

**STUDI NUMERIK KINERJA BALOK KASTELA DENGAN
VARIASI JARAK ANTAR LUBANG DAN DIAMETER
PADA BENTUK LINGKARAN**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL – FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2021**

**STUDI NUMERIK KINERJA BALOK KASTELA DENGAN
VARIASI JARAK ANTAR LUBANG DAN DIAMETER
PADA BENTUK LINGKARAN**

SKRIPSI

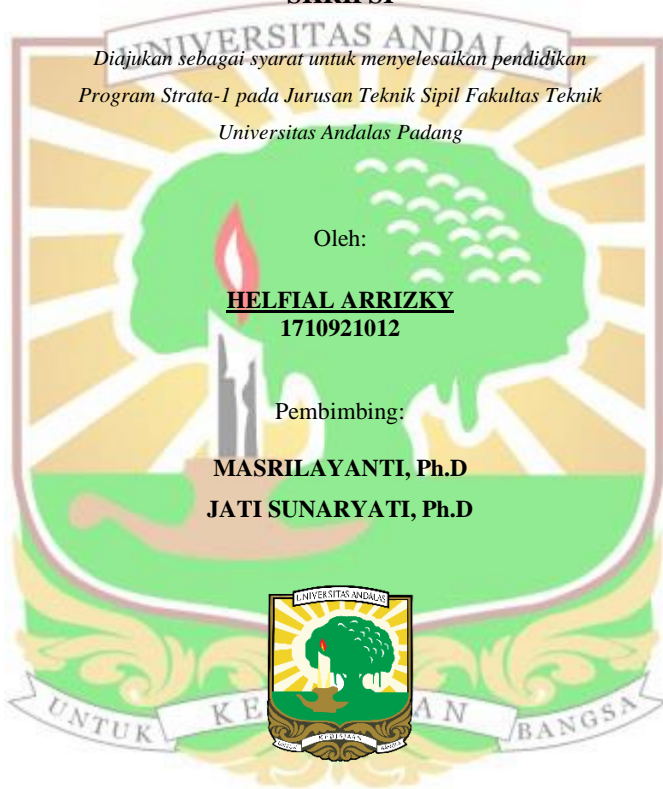
*Diajukan sebagai syarat untuk menyelesaikan pendidikan
Program Strata-1 pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Andalas Padang*

Oleh:

HELFIAL ARRIZKY
1710921012

Pembimbing:

MASRILAYANTI, Ph.D
JATI SUNARYATI, Ph.D



**JURUSAN TEKNIK SIPIL – FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG
2021**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI
JURUSAN TEKNIK SIPIL - FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS

STUDI NUMERIK KINERJA BALOK KASTELA DENGAN
VARIASI JARAK ANTAR LUBANG DAN DIAMETER PADA
TIPE LINGKARAN

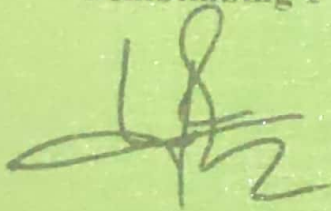


Oleh:

Nama : HELFIAL ARRIZKY

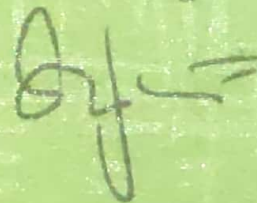
BP : 1710921012

Pembimbing 1



MASRILAYANTI, Ph.D.

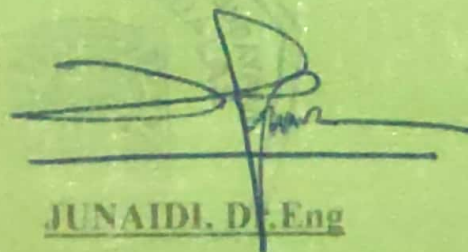
Pembimbing 2



JATI SUNARYATI, Ph.D.

Padang, 20 April 2021

Ketua Jurusan



JUNAIDI, D. Eng


NIP. 19760627 200501 1001

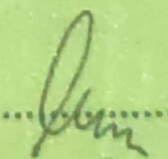
**LEMBAR BERITA ACARA SIDANG TUGAS AKHIR
JURUSAN TEKNIK SIPIL – FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ANDALAS**

Pada hari ini Kamis, 08 April 2021 telah dilaksanakan Sidang Tugas Akhir untuk mahasiswa:

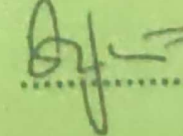
Nama : HELFIAL ARRIZKY
No BP : 1710921012
**Judul : STUDI NUMERIK KINERJA BALOK KASTELA
DENGAN VARIASI JARAK ANTAR LUBANG
DAN DIAMETER PADA BENTUK LINGKARAN**

Tim Penguji:

Ketua : Prof. JAFRIL TANJUNG, Dr.Eng. 

Anggota : FEBRIN ANAS ISMAIL, Dr.Eng. 

MASRILAYANTI, Ph.D 

JATI SUNARYATI, Ph.D 

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Helfial Arrizky
Nim : 1710921012
Tempat, Tanggal Lahir : Padang, 20 April 2000
Alamat : Komplek Palm Griya Indah II
Blok D/7 Korong Gadang,
Padang

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul **‘Studi Numerik Kinerja Balok Kastela Dengan Variasi Jarak Antar Lubang Dan Diameter Pada Bentuk Lingkaran’** adalah hasil pekerjaan saya. Seluruh pendapat, ide atau materi dari sumber lain telah dikutip dengan referensi yang sesuai.

Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan ini tidak sesuai dengan kenyataan, maka saya bersedia menerima sanksi yang akan dikenakan kepada saya termasuk pencabutan gelar Sarjana Teknik yang nanti saya dapatkan.

Padang, 20 April 2021



Helfial Arrizky

KATA PENGANTAR

Puji Syukur Penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT, karena rahmat dan karunia-Nya sehingga bisa menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir dengan judul "Studi Numerik Kinerja Balok Kastela Dengan Variasi Jarak Antar Lubang Dan Diameter Pada Bentuk Lingkaran" ini dapat diselesaikan dengan baik.

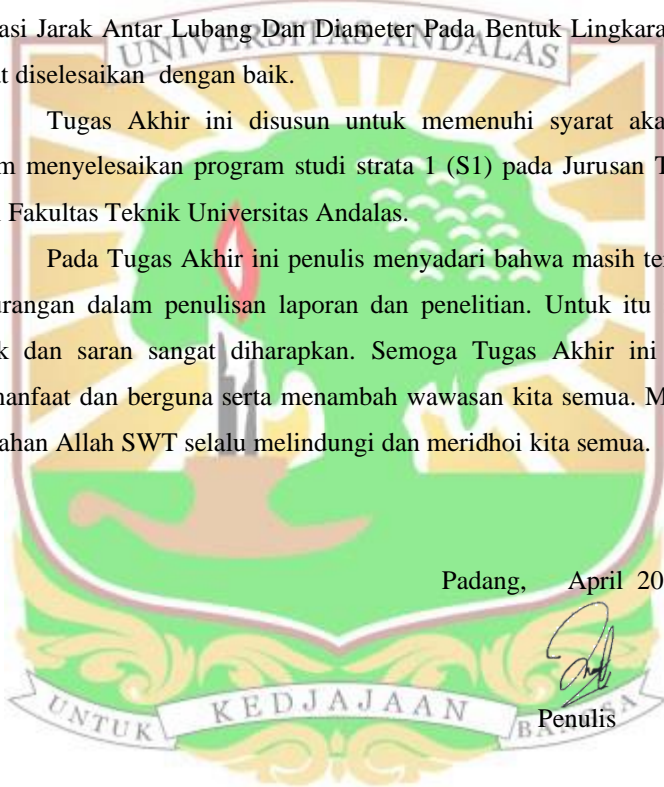
Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi syarat akademis dalam menyelesaikan program studi strata 1 (S1) pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas.

Pada Tugas Akhir ini penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penulisan laporan dan penelitian. Untuk itu segala kritik dan saran sangat diharapkan. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan berguna serta menambah wawasan kita semua. Mudah-mudahan Allah SWT selalu melindungi dan meridhoi kita semua.

Padang, April 2021



Penulis



ABSTRAK

Konstruksi baja merupakan bahan alternatif dalam pembangunan struktur teknik sipil. Hal ini dikarenakan material baja memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan bahan konstruksi lainnya. Baja kastela merupakan salah satu bentuk inovasi dalam pemanfaatan baja dalam struktur gedung. Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini mengasumsikan hubungan tegangan-material yang digunakan mengikuti perilaku elasto-plastis. Studi dilakukan terhadap pengaruh variasi jarak antar lubang dan diameter lingkaran pada balok kastela. Pada penelitian ini digunakan baja IWF 150.100.6.9 yang akan diubah menjadi balok kastela tipe lingkaran dengan 3 bentuk variasi diameter lingkaran dan jarak antar lubang yang berbeda. Perletakan yang digunakan pada penelitian ini adalah jepit-jepit, dengan panjang bentang balok 6,5 meter. Mutu material yang digunakan memiliki tegangan leleh (f_y) 300 MPa dan tegangan ultimit (f_u) 450 MPa. Pembebanan diberikan secara statis monotonik di tengah bentang balok sampai tercapai kondisi ultimit pada penampang. Dalam desain permodelan struktur pada penelitian ini digunakan perangkat lunak MSC Patran dan analisa atau proses running menggunakan aplikasi MSC Nastran. Hasil *running* akan direkapitulasi dan diplotkan pada Microsoft Excel dalam bentuk grafik untuk dianalisa dari segi kekuatan, kekakuan dan daktilitas.

Kata Kunci : *Profil Baja, Castelallted Beam, Lingkaran, Kantilever, Variasi diameter lingkaran, Variasi jarak antar lubang*

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
KATA PENGANTAR	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian	2
1.3 Batasan Penelitian	3
1.4 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Baja Profil	5
2.2 Baja Kastela	6
2.2.1 Pengertian	6
2.2.2 Teori Balok Perluasan/Badan Berlubang	8
2.2.3 Bentuk dan Cara Pembuatan Balok Kastela	9
2.3 Perilaku Tegangan-Regangan Baja	13
2.4 Kriteria Leleh	14
2.5 Kondisi Ultimate	14
2.6 Kekakuan	15
2.7 Daktilitas	15
2.8 Teori Metode Elemen Hingga (<i>Finite Element Method</i>)	16
2.8.1 Umum	16
2.8.2 Konsep Dasar	18

2.8.3	Perangkat MSC Patran dan Nastran.....	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		21
3.1	Metodologi Penelitian	21
3.1.1	Studi Literatur.....	23
3.1.2	Permodelan Struktur	23
3.1.3	Design Ukuran Lingkaran	23
3.1.4	<i>Meshing</i>	23
3.1.5	Perletakan dan Pembebanan	23
3.1.6	<i>Properties Material</i>	23
3.1.7	Eksekusi Program dan Rekapitulasi Data	24
3.1.8	Analisis dan Cek Tekuk	24
3.1.9	Kesimpulan dan Saran.....	24
BAB IV PROSEDUR DAN HASIL PERHITUNGAN		25
4.1	Prosedur Kerja	25
4.1.1	Permodelan Struktur	25
4.1.2	<i>Meshing</i>	30
4.1.3	Perletakan dan Pembebanan	31
4.1.4	<i>Properties Material</i>	31
4.1.5	Eksekusi Program	33
4.2	Hasil Kerja.....	35
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN		42
5.1	Analisa Grafik.....	42
5.1.1	Pengaruh Jarak Antar Lubang Terhadap Tinggi Profil.....	42
5.1.2	Pebandingan Berdasarkan Berat	43
5.1.3	Perbandingan Penampang Balok Kastela Terhadap Penampang Aslinya	44

5.1.4	Perbandingan Berdasarkan Diameter Lubang	49
5.2	Cek Tekuk dan Geser	52
BAB VI PENUTUP		60
6.1	Kesimpulan	60
6.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		63
UCAPAN TERIMA KASIH		64



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Konstruksi Baja Kastela.....	2
Gambar 2. 1 Profil Baja Kastela.....	7
Gambar 2.2 Profil Dipotong Zig-Zag.....	9
Gambar 2.3 Baja Kastela Segi Enam.....	10
Gambar 2.4 Potongan Pertama Pada Profil.....	10
Gambar 2.5 Potongan Kedua Pada Profil.....	10
Gambar 2.6 Baja Kastela Lingkaran.....	11
Gambar 2.7 Profil Dipotong Zig-Zag Miring.....	11
Gambar 2.8 Baja Kastela Segi Enam non Prismatic.....	11
Gambar 2.9 Profil Dipotong Berbentuk Sinusoidal.....	12
Gambar 2.10 Baja Kastela Sinusoidal.....	12
Gambar 2.11 Profil Dipotong Persegi.....	13
Gambar 2.12 Baja Kastela Persegi.....	13
Gambar 2.13 Grafik Tegangan-Regangan Baja.....	13
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	22
Gambar 4.1 Parameter Dimensi Lubang Lingkaran.....	26
Gambar 4.2 Permodelan Struktur.....	26
Gambar 4.3 Balok Kastela Variasi 1.....	26
Gambar 4.4 Balok Kastela Variasi 2.....	27
Gambar 4.5 Balok Kastela Variasi 3.....	27
Gambar 4.6 Balok Kastela Variasi 4.....	27
Gambar 4.7 Balok Kastela Variasi 5.....	28
Gambar 4.8 Balok Kastela Variasi 6.....	28
Gambar 4.9 Balok Kastela Variasi 7.....	28

Gambar 4.10 Balok Kastela Variasi 8.....	28
Gambar 4.11 Balok Kastela Variasi 9.....	29
Gambar 4.12 Balok Kastela Variasi 10.....	29
Gambar 4.13 Balok Kastela Variasi 11.....	29
Gambar 4.14 Balok Kastela Variasi 12.....	29
Gambar 4.15 Permodelan Meshing.....	30
Gambar 4.16 Meshing.....	30
Gambar 4.17 Perletakan dan Pembebanan.....	31
Gambar 4.18 Grafik Data Tegangan Regangan.....	32
Gambar 4. 19 Properties Material.....	33
Gambar 4.20 Eksekusi Program.....	34
Gambar 4.21 Deformasi Profil Diameter 120 mm.....	35
Gambar 4.22 Deformasi Profil Diamater 90 mm.....	35
Gambar 4.23 Deformasi Profil Diameter 60 mm.....	35
Gambar 4.24 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 1.....	36
Gambar 4.25 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 2.....	36
Gambar 4.26 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 3.....	37
Gambar 4.27 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 4.....	37
Gambar 4.28 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 5.....	38
Gambar 4.29 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 6.....	38
Gambar 4.30 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 7.....	39
Gambar 4.31 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 8.....	39
Gambar 4.32 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 9.....	40
Gambar 4.33 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 10.....	40
Gambar 4.34 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 11.....	41
Gambar 4.35 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 12.....	41

Gambar 5.1 Kurva Pengaruh Jarak Antar Lubang.....	42
Gambar 5.2 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 1	44
Gambar 5.3 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 2	44
Gambar 5.4 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 3	45
Gambar 5.5 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 4	45
Gambar 5.6 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 5	46
Gambar 5.7 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 6	46
Gambar 5.8 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 7	46
Gambar 5.9 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 8	47
Gambar 5.10 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 9	47
Gambar 5.11 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 10	48
Gambar 5.12 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 11	48
Gambar 5.13 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 12	48
Gambar 5.14 Kurva Beban-Perpindahan Dengan Diameter Lubang 120 mm	49
Gambar 5.15 Kurva Beban-Perpindahan Dengan Diameter Lubang 90 mm	50
Gambar 5.16 Kurva Beban-Perpindahan Dengan Diameter Lubang 60 mm	51



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter Variasi Dimensi Lubang Lingkaran.....	25
Tabel 4.2 Data Tegangan-Regangan.....	32
Tabel 5.1 Rekapitulasi Selisih Berat Balok Kastela.....	43
Tabel 5.2 Tabel Rekapitulasi Data Diameter 120 mm.....	49
Tabel 5.3 Tabel Rekapitulasi Data Diameter 90 mm.....	50
Tabel 5.4 Rekapitulasi Data Diameter 60 mm.....	51
Tabel 5.5 Rekapitulasi Cek Tekuk Lokal.....	53
Tabel 5.6 Rekapitulasi Tekuk Lateral.....	57
Tabel 5.7 Tabel Rekapitulasi Cek Kuat Geser.....	58



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konstruksi baja merupakan sebuah material yang memiliki peranan penting dalam pembangunan gedung ataupun struktur. Baja sebagai material konstruksi memiliki kelebihan seperti berat baja yang relatif ringan dengan pengerjaan yang cepat. Baja yang digunakan pada umumnya adalah profil baja solid. Seiring dengan perkembangan dan mulai ditemukannya baja profil *castellated*, penggunaan profil baja mulai beragam. Baja profil *castellated* bisa menjadi solusi pada kasus tertentu dengan kelebihan yang dimilikinya.

Baja kastela adalah profil baja I, H atau U yang kemudian pada bagian badannya dipotong memanjang dengan pola zig-zag tertentu. Kemudian bentuk dasar baja diubah dengan cara menggeser setengah bagian baja profil yang telah dipotong tadi dan disambung dengan cara di las pada bagian giginya. Sehingga terbentuk profil baru sesuai dengan pola potongan yang dapat berbentuk segi enam, segi delapan, lingkaran maupun persegi (Grünbauer, 2001).



Gambar 1.1 Konstruksi Baja Kastela

Pada penelitian ini yang menjadi pembahasan ialah studi analisa balok kastela atau *castellated beam* tipe lingkaran terhadap variasi jarak antar bukaan dan diameter yang dibuat pada profil baja tersebut. Penelitian ini dilakukan dengan perangkat lunak atau *software* MSC Patran-Nastran, dilakukan analisis yang berkaitan dengan variasi tersebut untuk memperoleh nilai stabilitas dan kapasitas.

1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah dapat memodelkan dan menganalisa balok kastela dengan tipe lingkaran dengan perangkat lunak MSC Patran-Nastran, serta mengetahui kinerja dan kapasitas balok kastela dengan tipe lingkaran terhadap pembebanan statik monotonik.

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah hasil penelitian dapat menjadi acuan dalam perencanaan konstruksi menggunakan *castellated beam*. Memberikan sumbangan dalam pemikiran terhadap pengembangan ilmu pengetahuan teknik sipil terutama dalam perencanaan menggunakan balok kastela.

1.3 Batasan Penelitian

1. Profil baja yang digunakan adalah IWF 150.100.6.9 yang diubah menjadi baja kastela dengan tipe lingkaran.
2. Dilakukan variasi diameter dengan ukuran 120 mm, 90 mm, dan 60 mm serta jarak antar lubang yang divariasikan dengan ukuran $1/5$ Diameter, $2/5$ Diameter, $3/5$ Diameter dan $4/5$ Diameter.
3. Merupakan eksperimen secara virtual yang dimana beban dan deformasi pada penampang di analisa secara tiga dimensi pada perangkat lunak MSC Patran-Nastran.
4. Struktur menggunakan tumpuan kantilever pada kedua ujungnya dan beban yang diberikan berupa *displacement control* di tengah bentang.
5. Struktur memiliki panjang bentang 6,5 meter.
6. Pada penelitian ini digunakan tegangan leleh (f_y) 300 MPa dan tegangan ultimit (f_u) 450 MPa.

1.4 Sistematika Penulisan

Untuk menghasilkan penulisan yang baik dan terarah maka penulisan tugas akhir ini dibagi dalam beberapa bab yang membahas hal-hal berikut:

BAB I Pendahuluan

Berisikan tentang latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan batasan masalah.

BAB II Tinjauan Pustaka

Berisikan tentang dasar-dasar teori mengenai alat yang digunakan, objek penelitian dan peraturan yang digunakan dalam Analisa.

BAB III Metodologi Penelitian

Pada bab ini diuraikan mengenai metode penelitian, bagan alir penelitian, prosedur penelitian, dan analisis data.

BAB IV Prosedur dan Hasil Perhitungan

Berisikan tentang proses pelaksanaan dan perhitungan yang meliputi pembebanan struktur, permodelan menggunakan software, analisa stabilitas dan deformasi.

BAB V Analisis dan Pembahasan

Pada bab ini dijelaskan hasil penelitian dan analisis pembahasan terhadap hasil yang diperoleh.

BAB VI Penutup

Pada bab ini diuraikan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan beserta saran.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

UCAPAN TERIMA KASIH

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Baja Profil

Baja adalah logam panduan, logam besi yang berfungsi sebagai unsur dasar dicampur dengan beberapa elemen lainnya dengan elemen utama yaitu karbon. Karbon pada baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% dari berat keseluruhan baja sesuai dengan mutu baja itu sendiri. Elemen lain yang biasa ditambahkan pada baja seperti mangan, fosfor, sulfur, silikon, oksigen, nitrogen dan aluminium. Fungsi penambahan karbon dalam baja adalah sebagai unsur peneras dengan mencegah dislokasi bergeser pada sisi kristal dari atom penyusun besi. Tanpa karbon maka struktur kristal dari besi murni tidak memiliki sifat mengikat antar atomnya. Secara umum sifat-sifat baja sebagai berikut:

- Mempunyai nilai daya tarik, lengkung dan tekan yang besar
- Tidak mudah patah
- Bersifat lentur sehingga dapat berdeformasi
- Dapat ditempa/dilas

Penambahan kandungan karbon pada baja meningkatkan nilai kekerasan (*hardness*) dan kekuatan tarik (*tensile strength*). Namun penambahan karbon juga mengakibatkan baja semakin getas (*brittle*) dan menurunkan elastisitasnya (*ductility*). Selain itu, baja memiliki kelebihan dan kekurangan sebagai berikut:

Kelebihan Baja:

- Kuat terhadap tarik tinggi
- Tahan terhadap rayap
- Tidak memiliki perbedaan nilai muai dan susut
- Lebih lentur dan ringan dari beton

Kekurangan Baja:

- Lemah terhadap gaya tekan
- Mudah berkarat
- Tidak tahan terhadap api

2.2

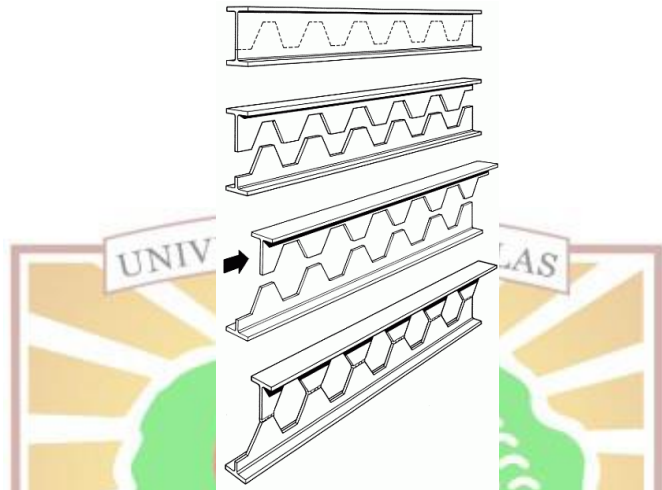
Baja Kastela

2.2.1

Pengertian

Casttelated adalah profil baja I, H, atau U yang kemudian pada bagian badannya dipotong memanjang dengan pola zig-zag. Kemudian bentuk dasar baja diubah dengan cara menggeser atau membalik setengah bagian profil baja yang telah dipotong. Penyambungan setengah bagian profil dengan cara dilas pada bagian ‘gigi-gigi’ nya. Sehingga terbentuk profil baru dengan lubang berbentuk segi enam (hexagonal), segi delapan (octogonal), dan lingkaran (circular) (Grünbauer, 2001).

Castellated Beam ini mempunyai tinggi (h) hampir 50% lebih tinggi dari profil awal sehingga meningkatkan nilai lentur axial, momen inersia (I_x), dan modulus section (S_x) (Knowles 1991).



Gambar 2. 1 Profil Baja Kastela

Profil *Castellated* mempunyai beberapa kelebihan diantara adalah (Megharief, 1997):

1. Mempunyai momen inersia dan modulus section yang lebih besar sehingga lebih kuat dan kaku bila dibandingkan dengan profil asalnya
2. Mampu memikul momen lebih besar dengan tegangan ijin yang lebih kecil
3. Bahannya ringan, kuat serta mudah dipasang
4. Mengurangi biaya erection (pengangkatan).

Namun Profil *Castelatted* juga mempunyai kelemahan sebagai berikut (Megharief, 1997):

1. Kurang tahan api, sehingga harus ditambah dengan lapisan tahan api 20% lebih tebal agar mencapai ketahanan yang sama dengan profil awalnya

2. Kurang kuat menerima gaya lateral
3. Kurang kuat dalam menerima gaya geser.

2.2.2 Teori Balok Perluasan/Badan Berlubang

Teori ini pertama kali dikemukakan oleh H.E Horton dari Cigago dan Iron Work sekitar tahun 1910. Penggunaan balok kastela pada struktur mulai digunakan pada tahun 1930. Namun baja kastela tidak mendapatkan perhatian di Amerika Utara. Namun di Eropa, penggunaan baja kastela sangat terkenal dikarenakan biaya material yang tinggi dengan biaya fabrikasi yang rendah. Lalu dengan diciptakannya pengelesan secara otomatis yang mengurangi biaya pembuatan baja kastela, maka baja kastela mulai digunakan di Amerika (Meghrifan,1997). Ide baja profil berlubang juga berkembang secara mandiri, oleh G.M.Boyd tahun 1935 di Argentina, yang kemudian mendapat paten di Inggris (Knowles,1991).

Dengan teknik pembelahan baja kastela maka menghasilkan profil yang semakin tinggi dan momen inersia yang semakin besar. Namun dengan penambahan tinggi pada profil baja maka juga menambah nilai kelangsingan yang mengakibatkan menurunkan nilai tegangan kritis. Jika tegangan kritis lebih kecil dari tegangan leleh $f_{cr} < f_y$, maka profil akan cepat rusak atau disebut dengan *premature calleb*. Hal ini dapat diatasi dengan cara memasang pengaku pada bagian pelat badan.

Dengan adanya bukaan lubang pada badan, perilaku balok kastela akan berbeda dengan balok tanpa adanya bukaan.

Kerdal dan Nethercott (1984) menentukan bahwa terdapat tujuh mode kegagalan dari balok kastela:

1. Formasi dari mekanisme Vierendeel
2. Tekuk Lateral-Torsi dari *Web Post*
3. *Buckling* Lateral-Torsi dari keseluruhan bentang
4. *Buckling Web post*
5. *Buckling* pada *Lower Tee* atau *Upper Tee*
6. Kegagalan pada sambungna las
7. Formasi dari mekanisme lentur

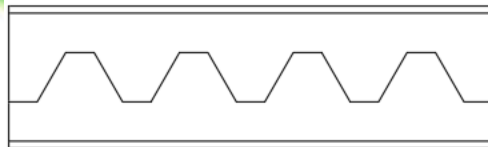
2.2.3

Bentuk dan Cara Pembuatan Balok Kastela

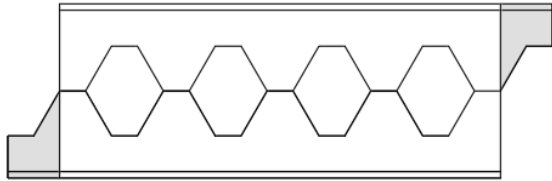
Bentuk badan profil tergantung dari teknis pembelahan plat badan profil sesuai dengan kebutuhan. Ada beberapa macam bentuk sebagai berikut:

1. Segi Enam dengan potongan lurus

Pembentukan balok kastela ini dilakukan dengan cara baja profil dibelah secara zig-zag horizontal seperti yang terlihat di Gambar 2.2. Kemudian hasil potongan plat bagian bawah dibalik lalu digabungkan dengan bagian atas dari plat. Lalu bagian yang berlebih dibuang seperti yang terlihat di Gambar 2.3.



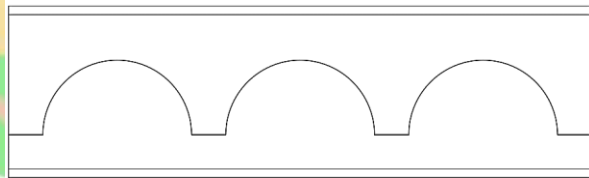
Gambar 2.2 Profil Dipotong Zig-Zag



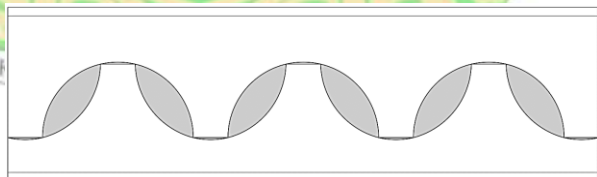
Gambar 2.3 Baja Kastela Segi Enam

2. Lingkaran dengan potongan lurus

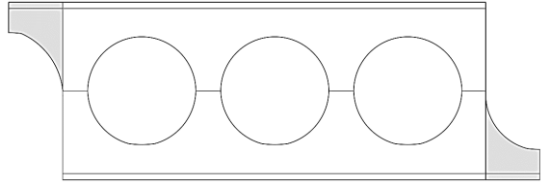
Pembentukan balok kastela ini dilakukan pemotongan pertama pada profil I seperti Gambar 2.4. Lalu dilanjutkan dengan pemotongan kedua pada bagian yang ditebalkan seperti Gambar 2.5. Kemudian hasil potongan profil dibalik dan digabungkan dengan cara dilas serta bagian yang berlebih dibuang seperti Gambar 2.6.



Gambar 2.4 Potongan Pertama Pada Profil



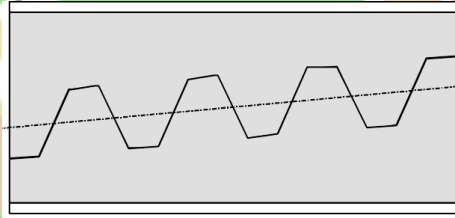
Gambar 2.5 Potongan Kedua Pada Profil



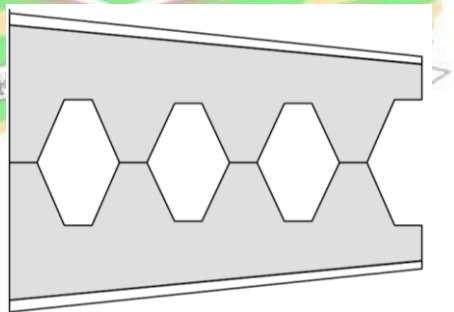
Gambar 2.6 Baja Kastela Lingkaran

3. Segi Enam dengan potongan miring

Pembentukan balok kastela ini dilakukan pemotongan secara zig-zag miring pada bagian plat badan profil I seperti Gambar 2.7. Lalu bagian potongan bawah dibalik dan dilas dengan bagian atas potongan seperti Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Profil Dipotong Zig-Zag Miring



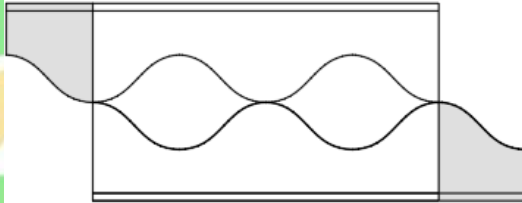
Gambar 2.8 Baja Kastela Segi Enam non Prismatis

4. Sinusoidal

Pembentukan balok kastela dilakukan dengan cara dilakukan pemotongan sesuai gelombang sinus seperti gambar Gambar 2.9. Lalu potongan dibalik dan digabungkan dengan cara dilas seperti Gambar 2.10.



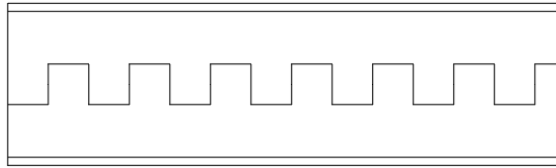
Gambar 2.9 Profil Dipotong Berbentuk Sinusoidal



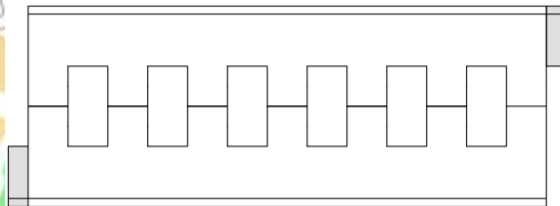
Gambar 2.10 Baja Kastela Sinusoidal

5. Persegi

Pembentukan balok kastela ini dilakukan dengan cara dilakukan pemotongan dengan bentuk persegi sesuai dengan Gambar 2.11. Lalu potongan bawah dibalik dan disambung dengan cara dilas seperti Gambar 2.12.



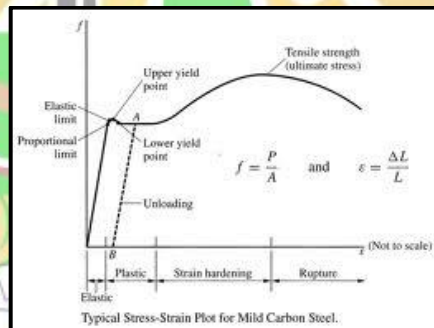
Gambar 2.11 Profil Dipotong Persegi



Gambar 2.12 Baja Kastela Persegi

2.3

Perilaku Tegangan-Regangan Baja



Gambar 2.13 Grafik Tegangan-Regangan Baja

Secara umum karakteristik material baja terlihat dari kurva tegangan-regangannya. Terlihat pada Gambar 2.13 kurva diawali dengan pertambahan nilai secara linear antara tegangan

dengan regangan, hal ini disebut dengan batas proporsionalitas atau disebut juga batas elastis, dimana bahan akan kembali ke bentuk semula jika beban dihilangkan. Kemudian baja akan memasuki batas plastis, dimana bahan tidak akan kembali ke bentuk semula walaupun beban dihilangkan. Lalu baja akan memasuki batas ultimate, merupakan titik dimana tegangan maksimum terjadi. Dan terakhir baja akan mengalami proses *necking*, yaitu pengecilan luas penampang area hingga akhirnya material akan patah.

2.4

Kriteria Leleh

Pada perangkat MSC Patran-Nastran menyediakan 4 macam kriteria leleh yaitu von Mises, Tresca, Mohr-Coulomb, dan Drucker-Prager. Dalam penelitian ini digunakan kriteria leleh von Misen karena merupakan kriteria yang lebih cocok untuk analisis plastis material baja.

2.5

Kondisi Ultimate

Pada suatu struktur balok kartilever yang diberi pembebanan, struktur tersebut akan selalu mengalami deformasi. Deformasi dapat terjadi secara vertikal maupun horizontal. Pada baja umumnya terdapat 2 macam bentuk keruntuhan yang terjadi yaitu:

1. Keruntuhan akibat leleh, yang tergantung pada panjang bentang

2. Keruntuhan akibat tekuk lokal yang ditentukan oleh tebal pelat sayap

Untuk mencapai kondisi ultimate dari penampang baja kastela, maka kita harus mencegah terjadinya tekuk lokal dan tekuk lateral pada penampang baja. Dari kondisi ultimate ini, kita bisa mendapatkan nilai beban maksimum yang dapat diterima oleh penampang baja.

2.6

Kekakuan

Merupakan suatu kemampuan suatu elemen untuk menerima beban tanpa mengakibatkan terjadinya deformasi secara permanen, kekakuan juga dapat didefinisikan sebagai hasil bagi antara beban dan deformasi dalam daerah elastis dan dihitung dengan persamaan berikut:

$$K = P / \Delta$$

Dimana:

K: Kekakuan (N/mm)

P: Beban (N)

Δ : Regangan (mm)

2.7

Daktilitas

Merupakan ukuran suatu ukuran kemampuan dari sebuah penampang dalam mengalami lendutan setelah kondisi leleh atau disebut dalam daerah plastis. Dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\mu = \Delta_m / \Delta_y$$

Dimana:

μ = Daktilitas

Δ_m = Regangan pada kondisi ultimate (mm)

Δ_y = Regangan pada kondisi leleh (mm)

2.8 Teori Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

2.8.1 Umum

Pada tahun 1960, metode elemen banyak dikenal hingga pada tahun 1963 diakui sebagai solusi pengkajian yang banyak digunakan dalam bidang teknik baik itu perpindahan panas, aliran fluida dan medan magnet. Dalam bidang teknik sipil, metode ini digunakan untuk menyelesaikan persoalan statik, dinamik, linear maupun non linear.

Finite Element Method adalah sebuah prosedur numerik yang dapat digunakan untuk memecahkan masalah mekanika kontinum dengan tingkat ketelitian yang dapat diterima. Pada dasarnya, elemen hingga merupakan bagian-bagian kecil dari struktur yang sebenarnya.

Metode elemen hingga dapat digunakan untuk menyelesaikan atau mengubah sebuah masalah dengan jumlah derajat kebebasan tertentu sehingga proses pemecahannya akan lebih sederhana.

Permasalahan teknik biasanya dilakukan pendekatan dengan cara sebuah model yang berbentuk persamaan diferensial. Setiap model matematik tersebut memiliki persamaan matematik lainnya yang ditentukan berdasarkan

asumsi dan kondisi aktual atau yang biasa disebut dengan kondisi batas.

Untuk permasalahan struktur dengan bentuk geometri dan pembebanan yang kompleks, hal ini tidak dapat diselesaikan dengan persamaan diferensial parsial, namun dapat diselesaikan dengan metode numerik pendekatan metode elemen hingga. Daerah yang dianalisis dapat mempunyai bentuk, beban dan kondisi batas sembarang. Maka metode elemen merupakan solusi yang dapat digunakan untuk memperoleh penyelesaian masalah yang kompleks.

Karena jumlah persamaan pada umumnya cukup besar, maka perhitungan dengan metode ini perlu dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak. Pada penggunaannya terdapat tiga tahapan utama yang dilakukan dalam perangkat lunak metode elemen hingga, yaitu:

1. Pra proses atau *Proprocessing*

Pada tahap ini, *user* membuat permodelan geometri penampang yang akan dianalisis, yang mana penampang tersebut akan di bagi menjadi bagian kecil-kecil.

2. Analisis

Pada tahap ini data-data yang diinputkan pada pra proses akan di analisis untuk menyelesaikan permasalahan yang dimodelkan pada sistem.

3. Pasca Proses atau *Post Processing*

Pada tahap ini, sistem akan menampilkan hasil akhir penganalisaan oleh model penganalisis dengan menampilkan data *displacements* dan tegangan yang nantinya dapat hasil analisis tersebut dalam bentuk grafis.

2.8.2

Konsep Dasar

Metoda elemen hingga merupakan salah satu metode diskretisasi ruang untuk mendapatkan solusi pendekatan dari suatu persamaan diferensial parsial.

Pada dasarnya geometri yang dimodelkan akan dilakukan *meshing* atau akan dipecah menjadi bagian-bagian kecil yang disebut sebagai elemen. Tiap-tiap element kecil tersebut akan terhubung oleh titik yang disebut sebagai *node*.

Node pada geometri yang telah di pecah menentukan jumlah dan ukuran elemen model. Terdapat 3 macam bentuk mode elemen yang dapat dibuat yaitu elemen 1 dimensi yang dapat berupa garis , 2 dimensi yang dapat berupa sebuah plat dan 3 dimensi yang dapat berupa benda yang memiliki ruang berupa kubus.

Terdapat enam kompenan tanda yang terdiri dari translasi yang ditandai dengan symbol x , y , z dan rotasi dalam tiga arah dengan symbol R_x , R_y , dan R_z . Komponen ini disebut sebagai *degree of freedom*. Kumpulan seluruh

derajat kebebasan tersebut akan menentukan perpindahan global.

Kekakuan pada tiap-tiap elemen akan ditampilkan dalam bentuk matrik, yang secara umum disebut sebagai kekakuan elemen. Ketentuan matrik kekakuan elemen berdasarkan pada input seperti jenis material, jenis elemen dan geometri dari elemen.

Seluruh matrik kekakuan elemen akan dirakit menjadi matrik tunggal yang disebut sebagai matrik kekakuan global. Matrik kekakuan global akan menampilkan kekakuan struktur secara keseluruhan sebelum diberikan beban.

Beban yang diterapkan pada model akan dibentuk menjadi sebuah vector beban. Beban tersebut nantinya akan bekerja pada tiap-tiap elemen yang ada pada model geometri, yang akan menyebabkan terjadinya perpindahan global.

Setelah kekakuan pengekang dan vektor beban dibuat, maka persamaan matrik keseimbangan statis akan berbentuk sebagai berikut:

$$[K] \{u\} = \{p\}$$

Dengan:

$[K]$ = Matrik Kekakuan Sistem

$\{u\}$ = Matrik Perpindahan Titik

$\{p\}$ = Matrik Vektor Beban

Hal yang ingin kita dapatkan dari perhitungan ini adalah matrik perpindahan atau $\{u\}$. Proses ini melibatkan persamaan invers matrik kekakuan $[K]$ dikalikan dengan matriks vektor beban $\{p\}$.

Hasil yang akan didapatkan dapat berupa tegangan, regangan dan perpindahan (*displacement*) yang terjadi pada elemen-elemen pada geometri.

2.8.3

Perangkat MSC Patran dan Nastran

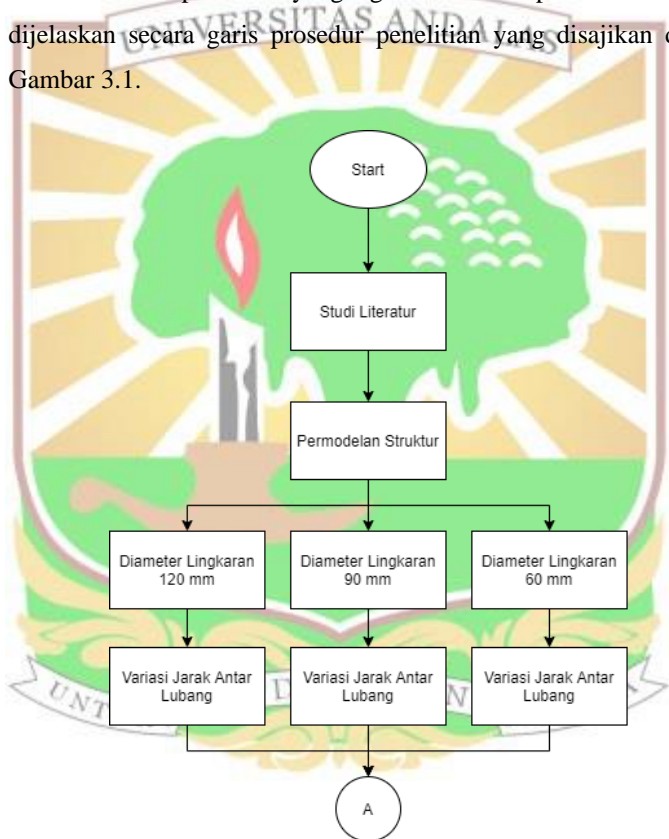
MSC Patran merupakan sebuah sistem Pra Proses dan Pasca Proses yang digunakan untuk permodelan geometri penampang yang nantinya dapat dilanjutkan dengan aplikasi analisis lain seperti MSC Nastran, Abaqus, dan lain-lain. MSC Patran menyediakan alat permodelan yang mudah dan dapat memastikan bahwa permodelan tersebut memberikan hasil yang cepat dan akurat. Dan juga MSC Patran akan menampilkan hasil perhitungan dari aplikasi analisis berupa Nastran dalam bentuk grafik.

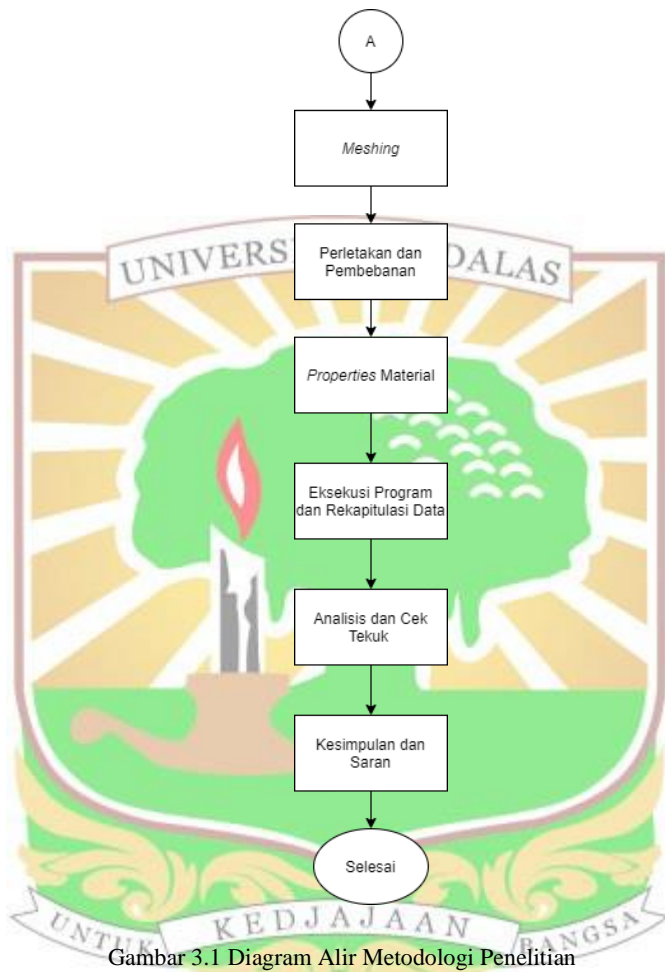
MSC Nastran merupakan aplikasi yang berperan sebagai analisis. Memungkinkan pengguna melakukan penyelesaian masalah yang kompleks baik itu analisis statis maupun dinamis linear secara efisien. MSC Nastran juga menawarkan penyelesaian masalah bidang lain seperti interaksi termal dan fluida.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metoda penelitian yang digunakan dalam penelitian ini akan dijelaskan secara garis prosedur penelitian yang disajikan dalam Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

Penjabaran diagram alir pada metodologi penelitian ini sebagai berikut:

3.1.1 Studi Literatur

Tahap ini merupakan proses mencari dan mengumpulkan teori-teori referensi yang berkaitan dengan studi yang dilakukan, guna sebagai pedoman dalam pelaksanaan penelitian. Dari referensi tersebut, nanti diketahui data apa saja yang dibutuhkan dan metoda apa yang dapat digunakan dalam penelitian ini.

3.1.2 Permodelan Struktur

Tahap ini merupakan proses dimana dilakukan permodelan atau pembuatan penampang geometri pada perangkat lunak yaitu MSC Patran.

3.1.3 Design Ukuran Lingkaran

Dalam penelitian ini digunakan 3 *design* yang berbeda pada penampang yang sama. Dan pada masing-masing *design* tersebut dibentuk variasi jarak antar bukaan yang berbeda.

3.1.4 *Meshing*

Merupakan tahap dimana struktur yang kita modelkan dipecah menjadi elemen-elemen yang lebih kecil.

3.1.5 Perletakan dan Pembebanan

Pada tahap ini diinputkan tumpuan pada bagian ujung-ujung balok dan beban di tengah bentang pada balok.

3.1.6 *Properties Material*

Merupakan tahap dimana kita melakukan input data seperti mutu baja dan juga nilai elastisitas.

3.1.7 Eksekusi Program dan Rekapitulasi Data

Pada tahap ini dilakukan *running* menggunakan program MSC Nastran, dan dilanjutkan dengan rekapitulasi data dari hasil *running* tersebut.

3.1.8 Analisis dan Cek Tekuk

Pada tahap ini dilakukan analisis perbandingan hasil perhitungan tiap-tiap *design* yang di plot kan dalam bentuk grafik serta cek tekuk pada penampang kastela.

3.1.9 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan didapatkan dari hasil analisa yang dilakukan dan diberikan saran yang membangun terhadap penelitian yang akan dilakukan di masa yang akan datang



BAB IV

PROSEDUR DAN HASIL PERHITUNGAN

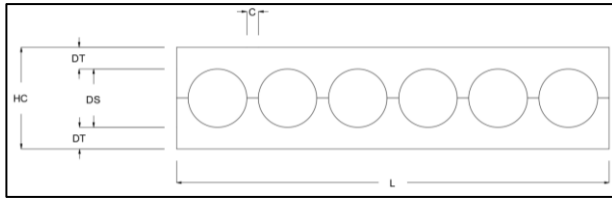
4.1 **Prosedur Kerja**

4.1.1 Permodelan Struktur

Profil IWF yang digunakan adalah profil 150.100.6.9 yang dijadikan balok kastela. Terdapat 12 variasi permodelan berdasarkan jarak antar bentang dan diameter lubang sebagai berikut:

Tabel 4.1 Parameter Variasi Dimensi Lubang Lingkaran

Variasi	HC (mm)	DT (mm)	DS (mm)	C (mm)
1	208.7878	44.3939	120	24
2	204.9909	42.955		48
3	198	39		72
4	186	33		96
5	194.0908	52.0454	90	18
6	191.2432	50.6216		36
7	186	48		54
8	177	43.5		72
9	179.3939	59.6969	60	12
10	177.4955	58.7477		24
11	174	57		36
12	168	54		48

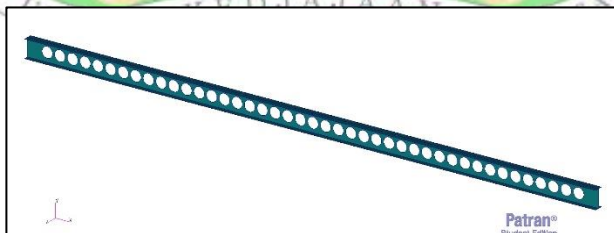


Gambar 4.1 Parameter Dimensi Lubang Lingkaran

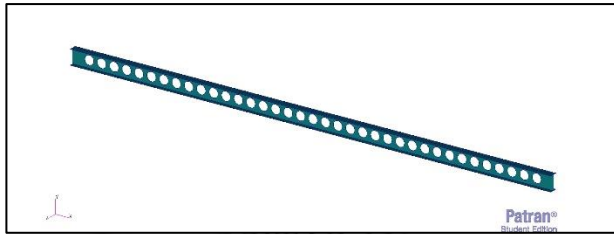
Pada aplikasi Pastran, dapat kita lakukan dengan cara seperti Gambar 4.2.



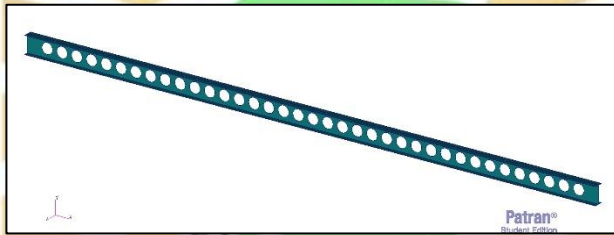
Gambar 4.2 Permodelan Struktur



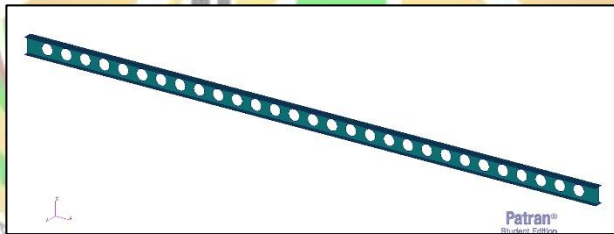
Gambar 4.3 Balok Kastela Variasi 1



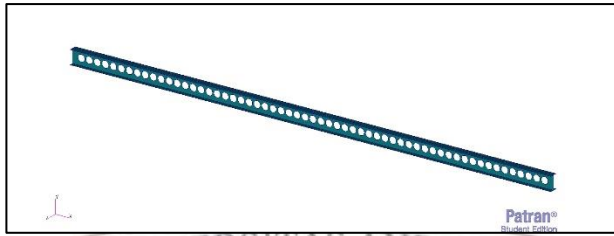
Gambar 4.4 Balok Kastela Variasi 2



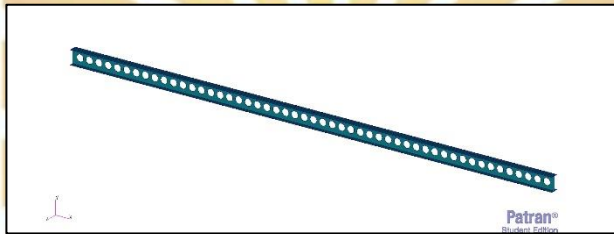
Gambar 4.5 Balok Kastela Variasi 3



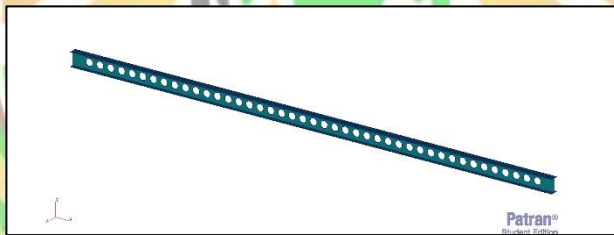
Gambar 4.6 Balok Kastela Variasi 4



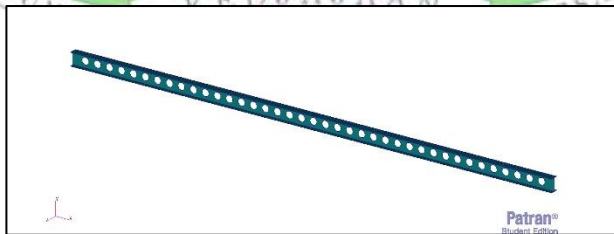
Gambar 4.7 Balok Kastela Variasi 5



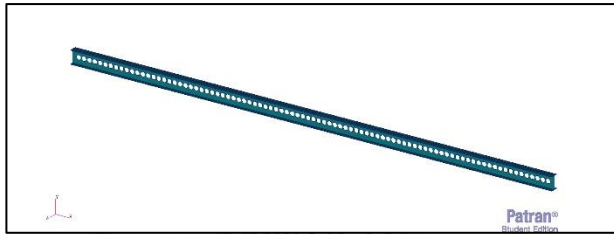
Gambar 4.8 Balok Kastela Variasi 6



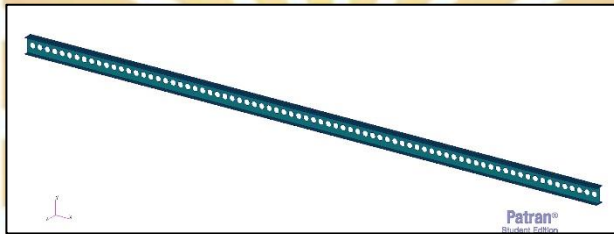
Gambar 4.9 Balok Kastela Variasi 7



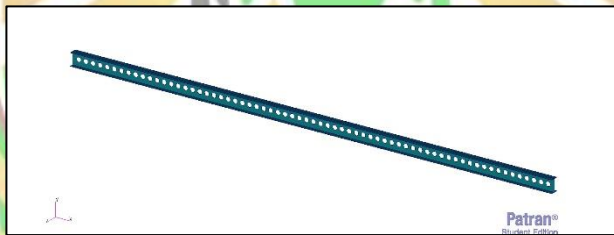
Gambar 4.10 Balok Kastela Variasi 8



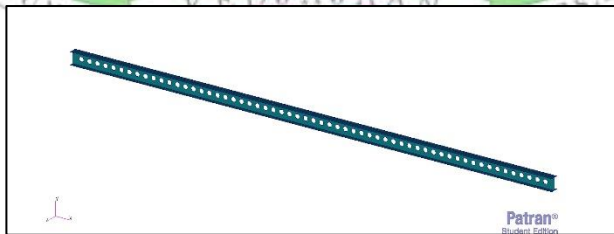
Gambar 4.11 Balok Kastela Variasi 9



Gambar 4.12 Balok Kastela Variasi 10



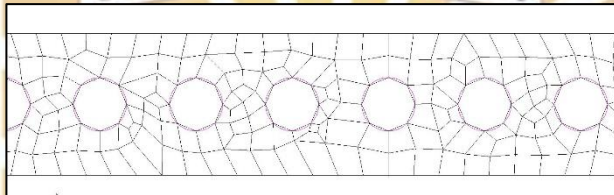
Gambar 4.13 Balok Kastela Variasi 11



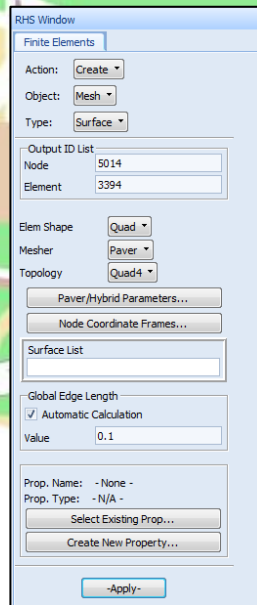
Gambar 4.14 Balok Kastela Variasi 12

4.1.2 Meshing

Tipe *meshing* yang digunakan pada permodelan ini adalah paver, dimana bentuk *meshing* yang dilakukan oleh MSC Patran berupa segi empat tidak beraturan seperti yang terlihat pada Gambar 4.15. Pada aplikasi patran dapat dilakukan dengan cara seperti Gambar 4.16



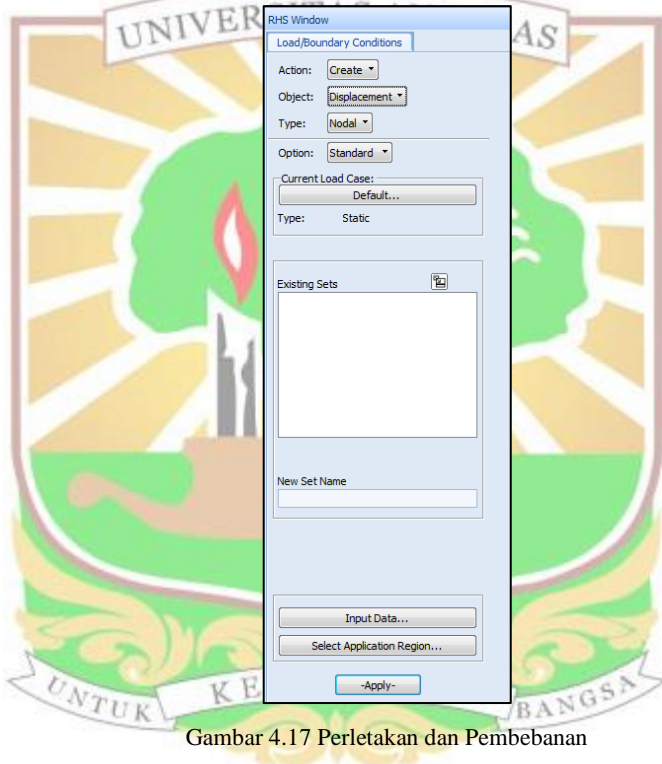
Gambar 4.15 Permodelan Meshing



Gambar 4.16 Meshing

4.1.3 Perletakan dan Pembebanan

Perletakan diberikan pada kedua ujung balok dengan tumpuan jepit-jepit. Dan pembebanan diberikan pada titik di tengah bentang secara meningkat. Pada aplikasi patran dapat dilakukan seperti Gambar 4.17



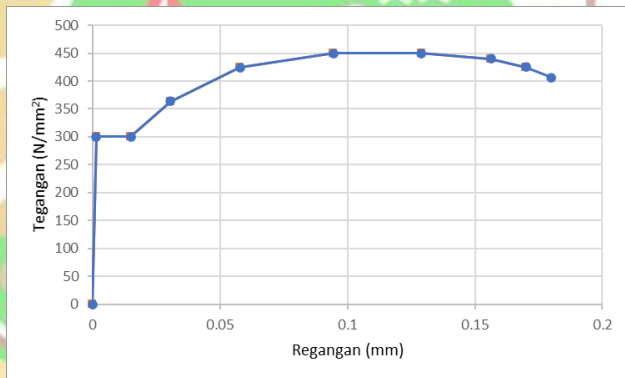
Gambar 4.17 Perletakan dan Pembebanan

4.1.4 *Properties Material*

Pada penelitian ini menggunakan input data material seperti data tegangan regangan sebagai berikut:

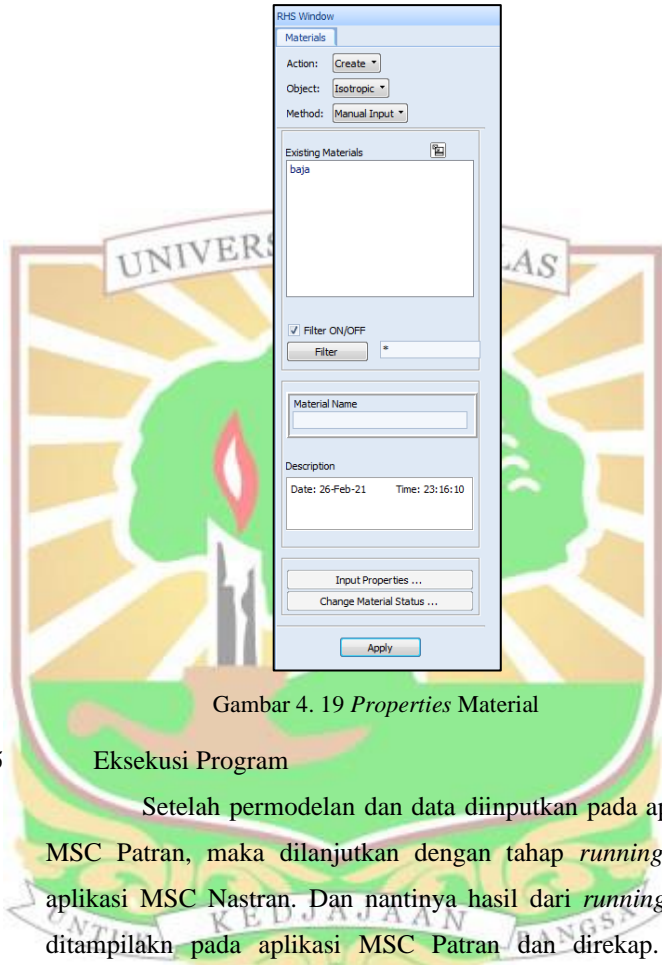
Tabel 4.2 Data Tegangan-Regangan

Regangan	Tegangan
0	0
0.0015	300
0.015	300
0.0306	364
0.0579	424
0.0944	450
0.1289	450
0.1563	440
0.17	425
0.18	406



Gambar 4.18 Grafik Data Tegangan Regangan
(Sumber: Yurisman,2010)

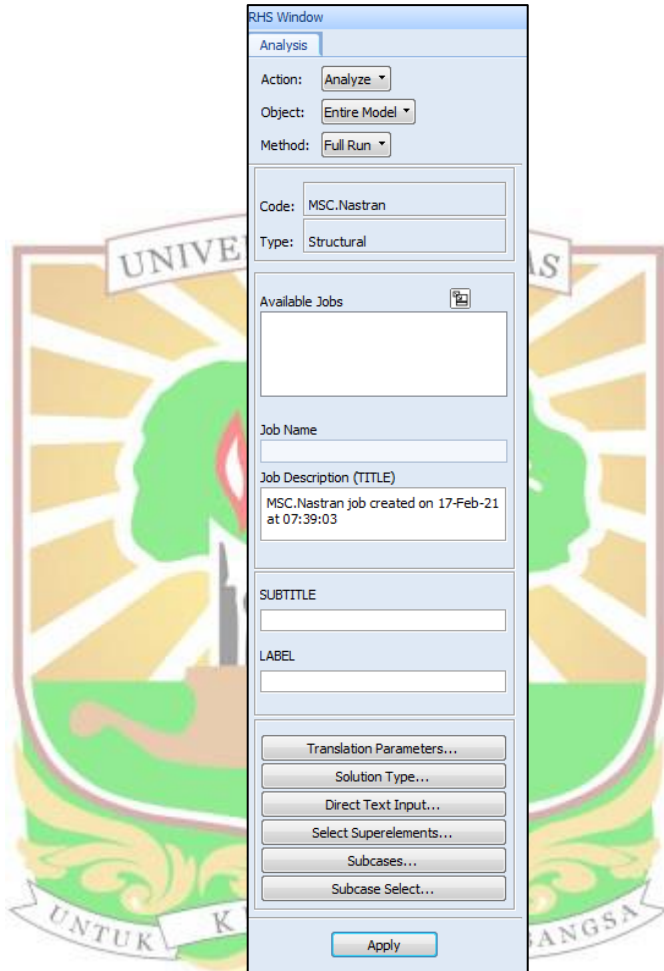
Lalu juga data modulus elastisitas sebesar 200.000 MPa dan *Poisson Ratio* sebesar 0.3. Pada aplikasi Pastran dapat dilakukan seperti Gambar 4.19



Gambar 4. 19 *Properties Material*

4.1.5 Eksekusi Program

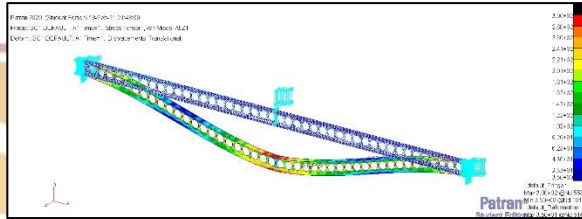
Setelah permodelan dan data diinputkan pada aplikasi MSC Patran, maka dilanjutkan dengan tahap *running* pada aplikasi MSC Nastran. Dan nantinya hasil dari *running* akan ditampilkan pada aplikasi MSC Patran dan direkap. Pada aplikasi Patran dapat dilakukan seperti Gambar 4.20



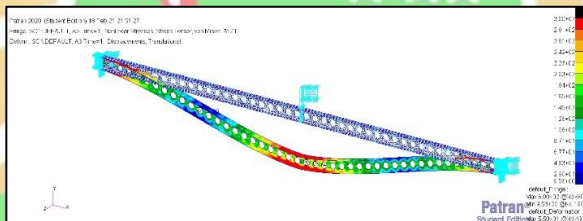
Gambar 4.20 Eksekusi Program

4.2 Hasil Kerja

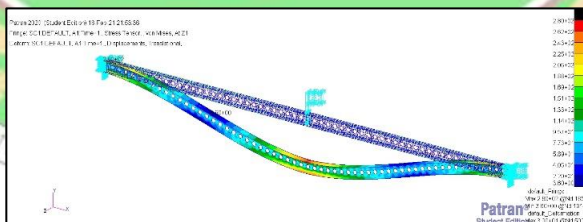
Setelah dilakukan *running* pada aplikasi MSC Nastran, maka kita dapat melihat keadaan struktur balok setelah diberikan pembebanan seperti gambar berikut:



Gambar 4.21 Deformasi Profil Diameter 120 mm



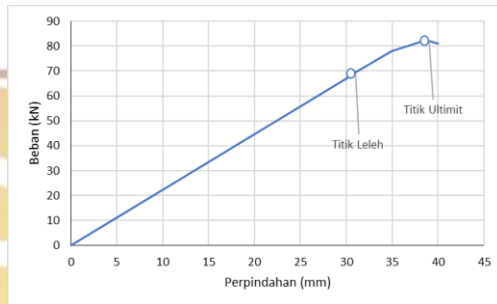
Gambar 4.22 Deformasi Profil Diameter 90 mm



Gambar 4.23 Deformasi Profil Diameter 60 mm

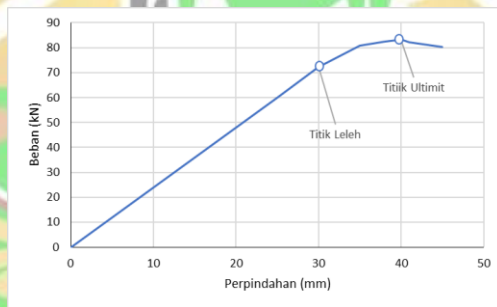
Dari hasil *running* maka akan didapatkan data output berupa nilai beban dan perpindahan yang dapat di tampilkan dalam grafik sebagai berikut:

1. Profil IWF 208,78.100.6.9 CB



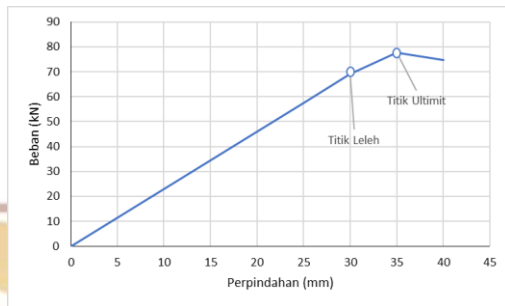
Gambar 4.24 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 1

2. Profil IWF 204,99.100.6.9 CB



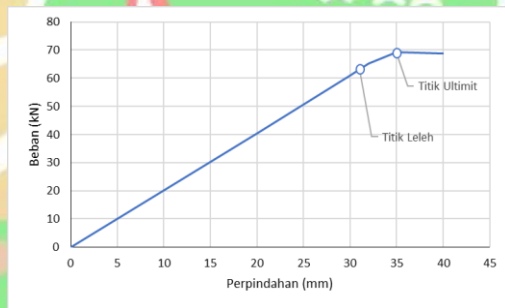
Gambar 4.25 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 2

3. Profil IWF 198.100.6.9 CB



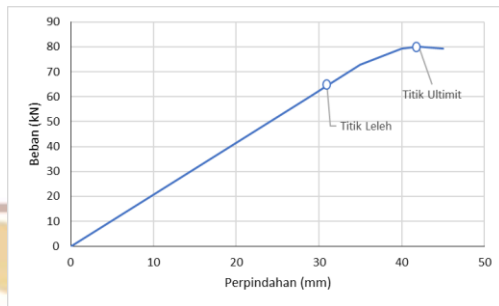
Gambar 4.26 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 3

4. Profil IWF 186.100.6.9 CB (Diameter 120 mm)



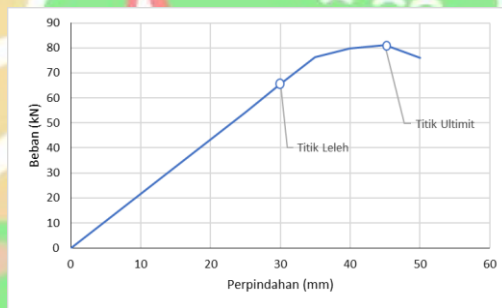
Gambar 4.27 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 4

5. Profil IWF 194,09.100.6.9 CB



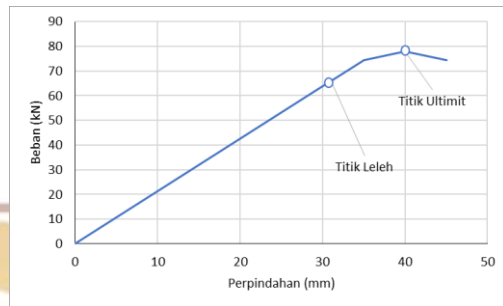
Gambar 4.28 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 5

6. Profil IWF 191,24.100.6.9 CB



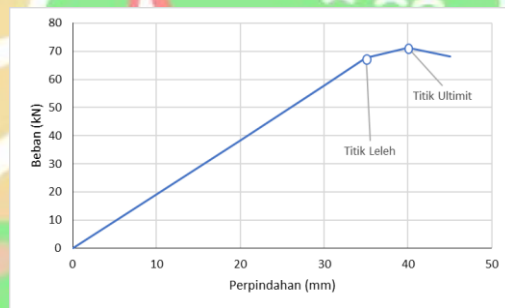
Gambar 4.29 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 6

7. Profil IWF 186.100.6.9 CB (Diamater 90 mm)



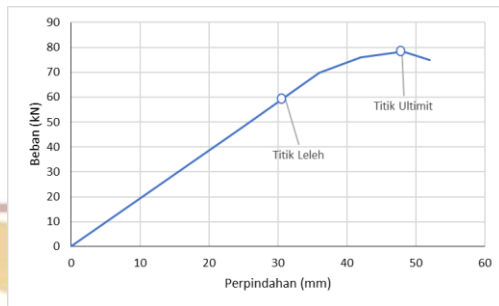
Gambar 4.30 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 7

8. Profil IWF 177.100.6.9 CB



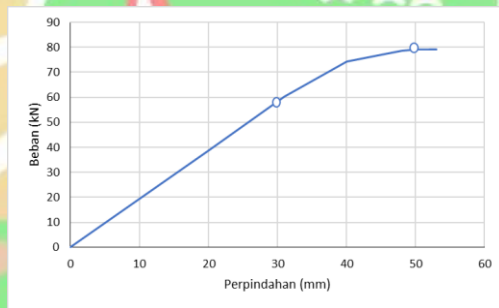
Gambar 4.31 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 8

9. Profil IWF 179,39.100.6.9 CB



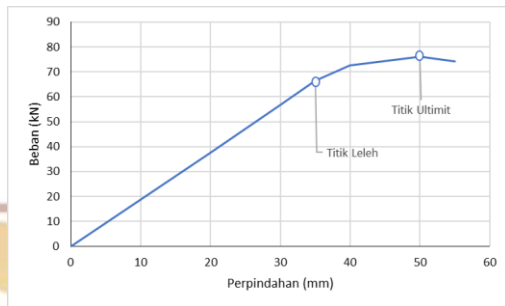
Gambar 4.32 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 9

10. Profil IWF 177,49.100.6.9 CB



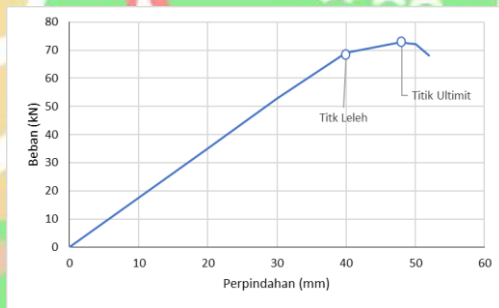
Gambar 4.33 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 10

11. Profil IWF 174.100.6.9 CB



Gambar 4.34 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 11

12. Profil IWF 168.100.6.9 CB



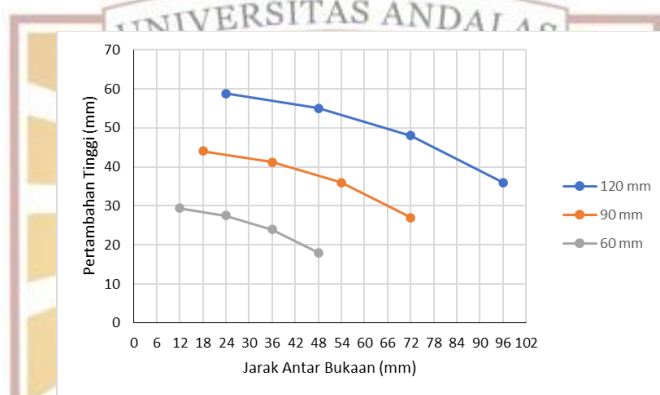
Gambar 4.35 Grafik Beban-Perpindahan Variasi 12

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisa Grafik

5.1.1 Pengaruh Jarak Antar Lubang Terhadap Tinggi Profil



Gambar 5.1 Kurva Pengaruh Jarak Antar Lubang Terhadap Tinggi Profil

Dari grafik dapat terlihat bahwa masing-masing diameter memberikan pola yang sama terhadap hubungan jarak antar lubang dengan pertambahan tinggi profil. Semakin kecil jarak antar lubang maka menghasilkan profil yang semakin tinggi, begitu pun sebaliknya.

5.1.2 Pebandingan Berdasarkan Berat

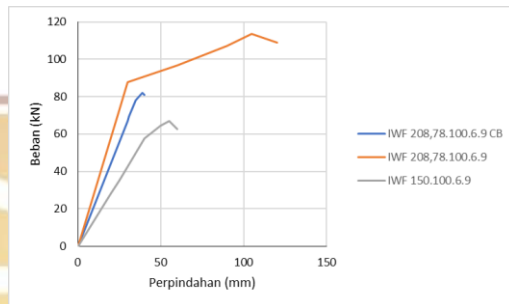
Tabel 5.1 Rekapitulasi Selisih Berat Balok Kastela dengan Penampang Asal

No	Hc (mm)	DS	C	Jumlah Lubang	% Selisih Berat
1	208.7878	120	24	43	3.562%
2	204.9909		48	37	2.086%
3	198		72	33	2.093%
4	186		96	29	3.213%
5	194.0908	90	18	59	3.034%
6	191.2432		36	51	1.927%
7	186		54	43	1.352%
8	177		72	39	2.482%
9	179.3939	60	12	89	2.071%
10	177.4955		24	77	1.333%
11	174		36	67	1.143%
12	168		48	59	1.703%

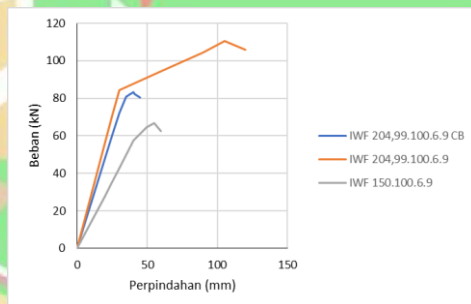
Dari data hasil perhitungan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa semakin besar jarak antar lubang, maka semakin besar juga berat yang baja yang terpotong. Dan juga semakin kecil jarak antar lubang, maka semakin banyak lubang yang terbentuk yang mengakibatkan bertambah banyak bagian baja yang terpotong.

5.1.3 Perbandingan Penampang Balok Kastela Terhadap Penampang Aslinya

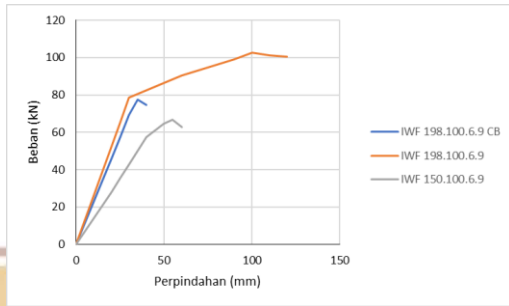
a. Diameter 120 mm



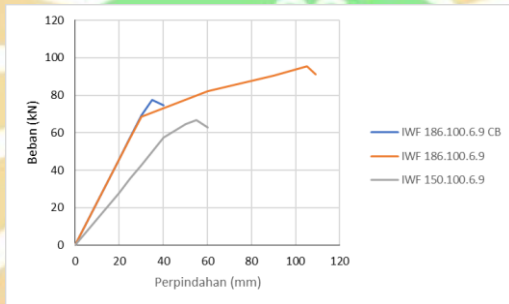
Gambar 5.2 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 1



Gambar 5.3 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 2



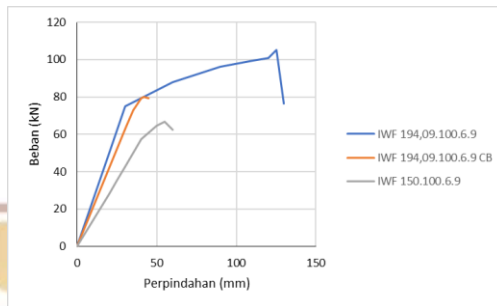
Gambar 5.4 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 3



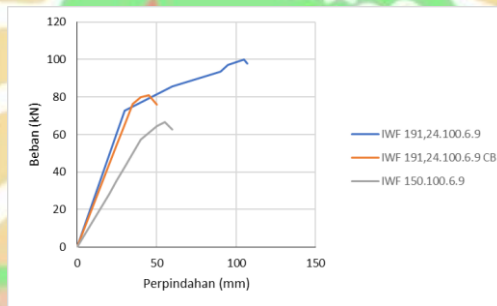
Gambar 5.5 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 4

Dari grafik yang diplot terlihat bahwa balok dengan ketinggian yang sama pada tipe non kastela memberikan hasil yang lebih baik daripada balok kastela dengan diameter 120 mm, baik dari segi kekuatan,kekakuan dan daktilitas.

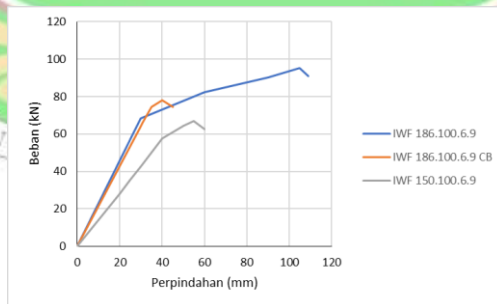
b. Diameter 90 mm



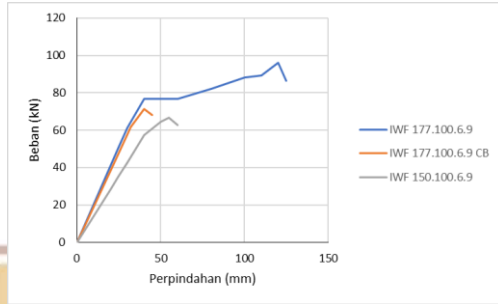
Gambar 5.6 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 5



Gambar 5.7 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 6



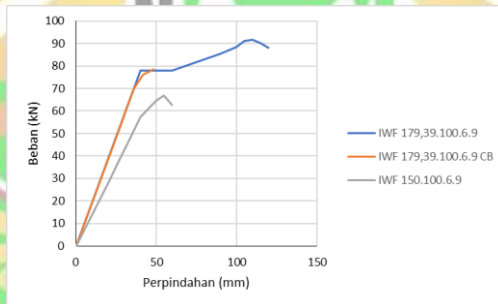
Gambar 5.8 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 7



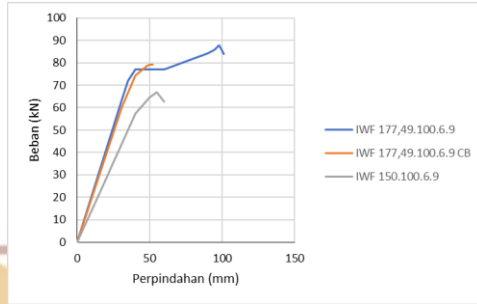
Gambar 5.9 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 8

Dari grafik yang diplot terlihat bahwa balok dengan ketinggian yang sama pada tipe non kastela memberikan hasil yang lebih baik daripada balok kastela dengan diameter 90 mm, baik dari segi kekuatan,kekakuan dan daktilitas.

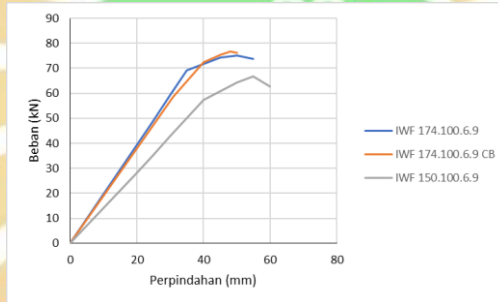
c. Diameter 60 mm



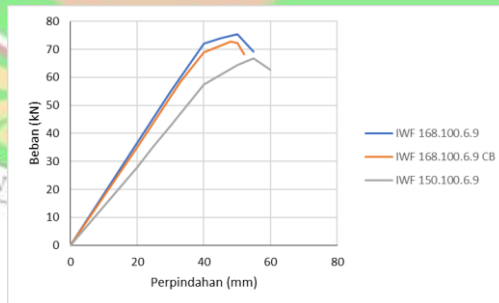
Gambar 5.10 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 9



Gambar 5.11 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 10



Gambar 5.12 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 11

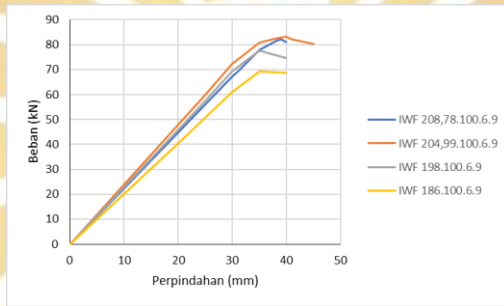


Gambar 5.13 Kurva Beban-Perpindahan Variasi 12

Pada variasi 9 dan 10 dari grafik terlihat bahwa balok dengan ketinggian yang sama pada tipe non kastela memberikan

hasil yang lebih baik daripada balok kastela dengan diameter 90 mm, baik dari segi kekuatan,kekakuan dan daktilitas. Sedangkan untuk variasi 11 dan 12 terlihat dari grafik bahwa balok kastela dan non kastela memiliki nilai yang sama dari segi kekukatan, kekakuan dan daktilitas.

5.1.4 Perbandingan Berdasarkan Diameter Lubang
a. Diameter 120 mm



Gambar 5.14 Kurva Beban-Perpindahan Dengan Diameter Lubang 120 mm

Tabel 5.2 Tabel Rekapitulasi Data Diamater 120 mm

No	HC	DS	Kekuatan	Kekakuan	Daktilitas
1	208.7878	120	82.08	2236.74	1.26
2	204.9909		83.16	2406.93	1.37
3	198		77.57	2306.15	1.17
4	186		69.28	2034.79	1.13

1. Faktor Kekuatan

Dari faktor kekuatan dapat terlihat dari grafik bahwa profil dengan ketinggian 204.99 mm mampu memikul beban tertinggi yaitu 83.16 kN.

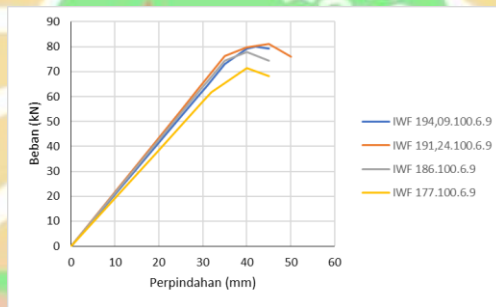
2. Faktor Kekakuan

Dari faktor kekakuan, dapat terlihat dari grafik bahwa profil dengan ketinggian 204.99 memiliki kekakuan terbesar yaitu 2406 N/mm.

3. Faktor Daktilitas

Dari faktor daktilitas, dapat terlihat dari grafik bahwa profil dengan ketinggian 204.99 memiliki daktilitas terbesar yaitu 1.37.

b. Diameter 90 mm



Gambar 5.15 Kurva Beban-Perpindahan Dengan Diameter Lubang 90 mm

Tabel 5.3 Tabel Rekapitulasi Data Diameter 90 mm

No	HC	DS	Kekuatan	Kekakuan	Daktilitas
5	194.0908	90	80.10	2080.52	1.35
6	191.2432		81.10	2181.53	1.55
7	186		78.00	2131.97	1.29
8	177		71.30	1931.53	1.25

1. Faktor Kekuatan

Dari faktor kekuatan dapat terlihat bahwa profil dengan ketinggian 191,24 mm mampu memikul beban tertinggi yaitu 81.10 kN.

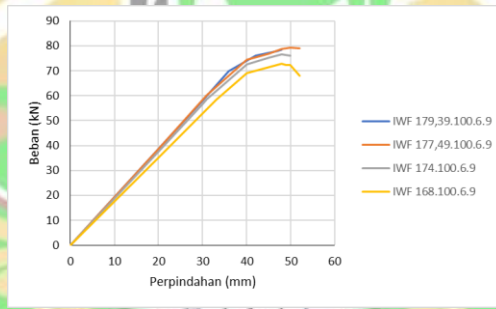
2. Faktor Kekakuan

Dari faktor kekakuan dapat terlihat bahwa profil dengan ketinggian 191.24 mm memiliki kekakuan tertinggi yaitu 2.181 N/mm.

3. Faktor Daktilitas

Dari faktor daktilitas dapat terlihat bahwa profil dengan ketinggian 191.24 mm dengan nilai daktilitas terbesar yaitu 1.55.

c. Diameter 60 mm



Gambar 5.16 Kurva Beban-Perpindahan Dengan Diameter Lubang 60 mm

Tabel 5.4 Rekapitulasi Data Diameter 60 mm

No	HC	DS	Kekuatan	Kekakuan	Daktilitas
9	179.3939	60	78.45	1936.37	1.57
10	177.4955		79.16	1942.93	1.61
11	174		75.28	1891.44	1.55
12	168		72.85	1767.71	1.48

1. Faktor Kekuatan

Dari faktor kekuatan, terlihat pada grafik bahwa profil dengan ketinggian 177.49 mm mampu memikul beban tertinggi yaitu 79.16 kN.

2. Faktor Kekakuan

Dari faktor kekakuan, terlihat pada grafik bahwa profil dengan ketinggian 177.49 mm memiliki kekakuan tertinggi yaitu 1942 N/mm

3. Faktor Daktilitas

Dari faktor daktilitas, terlihat pada grafik bahwa profil dengan ketinggian 177.49 mm memiliki daktilitas tertinggi yaitu 1,61.

5.2 Cek Tekuk dan Geser

Selanjutnya dilakukan cek tekuk pada semua profil penampang.

Terdapat beberapa langkah perhitungan sebagai berikut:

Variasi 1 – IWF 208,78.100.6.9

$$b = 100 \text{ mm} \quad f_y = 300 \text{ MPa}$$

$$h = 208,78 \text{ mm} \quad r_y = 22.58 \text{ mm}$$

$$t_w = 6 \text{ mm} \quad E = 200.000 \text{ MPa}$$

$$t_f = 9 \text{ mm} \quad G = 80.000 \text{ MPa}$$

$$f_r = 90 \text{ Mpa} \quad A = 2944.68 \text{ mm}^2$$

$$S_x = 201293.8 \text{ mm}^3$$

1. Tekuk Lokal

a) Pelat Sayap

$$\lambda = B/2t_f$$

$$\lambda = 5.555555556$$

$$\lambda_p = 170/\sqrt{F_y}$$

$$\lambda_p = 9.81$$

$\lambda < \lambda_p$ Penampang Kompak OK!

b) Pelat Badan Tanpa Lubang

$$\lambda = h/t_w$$

$$\lambda = 34.79666667$$

$$\lambda_p = 1680/\sqrt{F_y}$$

$$\lambda_p = 96.99$$

$\lambda < \lambda_p$ Penampang Kompak OK!

c) Pelat Badan Dengan Lubang

$$\lambda = Dt/t_w$$

$$\lambda = 20$$

$$\lambda_p = 365/\sqrt{F_y}$$

$$\lambda_p = 21.07328483$$

$\lambda < \lambda_p$ Penampang Kompak OK!



Tabel 5.5 Rekapitulasi Cek Tekuk Lokal

No	Hc (mm)	DS	C	Cek Tekuk Pelat						KET
				Sayap		Badan Tanpa Lbg		Badan Dengan Lbg		
				λ	λ_p	λ	λ_p	λ	λ_p	
1	208.7878	120	24			34.80		20		OK
2	204.9909		48			34.17		20		OK
3	198		72			33.00		20		OK
4	186		96			31.00		20		OK
5	194.0908	90	18			32.35		15		OK
6	191.2432		36	5.56	9.81	31.87	96.99	15	21.07	OK
7	186		54			31.00		15		OK
8	177		72			29.50		15		OK
9	179.3939	60	12			29.90		10		OK
10	177.4955		24			29.58		10		OK
11	174		36			29.00		10		OK
12	168		48			28.00		10		OK

Dari perhitungan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pada semua ukuran penampang balok kastela tidak terjadi tekuk lokal.

2. Tekuk Lateral

a) Inersia Penampang

Ix Penampang tanpa bagian lubang:

Pot 1

$$I_{x1} = \frac{1}{12} bh^3 + A d^2$$

$$I_{x1} = 6075 + 8980210.89$$

$$I_{x1} = 21445627.09 \text{ mm}^4$$

Pot 2

$$I_{x1} = \frac{1}{12} bh^3 + A d^2$$

$$I_{x1} = 3471910.631 + 0$$

$$I_{x1} = 3471910.631 \text{ mm}^4$$

$$\text{Total } I_{x1} = 21444482.41 \text{ mm}^4$$

Ix Penampang dengan lubang:

Pot 1

$$Ix_2 = 1/12 hb^3 + A d^2$$

$$Ix_2 = 6075 + 8980210.89$$

$$Ix_2 = 17972571.78 \text{ mm}^4$$

Pot 2

$$Ix_2 = 1/12 hb^3 + A d^2$$

$$Ix_2 = 22162.13991 + 1281793.176$$

$$Ix_2 = 2607910.631 \text{ mm}^4$$

$$\text{Total } Ix_2 = 20580482.41 \text{ mm}^4$$

Ix rata-rata:

$$Ix = (Ix_1 + Ix_2) / 2$$

$$Ix = 21012482.41 \text{ mm}^4$$

Iy Penampang tanpa bagian lubang:

Pot 1

$$Iy_1 = 1/12 bh^3 + A d^2$$

$$Iy_1 = 750000 + 0$$

$$Iy_1 = 1500000 \text{ mm}^4$$

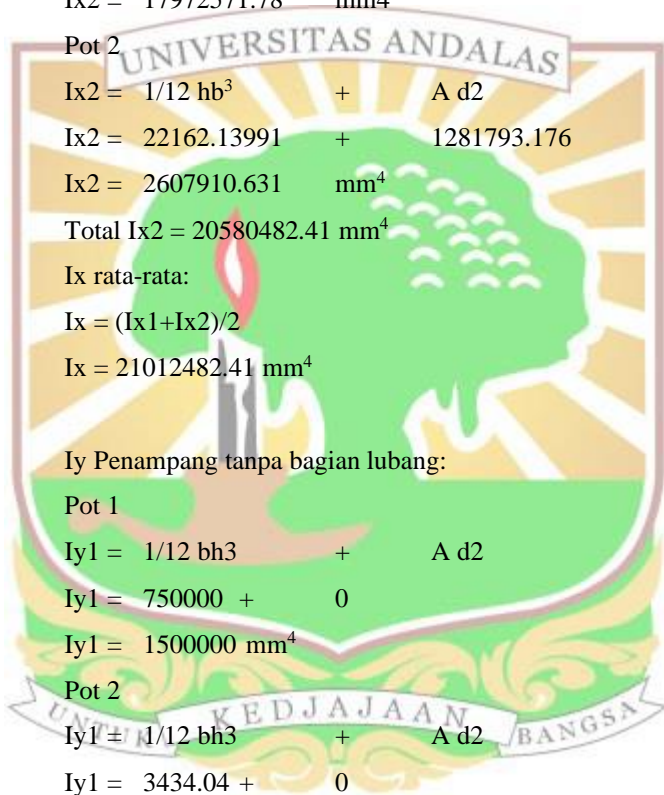
Pot 2

$$Iy_1 = 1/12 bh^3 + A d^2$$

$$Iy_1 = 3434.04 + 0$$

$$Iy_1 = 3434.04 \text{ mm}^4$$

$$\text{Total } Iy_1 = 1503434.04 \text{ mm}^4$$



Iy Penampang dengan lubang:

Pot 1

$$Iy2 = 1/12 bh^3 + A d^2$$

$$Iy2 = 750000 + 0$$

$$Iy2 = 1500000 \text{ mm}^4$$

Pot 2

$$Iy2 = 1/12 bh^3 + A d^2$$

$$Iy2 = 637.02 + 0$$

$$Iy2 = 1274.04 \text{ mm}^4$$

$$\text{Total } Iy2 = 1501274.04 \text{ mm}^4$$

Iy rata-rata:

$$Iy = (Iy1 + Iy2) / 2$$

$$Iy = 1502354.04 \text{ mm}^4$$

b) Menentukan Panjang bentang

$$Lb = 0.65 \times 6500 \text{ mm} = 4225 \text{ mm}$$

$$Lp = 1.76 \cdot r_y \cdot \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 1026.4 \text{ mm}$$

Untuk menghitung Lr:

$$J = [(h - 2tf) (tw)^3 + 2 (b \cdot tf^3)] / 3$$

$$J = 107371.1$$

$$X1 = \frac{\pi}{S_x} \sqrt{\frac{E \cdot G \cdot J \cdot A}{2}} = 24809.55$$

$$I_w = tf \cdot b^3 \cdot (h - tf)^2 = 28260557964$$

$$X2 = 4 \cdot \frac{I_w}{I_y} \cdot \left(\frac{S_x}{G \cdot J} \right)^2 = 4.13191 \times 10^{-5}$$

$$Lr = r_y \frac{X1}{f_y - f_r} \sqrt{1 + \sqrt{1 + X2 \cdot (f_y - f_r)^2}} = 4368.46 \text{ mm}$$

$L_p < L_b < L_r$ Bentang menengah

$$M_p = 1.12 \cdot S_x \cdot f_y = 67632858.42 \text{ N mm}$$

$$M_r = (f_y - f_r) \cdot S_x = 42270536.51 \text{ N mm}$$

$$M_n = C_b \cdot \left[M_r + (M_p - M_r) \cdot \left(\frac{L_r - L_b}{L_r - L_p} \right) \right] = 57,060,785 \text{ N mm}$$

$$M_n = 57.06 \text{ kNm}$$



UNIVERSITAS ANDALAS

Tabel 5.6 Rekapitulasi Tekuk Lateral

No	HC	DS	Mn1	Mn2
1	208.7878	120	57.06	56.34
2	204.9909		56.05	58.67
3	198		54.18	56.21
4	186		50.98	51.25
5	194.0908	90	53.47	52.40
6	191.2432		52.72	51.40
7	186		51.34	53.70
8	177		48.98	50.22
9	179.3939	60	49.81	48.77
10	177.4955		49.31	48.94
11	174		48.40	47.64
12	168		46.84	47.40

Ket :

Mn1 = Momen Nominal Perhitungan Manual

Mn2 = Momen Nominal Hasil *Running* MSC Patran-Nastran

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nilai secara umum nilai Mn2 mendekati nilai Mn1, Hal ini dikarenakan dalam processing pada software dilakukan dengan *finite element method*, sehingga beban akan terus dihasilkan mengikuti tegangan ultimitnya. Sementara perhitungan kapasitas momen nominal panampang dibatasi pada pola tegangan lelehnya.

3. Kuat Geser

$$h/tw = 208.78/6 = 34.8$$

$$1,10 \sqrt{\frac{Kn.E}{fy}} = 63.54$$

$$(h/tw) \leq 1,10 \sqrt{\frac{Kn.E}{fy}} \dots\dots\dots \text{Maka}$$

$$Aw = (h - dt) \cdot tw$$

$$Aw = 89$$

$$Vn = 0.6 \cdot fy \cdot Aw$$

$$Vn = 0.6 \cdot 300 \cdot 89$$

$$Vn = 95890.82 \text{ N}$$

Tabel 5.7 Tabel Rekapitulasi Cek Kuat Geser

No	Hc	Vn1	Vn2
1	208.7878	95890.82	34669.41
2	204.9909	91790.17	36104.01
3	198	84240	34592.21
4	186	71280	31539.21
5	194.0908	80018.06	32248.08
6	191.2432	76942.66	31632.25
7	186	71280	33045.54
8	177	61560	30904.48
9	179.3939	64145.41	30013.74
10	177.4955	62095.14	30115.39
11	174	58320	29317.34
12	168	51840	29167.15

Ket:

Vn1 = Kuat Geser Nominal Perhitungan Manual

Vn2 = Kuat Geser Nominal Aplikasi Patran Nastran

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nilai secara umum nilai Vn2 lebih kecil dibandingkan Vn1, maka dapat disimpulkan bahwa tidak terjadi keruntuhan geser pada semua variasi balok kastela.



BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal, sebagai berikut:

1. Pengurangan jarak antar lubang serta penambahan diameter mengakibatkan penambahan pada tinggi penampang
2. Pengaruh penambahan ukuran diameter lingkaran mengakibatkan pertambahan nilai kekuatan dan kekakuan serta pengurangan nilai daktilitas pada balok kastela.
3. Variasi 2, 6 dan 10 merupakan variasi yang terbaik pada tiap diameternya, yang dimana memiliki kekuatan, kekakuan dan daktilitas terbesar.
4. Penampang terbaik yang didapatkan ialah Profil IWF 191,24.100.6.9 *Castellated Beam* dengan diameter 90 mm dan jarak antar lubang 36 mm.

6.2 Saran

1. Untuk penelitian selanjutnya dapat meneliti output dari balok kastela dari segi tegangan dan gaya tarik pada daerah lubang.
2. Untuk penelitian selanjutnya agar bisa membandingkan balok kastela dengan bukaan terbaik dari bentuk lubang segi enam, segi delapan, lingkaran dan sebagainya dengan tinggi penampang serta tinggi lubang yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

1. *Mscsoftware.com (2016). NAS120 Online Training Finite Element Method.*
2. Badan Standarisasi Nasional. 2002. SNI 03-1729-2002. Tata cara perencanaan struktur baja untuk bangunan Gedung Bandung:Departemen Pekerjaan Umum
3. Megharief, J.D. 1997. *Behavior Of Composite Castellated Beams* [Tesis]. Montreal (CA): McGill University
4. Kerdal, D. And D.A Nethercot. 1984. *Failure Modes For Castellated Beam.* 4:298
5. Tjerita, Ketut Ngurah. 2018. *Metoda Elemen Hingga.* Bali: Universitas Udayana.
6. Pranata, Yosafat Aji. 2019. *Metoda Elemen Hingga.* Bandung: Universitas Kritis Maranatha
7. Anggraini, Sylvy. 2011. *Design Modification of Bahtera Hotel Balikpapan Using Hexagonal Castellated Beams* [Tesis]. Surabaya (ID): Universitas Sepuluh November.



UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah berkat adanya bimbingan, dukungan dan bantuan dari berbagai pihak akhirnya penulis bisa menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Ucapan puji syukur dan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan saudara yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan serta memberikan semangat baik secara moral maupun material, sehingga penulis mampu menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Junaidi, Dr. Eng, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas
3. Ibu Masrilayanti, Ph.D selaku dosen pembimbing I dan Ibu Jati Sunaryati, Ph.D selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk membantu dan memberikan bimbingan serta arahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Febrin Anas Ismail Dr. Eng, selaku dosen pembimbing akademik penulis di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas.
5. Seluruh dosen, staf pengajar dan karyawan/ti Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas
6. Bapak Dr.Ir. Yurisman, MT yang telah membantu penulis dalam penelitian Tugas Akhir ini.
7. Seluruh teman – teman mahasiswa di lingkungan Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas.



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS ANDALAS - FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK SIPIL

Alamat: Gedung Jurusan Teknik Sipil, Kampus Unand Limau Manis, Padang 25163
Telepon: 0751-72664; Fax: 0751-72566; Email: tekniksipil@eng.unand.ac.id
Website: <http://sipil.ft.unand.ac.id>

**HASIL PEMERIKSAAN
KESAMAAN LAPORAN TUGAS AKHIR**

Dosen Pembimbing Tugas Akhir Program Sarjana Jurusan Teknik Sipil Universitas Andalas telah melakukan pemeriksaan 'kesamaan' (*similarity*) dengan menggunakan aplikasi Turnitin terhadap laporan Skripsi/Tugas Akhir dari mahasiswa berikut:

Nama : Helfial Arrizky
No BP : 1710921012
Judul Skripsi : Studi Numerik Kinerja Balok Kastela Dengan Variasi Jarak Antar Lubang Dan Diameter Pada Tipe Lingkaran

Pemeriksaan dengan Turnitin menghasilkan *index similarity* sebesar 5 %. Angka ini sudah memenuhi persyaratan kesamaan maksimum 30% yang ditetapkan oleh Universitas Andalas

Padang, 20 April 2021
Dosen Pembimbing Tugas Akhir

Masrilayanti, Ph.D
NIP. 197512192001122001