

STUDI NUMERIK PERILAKU BALOK KASTELA TERHADAP VARIASI POSISI LUBANG DARI TUMPUAN

Abdul Ahad Ghifar Ente

Banu Dwi Handono, J. D. Pangouw

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi

Email: aghifarente@gmail.com

ABSTRAK

Material baja yang digunakan dalam bangunan memiliki kelebihan dibandingkan dengan material konstruksi lain dalam hal durability, fleksibilitas dan kualitas. Salah satu strategi optimasi adalah balok kastela (*castellated beam*) yang dalam optimasi ini membuat ukuran profil lebih tinggi sehingga momen inersia menjadi lebih besar. Hal ini akan meningkatkan tegangan lenturnya karena jarak dari garis netral ke bagian luar profil bertambah tanpa menambah berat sendiri dari profil tersebut. Balok kastela dimodelkan dalam setengah portal sebagai elemen balok-kolom dengan panjang balok 8 m. Tiga jenis profil yang digunakan adalah profil gunung garuda 300x100, 375x125, dan 450x150 divariasikan jarak lubang dari tumpuan dengan rasio 0.55, 0.70, 0.85, 1.00, dan 1.15. Analisis perilaku balok kastela menggunakan program ANSYS Mechanical APDL sebagai 3D-FEM. Posisi lubang dari tumpuan mempengaruhi besarnya kapasitas balok kastela. Tegangan von mises disekitar lubang di dekat tumpuan dan nilai lendutannya berkurang jika jarak lubang dari tumpuan semakin jauh. Dengan demikian pengaruh posisi lubang dari tumpuan harus diperhatikan untuk digunakan secara optimum, mengingat semakin jauh jarak lubang dari tumpuan maka berat sendiri dari balok baja tersebut semakin besar.

Kata Kunci : *Castellated Beam, Finite Element Method, ANSYS, Kapasitas Lentur, Kapasitas Geser*

PENDAHULUAN

Latar belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi dan kebutuhan yang meningkat saat ini, sistem struktur dituntut untuk mendesain struktur menjadi lebih efektif dan efisien disegala aspek. Selain aspek dari segi kekuatan yang secara mutlak juga harus memenuhi, aspek lain seperti aspek ekonomi dan kemudahan pelaksanaan. Salah satu sistem struktur utama yang menjadi perhatian saat ini adalah struktur baja. Struktur baja banyak dipakai sebagai struktur pada bangunan bertingkat tinggi dan berbentang lebar. Material baja yang digunakan dalam bangunan memiliki kelebihan dibandingkan dengan material konstruksi lain dalam hal durability, fleksibilitas dan kualitas.

Material baja unggul dibidang yang lain, hanya saja harganya relatif mahal. Dalam pemakaiannya kadang ada yang tidak bisa diberdayakan penuh, ada bagian yang kurang berfungsi. Sebab itu ada beberapa strategi optimasi. Tiap strategi ada risiko atau konsekuensinya. Untuk itu perlu diketahui beberapa strategi optimasi yang telah berhasil diaplikasikan. (Dewobroto. 2016)

Salah satu strategi optimasi adalah balok kastela (*castellated beam*) dimana optimasi ini memodifikasi ukuran profil menjadi lebih tinggi sehingga momen inersia menjadi lebih besar. Hal ini akan meningkatkan tegangan lenturnya karena jarak dari garis netral ke bagian luar profil bertambah tanpa menambah berat sendiri dari profil tersebut. Modifikasi ini bisa menghemat penggunaan profil baja dengan memperhatikan kekuatan profil baja tersebut. Disamping kelebihan dari segi kekuatannya, bukaan seperti lubang pada bagian *web* balok kastela (*castellated beam*) dapat dimanfaatkan sebagai pemasangan *mechanical electrical*.

Balok kastela (*castellated beam*) juga mempunyai kekurangan yaitu mudahnya terjadi tekuk. Balok kastela beresiko terjadi tekuk pada area dengan gaya geser yang besar. Hal ini karena pada balok terlentur dengan beban merata, di daerah tumpuan akan mengalami gaya geser yang besar jika dibandingkan dengan daerah tengah bentang. Maka keruntuhan akibat tekuk akan terjadi sebelum mencapai beban maksimum.

Banyak penelitian yang secara analisis maupun eksperimental dilakukan untuk mengetahui perilaku balok kastela terhadap

posisi lubang. Suharjanto (2011) menganalisis secara eksperimental penambahan *adding plate* pada *web post* dalam hal kuat geser horizontal pada *cellular beam*. Mohan et.al (2016) menganalisis lendutan pada balok kastela dengan adanya penambahan pengaku diagonal dibagian lubang pada daerah tumpuan. Tsavdaridis et.al (2016) melakukan studi parameter jarak lubang dari kolom pada *cellular beam* terhadap sambungan baut balok-kolom dengan menggunakan *software* ANSYS.

Dalam mendesain balok kastela, diperlukan analisa tegangan lentur dan geser untuk menghitung berapa tinggi potongan dan posisi lubang dari tumpuan agar mendapat kapasitas yang optimum dari penampang balok kastela. Salah satu metode untuk analisis perilaku dari balok kastela dapat dilakukam dengan membuat model balok kastela menggunakan program *ANSYS Mechanical APDL* sebagai *Three Dimensional Finite Element*.

Rumusan Masalah

Modifikasi balok kastela menyebabkan kegagalan tekuk pada daerah tumpuan akibat penampang tidak mampu menahan gaya geser sehingga kapasitas penampang belum terpakai secara optimum. Jarak lubang dari tumpuan sangat mempengaruhi tekuk. Maka diperlukan analisis jarak dari variasi lubang dari daerah tumpuan dengan menggunakan *software* ANSYS terhadap kapasitas penampang.

Batasan Masalah

Pembatasan masalah perlu dilakukan agar penelitian ini dapat difokuskan. Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Model yang dibuat menggunakan profil baja kastela gunung garuda ukuran 300x100, 375x125, dan 450x150.
2. Profil kolom yang digunakan adalah 300x300 dengan panjang 4 m.
3. Mutu baja yang digunakan pada balok, kolom, dan *end-plate* adalah BJ-37.
4. Struktur dimodelkan sebagai elemen balok-kolom dengan pemodelan setengah portal dengan panjang balok 8 m.
5. Beban yang digunakan adalah beban berupa tekanan pada seluruh permukaan atas area flens balok.
6. Analisis yang ditinjau hanya pada balok kastela.

7. Sambungan dimodelkan *extended-end-plate* enam baut dengan ukuran baut M16 dan mutu baut A490.
8. Perangkat lunak menggunakan AutoCAD untuk membuat geometri balok kastela dan ANSYS untuk pemodelan dan analisis perilaku balok kastela secara numerik dengan metode elemen hingga.
9. Penentuan jarak lubang yang dimodelkan berdasarkan rasio perbandingan jarak lubang dari tumpuan dengan tinggi profil yaitu 0.55, 0.70, 0.85, 1.00 dan 1.15.
10. Las penyambung potongan balok dianggap sempurna.
11. Kegagalan yang diteliti hanya *flexural mechanism* dan *web post buckling due to shear*.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui perilaku balok kastela yaitu pengaruh posisi lubang pertama dari tumpuan terhadap kapasitas balok kastela.
2. Mengetahui perilaku balok kastela yaitu pengaruh posisi lubang pertama dari tumpuan terhadap tegangan *Von mises* pada area sekitar lubang.

Manfaat Penelitian

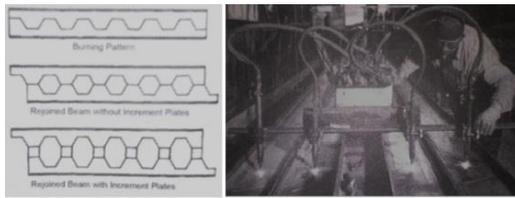
1. Mempelajari simulasi numerik program ANSYS yang dapat digunakan untuk membuat model *finite element* tiga dimensi posisi lubang balok kastela dari tumpuan.
2. Studi perilaku posisi lubang balok kastela dari tumpuan dengan profil 300x100, 375x125 dan 450x150 dengan variasi jarak lubang rasio 0.55, 0.70, 0.85, 1.00 dan 1.15.

LANDASAN TEORI

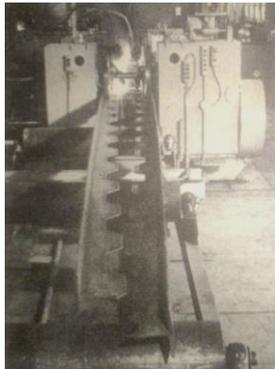
Balok Kastela

Teori balok lentur menjelaskan bahwa tegangan maksimum profil I terjadi di pelat sayap, sedangkan di pelat badan relatif kecil, bahkan nilainya nol di sumbu netral. Jarak antara pelat sayap akan menentukan besarnya momen inersia. Itu yang mendasari system *Castellated*, bagaimana cara meningkatkan momen inersia profil I *hot-rolled* tanpa tambahan material, yaitu dengan cara membelah dengan mesin pemotongan *plasma* sesuai pola seperti gambar 1

dan menyambungkannya kembali dengan las seperti gambar 2.



Gambar 1. Sistem pembuatan balok *Castellated*



Gambar 2. Proses *rejoined* pada sistem *Castellated*

Sistem *Castellated* meningkatkan properti penampang secara signifikan. Untuk kapasitas struktur yang sama, beratnya akan lebih ringan. Pemilihan sistem *Castellated* efektif untuk struktur yang dinominasi momen, misal struktur bentang lebar. Adapun bagian dengan momen dan gaya geser tinggi, seperti tumpuan struktur menerus maka bagian berlobang dapat ditutup pelat atau perkuatan lain.

Lendutan dan Kondisi Batas Layan

Meskipun ketentuan batas kekuatan (*limit state of strength*) untuk perencanaan balok telah dipenuhi, yang berarti segi keamanan telah memuaskan, tetapi struktur masih perlu dievaluasi terhadap ketentuan kondisi batas layan (*limit state of serviceability*). Ini tidak terkait faktor keselamatan, tetapi untuk menjamin bahwa pada kondisi beban rencana struktur tidak menimbulkan permasalahan bagi pemakaian dan bisa berfungsi sesuai rencana.

Besarnya lendutan yang terjadi pada balok ditentukan oleh detail dan maksud pemakaian struktur tersebut. Secara historis, batas lendutan balok dibatasi lebih kecil dari $L/360$ terhadap kondisi beban hidup nominal (tanpa beban terfaktor), untuk balok atap syaratnya lebih ringan, $L/240$. Menurut petunjuk ASCE-7 (2005), balok yang melendut sebesar $L/300$

(kantilever sebesar $L/1500$) sudah akan tampak secara visual dan akan menyebabkan kerusakanan *finishing* bangunan (*cladding* bocor). Lendutan balok lebih besar dari $L/200$ akan menyebabkan pintu dan yang semacamnya menjadi tidak berfungsi. (Dewobroto, 2016)

Konsep Metode Elemen Hingga

Dari sudut pandang *engineering*, metode elemen hingga adalah sebuah metode yang menyatukan elemen- elemen struktur yang dapat dianalisis secara terpisah ke dalam sebuah persamaan kesetimbangan global struktur (Dill, 2011).

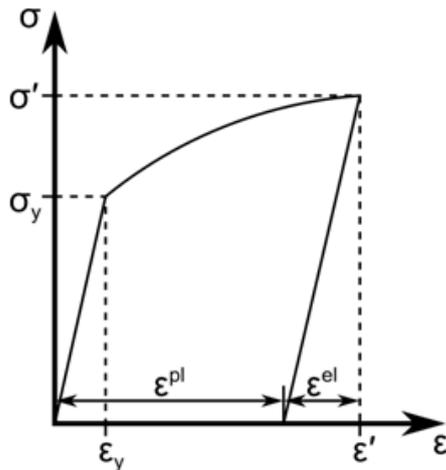
Prosedur elemen hingga mengurangi variable yang tidak diketahui menjadi sejumlah berhingga dengan membagi daerah penyelesaian menjadi bagian kecil yang disebut elemen dan dinyatakan sebagai variable medan yang tidak diketahui dalam istilah dianggap sebagai fungsi pendekatan (*approximation functions/interpolation functions/shape function*) dalam setiap elemen. (Bhavikatti, 2005)

Fungsi ini (juga disebut interpolasi) yang didefinisikan dalam bentuk nilai dan variable lapangan pada titik-titik tertentu, disebut sebagai node. Node biasanya terletak di sepanjang batas elemen, dan menghubungkan elemen yang berdekatan. (Erdogan dan Ibrahim, 2015)

Kemampuan untuk mendiskritisasi domain tidak beraturan dengan elemen hingga membuat metode ini menjadi alat analisis yang berharga dan praktis untuk solusi masalah terhadap keadaan batas, kondisi awal (*initial condition*) dan masalah eigenvalue yang timbul dalam berbagai disiplin ilmu teknik. (Erdogan dan Ibrahim, 2015)

Nonlinearitas Bahan

Hubungan tegangan-regangan nonlinier adalah penyebab umum perilaku struktural nonlinier. Bahan nonlinieritas terjadi karena adanya hubungan nonlinier antara tegangan dan regangan; Artinya, tegangan adalah fungsi nonlinier dari regangan. Banyak faktor dapat mempengaruhi sifat tegangan-regangan material, termasuk riwayat beban (seperti respons elastoplastik), kondisi lingkungan (seperti suhu), dan jumlah waktu yang diterapkan beban (seperti pada *creep response*). (ANSYS Mechanical APDL Material Reference)



Gambar 3 *Stress-strain curve for an elastic-plastic material*

METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan pelaksanaan penelitian :

Penelitian ini menggunakan analisis metode elemen hingga yang difokuskan untuk mengetahui perilaku posisi lubang balok kastela terhadap kapasitas penampang dalam memikul beban. Beban yang diterapkan adalah beban berupa tekanan di atas seluruh permukaan atas *flens* balok.

Metode penelitian dilakukan dalam tiga tahap, yaitu *input*, analisis, dan *output*. Tahap *input* antara lain adalah pemodelan struktur tiga dimensi balok-kolom termasuk didalamnya penentuan *element type* yang sesuai, pembagian struktur menjadi elemen-elemen kecil (*meshing*) serta mendefinisikan kontak. Setelah pemodelan selesai, tipe analisis yang akan dijalankan diatur dalam tahap *solution* termasuk menerapkan beban dan pemilihan metode penyelesaian persamaan yang akan digunakan. Dan tahap *output*, hasil analisis dapat ditampilkan seperti tegangan, dan deformasi. Hasil analisis dapat ditampilkan dengan grafik yang dapat diatur dalam tahap *Time History*.

Data Penelitian

Pemodelan yang digunakan adalah elemen balok-kolom dengan *constrain* pada kedua ujung kolom tidak diijinkan berdeformasi arah x,y,z dan pada ujung balok hanya diijinkan deformasi arah y (atas-bawah) untuk memodelkan setengah portal.

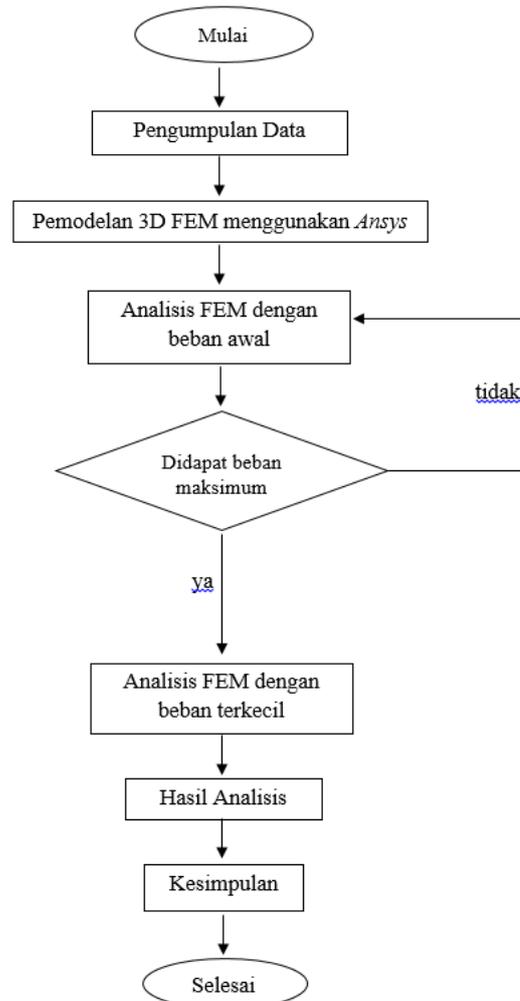


Diagram Alir Penelitian

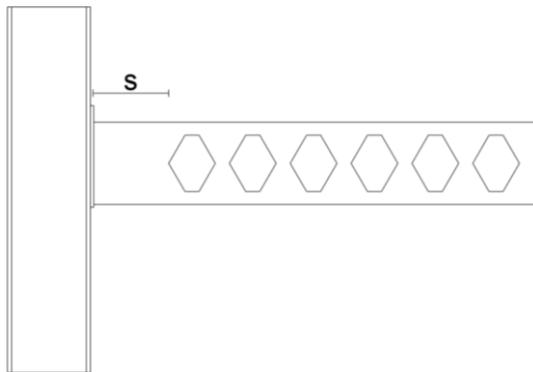
- Panjang Balok : 4 m (pemodelan setengah portal, panjang balok 8 m)
- Panjang Kolom : 4 m
- Geometri sambungan : *Extended-end-plate* enam baut
- Profil balok kastela : 300x100, 375x125, dan 450x150 (gunung langit)
- Profil kolom : 300x300 (gunung langit)
- Tebal *end-plate* : 15 mm.
- Ukuran baut : M16
- Mutu baja : BJ37 ($f_y=240$ MPa)
- Mutu baut : A490 ($f_y=900$ MPa)

Posisi lubang dari tumpuan (s) berdasarkan rasio antara jarak lubang dari tumpuan dengan tinggi profil dapat dijelaskan dari tabel 1.

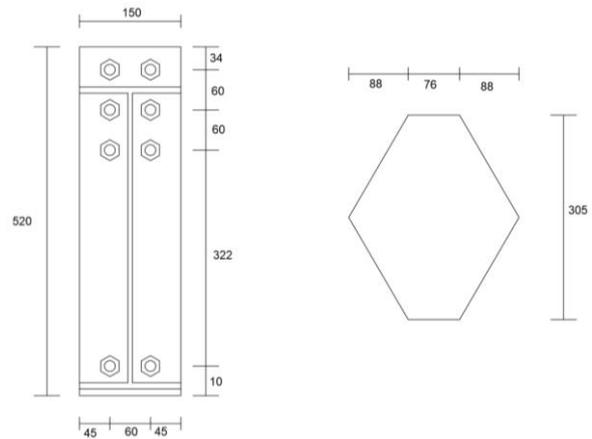
Tabel 1. Jarak lubang dari tumpuan (mm)

| Profil | 0.55 | 0.7 | 0.85 | 1 | 1.15 |
|---------|------|-----|------|-----|------|
| 300x100 | 165 | 210 | 255 | 300 | 345 |
| 375x125 | 206 | 263 | 319 | 375 | 431 |
| 450x150 | 248 | 315 | 383 | 450 | 518 |

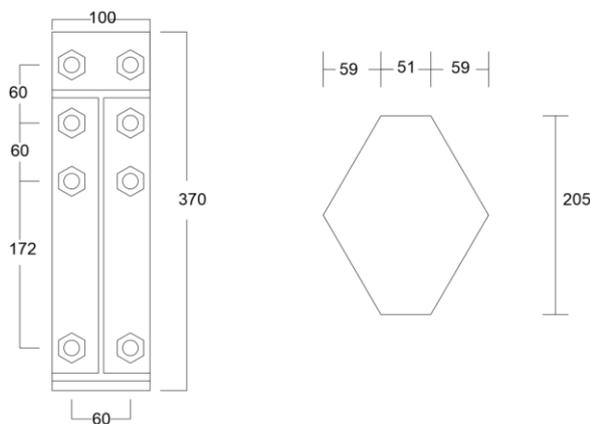
Detail pemodelan dalam penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.



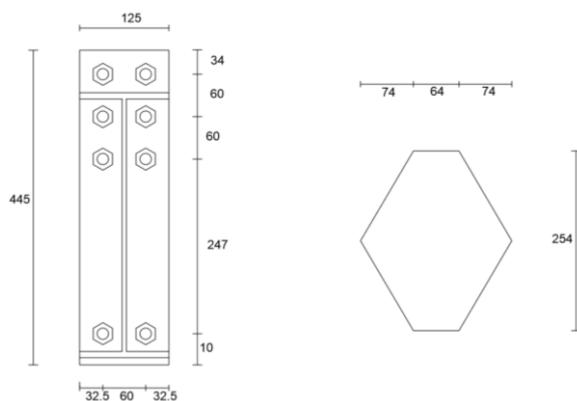
Gambar 4. Detail Pemodelan posisi lubang



Gambar 7. Detail sambungan dan ukuran lubang profil 450x150



Gambar 5. Detail sambungan dan ukuran lubang profil 300x100



Gambar 6. Detail sambungan dan ukuran lubang profil 375x125

Data Beban

Beban awal diletakkan di sepanjang permukaan *flens* balok untuk kemudian mencari kapasitas optimumnya. Jika penampang mampu menahan beban tersebut maka dicoba lagi dengan beban yang lebih besar. Setelah didapat kapasitasnya, kapasitas terkecilnya dimasukkan ke masing-masing variasi untuk dibandingkan tegangan-tegangannya.

Pemodelan Struktur dengan Menggunakan ANSYS

Tabel 2. Data *Material Model*

| | <i>Density</i> (tonne/mm ³) | <i>Linear Isotropic</i> | <i>Bilinear Isotropic Hardening</i> |
|---|--|--|--|
| <i>Material Number 1</i> (bolt) | 7.85E-09 | <i>Young's Modulus (EX)</i> = 200000 Mpa <i>Poisson's Ratio (PRXY)</i> = 0.3 | <i>Yield Stress</i> = 900 MPa <i>Tangent Modulus</i> = 6700 MPa |
| <i>Material Number 2</i> (Beam, column, and end-plate) | 7.85E-09 | <i>Young's Modulus (EX)</i> = 200000 Mpa <i>Poisson's Ratio (PRXY)</i> = 0.3 | <i>Yield Stress</i> = 240 MPa <i>Tangent Modulus</i> = 6700 MPa |

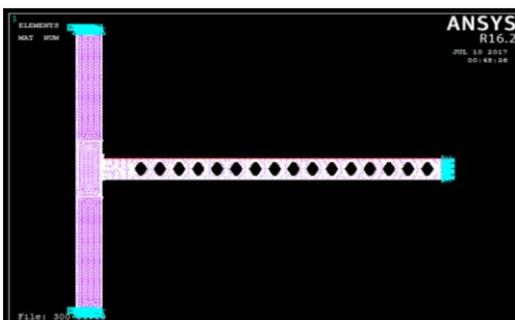
Material model yang digunakan adalah *Bilinear Isotropic Hardening* dengan *tangent modulus* dipakai sebesar 1/30 kali modulus elastisitasnya. (Dewobroto 2016). *Element type* yang digunakan adalah SOLID187 (3-D 10-Node *Tetrahedral Structural Solid*) dan *element type* pada kontak digunakan TARGE170 (3-D *Target Surface*) dan CONTA174 (3-D 8-Node *Surface-to-Surface Contact*).

Tabel 3. Pemodelan *contact pair*

| Contact | Target | Coefficient of friction | Contact algorithm | Behaviour of contact surface |
|-------------|-------------|-------------------------|-------------------|------------------------------|
| End-plate | Flens kolom | 0.3 | Penalty method | standart |
| Kepala baut | End-plate | - | MPC algorithm | Bonded (always) |
| Mur | Flens kolom | - | MPC algorithm | Bonded (always) |
| End-plate | balok | - | MPC algorithm | Bonded (always) |

Kontak antara *flens* kolom dan *end-plate* menggunakan koefisien friksi sebesar 0.3 dengan tipe kontak *standard* serta menggunakan *Penalty Method* untuk *contact alogaritm*. Pengaturan tersebut dimaksudkan untuk menghasilkan kontak yang hanya bersentuhan tetapi tidak melekat atau tanpa penetrasi (*touching no sticking*) pada kondisi awal.

Untuk kontak antara kepala baut dan mur baut dengan *endplate* dan *flens* kolom, menggunakan *MPC Alogaritm* sebagai *contact alogaritm* dan tipe kontak secara otomatis memilih tipe *Bonded (Always)*. Hal ini dimaksudkan agar kontak permukaan yang terjadi antara kepala baut/mur dengan *end-plate/flange column* melekat (*sticking*) untuk mensimulasikan pengencangan baut sehingga permukaan baut melekat dan dapat ikut berdeformasi bersamaan dengan *end-plate* ketika balok menerima beban tekan.



Gambar 8. Hasil *Mesh* dan model *constrain*

Analisis FEM

Langkah selanjutnya adalah proses analisis (*solve*) oleh program ANSYS Mechanical APDL untuk mengevaluasi parameter yang akan diteliti. Proses analisis yang dijalankan akan *terminate* ketika beban batas tercapai. Hasil yang diperoleh dari analisis FEM berupa data tegangan, *time*

step untuk mengetahui pertambahan beban yang diberikan hingga beban batas. Hasil perhitungan kemudian ditampilkan dalam tabel dan grafik yang menyatakan hubungan perilaku balok kastela akibat variasi posisi lubang dari tumpuan.

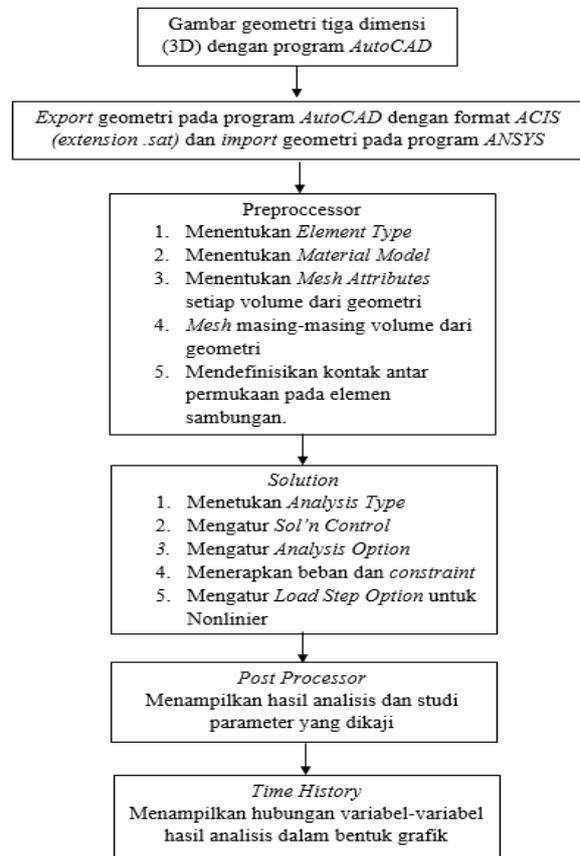


Diagram alir pemodelan Ansys

ANALISIS, HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis

Hasil analisis yang didapatkan menggunakan program ANSYS adalah berupa kapasitas maksimum atau beban batas dari suatu penampang dan perilaku dari balok kastela terhadap variasi posisi lubang dari tumpuan dengan profil balok kastela 300x100, 375x125, dan 450x150. Beban maksimum yang di dapat kemudian di batasi oleh batas lendutan yaitu $L/300$.

$$L = 8 \text{ m} = 8000 \text{ mm}$$

$$\text{Batas lendutan} = \frac{8000}{300} = 26.67 \text{ mm}$$

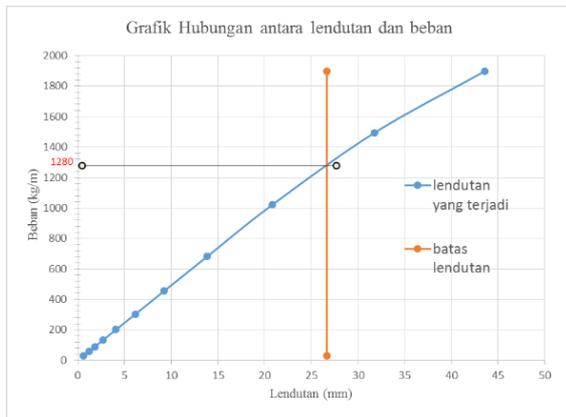
Maka beban maksimum diambil pada kondisi batas lendutan.

Tabel 4 merupakan hasil analisis pada profil 300x100 dengan beban awal 0.3 MPa atau 3000

kg/m yang diletakkan pada seluruh permukaan atas *flens* balok.

Tabel 4. Hasil analisis beban dan lendutan rasio 0.55 profil 300x100

| Sub-step | Time | Beban (MPa) | Beban (kg/m) | Lendutan (mm) |
|----------|---------|-------------|--------------|---------------|
| 1 | 0.00969 | 0.00291 | 29.082 | 0.591 |
| 2 | 0.01969 | 0.00591 | 59.082 | 1.201 |
| 3 | 0.02969 | 0.00891 | 89.082 | 1.811 |
| 4 | 0.04469 | 0.01341 | 134.082 | 2.726 |
| 5 | 0.06719 | 0.02016 | 201.582 | 4.098 |
| 6 | 0.10095 | 0.03029 | 302.850 | 6.156 |
| 7 | 0.15158 | 0.04547 | 454.740 | 9.243 |
| 8 | 0.22753 | 0.06826 | 682.590 | 13.873 |
| 9 | 0.34074 | 0.10222 | 1022.220 | 20.848 |
| 10 | 0.49823 | 0.14947 | 1494.690 | 31.778 |
| 11 | 0.63276 | 0.18983 | 1898.280 | 43.574 |



Gambar 9. Grafik hubungan beban dan lendutan rasio 0.55

Berikut ini adalah tabel dan grafik yang menampilkan hasil analisis kapasitas profil untuk masing-masing profil balok yang dimodelkan.

Tabel 5 Perbandingan hasil analisis kapasitas profil 300x100

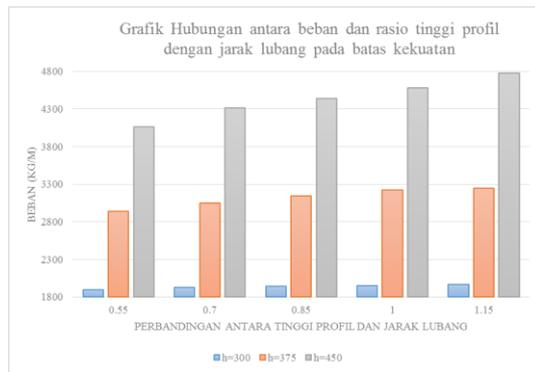
| Ratio | 0.55 | 0.70 | 0.85 | 1.00 | 1.15 |
|---------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|
| Jarak Lubang (mm) | 165 | 210 | 255 | 300 | 345 |
| Batas Kekuatan (kg/m) | 1898.28 | 1928.85 | 1945.8 | 1954.83 | 1963.11 |
| Pertambahan kapasitas (%) | | 1.610 | 2.503 | 2.979 | 3.415 |
| Batas layan (kg/m) | 1280 | 1290 | 1300 | 1310 | 1320 |
| Pertambahan kapasitas (%) | | 0.781 | 1.563 | 2.344 | 3.125 |

Tabel 6 Perbandingan hasil analisis kapasitas profil 375x125

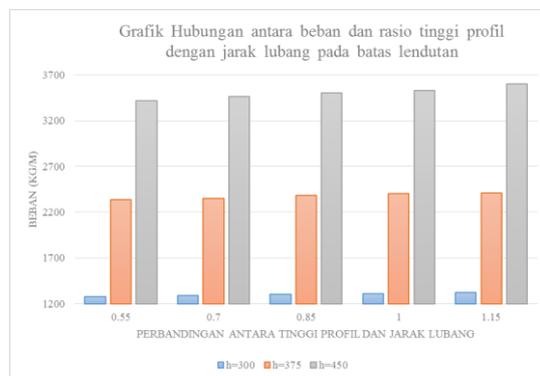
| Ratio | 0.55 | 0.70 | 0.85 | 1.00 | 1.15 |
|---------------------------|---------|---------|--------|--------|---------|
| Jarak Lubang (mm) | 206 | 263 | 319 | 375 | 431 |
| Batas Kekuatan (kg/m) | 2939.65 | 3048.75 | 3145.4 | 3220.5 | 3250.75 |
| Pertambahan kapasitas (%) | | 3.711 | 6.999 | 9.554 | 10.583 |
| Batas layan (kg/m) | 2340 | 2350 | 2380 | 2400 | 2410 |
| Pertambahan kapasitas (%) | | 0.427 | 1.709 | 2.564 | 2.991 |

Tabel 7 Perbandingan hasil analisis kapasitas profil 450x150

| Ratio | 0.55 | 0.70 | 0.85 | 1.00 | 1.15 |
|---------------------------|---------|--------|--------|---------|---------|
| Jarak Lubang (mm) | 248 | 315 | 383 | 450 | 518 |
| Batas Kekuatan (kg/m) | 4060.73 | 4313.1 | 4443.6 | 4581.53 | 4775.78 |
| Pertambahan kapasitas (%) | | 6.215 | 9.429 | 12.825 | 17.609 |
| Batas layan (kg/m) | 3420 | 3460 | 3500 | 3530 | 3600 |
| Pertambahan kapasitas (%) | | 1.170 | 2.339 | 3.216 | 5.263 |



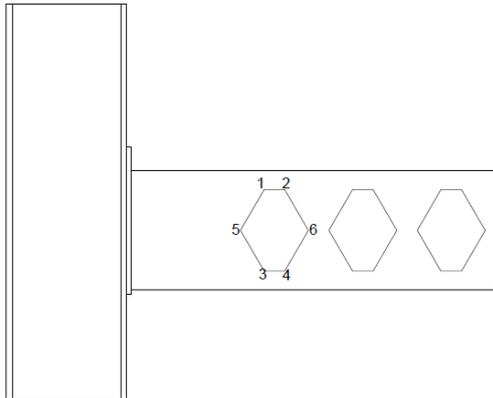
Gambar 10 Grafik hubungan antara beban dan rasio tinggi profil dengan jarak lubang pada batas layan



Gambar 11 Grafik hubungan antara beban dan rasio tinggi profil dengan jarak lubang pada batas layan

Perbandingan lendutan dan tegangan pada sekitar lubang

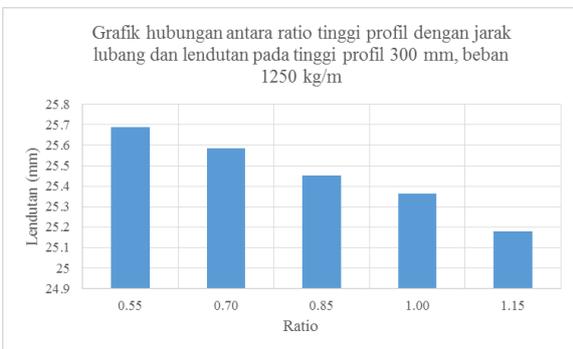
Dari hasil analisis dapat dibandingkan tegangan-tegangan yang terjadi disekitar lubang dengan menerapkan beban yang sama pada masing-masing variasi. Penomoran titik yang ditinjau di sekitar lubang dapat dilihat pada gambar 11 dan tabel 19-21 menampilkan hasil perbandingan yang dimaksud.



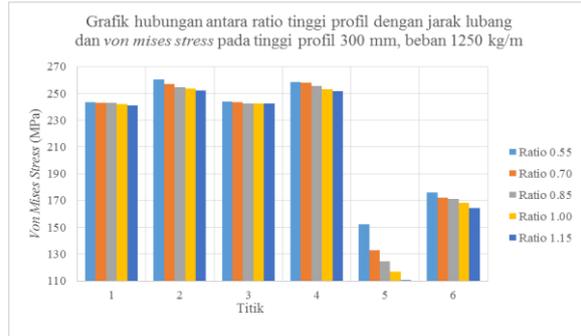
Gambar 12. Penomoran titik yang ditinjau untuk membandingkan perilaku dari balok kastela

Tabel 8. Lendutan dan Von mises stress pada profil 300x100 dengan beban 1250 kg/m

| Ratio | 0.55 | 0.7 | 0.85 | 1 | 1.15 | |
|--|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Jarak lubang (mm) | 165 | 210 | 255 | 300 | 345 | |
| Lendutan | Titik | 25.6871 | 25.5859 | 25.4524 | 25.362 | 25.1771 |
| Von mises stress pada sekitar lubang (MPa) | 1 | 243.177 | 243.122 | 242.986 | 242.11 | 241.095 |
| | 2 | 260.214 | 256.793 | 254.338 | 253.501 | 251.892 |
| | 3 | 243.881 | 243.314 | 242.568 | 242.505 | 242.246 |
| | 4 | 258.646 | 257.913 | 255.538 | 252.987 | 251.514 |
| | 5 | 152.392 | 132.98 | 124.551 | 116.723 | 110.224 |
| | 6 | 175.752 | 172.294 | 170.99 | 167.983 | 164.199 |



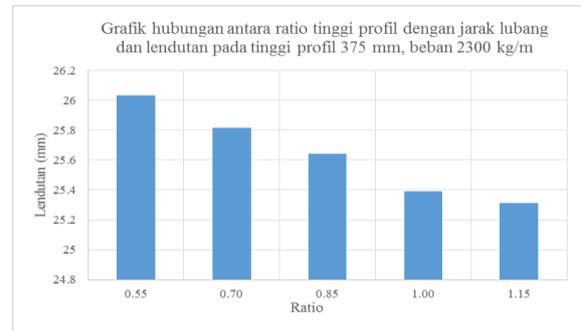
Gambar 13. Grafik hubungan antara ratio tinggi profil dengan jarak lubang dan lendutan pada tinggi profil 300 mm, beban 1250 kg/m



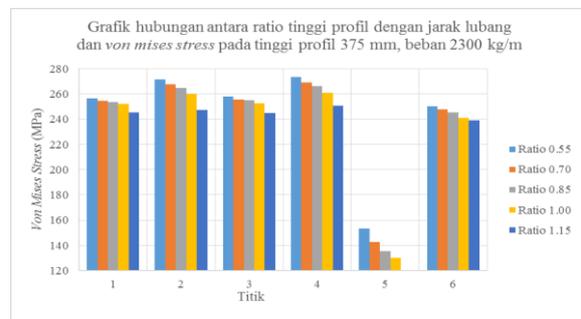
Gambar 14. Grafik hubungan antara ratio tinggi profil dengan jarak lubang dan von mises stress pada tinggi profil 300 mm, beban 1250 kg/m

Tabel 9. Lendutan dan Von mises stress pada profil 375x125 dengan beban 2300 kg/m

| Ratio | 0.55 | 0.70 | 0.85 | 1.00 | 1.15 | |
|--|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Jarak lubang (mm) | 206 | 263 | 319 | 375 | 431 | |
| Lendutan | Titik | 26.0317 | 25.8145 | 25.6434 | 25.3915 | 25.314 |
| Von mises stress pada sekitar lubang (MPa) | 1 | 256.403 | 254.72 | 253.777 | 252.192 | 245.62 |
| | 2 | 271.673 | 267.961 | 264.817 | 260.147 | 247.522 |
| | 3 | 258.231 | 255.776 | 255.174 | 252.495 | 244.746 |
| | 4 | 273.384 | 269.21 | 266.288 | 261.111 | 250.753 |
| | 5 | 153.39 | 142.762 | 135.295 | 130.161 | 120.265 |
| | 6 | 250.068 | 247.735 | 245.224 | 240.948 | 239.218 |



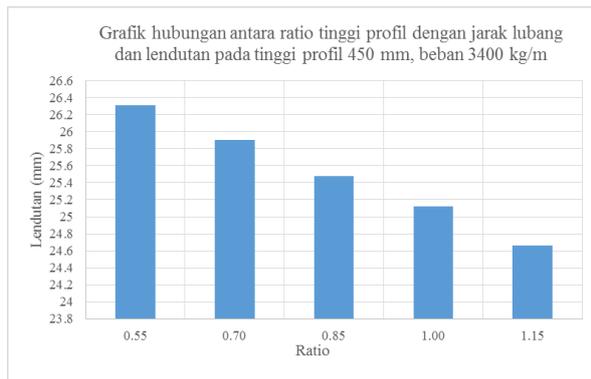
Gambar 15. Grafik hubungan antara ratio tinggi profil dengan jarak lubang dan lendutan pada tinggi profil 375 mm, beban 2300 kg/m



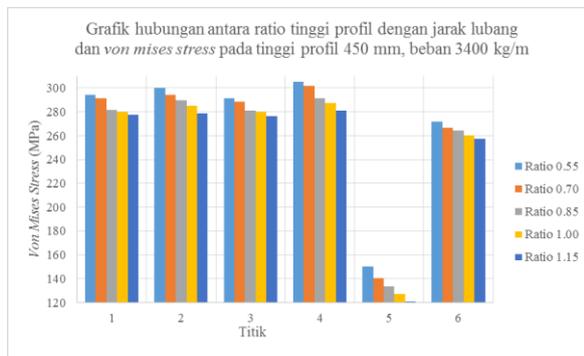
Gambar 16. Grafik hubungan antara ratio tinggi profil dengan jarak lubang dan von mises stress pada tinggi profil 375 mm, beban 2300 kg/m

Tabel 10. Lendutan dan *Von mises stress* pada profil 450x150 dengan beban 3400 kg/m

| Ratio | 0.55 | 0.7 | 0.85 | 1 | 1.15 | |
|--|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Jarak lubang (mm) | 248 | 315 | 383 | 450 | 518 | |
| Lendutan | Titik | 26.3126 | 25.905 | 25.4801 | 25.1235 | 24.6652 |
| Von mises stress pada sekitar lubang (MPa) | 1 | 293.959 | 291.066 | 281.35 | 279.899 | 277.644 |
| | 2 | 299.788 | 293.999 | 289.758 | 284.824 | 278.505 |
| | 3 | 291.099 | 288.301 | 280.89 | 279.974 | 276.17 |
| | 4 | 305.001 | 301.854 | 291.164 | 287.357 | 280.851 |
| | 5 | 150.247 | 140.496 | 133.372 | 126.904 | 120.896 |
| | 6 | 271.576 | 266.442 | 264.424 | 259.957 | 257.513 |



Gambar 17. Grafik hubungan antara ratio tinggi profil dengan jarak lubang dan lendutan pada tinggi profil 450 mm, beban 3400 kg/m



Gambar 18. Grafik hubungan antara ratio tinggi profil dengan jarak lubang dan *von mises stress* pada tinggi profil 450 mm, beban 3400 kg/m

PENUTUP

Kesimpulan

1. Jarak lubang dari tumpuan mempengaruhi kapasitas balok kastela dimana jarak lubang

dari rasio 0.55 menjadi 1.15 meningkatkan kapasitas *ultimate* balok kastela pada profil 300x100, 150x125 dan 450x150 masing-masing 3.415%, 10.583% dan 17.609%.

2. Pada balok yang dibebani beban terbagi merata kegagalan dominan yang terjadi adalah *flexural mechanism*.
3. Pada profil 300x100 kegagalan yang terjadi akibat lentur (*flexural mechanism*) tidak terjadi dari rasio 0.85 dan kegagalan yang terjadi pada badan akibat geser (*web post buckling due to shear*) terjadi pada rasio 0.55 sampai 1.15.
4. Pada profil 375x125 kegagalan yang terjadi akibat lentur (*flexural mechanism*) dan kegagalan yang terjadi pada badan akibat geser (*web post buckling due to shear*) tidak terjadi pada rasio 1.15.
5. Pada profil 450x150 kegagalan yang terjadi akibat lentur (*flexural mechanism*) tidak terjadi dari rasio 1.15 dan kegagalan yang terjadi pada badan akibat geser (*web post buckling due to shear*) tidak terjadi dari rasio 1.00.
6. Dalam hal perilaku perbandingan posisi lubang didapatkan bahwa semakin jauh posisi lubang menurunkan besarnya lendutan dan tegangan *Von mises*.

Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih dalam mengenai modifikasi jarak lubang balok kastela yang kapasitasnya digunakan secara optimum dengan biaya yang efisien, mengingat jika jarak lubang makin jauh dari tumpuan maka berat sendiri dari balok kastela tersebut makin besar dan dari segi pembuatan akan menjadi tidak efektif karena biaya.
2. Melakukan analisis perilaku balok kastela tentang pengaruh penambahan pengaku diagonal pada lubang didekat tumpuan.
3. Melakukan analisis perilaku balok kastela tentang pengaruh *increment plates*.
4. Melakukan analisis perilaku sistem balok *Cellular* dan sistem balok *Angelina* dan membandingkannya dengan sistem balok *Castellated*.

5.

DAFTAR PUSTAKA

- AISC 2010. *Specification for Structural Steel Building (ANSI/AISC 360-10)*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, June 2010.
- Anonymous. ANSYS Mechanical APDL V.16 Material Reference
- Bhavikatti, S. S. 2005. *Finite Element Analysis*. New Age International Publisher.
- Dewobroto, Wiryanto. 2016. *Struktur Baja Edisi ke-2*. Penerbit Jurusan Teknik Sipil UPH. Tangerang
- Dill, Ellis H. 2011. *The Finite Element Method for Mechanics of Solid with ANSYS Applications*. Advances in Engineering.
- Erdogan M, Ibrahim G. (2015). *The Finite Element Method and Application in Engineering Using ANSYS. Second Edition*. Springer International Publishing 2015.London
- Mohan, Resmi., and Prabhakaran, Preetha. 2016. *Finite Element Analysis to Compare the Deflection of Steel Beam with and without Web Openings*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Pp.07-11
- Tsavidaridis, Konstantinos Daniel., and Papadopoulos Theodore. 2016. *A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connection with cellular beams*. Journal of Constructional Steel Research 116 (2016) 92-113.
- Standar Nasional Indonesia 03 - 1729 - 2002 *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*. 2002. Departemen Pekerjaan Umum.
- Suharjanto. 2011. *Kajian Kuat Geser Horisontal Circular Castellated Beam With And Without Adding Plates*. Jurnal Teknik, Vol. 1, No.2, pp. 65-71.