

ANALISA PERBANDINGAN MODEL KERUNTUHAN PROFIL HEXAGONAL DAN CIRCULAR CASTELLATED BEAM DENGAN PROGRAM FEA

Nama Mahasiswa : Saidul Ulum
NRP : 3112 105 045
Jurusan : Teknik Sipil FTSP-ITS
Dosen Pembimbing : Budi Suswanto, ST, MT, P.hD
Ir. Heppy Kristijanto, MS

Abstrak

Penggunaan balok baja dengan menggunakan castellated beam selain dapat mengurangi biaya konstruksi dan membuat bahan menjadi lebih ringan jika dibanding dengan profil dengan dimensi yang sama, juga akan membuat momen inersia dan section modulus yang lebih besar, sehingga mampu memikul momen yang lebih besar dan tegangan ijin yang lebih kecil. Tugas Akhir ini difokuskan untuk menganalisa perbandingan model keruntuhan bukaan castellated beam, dengan dua jenis bentuk bukaan yaitu circular dan hexagonal antara solid beam IWF 250.125.6.9, IWF 400.200.8.13 dan IWF 450.200.9.14 yang sebelumnya telah direncanakan menjadi castellated beam. Hasil pemodelan dan analisa keruntuhan balok castellated beam menyimpulkan bahwa balok dengan bukaan hexagonal memiliki kekakuan yang lebih baik dari pada balok dengan bukaan circular pada sampel yang sama, hal ini ditunjukkan dengan perbedaan nilai persentase tegangan sebesar 5,126% dan defleksi 7,852% pada balok circular castellated beam.

Kata Kunci: *model keruntuhan, circular castellated beam, rectangular castellated beam, Program FEA*

COMPARATIVE ANALYSIS OF FAILURE MODEL HEXAGONAL AND CIRCULAR CASTELLATED BEAM PROFILE USING FEA PROGRAM

Student Name : Saidul Ulum
NRP : 3112 105 045
Major : Teknik Sipil FTSP-ITS
Consoller Lecturer : Budi Suswanto, ST, MT, P.hD
Ir. Heppy Kristijanto, MS

Abstract

The use of steel beams using a castellated beam in addition to reducing the construction cost and make the material becomes lighter when compared to the profiles with the same dimensions, also will make the moment of inertia and section modulus greater, so as to bear a greater moment and the allowable stress smaller. This final project is focused on analyzing of the failure model comparison openings castellated beam, with two types of forms are circular and hexagonal openings between the solid beam IWF 250.125.6, IWF 400.200.8.13 and IWF 450.200.9.14 which previously had been planned to be a castellated beams. The results of the modeling and failure analysis of castellated beams beam concluded that beams with hexagonal openings have better stiffness of the beam with circular openings on the same sampel, it is indicated by the difference of percentage value of the tension is 5.126% and deflection value is 7.852% on the circular castellated beams.

Keywords: *failure models, circular castellated beam, rectangular castellated beam, FEA Program.*

**ANALISA PERBANDINGAN MODEL
KERUNTUHAN PROFIL HEXAGONAL DAN
CIRCULAR CASTELLATED BEAM DENGAN
PROGRAM FEA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S1 Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

SAIDUL ULUM
NRP. 3112 105 045

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Budi Suswanto, ST., MT., PhD (Pembimbing I)
2. Ir. Heppy Kristijanto, MS. (Pembimbing II)



**SURABAYA
JULI, 2014**

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Castellated Beam

Castellated beam adalah profil baja H, I, atau U yang kemudian pada bagian badannya dipotong memanjang dengan pola *zig-zag*. Kemudian bentuk dasar baja diubah dengan menggeser atau membalik setengah bagian profil baja yang telah dipotong. Penyambungan setengah profil dilakukan dengan cara dilas pada bagian “gigi-giginya” sehingga terbentuk profil baru dengan lubang berbentuk segi enam (*hexagonal*), segi delapan (*octogonal*), dan lingkaran (*circular*) sehingga menghasilkan modulus penampang yang lebih besar.

2.2. Keuntungan dan Kerugian dari Castellated Beam Kelebihan *Castellated beam*

Kelebihan *Castellated beam* antara lain sebagai berikut:

- a) Dengan lebar profil yang lebih tinggi menghasilkan momen inersia dan modulus penampang yang lebih besar, sehingga lebih kuat dan kaku bila dibandingkan dengan profil asalnya. (Megharief, J.D. 1997 dan Grunbauer, J. 2001)
- b) Dengan tegangan ijin yang lebih kecil mampu memikul momen yang lebih besar. (Megharief, J. D. 1997 dan Grunbauer, J. 2001)
- c) Bahannya ringan, kuat, dan mudah dipasang. (Megharief, J. D. 1997 dan Grunbauer, J. 2001)
- d) Profil *Castellated beam* juga cocok untuk bentang panjang (untuk penggunaan *Castellated beam* pada atap dapat mencapai 10-50 meter dan bila digunakan sebagai pelat 12-25 meter). Sehingga dapat mengurangi jumlah

kolom dan pondasi serta mengurangi biaya *erection* (pengangkatan). (Dougherty 1993)

- e) Dapat digunakan untuk gedung tingkat tinggi dan bangunan perindustrian. (Amayreh, L. dan M.P. Saka 2005)

Kekurangan *Castellated beam*

Kekurangan dari *Castellated beam* adalah sebagai berikut:

- a) Profil *Castellated beam* kurang tahan api, sehingga harus ditambah lapisan tahan api 20% lebih tebal agar mencapai ketahanan yang sama dengan profil awalnya. (Grubauer, J. 2001)
- b) Kurang kuat menerima gaya lateral, sehingga perlu diberi satu atau lebih pelat pada ujung-ujung (dekat dengan pertemuan balok-kolom) (Grubauer, J. 2001).
- c) Pada ujung-ujung bentang (di sudut profil) terjadi peningkatan pemusatan tegangan (*stress concentration*). (Amayreh, L. dan M.P. Saka 2005)
- d) *Castellated beam* tidak sesuai untuk bentang pendek dengan beban yang cukup berat. (Amayreh, L. dan M.P. Saka 2005)

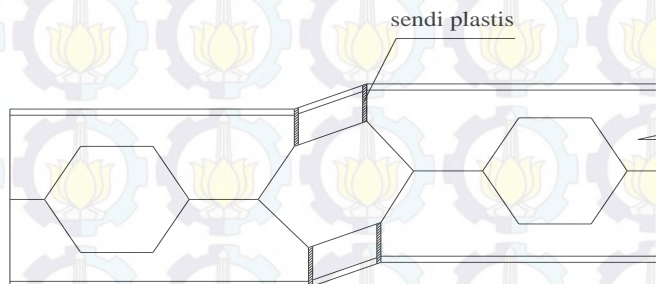
2.3. Model Kegagalan *Castellated Beam*

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kerdal dan Nethercort pada tahun 1994, model kegagalan *Castellated beam* antara lain sebagai berikut:

- a) **Mekanisme geser atau *Vierendeel***

Altifillisch (1957) dan Toprac dan Cook (1959) menyatakan bahwa mekanisme ini berbanding lurus dengan tegangan geser yang cukup tinggi pada balok. Sendi plastis terjadi pada ujung lubang dapat merubah bentuk bagian T (*tee section*) menjadi seperti jajargenjang (*parallelogram*). Balok bentang pendek dengan las yang panjang dan penampang T yang

pendek sangat rentan terhadap kegagalan ini. Bentang yang pendek dapat menerima beban yang lebih besar yang memicu terjadinya geser. Ketika *castellated beam* terkena geser, maka penampang T atas dan bawah lubang harus mampu menahan geser, serta menahan momen primer dan sekunder. Momen primer biasanya terjadi pada penampang melintang balok, dan momen sekunder yang dikenal sebagai *vierendeel moment*, merupakan akibat dari gaya geser yang terjadi di sepanjang lubang. Saat panjang dari lubang mengecil maka besarnya momen sekunder juga akan mengecil. Lokasi kegagalan ini akan terjadi pada lubang yang menerima gaya geser terbesar. Gambar dari kegagalan ini terlihat seperti Gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1. *Parallelogram mechanism*

b) Mekanisme lentur

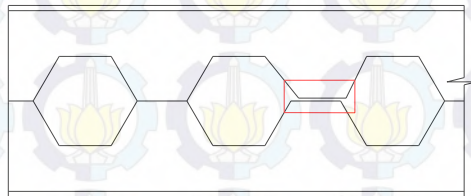
Toprack dan Cook (1959) dan Halleux (1967) menyimpulkan bahwa titik leleh yang terjadi pada bagian T (*tee section*) bagian atas dan bawah pada lubang profil *Castellated beam* hampir sama dengan profil WF solid. $M_p = Z' \times f_i$; dimana Z' adalah modulus plastis yang diambil melalui garis tengah vertikal pada lubang.

c) **Tekuk lateral torsi pada pelat badan**

Tekuk lateral torsi pada pelat badan profil solid biasanya terjadi pada balok bentang panjang yang tidak memiliki penahan lateral yang cukup untuk menahan tekan pada sayap. Kegagalan ini disebabkan oleh kurangnya kekakuan torsi pada balok, sebagai hasil dari tinggi dan kelangsingan penampang. Kerdal dan Nethercort (1982) menyimpulkan bahwa pada tekuk lateral torsi dari balok, efek lubang pada profil dapat diabaikan. Sehingga tekuk lateral torsi pada *Castellated beam* dapat direncanakan sama seperti pada pelat badan solid dengan menyesuaikan penampangnya.

d) **Putusnya sambungan las**

Husain dan Speirs (1971) menyatakan bahwa las pada jarak antara lubang yang satu dengan yang lainnya (e) dapat mengalami putus ketika tegangan geser horizontal melebihi kekuatan leleh dari pengelasannya. Gambar dari kegagalan ini terlihat pada Gambar 2.2 berikut ini:



Gambar 2.2. Putusnya sambungan las

Dougherty (1993) menyatakan bahwa panjang horizontal pada lubang berbanding lurus dengan panjang pengelasan dan ketika panjang horizontal dikurangi untuk mengurangi momen sekunder, maka bagian yang disambung dengan las menjadi lebih rentan terjadi kegagalan. Mekanisme *vierendeel* biasanya

terjadi pada balok – balok yang mempunyai jarak lubang horizontal yang cukup panjang sehingga mempunyai panjang las yang lebih panjang.

e) **Tekuk pelat badan akibat geser**

Gaya geser yang terjadi di pelat badan akibat adanya tegangan tarik dan tekan pada pelat badan mengakibatkan pembengkokan ujung – ujung balok *castellated beam*. Gambar dari kegagalan ini dapat dilihat di Gambar 2.3 sebagai berikut ini:



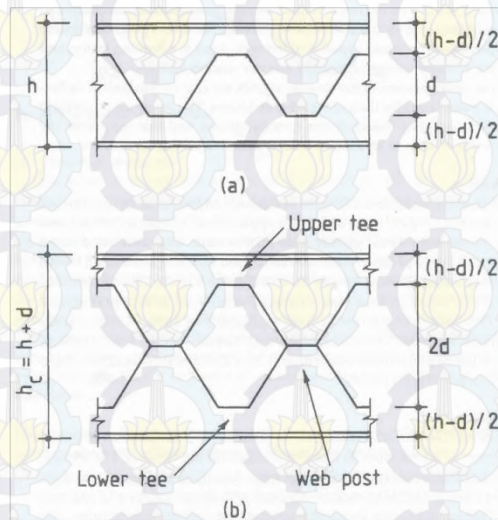
Gambar 2.3. Tekuk pelat badan akibat geser

f) **Tekuk pelat badan akibat tekan**

Toprack dan Cook (1959) dan Husain dan Speirs (1973) menyatakan bahwa kegagalan ini disebabkan oleh beban terpusat yang secara langsung dibebankan pada pelat badan. Kegagalan ini dapat dicegah dengan memperkuat penakut untuk menahan gaya tersebut.

2.4. Castelled Beam dengan Bukaian Hexagonal

Castellated beam merupakan suatu profil baja yang mempunyai bukaian berbentuk segi enam. Castellated mengalami proses pemotongan pada bagian badan profil dengan pola zigzag. Salah satu bagian yang telah dipotong lalu diangkat dan disatukan bagian badannya dan terakhir dilakukan pengelasan pada bagian badan yang menempel ; hal ini dilakukan untuk meningkatkan tinggi dari profil awal (h) dengan tinggi potongan yang ada (d). bentuk castellated beam ditampilkan dalam gambar 2.4.



Gambar 2.4 Proses Pembentukan Castellated Beam

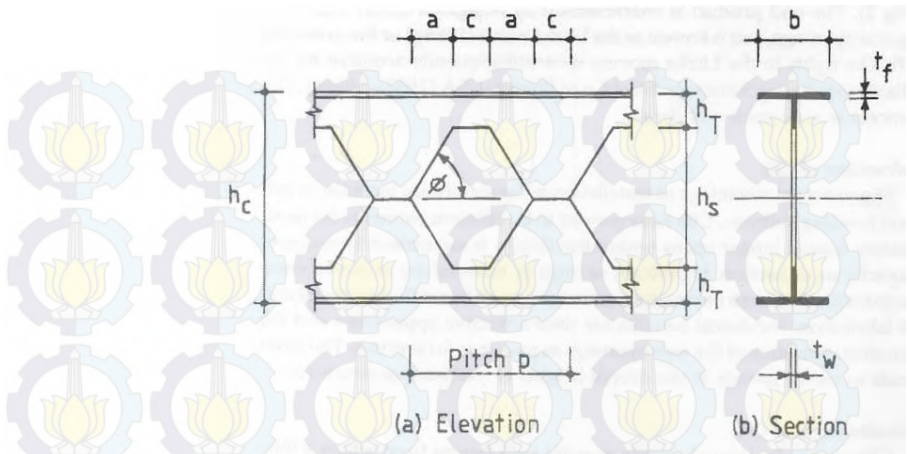
Adapun keuntungan dari penggunaan castellated beam. Keuntungan yang utama yaitu meningkatkan kekakuan lentur secara vertikal; castellated beam telah dibuktikan lebih efisien untuk beban medium pada bentang panjang dimana perencanaannya dikontrol dengan kapasitas momen dan lendutan. Balok castellated, karena rasio kuat tariknya

yang tinggi dengan berat dan pemeliharaan yang kecil, kadang-kadang secara menguntungkan dapat menggantikan penggunaan girder. Mereka digunakan dalam bangunan bertingkat, bangunan komersial dan bangunan industri, dan juga untuk rangka portal. Keuntungan balok castellated juga mencakup penampilan mereka yang mengesankan dan memungkinkan penggunaan daerah bukaan untuk pelayanan instalasi.

Adapun juga kerugian dari penggunaan balok castellated. Akibat adanya bukaan pada bagian badan profil, perilaku struktur dari balok castellated akan berbeda dari balok baja yang biasa. Karena perbedaan kemungkinan moda kegagalan atau moda kegagalan yang baru, mereka merupakan struktur nonlinear, dimana tidak bisa dianalisis dengan metode sederhana. Kapasitas geser pada bagian badan profil adalah suatu faktor yang terbatas, dan balok castellated tidak cocok untuk bentang pendek yang dibebani dengan berat. Deformasi geser pada bagian T nya sangat signifikan dan analisa lendutan lebih kompleks daripada balok yang bagian badan profil padat.

2.3.1. Analisa Dan Perencanaan Balok Castellated

Geometri dari balok castellated terdapat tiga parameter yaitu sudut potongan pada bukaan badan profil (θ), rasio ekspansi (α), dan panjang pengelasan (c) yang ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Parameter pada Castellated Beam

- Sudut Potongan (ϕ)

Sudut potongan mempengaruhi jumlah proses pemotongan balok castellated (N) per unit panjang dari balok. N akan kecil ketika sudut itu rata dan akan besar ketika bertahap. Percobaan telah menunjukkan bahwa peningkatan jumlah N mempunyai pengaruh yang kecil untuk kekakuan elastis pada balok castellated, itu akan meningkatkan daktailitas dan kapasitas rotasi, percobaan yang ada menunjukkan bahwa penyesuaian pada sudut 60° adalah suatu sudut standart yang efisien terhadap bangunan industri.

- Rasio Ekspansi (α)

Rasio ekspansi merupakan suatu ukuran dari peningkatan tinggi balok yang dicapai pada proses pemotongan. Dalam teori tinggi balok baja yang biasa dapat dapat hampir dua kali lipat, tetapi

tinggi seluruhnya dari profil T adalah suatu faktor batas. Dalam pelaksanaan, tinggi dari potongan 'd' adalah setengah bagian dari tinggi h_s , maka

$$h_T = \frac{h_s}{4}, h_c = \frac{h_s}{2} + h, \alpha = \frac{h_c}{h} \approx 1,5 \quad 2.1$$

Untuk sudut potongan 60^0 menjadi,

$$\alpha = \frac{0,5h_c}{\sqrt{3}} = 0,289 h_s \quad 2.2$$

- Panjang Pengelasan (c)

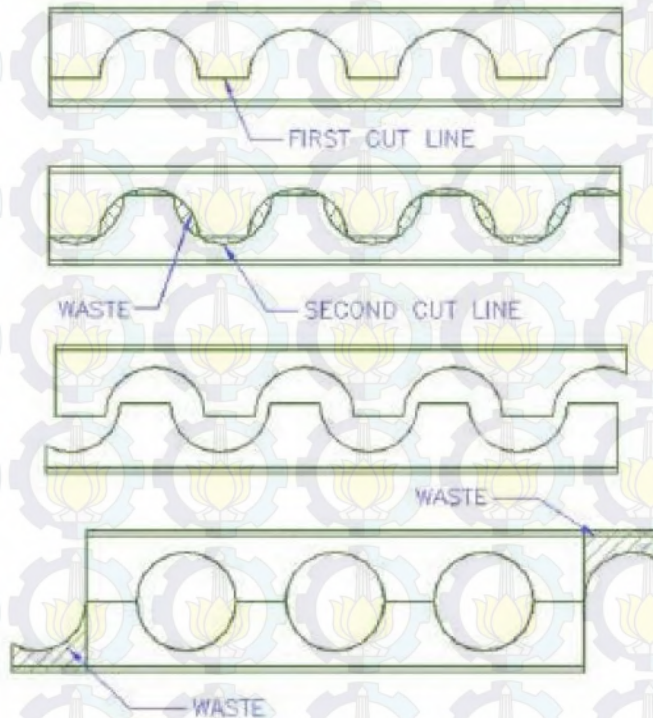
Jika panjang pengelasan terlalu pendek, kemudian las pada bagian badan yang disambung akan mengalami kegagalan geser horizontal, dan apabila terlalu panjang akan mengalami kegagalan dalam lentur vierendeel, jadi keseimbangan yang beralasan antara dua moda kegagalan ini yaitu $c = h_s / 4$

2.5. Castelled Beam dengan Bukaan Circular (Cellular Beam)

Cellular beam telah membuktikan menjadi salah satu jenis konstruksi baja yang berkembang paling signifikan sejak perkenalan mereka pada tahun 1987. Mereka saat ini telah digunakan di lebih dari 3500 proyek pembangunan pada 20 lebih Negara. Integritas structural dan criteria perencanaannya telah di verifikasi dengan mengikuti percobaan terhadap struktur cellular beam dalam skala besar.

Cellular beam adalah balok baja dengan bukaan berbentuk lingkaran pada bagian badan profil. Mereka dibentuk dengan cara memotong dua semi lingkaran pada bagian badan profil yaitu umumnya profil baja berbentuk I. Setelah dua potongan yang tadi selesai,

maka setengah baja tersebut dipisahkan , digabungkan dan di lakukan pengelasan bersama antara yang satu dengan yang lainnya untuk membentuk sesuatu yang baru, lebih tinggi, lebih kaku , lebih kuat suatu profil yang dikenal balok baja dengan profil I yang memiliki bukaan pada bagian badan profil yang ada. Hasil balok baja yang dibentuk lebih tinggi daripada balok baja I yang aslinya sehingga menghasilkan section modulus yang lebih besar. Proses ini di ilustrasikan dalam gambar 2.6.

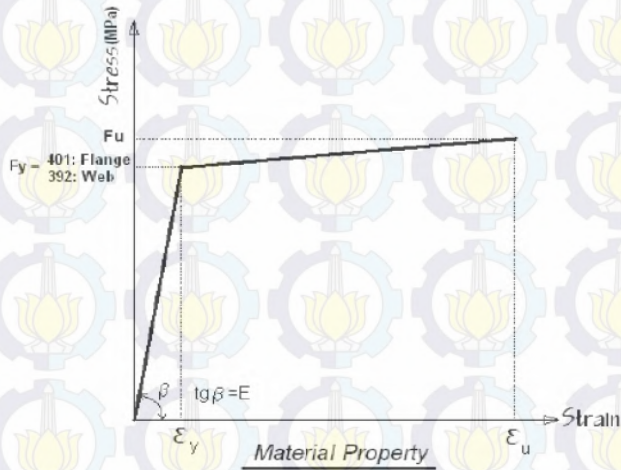


Gambar 2.6 Proses Pembentukan Cellular Beam

Dikarenakan pada perencanaan mereka dan keuntungan-keuntungan konstruksinya, para perencana dengan secara meningkat menggunakan profil yang memiliki bukaan pada badan baja I dalam perencanaan mereka. Keuntungan-keuntungan perencanaan dari cellular beam termasuk terjadi suatu pengurangan bobot atau berat dari balok baja tersebut per satuan panjang dan suatu peningkatan kekakuan lentur (section modulus yang lebih besar) dihasilkan dari peningkatan ketinggian pada profil baja yang ada, dan juga diizinkan di pakai untuk suatu konstruksi yang memiliki bentang yang panjang. Keuntungan-keuntungan konstruksi meliputi kemampuan untuk melewati keperluan-keperluan instalasi melalui bukaan yang ada pada cellular beam, dimana dapat menjaga beberapa inch dari ketinggian antara lantai ke lantai. Cellular beam juga memberikan keuntungan *aesthetic* ketika digunakan dalam struktur dengan balok yang terbuka (*exposed*). Bentuk bukaan pada badan profil digunakan atas dasar pertimbangan ekonomis digunakan sebagai struktur yang memiliki perencanaan pembebanan dengan tingkat medium sampai tinggi pada bentang portal atau bangunan yang medium sampai bentang yang panjang. Untuk sekarang-sekarang ini aplikasi dari cellular beam ini dari bangunan-bangunan komersial dan bangunan-bangunan industri termasuk daerah perkotaan yang berada pada daerah basement.

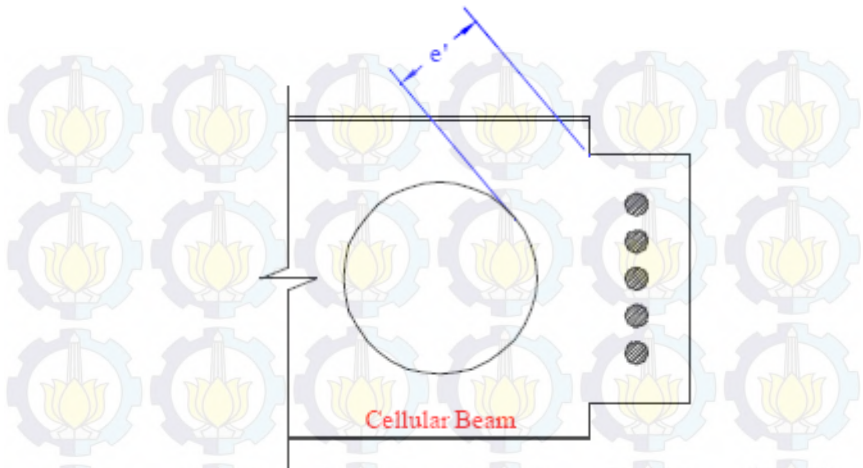
Pada bagian badan profil baja yang biasanya digunakan balok baja dengan profil I itu telah diadaptasikan dengan penambahan bukaan pada bagian badan profil baja di bawah panjang dari bentang yang ada. Penambahan dari bukaan lingkaran pada badan profil ini menghasilkan dalam suatu balok baja suatu berat yang sama bahkan lebih ringan daripada balok baja yang aslinya tetapi lebih kuat dan lebih tinggi disebabkan karena meningkatnya ketinggian bagian badan profil baja yang ada. Tambahan

bukaan lingkaran pada bagian badan baja, juga menghasilkan suatu perbedaan distribusi tegangan pada bagian badan dan suatu moda kegagalan baru yang dihubungkan dengan balok baja tersebut. Adapun hubungan tegangan dan regangan pada cellular beam yang di tampilkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hubungan Tegangan dan Regangan pada Cellular Beam

Apabila Cellular Beam digunakan untuk konstruksi, sebaiknya Cellular beam di beri Cope yaitu pemegang atau tanggulan pada sudut balok sehingga balok dapat dihubungkan dengan kolom yang ada. Penjepit yang ada itu di bedakan berdasarkan dimensi horizontal balok tersebut. Jarak antara pinggir penjepit dan pinggir Cell adalah jarak e' . Untuk dimensi penjepit yang signifikan, jarak e' bisa menjadi kecil dan hal itu akan mudah menyebabkan terjadinya kegagalan pada balok.



Gambar 2.8 Penjepit, Lingkaran, e' untuk Cellular Beam

Studi tentang bukaan pada bagian badan profil sudah selesai di amerika serikat dan kanada, termasuk bentuk bujur sangkar, persegi panjang, lingkaran, konsentris dan eksentris bukaan pada baik komposit dan non-komposit balok baja.

Beberapa standar nasional, seperti British Standard (BSI,2000) dan Canadian Standard (CSA,2001), menyediakan peraturan yang disederhanakan untuk perencanaan bukaan dengan tujuan menghindari kelemahan dari balok tersebut. Bagaimanapun, peraturan ini menutupi kemungkinan-kemungkinan yang jauh beda dan oleh karena itu, mereka sangat konservatif. dengan menggabungkan beberapa parameter, peraturan itu akan mungkin untuk mendapatkan hasil yang lebih fleksibel dan ekonomis untuk beberapa tipe keadaan.

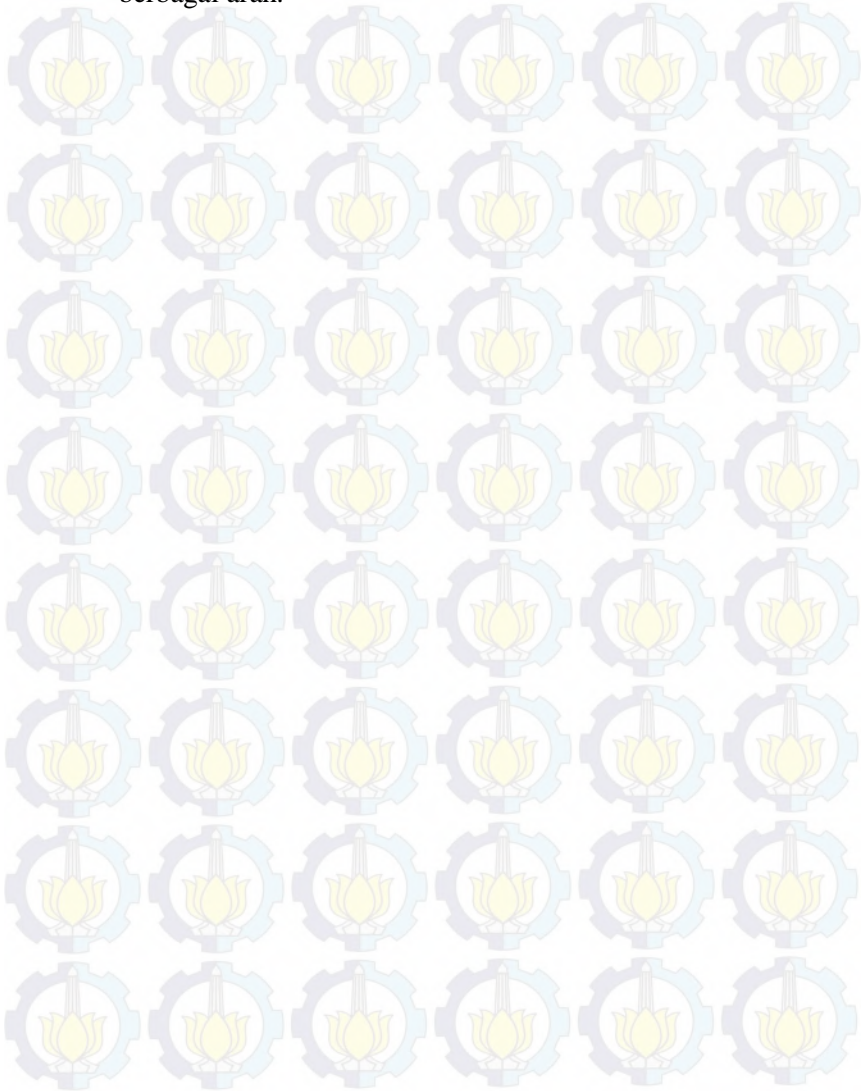
Pada perencanaan bukaan pada balok baja ini dibutuhkan bantuan perencanaan. Bantuan perencanaan itu disediakan yang memungkinkan identifikasi dari balok baja yang ada. Aplikasi dari bantuan perencanaan ini menghindari penggunaan metode perhitungan analisis yang kompleks dan mahal.

2.6. Teori Metode Elemen Hingga (FEM)

Balok cellular yang merupakan material baja yang nonlinear dapat di analisis melalui rumus pendekatan yang berdasarkan metode elemen hingga. FEM merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menghitung gaya-gaya dalam yang terjadi dalam suatu komponen struktur. Finite element methode juga dapat dipakai untuk perhitungan struktur, fluida, elektrik, static, dinamik, dan lain-lain. FEM juga dikenal sebagai metode kekakuan atau displacement methode karena yang didapat terlebih dahulu dari perhitungan adalah perpindahan baru kemudian mencari gaya batang. Dikarenakan perhitungan matematis yang kompleks, FEM secara utama dikembangkan untuk deformasi linear yang kecil dimana matriks kekakuan konstan. Pada kasus deformasi yang besar, matriks kekakuan dan gaya dalam menjadi fungsi dari perpindahan. Nonlinear FEM digunakan untuk memperbaiki parameter material dari pandangan pelat elastis yang tinggi. Dalam bab ini, dikembangkan model FEM nonlinear untuk deformasi geometri yang besar. dalam hal ini akan digunakan suatu model untuk memperbaiki deformasi yang ada pada struktur balok.

Suatu balok merupakan suatu batang, yang berarti satu dimensi lebih besar dari dua elemen struktur yang dapat menahan gaya transversal pada perletakan yang ada. Balok yang umum dapat digunakan sebagai struktur tersendiri atau dikombinasikan untuk membentuk struktur portal bangunan yang umum digunakan pada bangunan dan

dapat digunakan pada varisai beban secara luas dengan berbagai arah.

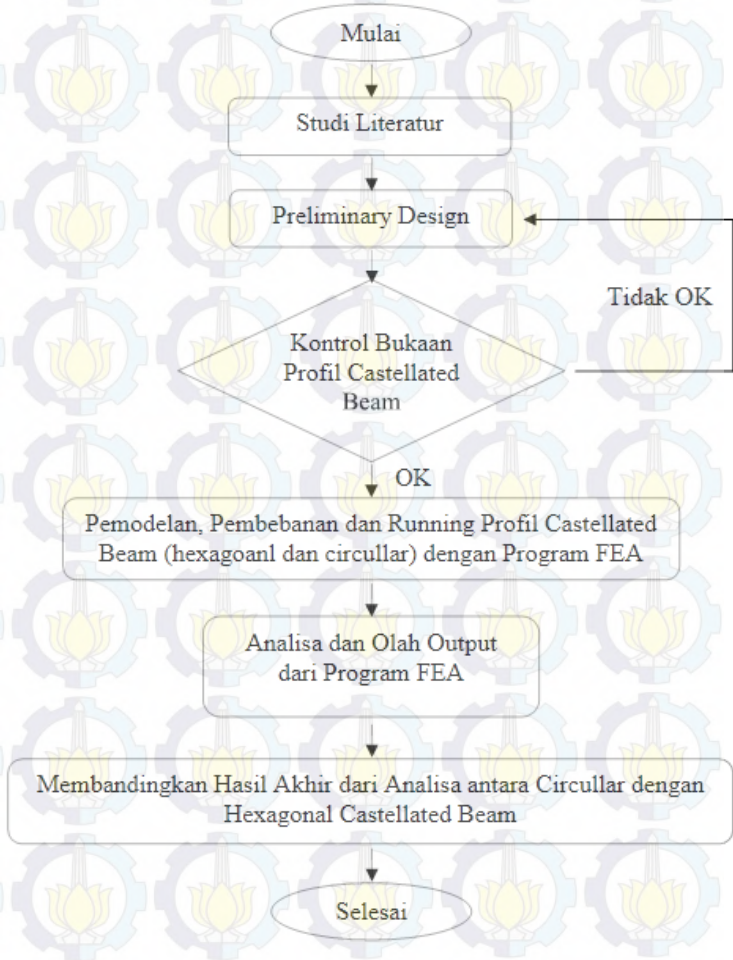




“Halaman Ini Sengaja Dikосongkan”

BAB III METODOLOGI

3.1. Flowchart Metode Penyelesaian



Gambar 3.1 *Flowchart* Metode Penyelesaian

3.2. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mengambil referensi-referensi dari buku, artikel, data TA yang sudah ada, jurnal, dan juga peraturan-peraturan yang sesuai dengan tema tugas akhir ini, baik yang berhubungan dengan analisa dan perencanaan maupun materi yang berhubungan dengan pengaplikasian software FEA. Adapun beberapa referensi yang digunakan dalam studi literatur tugas akhir terlampir pada daftar pustaka.

3.3. Preliminary Design

Pada kasus ini, profil yang digunakan adalah profil IWF (*wide flange solid beam*) IWF 250.125.6.9, IWF 400.200.8.13 dan IWF 450.200.9.14 yang direncanakan menjadi balok bukaan dengan bukaan *hexagonal* dan *circular*. Setelah bukaan dikontrol dan hasilnya memenuhi syarat, maka diambil dua profil dengan nilai I_x yang paling mendekati dari masing-masing balok bukaan untuk dijadikan sampel pada langkah berikutnya.

3.4. Analisa Program FEA

Analisa struktur (balok baja), baik pemodelan, pembebanan maupun *running* dilakukan dengan bantuan program FEA, dalam kasus ini menggunakan program Abaqus 6.10, dengan urutan pemodelan secara garis besar adalah sebagai berikut :

1. *Create Part*
2. Membuat model balok baja (dengan masukan semua koordinat)
3. Menentukan *Material Property*
 - a. *Material manager*
 - b. *Section manager*
 - c. *Section assignment*
4. *Assembly*

Assembly dilakukan apabila terdapat penggabungan

terhadap profil, misalnya pada kasus *castellated beam*, Proses pembuatan lubang (*hexagonal* dan *circullar*) dilakukan pada tahap ini.

5. *Step*
6. *Interaction* / Perletakan
Pada tahap ini model diberikan perletakan dimana perletakan pada pemodelan dibuat sendi-sendi.
7. *Load* / pembebanan
Pada masing-masing balok bukaan (*hexagonal* dan *circullar*) diberikan pembebanan sederhana pada tengah bentang dimana dilakukan pembebanan bertahap sampai profil mengalami runtuh, kemudian hasil Pu dan defleksi dicatat, untuk diplot pada kurva.
8. *Running*

3.5. Analisa dan Olah Output dari Program FEA

3.5.1. Kontrol Elemen

Kontrol Elemen berdasarkan SNI 03-1729-2002 dan *Journal of Structural Engineering Volume 118 no 12* dari *American Society of Civil Engineers (ASCE)* pada desember 1992 mengenai *Proposed Specification For Structural Steel Beams With Web Opening* dan AISC mengenai *Steel and Composite Beams with Web Opening* Oktober 2003.

3.5.1.1. Castellated Beam

1. Kontrol Penampang

Tekuk Lokal

Pelat sayap

$$\lambda = \frac{b_f}{2t_f} \quad 3.1$$

$$\lambda_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} \quad 3.2$$

Pelat Badan

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad 3.3$$

$$\lambda_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} \quad 3.4$$

Dimana :

f_y = kuat leleh baja

b_f = lebar sayap

t_w = tebal badan

F_r = tegangan sisa

h = tinggi total profilbersih

t_f = tebal sayap

2. Kontrol Tekuk Badan

$$a) \frac{d-2t_f}{t_w} \leq \frac{1365}{\sqrt{f_y}} ; F_y \text{ dalam MPa} \quad 3.6$$

$$b) \frac{d-2t_f}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{f_y}} ; F_y \text{ dalam MPa} \quad 3.7$$

Syarat :

$$\frac{a_o}{h_o} \leq 3,0 \quad 3.8$$

$$V_m \leq \frac{2}{3} V_p \quad 3.9$$

untuk balok non-komposit dan balok komposit pada momen negative

$$V_m \leq \frac{2}{3} V_p + V_c \quad 3.10$$

untuk balok komposit pada momen positif

$$c) \frac{1100}{f_y} < \frac{d-2t_f}{t_w} \leq \frac{1365}{\sqrt{f_y}} \quad 3.11$$

Fy dalam MPa

$$\frac{a_o}{h_o} \leq 2,2 \quad 3.12$$

$$V_m \leq 0,45V_p \quad 3.13$$

Dimana :

$$V_p = fyt_w d / \sqrt{3} \quad 3.14$$

$$V_c = V_p (\mu/\nu - 1) \geq 0 \text{ atau } V_{mt}(sh) - V_{pt} \quad 3.15$$

d) Parameter Opening

$$p_o = \left(\frac{a_o}{h_o}\right) + \left(\frac{6h_o}{d}\right) < 5,6 ; \text{baja} \quad 3.16$$

$$p_o = \left(\frac{a_o}{h_o}\right) + \left(\frac{6h_o}{d}\right) < 6,0 ; \text{komposit} \quad 3.17$$

syarat untuk balok komposit

$$h_o < 0,7d \quad 3.18$$

tinggi bagian atas tee > 0,15d

tinggi bagian bawah tee > 0,12d

$$\nu = a_o/st < 12$$

$$S \geq a_o$$

Dimana:

f_y = kuat leleh baja

a_o = panjang lubang

t_w = tebal badan

h_o = tinggi lubang

d = tingi total profil

t_f = tebal sayap

V_m = gaya geser nominal pada bukaan badan

V_p = gayageserplastispada tee atas da tee bawah

V_c = gaya geser akibat beton

3. Momen Lentur Nominal (non komposit)

$$M_u \leq \phi M_n \quad 3.19$$

$$M_n = M_p - \left[f_y \Delta A_s \left(\frac{h_o}{4} + e \right) \right] \quad 3.20$$

Dimana :

M_n = Momen Kuat Lentur Nominal Balok

$\Delta A_s = h_o t_w$

M_p = Momen Plastis = $Zx \cdot F_y$

h_o = tinggi lubang

t_w = ketebalan badan

e = eksentrisitas lubang

f_y = kuat leleh baja

4. Kontrol Kuat Lentur Akibat Tekuk Lateral

Plastis : $L_B < L_p$

Inelastis : $L_p \leq L_B \leq L_r$ 3.21

Elastis : $L_B > L_p$ 3.22

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{F_y}} r_y \quad 3.23$$

$$L_r = \frac{r_y X_1}{(F_{yt} - F_r)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (F_{yt} - F_r)^2}} \quad 3.24$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}} \quad 3.25$$

$$X_2 = 4 \frac{C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{GJ} \right)^2 \quad 3.26$$

$$C_w = \frac{h^2 I_y}{4} \quad 3.27$$

$$J = \frac{1}{3} (2bt_f^3 + ht_w^3) \quad 3.28$$

Dimana:

L_b = panjang antara 2 pengekang lateral yang berdekatan

L_p = panjang bentang maksimum untuk balok yang menerima plastis

L_r = panjang bentang minimum untuk balok yang kekuatannya mulai ditentukan oleh momen tekuk torsi lateral

r_y = jari-jari girasi terhadap sumbu lemah

S = modulus penampang

X_1 = koefisien untuk perhitungan momen tekuk torsi lateral

X_2 = koefisien untuk perhitungan momen tekuk torsi lateral ($1/\text{MPa}$)²

F_r = tegangan sisa

F_y = kuat leleh baja

I_y = inersia penampang sumbu y

G = modulus geser baja

J = konstanta puntir torsi

5. Kontrol Kuat Geser

$$V_u \leq V_d (\phi V_n) \quad 3.29$$

$$V_n = \Sigma V_{mt} \quad 3.30$$

$$V_{mt} = \frac{(\sqrt{6} + \mu)}{(v + \sqrt{3})} \leq 1 \quad 3.31$$

$$V_{mt} = \frac{(\sqrt{6} + \mu)}{(v + \sqrt{3})} V_{pt} \leq V_{pt} \quad 3.32$$

$$V_{mt}(sh) = V_{pt} + 0,29 \sqrt{f'c} A_{vc} \quad 3.33$$

$$\text{Dimana, } A_{vc} = 3t_e \quad 3.34$$

$$V_{mt} < V_{mt}(sh)$$

$$V_{pt} = f_y t_w d / \sqrt{3} \quad 3.35$$

Dimana :

V_n = kuat geser nominal

V_{mt} = kuat geser satu tee

V_{pt} = kuat geser plastis satu tee

f_y = kuat leleh baja

a_o = panjang lubang

t_w = tebal badan

s_1 = tinggi tee

b = aspek rasio tee = a_o/s_1

b_1 = lebar sayap

6. Kontrol Jarak antar Lubang Hexagonal

$$s \geq h_o$$

3.36

dimana $s = 2(b + e)$

3.37

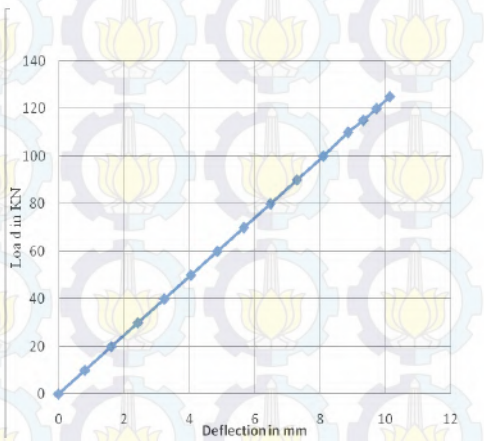
Circular

$$s \geq 1,5 D_o$$

3.38

3.5.2. Kurva Hasil Analisa

Hasil *output time history* abaqus 6.10, kemudian diplotkan terhadap kuva hubungan, dimana sumbu x menunjukkan defleksi atau sudut geser dan sumbu y menunjukkan beban (*load*). Contoh penggambaran kurvanya dapat dilihat pada Gambar 3.2



Gambar 3.2 Contoh Kurva Beban dan Defleksi Hasil program FEA

3.6. Perbandingan Hasil Analisa

Setelah semua selesai dianalisa baik untuk analisa struktur dengan program abaqus 6.10 maupun pengontrolan dengan hitungan manual, langkah berikutnya adalah membandingkan parameter kelelahan antara *circular castellated beam* dengan *hexagonal castellated beam* dengan menggunakan meninjau tegangan dan defleksi untuk parameter peninjaunya.





BAB IV PRELIMINARY DESIGN

4.1. Perencanaan Profil

Pada kasus ini, profil yang digunakan adalah profil IWF (*wide flange*) yang telah dikastelasi dari *solid beam* menjadi *castellated beam*.

Adapun profil yang direncanakan untuk dijadikan sampel pengujian adalah balok kastela yang telah dikastelasi menjadi bukaan *hexagonal* (segi enam) dan *circular* (lingkaran). Terdapat tiga sampel profil *solid beam* untuk masing-masing bukaan dengan data seperti dibawah ini.

IWF 250.125.6.9

| | | | | | | | |
|----|---|------|------|----------------|---|-------|-----------------|
| W | = | 29.6 | kg/m | A | = | 37.66 | cm ² |
| d | = | 250 | mm | I _x | = | 4050 | cm ⁴ |
| tw | = | 6 | mm | I _y | = | 294 | cm ⁴ |
| tf | = | 9 | mm | Z _x | = | 352 | cm ³ |
| bf | = | 125 | mm | Z _y | = | 72 | cm ³ |
| h | = | 232 | mm | i _x | = | 10.4 | cm |
| r | = | 12 | mm | i _y | = | 2.79 | cm |

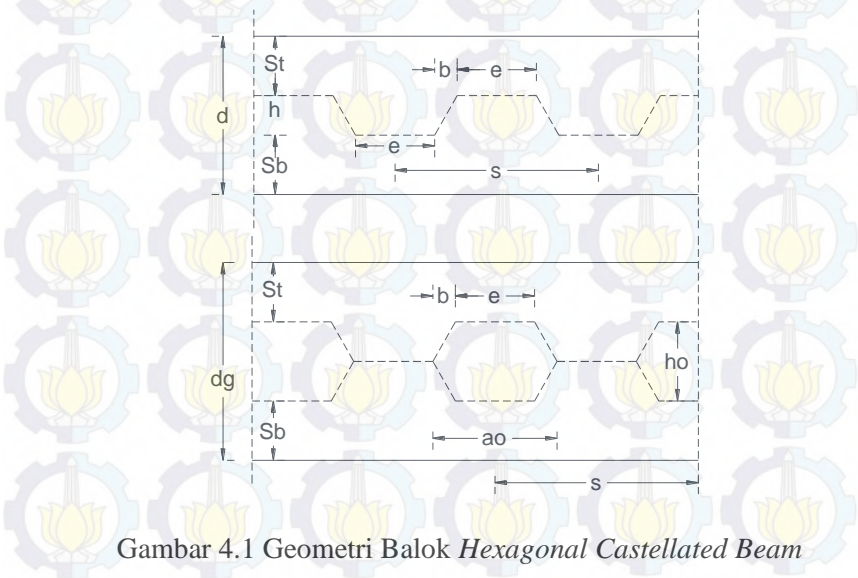
IWF 400.200.8.13

| | | | | | | | |
|----|---|-----|------|----------------|---|-------|-----------------|
| W | = | 66 | kg/m | A | = | 84.12 | cm ² |
| d | = | 400 | mm | I _x | = | 23700 | cm ⁴ |
| tw | = | 8 | mm | I _y | = | 1740 | cm ⁴ |
| tf | = | 13 | mm | Z _x | = | 1286 | cm ³ |
| bf | = | 200 | mm | Z _y | = | 266 | cm ³ |
| h | = | 374 | mm | i _x | = | 16.8 | cm |
| r | = | 16 | mm | i _y | = | 4.54 | cm |

IWF 450.200.9.14

| | | | | | | | |
|----|---|-----|------|----------------|---|-------|-----------------|
| W | = | 76 | kg/m | A | = | 96.76 | cm ² |
| d | = | 450 | mm | I _x | = | 33500 | cm ⁴ |
| tw | = | 9 | mm | I _y | = | 1870 | cm ⁴ |
| tf | = | 14 | mm | Z _x | = | 1621 | cm ³ |
| bf | = | 200 | mm | Z _y | = | 289 | cm ³ |
| h | = | 422 | mm | i _x | = | 18.6 | cm |
| r | = | 18 | mm | i _y | = | 4.4 | cm |

Dengan Mutu baja BJ 41 $f_y = 250$ Mpa
 $F_u = 410$ Mpa
 Modulus elastisitas (E) $= 200000$ Mpa

4.1.1. Perhitungan Bukaan Badan *hexagonal castellated beam*.Gambar 4.1 Geometri Balok *Hexagonal Castellated Beam*

$$h = d (K1 - 1)$$

$$dg = d + h$$

$$St = \frac{dg - ho}{2}$$

$$ho = 2h$$

$$e = 0.5 ho$$

$$b = \frac{h}{\tan \theta}$$

$$ao = 2b + e$$

Dimana :

d = tinggi asli balok

h = tinggi pemotongan

dg = tinggi balok *castellated beam*

ho = tinggi bukaan balok *castellated beam*

ao = panjang bukaan balok *castellated beam*

s = jarak antar bukaan

e = panjang bukaan pemotongan

b = panjang horizontal pemotongan sudut (60°)

Sb = tinggi penampang T bawah

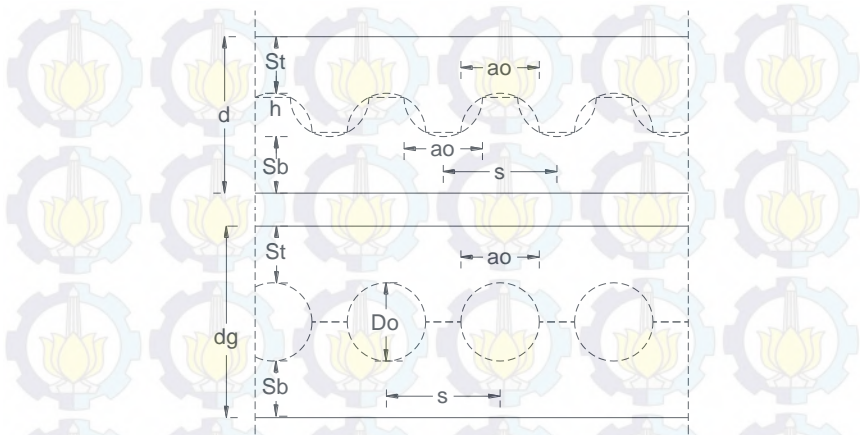
St = tinggi penampang T atas

Maka didapat balok hexagonal castellated beam dengan data sebagai berikut.

Tabel 4.1 Geometri *Hexagonal Castellated Beam*

| Hexagonal Castellated Beam | 350.125.6.9 (HCB 1) | 560.200.8.13 (HCB 2) | 630.200.9.14 (HCB 3) |
|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| d (mm) = | 250.00 | 400.00 | 450.00 |
| dg (mm) = | 350.00 | 560.00 | 630.00 |
| bf (mm) = | 125.00 | 200.00 | 200.00 |
| tw (mm) = | 6.00 | 8.00 | 9.00 |
| tf (mm) = | 9.00 | 13.00 | 14.00 |
| Ø (°) = | 60 | 60 | 60 |
| h (mm) = | 100.00 | 160.00 | 180.00 |
| b (mm) = | 57.74 | 92.38 | 103.92 |
| St (mm) = | 75.00 | 120.00 | 135.00 |
| Sb (mm) = | 75.00 | 120.00 | 135.00 |
| ho (mm) = | 200.00 | 320.00 | 360.00 |
| ao (mm) = | 215.47 | 344.75 | 387.85 |
| e (mm) = | 100.00 | 160.00 | 180.00 |
| s (mm) = | 315.47 | 504.75 | 567.85 |
| K = | 1.40 | 1.40 | 1.40 |

4.1.2. Perhitungan Bukaan Badan *circullar castellated beam*



Gambar 4.2 Geometri Balok *Circullar Castellated Beam*

$$h = d (K1 - 1)$$

$$dg = d + h - (0,075 \times Do)$$

$$St = \frac{dg - Do}{2}$$

$$ho = 2h$$

$$e = 0.5 ho$$

$$ao = 1Do$$

Dimana :

d = tinggi asli balok

h = tinggi pemotongan

dg = tinggi balok *castellated beam*

Do = tinggi bukaan balok *castellated beam*

ao = panjang bukaan balok *castellated beam*

s = jarak antar bukaan

Sb = tinggi penampang T bawah

St = tinggi penampang T atas

Maka didapat balok hexagonal castellated beam dengan data sebagai berikut.

Tabel 4.2 Geometri *Circullar Castellated Beam*

| Solid Beam | 250.125.6.9 | 400.200.8.13 | 450.200.9.14 |
|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Circullar Castellated Beam | 335.125.6.9 (CCB 1) | 536.200.8.13 (CCB 2) | 603.200.9.14 (CCB 3) |
| d (mm) = | 250.00 | 400.00 | 450.00 |
| dg (mm) = | 335.00 | 536.00 | 603.00 |
| bf (mm) = | 125.00 | 200.00 | 200.00 |
| tw (mm) = | 6.00 | 8.00 | 9.00 |
| tf (mm) = | 9.00 | 13.00 | 14.00 |
| h (mm) = | 100.00 | 160.00 | 180.00 |
| St (mm) = | 67.50 | 108.00 | 121.50 |
| Sb (mm) = | 67.50 | 108.00 | 121.50 |
| Do (mm) = | 200.00 | 320.00 | 360.00 |
| ao (mm) = | 200.00 | 320.00 | 360.00 |
| s (mm) = | 300.00 | 480.00 | 540.00 |
| K = | 1.40 | 1.40 | 1.40 |

4.2. Kontrol Profil dan Bukaannya

4.2.1. Kontrol Profil dan Bukaannya *hexagonal castellated beam*.

a. Syarat Bukaannya (HCB 1)

Syarat lubang h_o (AISC-T-DG02 hal 15)

| | | | |
|--------|--------|-----------|----------|
| h_o | \leq | 0,7 dg | |
| 200 mm | \leq | 0,7 x 350 | |
| 200 mm | \leq | 245 mm | OK |

Syarat St dan Sb (AISC-T-DG02 hal 15)

| | | | |
|---------------|--------|------------|----------|
| St dan Sb | \geq | 0,15 dg | |
| 75,00 mm | \geq | 0,15 x 350 | |
| 75,00 mm | \geq | 52,50 mm | OK |

Syarat v atau ao/sb atau ao/st (AISC-T-DG02 hal 15)

| | | | |
|-------------------|--------|----|----------|
| ao/sb ; ao/st | \leq | 12 | |
| 215,47/75,00 | \leq | 12 | |
| 2,87 | \leq | 12 | OK |

Kontrol jarak antar lubang (AISC-T-DG02 hal 16)

| | | | |
|-----------|--------|-------|----------|
| s | \geq | h_o | |
| 315,47 mm | \geq | 200 | OK |

Tabel 4.3 Tabel Kontrol Syarat Buka-an *Hexagonal Castellated Beam*

| Jenis Castellated Beam | Syarat lubang ho (mm) | Syarat St dan Sb (mm) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| HCB 1 | 200.00 ≤ 245.00 | 75.00 ≥ 52.50 |
| HCB 2 | 320.00 ≤ 392.00 | 120.00 ≥ 84.00 |
| HCB 3 | 360.00 ≤ 441.00 | 135.00 ≥ 94.50 |
| ket | ok | ok |

| Jenis Castellated | Syarat ao/sb | Syarat jarak antar lubang (mm) |
|-------------------|--------------|--------------------------------|
| HCB 1 | 2.87 ≤ 12.00 | 315.47 ≥ 200.00 |
| HCB 2 | 2.87 ≤ 12.00 | 504.75 ≥ 320.00 |
| HCB 3 | 2.87 ≤ 12.00 | 567.85 ≥ 360.00 |
| ket | ok | ok |

Menghitung momen inersia pada arah sumbu x dan sumbu y

I_x Castellated Beam pada penampang tanpa lubang

$$\begin{aligned}
 I_x &= \left(\frac{1}{12} x b_f x d_g^3 \right) - \left(\frac{1}{12} x (b_f - t_w) x (d_g - 2t_f)^3 \right) \\
 &= \left(\frac{1}{12} x 125 x 350^3 \right) - \left(\frac{1}{12} x (125 - 6) x (350 - 2x9)^3 \right) \\
 &= 83720434,00 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

I_x Castellated Beam pada penampang dengan lubang

$$\begin{aligned}
 I_x &= I_x \text{ tanpa lubang} - \left(\frac{1}{12} x t_w x h_o^3 \right) \\
 &= 83720434,00 - \left(\frac{1}{12} x 6 x 200^3 \right) \\
 &= 79720434,00 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

$$I_x \text{ rata - rata} = 81720434,00 \text{ mm}^4$$

I_y Castellated Beam pada penampang tanpa lubang

$$\begin{aligned} I_y &= 2 \left(\frac{1}{12} x t_f x b_f^3 \right) + \left(\frac{1}{12} x (d_g - 2t_f)(t_w)^3 \right) \\ &= 2 \left(\frac{1}{12} x 9 x 125^3 \right) + \left(\frac{1}{12} x (350 - 2x9) x 6^3 \right) \\ &= 2935663,50 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

I_y Castellated Beam pada penampang dengan lubang

$$\begin{aligned} I_y &= I_y \text{ tanpa lubang} - \left(\frac{1}{12} x h_o x t_w^3 \right) \\ &= 2935663,50 - \left(\frac{1}{12} x 200 x 6^3 \right) \\ &= 2932063,50 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_y \text{ rata - rata} = 2933863,50 \text{ mm}^4$$

Menghitung jari - jari girasi

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{8172,04}{36,42}} = 14,98 \text{ cm}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{293,39}{36,42}} = 2,84 \text{ cm}$$

Menghitung modulus penampang

Z_x Castellated Beam pada penampang tanpa lubang

$$\begin{aligned} Z_x &= \left(\frac{1}{4} x b_f x d_g^2 \right) - \left(2 x \frac{1}{4} x \left(\frac{b_f - t_w}{2} \right) x (d_g - 2t_f)^2 \right) \\ &= \left(\frac{1}{4} x 125 x 350^2 \right) - \left(2x \frac{1}{4} x \left(\frac{125 - 6}{2} \right) x (350 - 2 x 9)^2 \right) \\ &= 548961,00 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Z_x Castellated Beam pada penampang dengan lubang

$$\begin{aligned} Z_x &= Z_x \text{ tanpa lubang} - \left(\frac{1}{4} x t_w x h_o^2 \right) \\ &= 548961,00 - \left(\frac{1}{4} x 6 x 200^2 \right) \\ &= 488961,00 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$Z_x \text{ rata - rata} = 518961,00 \text{ mm}^3$$

Tabel 4.4 Tabel Nilai I_x , I_y , i_x , i_y , Z_x Hexagonal Castellated Beam

| Jenis Castellate | HC B 1 | HC B 2 | HC B 3 |
|----------------------------|----------|-----------|-----------|
| I_x (cm ⁴) = | 8,172.04 | 47,963.78 | 67,745.93 |
| I_y (cm ⁴) = | 293.39 | 1,734.93 | 1,869.23 |
| i_x (cm) = | 14.98 | 24.20 | 28.76 |
| i_y (cm) = | 2.84 | 4.60 | 4.46 |
| Z_x (cm ³) = | 518.96 | 1,890.11 | 2,394.41 |

b. Kontrol Penampang Profil (HC B 1)

Tekuk lokal
Pelat sayap

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{170}{\sqrt{f_y}}$$

$$\frac{125}{2 \times 9} \leq \frac{170}{\sqrt{250}}$$

$$6,94 \leq 10,75$$

Pelat badan

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$\frac{d_g}{2(t_f+r)} \leq \frac{1680}{\sqrt{f_y}}$$

$$\frac{350-2(9+12)}{6} \leq \frac{1680}{\sqrt{250}}$$

$$51,33 \leq 106,25$$

Tabel 4.5 Tabel Kontrol Penampang Profil *Hexagonal Castellated Beam*

| pelat sayap | $\lambda = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda_p = 170/\sqrt{f_y}$ | cek |
|-------------|--|--------|
| HCB 1 | $6.94 \leq 10.75$ | ok |
| HCB 2 | $7.69 \leq 10.75$ | ok |
| HCB 3 | $7.14 \leq 10.75$ | ok |
| pelat badan | $\lambda = \frac{(dg-2(tf+r))}{tw} \leq \lambda_p = 1680/\sqrt{f_y}$ | cek |
| HCB 1 | $51.33 \leq 106.25$ | kompak |
| HCB 2 | $62.75 \leq 106.25$ | kompak |
| HCB 3 | $62.89 \leq 106.25$ | kompak |

Karena $\lambda \leq \lambda_p$, maka penampang kompak

c. Tekuk Badan (HCB 1)

Pelat Sayap

$$\frac{d - 2tf}{tw} = \frac{312,5 - 2(9)}{6} = 55,33$$

$$\frac{1100}{\sqrt{f_y}} = \frac{1100}{\sqrt{250}} = 69,57$$

$$\frac{1365}{\sqrt{f_y}} = \frac{1365}{\sqrt{250}} = 88,11$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d - 2tf}{tw} \leq \frac{1100}{\sqrt{f_y}} \end{array} \right\}$$

Maka pelat badan termasuk plastis.

$$a_o = 134,67 \text{ mm}$$

$$h_o = 125 \text{ mm}$$

Perbandingan lebar terhadap tinggi badan

$$\frac{a_o}{h_o} = \frac{215,47}{200} = 1,08 \leq 3,0 \dots \dots \text{ok}$$

$$V_p = \frac{f_y \cdot t_w \cdot d / \sqrt{3}}{250 \times 6 \times 350} = 303108,89 \text{ N}$$

$$P_o = \left(\frac{a_o}{h_o} \right) + \left(\frac{6h_o}{d} \right) = 4,51 < 5,60 \dots \dots \text{ok}$$

Tabel 4.6 Tabel Kontrol Tekuk Badan *Hexagonal Castelled Beam*

| Jenis Castelled Beam | HCB 1 | HCB 2 | HCB 3 | ket |
|---|---------------|---------------|---------------|-----|
| $\frac{d - 2t_f}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{f_y}}$ | 55.33 ≤ 69.57 | 66.75 ≤ 69.57 | 66.89 ≤ 69.57 | ok |
| (a _o /h _o) < 3 | 1.08 < 3.00 | 1.08 < 3.00 | 1.08 < 3.00 | ok |
| P _o < 5,6 | 4.51 < 5,6 | 4.51 < 5,6 | 4.51 < 5,6 | ok |

d. Momen Lentur Nominal

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 518961,00 \times 250 = 129740250,00 \text{ Nmm}$$

$$\Delta A_s = h_o \times t_w = 200 \times 6 = 1200,00 \text{ mm}^2$$

$$M_n = M_p - f_y \Delta A_s \left(\frac{h_o}{4} + e \right)$$

$$M_n = 129740250,00 - 250 \times 1200 \left(\frac{200}{4} + 100 \right) = 84740250,00 \text{ Nmm}$$

$$\phi M_n = 0.9 \times 84740250,00 = 76266225,00 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} \mu &= 1/8 q l^2 = 1/8 \times 0.30 \text{ N/mm} \times (6000 \text{ mm})^2 \\ &= 1332000,00 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\phi M_n > \mu \dots \text{ok}$$

Tabel 4.7 Tabel Kontrol Momen Lentur Nominal
Hexagonal Castellated Beam

| Sampel | L (mm) | q | Z _x (mm ⁴) | f _y (Mpa) | h _o (mm) | t _w (mm) | e | ΔAs | M _p Z _x f _y (Nmm) |
|--------|-----------|----------------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---|--|
| | | (bs) (N/mm) | | | | | 0.5 h _o (mm) | h _o x t _w (mm) | |
| HCB 1 | 6000.00 | 0.30 | 518961.00 | 250.00 | 200.00 | 6.00 | 100.00 | 1200.00 | 129740250.00 |
| HCB 2 | 6000.00 | 0.66 | 1890112.00 | 250.00 | 320.00 | 8.00 | 160.00 | 2560.00 | 472528000.00 |
| HCB 3 | 6000.00 | 0.76 | 2394409.00 | 250.00 | 360.00 | 9.00 | 180.00 | 3240.00 | 598602250.00 |

| sampel | M _n | φM _n (Nmm) | μ | φM _n > μ |
|--------|--|--------------------------|--------------|---------------------|
| | M _p - f _y ΔAs (Nmm) | | | |
| HCB 1 | 84740250.00 | 76,266,225.00 | 1,332,000.00 | ok |
| HCB 2 | 318928000.00 | 287,035,200.00 | 2,970,000.00 | ok |
| HCB 3 | 379902250.00 | 341,912,025.00 | 3,420,000.00 | ok |

e. Kontrol Tekuk Lateral

$$S_x = I_x / (d/2) = 81720434,00 / (350/2) = 466973,91 \text{ mm}^3$$

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{3} (2b_f \times t_f^3 + ht_w^3) - \frac{1}{3} (h_o \times t_w^3) \\ &= \frac{1}{3} (2 \times 125 \times 9^3 + 332 \times 6^3) - \frac{1}{3} (200 \times 6^3) \\ &= 70254,00 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$C_w = \frac{h^2 I_y}{2} = \frac{332^2 \times 2933864,50}{2} = 1.62 \times 10^{11}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{2933863,50}{3642,00}} = 28,38 \text{ mm}$$

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{F_y}} \times r_y = \frac{790}{\sqrt{250}} \times 28,38 = 1418,10 \text{ mm}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{466973,91} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 70254 \times 3642}{2}} = 9625,16 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \frac{C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{G} \right)^2 = 4 \frac{1,62 \times 10^{11}}{2933863,50} \left(\frac{466973,91}{8 \cdot 10^4 \times 70254} \right)^2$$

$$= 0.00152 \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

$$L_r = \frac{r_y X_1}{(F_{yt} - F_r)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (F_y - F_r)^2}}$$

$$= \frac{28,38 \times 9625,16}{(250 - 70)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 0.00152 (250 - 70)^2}}$$

$$= 4317,52 \text{ mm}$$

$L_r < L_b \rightarrow$ bentang panjang merupakan penampang inelastis

Tabel 4.8 Tabel Kontrol Tekuk Lateral *Hexagonal Castellated Beam*

| Sampel | bf | d _g | t _w | t _f | h | h _o | f _y (Mpa) |
|--------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------------|
| | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | |
| HCB 1 | 125.00 | 350.00 | 6.00 | 9.00 | 332.00 | 200.00 | 250.00 |
| HCB 2 | 200.00 | 560.00 | 8.00 | 13.00 | 534.00 | 320.00 | 250.00 |
| HCB 3 | 200.00 | 630.00 | 9.00 | 14.00 | 602.00 | 360.00 | 250.00 |

| Sampel | A | I _x tanpa lubang | I _x lubang | Z _x tanpa lubang | Z _x lubang | I _x |
|--------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| | mm ² | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁴ |
| HCB 1 | 3,642.00 | 83,720,434.00 | 79,720,434.00 | 548,961.00 | 488,961.00 | 81,720,434.00 |
| HCB 2 | 8,192.00 | 490,560,469.33 | 468,715,136.00 | 1,992,512.00 | 1,787,712.00 | 479,637,802.67 |
| HCB 3 | 9,398.00 | 694,955,272.67 | 659,963,272.67 | 2,540,209.00 | 2,248,609.00 | 677,459,272.67 |

| Sampel | S _x | I _y | J | C _w | r _y | X ₁ | X ₂ |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|----------------|---------------------------------|
| | mm ³ | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁶ | mm | Mpa | mm ⁴ /N ² |
| HCB 1 | 466,973.91 | 2,933,863.50 | 70,254.00 | 161,691,085,212.00 | 28.38 | 9,625.16 | 0.00152 |
| HCB 2 | 1,712,992.15 | 17,349,290.67 | 329,456.00 | 2,473,627,164,672.00 | 46.02 | 8,521.84 | 0.00241 |
| HCB 3 | 2,150,664.36 | 18,692,303.17 | 424,672.67 | 3,387,082,718,406.33 | 44.60 | 8,254.05 | 0.00290 |

| Sampel | L _b | L _p | L _r | syarat bentang pengekang lateral |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|
| | (mm) | (mm) | (mm) | |
| HCB 1 | 6,000.00 | 1,418.10 | 4,317.52 | panjang |
| HCB 2 | 6,000.00 | 2,299.34 | 6,852.22 | menengah |
| HCB 3 | 6,000.00 | 2,228.29 | 6,705.93 | menengah |

f. Kontrol Kekuatan Geser

Untuk tee atas dan tee bawah

$$V_{pt} = \frac{f_y \times t_w \times s_1}{\sqrt{3}}$$

$$V_{pt} = \frac{250 \times 6 \times 75}{\sqrt{3}} = 64951,91 \text{ N}$$

$$\mu = 0$$

$$v = \frac{a_o}{dt} = \frac{215,47}{75} = 2,87$$

$$a_v = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} = 0,53 \leq 1,0 \dots \text{ok}$$

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} \cdot V_{pt}$$

$$= 0,53 \times 64951,91 = 34549,30 \text{ N}$$

$$V_{nt} \leq V_{pt} \dots \text{ok}$$

Tabel 4.9 Tabel Kontrol Kekuatan Geser *Hexagonal Castellated Beam*

| sampel | dt (mm) | ao (mm) | tw (mm) | fy (Mpa) | μ | v (ao/s1) | $\frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}}$ | V_{pt} | V_{nt} | $\frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} \cdot V_{pt}$ | $V_{nt} \leq V_{pt}$ |
|--------|---------|---------|---------|----------|-------|--------------|---------------------------------------|------------|-----------|--|----------------------|
| HCB1 | 75,00 | 215,47 | 6,00 | 250,00 | 0,00 | 2,87 | 0,53 | 64,951,91 | 34,549,30 | ok | ok |
| HCB2 | 120,00 | 344,75 | 8,00 | 250,00 | 0,00 | 2,87 | 0,53 | 138,564,06 | 73,705,18 | ok | ok |
| HCB3 | 135,00 | 387,85 | 9,00 | 250,00 | 0,00 | 2,87 | 0,53 | 175,370,14 | 93,283,12 | ok | ok |

4.2.2. Kontrol Profil dan Bukaannya *circullar castellated beam*.

a. Syarat Bukaannya (CCB 1)

Syarat lubang ho (AISC-T-DG02 hal 15)

$$D_o \leq 0,7 d_g$$

$$200 \text{ mm} \leq 0,7 \times 335$$

$$200 \text{ mm} \leq 234,50 \text{ mm} \quad \dots \text{OK}$$

Syarat St dan Sb (AISC-T-DG02 hal 15)

| | | | |
|-----------|--------|------------|----------|
| St dan Sb | \geq | 0,15 dg | |
| 67,50 mm | \geq | 0,15 x 335 | |
| 67,50 mm | \geq | 50,25 mm | OK |

Syarat v atau ao/sb atau ao/st (AISC-T-DG02 hal 15)

| | | | |
|---------------|--------|----|----------|
| ao/sb ; ao/st | \leq | 12 | |
| 200/67,50 | \leq | 12 | |
| 2,96 | \leq | 12 | OK |

Kontrol jarak antar lubang (AISC-T-DG02 hal 16)

| | | | |
|--------|--------|-----------|----------|
| s | \geq | 1,5 Do | |
| 300 mm | \geq | 1,5 x 200 | |
| 300 mm | \geq | 300 | OK |

Tabel 4.10 Tabel Kontrol Syarat Bukaan *Circular Castellated Beam*

| Jenis Castellated Beam | Syarat lubang ho (mm) | Syarat St dan Sb (mm) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| CCB 1 | 200.00 \leq 234.50 | 67.50 \geq 50.25 |
| CCB 2 | 320.00 \leq 375.20 | 108.00 \geq 80.40 |
| CCB 3 | 360.00 \leq 422.10 | 121.50 \geq 90.45 |
| ket | ok | ok |

| Jenis Castellated | Syarat ao/sb | Syarat jarak antar lubang (mm) |
|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| CCB 1 | 0.66 \leq 12.00 | 184.80 \geq 132.00 |
| CCB 2 | 0.66 \leq 12.00 | 295.68 \geq 211.20 |
| CCB 3 | 0.66 \leq 12.00 | 332.64 \geq 237.60 |
| ket | ok | ok |

Menghitung momen inersia pada arah sumbu x dan sumbu y

I_x Castellated Beam pada penampang tanpa lubang

$$\begin{aligned} I_x &= \left(\frac{1}{12} x b_f x d_g^3 \right) - \left(\frac{1}{12} x (b_f - t_w) x (d_g - 2t_f)^3 \right) \\ &= \left(\frac{1}{12} x 125 x 335^3 \right) - \left(\frac{1}{12} x (125 - 6) x (335 - 2x9)^3 \right) \\ &= 75722944,00 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

I_x Castellated Beam pada penampang dengan lubang

$$\begin{aligned} I_x &= I_x \text{ tanpa lubang} - \left(\frac{1}{12} x t_w x D_o^3 \right) \\ &= 75722944,00 - \left(\frac{1}{12} x 6 x 200^3 \right) \\ &= 71722944,00 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_x \text{ rata - rata} = 73722944,00 \text{ mm}^4$$

I_y Castellated Beam pada penampang tanpa lubang

$$\begin{aligned} I_y &= 2 \left(\frac{1}{12} x t_f x b_f^3 \right) + \left(\frac{1}{12} x (d_g - 2t_f) (t_w)^3 \right) \\ &= 2 \left(\frac{1}{12} x 9 x 125^3 \right) + \left(\frac{1}{12} x (335 - 2x9) x 6^3 \right) \\ &= 2935393,50 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

I_y Castellated Beam pada penampang dengan lubang

$$\begin{aligned} I_y &= I_y \text{ tanpa lubang} - \left(\frac{1}{12} x D_o x t_w^3 \right) \\ &= 2935393,50 - \left(\frac{1}{12} x 200 x 6^3 \right) \\ &= 2931793,50 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$I_y \text{ rata - rata} = 2935393,50 \text{ mm}^4$$

Menghitung jari - jari girasi

$$i_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{7372,29}{35,52}} = 14,41 \text{ cm}$$

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{293,38}{35,52}} = 2,87 \text{ cm}$$

Menghitung modulus penampang

Zx Castellated Beam pada penampang tanpa lubang

$$\begin{aligned} Z_x &= \left(\frac{1}{4} \times b_f \times d_g^2 \right) - \left(2 \times \frac{1}{4} \times \left(\frac{b_f - t_w}{2} \right) \times (d_g - 2t_f)^2 \right) \\ &= \left(\frac{1}{4} \times 125 \times 335^2 \right) - \left(2 \times \frac{1}{4} \times \left(\frac{125 - 6}{2} \right) \times (335 - 2 \times 9)^2 \right) \\ &= 517483,50 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Zx Castellated Beam pada penampang dengan lubang

$$\begin{aligned} Z_x &= Z_x \text{ tanpa lubang} - \left(\frac{1}{4} \times t_w \times D_o^2 \right) \\ &= 517483,50 - \left(\frac{1}{4} \times 6 \times 200^2 \right) \\ &= 457483,50 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$Z_x \text{ rata - rata} = 487483,50 \text{ mm}^3$$

Tabel 4.11 Tabel Nilai Ix, Iy, ix, iy, Zx *Circular Castellated Beam*

| Jenis Castellate | CCB 1 | CCB 2 | CCB 3 |
|------------------|------------|-----------|-----------|
| Ix (cm4) | = 7,372.29 | 43,317.23 | 61,086.69 |
| Iy (cm4) | = 293.36 | 1,734.83 | 1,869.07 |
| ix (cm) | = 14.41 | 23.27 | 27.63 |
| iy (cm) | = 2.87 | 4.66 | 4.52 |
| Zx (cm3) | = 487.48 | 1,777.60 | 2,247.31 |

**b. Kontrol Penampang Profil
(CCB 1)**

Tekuk lokal
Pelat sayap

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$\frac{b_f}{2t_f} \leq \frac{170}{\sqrt{fy}}$$

$$\frac{125}{2 \times 9} \leq \frac{170}{\sqrt{250}}$$

$$6,94 \leq 10,75$$

Pelat badan

$$\lambda \leq \lambda_p$$

$$\frac{dg-}{2(tf+r)} \leq \frac{1680}{\sqrt{fy}}$$

$$\frac{335-2(9+12)}{6} \leq \frac{1680}{\sqrt{250}}$$

$$48,83 \leq 106,25$$

Tabel 4.12 Tabel Kontrol Penampang Profil *Hexagonal Castellated Beam*

| pelat sayap | $\lambda = \frac{bf}{2tf} \leq \lambda_p = 170/\sqrt{f_y}$ | cek |
|-------------|--|--------|
| CCB 1 | $6.94 \leq 10.75$ | ok |
| CCB 2 | $7.69 \leq 10.75$ | ok |
| CCB 3 | $7.14 \leq 10.75$ | ok |
| pelat badan | $\lambda = \frac{(dg-2(tf+r))}{tw} \leq \lambda_p = 1680/\sqrt{f_y}$ | cek |
| CCB 1 | $48.83 \leq 106.25$ | kompak |
| CCB 2 | $59.75 \leq 106.25$ | kompak |
| CCB 3 | $59.89 \leq 106.25$ | kompak |

Karena $\lambda \leq \lambda_p$, maka penampang kompak

c. Tekuk Badan (CCB 1)

Pelat Sayap

$$\frac{d - 2tf}{tw} = \frac{335 - 2(9)}{6} = 52,83$$

$$\frac{1100}{\sqrt{f_y}} = \frac{1100}{\sqrt{250}} = 69,57$$

$$\frac{1365}{\sqrt{f_y}} = \frac{1365}{\sqrt{250}} = 88,11$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d - 2tf}{tw} \leq \frac{1100}{\sqrt{f_y}} \end{array} \right\}$$

Maka pelat badan termasuk plastis.

Perbandingan lebar terhadap tinggi badan

$$\frac{a_o}{D_o} = \frac{200}{200} = 1,0 \leq 3,0 \dots \dots ok$$

$$V_p = f_y \cdot t_w \cdot d / \sqrt{3}$$

$$V_p = \frac{250 \times 6 \times 335}{\sqrt{3}} = 290118,51 \text{ N}$$

$$P_o = (a_o/D_o) + (6D_o/d)$$

$$P_o = \left(\frac{200}{200}\right) + \left(\frac{6 \times 200}{350}\right) = 4,58 < 5.60 \dots \dots \text{ok}$$

Tabel 4.13 Tabel Kontrol Tekuk Badan *Hexagonal Castellated Beam*

| Jenis | CCB 1 | CCB 2 | CCB 3 | ket |
|---|---------------|---------------|---------------|-----|
| $\frac{d - 2r_f}{t_w} \leq \frac{1100}{\sqrt{f_y}}$ | 52.83 ≤ 69.57 | 63.75 ≤ 69.57 | 63.89 ≤ 69.57 | ok |
| $(a_o/D_o) < 3$ | 1.00 < 3.00 | 1.00 < 3.00 | 1.00 < 3.00 | ok |
| $P_o < 5,6$ | 4.58 < 5,6 | 4.58 < 5,6 | 4.58 < 5,6 | ok |

d. Momen Lentur Nominal

$$M_p = Z_x \cdot f_y = 487483,50 \times 250 = 121870875,00 \text{ Nmm}$$

$$\Delta A_s = h_o \times t_w = 200 \times 6 = 1200,00 \text{ mm}^2$$

$$M_n = M_p - f_y \Delta A_s \left(\frac{h_o}{4} + e \right)$$

$$M_n = 121870875,00 - 250 \times 1200 \left(\frac{200}{4} + 100 \right)$$

$$= 76870875,00 \text{ Nmm}$$

$$\phi M_n = 0.9 \times 76870875,00 = 69183787,50 \text{ Nmm}$$

$$M_u = 1/8 q l^2 = 1/8 \times 0.30 \text{ N/mm} \times (6000 \text{ mm})^2$$

$$= 1332000,00 \text{ Nmm}$$

$$\phi M_n > M_u \dots \text{Ok}$$

Tabel 4.14 Tabel Momen Lentur Nominal *Hexagonal Castelled Beam*

| Sampel | L (mm) | q | Z _x (mm ⁴) | f _y (Mpa) | h _o (mm) | t _w (mm) | e | ΔAs | M _p Z _x f _y (Nmm) |
|--------|-----------|--------|--------------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------------|--|
| | | (N/mm) | | | | | 0.5 h _o | h _o x t _w | |
| CCB1 | 6000.00 | 0.30 | 487483.50 | 250.00 | 200.00 | 6.00 | 100.00 | 1200.00 | 121870875.00 |
| CCB2 | 6000.00 | 0.66 | 1777600.00 | 250.00 | 320.00 | 8.00 | 160.00 | 2560.00 | 444400000.00 |
| CCB 3 | 6000.00 | 0.76 | 2247306.25 | 250.00 | 360.00 | 9.00 | 180.00 | 3240.00 | 561826562.50 |

| sampel | M _n | | | M _u | |
|--------|--|--|--------------|----------------|----|
| | M _p - f _y ΔA _s (Nmm) | | | | |
| CCB1 | 76870875.00 | | 69183787.50 | 1332000.00 | ok |
| CCB2 | 290800000.00 | | 261720000.00 | 1332000.00 | ok |
| CCB 3 | 343126562.50 | | 308813906.25 | 1332000.00 | ok |

e. Kontrol Tekuk Lateral

$$S_x = I_x / (d/2) = 73722944,00 / (335/2) = 440136,98 \text{ mm}^3$$

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{3} (2b_f \times t_f^3 + ht_w^3) - \frac{1}{3} (h_o \times t_w^3) \\ &= \frac{1}{3} (2 \times 125 \times 9^3 + 317 \times 6^3) - \frac{1}{3} (200 \times 6^3) \\ &= 69174,00 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$C_w = \frac{h^2 I_y}{2} = \frac{317^2 \times 2933593,50}{2} = 1,47 \times 10^{11}$$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{2933593,50}{3552,00}} = 28,74 \text{ mm}$$

$$L_p = \frac{790}{\sqrt{F_y}} \times r_y = \frac{790}{\sqrt{250}} \times 28,74 = 1435,89 \text{ mm}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{EGJA}{2}}$$

$$X_1 = \frac{\pi}{440136,98} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \times 8 \cdot 10^4 \times 69174 \times 3552}{2}} = 10007,25 \text{ MPa}$$

$$X_2 = 4 \frac{C_w}{I_y} \left(\frac{S_x}{G} \right)^2 = 4 \frac{1,47 \times 10^{11}}{2933593,50} \left(\frac{440136,98}{8 \cdot 10^4 \times 69174} \right)^2$$

$$= 0.00127 \text{ mm}^4/\text{N}^2$$

$$L_r = \frac{r_y X_1}{(F_{yt} - F_r)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X_2 (F_y - F_r)^2}}$$

$$= \frac{28,74 \times 10007,25}{(250 - 70)} \sqrt{1 + \sqrt{1 + 0.00147 (250 - 70)^2}}$$

$$= 4374,52 \text{ mm}$$

$L_r < L_b \rightarrow$ bentang panjang merupakan penampang inelastis

Tabel 4.15 Tabel Momen Lentur Nominal *Hexagonal Castelled Beam*

| Sampel | bf | d _g | t _w | t _f | h | h _o | f _y (Mpa) |
|--------|--------|----------------|----------------|----------------|--------|----------------|----------------------|
| | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | |
| CCB1 | 125.00 | 335.00 | 6.00 | 9.00 | 317.00 | 200.00 | 250.00 |
| CCB2 | 200.00 | 536.00 | 8.00 | 13.00 | 510.00 | 320.00 | 250.00 |
| CCB 3 | 200.00 | 603.00 | 9.00 | 14.00 | 575.00 | 360.00 | 250.00 |

| Sampel | A | I _x tanpa lubang | I _x lubang | Z _x tanpa lubang | Z _x lubang | I _x |
|--------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| | mm ² | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁴ |
| CCB1 | 3,552.00 | 75,722,944.00 | 71,722,944.00 | 517,483.50 | 457,483.50 | 73,722,944.00 |
| CCB2 | 8,000.00 | 444,094,933.33 | 422,249,600.00 | 1,880,000.00 | 1,675,200.00 | 433,172,266.67 |
| CCB 3 | 9,155.00 | 628,362,897.92 | 593,370,897.92 | 2,393,106.25 | 2,101,506.25 | 610,866,897.92 |

| Sampel | Sx | Iy | J | Cw | ry | X1 | X2 |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------|-----------|---------------------|
| | mm ³ | mm ⁴ | mm ⁴ | mm ⁶ | mm | Mpa | mm ⁴ /N2 |
| CCB1 | 440,136.98 | 2,933,593.50 | 69,174.00 | 147,396,938,610.75 | 28.74 | 10,007.25 | 0.0013 |
| CCB2 | 1,616,314.43 | 17,348,266.67 | 325,360.00 | 2,256,142,080,000.00 | 46.57 | 8,869.44 | 0.0020 |
| CCB 3 | 2,026,092.53 | 18,690,662.92 | 418,111.67 | 3,089,800,213,411.46 | 45.18 | 8,580.47 | 0.0024 |

| Sampel | L _b | L _p | L _r | syarat bentang pengekang lateral |
|--------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------------|
| | (mm) | (mm) | (mm) | |
| CCB1 | 6,000.00 | 1,435.89 | 4,374.27 | panjang |
| CCB2 | 6,000.00 | 2,326.70 | 6,930.88 | menengah |
| CCB 3 | 6,000.00 | 2,257.57 | 6,784.66 | menengah |

f. Kontrol Kekuatan Geser

Untuk tee atas dan tee bawah

$$V_{pt} = \frac{f_y \times t_w \times s_1}{\sqrt{3}}$$

$$V_{pt} = \frac{250 \times 6 \times 67,50}{\sqrt{3}} = 58456,71 \text{ N}$$

$$\mu = 0$$

$$v = \frac{a_o}{dt} = \frac{200}{67,50} = 2,96$$

$$a_v = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} = 0.52 \leq 1.0 \dots \text{ok}$$

$$V_{nt} = \frac{\sqrt{6} + \mu}{v + \sqrt{3}} \cdot V_{pt}$$

$$= 0,52 \times 58456,71 = 30498,13 \text{ N}$$

$$V_{nt} \leq V_{pt} \dots \dots \text{ok}$$

Tabel 4.16 Tabel Kontrol Kekuatan Geser *Hexagonal Castellated Beam*

| sampel | dt (mm) | do (mm) | tw (mm) | fy (Mpa) | μ | v (a _o /s1) | $\frac{V_{pt}}{V_{pl}}$ | $\frac{V_{nt}}{V_{pl}}$ | $\frac{V_{nt}}{V_{pl}}$ | Vnt ≤ Vpt | |
|--------|---------|---------|---------|----------|-------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|----|
| CCB1 | 67.50 | 200.00 | 6.00 | 250.00 | 0.00 | 2.96 | 0.52 | 58,456.71 | 30,498.13 | ok | ok |
| CCB2 | 108.00 | 320.00 | 8.00 | 250.00 | 0.00 | 2.96 | 0.52 | 124,707.66 | 65,062.67 | ok | ok |
| CCB3 | 121.50 | 360.00 | 9.00 | 250.00 | 0.00 | 2.96 | 0.52 | 157,833.13 | 82,344.94 | ok | ok |

4.3. Penentuan Profil yang Dipakai

Dari ketiga profil *solid beam* IWF 250.125.6.9, IWF 400.200.8.13 dan IWF 450.200.9.14, setelah direncanakan menjadi *castellated beam* dan dilakukan pengontrolan, maka diperoleh profil *castellated beam* seperti dibawah ini untuk dianalisa model keruntuhanannya degan program FEA.

Hexagonal Castellated Beam

IWF 350.125.6.9
IWF 560.200.8.13
IWF 630.200.9.14

Circular Castellated beam

IWF 335.125.6.9
IWF 536.200.8.13
IWF 603.200.9.14

BAB V

ANALISA KERUNTUHAN DENGAN PROGRAM FEA

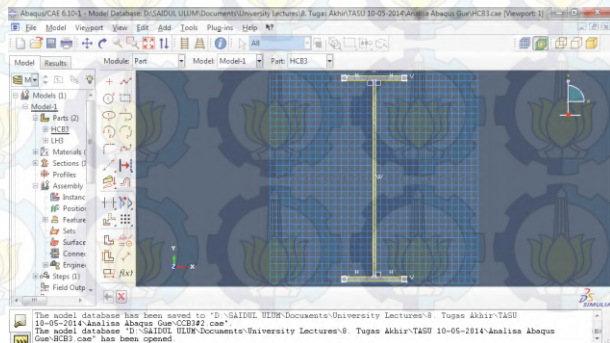
5.1. Analisa Pemodelan dengan FEA

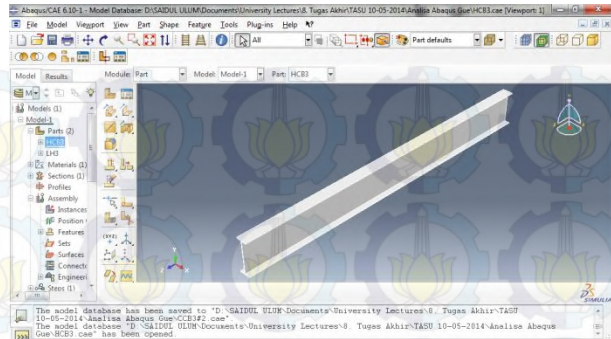
Untuk menganalisa perilaku *Castellated Beam* digunakan software finite elemen. Pemodelan elemen balok dengan bentuk yang diinginkan, beserta input data, jenis material, pola pembebanan, rekatan antar elemen, jenis perletakan dan *meshing element* dapat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

5.1.1. Part

Step ini merupakan penggambaran bentuk awal dari geometrik elemen dengan menggunakan titik - titik koordinat dalam penggambaran untuk masing – masing elemen dengan men-klik *Part Manager* pada sampel HCB1.

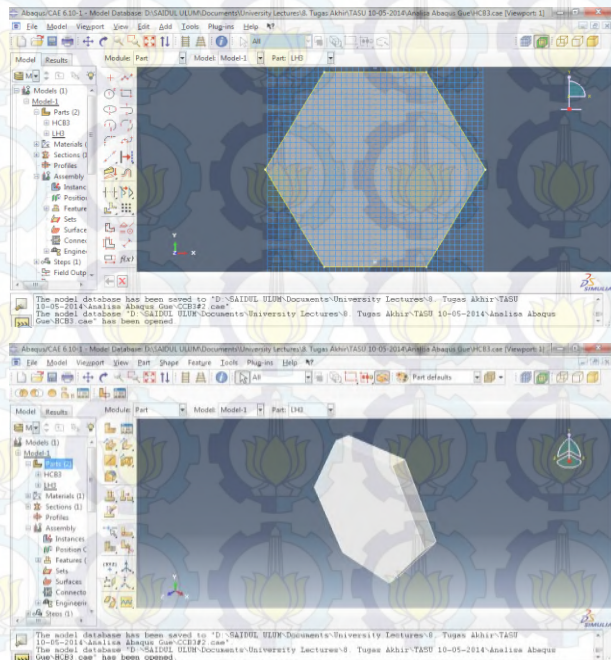
- *Wide Flange* (WF) dalam desain struktur ini digunakan profil castellated beam buatan dimensi Tinggi profil (D) = 350 mm, Lebar profil (B) = 125 mm, tebal sayap profil (tf) = 9 mm, tebal badan profil (tw) = 6 mm dengan panjang 6000 mm dengan property sebagai profil baja seperti terlihat pada Gambar 5.1.





Gambar 5.1. WF Solid Sebelum Dilubangi

- Lubang Castellated dalam desain struktur ini digunakan dimensi panjang (h_o) = 200 mm dan lebar (a_o) = 215,47 mm.



Gambar 5.2. Lubang Castellated

5.1.2. Property

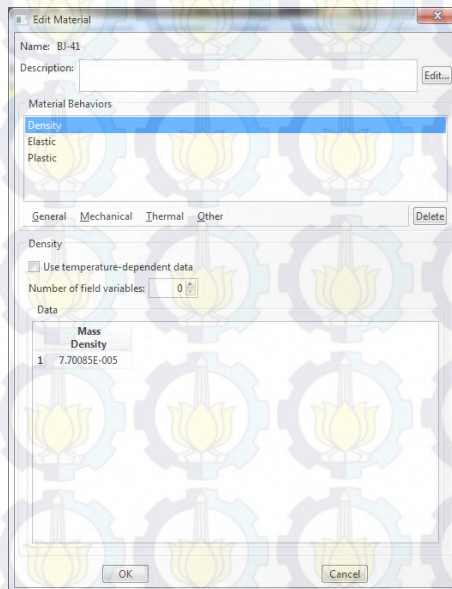
Langkah ini merupakan penentuan jenis material yang digunakan untuk masing – masing elemen.

- Material Manager
Dengan mengisi *mass density*, *elastisitas material* dan *plastisitas material*.

Density Menu

Mass density untuk baja adalah

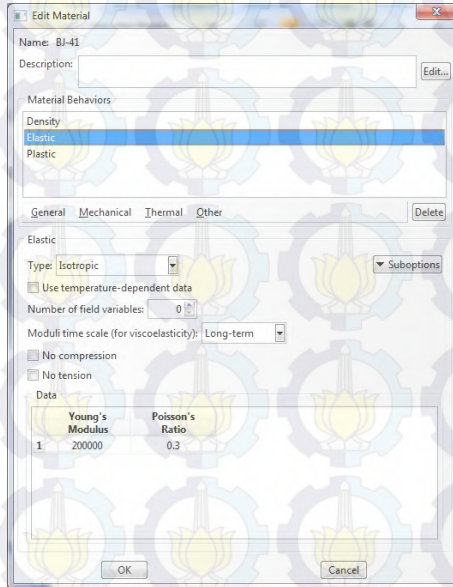
$$= \frac{7850 \text{ kg} / \text{m}^3}{1000000000} \times 9,81 \text{ m} / \text{dt}^2 = 7,70085 \times 10^{-5}$$



Gambar 5.3 Mass Density

Elastic Menu

Modulus Young Baja adalah 200000 Mpa dengan Poisson ratio = 0,3

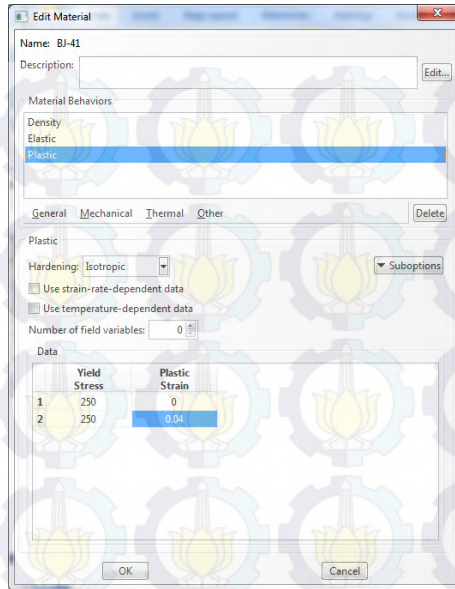


Gambar 5.4 Elastic Material

Plastic Menu

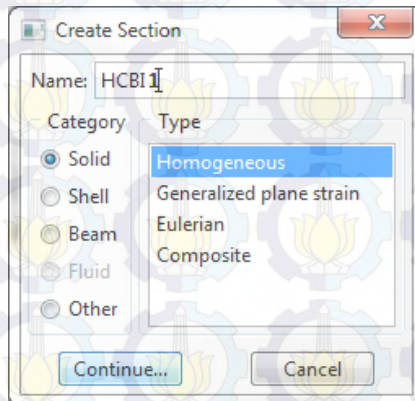
$F_y = 250$ Mpa untuk batas leleh dengan *plastic strain* harus dimulai dari 0 Mpa.

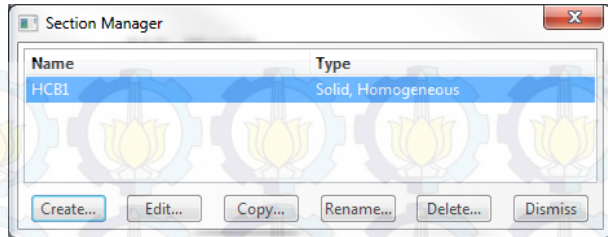
$F_y = 250$ Mpa untuk batas leleh dengan *plastic strain* = 0,04 Mpa



Gambar 5.5 Plastic Material

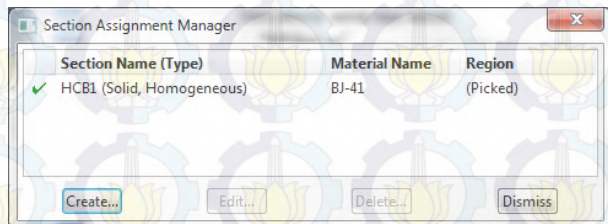
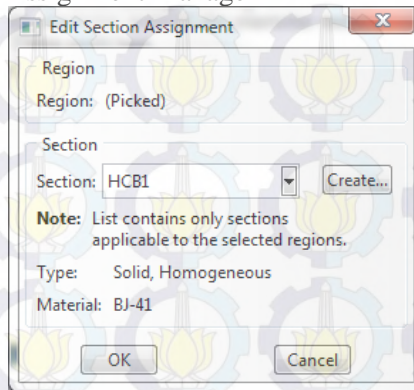
- Section Manager





Gambar 5.6 Section Manager

- Section Assignment Manager



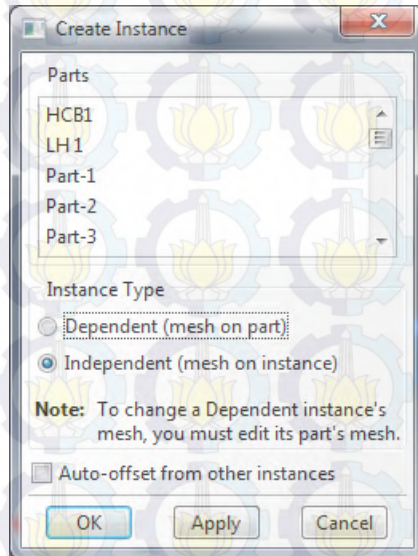
Gambar 5.7 Section Assignment Manager

5.1.3. Assembly

Assembly merupakan mengeluarkan yang telah dibuat sebelum melangkah pada step berikutnya. Dalam langkah ini dibagi beberapa langkah yaitu:

- *Instance Part*

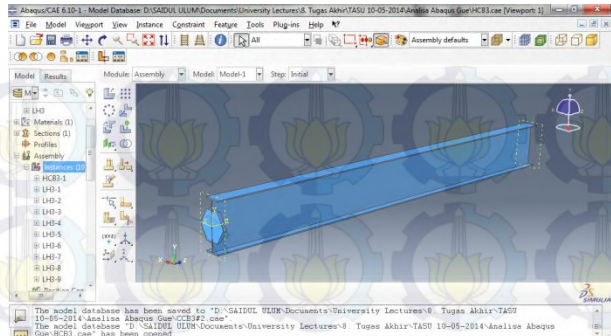
Klik *Instance Part*, pilih dan *apply* HCB1 dan lubang yang terdapat pada pilihan. Pilih *independent* pada *instance type* seperti terlihat pada Gambar 5.8.



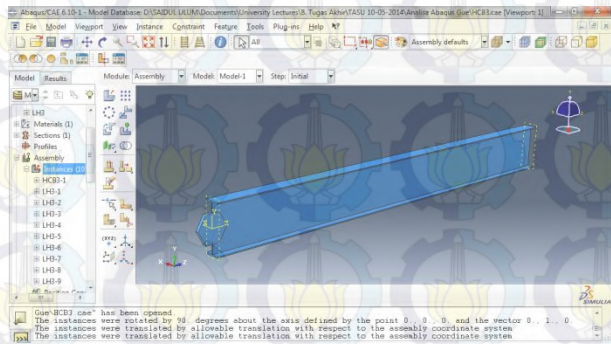
Gambar 5.8. *Instance Part*

- *Rotate Instance*

Pada waktu akan memutar suatu elemen diputar sebesar 90° harus dilakukan dengan langkah *rotate*, dengan men-klik frame lubang yang akan diputar setelah itu isi start point 0,0,0 dan end point 0,1,0. Hal ini dikarenakan akan diputar sebesar 90° arah 1 atau y. Setelah itu masukan sudut yang akan diputar yaitu 90° seperti terlihat pada Gambar 5.10.



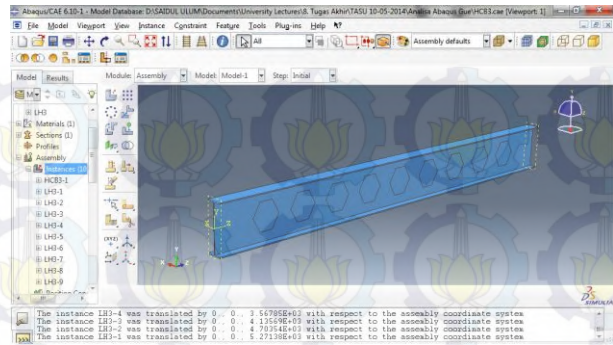
Gambar 5.9. Sebelum Diputar



Gambar 5.10. Setelah Diputar

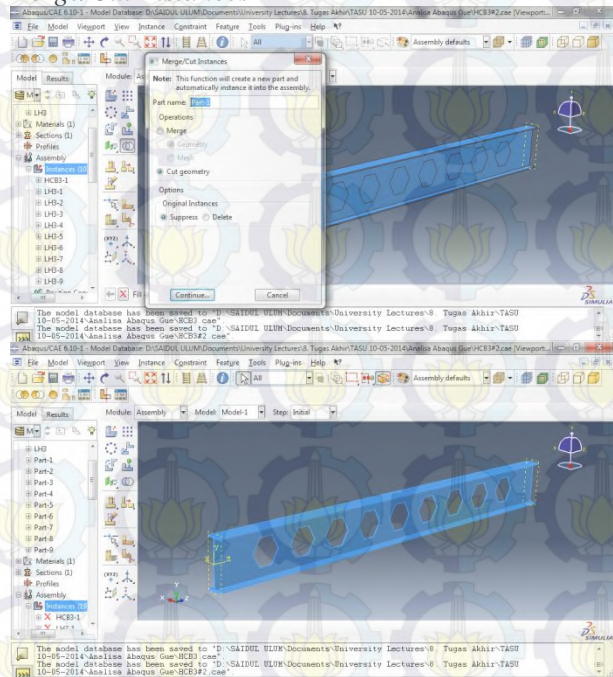
- *Translate Instance*

Lubang yang dipanggil harus digeser sesuai dengan jarak yang telah ditentukan sebelumnya. dengan mengklik frame lubang yang akan digeser setelah itu isi start point 0,0,0 dan end point 0,0,n (sesuai jarak yang ditentukan). Hal ini dikarenakan akan digeser sepanjang arah Z seperti terlihat pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11. Instance Part

- Merge/Cut Instances



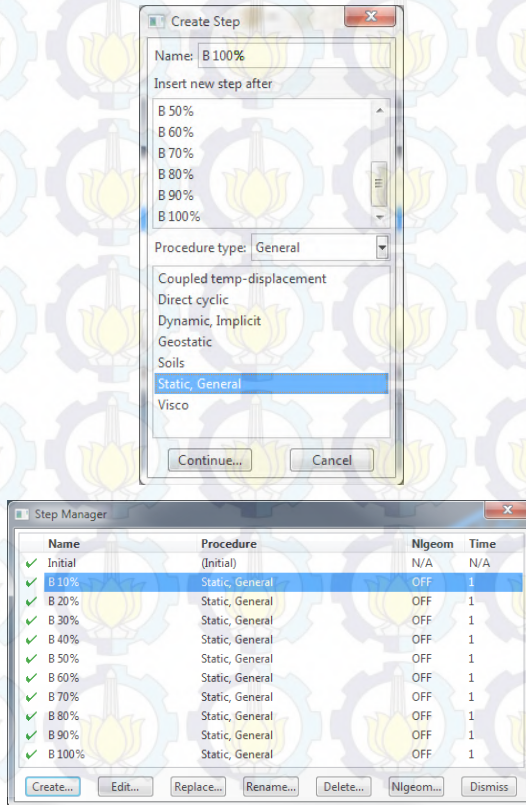
Gambar 5.12. Instance Part

5.1.4. Step

Step Manager

Karena balok akan dibebani dengan dengan beban displacement, maka perlu dibuatkan pembagian persentase pembebanan. Dalam kasus ini diambil 10 bagian dari mulai 0% - 100% dengan selisih 10% antara bagian-bagiannya.

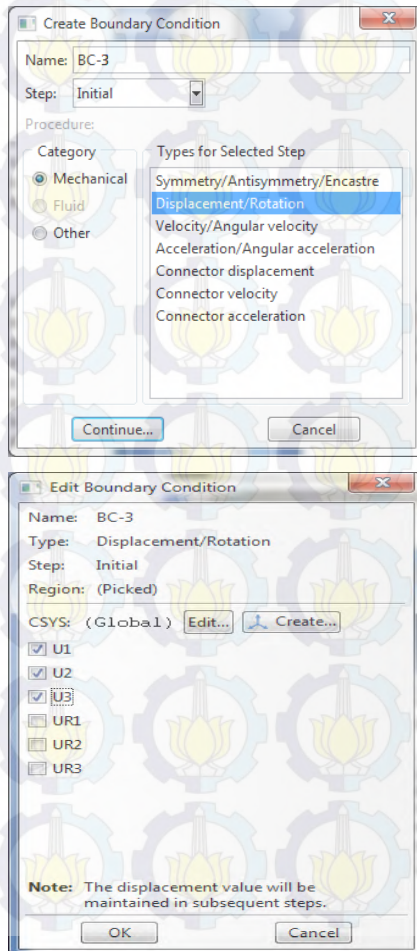
Langkah pengerjaannya adalah, klik Step Manager → Create, isikan nama dan pilih *Static, General*. Lakukan sampai sepuluh kali.



Gambar 5.13. Step Manager

5.1.5. Load

Setelah dilakukan *step* maka setelah itu sampel *castellated beam* diberi beban. Namun sebelum diberi beban maka perletakkan elemen tersebut harus diasumsikan sendi – sendi terlebih dahulu seperti terlihat pada Gambar 5.14.



Gambar 5.14 Perletakan

Setelah proses perletakan pada Profil Castellated Beam, selanjutnya diberi beban Aksial di tengah bentang pada 10 bagian pembebanan yang telah dibuat pada langkah step (10%-100%), dengan nilai P sebagai berikut :

$$M_n = 76870875 \text{ Nmm}$$

$$M = \frac{1}{8} q l^2 \gg \text{ pada beban terbagi rata}$$

$$q = \frac{8M}{l^2} = \frac{8 \times 76870875}{6000^2} = 17,08 \text{ N/mm}$$

$$P = \frac{q}{bf} = \frac{17,08}{125} = 0,137 \gg P \text{ 100\%}$$

Tabel 5.1 Nilai Pembebanan

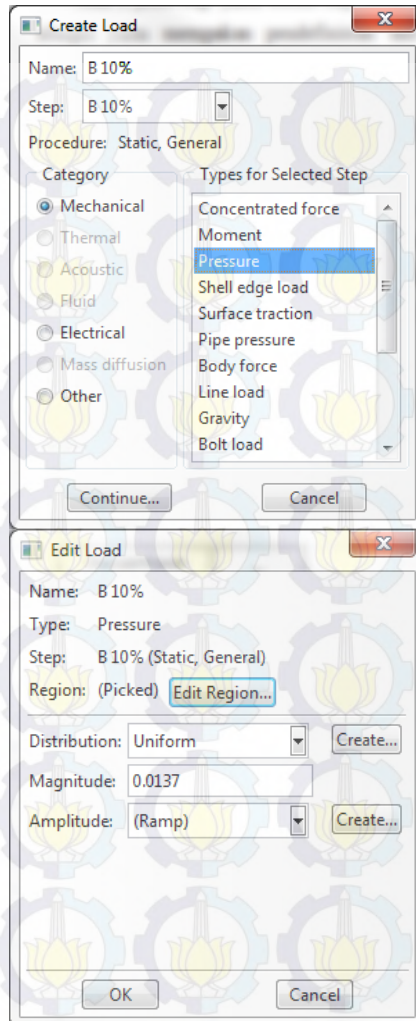
| Persentase Pembebanan | P |
|-----------------------|--------|
| 10% | 0.0137 |
| 20% | 0.0273 |
| 30% | 0.0410 |
| 40% | 0.0547 |
| 50% | 0.0683 |
| 60% | 0.0820 |
| 70% | 0.0957 |
| 80% | 0.1093 |
| 90% | 0.1230 |
| 100% | 0.1367 |

Keterangan :

$$q_{HCB1}, q_{CCB1} = 17,08 \text{ N/mm}^2$$

$$q_{HCB2}, q_{CCB2} = 64,62 \text{ N/mm}^2$$

$$q_{HCB3}, q_{CCB3} = 76,25 \text{ N/mm}^2$$



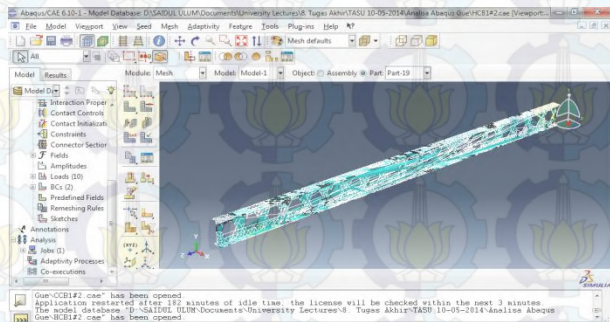
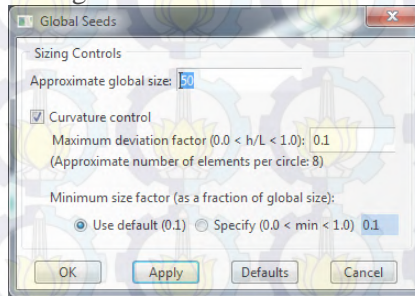
Gambar 5.15 Pembebanan

5.1.6. Mesh

Setiap part yang terdapat pada struktur harus dibagi menjadi bagian – bagian kecil – kecil. Hal ini

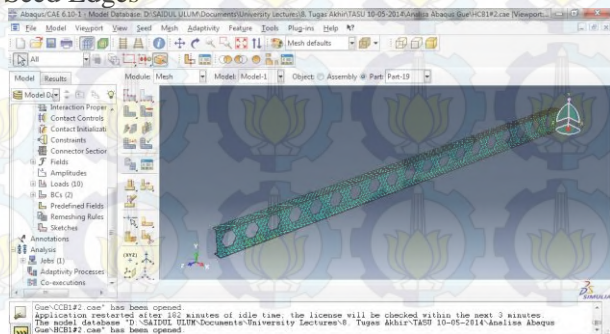
berfungsi untuk menganalisa setiap elemen portal lebih mendalam seperti terlihat pada Gambar 5.14.

- Seed Part
Approximate global size = 50



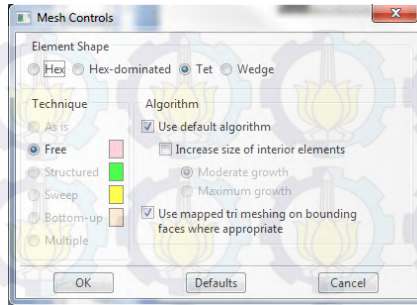
Gambar 5.16 Seed Part

- Seed Edges



Gambar 5.17 Seed Edges

- Assign Mesh Controls



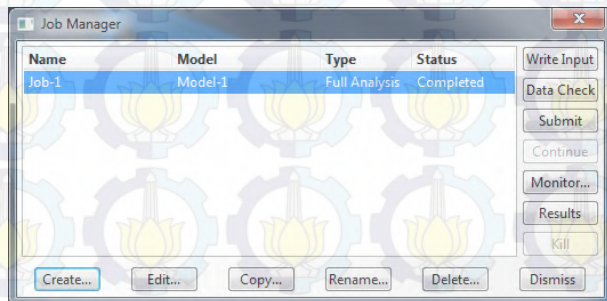
Gambar 5.18 Assign Mesh Controls

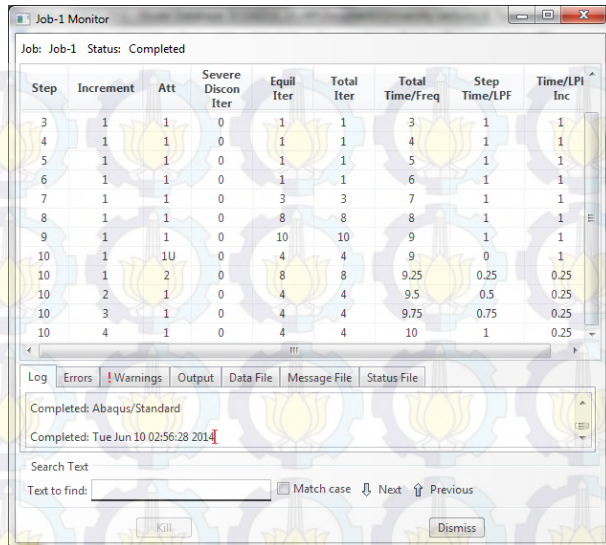
5.1.7. Job

Untuk Mengetahui output elemen, kita harus menganalisanya terlebih dahulu dengan urutan :

- Create
- Submit
- Monitor
- Result

Dapat dilihat pada Gambar 5.19





Job: Job-1 Status: Completed

| Step | Increment | Att | Severe Discon Iter | Equil Iter | Total Iter | Total Time/Freq | Step Time/LPF | Time/LPI Inc |
|------|-----------|-----|--------------------|------------|------------|-----------------|---------------|--------------|
| 3 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4 | 1 | 1 |
| 5 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 5 | 1 | 1 |
| 6 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 6 | 1 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 0 | 3 | 3 | 7 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 0 | 8 | 8 | 8 | 1 | 1 |
| 9 | 1 | 1 | 0 | 10 | 10 | 9 | 1 | 1 |
| 10 | 1 | 1U | 0 | 4 | 4 | 9 | 0 | 1 |
| 10 | 1 | 2 | 0 | 8 | 8 | 9.25 | 0.25 | 0.25 |
| 10 | 2 | 1 | 0 | 4 | 4 | 9.5 | 0.5 | 0.25 |
| 10 | 3 | 1 | 0 | 4 | 4 | 9.75 | 0.75 | 0.25 |
| 10 | 4 | 1 | 0 | 4 | 4 | 10 | 1 | 0.25 |

Log Errors Warnings Output Data File Message File Status File

Completed: Abaqus/Standard
 Completed: Tue Jun 10 02:56:28 2014

Search Text
 Text to find: Match case

Gambar 5.19 Job

Perlu diketahui, untuk balok dengan bukaan circular langkah pengerjaannya sama dengan balok bukaan hexagonal, hanya saja berbeda pada saat membuat objek bukaan, yaitu bentuknya bulat bukan hexagonal.

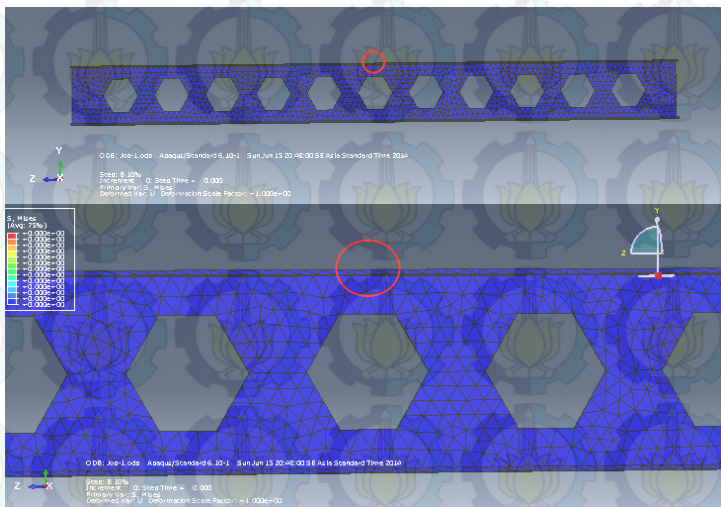
BAB VI PERBANDINGAN HASIL ANALISA

6.1. Hasil Output Program Abaqus 6.10

Dari benda uji berupa 3 jenis Balok IWF Castellated Beam dengan dua bukaan hexagonal dan circular, kemudian dilakukan analisa menggunakan program FEA untuk mendapatkan nilai tegangan dan defleksinya.

Pada Castellated Beam nilai tegangan dan defleksi dapat dilihat pada sumbu local pada elemen tersebut. Warna pada elemen menunjukkan tegangan yang terjadi pada elemen tersebut. Semakin warna merah maka menunjukkan bahwa displacement, tegangan yang terjadi semakin besar.

Untuk titik peninjau keruntuhan diambil pada tengah bentang diatas lubang kastelasi, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



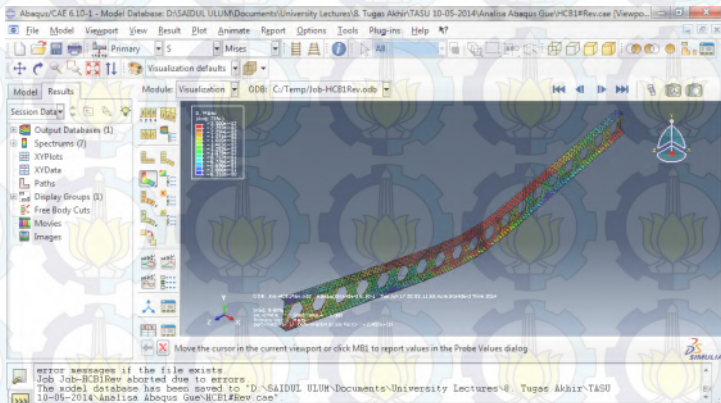


Gambar 6.1 Titik Pengambilan Sampel Keruntuhan

Dari program FEA, output yang dihasilkan berupa tegangan (S33) dan defleksi (U), khusus untuk defleksi akan ditinjau pada sumbu y (U2), karena pada sumbu y diasumsikan akan mendapat pengaruh yang paling besar terhadap q (beban).

6.1.1. Analisa Tegangan dan Defleksi

1) Sampel HCB1 Vs CCB1 HCB1

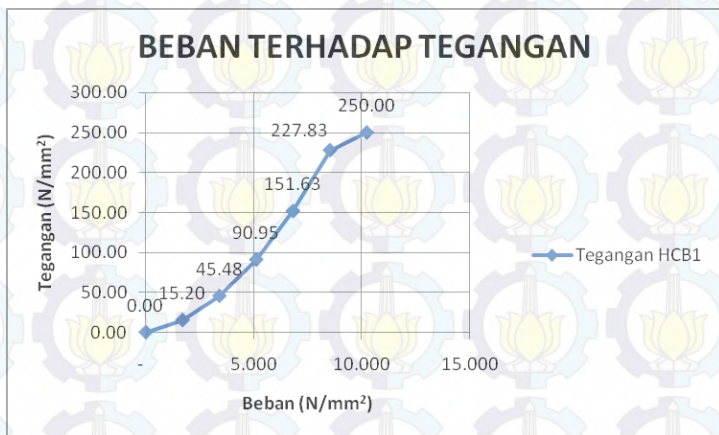


Gambar 6.2 Model Keruntuhan Sampel HCB1

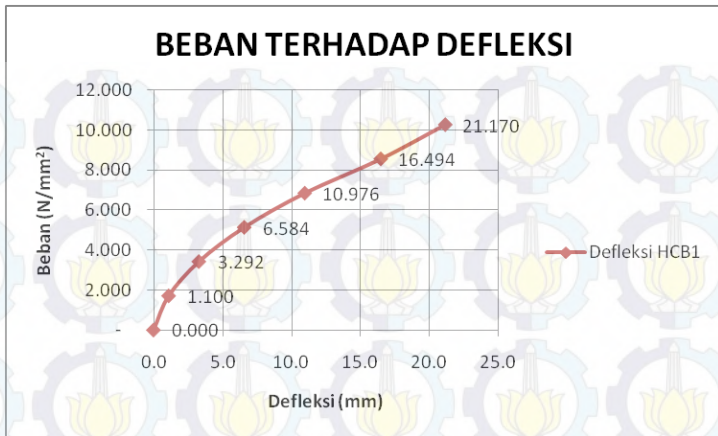
Tabel 6.1 Nilai Tegangan dan Defleksi Sampel HCB1

| No | Persentase Pembebanan | q (N/mm ²) | Element ID | Node | Type | Tegangan | Defleksi |
|----|-----------------------|------------------------|------------|------|------|----------|----------|
| 1 | 0% | - | 9142 | 2928 | C3D4 | 0.00 | 0.000 |
| 2 | 10% | 1.708 | 9142 | 2928 | C3D4 | 15.20 | 1.100 |
| 3 | 20% | 3.416 | 9142 | 2928 | C3D4 | 45.48 | 3.292 |
| 4 | 30% | 5.125 | 9142 | 2928 | C3D4 | 90.95 | 6.584 |
| 5 | 40% | 6.833 | 9142 | 2928 | C3D4 | 151.63 | 10.976 |
| 6 | 50% | 8.541 | 9142 | 2928 | C3D4 | 227.83 | 16.494 |
| 7 | 60% | 10.249 | 9142 | 2928 | C3D4 | 250.00 | 21.170 |

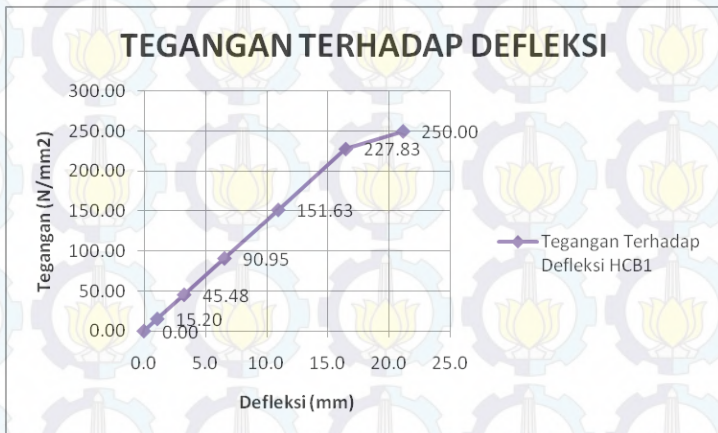
Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa balok runtuh pada $q = 10,249 \text{ N/mm}^2$ dengan nilai defleksi 21,170 mm. Untuk grafik tegangan dan defleksi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6.3 Grafik Beban terhadap Nilai Tegangan

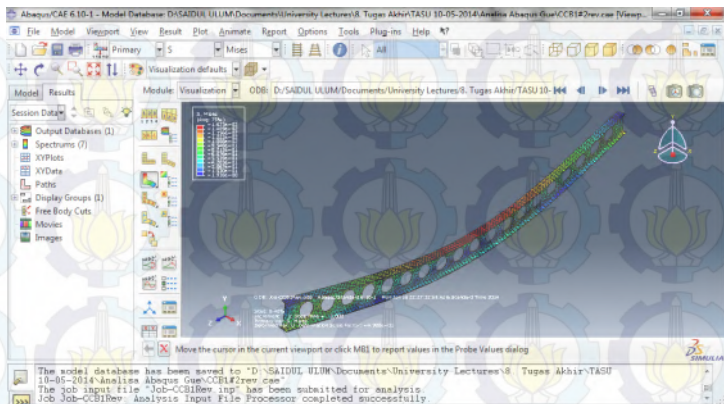


Gambar 6.4 Grafik Beban terhadap Nilai Defleksi



Gambar 6.5 Grafik Nilai Tegangan terhadap Nilai Defleksi

CCB1

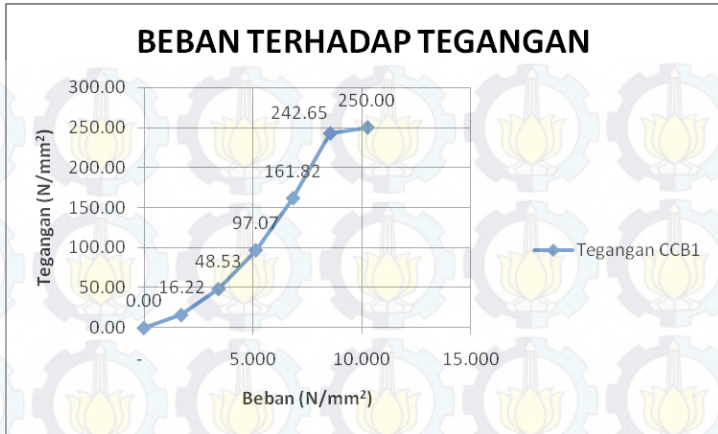


Gambar 6.6 Model Keruntuhan Sampel CCB1

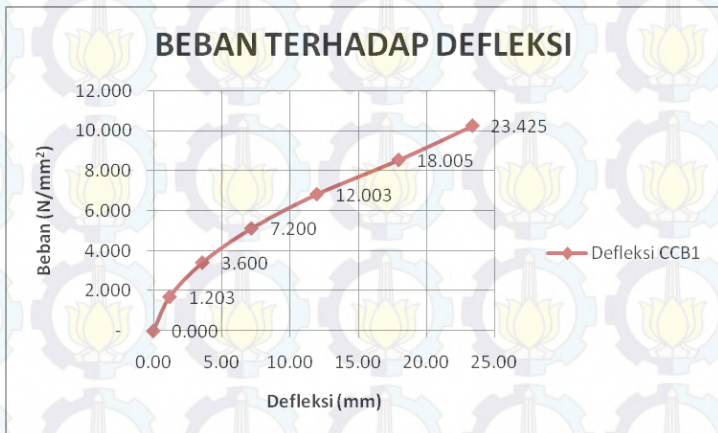
Tabel 6.2 Nilai Tegangan dan Defleksi Sampel CCB1

| No | Persentase Pembebanan | q (N/mm ²) | Element ID | Node | Type | Tegangan | Defleksi |
|----|-----------------------|------------------------|------------|------|------|----------|----------|
| 1 | 0% | - | 4735 | 3064 | C3D4 | 0.00 | 0.000 |
| 2 | 10% | 1.708 | 4735 | 3064 | C3D4 | 16.22 | 1.203 |
| 3 | 20% | 3.416 | 4735 | 3064 | C3D4 | 48.53 | 3.600 |
| 4 | 30% | 5.125 | 4735 | 3064 | C3D4 | 97.07 | 7.200 |
| 5 | 40% | 6.833 | 4735 | 3064 | C3D4 | 161.82 | 12.003 |
| 6 | 50% | 8.541 | 4735 | 3064 | C3D4 | 242.65 | 18.005 |
| 7 | 60% | 10.249 | 4735 | 3064 | C3D4 | 250.00 | 23.425 |

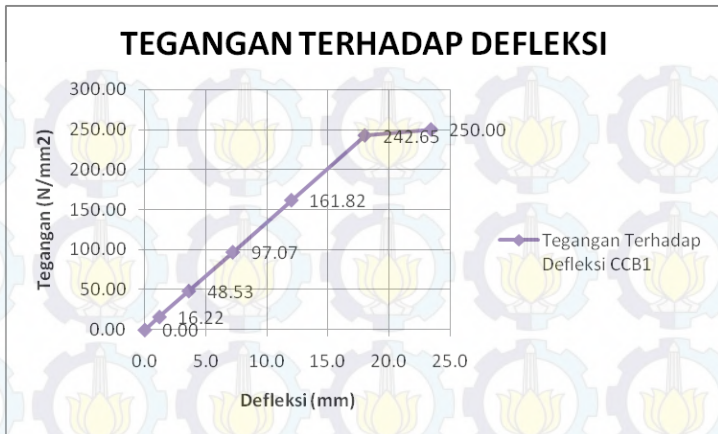
Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa balok runtuh pada $q = 10,249 \text{ N/mm}^2$ dengan nilai defleksi 23,425 mm. Untuk grafik tegangan dan defleksi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6.7 Grafik Beban terhadap Nilai Tegangan

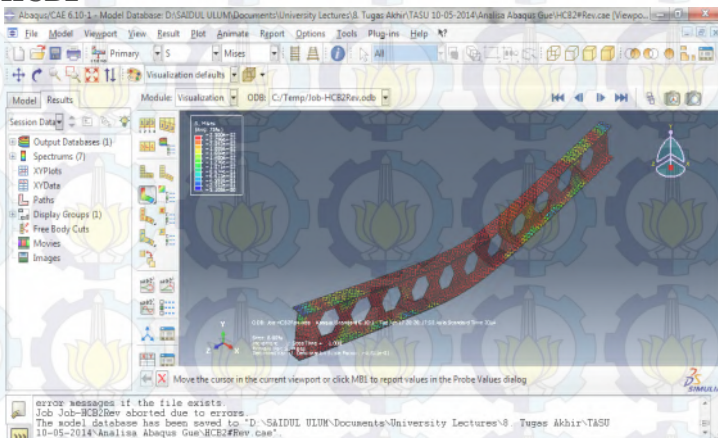


Gambar 6.8 Grafik Beban terhadap Nilai Defleksi



Gambar 6.9 Grafik Nilai Tegangan terhadap Nilai Defleksi

2) Sampel HCB2 Vs CCB2 HCB2

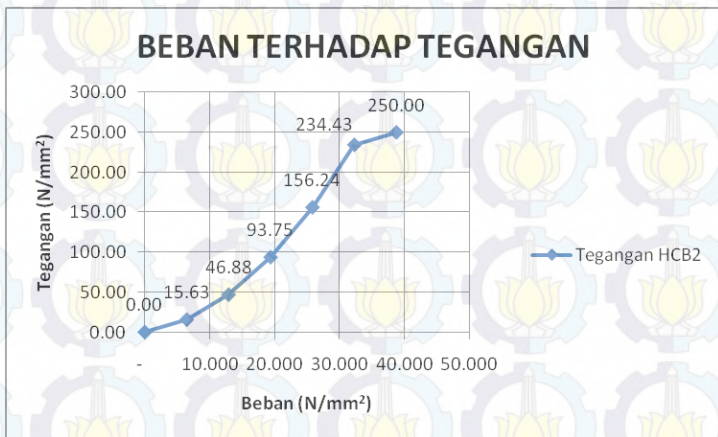


Gambar 6.10 Model Keruntuhan Sampel HCB2

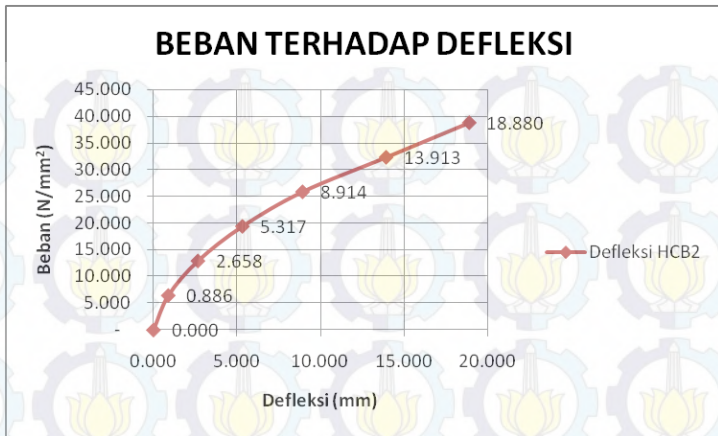
Tabel 6.3 Nilai Tegangan dan Defleksi Sampel HCB2

| No | Persentase Pembebanan | q (N/mm ²) | Element ID | Node | Type | Tegangan | Defleksi |
|----|-----------------------|------------------------|------------|------|------|----------|----------|
| 1 | 0% | - | 11216 | 4531 | C3D4 | 0.00 | 0.000 |
| 2 | 10% | 6.462 | 11216 | 4531 | C3D4 | 15.63 | 0.886 |
| 3 | 20% | 12.924 | 11216 | 4531 | C3D4 | 46.88 | 2.658 |
| 4 | 30% | 19.387 | 11216 | 4531 | C3D4 | 93.75 | 5.317 |
| 5 | 40% | 25.849 | 11216 | 4531 | C3D4 | 156.24 | 8.914 |
| 6 | 50% | 32.311 | 11216 | 4531 | C3D4 | 234.43 | 13.913 |
| 7 | 60% | 38.773 | 11216 | 4531 | C3D4 | 250.00 | 18.880 |

Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa balok runtuh pada $q = 38,773 \text{ N/mm}^2$ dengan nilai defleksi 18,880 mm. Untuk grafik tegangan dan defleksi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6.11 Grafik Beban terhadap Nilai Tegangan

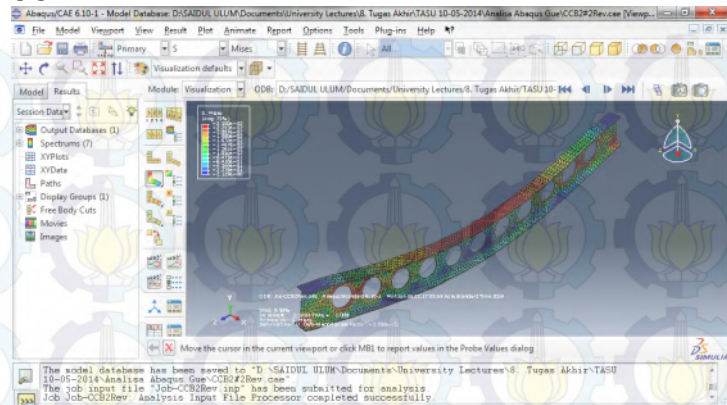


Gambar 6.12 Grafik Beban terhadap Nilai Defleksi



Gambar 6.13 Grafik Nilai Tegangan terhadap Nilai Defleksi

CCB2

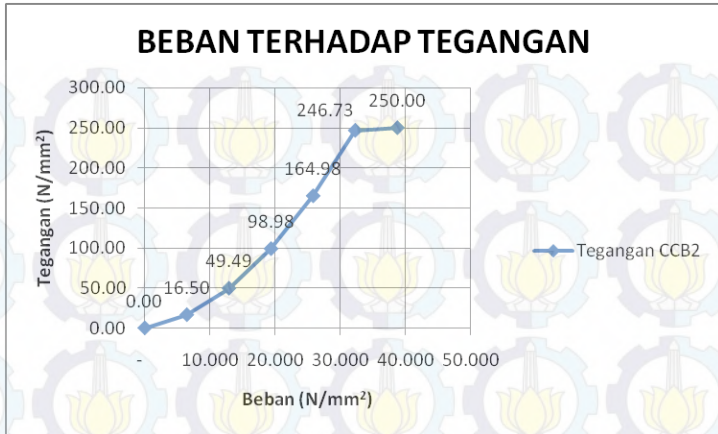


Gambar 6.14 Model Keruntuhan Sampel CCB2

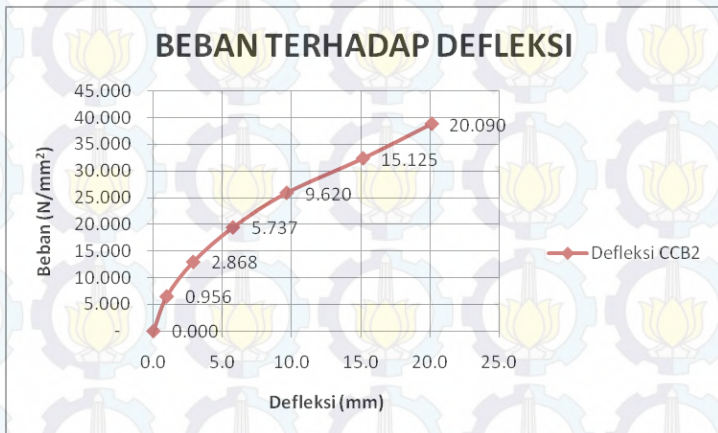
Tabel 6.4 Nilai Tegangan dan Defleksi Sampel CCB2

| No | Persentase Pembebanan | q (N/mm ²) | Element ID | Node | Type | tegangan | Defleksi |
|----|-----------------------|------------------------|------------|------|------|----------|----------|
| 1 | 0% | - | 76 | 4330 | C3D4 | 0.00 | 0.000 |
| 2 | 10% | 6.462 | 76 | 4330 | C3D4 | 16.50 | 0.956 |
| 3 | 20% | 12.924 | 76 | 4330 | C3D4 | 49.49 | 2.868 |
| 4 | 30% | 19.387 | 76 | 4330 | C3D4 | 98.98 | 5.737 |
| 5 | 40% | 25.849 | 76 | 4330 | C3D4 | 164.98 | 9.620 |
| 6 | 50% | 32.311 | 76 | 4330 | C3D4 | 246.73 | 15.125 |
| 7 | 60% | 38.773 | 76 | 4330 | C3D4 | 250.00 | 20.090 |

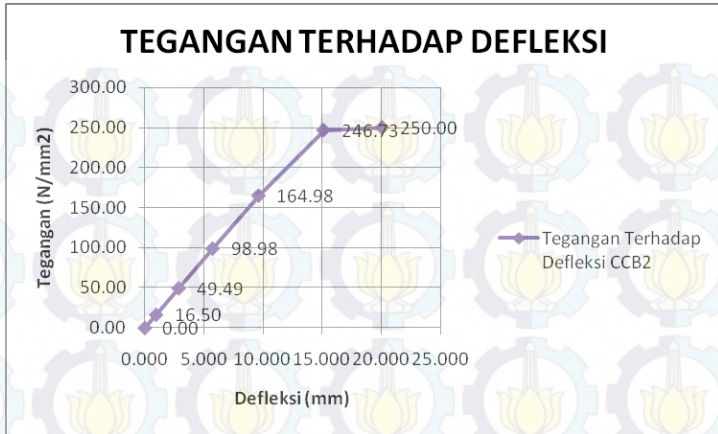
Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa balok runtuh pada $q = 38,773 \text{ N/mm}^2$ dengan nilai defleksi 20,090 mm. Untuk grafik tegangan dan defleksi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6.15 Grafik Beban terhadap Nilai Tegangan

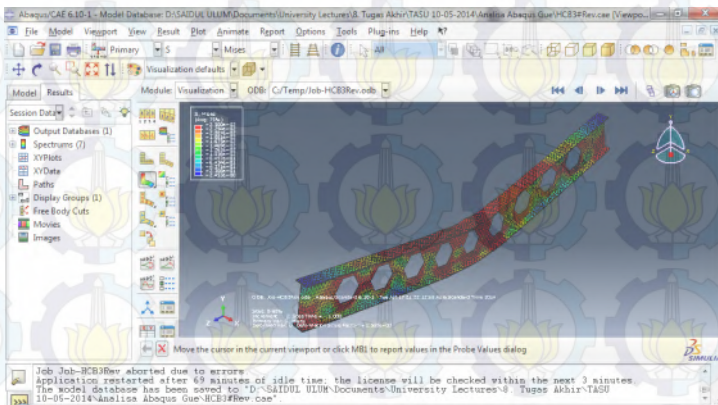


Gambar 6.16 Grafik Beban terhadap Nilai Defleksi



Gambar 6.17 Grafik Nilai Tegangan terhadap Nilai Defleksi

3) Sampel HCB3 Vs CCB3 HCB3

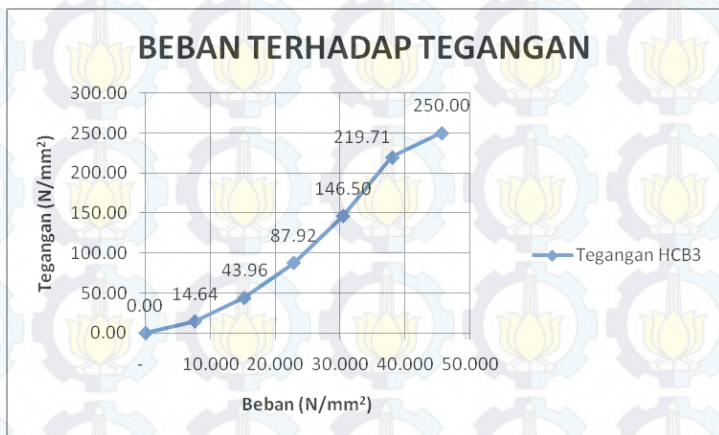


Gambar 6.18 Model Keruntuhan Sampel HCB3

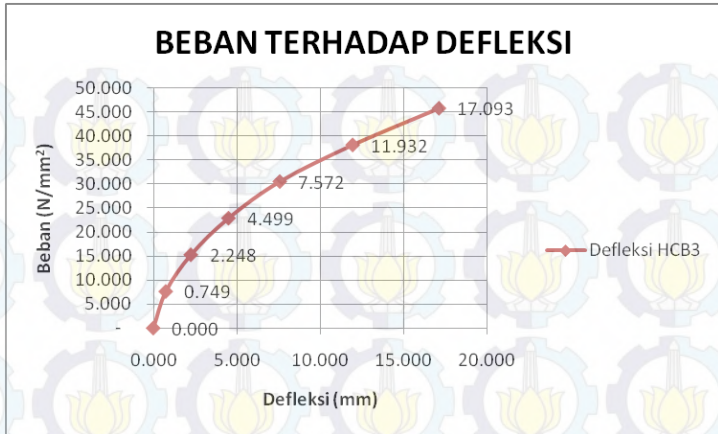
Tabel 6.5 Nilai Tegangan dan Defleksi Sampel HCB3

| No | Persentase Pembebanan | q (N/mm ²) | Element ID | Node | Type | tegangan | Defleksi |
|----|-----------------------|------------------------|------------|------|------|----------|----------|
| 1 | 0% | - | 115 | 4831 | C3D4 | 0.00 | 0.000 |
| 2 | 10% | 7.625 | 115 | 4831 | C3D4 | 14.64 | 0.749 |
| 3 | 20% | 15.250 | 115 | 4831 | C3D4 | 43.96 | 2.248 |
| 4 | 30% | 22.875 | 115 | 4831 | C3D4 | 87.92 | 4.499 |
| 5 | 40% | 30.500 | 115 | 4831 | C3D4 | 146.50 | 7.572 |
| 6 | 50% | 38.125 | 115 | 4831 | C3D4 | 219.71 | 11.932 |
| 7 | 60% | 45.750 | 115 | 4831 | C3D4 | 250.00 | 17.093 |

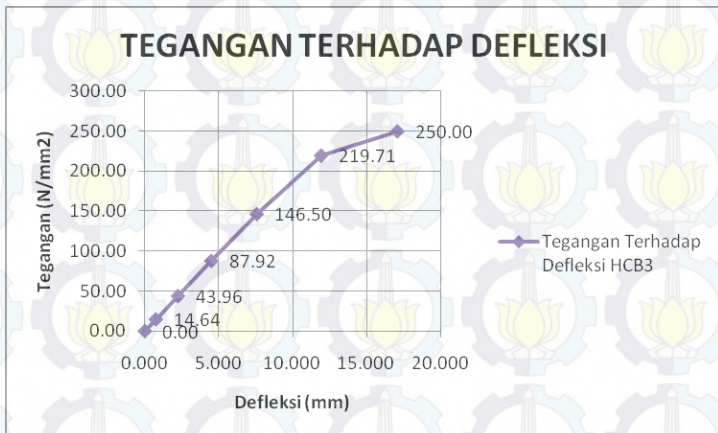
Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa balok runtuh pada $q = 45,750 \text{ N/mm}^2$ dengan nilai defleksi 17,093 mm. Untuk grafik tegangan dan defleksi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6.19 Grafik Beban terhadap Nilai Tegangan

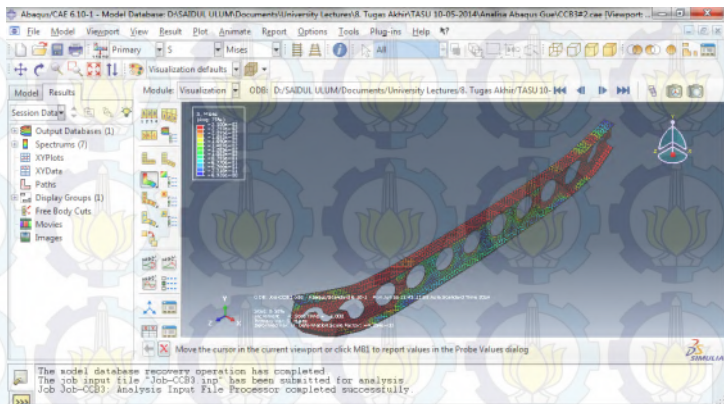


Gambar 6.20 Grafik Beban terhadap Nilai Defleksi



Gambar 6.21 Grafik Nilai Tegangan terhadap Nilai Defleksi

CCB3

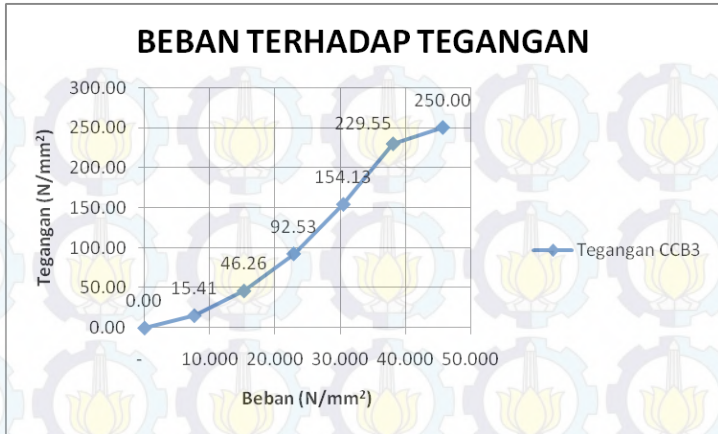


Gambar 6.22 Model Keruntuhan Sampel CCB3

Tabel 6.6 Nilai Tegangan dan Defleksi Sampel CCB3

| No | Persentase Pembebanan | q (N/mm ²) | Element ID | Node | Type | tegangan | Defleksi |
|----|-----------------------|------------------------|------------|------|------|----------|----------|
| 1 | 0% | - | 2481 | 4578 | C3D4 | 0.00 | 0.000 |
| 2 | 10% | 7.625 | 2481 | 4578 | C3D4 | 15.41 | 0.896 |
| 3 | 20% | 15.250 | 2481 | 4578 | C3D4 | 46.26 | 2.691 |
| 4 | 30% | 22.875 | 2481 | 4578 | C3D4 | 92.53 | 5.384 |
| 5 | 40% | 30.500 | 2481 | 4578 | C3D4 | 154.13 | 9.139 |
| 6 | 50% | 38.125 | 2481 | 4578 | C3D4 | 229.55 | 12.357 |
| 7 | 60% | 45.750 | 2481 | 4578 | C3D4 | 250.00 | 18.560 |

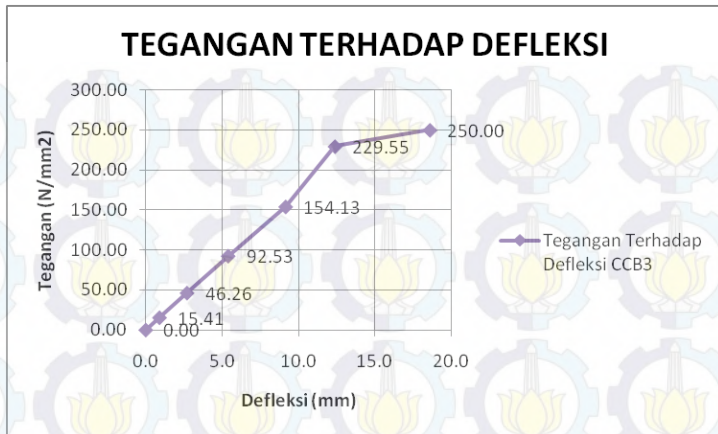
Dari tabel di atas dapat disimpulkan bahwa balok runtuh pada $q = 45,750 \text{ N/mm}^2$ dengan nilai defleksi 18,560 mm. Untuk grafik tegangan dan defleksi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6.23 Grafik Beban terhadap Nilai Tegangan



Gambar 6.24 Grafik Beban terhadap Nilai Defleksi



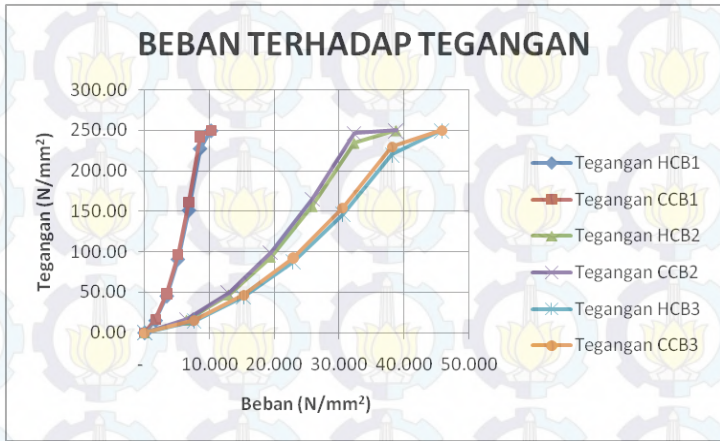
Gambar 6.25 Grafik Nilai Tegangan terhadap Nilai Defleksi

6.2. Perbandingan Tegangan dan Defleksi 3 Sampel Uji

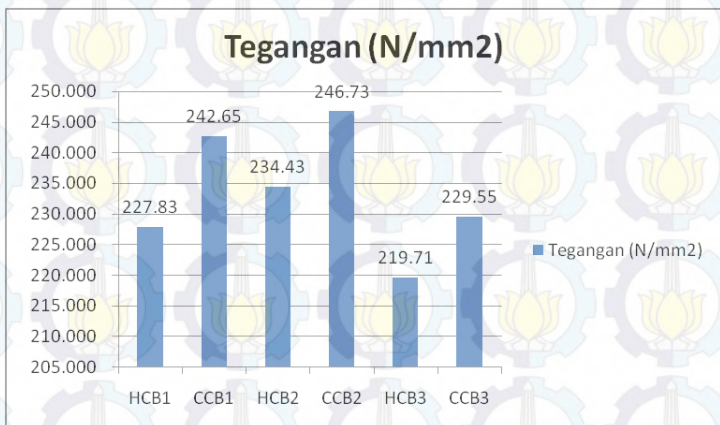
Tabel 6. Nilai Tegangan dan Defleksi Semua Sampel

| No | Sampel | Tegangan (N/mm ²) | Perbedaan (%) | Defleksi (mm) | Perbedaan (%) |
|-------------|--------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | HCB1 | 227.829 | 6.109 | 21.170 | 9.630 |
| 2 | CCB1 | 242.652 | | 23.425 | |
| 3 | HCB2 | 234.434 | 4.982 | 18.880 | 6.023 |
| 4 | CCB2 | 246.725 | | 20.090 | |
| 5 | HCB3 | 219.710 | 4.287 | 17.093 | 7.904 |
| 6 | CCB3 | 229.551 | | 18.560 | |
| Rata - rata | | | 5.126 | | 7.852 |

Tegangan

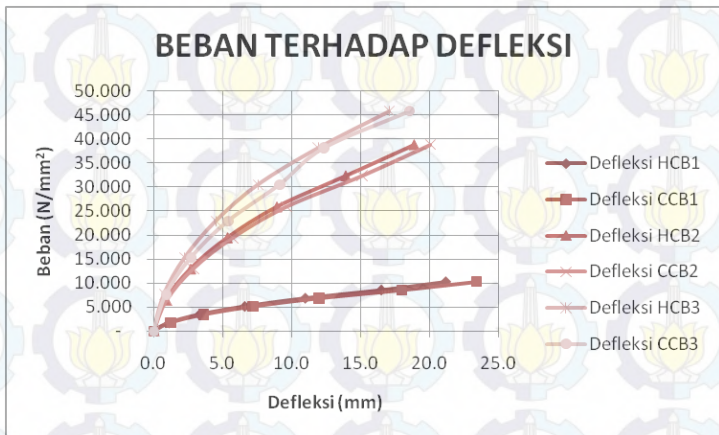


Gambar 6.26 Grafik Beban terhadap Nilai Tegangan untuk Semua Sampel

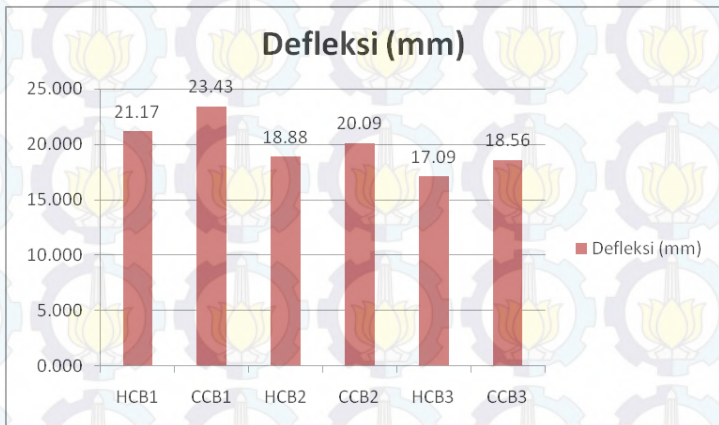


Gambar 6.27 Nilai Tegangan untuk Semua Sampel

Defleksi

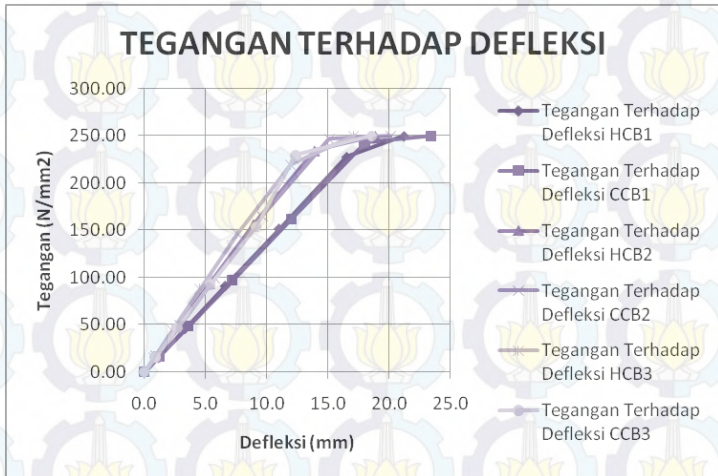


Gambar 6.28 Grafik Beban terhadap Nilai Defleksi untuk Semua Sampel

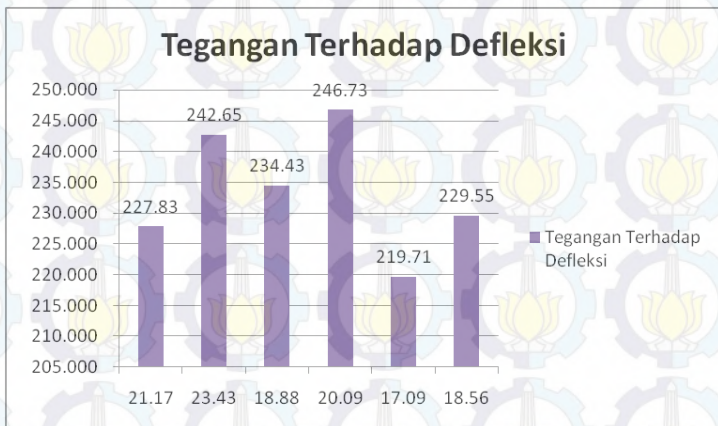


Gambar 6.29 Nilai Defleksi untuk Semua Sampel

Tegangan Terhadap Defleksi



Gambar 6.30 Grafik Nilai Tegangan terhadap Nilai Defleksi untuk Semua Sampel



Gambar 6.31 Nilai Tegangan terhadap Defleksi untuk Semua Sampel

BAB VII

ANALISA KERUNTUHAN DENGAN RUMUS EMPIRIS

7.1. Analisa Tegangan

Dapat dikatakan saat balok baik web solid maupun castellated beam mengalami leleh atau runtuh di tengah bentang tepat pada lubang kastelasinya. Secara teoritik di tengah bentang akan mencapai tegangan awal yaitu sebesar 250 MPa, namun sebelum baja leleh. Pada titik tersebut tentunya akan menunjukkan tegangan maksimal tertentu. Tegangan tersebutlah yang akan dicari dengan rumus empiris lalu dibandingkan dengan hasil FEA

Keterangan :

σ : Tegangan

M : Momen yang bekerja pada profil kastela

y : jarak dari sumbu netral ($h/2$)

Balok HCB1

Data :

$h = dg = 350 \text{ mm}$

$I_x = 82177990 \text{ mm}^4$

$M = 84740250 \text{ Nmm}$

$f_y = 250 \text{ Mpa}$

} Data hasil control property
pada bab IV

$$\sigma = \frac{M \cdot \frac{h}{2}}{I} = \frac{84740250 \times \frac{350}{2}}{82177990} = 180,46 \text{ N/mm}^2$$

Perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada tabel 7.1

Tabel 7.1 Perhitungan Tegangan Castellated Beam

| Sampel | d_g (mm) | $I_{x\text{rata-rata}}$ (mm^4) | $I_{x\text{solid}}$ (mm^4) | $I_{x\text{castela}}$ (mm^4) |
|--------|---------------|--|--|--|
| HCB1 | 350.00 | 82,177,990.74 | 83,720,434.00 | 79,720,434.00 |
| HCB2 | 560.00 | 482,136,603.95 | 490,560,469.33 | 468,715,136.00 |
| HCB3 | 630.00 | 681,461,686.02 | 694,955,272.67 | 659,963,272.67 |
| CCB1 | 335.00 | 73,934,973.25 | 75,722,944.00 | 71,722,944.00 |
| CCB2 | 536.00 | 434,330,472.92 | 444,094,933.33 | 422,249,600.00 |
| CCB3 | 603.00 | 612,722,111.70 | 628,362,897.92 | 593,370,897.92 |

| f_y (Mpa) | M_n (N/mm) | σ rata-rata (N/mm^2) | σ solid (N/mm^2) | σ castela (N/mm^2) |
|----------------|-----------------|--|--|--|
| 250 | 84,740,250.00 | 180.46 | 177.13 | 186.02 |
| 250 | 318,928,000.00 | 185.22 | 182.04 | 190.52 |
| 250 | 379,902,250.00 | 175.61 | 172.20 | 181.33 |
| 250 | 84,740,250.00 | 191.98 | 187.45 | 197.90 |
| 250 | 318,928,000.00 | 196.79 | 192.46 | 202.42 |
| 250 | 379,902,250.00 | 186.94 | 182.28 | 193.03 |

Untuk tegangan sebelum leleh pada hasil FEA digunakan tegangan max.

Tabel 7.2 Perbandingan tegangan rumus empiris dan hasil FEA

| Sampel | σ Empiris rata-rata (N/mm^2) | σ Empiris solid (N/mm^2) | σ Empiris castela (N/mm^2) | σ FEA (N/mm^2) |
|--------|--|--|--|--|
| HCB1 | 180.46 | 177.13 | 186.02 | 227.83 |
| HCB2 | 185.22 | 182.04 | 190.52 | 234.43 |
| HCB3 | 175.61 | 172.20 | 181.33 | 219.71 |
| CCB1 | 191.98 | 187.45 | 197.90 | 242.65 |
| CCB2 | 196.79 | 192.46 | 202.42 | 246.73 |
| CCB3 | 186.94 | 182.28 | 193.03 | 229.55 |

Untuk sampel tegangan sebelum runtuh yang terjadi pada FEA dan rumus empiris terjadi perbedaan, karena pada FEA, elemen dianalisa dengan program finite elemen sehingga tiap elemen dipecah menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Hal itu membuat output tegangan elemen akan dianalisa lebih detail sehingga membuat hasilnya lebih besar dari pada rumus empiris.

7.2. Analisa Defleksi

Sampel HCB1

$$\Delta = \frac{5qL^4}{384EI}$$

$$\Delta = \frac{5 \times 17,082 \times 6000^3}{384 \times 2.10^5 \times 8.21 \times 10^7} = 17,539 \text{ mm}$$

Tabel 7.3 Perhitungan Defleksi

| Sampel | L (mm) | q (N/mm) | I _x rata-rata (mm ⁴) | I _x solid (mm ⁴) |
|--------|-------------|---------------|---|---|
| HCB1 | 6000 | 17.082 | 82,177,990.74 | 83,720,434.00 |
| HCB2 | 6000 | 64.622 | 482,136,603.95 | 490,560,469.33 |
| HCB3 | 6000 | 76.250 | 681,461,686.02 | 694,955,272.67 |
| CCB1 | 6000 | 17.082 | 73,934,973.25 | 75,722,944.00 |
| CCB2 | 6000 | 64.622 | 434,330,472.92 | 444,094,933.33 |
| CCB3 | 6000 | 76.250 | 612,722,111.70 | 628,362,897.92 |

| $I_{xcastela}$ (mm^4) | f rata-rata (mm) | f solid (mm) | f castela (mm) | f ijin (mm) | f < f ijin |
|------------------------------|--------------------------|----------------------|------------------------|------------------|------------|
| 79,720,434.00 | 17.539 | 17.216 | 18.080 | 25 | ok |
| 468,715,136.00 | 11.309 | 11.115 | 11.633 | 25 | ok |
| 659,963,272.67 | 9.441 | 9.258 | 9.748 | 25 | ok |
| 71,722,944.00 | 19.495 | 19.034 | 20.096 | 25 | ok |
| 422,249,600.00 | 12.554 | 12.278 | 12.913 | 25 | ok |
| 593,370,897.92 | 10.500 | 10.239 | 10.842 | 25 | ok |

Tabel 7.4 Perbandingan defleksi rumus empiris dan FEA

| Sampel | Lb (mm) | f rata-rata empiris (mm) | f solid empiris (mm) | f castela empiris (mm) | f FEA (mm) |
|--------|--------------|----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| HCB1 | 6000 | 17.539 | 17.216 | 18.080 | 21.170 |
| HCB2 | 6000 | 11.309 | 11.115 | 11.633 | 18.880 |
| HCB3 | 6000 | 9.441 | 9.258 | 9.748 | 17.093 |
| CCB1 | 6000 | 19.495 | 19.034 | 20.096 | 23.425 |
| CCB2 | 6000 | 12.554 | 12.278 | 12.913 | 20.090 |
| CCB3 | 6000 | 10.500 | 10.239 | 10.842 | 18.560 |

Secara garis besar hasil FEA selalu lebih besar, hasil FEA lebih valid karena dalam FEA, elemen dipecah menjadi beberapa bagian lalu tiap elemen akan dianalisis oleh program.

BAB VIII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

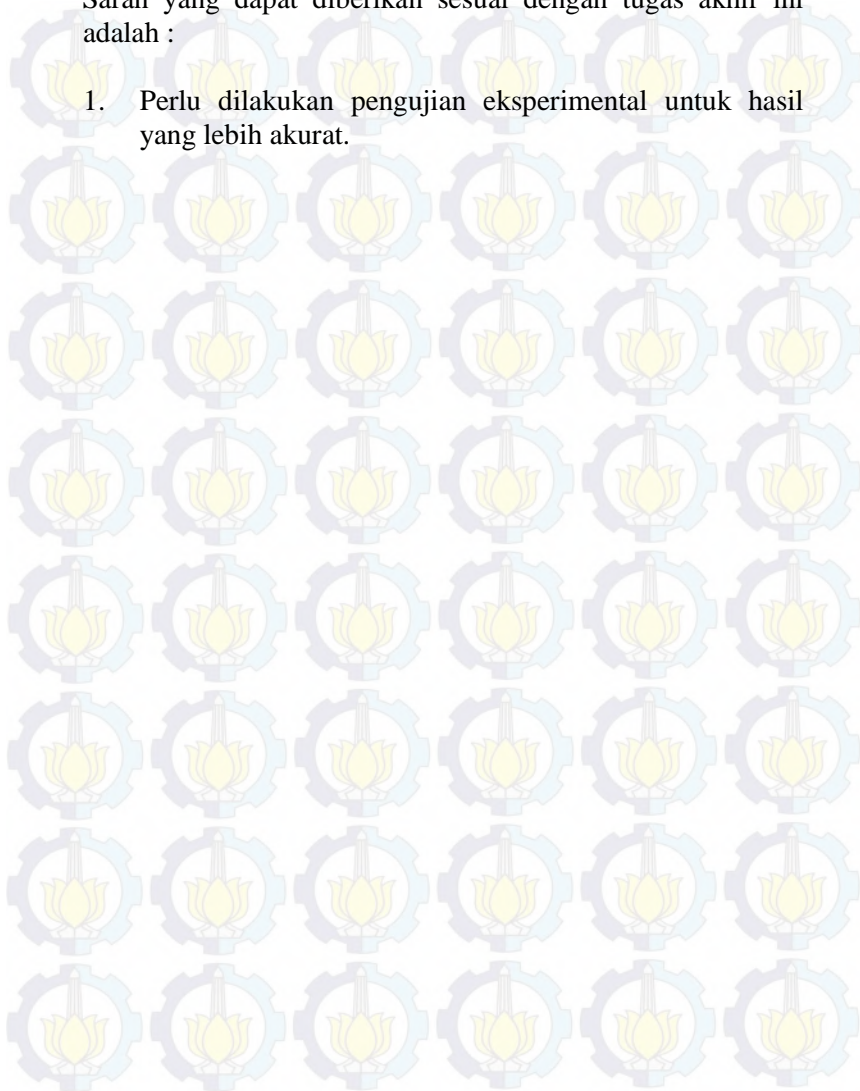
Berikut ini adalah hasil yang dapat disimpulkan berdasarkan analisa model keruntuhan profil hexagonal *castellated beam* dengan program bantu *Finite Element Analysis*.

1. Dari hasil analisa FEA, nilai tegangan pada setiap sampel *circular castellated beam* (CCB) lebih besar 5,126% dari nilai tegangan *hexagonal castellated beam* (HCB).
2. Dari hasil analisa FEA, nilai defleksi pada setiap sampel *circular castellated beam* (CCB) lebih besar 7,852% dari nilai defleksi *hexagonal castellated beam* (HCB).
3. Dari hasil analisa FEA, dapat disimpulkan dengan I_x pada sampel CCB lebih kecil dari sampel HCB, mengakibatkan defleksi dan tegangan yang lebih besar pada sampel CCB. Sehingga sampel HCB lebih kaku.
4. Pada analisa FEA membuktikan bahwa ketika penampang mengalami kelelahan, lendutan menjadi semakin besar tidak lagi linear.
5. Hasil analisa program FEA dan rumus empiris sedikit memiliki perbedaan nilai, karena pada program FEA kita melakukan *meshing* elemen sehingga analisisnya memiliki akurasi validasi nilai yang tinggi dibanding rumus empiris yang hanya menghitung per elemen tanpa melakukan *meshing*.

7.2. Saran

Saran yang dapat diberikan sesuai dengan tugas akhir ini adalah :

1. Perlu dilakukan pengujian eksperimental untuk hasil yang lebih akurat.



NILAI PEMBEBANAN CASTELLATED BEAM

HCB 1

q 17.0824 N/mm
p 0.1367 100%

| Persentase Pembebanan | p |
|-----------------------|--------|
| 10% | 0.0137 |
| 20% | 0.0273 |
| 30% | 0.0410 |
| 40% | 0.0547 |
| 50% | 0.0683 |
| 60% | 0.0820 |
| 70% | 0.0957 |
| 80% | 0.1093 |
| 90% | 0.1230 |
| 100% | 0.1367 |

HCB 2

q 64.6222 N/mm
p 0.3231 100%

| Persentase Pembebanan | p |
|-----------------------|--------|
| 10% | 0.0323 |
| 20% | 0.0646 |
| 30% | 0.0969 |
| 40% | 0.1292 |
| 50% | 0.1616 |
| 60% | 0.1939 |
| 70% | 0.2262 |
| 80% | 0.2585 |
| 90% | 0.2908 |
| 100% | 0.3231 |

HCB 3

q 76.2503 N/mm
p 0.3813 100%

| Persentase Pembebanan | p |
|-----------------------|--------|
| 10% | 0.0381 |
| 20% | 0.0763 |
| 30% | 0.1144 |
| 40% | 0.1525 |
| 50% | 0.1906 |
| 60% | 0.2288 |
| 70% | 0.2669 |
| 80% | 0.3050 |
| 90% | 0.3431 |
| 100% | 0.3813 |

CCB 1

q 17.0824 N/mm
p 0.1367 100%

| Persentase Pembebanan | p |
|-----------------------|--------|
| 10% | 0.0137 |
| 20% | 0.0273 |
| 30% | 0.0410 |
| 40% | 0.0547 |
| 50% | 0.0683 |
| 60% | 0.0820 |
| 70% | 0.0957 |
| 80% | 0.1093 |
| 90% | 0.1230 |
| 100% | 0.1367 |

CCB 2

q 64.6222 N/mm
p 0.3231 100%

| Persentase Pembebanan | p |
|-----------------------|--------|
| 10% | 0.0323 |
| 20% | 0.0646 |
| 30% | 0.0969 |
| 40% | 0.1292 |
| 50% | 0.1616 |
| 60% | 0.1939 |
| 70% | 0.2262 |
| 80% | 0.2585 |
| 90% | 0.2908 |
| 100% | 0.3231 |

CCB 3

q 76.2503 N/mm
p 0.3813 100%

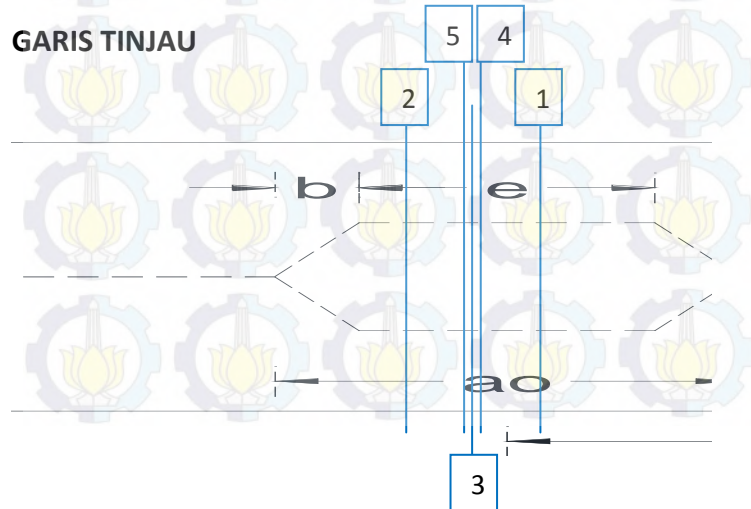
| Persentase Pembebanan | p |
|-----------------------|--------|
| 10% | 0.0381 |
| 20% | 0.0763 |
| 30% | 0.1144 |
| 40% | 0.1525 |
| 50% | 0.1906 |
| 60% | 0.2288 |
| 70% | 0.2669 |
| 80% | 0.3050 |
| 90% | 0.3431 |
| 100% | 0.3813 |

NILAI Ix BALOK HCB

| GARIS TINJAU | TINGGI LUBANG TINJAUAN (mm) | | | NILAI Ix (mm ⁴) | | |
|---------------------------------|-----------------------------|------|------|-----------------------------|----------------|----------------|
| | HCB1 | HCB2 | HCB3 | HCB1 | HCB2 | HCB3 |
| 1 | | | | 83,720,434.00 | 490,560,469.33 | 694,955,272.67 |
| 2 | 200 | 320 | 360 | 79,720,434.00 | 468,715,136.00 | 659,963,272.67 |
| 3 | 100 | 160 | 180 | 83,220,434.00 | 487,829,802.67 | 690,581,272.67 |
| 4 | 50 | 80 | 90 | 83,657,934.00 | 490,219,136.00 | 694,408,522.67 |
| 5 | 150 | 240 | 270 | 82,032,934.00 | 481,344,469.33 | 680,193,022.67 |
| Total | | | | | | |
| Ix rata-rata (mm ⁴) | | | | | | |

| JARAK HORIZONTAL BIDANG (mm) | | | NILAI Ix (mm ⁴) | | |
|------------------------------|--------|--------|-----------------------------|----------------|----------------|
| HCB1 | HCB2 | HCB3 | HCB1 | HCB2 | HCB3 |
| 100.00 | 160.00 | 180.00 | 26,537,477.49 | 155,498,999.71 | 220,294,359.47 |
| 100.00 | 160.00 | 180.00 | 25,269,568.28 | 148,574,415.09 | 209,202,220.84 |
| 38.49 | 61.59 | 69.28 | 10,154,152.11 | 59,520,983.13 | 84,255,196.13 |
| 38.49 | 61.59 | 69.28 | 10,207,533.72 | 59,812,509.95 | 84,722,144.35 |
| 38.49 | 61.59 | 69.28 | 10,009,259.14 | 58,729,696.06 | 82,987,765.23 |
| 315.48 | 504.76 | 567.84 | 82,177,990.74 | 482,136,603.95 | 681,461,686.02 |

GARIS TINJAU

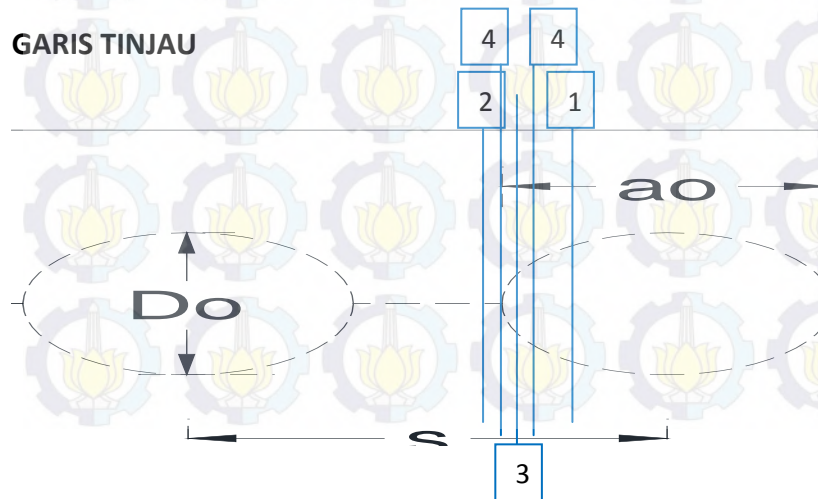


NILAI Ix BALOK CCB

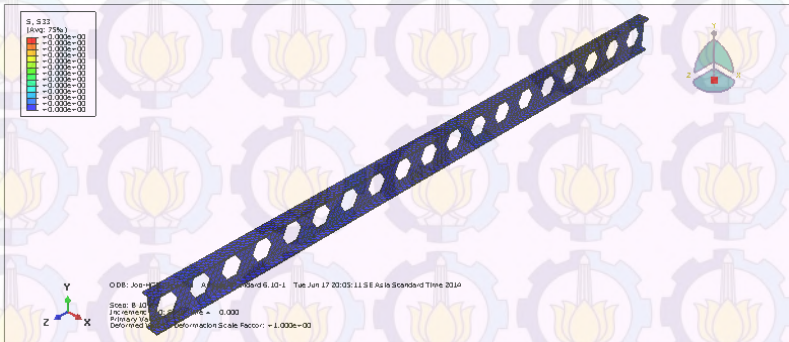
| GARIS TINJAU | TINGGI LUBANG TINJAUAN (mm) | | | NILAI Ix (mm ⁴) | | |
|---------------------------------|-----------------------------|--------|--------|-----------------------------|----------------|----------------|
| | CCB1 | CCB2 | CCB3 | CCB1 | CCB2 | CCB3 |
| 1 | | | | 75,722,944.00 | 444,094,933.33 | 628,362,897.92 |
| 2 | 200.00 | 320.00 | 360.00 | 71,722,944.00 | 422,249,600.00 | 593,370,897.92 |
| 3 | 173.21 | 277.13 | 311.77 | 75,722,944.00 | 444,094,933.33 | 628,362,897.92 |
| 4 | 132.29 | 211.66 | 238.12 | 75,722,944.00 | 444,094,933.33 | 628,362,897.92 |
| 5 | 193.65 | 309.84 | 348.57 | 75,722,944.00 | 444,094,933.33 | 628,362,897.92 |
| Total | | | | | | |
| Ix rata-rata (mm ⁴) | | | | | | |

| JARAK HORIZONTAL BIDANG (mm) | | | NILAI Ix (mm ⁴) | | |
|------------------------------|--------|--------|-----------------------------|----------------|----------------|
| CCB1 | CCB2 | CCB3 | CCB1 | CCB2 | CCB3 |
| 100.00 | 160.00 | 180.00 | 25,240,981.33 | 148,031,644.44 | 209,454,299.31 |
| 28.57 | 45.71 | 51.43 | 6,830,756.57 | 40,214,247.62 | 56,511,514.09 |
| 57.14 | 91.43 | 102.86 | 13,928,504.08 | 81,886,797.29 | 115,358,998.15 |
| 57.14 | 91.43 | 102.86 | 14,202,926.46 | 83,385,402.08 | 117,759,360.44 |
| 57.14 | 91.43 | 102.86 | 13,731,804.81 | 80,812,381.49 | 113,637,939.71 |
| 300 | 480 | 540 | 73,934,973.25 | 434,330,472.92 | 612,722,111.70 |

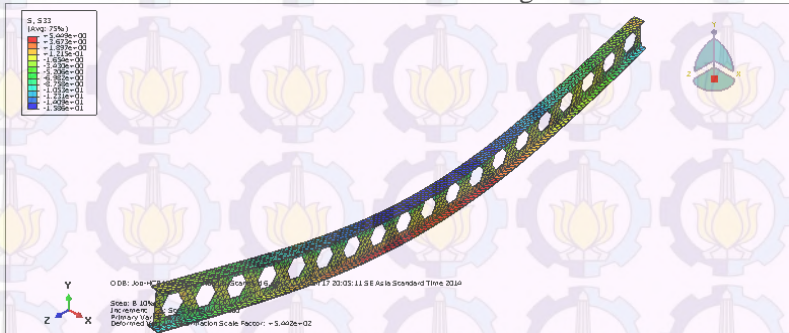
GARIS TINJAU



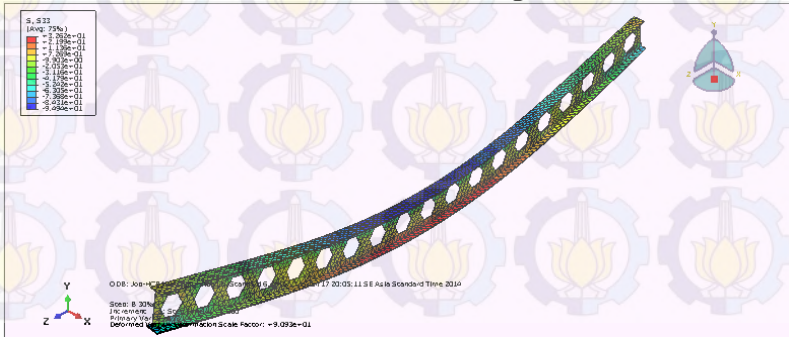
MODEL KERUNTUHAN BEAM HEXAGONAL CASTELLATED BEAM (HCB1)



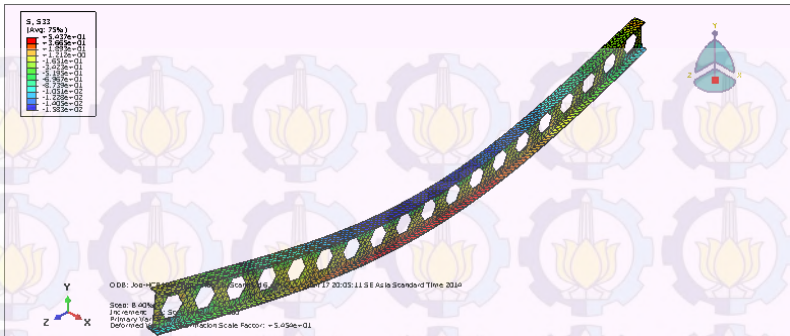
Gambar 1 Model Keruntuhan dengan P = 0%



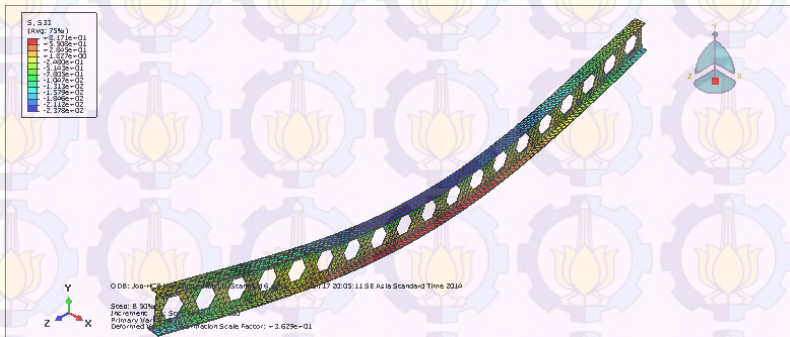
Gambar 2 Model Keruntuhan dengan P = 10%



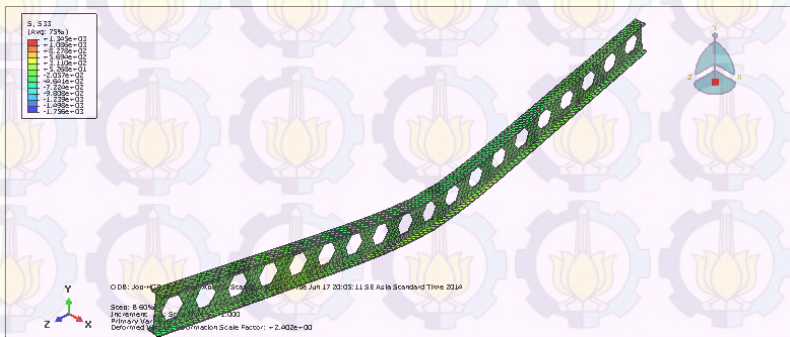
Gambar 3 Model Keruntuhan dengan P = 30%



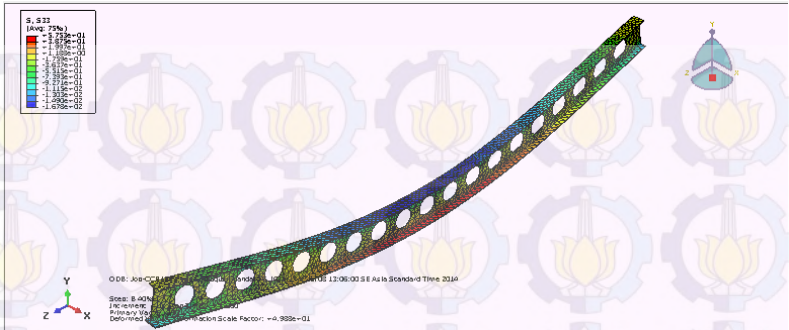
Gambar 4 Model Keruntuhan dengan P = 40%



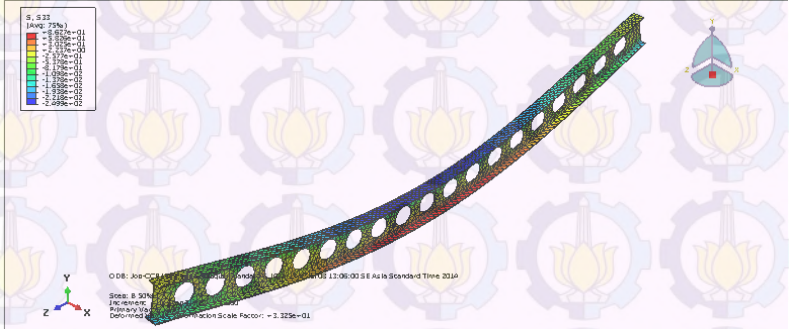
Gambar 5 Model Keruntuhan dengan P = 50%



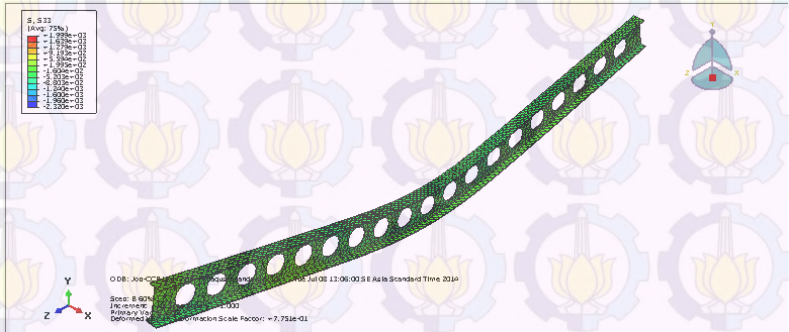
Gambar 6 Model Keruntuhan dengan P = 60%



Gambar 10 Model Keruntuhan dengan P = 40%

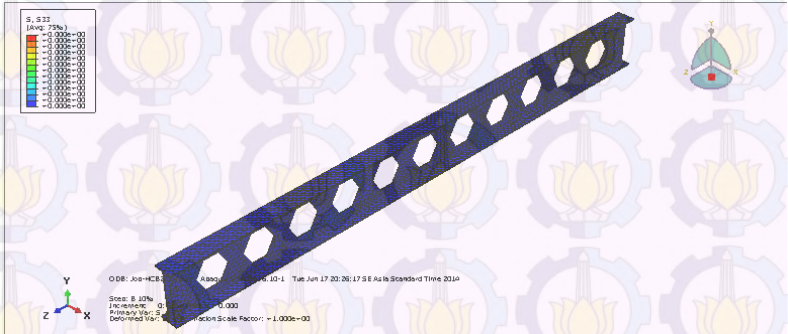


Gambar 11 Model Keruntuhan dengan P = 50%

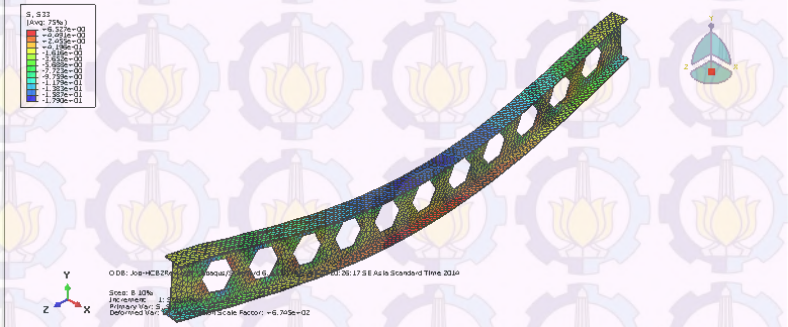


Gambar 12 Model Keruntuhan dengan P = 60%

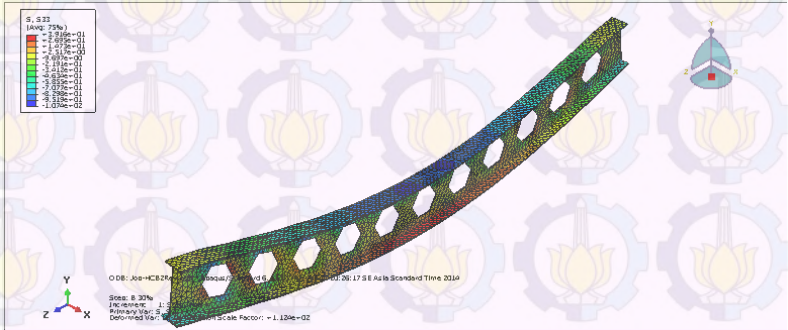
MODEL KERUNTUHAN HEXAGONAL CASTELLATED BEAM (HCB2)



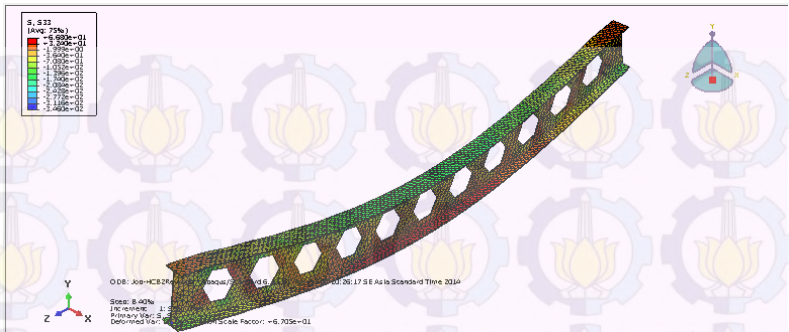
Gambar 13 Model Keruntuhan dengan $P = 0\%$



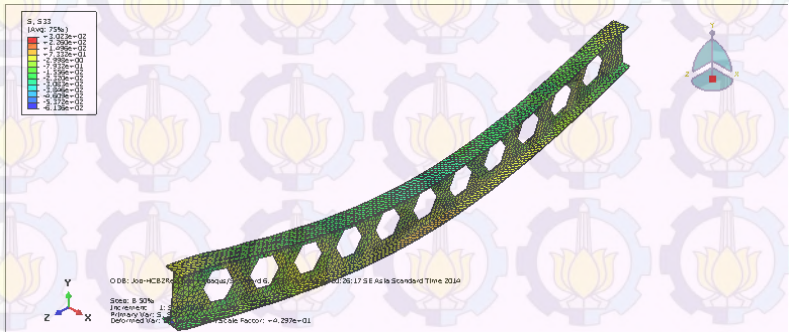
Gambar 14 Model Keruntuhan dengan $P = 10\%$



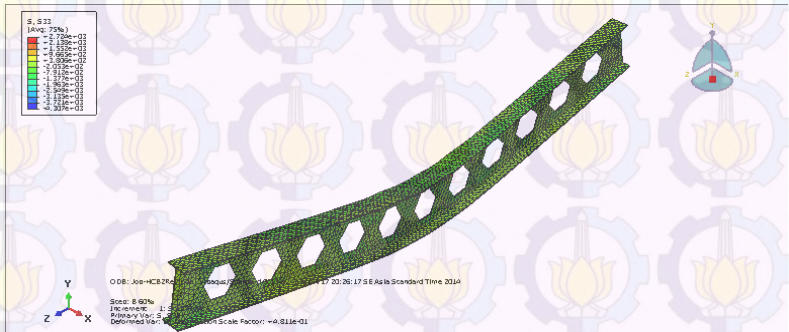
Gambar 15 Model Keruntuhan dengan $P = 30\%$



Gambar 16 Model Keruntuhan dengan P = 40%

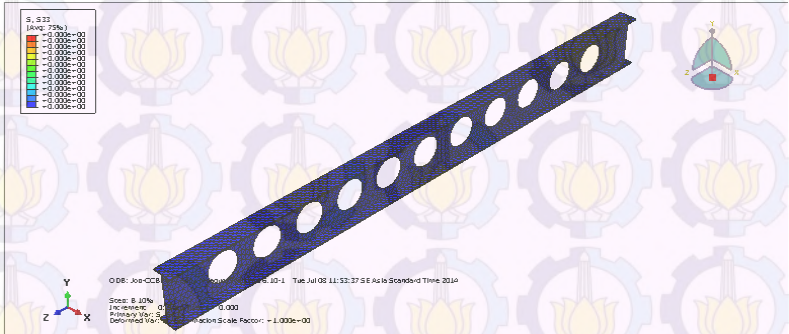


Gambar 17 Model Keruntuhan dengan P = 50%

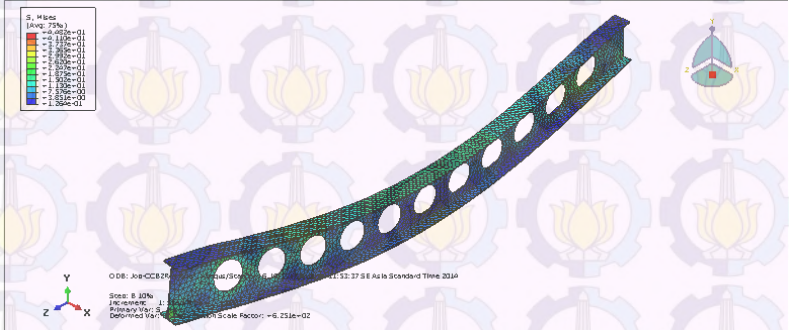


Gambar 18 Model Keruntuhan dengan P = 60%

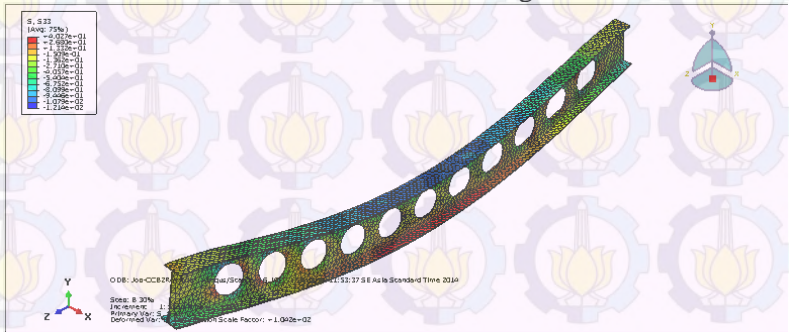
MODEL KERUNTUHAN HEXAGONAL CASTELLATED BEAM (CCB2)



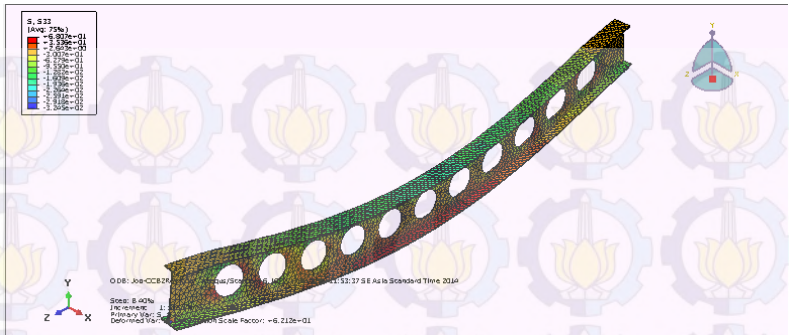
Gambar 19 Model Keruntuhan dengan $P = 0\%$



Gambar 20 Model Keruntuhan dengan $P = 10\%$



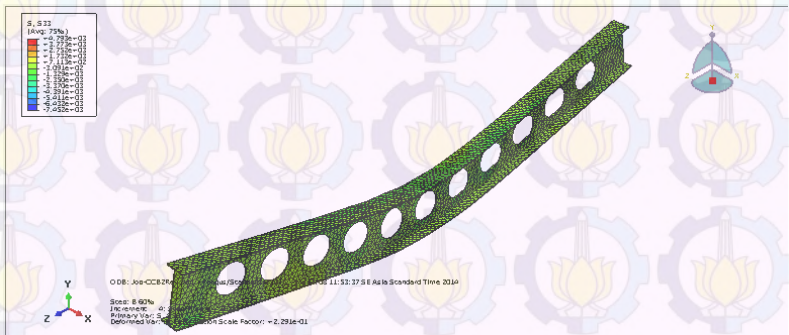
Gambar 21 Model Keruntuhan dengan $P = 30\%$



Gambar 22 Model Keruntuhan dengan P = 40%



Gambar 23 Model Keruntuhan dengan P = 50%

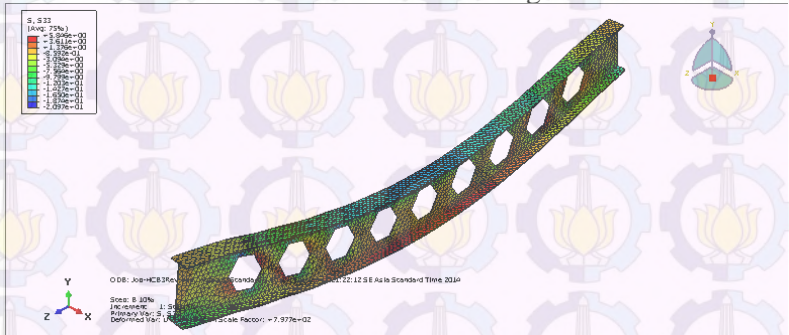


Gambar 24 Model Keruntuhan dengan P = 60%

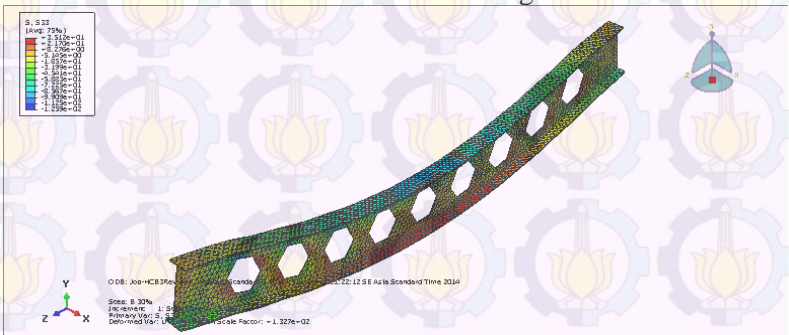
MODEL KERUNTUHAN HEXAGONAL CASTELLATED BEAM (HCB3)



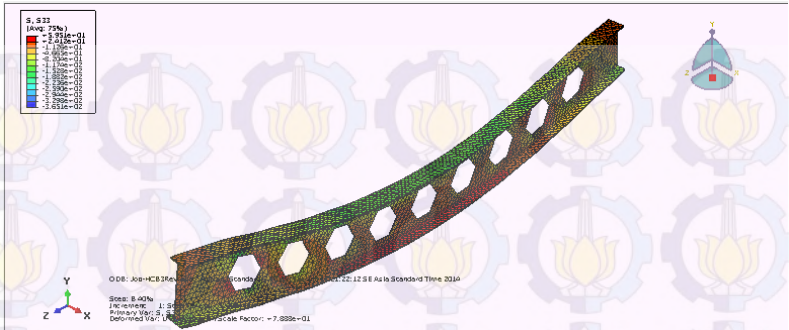
Gambar 25 Model Keruntuhan dengan $P = 0\%$



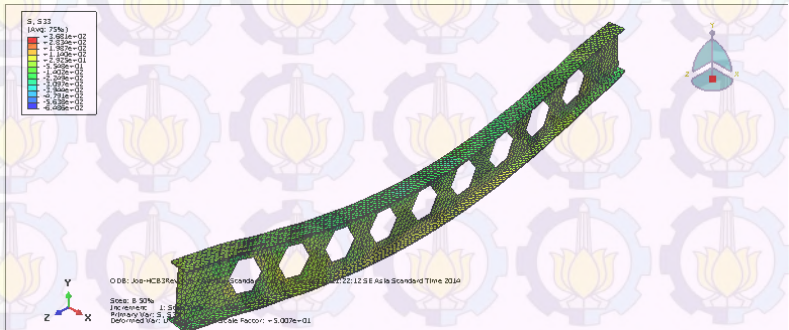
Gambar 26 Model Keruntuhan dengan $P = 10\%$



Gambar 27 Model Keruntuhan dengan $P = 30\%$



Gambar 28 Model Keruntuhan dengan P = 40%



Gambar 29 Model Keruntuhan dengan P = 50%

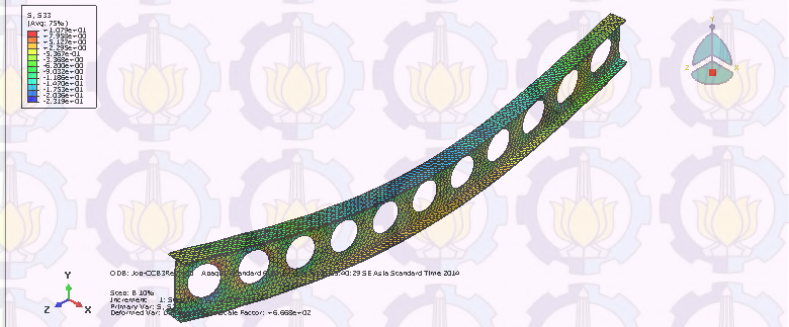


Gambar 30 Model Keruntuhan dengan P = 60%

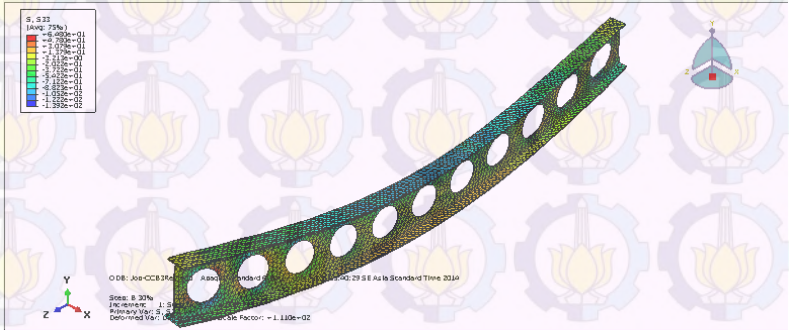
MODEL KERUNTUHAN HEXAGONAL CASTELLATED BEAM (CCB3)



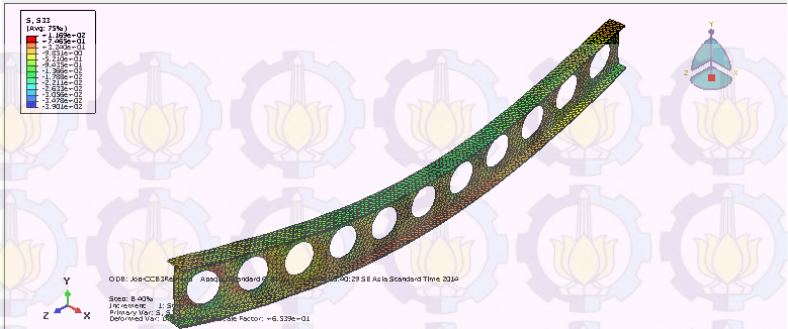
Gambar 31 Model Keruntuhan dengan $P = 0\%$



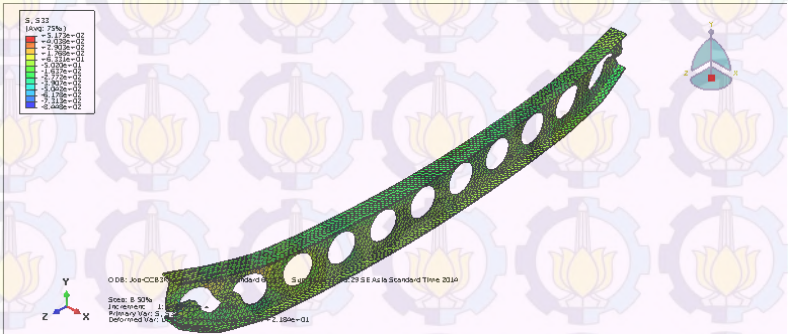
Gambar 32 Model Keruntuhan dengan $P = 10\%$



Gambar 33 Model Keruntuhan dengan $P = 30\%$



Gambar 34 Model Keruntuhan dengan P = 40%



Gambar 35 Model Keruntuhan dengan P = 50%



Gambar 36 Model Keruntuhan dengan P = 60%

BIODATA PENULIS



SAIDUL ULUM

Penulis dilahirkan di Sukabumi 15 Mei 1990. Penulis telah menempuh pendidikan formal diantaranya :

1. MI Sukamaju – Sukabumi (1997-2003)
2. MTs Al-Huda Sukabumi (2003-2006)
3. SMK Negeri 1 Sukabumi (2006-2009)

Selama menempuh pendidikan di SMKN 1 Sukabumi, penulis

mengambil konsentrasi Teknik Gambar Konstruksi.

4. Universitas Gajah Mada (UGM) Yogyakarta (2009-2012)

Setelah lulus dari SMKN 1 Sukabumi tahun 2009, penulis menempuh pendidikan di Diploma III Teknik Sipil Universitas Gajah Mada (UGM) Yogyakarta yang sebelumnya masuk melalui jalur PMDK.

Pernah Aktif di kegiatan organisasi kampus (BEM Fakultas Teknik Sipil UGM)

Setelah lulus tahun 2009, penulis melanjutkan pendidikannya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada program Lintas Jalur (LJ) Teknik Sipil ITS, dan mengambil konsentrasi struktur pada tugas akhir yang dikerjakannya.