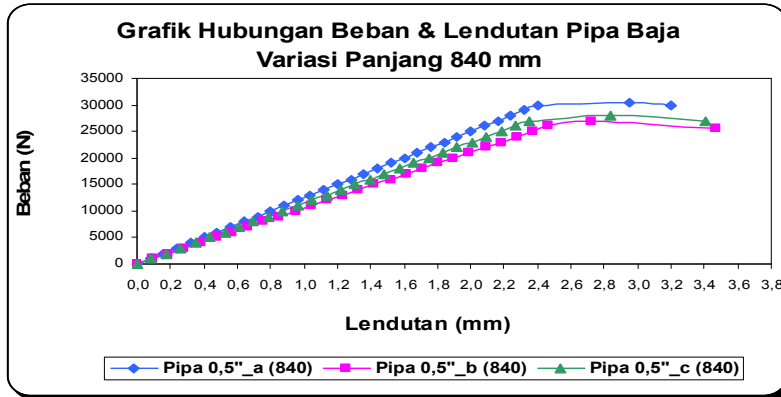
Gambar 4. Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi Variasi Panjang 840 mm



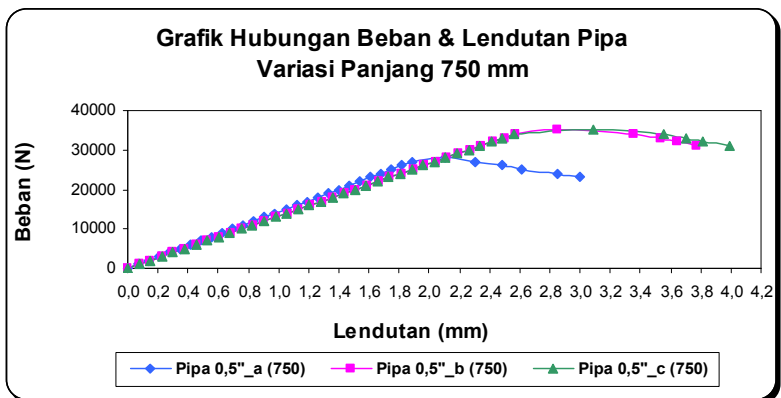
Gambar 5. Grafik Hubungan Beban – Lendutan Besi Variasi Panjang 750 mm



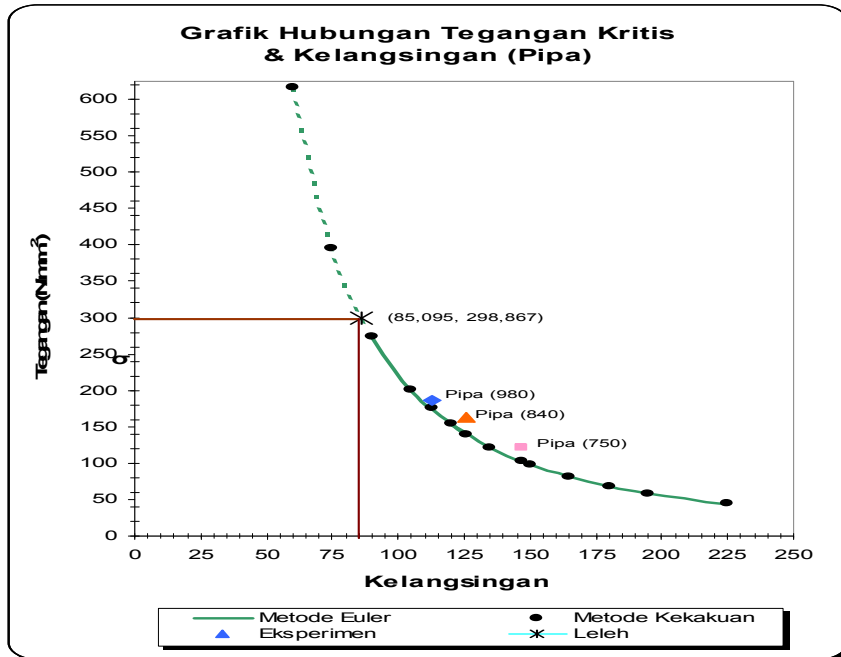
Gambar 6. Grafik Hubungan Beban – Lendutan Pipa Baja Variasi Panjang 980 mm



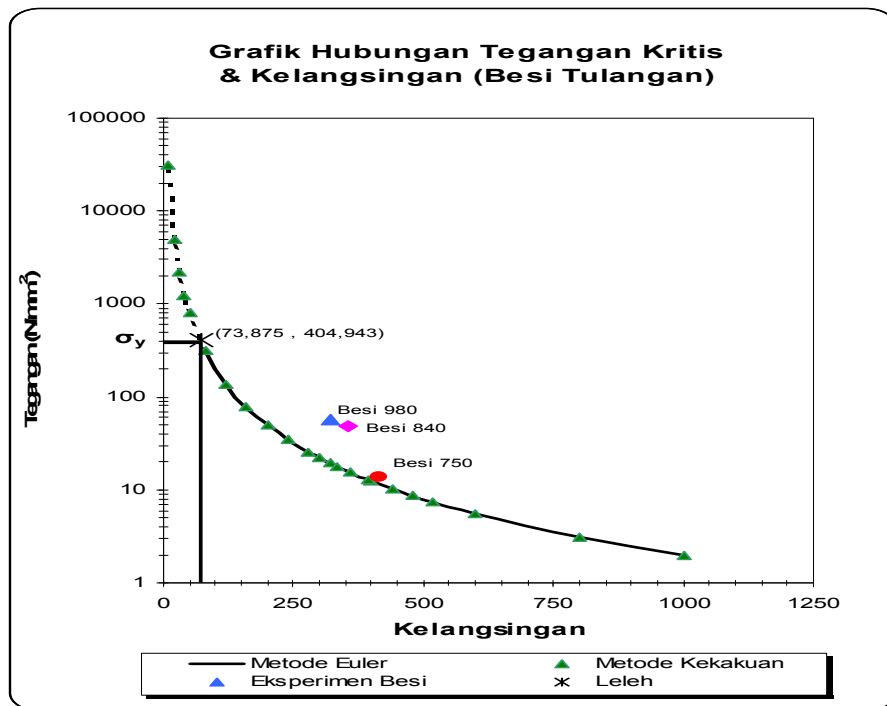
Gambar 7. Grafik Hubungan Beban – Lendutan Pipa Baja Variasi Panjang 840 mm



Gambar 8. Grafik Hubungan Beban – Lendutan Pipa Baja Variasi Panjang 750 mm



Gambar 9. Grafik Hubungan Tegangan – Kelangsingan Pipa Hasil Analisis Numeris Dan Eksperimen



Gambar 10. Grafik Hubungan Tegangan – Kelangsingan Besi Tulangan Hasil Analisis Numeris Dan Eksperimen

Tabel 7. Hasil Analisis Perbedaan Panjang Tekuk Antara Eksak dan Eksperimen

No.	Jenis spesimen	L (mm)	Sampel	Eksperimen	Eksak
1	Besi tulangan	980	K1	980	980
			K2	977	980
			K3	978	980
Rerata				978	980
% Kesalahan				0,17	
2	Besi tulangan	840	K1	830	840
			K2	833	840
			K3	838	840
Rerata				834	840
% Kesalahan				0,754	
3	Besi tulangan	750	K1	740	750
			K2	748	750
			K3	748	750
Rerata				745	750
% Kesalahan				0,622	
4	Pipa baja	980	A	972	980
			B	976	980
			C	980	980
Rerata				976	980
% Kesalahan				0,408	
5	Pipa baja	840	A	840	840
			B	832	840
			C	834	840
Rerata				835	840
% Kesalahan				0,556	
6	Pipa baja	750	A	750	750
			B	744	750
			C	744	750
Rerata				746	750
% Kesalahan				0,533	

Sumber : Data Primer, 2017

Tabel 8. Hasil Analisis Menggunakan Rumus Euler

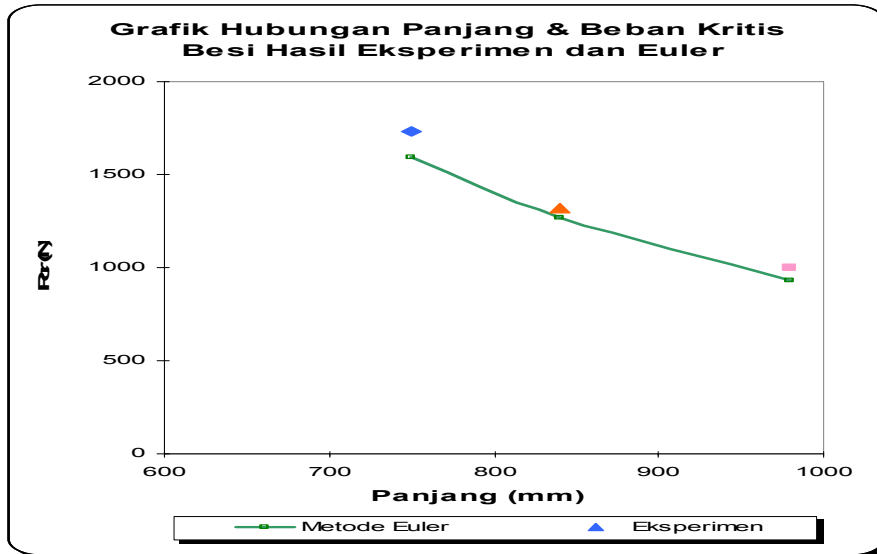
Jenis spesimen	L (mm)	A (mm ²)	I _{min} (mm ⁴)	i _{min} (mm ²)	E (N/mm ²)	Metode Euler	
						P _{cr} (N)	σ _{cr} (N/mm ²)
Besi Tulangan	980	72,382	416,922	2,400	217491,463	931,847	12,874
Besi Tulangan	840	72,382	416,922	2,400	217491,463	1268,347	17,523
Besi Tulangan	750	72,382	416,922	2,400	217491,463	1591,015	21,981
Pipa Baja	980	176,301	7779,100	6,661	223918,974	17898,229	102,100
Pipa Baja	840	176,301	7779,100	6,661	223918,974	24361,479	138,969
Pipa Baja	750	176,301	7779,100	6,661	223918,974	30559,039	174,323

Sumber : Data Primer, 2017

Tabel 9. Perbandingan Hasil Eksperimen Besi Tulangan Dengan Rumus Euler

Kode	L (mm)	λ	Eksperimen		Metode Euler		% Kesalahan
			P _{cr} (N)	σ _{cr} (N/mm ²)	P _{cr} (N)	σ _{cr} (N/mm ²)	
K1_(980)	980	408	1000	13,816	931,847	12,874	6,815
K2_(980)	980	408	1000	13,816			6,815
K3_(980)	980	408	1000	13,816			6,815
Rerata	980	408	1000	13,816	931,847	12,874	6,815
K1_(840)	840	350	1300	17,960	1268,347	17,523	2,435
K2_(840)	840	350	1300	17,960			2,435
K3_(840)	840	350	1350	18,651			6,048
Rerata	840	350	1317	18,190	1268,347	17,523	3,669
K1_(750)	750	313	1650	22,796	1591,015	21,981	3,575
K2_(750)	750	313	1750	24,177			9,085
K3_(750)	750	313	1800	24,868			11,610
Rerata	750	313	1733	23,947	1591,015	21,981	8,211

Sumber : Data Primer, 2017

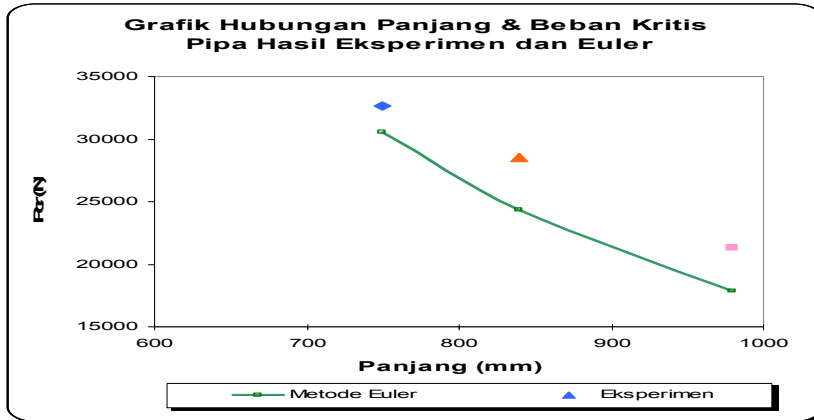


Gambar 11. Grafik Hubungan Panjang dan Beban Kritis Besi Hasil Eksperimen dan Euler

Tabel 10. Perbandingan hasil eksperimen pipa dengan analisis Rumus Euler

Kode Pipa	L (mm)	λ	Eksperimen		Metode Euler		% Kesalahan
			Pcr (N)	σ_{cr} (N/mm ²)	Pcr (N)	σ_{cr} (N/mm ²)	
a_(980)	980	147,125	25000	142,612	17898,229	102,100	28,407
b_(980)	980	147,125	19000	108,385			5,799
c_(980)	980	147,125	20000	114,089			10,509
Rerata	980	147,125	21333	121,695	17898,229	102,100	16,102
a_(840)	840	126,106	30500	173,986	24361,479	138,969	20,126
b_(840)	840	126,106	27000	154,021			9,772
c_(840)	840	126,106	28000	159,725			12,995
Rerata	980	126,106	28500	162,578	24361,479	138,969	14,521
a_(750)	750	112,596	28000	159,725	30559,039	174,323	9,139
b_(750)	750	112,596	35000	199,657			12,688
c_(750)	750	112,596	35000	199,657			12,688
Rerata	750	112,596	32667	186,346	30559,039	174,323	6,452

Sumber : Data Primer, 2017

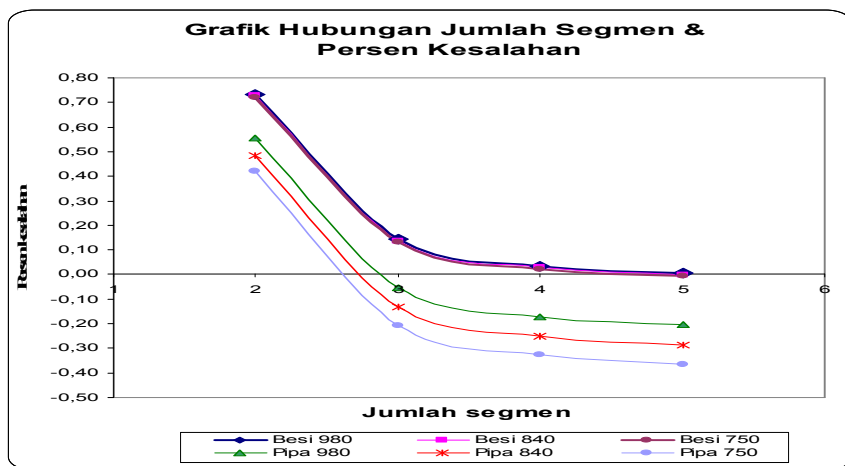


Gambar 12. Grafik Hubungan Panjang dan Beban Kritis Besi Hasil Eksperimen dan Euler

Tabel 11. Perbandingan hasil analisis Rumus Euler dan metode Kekakuan

No	Jenis spesimen	L (mm)	A (mm ²)	I _{min} (mm ⁴)	i _{min} (mm ²)	E (N/mm ²)	Metode Euler		Metode Kekakuan		% Kesalahan
							P _{cr} (N)	σ _{cr} (N/mm ²)	Segmen 2		
									P _{cr} (N)	σ _{cr} (N/mm ²)	Segmen 2
1	Besi Tulangan	980	72,382	416,922	2,400	217491,463	931,847	12,874	938,852	12,971	0,746
2	Besi Tulangan	840	72,382	416,922	2,400	217491,463	1268,347	17,523	1277,882	17,655	0,746
3	Besi Tulangan	750	72,382	416,922	2,400	217491,463	1591,015	21,981	1602,976	22,146	0,746
4	Pipa Baja	980	175,301	7778,100	6,661	223917,974	17898,229	102,100	18032,780	102,868	0,746
5	Pipa Baja	840	175,301	7778,100	6,661	223917,974	24361,478	138,970	24544,617	140,014	0,746
6	Pipa Baja	750	175,301	7778,100	6,661	223917,974	30559,038	174,323	30788,768	175,634	0,746

Sumber : Data Primer, 2017



Gambar 13. Grafik Hubungan % Kesalahan dan Jumlah Segmen Menggunakan software SAP2000

Tabel 12. Perbandingan Hasil Simulasi Software Sap2000 dengan

Hasil Eksperimen

No	Jenis spesimen	L (mm)	Pcr (N)					% Kesalahan Pcr (N)				
			Eksperimen	SAP2000					SAP2000			
				Segmen					2	3	4	5
				2	3	4	5					
1	Besi Tulangan	980	1000,000	938,724	933,174	932,173	931,890	6,128	6,683	6,783	6,811	
2	Besi Tulangan	840	1317,000	1277,642	1270,082	1268,716	1268,331	2,988	3,562	3,666	3,695	
3	Besi Tulangan	750	1733,000	1602,596	1593,105	1591,388	1590,903	7,525	8,072	8,171	8,199	
4	Pipa Baja	980	21333,330	17998,101	17888,331	17867,781	17861,715	15,634	16,148	16,245	16,273	
5	Pipa Baja	840	28500,000	24480,363	24329,279	24300,621	24292,023	14,104	14,634	14,735	14,765	
6	Pipa Baja	750	32666,670	30687,677	30496,152	30459,380	30448,190	6,058	6,644	6,757	6,791	

Sumber : Data Primer, 2017

Tabel 13. Perbandingan Hasil Analisis Rumus Euler dengan Hasil Simulasi software SAP2000

No.	Jenis spesimen	L (mm)	Pcr (N)					% Kesalahan Pcr (N)				
			Metode Euler	SAP2000					SAP2000			
				Segmen					2	3	4	5
				2	3	4	5					
1	Besi Tulangan	980	931,847	938,724	933,174	932,173	931,890	0,733	0,142	0,035	0,005	
2	Besi Tulangan	840	1268,347	1277,642	1270,082	1268,716	1268,331	0,728	0,137	0,029	-0,001	
3	Besi Tulangan	750	1591,015	1602,596	1593,105	1591,388	1590,903	0,723	0,131	0,023	-0,007	
4	Pipa Baja	980	17898,229	17998,101	17888,331	17867,781	17861,715	0,555	-0,055	-0,170	-0,204	
5	Pipa Baja	840	24361,479	24480,363	24329,279	24300,621	24292,023	0,486	-0,132	-0,250	-0,286	
6	Pipa Baja	750	30559,039	30687,677	30496,152	30459,380	30448,190	0,419	-0,206	-0,327	-0,364	

Sumber : Data Primer, 2017

.:SELAMAT MENULIS:.

Sekretariat SiIMO Engenering

Alamat : Ruang Jurnal Jurnal SiIMO Engenering FAKULTAS TEKNIK UNISMUH

PALU – Palu 94118

Telp : +6281355585166