



TESIS - RC185401

**ANALISIS TEGANGAN - REGANGAN PERILAKU BALOK  
BAJA CASTELLA PADA SAMBUNGAN DENGAN  
PLAT COUPLE UNTUK GEOMETRI HEXAGONAL,  
OCTAGONAL DAN BERLIAN MENGGUNAKAN  
METODE ELEMEN HINGGA**

**VICKY WILDAN YUSTISIA**  
NRP. 03111650020012

Dosen Pembimbing :  
Budi Suswanto, ST, MT, Ph.D.

Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan Dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020

**TESIS - RC142501**

**ANALISIS TEGANGAN - REGANGAN PERILAKU  
BALOK BAJA CASTELLA PADA SAMBUNGAN  
DENGAN PLAT COUPLE PADA GEOMETRI  
HEXAGONAL, OCTAGONAL DAN PERMATA  
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**VICKY WILDAN YUSTISIA**  
NRP. 03111650020012

**DOSEN PEMBIMBING :**  
**Budi Suswanto, ST, MT, Ph.D.**

Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan Dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Telah disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

**Magister Teknik (M.T.)**

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

**Vicky Wildan Yustisia**

**NRP : 03111650020012**

Tanggal Ujian : 22 Juni 2020

Periode Wisuda : September 2020 (122)

Disetujui oleh:

**Pembimbing**

1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19730128 199802 1 002

**Penguji**

1. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 19800430 200501 1 002

3. Dr. Wahyuniarsih Sutrisno, S.T., M.T.  
NIP. 1990201912076



Kepala Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan

Umbaro Lasminto., S.T., M.Sc.  
NIP : 19721202 199802 1 001

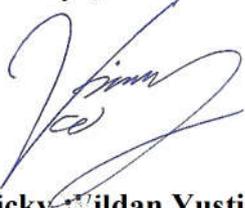
## PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

**Tesis yang berjudul: “Analisis Tegangan – Regangan Perilaku Balok Baja Castella Pada Sambungan Plat Couple Untuk Geometri Hexagonal, Octagonal Dan Berlian Menggunakan Metode Elemen Hingga”** ini adalah karya penelitian saya sendiri dan tidak terdapat karya /tulis untuk memperoleh gelar akademik maupun karya ilmiah/tulis yang pernah dipublikasikan oleh orang lain, kecuali dijadikan kutipan dari bagian karya ilmiah/tulis orang lain dengan menyebutkan sumbernya, baik dalam naskah disertasi maupun daftar pustaka.

Apabila ternyata ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur plagiasi di dalam naskah **tesis** ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan peraturan akademik ITS dan/atau perundang-undangan yang berlaku.

Surabaya, 25 Juli 2020



**Vicky Wildan Yustisia**

**NRP: 03111650020012**

## PERNYATAAN KEASLIAN PUBLIKASI TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

**JUDUL ARTIKEL PUBLIKASI:**

**The Structural Behavior Of Castellated Beam With Shape Variation Using Finite Element Methods**

**PENULIS UTAMA:**

**Vicky Wildan Yustisia**

**PENULIS ANGGOTA:**

1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D.
2. Dr., Ir., Djoko Irawan M.S.
3. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D.

**Artikel Publikasi** tersebut merupakan sebagian atau keseluruhan isi **Tesis** pada jurnal atau forum ilmiah yang merupakan karya ilmiah saya sendiri dan terdapat karya ilmiah orang lain. Apabila saya melakukan pelanggaran dari ketentuan publikasi ini, maka saya bersedia mendapatkan sanksi akademik yang berlaku.

Surabaya, 25 Juli 2020



**Vicky Wildan Yustisia**

**NRP: 03111650020012**

**ANALISIS TEGANGAN – REGANGAN PERILAKU BALOK BAJA  
CASTELLA PADA SAMBUNGAN PLAT COUPLE UNTUK GEOMETRI  
HEXAGONAL, OCTAGONAL DAN BERLIAN MENGGUNAKAN  
METODE ELEMEN HINGGA**

Nama Mahasiswa : Vicky Wildan Yustisia  
NRP : 03111650020012  
Pembimbing : Budi Suswanto, ST, MT, Ph.D.

**ABSTRAK**

Baja castella merupakan material alternatif yang bisa digunakan pada konstruksi struktur suatu bangunan yang bisa digunakan pada elemen material balok dan kolom. Baja castella sering digunakan sebagai struktur balok. Lubang pada badan castella mempunyai beberapa bentuk geometri pada penelitian yang ada antara lain: hexagonal, honey comb, octagonal, berlian, dan hexagonal dengan sudut terpotong

Balok baja castella memiliki geometri badan yang lebih tinggi dengan berat sendiri yang tidak bertamabah sehingga menambah nilai inersia profil tersebut dalam menerima beban, hal tersebut merupakan keuntungan penggunaan castella. Namun dengan geometri badan yang lebih tinggi dibanding geometri aslinya mengakibatkan tekuk torsi lateral dalam menerima beban axial. Terdapat 6 kemungkinan pola kegagalan pada balok castella yaitu pada mekanisme lentur, tekuk torsi lateral, mekanisme Vierendeel, pecah atau retak pada sambungan las, geser tekuk dan tekuk tertekan pada badan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan analisis balok baja castella dengan variasi bentuk geometri yaitu hexagonal, octagonal dan berlian dengan memasang plat couple pada sambungan las badan untuk mengetahui perilaku balok baja castella ketika menerima beban aksial dengan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) program bantu abaqus.

Analisis perilaku balok baja castella dengan penambahan plat atau tidak dengan penambahan plat coupled mempunyai pengaruh signifikan terhadap tegangan regangan yang terjadi disambungan las badan. Sehingga penambahan plat coupled pada sambungan badan profil balok baja castella sangat direkomendasikan untuk menunjang ketahanan (*durability*) kekuatan profil sebagai struktur jangka panjang. Analisis kinerja balok baja castella dengan penambahan plat coupled untuk berbagai profil lubang dengan beban yang sama yaitu 75 kN, menghasilkan kinerja terbaik pada profil hexagonal ditinjau dari nilai perpindahan yang terjadi adalah yaitu 12,839mm dibanding perpindahan profil lainnya adalah 14,433mm untuk profil lubang berlian dan 14,972 untuk profil lubang octagonal.

**Kata kunci:** balok baja kastela, plat couple, metode elemen hingga, kurva gaya – perpindahan, kurva tegangan – regangan .

## KATA PENGANTAR

Puji syukur selalu dihatirkan kehadirat Allah SWT serta shalawat dan salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad Salallahu Allaihi Wassalam. Atas ridho Allah, Tesis dengan judul **Analisis Tegangan – Regangan Perilaku Balok Baja Castella Pada Sambungan Plat Couple Untuk Geometri Hexagonal, Octagonal Dan Berlian Menggunakan Metode Elemen Hingga** terselesaikan dengan baik.

Terselesainya thesis ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak-pihak terdekat penulis. Karena itu, ucapan terima kasih kepada semua pihak berikut:

1. Budi Suswanto, S.T., M.T., Ph.D selaku Dosen Konsultasi yang telah memberikan ilmu selama proses penyelesaian karya ilmiah Tesis ini.
2. Data Iranata, S.T., M.T., Ph.D., dan Dr. Wahyuniarsih Sutrisno, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang dengan telaten memberikan saran untuk kesempurnaan karya ilmiah Tesis ini.
3. Dosen – dosen bidang Struktur yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan mengenai struktur sehingga menunjang penyelesaian Tesis ini.
4. Teman – teman di S2 Teknik Sipil ITS, di PT. PP (Persero) tbk, di PT. Rasya Anugrah Pratama yang memberi dukungan selalu.
5. Istri dan anak beserta keluarga besar yang selalu memberikan dukungan lahir dan bathin dalam penyelesaian Tesis ini.

Penulis menyadari akan kekurang sempurnaan Tesis ini dan berharap saran, kritik dan petunjuk terhadap Tesis ini, sehingga penulis kedepannya bisa meningkatkan kualitas dari penulisan karya ilmiah selanjutnya. Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih.

Surabaya, 22 Juni 2020

Penulis

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	iv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian .....	4
1.5. Batasan Masalah.....	4
<b>BAB II KAJIAN PUSTAKA</b>	
2.1. Studi Pendahuluan .....	5
2.2. Desain Sambungan Las Badan Baja Castella .....	12
2.3. Metode Elemen Hingga ( <i>Finite Element Method</i> ) .....	13
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1. Bagan Alir Penelitian ( <i>flow chart</i> ) .....	15
3.2. Umum .....	16
3.3. Studi Literatur dan Standart Code .....	16
3.4. Preliminer Desain .....	17
3.5. Perhitungan Analisis .....	18
3.6. Perbandingan Performa Profil Balok Baja Kastela .....	20

<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. Rasio Tinggi Profil Terhadap Lubang .....	23
4.2. Verifikasi Pemodelan Terhadap Uji Eksperimental Penelitian Terdahulu .....	25
4.3. Perilaku Balok Baja Castella dengan lubang Hexagonal .....	32
4.4. Perilaku Balok Baja Castella dengan lubang Octagonal .....	34
4.5. Perilaku Balok Baja Castella dengan lubang Berlian .....	36
4.6. Perbandingan Kinerja Balok Baja Castella .....	38
4.7. Sifat Mekanik Balok Baja Castella .....	38
4.8. Evaluasi Kinerja Profil Balok Baja Castella .....	45
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1. Kesimpulan .....	49
5.2. Saran .....	49
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>51</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Penelitian Balok Baja Kastella .....	5
2.2. Hasil dari perbandingan uji eksperimen dengan numerik elemen hingga ....	9
3.1. Profil Baja Castella 225x75x5x7mm dengan panjang 3.000 mm .....	18
4.1. Detail Profil Balok Baja Castela 225x75x5x7 .....	23
4.2. Tabel Perbandingan Hasil Analisis dan Hasil Penelitian Terdahulu .....	31
4.3. Tabel Gaya dan Displacement Balok Baja Castella Profil Hexagonal .....	32
4.4. Tabel Gaya dan Displacement Balok Baja Castella Profil Octagonal .....	34
4.5. Tabel Gaya dan Displacement Balok Baja Castella Profil Berlian .....	36
4.6. Perbandingan Tegangan Balok Baja Castella Lubang Hexagonal .....	40
4.7. Perbandingan Tegangan Balok Baja Castella Lubang Octagonal .....	42
4.8. Perbandingan Tegangan Balok Baja Castella Lubang Berlian .....	44
4.9. Hasil Analisis Kinerja Balok Baja Castella .....	45
4.10. Hasil Analisis Kinerja Balok Baja Castella .....	46

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Variasi geometri balok baja castella .....	6
2.2. Terminologi dasar dalam desain balok baja castella .....	6
2.3. Hasil analisis variasi tegangan dari optimalisasi balok dengan geometri lingkaran .....	7
2.4. Proses validasi optimalisasi balok baja castella dengan uji eksperimental .	7
2.5. Pengaturan pengujian balok tekuk terkekang lateral .....	8
2.6. Parameter desain dari lubang hexagonal balok baja kastela .....	9
2.7. Pengaturan alat pengujian .....	10
2.8. Lokasi dari konsentrasi tegangan pada benda uji (titik kontrol) .....	10
2.9. Perbandingan antara analisis elemen hingga dan hasil uji laboratorium ....	11
2.10. Detail system plat komposit .....	11
2.11. Perangkat lunak ABAQUS 6.14 untuk analisis metode elemen hingga.....	13
3.1. Tipe – tipe benda uji yang digunakan : a. Balok kastela dengan geometri octagonal, b. Balok kastela dengan geometri hexagonal, c. Balok kastela dengan geometri berlian .....	17
3.2. Detail Preliminari Profil Balok Baja Castella Budi, dkk .....	18
3.3. Pembebanan Balok Baja Castella .....	19
3.4. Variasi pada beban leleh berdasarkan perbedaan S/Do dan D/Do balok baja kastela geometri lingkaran.....	20
3.5. Grafik kurva perbandingan antara beban dengan lendutan pada balok baja kastela geometri lingkaran, b). Grafik kurva perbandingan antara beban dengan lendutan pada balok baja kastela geometri berlian.....	21
3.6. Perbandingan dari prediksi elemen hingga dengan hasil uji eksperimental karena beban defleksi pada balok baja castella dengan lubang lingkaran .....	21

4.1. Detail Profil Kastela Hexagonal dan Octagonal .....	24
4.2. Detail Profil Kastela Berlian .....	24
4.3. Pengaturan “ <i>Create Part Abaqus</i> ” .....	25
4.4. Penentuan Mutu Material Balok Baja Castella .....	26
4.5. Hubungan viscosity dan beban-perpindahan .....	26
4.6. Tahap <i>Assembly</i> Balok Baja Castella .....	27
4.7. Tahap <i>Assembly</i> Interaksi Balok Baja Castella dengan plat coupled .....	28
4.8. Tahap Penentuan Solusi Penyelesaian Analisis .....	28
4.9. Tahap Penentuan Jumlah Time Period dan Jumlah Increament. ....	29
4.10. Model pembebanan dan tumpuan sendi-rol. ....	29
4.11. Meshing Balok Baja Castella Hexagonal. ....	30
4.12. <i>Submit Job</i> Analisis. ....	30
4.13. Grafik Verifikasi Hasil Analisis Pemodelan Terdahulu dengan Penelitian ini .....	31
4.14. Grafik Hubungan gaya – perpindahan balok baja castella hexagonal. ....	32
4.15. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Balok Baja Castella Hexagonal dengan Couple atau Tanpa Couple.....	33
4.16. Perilaku tegangan – regangan balok baja castella hexagonal. ....	33
4.17. Grafik Hubungan gaya – perpindahan balok baja castella octagonal .....	34
4.18. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Balok Baja Castella Octagonal dengan Couple atau Tanpa Couple .....	35
4.19. Perilaku tegangan – regangan balok baja castella octagonal. ....	35
4.20. Grafik Hubungan gaya – perpindahan balok baja castella berlian. ....	36
4.21. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Balok Baja Castella Berlian dengan Couple atau Tanpa Couple. ....	37
4.22. Perilaku tegangan – regangan balok baja castella octagonal.....	37
4.23. Perbandingan perilaku tegangan – regangan balok baja castella dengan lubang berlian, hexagonal dan octagonal. ....	38

4.24. Grafik Hubungan Gaya – Perpindahan Balok Baja Castella Lubang Hexagonal terhadap terjadinya titik leleh ( $f_y$ ). .....	39
4.25. Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Hexagonal : a. Von Misses Balok Baja Castella tanpa plat couple, b. Von Misses Balok Baja Castella dengan plat coupled .....	40
4.26. Contoh Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Hexagonal pada Tengah Bentang dengan Mutu Baja BJ-50. ....	40
4.27. Grafik Hubungan Gaya – Perpindahan Balok Baja Castella Lubang Octagonal terhadap terjadinya titik leleh ( $f_y$ ) .....	41
4.28. Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Octagonal : a. Von Misses tanpa plat couple, b. Von Misses dengan plat coupled .....	42
4.29. Contoh Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Octagonal pada Tengah Bentang dengan Mutu Baja BJ-50. ....	42
4.30. Grafik Hubungan Gaya – Perpindahan Balok Baja Castella Lubang Berlian .....	43
4.31. Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Berlian : a. Von Misses tanpa plat couple, b. Von Misses dengan plat coupled .....	44
4.32. Contoh Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Berlian pada Tengah Bentang dengan Mutu Baja BJ-50.....	44
4.33. Diagram Kinerja Balok Baja Castella menggunakan Metode Elemen Hingga Software Abaqus .....	45
4.34. Grafik Tegangan – Regangan Baja Mutu 41 dan Baja Mutu 50 .....	46
4.34. (Lanjutan) Grafik Tegangan – Regangan Baja Mutu 41 dan 50 .....	47

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Baja castella merupakan material alternatif yang bisa digunakan pada konstruksi struktur suatu bangunan yang bisa digunakan pada elemen material balok dan kolom. Baja castella sering digunakan sebagai struktur balok. Balok baja castella adalah material alternatif yang dimodifikasi dari balok-I yang mengalami pemotongan secara longitudinal dan horizontal pada bagian badan/*web* (Budi dkk, 2017). Batang castella adalah batang profil-I dengan lubang hexagonal pada badan yang dibuat dari pemotongan sebuah baja gilas panas batang profil I yang membentuk pola polygon yang mana badan dibagi dua dan disambung kembali dengan las pada posisi badan sehingga profil bertambah lebih tinggi 40-60% dari profil aslinya (Sonck dkk, 2016). Lubang pada badan castella mempunyai beberapa bentuk geometri yang sudah dilakukan penelitian antara lain : hexagonal, honey comb, octagonal, berlian, dan hexagonal dengan sudut terpotong. Terdapat 6 kemungkinan pola kegagalan pada balok castella antara lain pada formasi mekanisme lentur, tekuk torsi lateral, formasi mekanisme Vierendeel, pecahnya sambungan las, geser tekuk dan tekuk tertekan pada badan (Jamadar dan Kumbhar, 2015). Proses penyambungan profil I yang sudah terpotong menjadi sangat penting, agar tidak terjadi retak atau patah pada sambungan las tersebut. Maka diperlukan suatu penelitian secara analisis kegagalan las akibat beban pada balok castella. Pada penelitian ini membahas tentang analisis balok baja castella hexagonal, octagonal dan berlian yang dipasang plat couple pada posisi sambungan las menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak Abaqus 6.14.

Balok baja castella memiliki geometri badan yang lebih tinggi dengan berat sendiri yang tidak bertambah sehingga menambah nilai inersia profil tersebut dalam menerima beban, hal tersebut merupakan keuntungan penggunaan castella. Namun dengan geometri badan yang lebih tinggi dibanding geometri aslinya mengakibatkan tekuk torsi lateral dalam menerima beban axial. Metode analisis

yang digunakan untuk mengkaji perilaku sistem sambungan pada penelitian ini adalah metode elemen hingga (MEH). Logan (2007) menjelaskan tentang metode elemen hingga adalah metode numerik untuk memecahkan masalah teknik fisika dan matematika. Penyelesaian permasalahan elemen hingga menggunakan bantuan perangkat lunak Abaqus. Abaqus adalah program simulasi rekayasa *engineer* yang kuat, berdasarkan metode elemen hingga, yang dapat memecahkan masalah mulai dari linear relatif sederhana sampai dengan analisis nonlinear (Dassault system, 2012). Metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak abaqus dipilih dalam penelitian ini dengan tujuan untuk memverifikasi hasil dari uji eksperimental yang sudah dilakukan.

Penelitian sonck dkk (2016) tentang tahanan tekuk torsi lateral balok baja castella, menghasilkan bahwa modifikasi dari pola tegangan sisa selama proses pembuatan balok castellated akan menghasilkan resistensi yang terletak sekitar satu kurva tekuk lebih rendah daripada resistensi yang diperoleh menggunakan pola tegangan sisa asli. Ini sesuai dengan penurunan maksimum resistensi tekuk sekitar 13%. Hal tersebut merupakan dampak dari efek merugikan proses fabrikasi pada tegangan flange residual, yang sebelumnya tidak pernah dipertimbangkan dan diperhitungkan. Penelitian Budi dkk (2017) tentang optimalisasi ukuran dan jarak lubang geometri hexagonal balok baja castella, menghasilkan bahwa jarak antar lubang berpengaruh terhadap lokasi konsentrasi tegangan maksimum. Maksimum konsentrasi tegangan berada di ujung area dari lubang hexagonal untuk jarak lubang yang lebih jauh. Sementara konsentrasi tegangan maksimum berpindah ke area sambungan badan untuk jarak lubang yang lebih pendek. Dasar dari analisis kekuatan yang bertambah untuk profil asli dan lokasi dari konsentrasi tegangan dari semua model adalah 60 derajat yaitu ukuran sudut dengan jarak lubang yang menghasilkan model optimum balok baja castella bernilai antara 0,186ho s.d 0,266ho. Hasil tes laboratorium kurang lebih sama dengan analisis FEM dengan rata-rata rasio 1,011 dan nilai COV 0,069. Metode yang digunakan untuk analisa model balok baja castella dengan FEM adalah valid. Penelitian Yossef dan Taher (2018) perihal optimalisasi biaya pada system lantai komposit dengan balok baja castella, menghasilkan cara untuk mereduksi pasca tekuk badan, rasio dimensi bukaan pada badan bisa bervariasi antara 19 s.d 34 dan rasio tinggi bukaan untuk

lebar harus kurang dari 2,28 dengan sudut ( $\alpha$ ) diantara 54,8 s.d 76,5 derajat dengan rata-rata nilai 62,12 derajat. Memperjauh jarak dari ujung ke ujung tidak direkomendasikan karena tidak berpengaruh pada optimasi nilai material. Sambungan kaku sebagian dengan faktor pengekangan  $R=0,75$  untuk girder utama mengefisiensikan 10% harga plat komposit dibanding dengan sambungan ujung sederhana.

Pada penelitian ini mempunyai tujuan untuk meneliti secara analisis tegangan – regangan pada sambungan badan dengan plat couple balok baja castella dengan variasi bentuk geometri yaitu hexagonal, octagonal dan diamond ketika menerima beban aksial dengan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) program bantu abaqus.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang ada, terdapat beberapa hal yang menjadi pokok pembahasan antara lain :

1. Bagaimana tegangan – regangan balok baja castella dengan sambungan plat couple pada sambungan badan las pada geometri hexagonal ?
2. Bagaimana tegangan – regangan balok baja castella dengan sambungan plat couple pada sambungan badan las pada geometri octagonal ?
3. Bagaimana tegangan – regangan balok baja castella dengan sambungan plat couple pada sambungan badan las pada geometri berlian ?
4. Perbandingan tegangan – regangan optimum terhadap geometri dalam menerima beban?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Menjawab rumusan masalah tersebut antara lain :

1. Menganalisa perilaku balok baja castella dengan geometri hexagonal dalam menerima beban
2. Menganalisa perilaku balok baja castella dengan geometri octagonal dalam menerima beban

3. Menganalisa perilaku balok baja castella dengan geometri berlian dalam menerima beban
4. Menganalisa perilaku geometri yang optimum dari perbandingan geometri balok baja castella

#### **1.4. Manfaat Penelitian**

Dampak langsung maupun tidak langsung dari kajian Thesis adalah kepada seluruh elemen masyarakat Indonesia antara lain :

1. Bagi Pemerintah.
  - 1.1. Pemerintah memperoleh informasi terkait kekuatan nominal material balok baja castella dengan variasi geometri sebagai struktur utama
2. Bagi Kontraktor/Konsultan
  - 2.1. Kontraktor/konsultan memperoleh informasi terkait kinerja material balok baja castella dengan variasi geometri *coupler* pada struktur utama.
3. Bagi Peneliti dan Mahasiswa
  - 3.1. Memperoleh informasi dan cara penggunaan material alternatif yang bisa digunakan pada struktur utama.
  - 3.2. Memperoleh pengetahuan tentang tingkat kinerja struktur utama balok baja castella dengan variasi geometri.
  - 3.3. Dapat menerapkan analisis balok baja castella dengan variasi geometri menggunakan metode analisis elemen hingga .

#### **1.5. Batasan Masalah**

Penelitian ini mempunyai batasan – batasan dalam lingkup pembahasannya antara lain :

1. Fokus pada geometri yang diteliti sesuai referensi penelitian dari Budi dkk, 2017.
2. Data hasil pengujian eksperimental didapat dari hasil literature / jurnal yang ada.

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1. Studi Pendahuluan

Penelitian – penelitian yang sudah pernah dilakukan pada lingkup pembahasan Baja Katella adalah sebagai berikut :

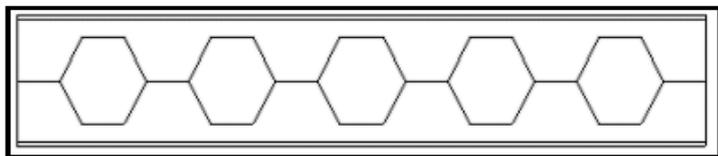
Tabel 2.1. Penelitian Balok Baja Kastella

NO.	PENELITI	JUDUL	TAHUN	PERIHAL
1	Jamadar A.M., Kumbhar P.D.	Parametric Study Of Castellated Beam With Circular And Diamong Opening	2015	Meneliti tentang parameter balok castella lubang lingkaran dan berlian
2	Sonck & Belis	Lateral-Torsional Buckling Resistance Of Castellated Beams(Asce)St.1943-541x.0001690	2016	Meneliti tentang tahanan tekuk torsi lateral dari baja castella
3	Budi, dkk	Optimization Analysis Of Size And Distance Of Hexagonal Hole In Castellated Steel Beams	2017	Meneliti tentang optimalisasi analisis dari ukuran dan jarak dari lubang hexagonal pada balok baja castella
4	Yossef & Taher	Cost Optimization of Composite Floor Systems with Castellated Steel Beams	2018	Meneliti tentang optimalisasi biaya pada system lantai komposit menggunakan balok baja castella

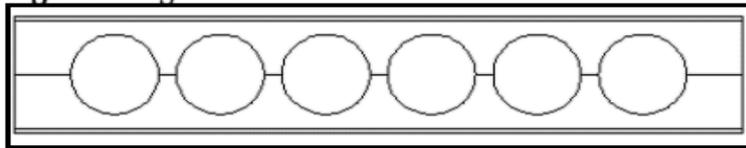
Penelitian – penelitian yang sudah dilakukan dengan pembahasan balok baja kastella pada kurun waktu 10 tahun ini sudah menghasilkan banyak informasi data yang ada perihal perilaku profil balok baja kastella dalam menerima beban. Namun penelitian pada titik sambungan belum dibahas secara mendetail, sehingga pada thesis ini akan dilakukan penelitian secara analisis menggunakan metode elemen hingga tentang perilaku balok baja castella dengan variasi geometri lubang yang dipasang plat couple pada sambungan las badan dengan merujuk pada penelitian – penelitian yang sudah ada.

Penelitian oleh Jamadar & Kumbhar (2015) perihal lubang pada badan balok castella secara umum berbentuk hexagonal, lingkaran, berlian atau kotak. Tujuan penelitian ini untuk meneliti lubang dengan bentuk hexagonal, lingkaran, diamond atau kotak. Pada penelitian ini digunakan bentuk lingkaran dan diamond untuk optimasi rasio keseluruhan kedalaman dibanding dengan bukaan ( $D/Do$ )

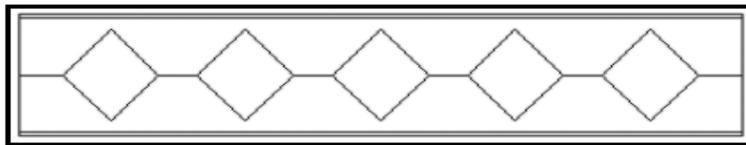
dan rasio jarak bukaan terhadap kedalaman ( $S/D_o$ ). Kriteria kegagalan Von Mises digunakan untuk menemukan beban kegagalan pada balok dan hasil yang didapatkan untuk optimalisasi balok adalah dengan validasi eksperimen. Keuntungan penggunaan balok baja castella adalah mengurangi total berat dari struktur dan hal tersebut di karenakan kebutuhan jumlah penggunaan baja yang lebih sedikit. Secara umum, baja memenuhi persyaratan kekuatan, kesulitannya adalah batang harus memenuhi persyaratan kemudahan layan yaitu kriteria defleksi dalam pemeriksaan keselamatan. Penggunaan balok castellated adalah solusi terbaik untuk mengatasi kesulitan ini.



**Fig -1: Hexagonal Castellated Beam**



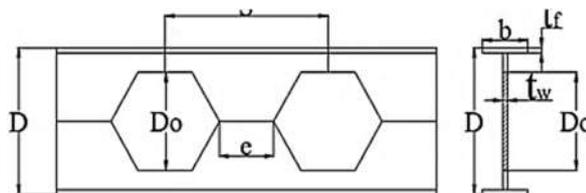
**Fig -2: Cellular Beam**



**Fig -3: Castellated Beam with Diamond Shaped Opening**

Gambar 2.1. Variasi geometri balok baja castella  
sumber : IRJET vol:2-2 oleh Jamadar dan Kumbhar (2015)

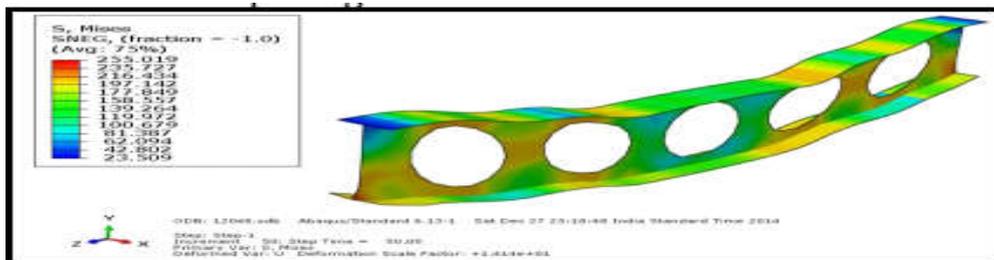
Terdapat 6 kemungkinan pola kegagalan pada balok antara lain : formasi mekanisme lentur, tekuk torsi lateral, formasi mekanisme Vierendeel, pecah pada sambungan las, tekuk geser pada badan dan tekuk tertekan pada badan. terminologi dasar yang digunakan dalam desain balok castellated sebagai berikut :



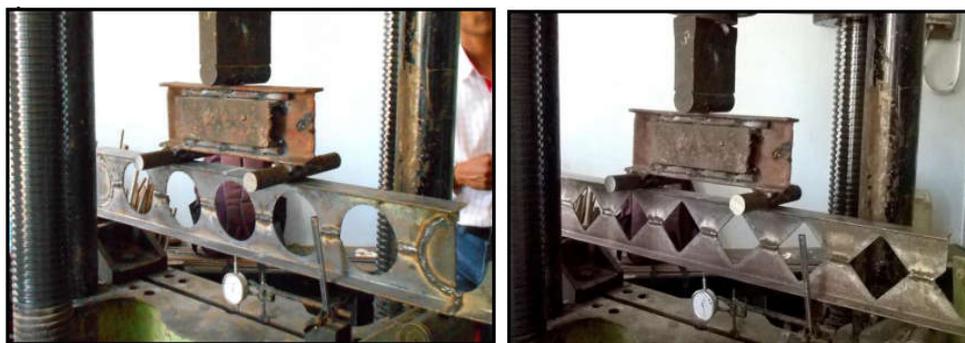
Gambar 2.2. Terminologi dasar dalam desain balok baja castella  
Sumber : IRJET vol:2-2 oleh Jamadar dan Kumbhar (2015)

dimana : Do = Tinggi lubang pada badan profil  
 D = Tinggi profil  
 S = Jarak as antar lubang (C/C)  
 e = Jarak bersih antar lubang  
 b = Lebar sayap dari balok I  
 tf = Tebal sayap dari balok I  
 tw = Tebal badan dari balok I

Desain dari balok baja castella adalah menggunakan EUROCODE 3 yang meliputi : 1. Kapasitas lentur balok, 2. Kapasitas geser balok, 3. Kekuatan lentur dan tekuk dari badan, 4. Moment vierendeel bengkok dari bagian bawah dan atas T, 5. Pecah pada sambungan las, 6. Pemeriksaan lendutan.



Gambar 2.3. Hasil analisis variasi tegangan dari optimalisasi balok dengan geometri lingkaran  
 Sumber : IRJET vol:2-2 oleh Jamadar dan Kumbhar (2015)

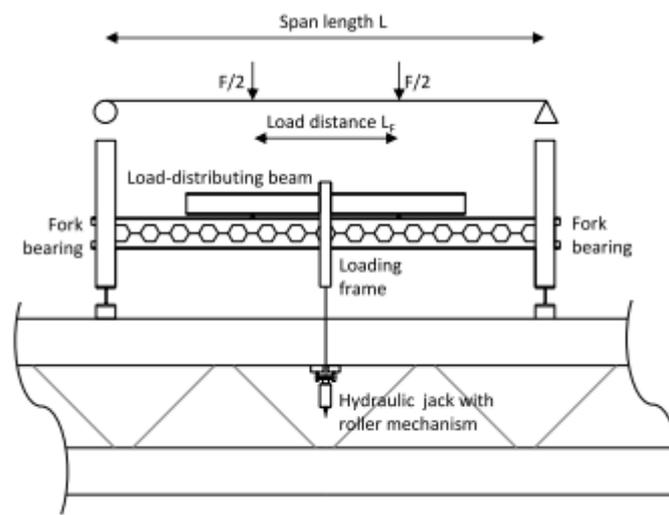


Gambar 2.4. Proses validasi optimalisasi balok baja castella dengan uji eksperimental  
 Sumber : IRJET vol:2-2 oleh Jamadar dan Kumbhar (2015)

Optimalisasi balok dengan metode elemen hingga, perlu di fabrikasi dan di uji secara eksperimental pada laboratorium. Pada penelitian ini pengujian dilakukan dengan menggunakan UTM (*universal testing machine*) dengan kapasitas 600 kN yang pengaturan pembebanan terletak

pada 2 titik pembebanan. Hasil dari penelitian ini adalah lubang berbentuk berlian lebih banyak memindahkan lokasi gaya geser yang tersedia sehingga meminimalisir pengaruh kegagalan lokal. Oleh karena itu, balok castella dengan bukaan berbentuk berlian terbukti lebih baik daripada bukaan berbentuk lainnya. Hasil perangkat lunak Abaqus (FEA) sesuai dengan hasil eksperimen dan juga dengan analisis metode yang diberikan oleh aturan.

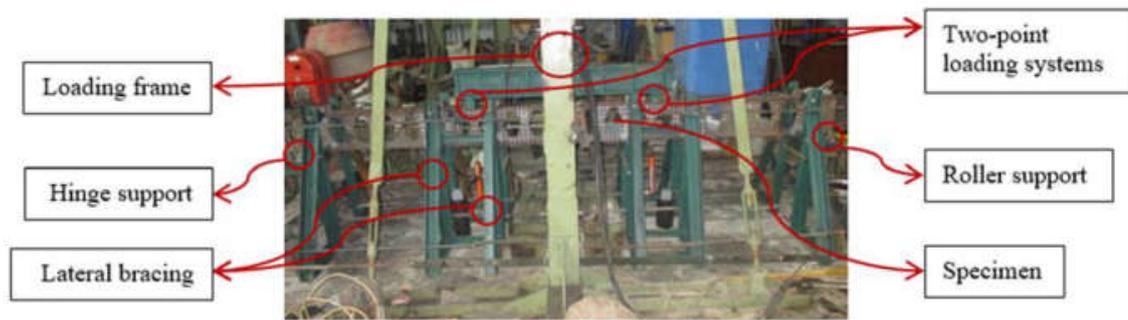
Penelitian Sonck & Belis (2016) bertujuan untuk melakukan studi analitik yang komprehensif mengenai tekuk lateral-puntir dari balok castellated yang didukung sederhana dengan lentur murni dan / atau beban yang terdistribusi secara merata.



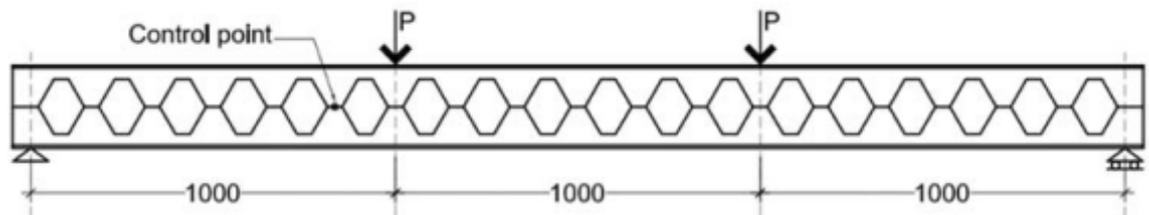
Gambar 2.5. Pengaturan pengujian balok tekuk terkekang lateral  
 Sumber : Journal of Structural Engineering 0733-9455 oleh Sonck dan Belis (2016)

Pengaturan pengujian balok tekuk terkekang lateral seperti pada gambar yaitu benda uji berada pada empat titik simetri yang akan dikenakan beban bengkok dengan kondisi balok tertumpu sederhana. Dan hasilnya adalah 3 balok castella yang di uji mengalami pola kegagalan akibat tekuk torsi lateral. Uji eksperimen tersebut merupakan validasi dari model numerik elemen hingga menggunakan ABAQUS 6.12. Pada numerik model mempertimbangkan ketidak sempurnaan material dan geometri dari balok castella. Balok di model pada kondisi elastis-plastis sempurna tanpa kondisi *hardening*. Perilaku elastis dimodelkan menggunakan modulus young ( $E$ )



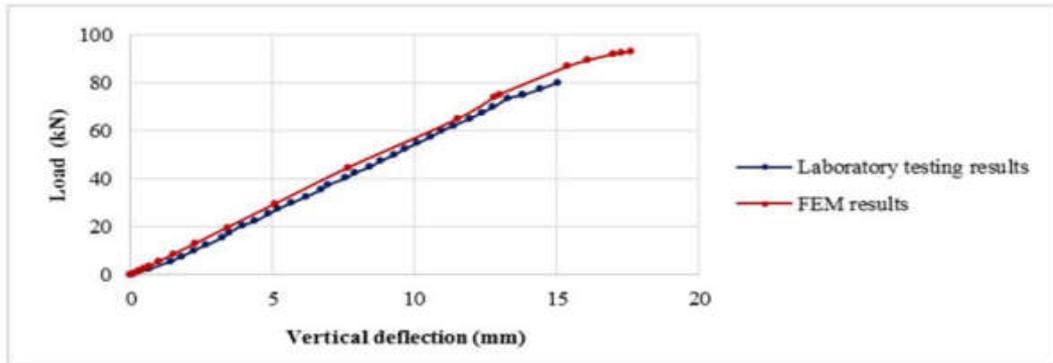


Gambar 2.7. Pengaturan alat pengujian  
 Sumber : ScienceDirect SCESCM oleh Budi, dkk (2016)



Gambar 2.8. Lokasi dari konsentrasi tegangan pada benda uji (titik kontrol)  
 Sumber : ScienceDirect SCESCM oleh Budi, dkk (2016)

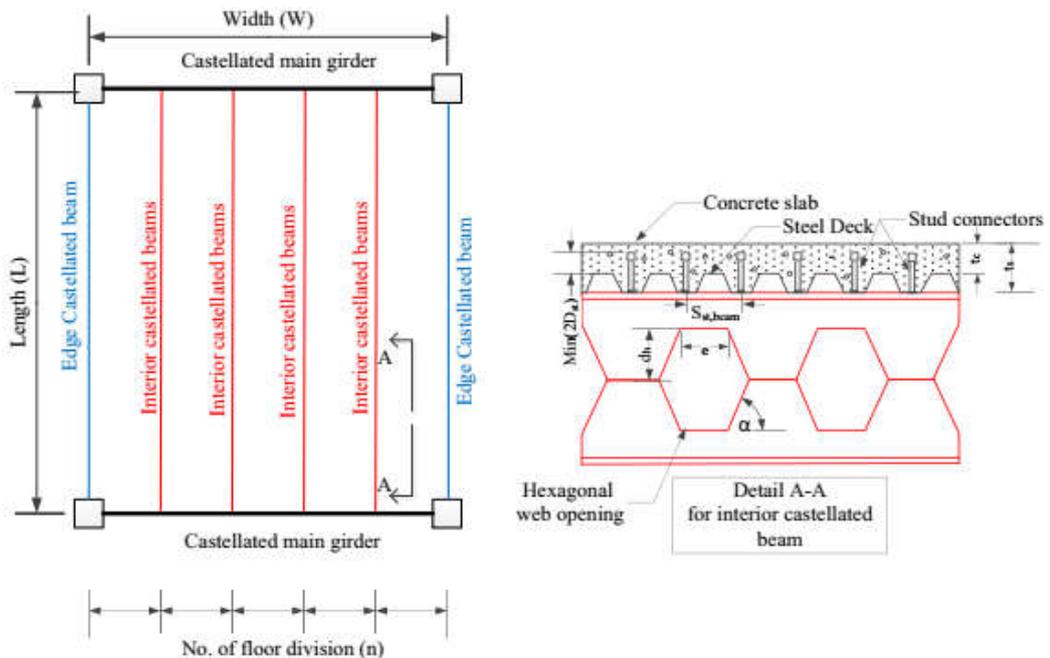
Diperoleh dasar dari optimalisasi kondisi sudut dari lubang hexagonal sebagai analisis konsentrasi tegangan model balok castella dengan tujuan menemukan lokasi konsentrasi tegangan. Analisa konsentrasi tegangan menghasilkan performa pada 5 model balok kastela dengan performa paling optimum berdasarkan lubang hexagonal. Hasil dari penelitian ini adalah tegangan konsentrasi pada model dengan sudut 45 derajat terletak pada sambungan las badan. Hasil yang lain adalah jarak lubang berpengaruh dengan lokasi konsentrasi tegangan maksimum. Maksimum konsentrasi tegangan berada di ujung area dari lubang hexagonal untuk jarak lubang yang lebih jauh. Sementara konsentrasi tegangan maksimum berpindah ke area sambungan badan untuk jarak lubang yang lebih pendek. Hasil tes laboratorium mirip analisis FEM dengan rata-rata rasio 1,011 dan nilai COV 0,069 sehingga metode elemen hingga yang digunakan untuk analisa model balok baja castella adalah valid. Grafik perbandingan antara analisis numerik dan uji eksperimental :



Gambar 2.9. Perbandingan antara analisis elemen hingga dan hasil uji laboratorium

Sumber : ScienceDirect SCESCM oleh Budi, dkk (2016)

Penelitian Yossef & Taher (2018) bertujuan untuk mengoptimalkan biaya lantai komposit dengan balok baja castella menggunakan algoritma genetik. Akurasi pemodelan sudah divalidasi pada kedua literature yang ada. Simulasi komparatif dilakukan untuk mengeksplorasi pengaruh dari berbagai parameter yang mempengaruhi dalam optimalisasi desain, dan jumlah pembagian lantai, dimensi lubang heksagonal, dan jumlah lubang pada badan juga dipertimbangkan.



Gambar 2.10. Detail system plat komposit

Sumber : Practice Periodical on Structural Design and Construction oleh Yossef dan Taher (2018)

Hasil dari penelitian ini menunjukkan perimeter – perimeter yang berpengaruh pada desain penggunaan balok baja castella pada sistem lantai komposit antara lain : A. Balok baja pada posisi tepi dengan derajat sambungan geser ( $n = 0,4$ ) akan memberikan desain yang kompetitif untuk girder castella komposit, B. Meminimalisir panjang potongan, batas dari hexagonal dimensi yang sudah ada. Lubang pada badan berasio dimensi ( $e/tw$ ) berbeda-beda nilainya berkisar dari 33 - 35. Rasio ( $2dh/e$ ) harus kurang dari 1,455 dan sudut ( $\alpha$ ) mendekati 30 derajat, C. untuk mereduksi pasca tekuk badan, rasio dimensi lubang pada badan bervariasi nilainya yaitu antara 19 s.d 34 dan rasio tinggi lubang untuk lebar harus kurang dari 2,28 dengan sudut ( $\alpha$ ) diantara 54,8 s.d 76,5 derajat dengan rata-rata nilai 62,12 derajat, D. Memperpendak jarak pada sambungan di ujung tidak direkomendasikan karena hal ini tidak berpengaruh pada optimasi harga material, E. Sambungan kaku sebagian dengan faktor pengekanan  $R=0,75$  untuk girder utama seharusnya menyimpan 10% dari komposit harga plat dengan sambungan ujung sederhana

## **2.2. Desain Sambungan Las Badan Baja Castella**

Pembentukan baja castella adalah dengan memotong secara longitudinal dan vertikal pada bagian badan dan kemudian menyambunginya lagi dengan sistem sambungan las pada badan untuk mendapatkan penambahan tinggi dari profil aslinya. Hal ini sangat menguntungkan dikarenakan bertambahnya tinggi profil maka akan menambah nilai modulus dan inersial profil. Las menjadi sangat penting pada proses pembuatan balok baja kastela tersebut. Pengertian las adalah proses penyambungan logam dengan membuat bagian yang disambung melebur (*coalescence*) menjadi satu kesatuan (Dewobroto, 2016). Sambungan dengan menggunakan las mempunyai fleksibilitas dan kekuatan yang baik dan menyamai batang utuh. Perencanaan kuat nominal sambungan las sesuai AISC LRFD dengan memperhatikan mutu las yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$P_u \leq \phi \times R_n \quad (2.1)$$

$$R_n = F_{nw} \times A_{we} \quad (2.2)$$

Keterangan :  $P_u$  = kuat nominal sambungan las

$\phi$  = 0,75

$R_n$  = momen tahanan

$F_{nw} = 0,6F_{exx}$  dengan  $F_{exx}$  adalah kuat Tarik kawat las

$A_{we}$  = Luas penampang las

Nilai  $F_{exx}$  adalah sebagai berikut :

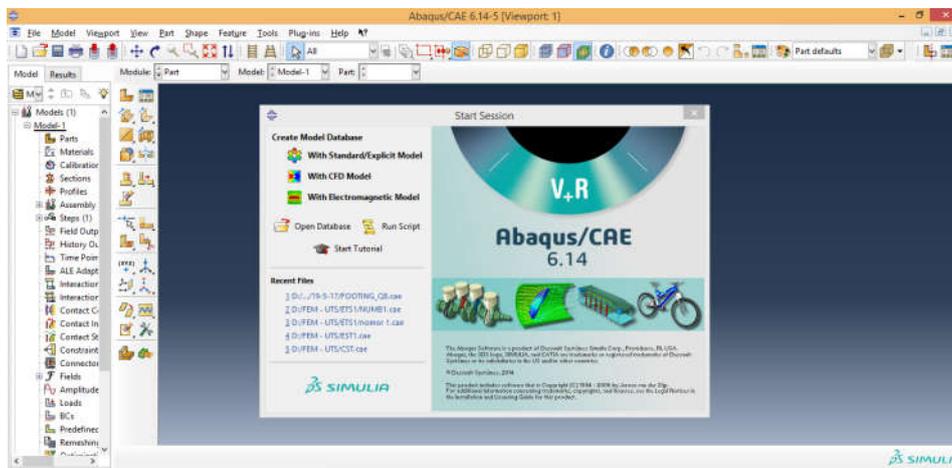
Mutu las E60xx = 430 MPa

Mutu las E70xx = 490 MPa

Mutu las E80xx = 550 MPa

### 2.3. Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metode elemen hingga banyak digunakan untuk analisis struktur mikro yaitu suatu komponen struktur yang khusus digunakan pada suatu bangunan. Pemodelan element dalam bentuk tiga dimensi yaitu pemodelan baja castella dengan bentuk hexagonal, octagonal dan diamond. Metode elemen hingga digunakan untuk menganalisis tegangan yang terjadi sebelum baja leleh dan pasca baja leleh. Logan Daryl L. 4<sup>th</sup> edition (2007) menjelaskan tentang metode elemen hingga adalah suatu cara numerik untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan matematika fisik. Permasalahan teknik dan matematika yang bisa diselesaikan dengan metode elemen hingga meliputi analisis struktur, perpindahan panas, aliran fluida, *mass transport*, energy potensial elektromagnetik.



Gambar 2.11. Perangkat lunak ABAQUS 6.14 untuk analisis metode elemen hingga.

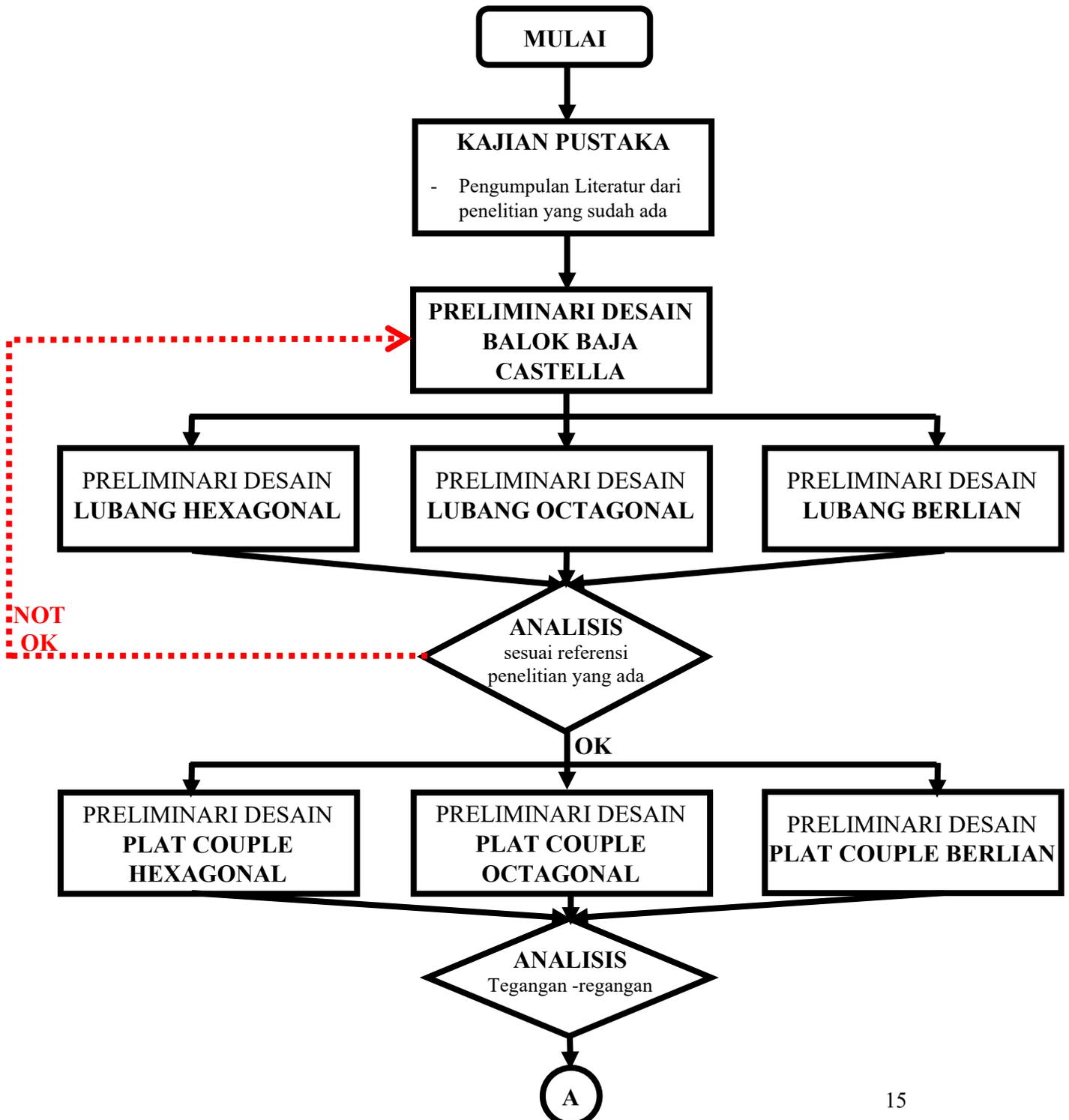
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

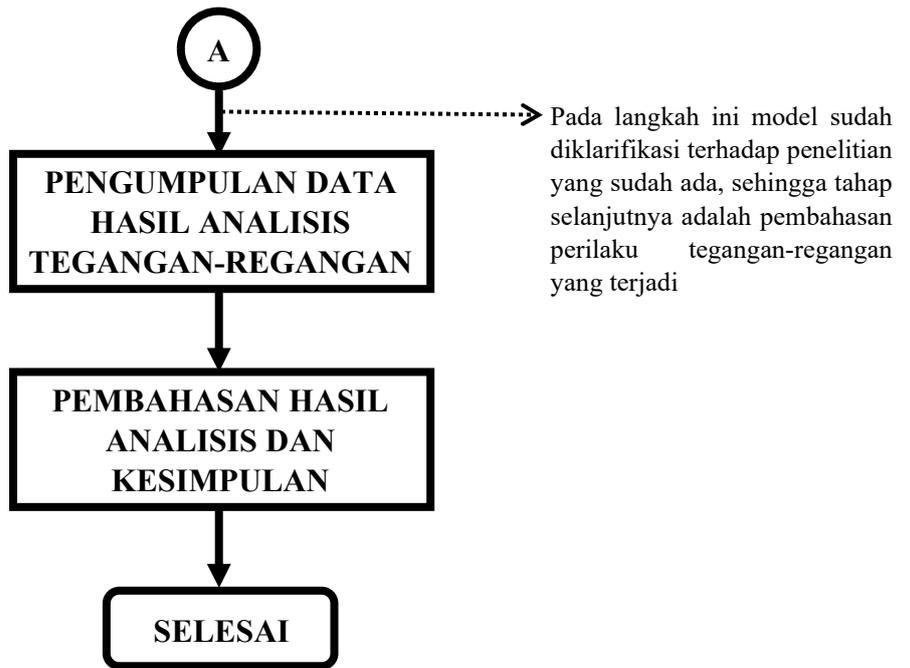
## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1. Bagan Alir Penelitian (*flow chart*)

Berikut bagan alir dari penelitian yang akan dilakukan :





### 3.2. Umum

Bab ini akan menjelaskan secara detail urutan dari penelitian secara analisis balok baja castella dengan variasi lubang geometri yang dipasang plat couple pada sambungan las menggunakan metode elemen hingga (MEH). Garis besar dari penelitian ini adalah mengetahui perilaku tegangan – regangan dari balok baja castella dengan variasi lubang geometri yang dipasang plat couple pada sambungan las ketika menerima beban aksial. Analisis yang dilakukan menggunakan program bantu abaqus versi 2019 yaitu suatu program analisis menggunakan metode elemen hingga

### 3.3. Studi Literatur dan Standart Code

Tujuan dari studi literature ini adalah mengetahui konsep awal (dasar) dalam analisis menggunakan metode elemen hingga. Konsep dasar tersebut penting diketahui guna analisis terhadap elemen yang rusak akibat gaya aksial yang terjadi. Penentuan batas – batasan dari permasalahan berdasarkan kepada hasil – hasil penelitian terdahulu dengan tujuan agar hasil yang didapatkan valid dan mendetail. Literature yang digunakan berasal dari jurnal, artikel dan buku – buku berbasis analisis terhadap balok baja castella. Peraturan (*standart code*) yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

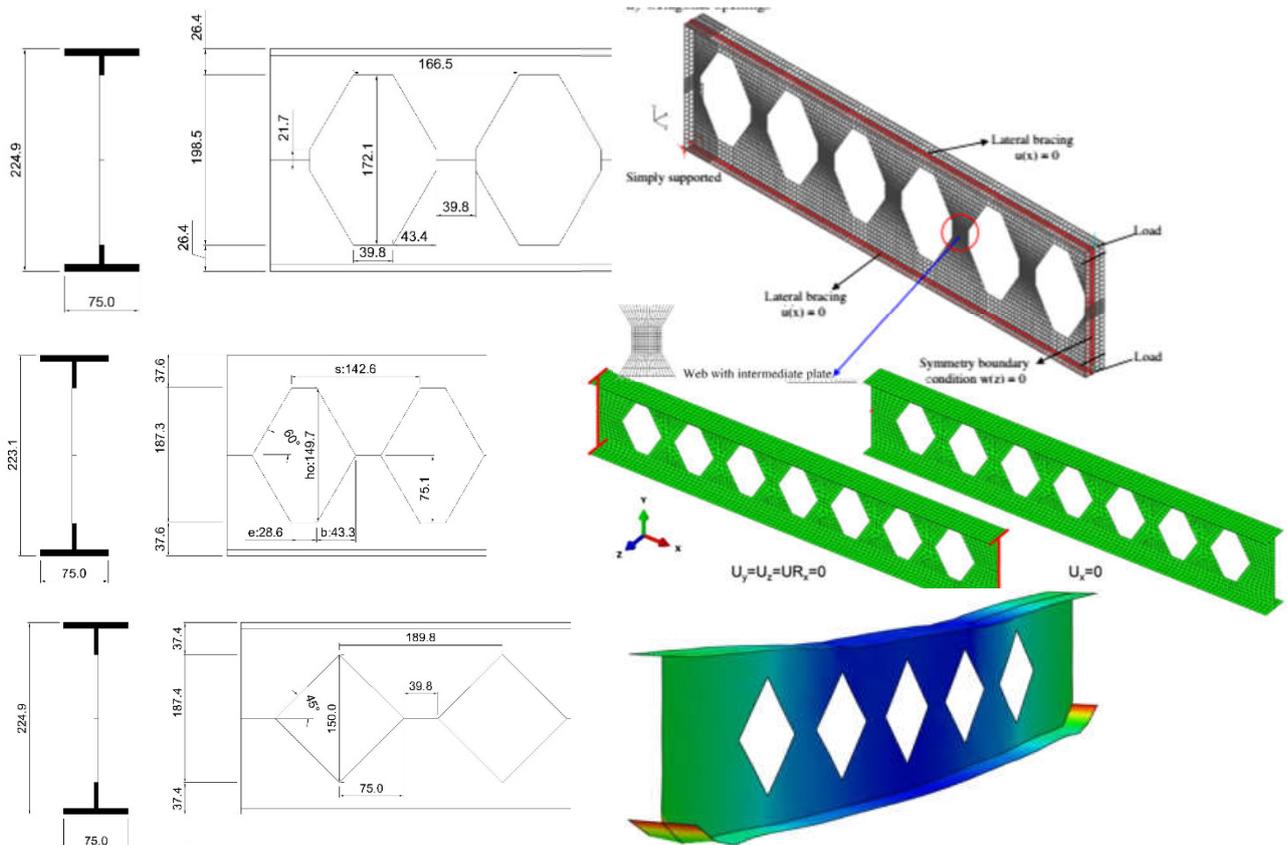
- a. ANSI / AISC 360-16 : Specification for Structural Steel Buildings
- b. Eurocode 3 : Design of steel structures

c. SNI 1729-2015. Tata cara perhitungan struktur baja struktural

### 3.4. Preliminari Desain

Data yang dikumpulkan berupa informasi terkait material dan geometri yang sudah pernah diteliti dalam literature meliputi dimensi (panjang, lebar profil, ukuran lubang, dan sudut lubang tersebut), mutu bahan baja kastela, serta material las sebagai sambungan badan. Terdapat 3 pemodelan geometri lubang baja kastela yang akan diteliti dan di analisis dengan mutu material BJ41 yaitu mempunyai kuat leleh ( $f_y$ ) 250 MPa dengan kuat tarik ( $f_u$ ) 410 MPa dan BJ50 yaitu mempunyai kuat leleh ( $f_y$ ) 290 MPa dengan kuat tarik ( $f_u$ ) 500 MPa.

Pemodelan dari 3 specimen material balok baja kastela yang telah di teliti menghasilkan pola (*mode*) kegagalan yaitu A. formasi mekanisme lentur, B. tekuk torsi lateral, C. formasi mekanisme Vierendeel, D. pecahnya sambungan las, E. geser tekuk pada dan F. tekuk tertekan pada badan. Pembahasan pada penelitian ini adalah pada kegagalan akibat sambungan las. Dimensi yang digunakan adalah tabel WF 150x75x5x7 menjadi castella 225x75x5x7mm dan berikut rencana pemodelan 2 dimensi dan pemodelan elemen hingga pada penelitian ini :



Gambar 3.1. Tipe tipe benda uji yang digunakan:  
 a. Balok kastela dengan geometri octagonal,  
 b. Balok kastela dengan geometri hexagonal,  
 c. Balok kastela dengan geometri berlian

dengan detail profil yang akan di teliti sebagai berikut :

Tabel 3.1. Profil Baja Castella 225x75x5x7mm dengan panjang 3.000 mm

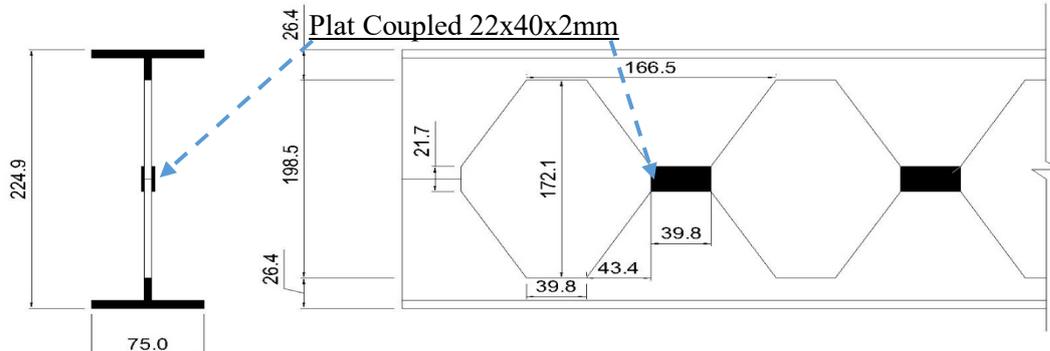
NO.	PROFIL BAJA (mm)				MUTU BAJA				PROFIL LUBANG CASTELLA							LUBANG CASTELLA
	H	B	tw	tf	Jenis	(fy)	(fu)	(%)	ho	b (mm)	e (mm)	ntotal	e/ho (ratio)	°	s	
1	225	75	5	7	BJ 41	250	410	18	149,74	43,50	39,83	48,00	0,27	60	166,66	Hexagonal
2	225	75	5	7	BJ 41	250	410	18	172,10	43,40	39,83	48,00	0,23	60	166,46	Octagonal
3	225	75	5	7	BJ 41	250	410	18	150,00	75,00	39,83	42,00	0,27	45	189,83	Diamond
4	225	75	5	7	BJ 50	290	500	16	149,74	43,50	39,83	48,00	0,27	60	166,66	Hexagonal
5	225	75	5	7	BJ 50	290	500	16	172,10	43,40	39,83	48,00	0,23	60	166,46	Octagonal
6	225	75	5	7	BJ 50	290	500	16	150,00	75,00	39,83	42,00	0,27	45	189,83	Diamond

Data material yang digunakan adalah sebagai berikut :

Modulus Young (E) : 200.000 MPa

Poison Rasion : 0,3

Profil balok baja awal adalah WF 150x75x5x7 yang mengalami modifikasi menjadi profil balok baja castella 225x75x5x7 seperti detail gambar yang mengadopsi dari penelitian Budi dkk (2017) sebagai berikut :



Gambar 3.2. Detail Preliminari Profil Balok Baja Castella

### 3.5. Perhitungan Analisis

Perforasi yang dibuat pada badan kastela sangat mempengaruhi kinerja struktural balok. Oleh karena itu, perlu dilakukan analisis secara praktis untuk memberikan perforasi yang optimal pada balok. Berikut ini adalah pedoman umum yang diberikan oleh Eurocode dan beberapa di antaranya didasarkan pada pertimbangan lapangan atau praktis. Standar-standar ini digunakan dalam perforasi web dan dapat diubah atau dimodifikasi tanpa mempengaruhi kinerja

struktural balok. Pedoman ini adalah sebagai berikut :

$$1,08 < \frac{S}{D_o} < 1,5 \quad (3.1)$$

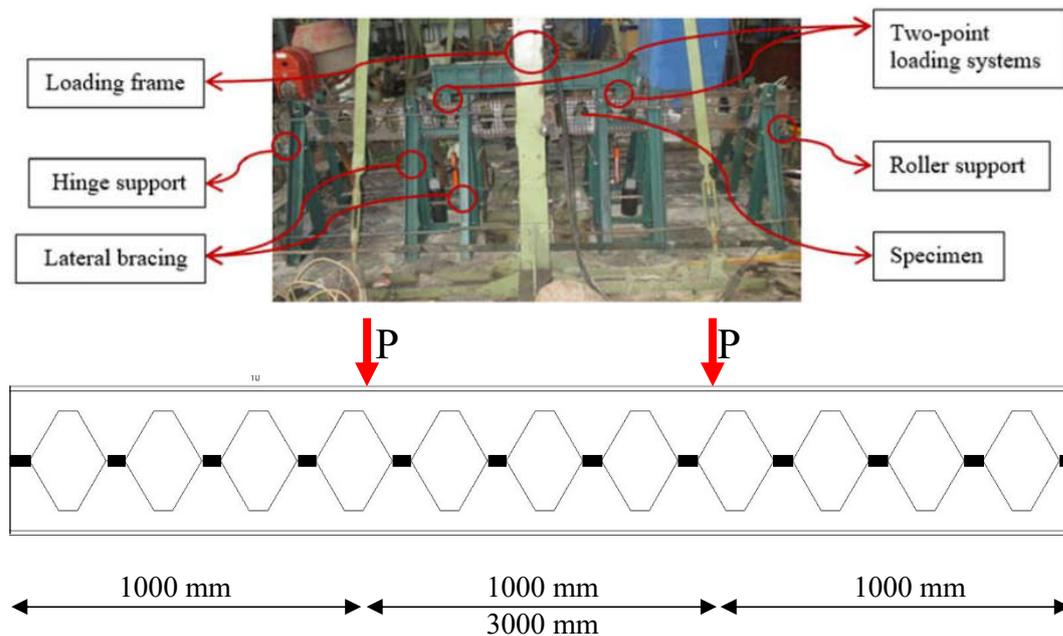
$$1,25 < \frac{D}{D_o} < 1,75 \quad (4.1)$$

$$D_o \leq 0,8 D \quad (5.1)$$

$$e \leq 0,4 D_o \quad (6.1)$$

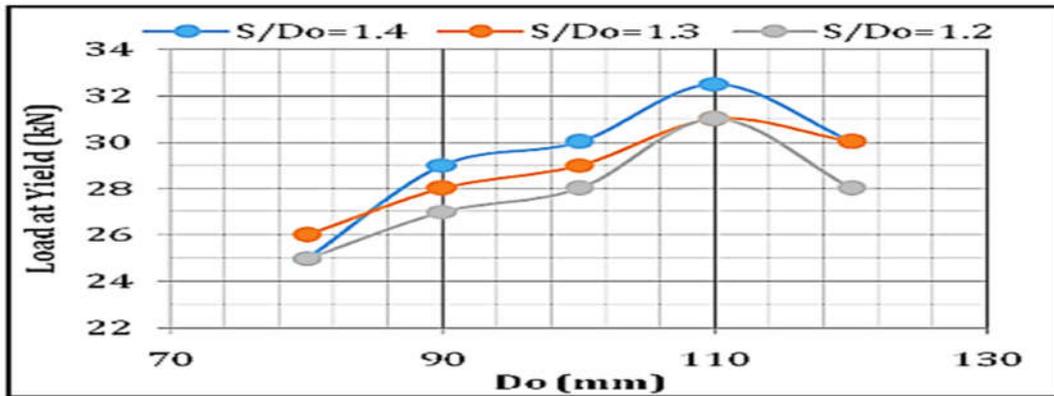
- dimana :
- $D_o$  = Tinggi lubang pada badan profil
  - $D$  = Tinggi profil
  - $S$  = Jarak as antar lubang (C/C)
  - $e$  = Jarak bersih antar lubang
  - $b$  = Lebar sayap dari balok I
  - $t_f$  = Tebal sayap dari balok I
  - $t_w$  = Tebal badan dari balok I

Pembebanan terjadi pada pertengahan bentang balok baja kastela dengan kategori beban terpusat.



Gambar 3.3. Pembebanan Balok Baja Castella Budi, dkk (2017)

Dan kemudian hasil tersebut disampaikan pada grafik untuk perbedaan jarak antar lubang berbanding dengan tinggi profil ( $S/D_o$  dan  $D/D_o$ ) sebagai berikut :



Gambar 3.4. Variasi pada beban leleh berdasarkan perbedaan S/Do dan D/Do balok baja kastela geometri lingkaran

Pada desain sambungan las badan balok baja kastela menggunakan jenis sambungan las tumpul dengan memperhatikan kuat tarik las berdasarkan kriteria leleh penampang utuhnya sebagai berikut :

$$\phi P_n = 0,9 \times F_y \times A_g \quad (7)$$

dimana :  $F_y$  = Kuat leleh

$A_g$  = Luas penampang

Pada perhitungan kekuatan lentur dan tekuk yang terjadi pada badan diperiksa dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{M_{max}}{M_e} < \left[ C_1 \left( \frac{S}{D_o} \right) - C_2 \left( \frac{S}{D_o} \right)^2 - C_3 \right]$$

Dimana :  $M_{max}$  = momen kritis pada profil badan

$$M_e = \text{tahanan daro momen kritis badan} = \frac{t_w x P_y x (s-2b)^2}{2}$$

$$C_1 = 5,097 + 0,1464 \left( \frac{D_o}{t} \right) - 0,00174 \left( \frac{D_o}{t} \right)^2$$

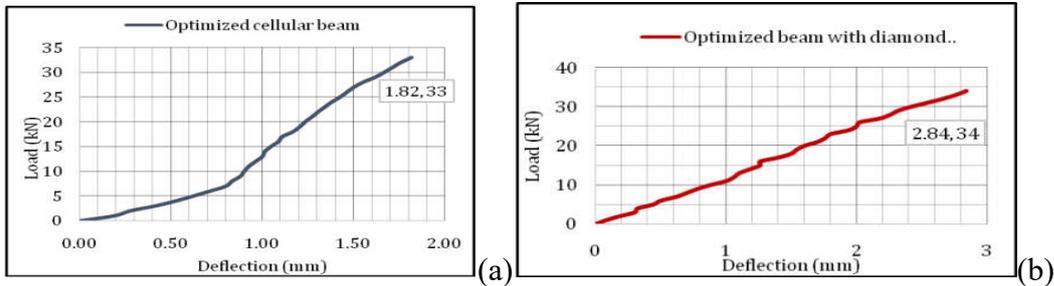
$$C_2 = 1,441 + 0,0625 \left( \frac{D_o}{t} \right) - 0,000683 \left( \frac{D_o}{t} \right)^2$$

$$C_3 = 3,645 + 0,0583 \left( \frac{D_o}{t} \right) - 0,00108 \left( \frac{D_o}{t} \right)^2$$

### 3.6. Perbandingan Performa Profil Balok Kastela

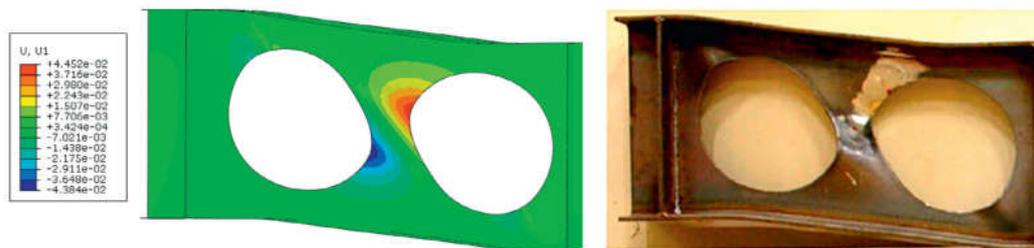
Hasil Analisa ditampilkan dalam bentuk grafik perbandingan yang menunjukkan performa profil balok baja kastela berdasarkan variasi geometri dalam menerima beban. Performa terbaik ditinjau berdasarkan tegangan dan nilai

lendutan yang terjadi. Berikut hasil analisis terhadap balok baja kastela yang sudah ada :



Gambar 3.5.a). Grafik kurva perbandingan antara beban dengan lendutan pada balok baja kastela geometri lingkaran, b). Grafik kurva perbandingan antara beban dengan lendutan pada balok baja kastela geometri diamond

Diagram tegangan – regangan yang terjadi pada analisis elemen hingga, merupakan visual dari simulasi pengujian eksperimental yang dilakukan di laboratorium. Wang, dkk (2014) melakukan penelitian pada kapasitas tekuk geser vertikal pada badan dari balok baja castella dengan lubang badan hexagonal terfillet. Perbandingan antara simulasi mode tertekuk diperoleh dari hasil uji eksperimental dengan hasil kegagalan tekuk terjadi pada badan. Prediksi deformasi perubahan bentuk menggunakan simulasi elemen hingga memberikan hasil yang sangat baik.



Gambar 3.6. Perbandingan dari prediksi elemen hingga dengan hasil uji eksperimental karena beban defleksi pada balok baja castella dengan lubang lingkaran.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Rasio Tinggi Profil terhadap Lubang

Profil kastella mempunyai bentuk geometri dengan inersia yang lebih tinggi dibanding dengan profil aslinya (Profil I). Perubahan geometri tersebut menurut hasil penelitian Sonck (2016) yaitu bertambah sekitar 40 – 60% dari profil aslinya sehingga kekuatan juga bertambah. Optimasi dari profil kastela pada penelitian sebelumnya, menjadi dasar pada penelitian ini dengan menambahkan plat coupled pada sambungan tengahnya. Optimasi yang dilakukan pada penelitian Budi, dkk (2017) untuk rasio antara jarak dan tinggi lubang profil adalah antara  $0,186h_o$  sampai dengan  $0,266h_o$  dengan sudut lubang ( $\alpha$ )  $60^\circ$ . Pada penelitian ini menggunakan dua jenis sudut lubang yaitu  $45^\circ$  dan  $60^\circ$  yang diambil dari hasil penelitian sebelumnya. Profil awal yang digunakan adalah  $150 \times 75 \times 5 \times 7$  mm yang dipotong secara horizontal pada tengah bentang sehingga menjadi profil kastella  $225 \times 75 \times 5 \times 7$  mm. Panjang bentang (L) klarifikasi dan panjang bentang pada penelitian ini adalah 3m. Adapun detail profil pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 sebagai berikut :

Tabel 4.1 Detail Profil Balok Baja Castela  $225 \times 75 \times 5 \times 7$

NO.	PROFIL LUBANG CASTELLA								LUBANG CASTELLA
	ho	b (mm)	e (mm)	n total	e/ho (ratio)	$\alpha$	s	hp	
1	150	43,50	39,8	48,00	0,27	60	166,7	-	Hexagonal
2	172	43,40	39,8	48,00	0,23	60	166,5	21,7	Octagonal
3	150	75,00	39,8	42,00	0,27	45	189,8	-	Diamond
4	150	43,50	39,8	48,00	0,27	60	166,7	-	Hexagonal
5	172	43,40	39,8	48,00	0,23	60	166,5	21,7	Octagonal
6	150	75,00	39,8	42,00	0,27	45	189,8	-	Diamond

Keterangan :

ho : tinggi dari lubang kastela

b : proyeksi jarak horizontal pada lubang castela

e : lebar dari jarak horizontal pada badan.  $\left(\frac{L-(n_{total} \cdot 2 \cdot b)}{2 \cdot n_{total}}\right)$

n : jumlah total lubang castela

e/ho : rasio

$\alpha$  : sudut lubang

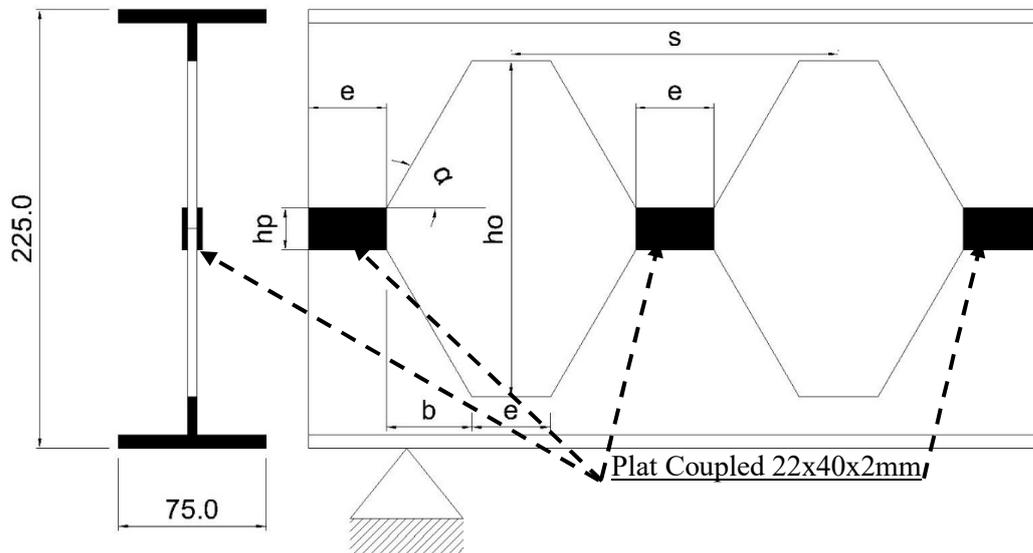
s : jarak antar titik lubang.

Profil Hexagonal dan Octagonal =  $2e + 2b$

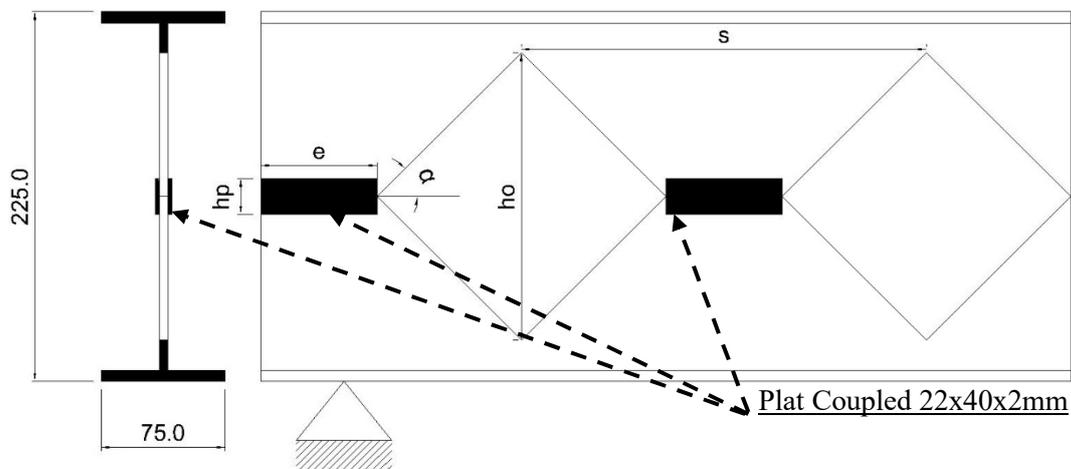
Profil Berlian =  $ho + b$

hp : tinggi vertical antar lubang = lebar plat couple

profil couple : panjang 39,8mm, lebar 21,7mm dengan tebal 2,5mm



Gambar 4.1. Detail Profil Kastela Hexagonal dan Octagonal



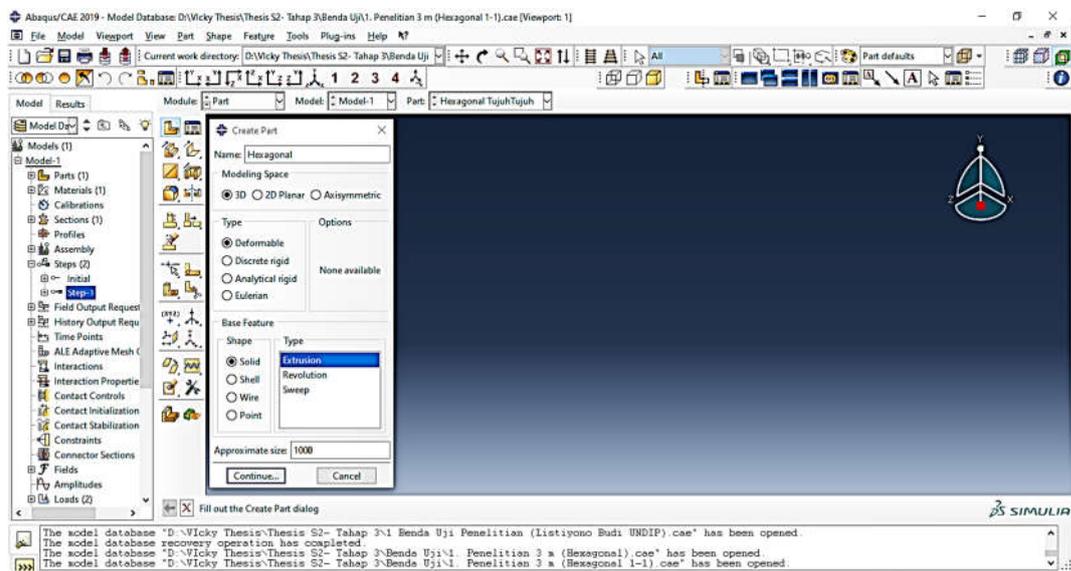
Gambar 4.2. Detail Profil Kastela Berlian

## 4.2. Verifikasi Pemodelan Terhadap Uji Eksperimental Penelitian Terdahulu

Penelitian Budi dkk (2017) adalah yang menjadi rujukan pada penelitian ini. Pada penelitian tersebut bertujuan melakukan analisis optimalisasi terhadap ukuran dan jarak dari lubang hexagonal balok baja castela. Pada penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dengan pemodelan yang merujuk pada profil penelitian Budi dkk (2017). Indikator pemodelan dinyatakan terverifikasi dengan hasil uji eksperimental apabila hasil analisis elemen hingga terhadap kuat tekan (*Force*) dan lendutan (*displacement*) yang dihasilkan tidak lebih dari 5% hasil penelitian terdahulu. Tahapan - tahapan proses verifikasi pemodelan penelitian ini menggunakan abaqus (*preprocessing*) sebagai berikut :

### 4.2.1. Membuat Pemodelan Profil Baja Castella sesuai Penelitian

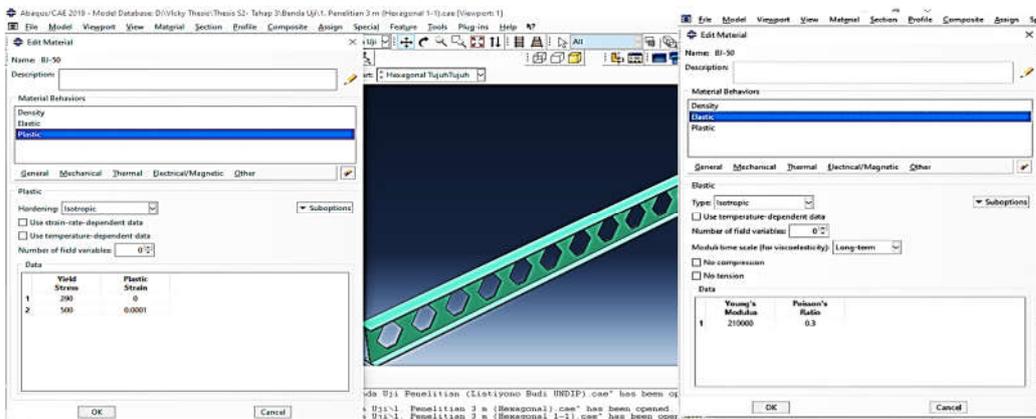
Gambar 4.3. menunjukkan pengaturan profil yang digunakan untuk pemodelan yaitu balok baja castella dengan dimensi 225x75x5x7mm dengan model 3 dimensi, type deformable, bentuk solid extrusion dengan tujuan menghasilkan analisis yang sama atau mendekati hasil pada uji eksperimental yang pada penelitian budi, dkk (2017) yang sudah ada.



Gambar 4.3. Pengaturan “Create Part Abaqus”

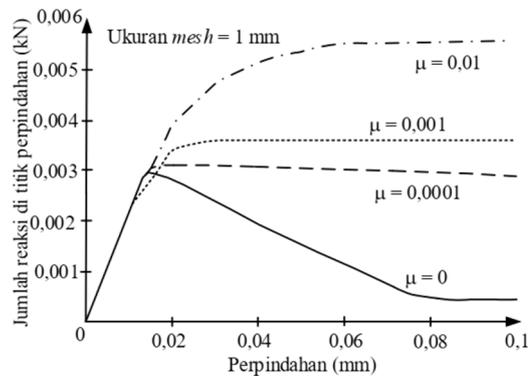
#### 4.2.2. Penentuan Mutu Material Baja (*Material Properties*)

Sifat mekanis untuk balok baja castella yang digunakan pada penelitian ini dijelaskan pada gambar 4.4 yaitu mutu BJ41 dan BJ50. Tahapan verifikasi pemodelan ini menggunakan balok baja mutu BJ50 dengan tegangan leleh ( $f_y$ ) 290 MPa dan tegangan putus minimum ( $f_u$ ) 500 MPa. Nilai regangan yang ditentukan menyesuaikan nilai pada baja pada umumnya. Modulus elastisitas yang digunakan adalah 210.000 MPa dan nilai poisson rasio 0,3. Poisson rasion merupakan konstanta elastisitas yang dimiliki setiap material yang merupakan perbandingan dari perubahan bentuk ke arah gaya dan perubahan bentuk ke arah tegak lurus arah gaya.



Gambar 4.4. Penentuan Mutu Material Balok Baja Castella

Penentuan nilai *plastic strain* berdasarkan grafik hubungan *viscosity* dan perpindahan oleh Michal dan Andrzej (2015) dalam penelitian Irawan, C., (2019). Pada penelitian tersebut menyatakan rekomendasi nilai viscosity parameter adalah 0,0001.



Gambar 4.5. Hubungan viscosity dan beban-perpindahan

Persamaan dalam menentukan regangan plastis didalam Abaqus dengan menggunakan nilai tegangan yang ditetapkan pada penelitian ini sebagai berikut :

$$\epsilon_p = \epsilon - \sigma/E \tag{4.1}$$

$$\epsilon = \epsilon_{nom} - \sigma_{nom}/E \tag{4.2}$$

$$\sigma_{nom} = 1+\epsilon_{nom} \tag{4.3}$$

dimana :  $\sigma_{nom}$  = Tegangan Nominal / Tegangan Rekayasa (Mpa)

$\epsilon_{nom}$  = Regangan Nominal / Regangan Rekayasa (%)

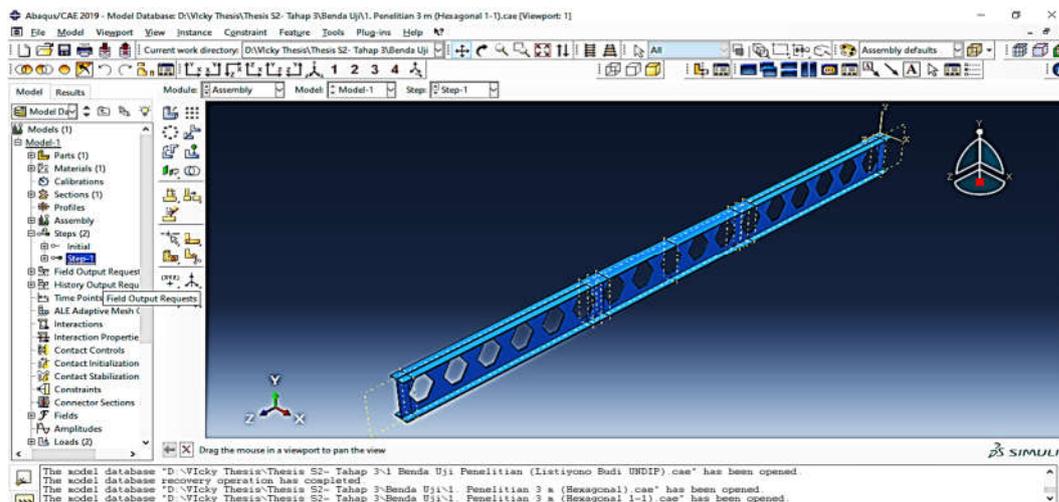
$\sigma$  = Tegangan Sebenarnya (Mpa)

$\epsilon$  = Regangan Sebenarnya (%)

E = Modulus Young (MPa)

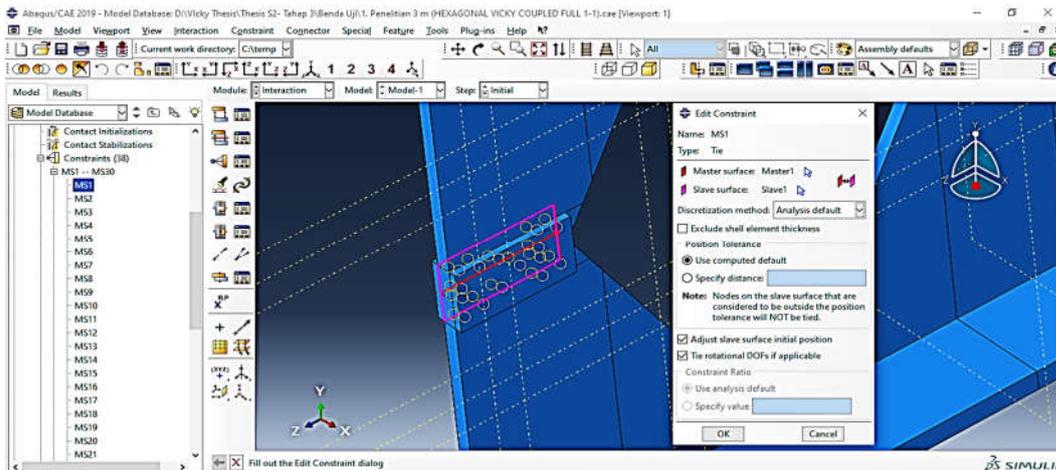
#### 4.2.3. Membentuk Titik dan Permukaan Pembebanan (*Assembly*)

Pada analisis elemen hingga menggunakan Abaqus, tahap *assembly* adalah tahap yang digunakan untuk menentukan pembagian section dari profil menggunakan datum pada jarak – jarak tertentu. Gambar 4.6 titik tumpuan (*boundary condition*) dan titik pembebanan. Sehingga pada tahap *assembly* adalah kombinasi dari bagian-bagian untuk dijadikan satu bentuk atau model.



Gambar 4.6. Tahap *Assembly* Balok Baja Castella

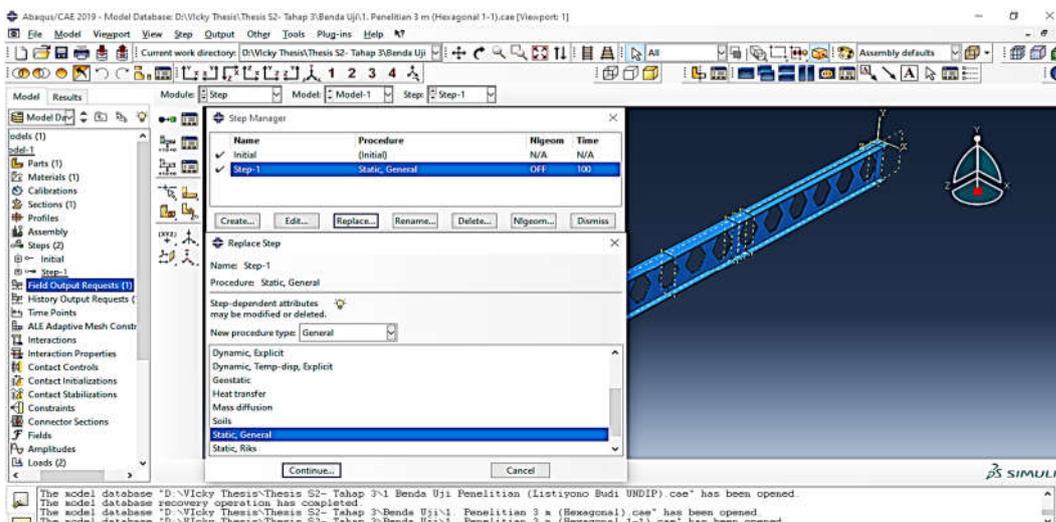
Gambar 4.7 menunjukkan hubungan interaksi baja castella dan plat couple menggunakan type constraint “tie” dengan tujuan mendapatkan hasil yang ideal jika nodes yang berhadapan antara badan balok baja castella (*master*) dengan permukaan plat couple yang menempel (dilas) ke badan balok baja castella (*slave*) memiliki gerak dengan keseragaman meshing.



Gambar 4.7. Tahap *Assembly* Interaksi Balok Baja Castella dengan plat coupled

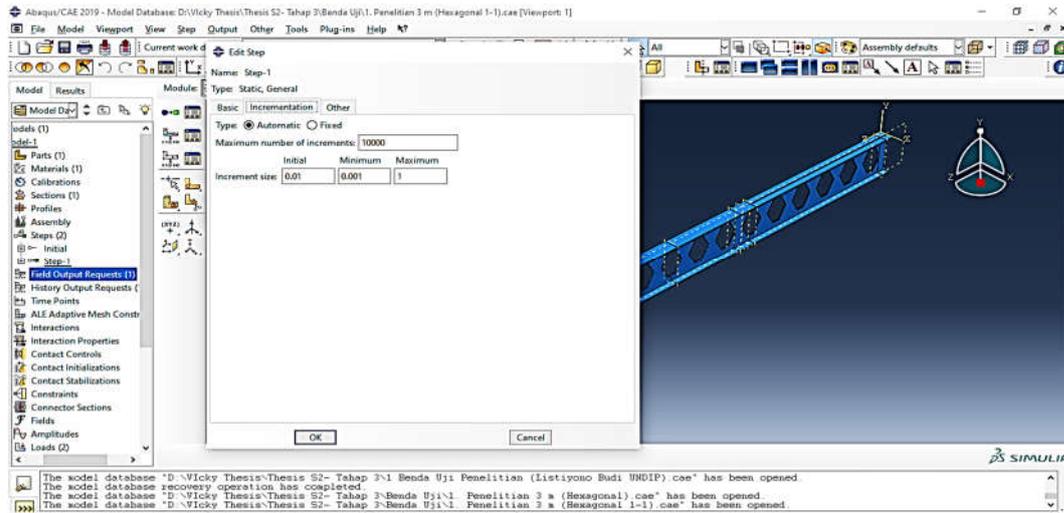
#### 4.2.4. Penentuan Step Analisis

Tahap ini merupakan penentuan dari pemilihan solusi penyelesaian analisis pemodelan menggunakan Abaqus. Penelitian ini menggunakan prosedur solusi penyelesaian static-general yaitu beban yang terjadi pada profil balok baja castella dengan jenis beban monotonic seperti pada gambar 4.8 berikut :



Gambar 4.8. Tahap Penentuan Solusi Penyelesaian Analisis

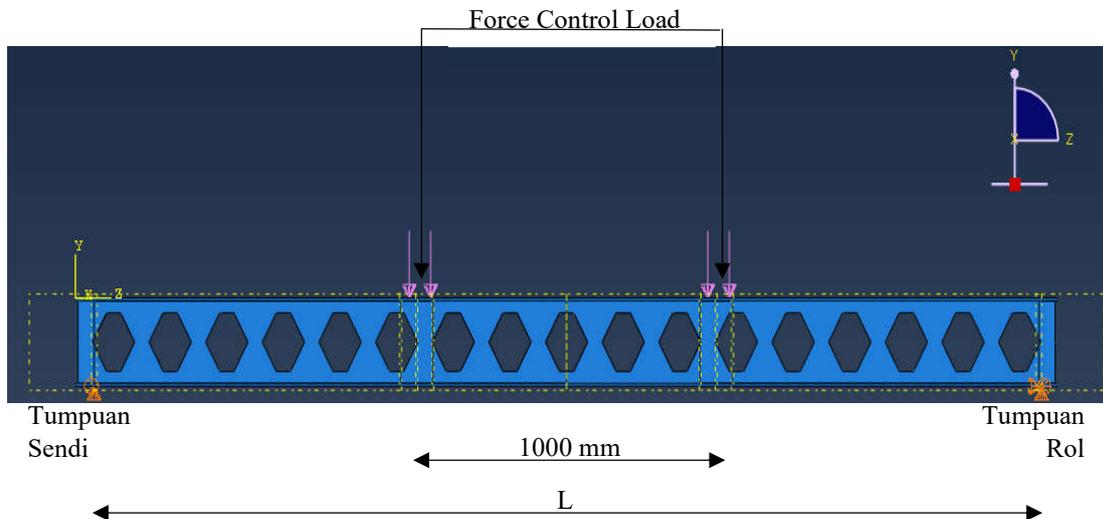
Selanjutnya adalah tahap penentuan *time period* dan penentuan jumlah *increment* untuk mencapai analisis tahap plastis. Penentuan kedua unsur tersebut dijelaskan pada gambar 4.9 yaitu tahap “*step*” yang merupakan penentu keberhasilan analisis terhadap konvergensi pada setiap meshing yang dilakukan dipemodelan tersebut.



Gambar 4.9. Tahap Penentuan Jumlah Time Period dan Jumlah Increment.

#### 4.2.5. *Boundary Condition* dan Pembebanan

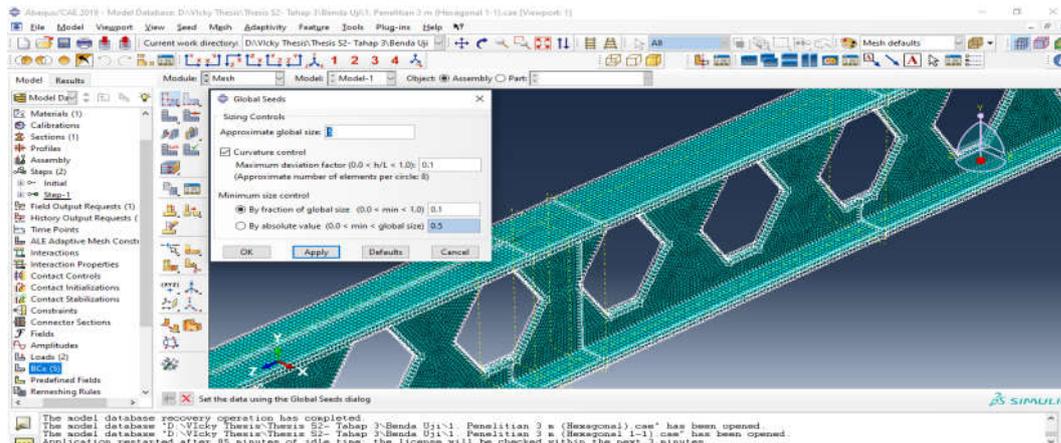
Penentuan tumpuan diujung adalah sendi-rol sesuai dengan kondisi pengujian eksperimental. Beban yang diberikan merupakan beban terpusat static dengan nilai 75 kN (Budi, dkk : 2017). Gambar 4.10 menunjukkan beban *force control* yang digunakan sesuai dengan metode pada eksperimental yang ada.



Gambar 4.10. Model pembebanan dan tumpuan sendi-rol.

#### 4.2.6. Meshing Profil Material

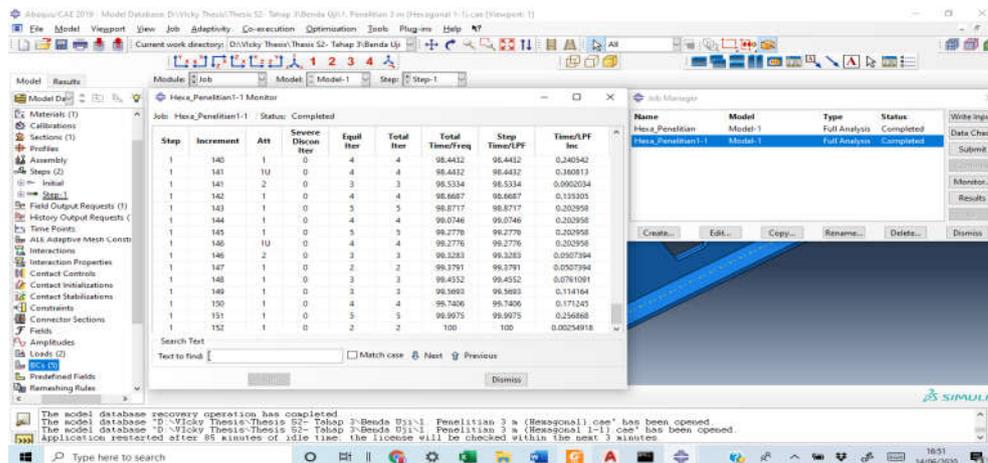
Pada gambar 4.11 adalah proses membagi menjadi bagian – bagian kecil (sesuai dengan elemen – elemen dan nodes), dapat mempengaruhi konvergensi dari hasil analisis. Penentuan jumlah elemen meshing sangat mempengaruhi hasil analisis yaitu semakin banyak jumlah elemen maka hasil analisisnya semakin detail dan membutuhkan waktu ”running” analisisnya.



Gambar 4.11. Meshing Balok Baja Castella Hexagonal.

#### 4.2.7. Hasil Analisis (Post Processing)

Tahap selanjutnya melakukan *submit job* untuk melakukan analisis seperti pada gambar 4.12. Pada tahap ini, dibutuhkan durasi waktu 120 menit untuk mendapatkan hasil analisis dari penelitian ini berupa nilai beban, perpindahan, dan tegangan – regangan.



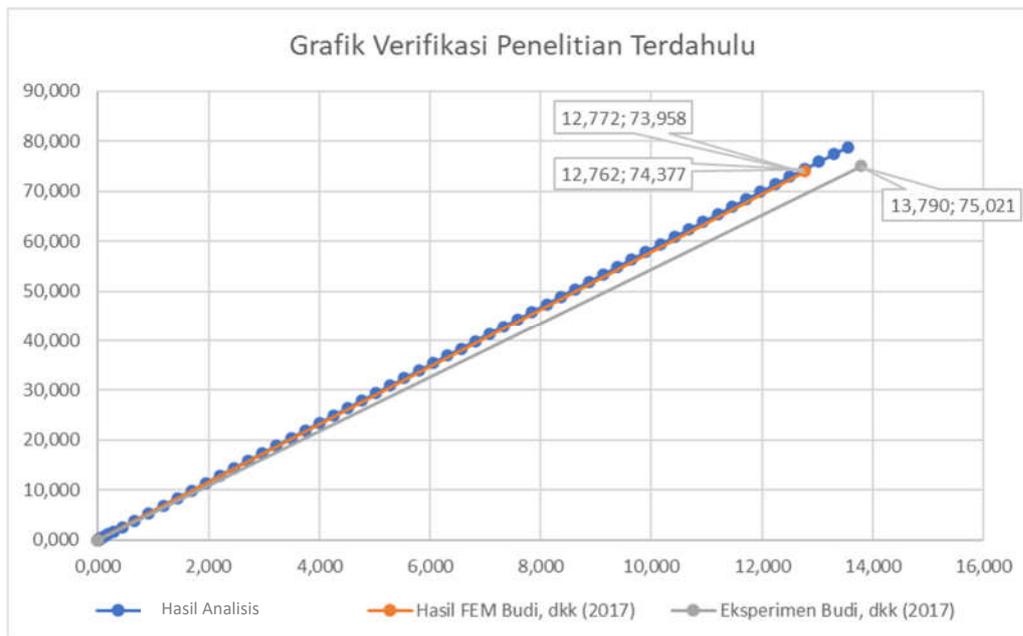
Gambar 4.12. Submit Job Analysis.

Pada penelitian ini menghasilkan nilai analisis yang akan dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Indikator tahap verifikasi ini adalah nilai beban dan perpindahan uji eksperimental dan hasil analisis elemen hingga seperti yang dijelaskan pada tabel 4.2 sebagai berikut :

Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Analisis dan Hasil Penelitian Terdahulu

	Hasil Analisis	Budi, dkk. (2017)		ratio		
		FEM	Eksperimental	(b/a)	(c/b)	(c/a)
	(a)	(b)	(C)			
P (kN)	74,377	73,958	75,021	0,994	1,014	1,009
Disp. (mm)	12,762	12,772	13,790	1,001	1,080	1,081
Ratio (P/Disp)	5,828	5,791	5,440	0,994	0,939	0,933
Rata - Rata				0,996	1,011	1,008
Deviasi				1,478%		0,360%

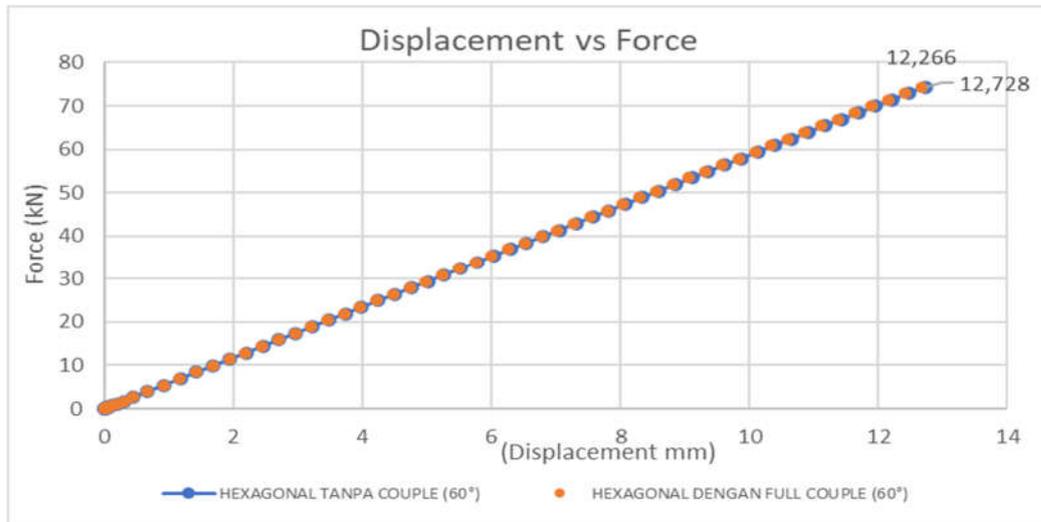
Hasil analisis pemodelan tersebut menunjukkan selisih deviasi terhadap hasil penelitian terdahulu yang cukup baik yaitu dengan hasil deviasi dibawah 5%. Sehingga tahap – tahap pemodelan tersebut dinyatakan layak untuk digunakan pada analisis profil selanjutnya. Gambar 4.13 menunjukkan grafik verifikasi yang menunjukkan hasil berhimpit antara data penelitian terdahulu dan penelitian ini.



Gambar 4.13. Grafik Verifikasi Hasil Analisis Pemodelan Budi, dkk (2017) dengan Hasil Analisis Penelitian ini.

### 4.3. Perilaku Balok Baja Castella dengan lubang Hexagonal

Analisis yang dilakukan pada balok baja castella menghasilkan perilaku struktur yaitu hubungan antara gaya – perpindahan, tegangan – regangan. Adapaun grafik hubungan gaya (kN) dan perpindahan (mm) seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.14 berikut :



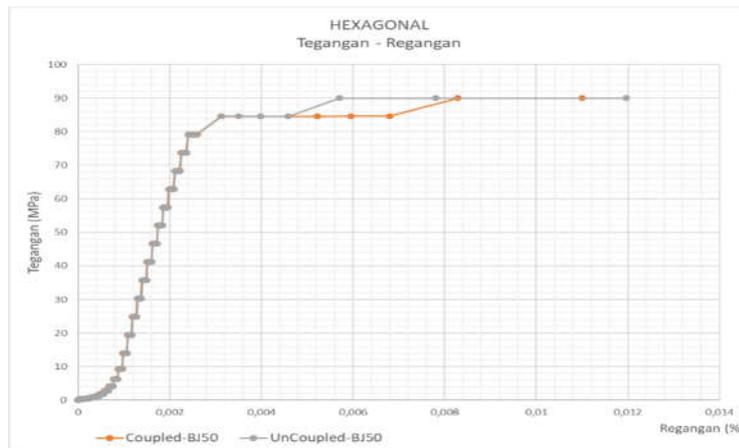
Gambar 4.14. Grafik Hubungan gaya – perpindahan balok baja castella hexagonal.

Ringkasan nilai – nilai dari gaya dan perpindahan balok baja castella profil hexagonal ditampilkan pada tabel berikut :

Tabel 4.3 Tabel Gaya dan Displacement Balok Baja Castella Profil Hexagonal

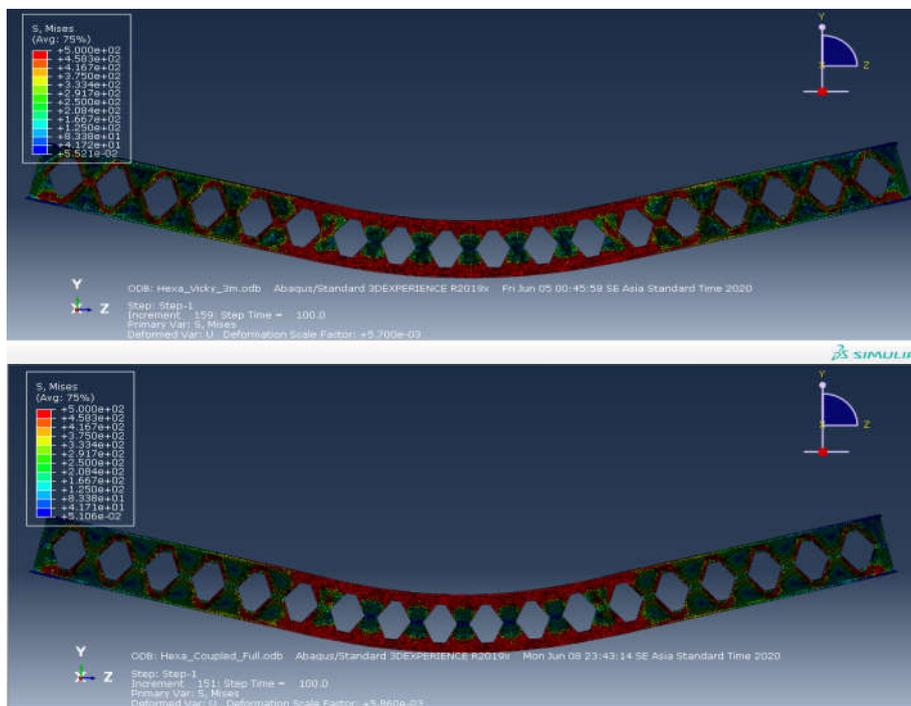
NO.	BENDA UJI	GAYA	DISPLACEMENT
		(kN)	(mm)
1	Tanpa Couple	74,377	12,728
2	Dengan Couple	74,377	12,666

Berdasarkan hasil analisis tersebut, menunjukkan bahawa penambahan plat couple pada area las badan mempunyai pengaruh yang tidak signifikan terhadap nilai displacement sesuai pada tabel 4.3 diatas. Pengaruh tersebut ditunjukkan pada grafik tegangan – regangan yang terjadi pada balok baja castella dengan couple dan tanpa couple seperti yang dijelaskan pada gambar 4.15 sebagai berikut:



Gambar 4.15. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Balok Baja Castella Hexagonal dengan Couple atau Tanpa Couple.

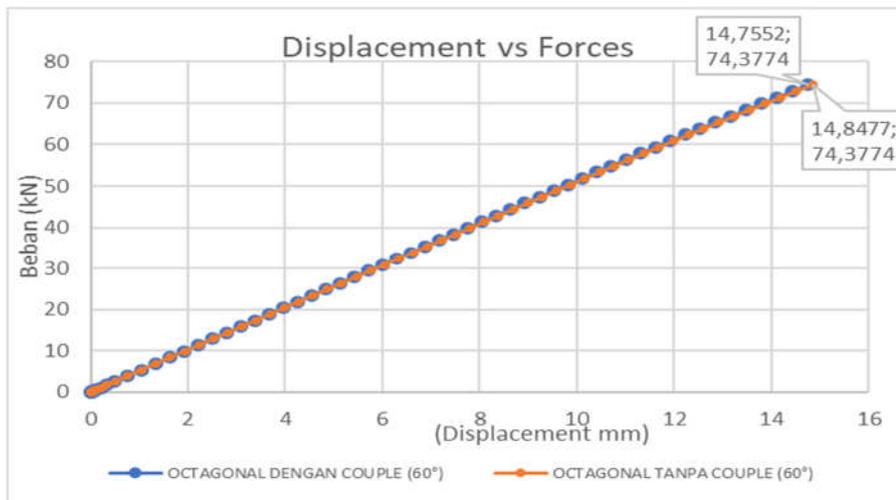
Tinjauan lanjut yaitu pada perilaku tegangan regangan yang terjadi sesuai gambar 4.15 yaitu perilaku tegangan – regangan yang terjadi pada profil balok castella dengan profil lubang hexagonal antara balok yang dipasangkan dengan plat coupled pada area las badan dan balok yang tidak dipasangkan plat coupled menunjukkan nilai yang tidak signifikan. Hal tersebut dapat ditinjau pada visualisasi tegangan pada gambar 4.16 berikut :



Gambar 4.16. Perilaku tegangan – regangan balok baja castella hexagonal. a). Hexagonal tanpa coupled. b). Hexagonal dengan Coupled

#### 4.4. Perilaku Balok Baja Castella dengan lubang Octagonal

Analisis pada balok baja castella dengan lubang octagonal mempunyai geometri yang cukup kompleks. Terdapat tekukan pada balok baja castella lubang octagonal, sehingga pada proses fabrikasi lebih lengkap dan membutuhkan keahlian dengan ketelitian yang baik sehingga pengelesan pada badan menghasilkan kualitas yang sempurna. Adapaun grafik hubungan gaya (kN) dan perpindahan (mm) sebagai berikut :

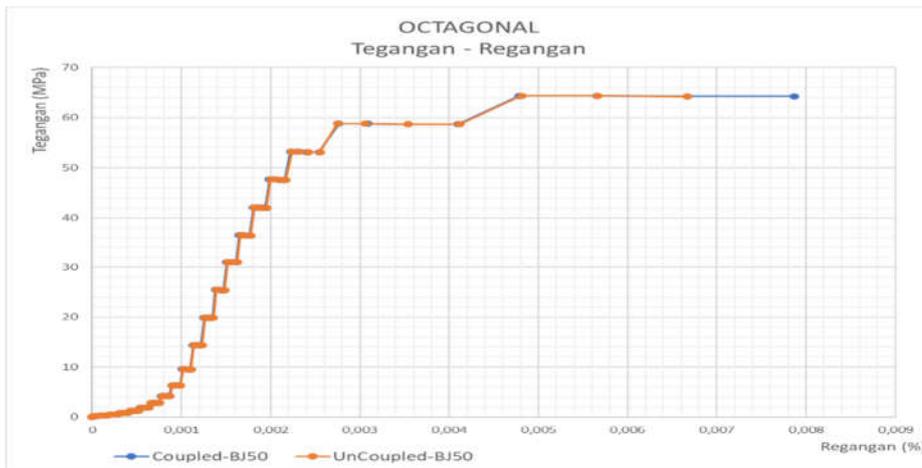


Gambar 4.17. Grafik Hubungan gaya – perpindahan balok baja castella octagonal.

Ringkasan nilai – nilai dari gaya dan perpindahan, tegangan – regangan pada balok baja castella profil hexagonal dijelaskan pada gambar 4.17, gambar 4.18 dan tabel 4.4 sebagai berikut :

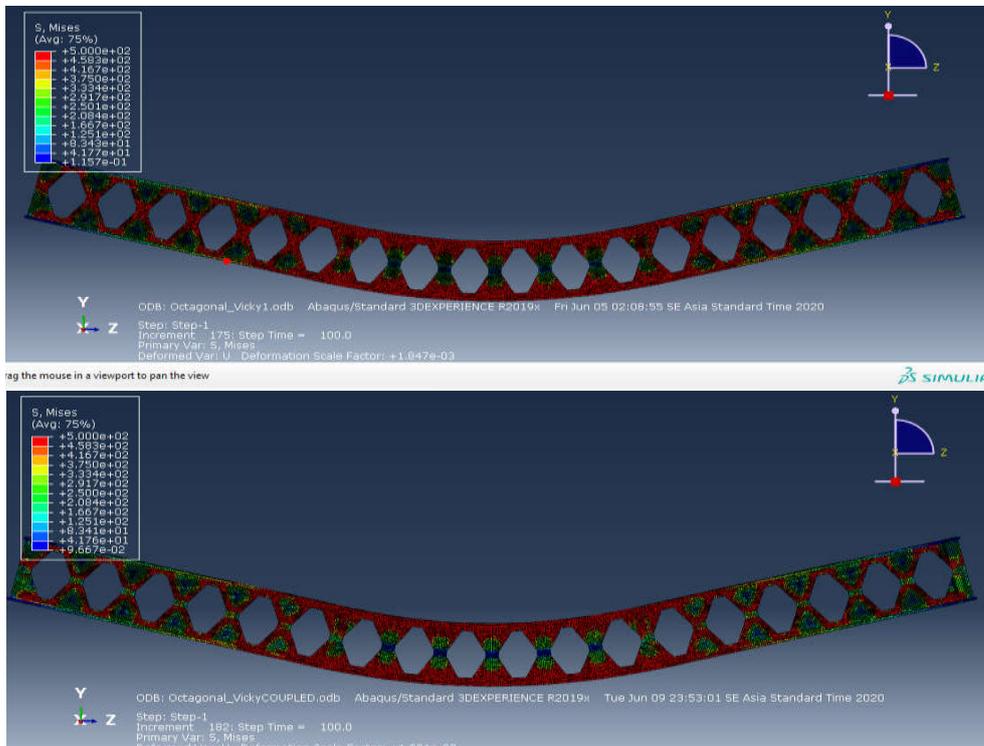
Tabel 4.4 Tabel Gaya dan Displacement Balok Baja Castella Profil Octagonal

NO.	BENDA UJI	GAYA	DISPLACEMENT
		(kN)	(mm)
1	Tanpa Couple	74,377	14,848
2	Dengan Couple	74,377	14,755



Gambar 4.18. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Balok Baja Castella Octagonal dengan Couple atau Tanpa Couple.

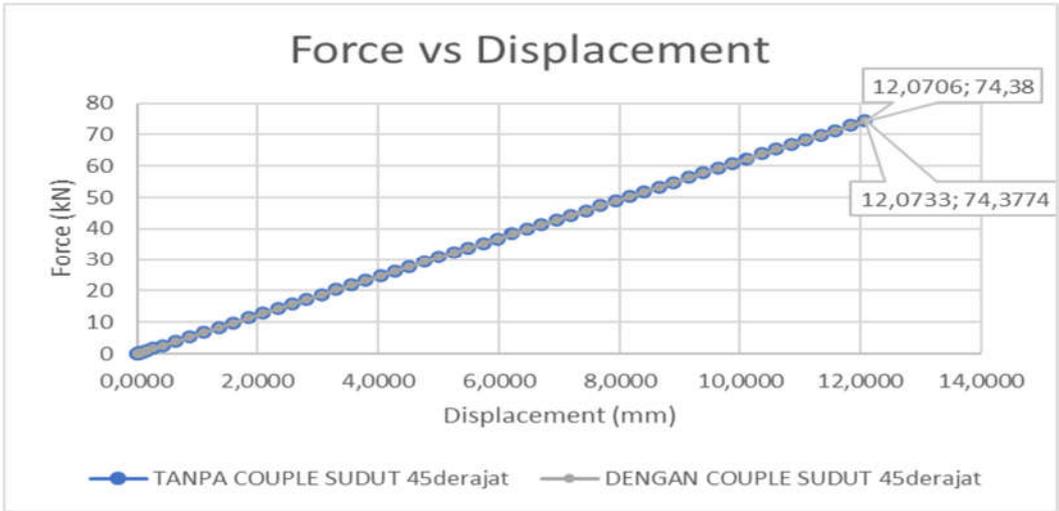
Tinjauan lanjut yaitu pada perilaku tegangan regangan yang terjadi sesuai gambar 4.18 yaitu grafik tegangan – regangan yang terjadi pada profil balok castella dengan profil lubang octagonal antara balok yang dipasangkan dengan plat coupled pada area las badan dan balok yang tidak dipasangkan plat coupled menunjukkan nilai yang tidak signifikan. Hal tersebut dapat ditinjau pada visualisasi tegangan pada gambar 4.19 berikut :



Gambar 4.19. Perilaku tegangan – regangan balok baja castella octagonal.

#### 4.5. Perilaku Balok Baja Castella dengan lubang Berlian

Analisis pada balok baja castella dengan lubang berlian mempunyai geometri yang sederhana membentuk deretan berlian. Proses fabrikasi cukup sederhana jika dibandingkan dengan profil lubang octagonal sehingga dapat menghasilkan kualitas las yang baik. Adapaun grafik hubungan gaya (kN) dan perpindahan (mm) seperti pada gambar 4.20 sebagai berikut :

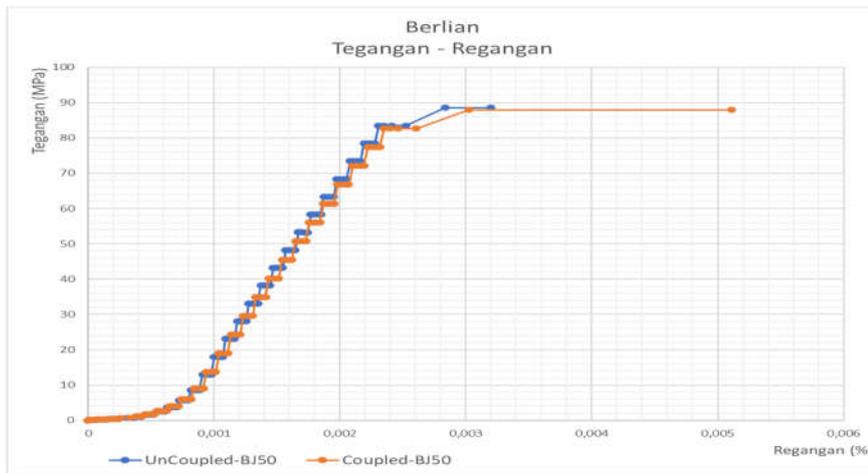


Gambar 4.20. Grafik Hubungan gaya – perpindahan balok baja castella berlian.

Ringkasan nilai – nilai dari gaya dan perpindahan, tegangan – regangan balok baja castella profil berlian ditunjukkan pada gambar 4.21 dan tabel 4.5 berikut :

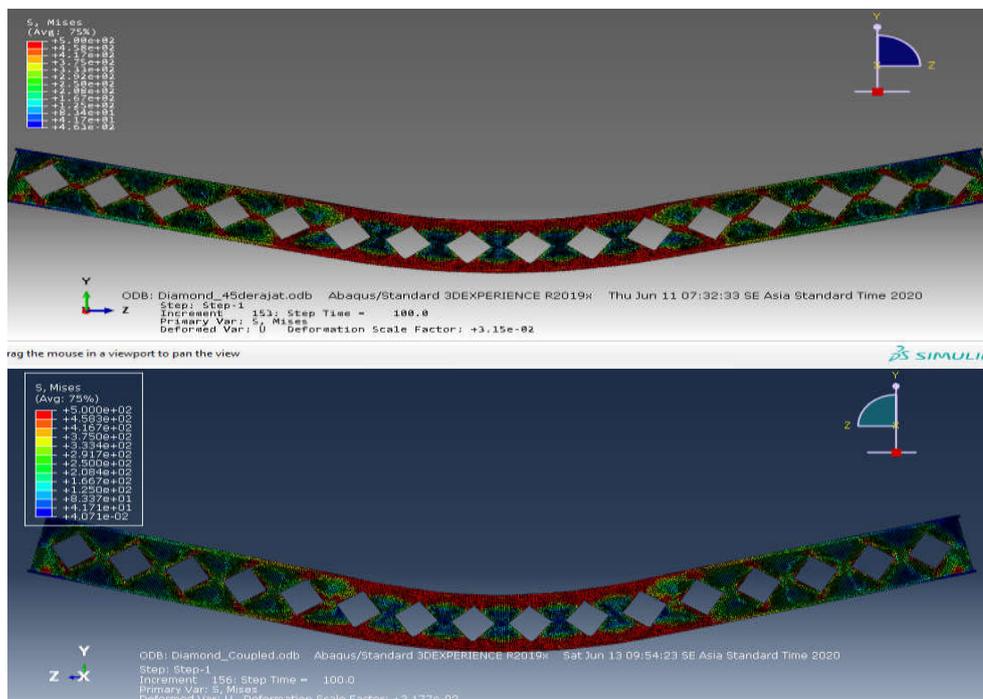
Tabel 4.5 Tabel Gaya dan Displacement Balok Baja Castella Profil Berlian

NO,	BENDA UJI	BEBAN	DISPLACEMENT
		(kN)	(mm)
1	Tanpa Couple	74,377	12,071
2	Dengan Couple	74,377	12,073



Gambar 4.21. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Balok Baja Castella Berlian dengan Couple atau Tanpa Couple.

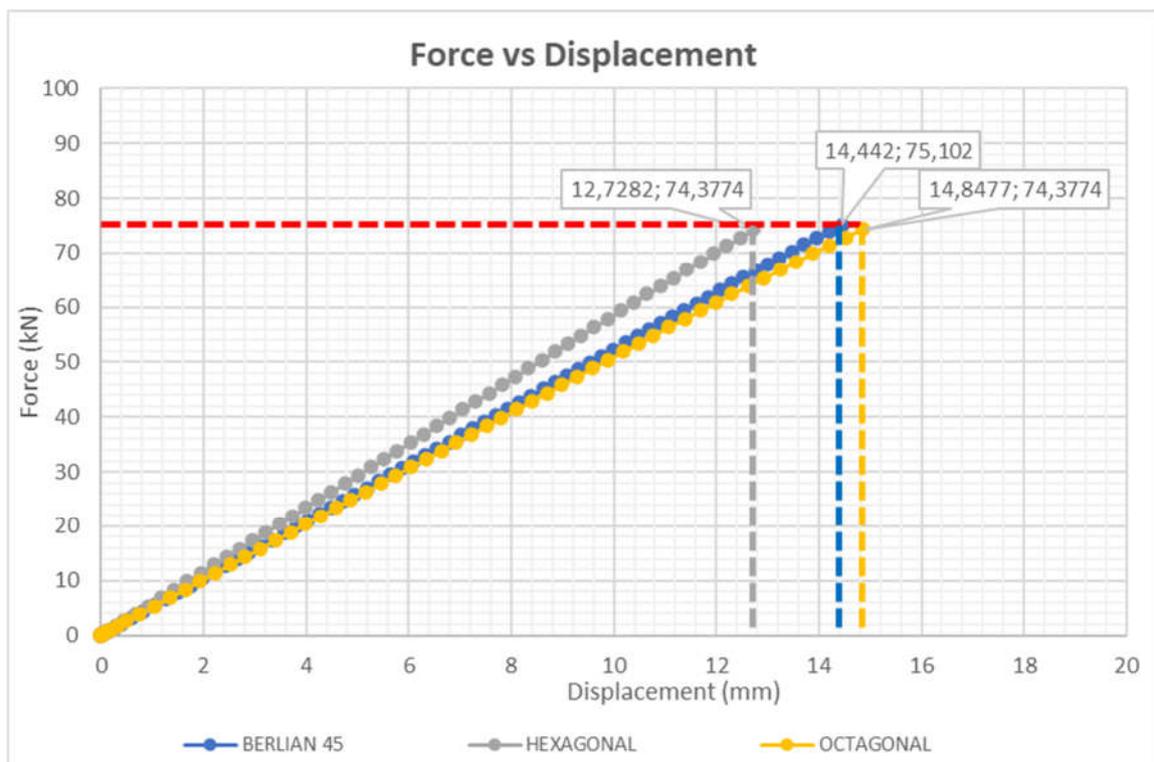
Tinjauan lanjut yaitu pada perilaku tegangan regangan yang terjadi sesuai gambar 4.21 yaitu perilaku tegangan – regangan yang terjadi pada profil balok castella dengan profil lubang berlian antara balok yang dipasangkan dengan plat coupled pada area las badan dan balok yang tidak dipasangkan plat coupled menunjukkan nilai yang tidak signifikan. Hal tersebut dapat ditinjau pada visualisasi tegangan pada gambar 4.22 berikut :



Gambar 4.22. Perilaku tegangan – regangan balok baja castella octagonal.

#### 4.6. Perbandingan Kinerja Balok Baja Castella

Peninjauan kinerja balok baja castella terhadap perilaku perpindahan (displacement) dan gaya, menunjukkan bahwa masing – masing profil mempunyai keunggulan dalam menerima beban aksial statik. Pada gambar 4.23 menunjukkan kinerja profil masing - masing lubang balok baja castella dengan perbandingan terhadap nilai perpindahan (*displacement*) yang terjadi terhadap beban (P) yang sama dengan hasil lubang hexagonal memiliki kinerja terbaik ditinjau dari nilai perpindahan yang paling kecil diantara profil lubang yang lainnya.

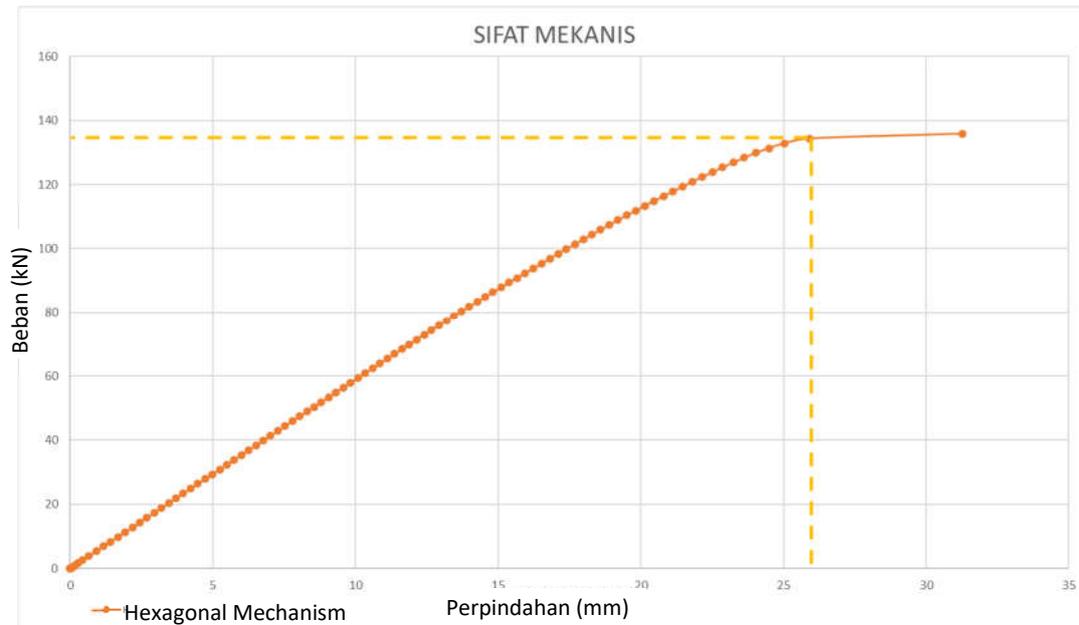


Gambar 4.23. Perbandingan nilai perpindahan terhadap beban yang diberikan pada masing – masing lubang castella yaitu berlian, hexagonal dan octagonal.

#### 4.7. Sifat Mekanik Balok Baja Castella

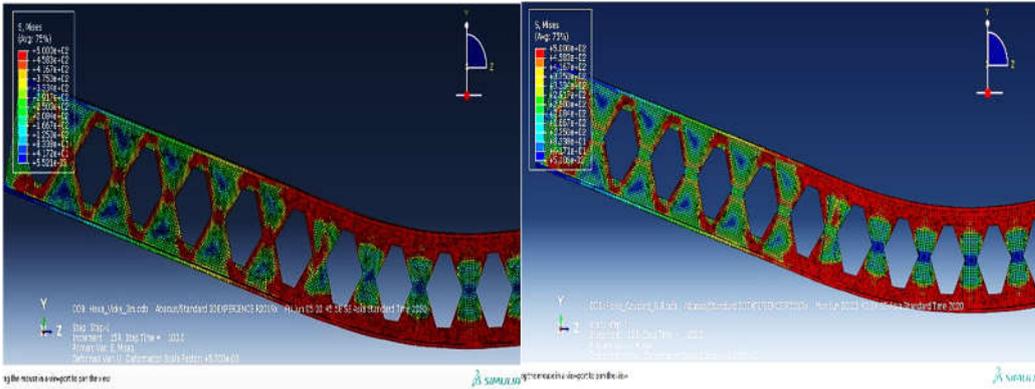
Analisis balok baja castella menggunakan metode elemen hingga menghasilkan data tentang nilai kinerja balok baja castella ditinjau dari kemampuan menerima beban, perpindahan (*displacement*) yang terjadi serta hubungan tegangan regangan. Kinerja tersebut dipengaruhi juga oleh bentuk dari profil lubang balok baja castella. Hal tersebut dapat ditinjau dari sifat mekanis

type balok baja castella dalam menerima beban dan mengalami perpindahan. Balok baja castella dengan lubang hexagonal mempunyai kinerja terbaik ditinjau dari nilai perpindahan yang terjadi seperti terlihat pada grafik sifat mekanis berikut :



Gambar 4.24. Grafik Hubungan Gaya – Perpindahan Balok Baja Castella Lubang Hexagonal terhadap terjadinya titik leleh ( $f_y$ ).

Pada gambar 4.24 tersebut menunjukkan grafik perpindahan fase elastis menuju fase plastis materil balok baja castella lubang hexagonal. Balok baja castella lubang hexagonal menghasilkan nilai batas elastis pada gaya 134,377kN dengan perpindahan 25,904mm. Pada pertambahan beban selanjutnya yaitu pada 135,877 kN dengan perpindahan 31,281 menunjukkan bahwa material sudah mengalami fase plastis dengan ditunjukkanya perpindahan yang drastis yaitu 5,377mm (dari rata – rata perpindahan 0,259 mm). Selain itu tinjauan terhadap kinerja hubungan tegangan – regangan yang terjadi juga dilakukan untuk melihat perbedaan kinerja balok baja castella dengan plat couple pada sambungan las badan dengan yang tidak. Hal tersebut dapat ditinjau pada gambar tegangan von misses yang terjadi sebagai berikut :



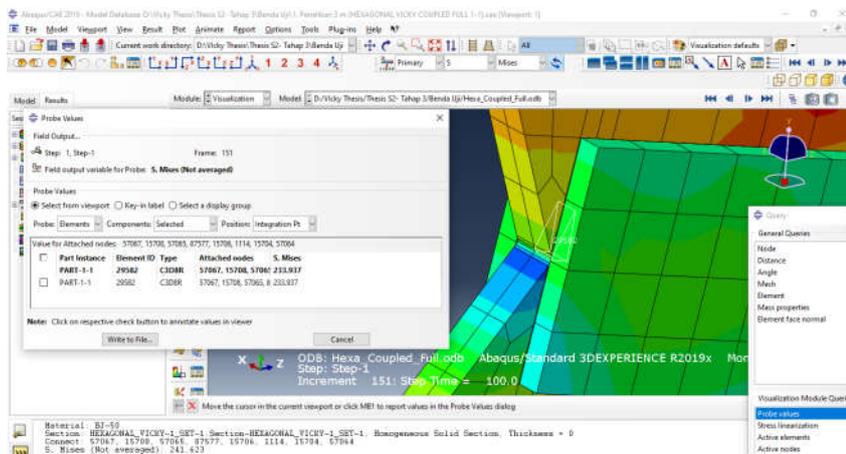
Gambar 4.25. Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Hexagonal : a. Von Misses Balok Baja Castella tanpa plat couple, b. Von Misses Balok Baja Castella dengan plat coupled

Terlihat pada gambar 4.25 tersebut perbedaan yang cukup signifikan yaitu balok dengan plat couple pada sambungan badannya mempunyai nilai tegangan yang lebih kecil jika dibanding dengan balok tanpa menggunakan plat couple baja pada sambungan las badan. Hal tersebut ditunjukkan pada gambar 4.26 dan tabel 4.6 sebagai berikut :

Tabel 4.6 Perbandingan Tegangan Balok Baja Castella Lubang Hexagonal

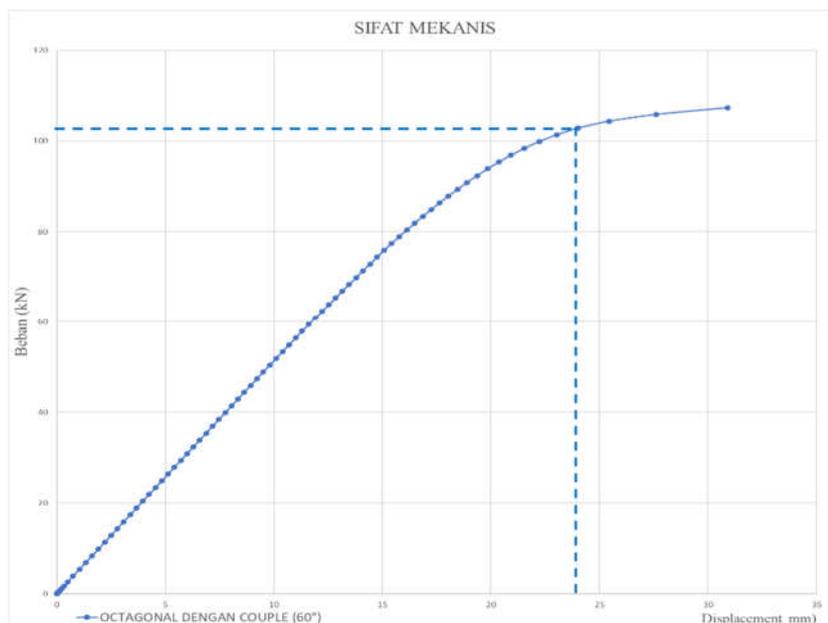
Mutu	Tengah Bentang		Tumpuan	
	No. Element	S. Misses	No. Element	S. Misses
BJ41	29582	242,427	27125	286,563
BJ50	29582	233,937	27125	213,119
BJ50-Uncoup	51411	366,337	48969	446,397

Note : S. Misses (sat. MPa)



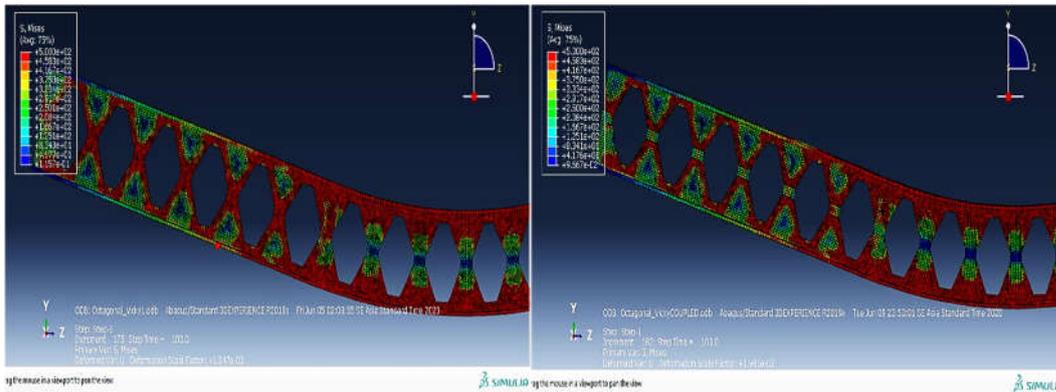
Gambar 4.26. Contoh Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Hexagonal pada Tengah Bentang dengan Mutu Baja BJ-50.

Pada balok baja castella dengan lubang octagonal mempunya sifat mekanis yang berbeda dengan balok baja castella dengan lubang hexagonal. Pada balok baja castella octagonal, fase perpindahan dari elastis menuju plastis terjadi pada beban 102,88kN dengan perpindahan yang terjadi 25,435mm. Pertambahan beban selanjutnya sudah masuk dalam fase plastis yaitu dengan beban 104,38kN dengan perpindahan 25,435mm. Perpindahan fase tersebut ditunjukkan dengan bertambahnya rata – rata nilai perpindahan yang signifikan yaitu 2,29 mm dari yang sebelumnya adalah rata – rata nilai perpindahan 0,304 mm. Kondisi tersebut juga menjelaskan bahwa kinerja balok baja castella dengan lubang octagonal mempunyai kinerja yang lebih rendah jika dibanding dengan profil balok baja castella hexagonal. Sifat mekanis tersebut dapat ditinjau langsung pada gambar 4.27 dengan grafik sebagai berikut :



Gambar 4.27. Grafik Hubungan Gaya – Perpindahan Balok Baja Castella Lubang Octagonal terhadap terjadinya titik leleh ( $f_y$ ).

Tinjauan terhadap kinerja balok baja castella dengan lubang octagonal pada hubungan tegangan – regangan yang terjadi terlihat pada gambar berikut :



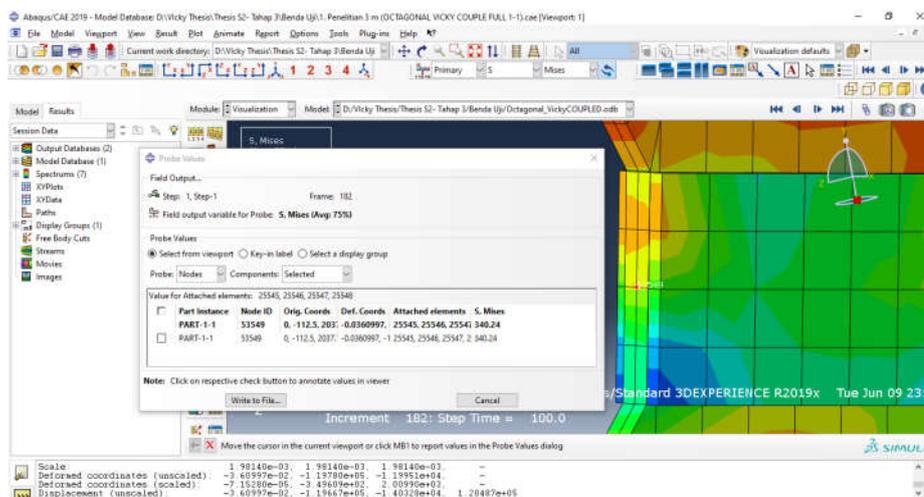
Gambar 4.28. Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Octagonal : a. Von Misses tanpa plat couple, b. Von Misses dengan plat coupled

Perbedaan yang cukup signifikan yaitu balok dengan plat couple pada sambungan badannya mempunyai nilai tegangan yang lebih kecil jika dibanding dengan balok tanpa menggunakan plat couple baja pada sambungan las badan. Hal tersebut dijelaskan pada gambar 4.28, 4.29 dan tabel 4.7 sebagai berikut :

Tabel 4.7 Perbandingan Tegangan Balok Baja Castella Lubang Octagonal

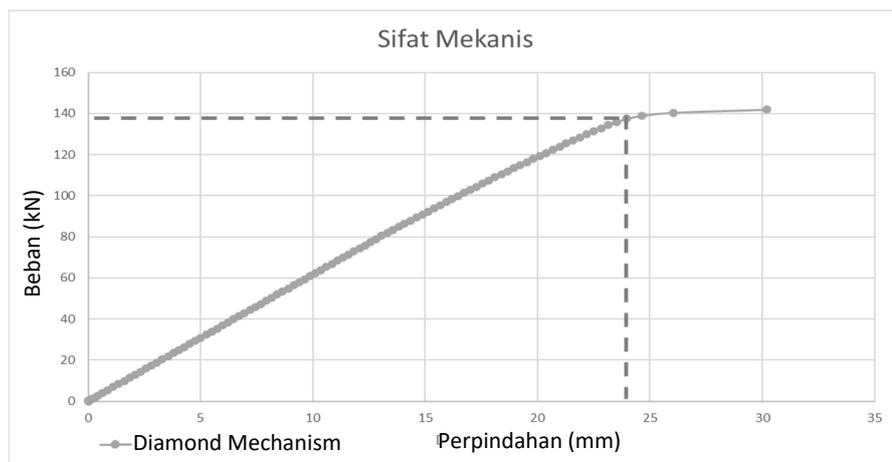
Mutu	Tengah Bentang		Tumpuan	
	No. Nodes	S. Misses	No. Nodes	S. Misses
BJ41	53549	407,324	22876	255,987
BJ50	53549	340,24	22876	50,7486
BJ50-Uncoup	73835	473,97	73898	500

Note : S. Misses (sat. MPa)



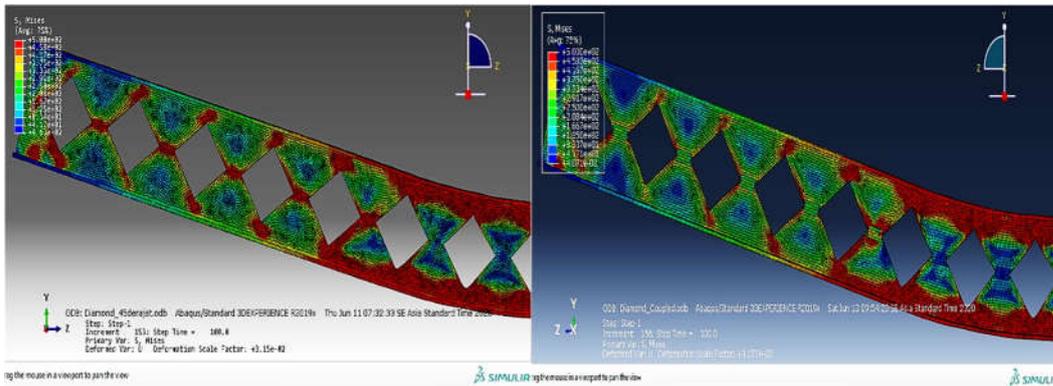
Gambar 4.29. Contoh Tegangan Von Misses Balok Baja Castella Octagonal pada Tengah Bentang dengan Mutu Baja BJ-50.

Pada balok baja castella dengan lubang berlian mempunyai sifat mekanis yang lebih baik ditinjau dari kinerja material dalam menerima beban jika dibanding dengan balok baja castella dengan lubang hexagonal atau octagonal. Pada balok baja castella berlian, fase perpindahan dari elastis menuju plastis terjadi pada beban 140,38kN dengan perpindahan yang terjadi 26,057mm. Pertambahan beban selanjutnya sudah masuk dalam fase plastis yaitu dengan beban 141,88kN dengan perpindahan 30,208mm. Perpindahan fase tersebut ditunjukkan dengan bertambahnya rata – rata nilai perpindahan yang signifikan yaitu 2,78 mm dari yang sebelumnya adalah rata – rata 0,239 mm. Kondisi tersebut juga menjelaskan bahwa kinerja balok baja castella dengan lubang berlian mempunyai kinerja yang lebih baik jika dibanding dengan balok castella profil hexagonal namun lebih rendah jika dibanding dengan profil balok baja castella octagonal. Hal tersebut dapat ditinjau pada gambar 4.30 grafik sifat mekanis sebagai berikut :



Gambar 4.30. Grafik Hubungan Gaya – Perpindahan Balok Baja Castella Berlian terhadap terjadinya titik leleh ( $f_y$ ).

Selain itu tinjauan terhadap kinerja hubungan tegangan – regangan yang terjadi juga dilakukan untuk melihat perbedaan kinerja balok baja castella dengan plat couple pada sambungan las badan dengan yang tidak. Hal tersebut dapat ditinjau pada gambar tegangan von misses yang terjadi sebagai berikut :



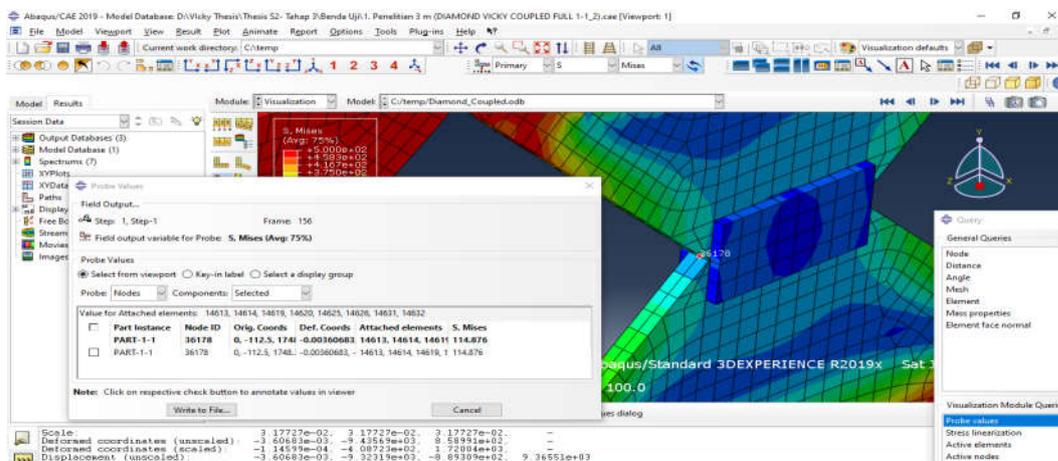
Gambar 4.31. Tegangan Von Mises Balok Baja Castella Berlian : a. Von Mises tanpa plat couple, b. Von Mises dengan plat coupled

Perbedaan yang cukup signifikan yaitu balok dengan plat couple pada sambungan badannya mempunyai nilai tegangan yang lebih kecil jika dibanding dengan balok tanpa menggunakan plat couple baja pada sambungan las badan. Penjelasan gambar tersebut ditinjau dari perbedaan nilai S. Misses pada gambar 4.31, 4.32 dan tabel 4.8 sebagai berikut :

Tabel 4.8 Perbandingan Tegangan Balok Baja Castella Lubang Berlian

Mutu	Tengah Bentang		Tumpuan	
	No. Nodes	S. Misses	No. Nodes	S. Misses
BJ41	36178	410,002	18581	400,00
BJ50	36178	114,876	18581	402,713
BJ50-Uncoup	11299	255,761	10888	424,417

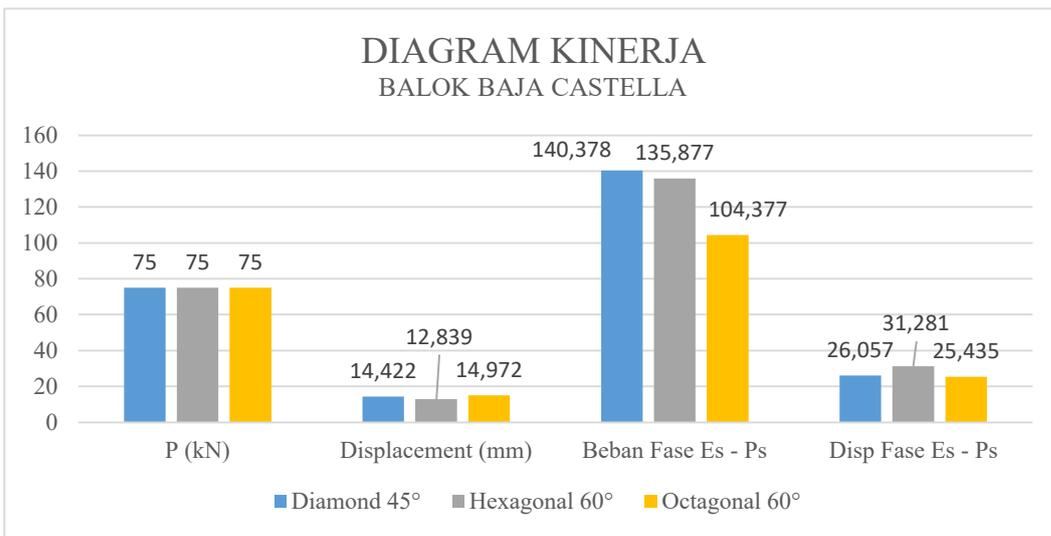
Note : S. Misses (sat. MPa)



Gambar 4.32. Contoh Tegangan Von Mises Balok Baja Castella Berlian pada Tengah Bentang dengan Mutu Baja BJ-50.

#### 4.8. Evaluasi Kinerja Profil Balok Baja Castella

Profil yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil optimasi dari penelitian terdahulu. Optimasi tersebut ditinjau dari hasil kinerja yang didapatkan meliputi nilai beban yang mampu diterima, perpindahan maksimum dan tegangan – regangan yang terjadi. Optimasi ditinjau dari geometri yang digunakan yaitu jenis lubang profil castella, nilai sudut lubang, panjang jarak bersih antar lubang. Pada gambar 4.33 menunjukkan diagram perbandingan hasil perpindahan pada analisis penelitian ini sebagai berikut :



Gambar 4.33. Diagram Kinerja Balok Baja Castella menggunakan Metode Elemen Hingga Software Abaqus pada Tinjauan Beban vs Perpindahan

Tabel 4.9 Hasil Analisis Kinerja Balok Baja Castella

	Diamond 45°	Hexagonal 60°	Octagonal 60°	Kinerja
<b>P (kN)</b>	75	75	75	
<b>Displacement (mm)</b>	14,422	12,839	14,972	Hexagonal 60°
<b>Beban Fase Es - Ps</b>	140,378	135,877	104,377	Diamond 45°
<b>Disp Fase Es - Ps</b>	26,057	31,281	25,435	Octagonal 60°

Pada tabel 4.9 dan gambar 4.33 tersebut, dapat disimpulkan bahwa balok baja castella dengan kinerja terbaik dalam menerima beban static yang sama ditunjukkan dengan perpindahan (*displacement*) terkecil adalah pada profil lubang hexagonal.

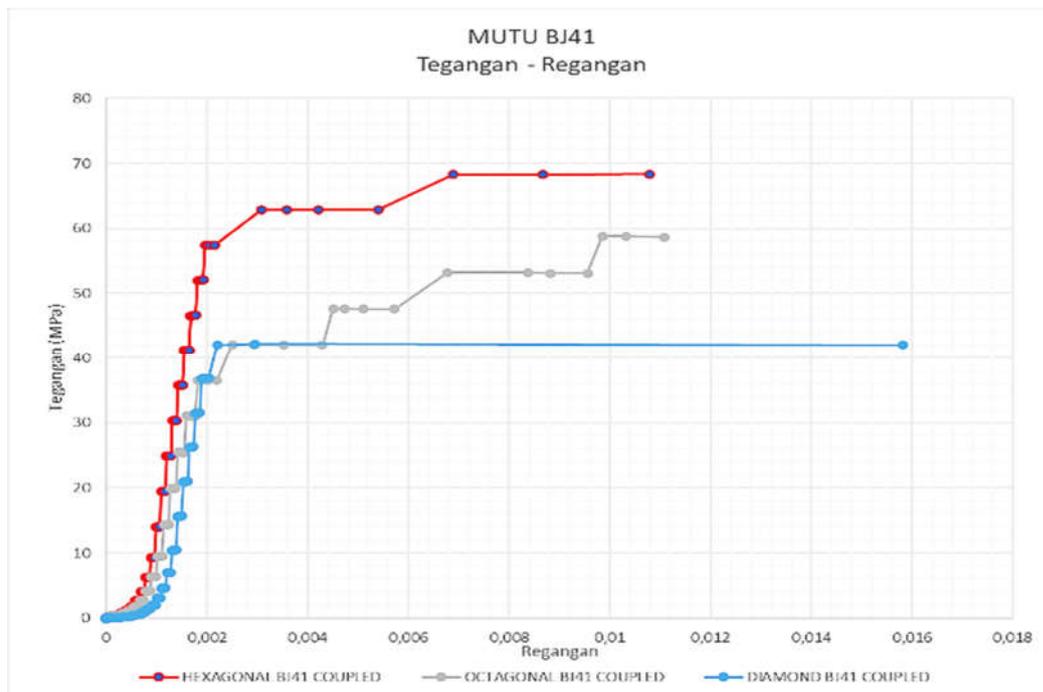
Namun jika ditinjau secara lanjut terhadap kemampuan material balok baja castella dalam menerima beban sampai dengan fase plastis mempunyai kategori kinerja yang berbeda antar profilnya. Tinjauan lebih lanjut adalah pada tegangan

yang terjadi pada masing – masing bagian balok yaitu pada posisi tengah bentang dan pada tumpuan dengan hasil sebagai berikut :

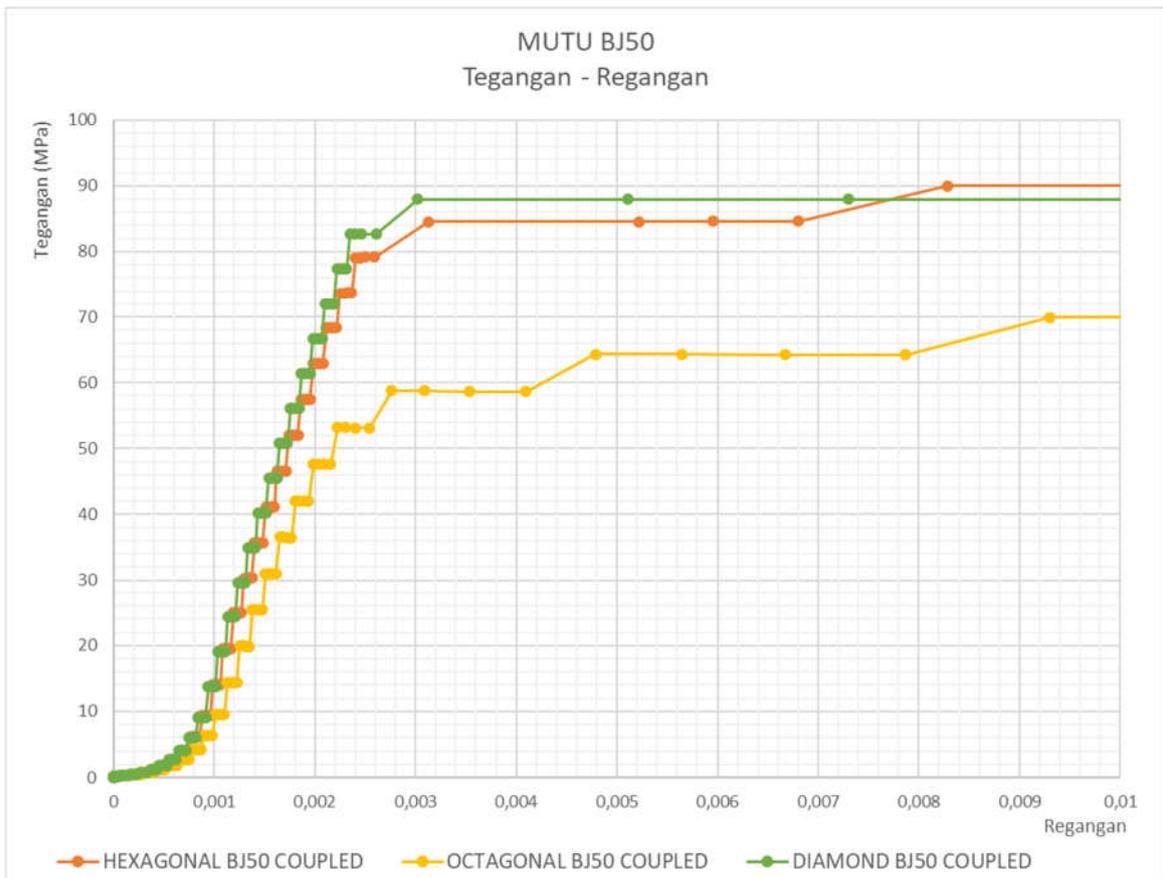
Tabel 4.10 Hasil Analisis Perbandingan Tegangan Balok Baja Castella

Mutu	Tegangan Profil Pada Sambungan dengan Plat Coupled (MPa)					
	Coupled di Tengah Bentang			Coupled di Tumpuan		
	Hexagonal	Octagonal	Diamond	Hexagonal	Octagonal	Diamond
BJ41-Coupled	242	407	410	287	256	400
BJ50-Coupled	234	340	115	213	507	403
BJ50-Uncoupled	366	474	256	446	500	424
<b>Rata - rata</b>	<b>281</b>	<b>407</b>	<b>260</b>	<b>315</b>	<b>421</b>	<b>409</b>

Dari tabel 4.10 menunjukkan nilai tegangan rata – rata optimal pada sambungan plat coupled yaitu pada profil lubang hexagonal balok baja castella. Hal tersebut menunjukkan bahwa profil lubang hexagonal memiliki kinerja struktur terbaik dalam menerima beban dengan meninjau pada nilai tegangan rata – rata yang dihasilkan dari tegangan pada sambungan plat coupled ditengah bentang dan ditumpuan yaitu 298 MPa untuk lubang hexagonal; 414 MPa untuk lubang octagonal; dan 334 MPa untuk lubang berlian. Adapun grafik tegangan – regangan yang diambil pada tengah bentangn dibagian sayap atas balok baja dengan beberapa variasi profil adalah sebagai berikut :



Gambar 4.34. Grafik Tegangan – Regangan Baja Mutu 41 dan Baja Mutu 50



Gambar 4.34 (lanjutan). Grafik Tegangan – Regangan Baja Mutu 41 dan Baja Mutu 50

Pada Gambar 4.34 merupakan perbandingan grafik tegangan – regangan pada sayap atas balok baja castella. Pada mutu BJ-41 menghasilkan tegangan – regangan dengan nilai terbaik pada lubang hexagonal dibanding profil lubang lainnya. Namun pada mutu baja BJ-50 menghasilkan nilai tegangan – regangan terbaik pada profil lubang berlian (diamond). Hal ini menunjukkan perilaku yang berbeda sesuai dengan mutu baja dan jenis profil lubang castella yang digunakan.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari hasil analisis dan pembahasan pada bab sebelumnya dapat disimpulkan poin – poin penting sebagai berikut :

1. Perbedaan hasil analisis pada nilai perpindahan yang terjadi antara perilaku balok baja castella dengan penambahan plat coupled yaitu 12,666 mm dan tidak dengan penambahan plat coupled yaitu 12,728 mm dengan nilai deviasi 0,388 mm. Tinjauan lendutan pada tengah bentang tersebut menunjukkan bahwa penambahan plat coupled pada sambungan badan tidak berpengaruh signifikan terhadap lendutan yang terjadi.
2. Kinerja terbaik ditinjau dari nilai perpindahan yang terjadi pada analisis kinerja balok baja castella dengan variasi profil lubang dan penambahan plat coupled pada las badan dalam menerima beban 75 kN yaitu pada profil hexagonal dengan nilai perpindahan 12,839mm lebih kecil jika dibandingkan dengan perpindahan profil lainnya adalah 14,433mm untuk profil lubang berlian dan 14,972mm untuk profil lubang octagonal.
3. Hasil analisis pada tinjauan tegangan – regangan menghasilkan nilai tegangan balok baja dengan plat coupled lebih kecil jika dibandingkan dengan balok baja yang tidak menggunakan plat coupled.

#### **5.2. Saran**

Tahap – tahapan yang dilakukan pada penelitian ini menghasilkan kesimpulan berupa kinerja pada setiap profil lubang balok baja castella. Sehingga hal – hal yang bisa dilakukan selanjutnya adalah :

1. Melakukan analisa terhadap mode kegagalan yang mungkin bisa terjadi pada balok baja castella dengan tambahan plat coupled pada badan las menggunakan profil hexagonal, octagonal dan berlian.
2. Melakukan analisa terhadap kinerja balok baja castella dengan penambahan plat coupled pada las badan profil lubang yang berbeda semisal elips

## DAFTAR REFERENSI

- Dewobroto, W, (2016), *Struktur Baja Perilaku, Analisis & Desain – AISC 2010*, 2<sup>nd</sup> Edition, Jurusan Teknik Sipil UPH, Tangerang.
- Irawan, C. (2019), *Kontribusi Beton Pengisi Terhadap Peningkatan Kinerja Tiang Pancang Spun Pile Akibat Beban Lateral Siklik dan Aksial Tekan*, Disertasi Dr., Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya.
- Jamadar A. M., dan Kumbhar P. D. (2015), “Parametric Study Of Castellated Beam With Circular And Diamond Shaped Openings”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 02, No. 02, hal. 715-722.
- Listiyono, B., Sukamta, dan Partono W. (2017), “Optimization Analysis of Size and Distance Of Hexagonal Hole In Castellated Steel Beams”, *Sustainable Civil Engineering Structures And Construction 2016 (SCESCM 2016)*, Vol. 171, hal 1092– 1099.
- Logan, D.L., (2012), *A First Course in the Finite Element Method*, 5<sup>th</sup> Edition. Global Engineering, United States of America.
- Soltani, M.R., Bouchair, A., dan Mimoune M. (2012), “Nonlinear FE Analysis of the ultimate behavior of Steel Castellated Beams”, *Journal of Construction Steel Research*, Vol 70, hal. 101-114.
- Standar Nasional Indonesia 1729 (2015), *Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural*, Jakarta. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Sonck, D., dan Belis, J. (2017), “Lateral-Torsional Buckling Resistance of Castellated Beams”, *J. Struct. Eng.*, Vol. 143, No. 3, hal. 1-9.
- Wang, P., Wang, X., dan Ma, N. (2014), “Vertical Shear Buckling Capacity of Web – Post in Castellated Beam with Fillet Corner Hexagonal Web Openings”, *Engineering Structure*, Vol. 75, hal. 315-326.
- Yossef N.M., dan Taher S. (2019), “Cost Optimization of Composite Floor Systems with Castellated Steel Beams”, *Pract. Period. Struct. Des. Constr*, Vol. 24, No. 1, hal. 1-13.

(halaman ini sengaja dikosongkan)