

STUDI ANALISIS PEMODELAN PERILAKU LENTUR PADA BAJA COLD-FORMED DALAM MENAHAN BEBAN

SKRIPSI TEKNIK SIPIL

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**NUGROHO ADI SUCIPTO
NIM. 175060100111008**

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
MALANG
2021**

LEMBAR PENGESAHAN
STUDI ANALISIS PEMODELAN PERILAKU LENTUR PADA BAJA
***COLD-FORMED* DALAM MENAHAN BEBAN**

SKRIPSI
TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



NUGROHO ADI SUCIPTO
NIM. 175060100111008

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 27 Juli 2021

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, M.Sc.
NIK. 201102 841203 2 001

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ir. Eva Arifi, ST., MT.
NIK. 201002 77/203 2 001



Mengetahui
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST, M. Eng (Prac)
NIP. 19810220 200604 1 002

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran sebagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiasi, saya bersedia skripsi ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 10 Agustus 2021



Nugroho Adi Sucipto

NIM. 175060100111008



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 010/UN10.F07.11.11/PP/2021

Sertifikat ini diberikan kepada :

NUGROHO ADI SUCIPTO

Dengan Judul Skripsi :

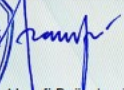
**STUDI ANALISIS PEMODELAN PERILAKU LENTUR PADA BAJA
COLD-FORMED DALAM MENAHAN BEBAN**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 9 Agustus 2021

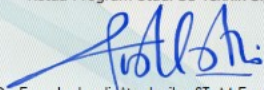
Jurusan Teknik Sipil

Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil




Alwafi Puji ahario, ST, MT

NIP. 19700829 200012 1 001


Dr. Eng. Indradi Wiatmiko, ST, M.Eng [Prac]
NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI :

Studi Analisis Pemodelan Perilaku Lentur pada Baja *Cold-Formed* dalam Menahan Beban

Nama Mahasiswa : Nugroho Adi Sucipto

NIM : 175060100111008

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Struktur

TIM DOSEN PENGUJI :

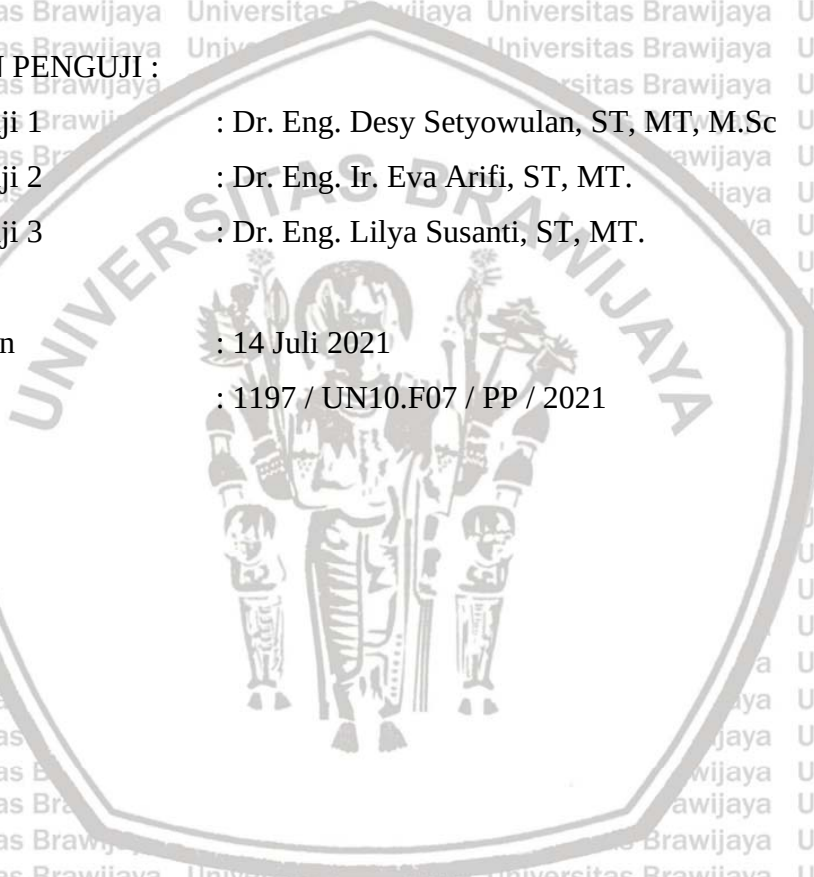
Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, MT, M.Sc

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Ir. Eva Arifi, ST, MT.

Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Lilya Susanti, ST, MT.

Tanggal Ujian : 14 Juli 2021

SK Penguji : 1197 / UN10.F07 / PP / 2021



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Maksud dan Tujuan	2
1.5. Manfaat Kegiatan	2
BAB II	3
2.1. Baja Cold-Formed	3
2.1.1. Macam-Macam Profil Baja Cold-Formed	4
2.1.2. Sifat Mekanik Baja Cold-Formed	5
2.2. Tegangan – Regangan Sebenarnya (True Stress-Strain)	7
2.3. Kapasitas Baja Cold-Formed terhadap Lentur	9
2.3.1. Kapasitas Momen Nominal Penampang (M_s)	9
2.3.1.1. Berdasarkan Pelelehan Awal	9
2.3.1.2. Berdasarkan Kapasitas Cadangan Inelastis	9
2.3.2. Kapasitas Momen Komponen Struktur Nominal (M_b)	11
2.3.2.1. Komponen struktur yang menerima tekuk global	11
2.3.2.2. Komponen struktur yang menerima tekuk lokal	12
2.3.2.3. Balok dengan satu sayap dikencangkan menembus lembaran	13
2.4. Lendutan	14
2.5. Struktur Penampang I dari Dua Kanal	14
2.6. Finite Element Method (Metode Elemen Hingga)	15
2.5.1. Prosedur Dasar Analisis Elemen Hingga	16
2.7. Software ABAQUS Student Edition	16
BAB III	19
3.1. Data Profil	19
3.2. Mutu Profil	21
3.3. Metode Penelitian	21
3.4. Pemodelan dengan Software ABAQUS Student Edition	24
BAB IV	34

4.1. Pemodelan Profil Baja Cold-formed	34
4.1.1. Gambaran umum	34
4.1.2. Spesifikasi material	37
4.2. Perhitungan Manual Kapasitas Profil	39
4.2.1. Perhitungan kapasitas profil Kanal	39
4.2.1.1. Data perhitungan	39
4.2.1.2. Perhitungan Kapasitas	39
4.2.2. Perhitungan kapasitas profil Square Hollow	41
4.2.2.1. Data perhitungan	41
4.2.2.2. Perhitungan Kapasitas	41
4.2.3. Perhitungan kapasitas profil Double Canal	42
4.2.3.1. Data Perhitungan	42
4.2.3.2. Perhitungan kapasitas	43
4.3. Analisis Profil menggunakan Software ABAQUS	44
4.3.1. Kapasitas Profil	44
4.3.2. Tegangan – Regangan	46
4.3.3. Hubungan Beban Dan Lendutan	49
4.3.4. Bentuk Keruntuhan	52
4.3.5. Momen Kurvatur	54
BAB V	57
5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran	58
Daftar Pustaka	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 : Kekuatan Minimum Baja Ringan Sesuai SNI 7971:2013.....	7
Tabel 2.2 : Batas lendutan maksimum.....	14
Tabel 3.1 : Sifat Mekanis G550.....	21
Tabel 4. 1. Tabel engineering stress-strain dan true stress-strain.....	37
Tabel 4. 2. Tabel rekapitulasi kapasitas profil kanal.....	40
Tabel 4. 3. Tabel rekapitulasi kapasitas profil square hollow.....	42
Tabel 4. 4. Rekapitulasi kapasitas Profil double canal.....	43
Tabel 4. 5. Hasil Kapasitas dari ABAQUS dan SNI.....	45



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 : Bentuk Profil Struktural Tunggul.....	4
Gambar 2.2 Bentuk Panel dan Dek.....	4
Gambar 2.3 : Kurva Tegangan Regangan Cold-Formed	5
Gambar 2.4 : (a). simulasi beban angin pada bangunan lepas pantai. (b). respon modal pada bangunan gedung. (c). aliran angin dan manajemen suhu. (d). pola bidang listrik antenna pada helikopter.....	15
Gambar 2.5 : (a) Model bentuk sembarang (b) Model elemen hingga pada bentuk sembarang tersebut.....	16
Gambar 2.6 : Modul dari ABAQUS Student Edition	17
Gambar 2.7 : Diagram Alir Proses Running Program ABAQUS Student Edition.....	18
Gambar 3.1 : Profil Kanal C80.30.9.....	19
Gambar 3.2 : Profil Kanal C80.30.9 Ganda Tersusun-I.....	20
Gambar 3.3 : Profil Kanal Hollow 4x4.....	20
Gambar 3.4 : Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 3.5 : Diagram Alir Penelitian Menggunakan ABAQUS Student Edition.....	23
Gambar 3.6 : Memasukkan Koordinat Setiap Titik Pada Profil C80.30.9.....	24
Gambar 3.7 : Memasukkan Koordinat dan Diameter Loading Beam.....	24
Gambar 3.8 : Hasil Input Koordinat dan Pemberian Panjang Profil.....	25
Gambar 3.9 : Memasukkan nilai modulus elastisitas dan poisson ratio	25
Gambar 3.10 : Memasukkan nilai tegangan leleh dan plastic strain.....	26
Gambar 3.11 : Memasukkan ketebalan penampang pada Edit Section	26
Gambar 3.12 : Menyusun part C80.30.9 dan Loading beam pada Crate Instance.....	27
Gambar 3.13 : Membuat step Lentur dan memilih tipe prosedur static general	27
Gambar 3.14 : Memasukkan nilai increment dan	28
Gambar 3.15 : Membuat reference point pada Loading Beam	28
Gambar 3.16 : Mendefinisikan jenis kontak antara permukaan Loading Beam dan permukaan balok C80.30.9	29
Gambar 3.17 : Mendefinisikan jenis interaksi antara Loading Beam dan C80.30.9	29
Gambar 3.18 : Memasukkan nilai beban pada reference point Loading Beam	30
Gambar 3.19 : Mendefinisikan boundary condition pada reference point balok C80.30.9 dan pada Loading Beam	30
Gambar 3.20 : Membuat seed part pada Loading Beam dan balok C80.30.9.....	31
Gambar 3.21 : Melakukan Meshing pada Loading Beam dan balok C80.30.9	31
Gambar 3.22 : hasil akhir meshing struktur balok yang akan di uji	32
Gambar 3.23 : Membuat perintah Job.....	32
Gambar 3.24 : Melakukan submit untuk memulai analisis.....	33
Gambar 4. 1. Loading beam sebagai tempat pemberian beban	34
Gambar 4. 2. Pemodelan benda uji profil kanal.....	35
Gambar 4. 3. Pemodelan benda uji profil Square Hollow	35
Gambar 4. 4. Pemodelan benda uji profil double canal.....	35
Gambar 4. 5. Bentuk pengujian pada profil kanal, letak tumpuan dan letak pengaku web	36
Gambar 4. 6. Bentuk pengujian pada square hollow dan letak tumpuan.....	36
Gambar 4. 7. Bentuk pengujian pada profil double canal, letak tumpuan dan letak pengaku web	36
Gambar 4. 8. Grafik Engineering Stress-Strain dan True Stress-Strain.....	38
Gambar 4. 9. Kapasitas profil kanal hasil analisis abaqus.	44
Gambar 4. 10. Kapasitas profil square hollow hasil analisis abaqus	44
Gambar 4. 11. Kapasitas profil double canal hasil analisis abaqus	45
Gambar 4. 12. Stress maksimum pada lip kanal	46
Gambar 4. 13. Stress maksimum pada profil square hollow pada web bawah.....	46
Gambar 4. 14. Grafik Stress - Strain pada profil kanal.....	47
Gambar 4. 15. Grafik stress - strain pada profil square hollow	47

The logo of Universitas Brawijaya is a circular emblem. In the center is a stylized figure, likely a representation of a deity or a historical figure, wearing a crown and holding a staff or scepter. The figure is flanked by two smaller figures or symbols. The entire emblem is enclosed within a circular border containing the text 'UNIVERSITAS BRAWIJAYA' in a serif font.

RINGKASAN

Nugroho Adi Sucipto, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, April 2021, *Studi Analisis Pemodelan Perilaku Lentur pada Baja Cold-Formed dalam Menahan Beban*, Dosen pembimbing: **Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, M.Sc.** dan **Dr. Eng. Ir. Eva Arifi, ST., MT.**

Perkembangan jumlah penduduk di Indonesia semakin meningkat. Hal ini disertai dengan bertambahnya kebutuhan infrastruktur. Dibutuhkan berbagai macam ilmu dalam pembuatan infrastruktur. Selain itu, dibutuhkan juga berbagai bahan konstruksi dan teknologi yang berpengaruh besar dalam pembangunan infrastruktur. Salah satu bahan konstruksi yang ekonomis dan berkualitas tinggi saat ini adalah baja Cold-Formed. Dalam analisis ini dilakukan dengan perhitungan manual yang berdasarkan SNI 7971:2013 tentang Struktur Baja Cold-Formed dan menggunakan bantuan *software ABAQUS student edition*. Profil yang digunakan pada analisis yaitu profil C80.30.9 dengan tebal 0,75 mm, profil *Square Hollow* 41x41 dengan tebal 1,31 mm, dan profil *Double Canal* yang terbuat dari profil kanal yang disusun I. Profil yang digunakan memiliki mutu G550 dengan nilai f_y dan f_u nya sebesar 550 MPa. Pembebanan *ABAQUS student edition* di lakukan pada tengah bentang dengan beban yang naik secara bertahap hingga analisis berhenti atau *aborted*.

Hasil dari analisis ini yaitu, kapasitas Profil Kanal adalah 13534,386 N (berdasarkan SNI) dan 13558,7832 N (berdasarkan ABAQUS). Kapasitas Profil *Square Hollow* adalah 52570,0575 N (berdasarkan SNI) dan 54263,6914 N (berdasarkan ABAQUS). Kapasitas Profil *Double Canal* adalah 27068,7720 N (berdasarkan SNI) dan 26619,6445 N (berdasarkan ABAQUS). Tegangan puncak Profil Kanal sebesar 514,311 MPa dengan regangan 0,008 yang terletak pada lip nya. Profil *Square Hollow* memiliki tegangan puncak sebesar 484,468 dengan regangan 0,0038 yang terletak pada web bagian bawah. Pada profil *Double Canal* memiliki tegangan puncak sebesar 530,91 MPa dan regangan 0,0134 yang terletak pada lip nya. Tekuk yang terjadi pada profil kanal, *square hollow*, dan *double canal* merupakan tekuk lokal karena terjadi tekuk pada flens. Secara teoritis momen yang dapat di tahan oleh profil *double canal* hampir dua kali dari profil kanal dengan rotasi yang terjadi lebih kecil dari profil kanal. Untuk profil *square hollow*, bisa menahan momen hampir sama dengan profil double canal, tetapi rotasi yang terjadi pada profil square hollow 3,5 kali profil double canal. Namun untuk nilai rotasi hasil analisis ABAQUS pada profil kanal, *square hollow*, dan *double canal* terjadi kenaikan dan penurunan yang disebabkan terjadinya tekuk lokal di daerah tumpuan.

Kata Kunci: *Cold-Formed*, kapasitas, tegangan dan regangan, tekuk, momen dan rotasi

SUMMARY

Nugroho Adi Sucipto, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering Universitas Brawijaya, April 2021, Analytical Study on the Flexural Behavior Modeling of Cold-Formed Steel in Resisting Load, Supervisor: **Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST, M.Sc. and Dr. Eng. Ir. Eva Arifi, ST., MT.**

The development of the population in Indonesia is increasing. This is accompanied by an increasing need for infrastructure. It takes various kinds of knowledge in the manufacture of infrastructure. In addition, various construction materials and technologies are needed that have a major impact on infrastructure development. One of the most economical and high-quality construction materials today is Cold-Formed Steel. In this analysis, manual calculations are carried out based on SNI 7971:2013 concerning Cold-Formed Steel Structures and using the ABAQUS student edition software. The profiles used in the analysis are the C80.30.9 profile with a thickness of 0.75 mm, the Square Hollow profile 41x41 with a thickness of 1.31 mm, and the Double Canal profile made of canal profiles arranged I. The profile used has G550 quality with a f_y value. and its f_u is 550 MPa. The loading of ABAQUS student edition is carried out in the middle of the span with the load increasing gradually until the analysis stops or is aborted.

The result of this analysis is that the channel profile capacity is 13534,386 N (based on SNI) and 13558,7832 N (based on ABAQUS). The capacity of the Square Hollow Profile is 52570.0575 N (based on SNI) and 54263.6914 N (based on ABAQUS). The capacity of the Double Canal Profile is 27068.7720 N (based on SNI) and 26619.6445 N (based on ABAQUS). The peak stress of the Canal Profile is 514.311 MPa with a strain of 0.008 located at the lip. The Square Hollow profile has a peak stress of 484.468 with a strain of 0.0038 which is located on the lower web. The Double Canal profile has a peak stress of 530.91 MPa and a strain of 0.0134 which is located at the lip. The buckling that occurs in the canal profile, square hollow, and double canal is a local buckling due to buckling in the flange. Theoretically the moment that can be resisted by the double canal profile is almost twice that of the canal profile with the rotation that occurs is smaller than the canal profile. For the square hollow profile, it can withstand almost the same moments as the double canal profile, but the rotation that occurs in the square hollow profile is 3.5 times that of the double canal profile. However, for the rotational value of the ABAQUS analysis on the canal profile, square hollow, and double canal, there is an increase and decrease due to local buckling in the support area.

Keywords: Cold-Formed, capacity, stress and strain, buckling, moment and rotation.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi di Indonesia semakin lama semakin meningkat. Hal ini sejalan dengan berkembangnya pertumbuhan penduduk di Indonesia. Dengan pertambahan ini maka tingkat kebutuhan penduduknya juga meningkat. Salah satunya adalah kebutuhan infrastruktur. Dibutuhkan berbagai macam ilmu dalam pembuatan infrastruktur. Selain itu, dibutuhkan juga berbagai material dan teknologi yang berpengaruh besar dalam pembangunan infrastruktur.

Salah satu bahan konstruksi yang ekonomis dan berkualitas tinggi saat ini adalah baja *Cold-Formed*. Material ini memiliki berbagai bentuk profil yang dapat digunakan dalam konstruksi, sehingga sekarang tidak perlu terpaku pada material beton atau kayu yang biasa digunakan pada konstruksi. Baja *Cold-Formed* mulai banyak digunakan di Indonesia, terutama sebagai rangka atap seperti gording dan reng pada rumah dan bangunan lainnya. Material ini memiliki keunggulan relatif ringan dibandingkan baja atau kayu, sehingga material ini sangat cocok digunakan pada rangka atap.

Baja *Cold-Formed* atau *Cold-Formed Steel* dibentuk dengan proses *cold forming* dari baja karbon menjadi lembaran, strip, pelat atau batangan. Profil baja *Cold-Formed* merupakan jenis profil baja dengan dimensi ketebalan yang relatif kecil dan rasio lebar terhadap ketebalan setiap elemen profil sangat besar. Karena ketebalan profil ini kecil, profil dapat dibentuk dengan proses pembentukan dingin / *cold forming*. Baja *Cold-Formed* mempunyai sifat fisik seperti baja konvensional, namun ukurannya lebih kecil sehingga menjadi bahan yang ringan, mudah diangkut, mudah pengerjaannya, dan banyak lagi.

Beberapa keunggulan bahan profil baja *Cold-Formed* dibandingkan bahan lainnya yaitu, ringan, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, dapat di fabrikasi, elemen tidak mengembang atau menyusut, menghilangkan kebutuhan akan perancah, tahan rayap dan tidak membusuk, mudah diangkut dan dipasang, tidak mudah terbakar, dapat didaur ulang dan hemat energi (Prasetyo, 2014). Mengingat keunggulan profil baja *Cold-Formed*, diperlukan banyak penelitian tentang material untuk profil baja *Cold-Formed* dalam hal perilaku komponennya.

Dalam aspek geometris profil baja *Cold-Formed*, rasio dimensi lebar terhadap ketebalan cukup besar sehingga secara signifikan mempengaruhi perilaku dan ketahanan terhadap beban. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan analisis pola perilaku yang terkait dengan dampak perubahan beban terhadap kekuatan profil.

1.2. Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini dibutuhkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi beban terhadap kekuatan lentur pada profil baja *Cold-Formed*?
2. Bagaimana perbandingan kekuatan lentur yang didapat menggunakan *software ABAQUS Student Edition* dan Analisis berdasarkan SNI 7971:2013 Struktur Baja *Cold-Formed*?

1.3. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dibutuhkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Profil baja *Cold-Formed* yang digunakan yaitu tipe kanal (C) tunggal, kanal ganda dan *Hollow Square*.
2. Dimensi profil yang digunakan yaitu profil C80.30.9 dan *Hollow Square* 41.41.1,31.
3. Mutu baja *Cold-Formed* yang digunakan yaitu G550.
4. Profil kanal ganda diasumsikan menggunakan sambungan las.
5. Pemodelan profil baja *Cold-Formed* dilakukan dengan menggunakan *software ABAQUS Student Edition*.
6. Analisis dilakukan dengan menggunakan *software ABAQUS Student Edition* dan perhitungan manual menurut SNI 7971:2013 Struktur Baja *Cold-Formed*.
7. Satuan yang digunakan dalam analisis pada *software ABAQUS Student Edition* yaitu mm (satuan panjang), N (satuan gaya), dan MPa (satuan tegangan).

1.4. Maksud dan Tujuan

Maksud dan tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui bagaimana pengaruh variasi beban terhadap kekuatan lentur pada profil *Cold-Formed* tipe kanal, *double* kanal dan *Hollow Square*.
2. Mengetahui perbandingan kekuatan lentur yang didapat menggunakan *software ABAQUS Student Edition* dan Analisis berdasarkan SNI 7971:2013 Struktur Baja *Cold-Formed*.

1.5. Manfaat Kegiatan

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui apa saja pengaruh variasi beban terhadap kekuatan lentur pada profil *Cold-Formed* tipe kanal, *double* kanal dan *Hollow Square*.
2. Untuk mengetahui perbedaan hasil kekuatan lentur yang didapat menggunakan *software ABAQUS Student Edition* dan Analisis berdasarkan SNI 7971:2013 Struktur Baja *Cold-Formed*.
3. Dapat digunakan sebagai referensi untuk bahan penelitian selanjutnya

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Baja Cold-Formed

Baja *Cold-Formed* saat ini merupakan material yang semakin banyak digunakan dalam konstruksi. Baja *Cold-Formed* berbeda dengan bahan baja pada umumnya, yang dapat dilihat dari penampang, proses pembuatan, konfigurasi dan fabrikasinya. Material ini merupakan material baja berupa lembaran, strip, pelat atau batangan yang dibentuk dengan pembentukan dingin atau *cold forming* pada suhu ruang dengan *bending brakes*, *press brake*, dan *roll-forming machines*. Proses pembentukan dingin atau *cold forming* ini sangat penting dalam pembuatan baja *Cold-Formed* dikarenakan untuk mengurangi dimensi profil. Berbeda dengan baja konvensional yang dibentuk dengan peleburan panas, baja *Cold-Formed* dibentuk dengan menyambung dan menekan lembaran baja tipis untuk mendapatkan profil penampang yang dibutuhkan. Dengan proses ini hasil yang didapatkan cukup presisi, karena pembentukannya menggunakan mesin.

Baja *Cold-Formed* memiliki dimensi ketebalan yang sangat kecil dan rasio yang sangat besar antara lebar setiap elemen profil terhadap ketebalannya. Meskipun ketebalannya lebih kecil, keandalan material baja *Cold-Formed* sebagai komponen strukturnya juga tidak kalah kuatnya dengan baja konvensional karena memiliki kekuatan luluh yang tinggi sekitar 550MPa. Karena dimensinya yang lebih kecil, baja *Cold-Formed* memiliki bobot yang lebih ringan. Selain itu, baja *Cold-Formed* memiliki beberapa keunggulan seperti hemat biaya, bahan yang kuat karena tahan karat dan rayap, tidak mudah mengembang atau menyusut, dan lain-lain. Namun baja *Cold-Formed* memiliki kelemahan, yaitu lemah terhadap tekuk lokal, puntiran dan kerusakan web atau *web crippling*. Hal ini dapat terjadi karena ketebalan baja *Cold-Formed* sangat tipis dan kandungan karbon yang ada pada baja *Cold-Formed* lebih rendah jika dibandingkan dengan baja biasa.

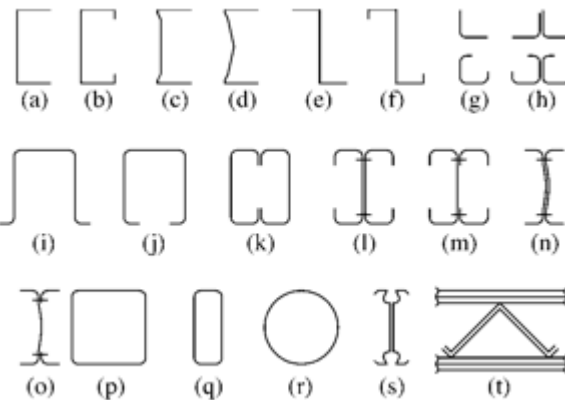
Perkembangan baja *Cold-Formed* di bidang konstruksi sudah cukup lama dan digunakan untuk berbagai kebutuhan struktur seperti balok lantai, rangka atap, dinding pada bangunan industri dan lain sebagainya. Di Indonesia baja *Cold-Formed* banyak digunakan untuk konstruksi rangka atap. Keuntungan menggunakan bahan ini dalam konstruksi adalah kecepatan pemasangannya dan kemudahannya untuk diperoleh. Oleh karena itu, baja *Cold-Formed* dapat dianggap sebagai material yang akan digunakan untuk menggantikan material kayu yang saat ini sudah mulai berkurang. Terdapat pedoman untuk perencanaan dan pelaksanaan struktur baja *Cold-Formed* di Indonesia yaitu SNI 7971:2013 tentang Struktur Baja *Cold-Formed*.

2.1.1. Macam-Macam Profil Baja Cold-Formed

Profil baja *Cold-Formed* memiliki berbagai macam bentuk. Menurut Wiguna (2015), Baja *Cold-Formed* dibagi menjadi dua golongan utama, yaitu:

1. Batang Profil Struktural Tunggal

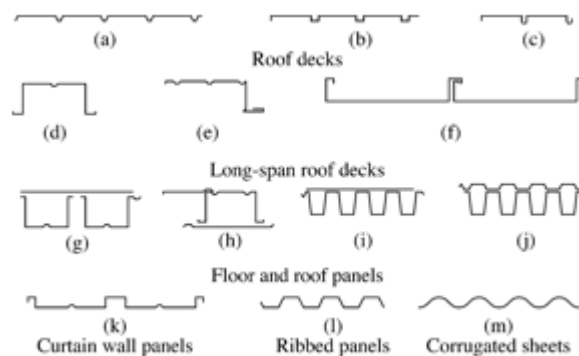
Untuk golongan ini terdapat bentuk yang umum seperti profil kanal (*C Section*), profil I (*I Section*), profil Z (*Z Section*), profil bulat (*Tubular Section*), profil siku (*Angle Section*), profil T (*T Section*), dan profil sigma (*Sigma Section*).



Gambar 2.1 : Bentuk Profil Struktural Tunggal

Sumber : *Cold-formed steel design* (5th ed), Wen Yu (2020)

2. Bentuk Panel dan Dek



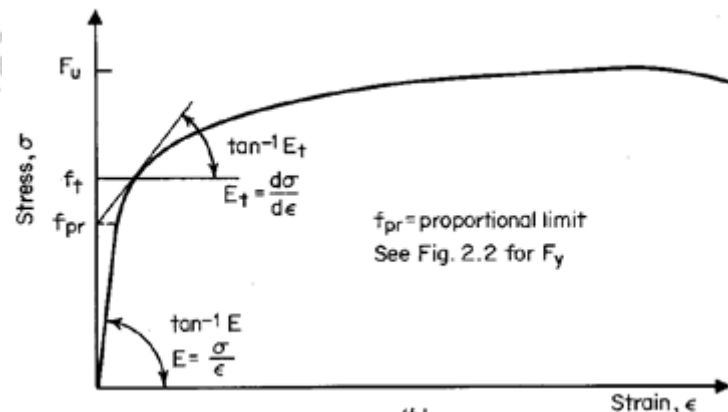
Gambar 2.2 Bentuk Panel dan Dek

Sumber : *Cold-formed steel design* (5th ed), Wen Yu (2020)

2.1.2. Sifat Mekanik Baja Cold-Formed

Sifat mekanik merupakan kemampuan material dalam menahan beban mekanik yang diberikan. Untuk mengetahui sifat-sifat yang terdapat pada baja *Cold-Formed*, dapat dilakukan dengan melakukan uji model. Pengujian yang dapat dilakukan adalah uji tarik sampel baja *Cold-Formed*. Uji tarik diterapkan karena lebih akurat daripada uji tekan. Karena berbagai faktor, seperti ketidakstabilan akibat tekuk pada benda uji, uji tekan tidak dapat memberikan data yang akurat tentang sifat mekanik material baja *Cold-Formed*. Selain itu, lebih mudah menghitung tegangan yang terjadi pada benda uji pada uji tarik dibandingkan pada uji tekan.

Kekuatan komponen Baja *Cold-Formed* dapat dilihat dari kekuatan luluh atau tegangan leleh pada Baja *Cold-Formed* tersebut, kecuali pada daerah sambungan, tekuk lokal elastis serta tekukan global yang mencapai keadaan kritis. Kurva tegangan-regangan untuk baja *Cold-Formed* ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.3 : Kurva Tegangan Regangan Cold-Formed

Sumber : *Cold-formed steel design* (5th ed), Wen Yu (2020)

Tegangan leleh Baja *Cold-Formed* sekitar 165 MPa sampai 552 MPa. Kekuatan suatu elemen tidak hanya bergantung pada titik leleh, tetapi juga pada modulus elastisitasnya (E) dan modulus tangensial (E_t). Modulus elastisitas ditentukan oleh kemiringan kurva tegangan-regangan yang lurus. Nilai dari modulus elastisitas (E) yang ditentukan dalam rentang standar dari 200 hingga 207 GPa. Modulus tangen ditentukan oleh kemiringan kurva tegangan-regangan pada setiap tingkat tegangan. (Yu, 2000)

Selain itu beberapa nilai mekanik baja *Cold-Formed* lainnya adalah sebagai berikut (Hendra, 2017):

Modulus Elastisitas bahan (E) : 200.000 MPa

Modulus Geser (G) : 80.000 MPa

Koefisien Pemuaian (α) : 12×10^6 per $^{\circ}\text{C}$

Angka Poisson (ν) : 0,3

Standar SNI 7971: 2013 tentang Struktur Baja *Cold-Formed* juga mengatur bahwa batas kuat leleh minimum (F_y) dan kuat tarik minimum (F_u) tidak boleh melebihi nilai yang dipersyaratkan pada Tabel 2.1.

Standar yang Digunakan	Mutu	Tegangan Leleh (f_y) MPa	Kekuatan tarik (f_u) MPa
AS 1163	C250 dan C250L0	250	320
	C350 dan C350L0	350	430
	C450 dan C450L0	450	500
AS 1397	G250	250	320
	G300	300	340
	G350	350	420
	G450*	450	480
	G500†	500	520
	G550‡	550	550
AS/NZS 1594	HA1	(lihat Catatan)	(lihat Catatan)
	HA3	200	300
	HA4N	170	280
	HA200	200	300
	HA250, HU250	250	350
	HA250/1	250	350
	HA300, HU300	300	400
	HA300/1, HU300/1	300	430
	HW350	350	430
	HW350	340	450
	HA400	380	460
	XF300	300	440
	XF400	380	460
	XF500	480	570
AS/NZS 1595	CA220	210	340
	CA260	250	350
	CW300	300	450
	CA350	350	430
	CA500	500	510
AS/NZS 3678	200 ($t \leq 8$ mm)	200	300
	200 ($8\text{mm} < t \leq 12$ mm)	200	300
	250, 250L15 ($t \leq 8$ mm)	280	410
	250, 250L15 ($8\text{mm} < t \leq 12$ mm)	260	410
	250, 250L15 ($12\text{mm} < t \leq 20$ mm)	250	410
	250, 250L15 ($12\text{mm} < t \leq 20$ mm)	250	410

Standar yang Digunakan	Mutu	Tegangan leleh (f_y) MPa	Kekuatan tarik (f_u) MPa
AS/NZS 3678	300, 300L15 ($t \leq 8$ mm)	320	430
	300, 300L15 ($8\text{mm} < t \leq 12$ mm)	310	430
	300, 300L15 ($12\text{mm} < t \leq 20$ mm)	300	430
	300, 300L15 ($20\text{mm} < t \leq 25$ mm)	280	430
	350, 350L15 ($t \leq 8$ mm)	360	450
	350, 350L15 ($8\text{mm} < t \leq 12$ mm)	360	450
	350, 350L15 ($12\text{mm} < t \leq 20$ mm)	350	450
	350, 350L15 ($20\text{mm} < t \leq 25$ mm)	340	450
	400, 400L15 ($t \leq 8$ mm)	400	480
	400, 400L15 ($8\text{mm} < t \leq 12$ mm)	400	480
	400, 400L15 ($12\text{mm} < t \leq 20$ mm)	380	480
	400, 400L15 ($20\text{mm} < t \leq 25$ mm)	360	480
	450, 450L15 ($t \leq 8$ mm)	450	520
	450, 450L15 ($8\text{mm} < t \leq 12$ mm)	450	520
	450, 450L15 ($12\text{mm} < t \leq 20$ mm)	450	520
	450, 450L15 ($20\text{mm} < t \leq 25$ mm)	420	500
	WR350, WR350/L0 ($t \leq 8$ mm)	340	450
	WR350, WR350/L0 ($8\text{mm} < t \leq 12$ mm)	340	450
	WR350, WR350/L0 ($12\text{mm} < t \leq 20$ mm)	340	450
	WR350, WR350/L0 ($20\text{mm} < t \leq 25$ mm)	340	450

* Berlaku untuk material gilas keras dengan ketebalan lebih besar atau sama dengan 1,5 mm
† Berlaku untuk material gilas keras dengan ketebalan lebih besar 1,0 mm tetapi kurang dari 1,5 mm
‡ Berlaku untuk material gilas keras dengan ketebalan lebih kecil atau sama dengan 1,0 mm

Tabel 2.1 : Kekuatan Minimum Baja Ringan Sesuai SNI 7971:2013

Sumber : SNI 7971:2013 tentang struktur baja canai dingin

2.2. Tegangan – Regangan Sebenarnya (True Stress-Strain)

Tegangan merupakan ukuran intensitas suatu gaya atau reaksi internal persatuan luas. Sedangkan regangan merupakan perubahan ukuran atau bentuk material dari bentuk awal akibat gaya tarik atau gaya tekan. Menurut Marciniak dkk (2002), Tegangan-regangan dapat dibedakan menjadi dua yaitu: *Engineering Stress – Strain* dan *True Stress – Strain*.

Engineering Stress dan *Engineering Strain* bisa dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_{eng} = \frac{F}{A_0} \quad \text{dan} \quad \epsilon_{eng} = \frac{l-l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\%$$

Dimana :

σ_{eng} = *Engineering Stress* (MPa)

F = Gaya (N)

A_0 = Luas permukaan awal (mm^2)

ϵ_{eng} = *Engineering Strain*

Δl = perubahan panjang

l_0 = panjang mula – mula

l = panjang setelah diberi gaya

Namun *Engineering stress-strain* kurang cocok dipakai untuk pemodelan yang mengalami deformasi plastis. Hal ini dikarenakan teganga-regangannya di

dasarkan pada luas penampang awal (A_0) dan panjang awal (l_0), bukan di dasarkan kepada keadaan sebenarnya. Sehingga diperlukan perhitungan tegangan – regangan sebenarnya (*True Stress – Strain*).

True Stress bisa dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Dimana :

σ = tegangan Sebenarnya (Mpa)

F = gaya (N)

A = luas permukaan sebenarnya (mm^2)

True Stress bisa dirumuskan sebagai berikut :

$$\epsilon = \int d\epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0}$$

Dimana :

ϵ = Regangan

l_0 = panjang mula – mula

l = panjang akhir setelah terkena gaya

Dalam mencari *True Stress – Strain* juga bisa menggunakan konversi dari data *Engineering stress-strain* pada daerah inelastis (Yang&Hancock,2004). Untuk rumus konversinya sebagai berikut :

$$\sigma = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng})$$

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{eng}) - \sigma_{eng}/E$$

2.3. Kapasitas Baja Cold-Formed terhadap Lentur

Salah satu fungsi balok atau *beam* di dalam sebuah struktur adalah untuk menopang beban melintang dan/atau beban momen yang bekerja. Akibat beban tersebut, komponen struktur ini akan mengalami lentur atau biasa disebut sebagai komponen struktur lentur (*Flexural Member*). Berbagai profil baja *Cold-Formed* seperti profil kanal (C Section), profil I (I Section), profil Z (Z Section), profil siku (Angle Section), profil T (T Section), profil bulat (Tubular Section), profil sigma (Sigma Section) dan profil dek bisa digunakan sebagai komponen struktur lentur.

Dalam mendisain komponen struktur lentur baja *Cold-Formed*, harus memperhatikan kapasitas momen lentur dan lendutan / *deflection*. Beban yang bekerja pada komponen struktur lentur tersebut tidak boleh melebihi kapasitas momen lentur nominal penampang (M_s) dan kapasitas momen komponen struktur nominal (M_b). Selain itu, komponen struktur tersebut harus memiliki lendutan yang lebih kecil dari lendutan batas atau lendutan yang diperbolehkan. Berdasarkan SNI 7971:2013 tentang Struktur Baja *Cold-Formed*, kapasitas komponen struktur baja *Cold-Formed* adalah sebagai berikut :

$$M^* \leq \phi_b \times M_s$$

$$M^* \leq \phi_b \times M_b$$

Keterangan:

ϕ_b = faktor reduksi kapasitas untuk lentur.

M^* = Momen lentur desain.

M_s = kapasitas momen penampang nominal.

M_b = kapasitas momen komponen struktur nominal.

2.3.1. Kapasitas Momen Nominal Penampang (M_s)

Kapasitas momen nominal penampang (M_s) merupakan kapasitas komponen lentur yang ditentukan berdasarkan pelelehan awal yang terjadi pada penampang efektif atau berdasarkan kapasitas cadangan inelastis.

2.3.1.1. Berdasarkan Pelelehan Awal

Berdasarkan pelelehan awal, kapasitas momen nominal penampang ditentukan sebagai berikut :

$$M_s = Z_e \times f_y$$

Dimana Z_e merupakan modulus penampang efektif yang dihitung pada serat tekan atau serat tarik terluar yang mencapai kuat leleh nya (f_y).

2.3.1.2. Berdasarkan Kapasitas Cadangan Inelastis

Kapasitas cadangan lentur inelastis dapat digunakan jika kondisi-kondisi berikut dipenuhi :

- a. Komponen struktur tidak menerima puntir atau tekuk global, torsi, lokal, atau lentur-torsi.
- b. Efek proses *Cold-Formed* tidak diperhitungkan dalam menentukan tegangan leleh (f_y).
- c. Untuk Poin (i) (di bawah), rasio tinggi bagian pelat badan yang mengalami tekan (d_w) terhadap ketebalannya (t_w) tidak melebihi rasio kelangsingan (λ_1).
- d. Gaya geser desain (V^*) tidak melebihi 0,35 f_y kali luas pelat badan ($d_t \cdot t_w$) untuk Poin (i) (di bawah) dan (b_c) untuk Poin (ii) (di bawah).
- e. Sudut antara pelat badan dan garis tegak lurus sayap tidak melebihi 30°.

Kapasitas momen penampang nominal (M_s) tidak boleh melebihi $1,25 Z_e f_y$ dimana $Z_e f_y$ merupakan kapasitas berdasarkan pelelehan awal atau yang menimbulkan regangan tekan maksimum sebesar $C_y e_y$.

Keterangan:

C_y = adalah faktor regangan tekan

e_y = adalah regangan leleh

= f_y / E

Faktor regangan tekan (C_y) harus ditentukan sebagai berikut:

- (i) Untuk elemen tekan dengan pengaku tanpa pengaku antara:

$$\text{Untuk } b/t \leq \lambda_1: C_y = 3 \quad (3.3.2.3(2))$$

$$\text{Untuk } \lambda_1 < b/t \leq \lambda_2: C_y = 3 - 2[(b/t) - \lambda_1] / (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (3.3.2.3(3))$$

$$\text{Untuk } b/t \geq \lambda_2: C_y = 1 \quad (3.3.2.3(4))$$

$$\lambda_1 = \frac{1,11}{\sqrt{f_y / E}} \quad (3.3.2.3(5))$$

$$\lambda_2 = \frac{1,28}{\sqrt{f_y / E}} \quad (3.3.2.3(6))$$

- (ii) Untuk elemen tekan tanpa pengaku:

- (A) Yang menerima tegangan tidak merata yang menyebabkan tekan pada satu tepi longitudinal dan tarik tepi longitudinal yang lain dari elemen tanpa pengaku.

$$\text{Untuk } \lambda \leq \lambda_3 \quad C_y = 3$$

$$\text{Untuk } \lambda_3 < \lambda < \lambda_4 \quad C_y = 3 - 2[(\lambda - \lambda_3) / (\lambda_4 - \lambda_3)] \quad (3.3.2.3(7))$$

$$\text{Untuk } \lambda \geq \lambda_4 \quad C_y = 1$$

$$\lambda_3 = 0,43$$

$$\lambda_4 = 0,673(1 - \psi) \quad (3.3.2.3(8))$$

dimana λ dan ψ harus ditentukan sesuai dengan Pasal 2.3.2.2

- (B) Yang menerima tegangan tidak merata yang menyebabkan tekan pada kedua tepi longitudinal dari elemen tanpa pengaku

$$C_y = 1$$

- (iii) Untuk elemen tekan dengan pengaku majemuk dan elemen tekan dengan pengaku tepi:

$$C_y = 1$$

2.3.2. Kapasitas Momen Komponen Struktur Nominal (M_b)

Kapasitas Momen Komponen Struktur Nominal (M_b) harus lebih kecil dari Kapasitas momen nominal penampang (M_n) dan nilai nya ditentukan berdasarkan kapasitas terhadap tekuk global (atau bisa diganti dengan kapasitas balok satu sayap yang dikencangkan menembus lembaran apabila memenuhi) dan tekuk lokal.

2.3.2.1. Komponen struktur yang menerima tekuk global

A. Komponen struktur penampang terbuka

Kapasitas momen komponen struktur nominal (M_b) dari segmen-segmen tanpa breising global dari penampang simetris tunggal, ganda dan titik yang menerima tekuk global harus dihitung sebagai berikut:

$$M_b = Z_c \cdot f_c$$

Keterangan:

Z_c = modulus penampang efektif yang dihitung pada tegangan f_c pada serat tekan terluar

f_c = Tegangan beban layan

$= M_c / Z_f$

M_c = momen kritis

Z_f = modulus penampang utuh tanpa reduksi pada serat tekan terluar.

Momen kritis (M_c) harus dihitung sebagai berikut:

Untuk $\lambda_b \leq 0,60$:

$$M_c = M_y$$

Untuk $0,60 < \lambda_b < 1,336$:

$$M_c = 1,11 M_y \left[1 - \frac{10 \lambda_b^2}{36} \right]$$

Untuk $\lambda_b \geq 1,336$:

$$M_c = M_y \left(\frac{1}{\lambda_b^2} \right)$$

$$\lambda_b = \sqrt{\frac{M_y}{M_o}}$$

M_o = momen tekuk elastis.

B. Komponen struktur boks tertutup

Untuk komponen boks tertutup, kapasitas momen struktur nominal (M_b) ditentukan sebagai berikut:

- Bila panjang komponen struktur tanpa breising kurang dari atau sama dengan l_u , maka M_b ditentukan sesuai dengan kapasitas komponen struktur penampang terbuka.

Keterangan:

$$l_u = \frac{0,36 C_b \pi}{f_y Z_f} \sqrt{E G J_T}$$

- Bila panjang komponen struktur tanpa breising global lebih besar dari l_u , maka M_b ditentukan sesuai dengan kapasitas komponen struktur penampang terbuka, namun nilai M_o nya harus dihitung sebagai berikut :

$$M_o = \frac{C_b \pi}{l} \sqrt{E G J_y}$$

Keterangan:

l adalah panjang komponen struktur yang tidak dibreising secara lateral

2.3.2.2. Komponen struktur yang menerima tekuk lokal

Kapasitas momen komponen struktur nominal (M_b) dari penampang yang menerima tekuk lokal harus dihitung sebagai berikut:

$$M_b = Z_c \cdot f_c$$

Dimana :

- Jika tekuk lokal melibatkan rotasi sayap dan lip terhadap pertemuan sayap/pelat badan dari kanal atau penampang Z, Maka Z_c merupakan modulus penampang utuh. Tetapi jika K_ϕ bernilai negatif maka Z_c merupakan modulus penampang efektif dan $f_c = M_c / Z_f$.

Keterangan:

M_c adalah momen kritis

Z_f adalah modulus penampang utuh

Momen kritis (M_c) harus dihitung sebagai berikut:

$$\text{Untuk } \lambda_d \leq 0,674 : M_c = M_y$$

$$\text{Untuk } \lambda_d > 0,674 : M_c = \frac{M_y}{\lambda_d} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_d} \right)$$

- Jika tekuk lokal melibatkan lentur transversal dari pelat badan vertikal dengan perpindahan global sayap tekan maka Z_c adalah modulus penampang efektif yang dihitung pada tegangan f_c pada serat terluar, dimana $f_c = M_c / Z_f$.

Momen kritis (M_c) harus dihitung sebagai berikut:

$$\text{Untuk } \lambda_d < 0,59 : M_c = M_y$$

$$\text{Untuk } 0,59 < \lambda_d \leq 1,70 : M_c = M_y \left(\frac{0,59}{\lambda_d} \right)$$

$$\text{Untuk } \lambda_d \geq 1,70 : M_c = M_y \left(\frac{1}{\lambda_d^2} \right)$$

2.3.2.3. Balok dengan satu sayap dikencangkan menembus lembaran

Kapasitas momen komponen struktur nominal (M_b) dari penampang kanal atau Z yang dibebani pada bidang sejajar pelat badan, dengan sayap tarik terhubung ke lembaran dan sayap tekang tidak dibresing global, harus dihitung menggunakan rumus berikut :

$$M_b = R \cdot Z_e \cdot f_y$$

Dimana R merupakan faktor reduksi. Untuk faktor reduksi (R) dapat diambil sebagai berikut :

- a) Beban hisap Untuk gording menerus dengan lewatan yang memiliki tiga bentang atau lebih menggunakan penampang Z , dan bentang sederhana menggunakan kanal atau penampang Z dengan ring per, faktor R harus diambil sebagai berikut:
 - Tanpa penghubung, $R = 0,75$.
 - Satu baris penghubung pada bentang ujung dan interior, $R = 0,85$
 - Dua baris penghubung pada bentang ujung dan satu baris atau lebih pada bentang interior dari gording menerus dengan lewatan, $R = 0,95$.
 - Dua baris penghubung pada bentang sederhana, $R = 1,00$.
- b) Beban ke bawah Untuk gording menerus dengan lewatan dengan tiga bentang atau lebih menggunakan penampang Z , tanpa penghubung atau konfigurasi yang lain, faktor R harus diambil sama dengan 0,85.

2.4. Lendutan

lendutan pada komponen struktur lentur / *flexural member* dipengaruhi oleh berbagai hal, seperti seberapa besar beban yang diberikan, lokasi beban, tipe pembebanan, kekakuan komponen terhadap lentur (EI), dan panjang bentang. Dalam desain baja *Cold-Formed*, metode yang dilakukan untuk menghitung lendutan di dasarkan pada tingkat akurasi yang di inginkan. Diperlukan bantuan program komputer atau metode numerik untuk mendapatkan lendutan dengan tingkat akurasinya tinggi. Hal ini dikarenakan perhitungan yang terlalu kompleks untuk di lakukan menggunakan perhitungan manual. Sehingga perhitungan manual dilakukan hanya untuk pendekatan atau perkiraan lendutan yang akan terjadi berdasarkan momen inersia konstan pada momen lentur maksimum.

Berdasarkan SNI 1729:2002 mengenai tata cara perencanaan struktur baja untuk bangunan gedung pasal 6.4.3, batas lendutan yang diperbolehkan terjadi untuk keadaan kemampuan-layan adalah sebagai berikut :

Komponen struktur dengan beban tidak terfaktor	Beban tetap	Beban sementara
Balok pemikul dinding atau finishing yang getas	$L/360$	-
Balok biasa	$L/240$	-
Kolom dengan analisis orde pertama saja	$h/500$	$h/200$
Kolom dengan analisis orde kedua	$h/300$	$h/200$

Tabel 2.2 : Batas lendutan maksimum

Sumber : SNI 1729:2002 mengenai tata cara perencanaan struktur baja untuk bangunan gedung

Batasan ini ditetapkan untuk memberikan kemampuan layan atau *serviceability* struktur yang baik.

2.5. Struktur Penampang I dari Dua Kanal

Jarak longitudinal maksimum dari las atau penyambung lainnya ($S_{\max}$), yang menghubungkan dua kanal sehingga membentuk penampang I harus di tentukan sebagai berikut.

$$S_{\max} = l/6$$

$$S_{\max} \leq \frac{2.S_g.N^*}{mq}$$

Keterangan :

l = bentang balok.

S_g = jarak vertikal antara dua baris sambungan terdekat ke sayap atas dan bawah.

N^* = gaya tarik desain sambungan

q = intensitas aksi desain pada balok

m = jarak dari pusat geser sebuah kanal ke bidang tengah pelat badanya

Intensitas beban desain (q) diperoleh dengan membagi besaran aksi atau reaksi terpusat desain dengan panjang tumpuan. Untuk balok yang dirancang untuk beban merata, q harus sama dengan tiga kali intensitas aksi desain terbagi merata. Jika panjang tumpuan pada aksi atau reaksi-reaksi terpusat kurang dari jarak antarlas (s_w), gaya tarik desain las atau sambungan-sambungan terdekat beban atau reaksi harus ditentukan sebagai berikut:

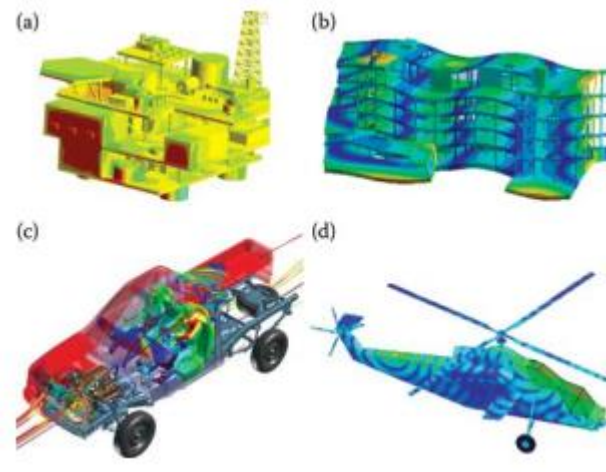
$$N^* = \frac{m.R_b^*}{2.s_g}$$

Dimana R_b^* merupakan aksi atau reaksi terpusat desain.

2.6. Finite Element Method (Metode Elemen Hingga)

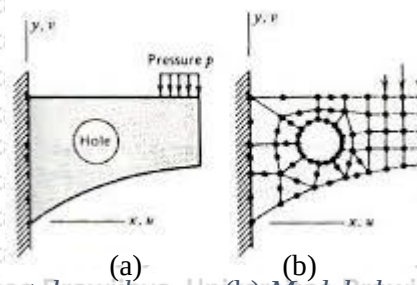
Metode Elemen Hingga (FEM) atau Metode Elemen Hingga adalah metode analisis yang menggunakan konsep menghitung batas sebagai pendekatan atau untuk mempresentasikan objek dengan jumlah elemen sederhana yang terbatas atau untuk menambah jumlah potongan untuk meningkatkan keakuratan analisis. Konsep dasarnya adalah mengubah objek kompleks menjadi blok sederhana atau memecah objek kompleks menjadi bagian yang lebih kecil dan mudah disesuaikan.

Metode elemen hingga dapat digunakan untuk menyelesaikan model matematika dari berbagai masalah teknik, seperti analisis tegangan pada struktur rangka atau pada mesin yang kompleks, analisis perpindahan panas pada sistem pendingin pada elektronik dan lain-lain.



Gambar 2.4 : (a). simulasi beban angin pada bangunan lepas pantai. (b). respon modal pada bangunan gedung. (c). aliran angin dan manajemen suhu. (d). pola bidang listrik antenna pada helikopter.

Sumber : *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*, Xiaolin Chen (2014)



Gambar 2.5 : (a) Model bentuk sembarang (b) Model elemen hingga pada bentuk sembarang tersebut

sumber: Konsep dan Aplikasi Metode Elemen Hingga, Robert D. Cook (1990)

Metode elemen hingga merupakan sebagian kecil dari struktur sebenarnya. Gambar 2.5.b menunjukkan metode elemen hingga pada bentuk sembarang pada Gambar 2.5.a. Pada gambar, Anda dapat melihat titik-titik hitam, juga disebut *node*, di mana *node-node* ini terhubung satu sama lain. Hubungan antar *node* yang tercipta berupa jaring-jaring dari susunan titik simpul dan elemen yang disebut sebagai *mesh*. *Mesh* terdiri dari elemen segitiga dan kuadrilateral (bangun segi empat), beberapa dengan simpul di sisi dan beberapa dengan hanya ujung.

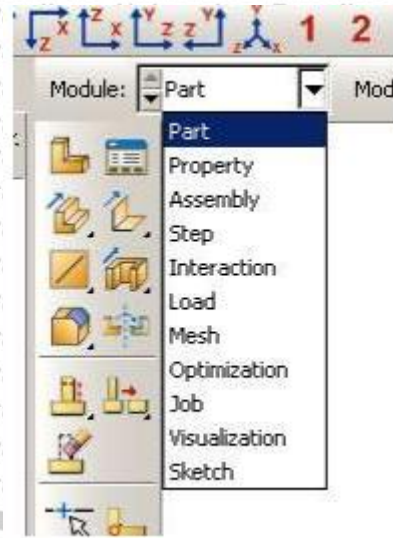
2.5.1. Prosedur Dasar Analisis Elemen Hingga

Untuk melakukan analisis elemen hingga, prosedur dasar yang perlu dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Membagi geometri model menjadi beberapa potongan lalu membuat *mesh* atau kumpulan beberapa elemen dan *node*.
2. Definisikan perilaku fisik pada setiap elemen.
3. Menghubungkan elemen – elemen pada *node* untuk membentuk sistem persamaan pada seluruh model.
4. Memberikan beban dan kondisi batas.
5. Menyelesaikan sistem persamaan yang melibatkan besaran yang tidak diketahui pada *node*.

2.7. Software ABAQUS Student Edition

Software ABAQUS Student Edition telah dirilis sejak tahun 1978 untuk pemodelan, analisis komponen dan visualisasi hasil menggunakan analisis elemen hingga. ABAQUS Student Edition terbagi menjadi beberapa modul yang masing-masing modul memiliki fungsi sendiri-sendiri dari proses pemodelan. Modul tersebut yaitu *part*, *property*, *assembly*, *step*, *interaction*, *load*, *mesh*, *optimization*, *job*, *visualization* dan *sketch*.



Gambar 2.6 : Modul dari ABAQUS Student Edition

Sumber : ABAQUS Student Edition

Fungsi dari masing-masing modul, yaitu:

1. *Part* berfungsi untuk membuat geometri dari model yang akan dibuat.
2. *Property* berfungsi untuk memasukkan sifat mekanik, jenis material, kekuatan bahan dan spesifikasi teknis dari material yang akan dianalisis.
3. *Assembly* berfungsi untuk menyusun komponen (*part*) yang telah dibuat menjadi satu kesatuan model.
4. *Step* berfungsi untuk menentukan jenis analisis yang akan digunakan seperti *static stress analysis* atau *heat transfer analysis*.
5. *Interaction* berfungsi untuk menentukan jenis kontak pada bagian permukaan material yang akan mengalami kontak.
6. *Load* berfungsi untuk memberikan beban, *boundary condition* dan kecepatan pada suatu model.
7. *Mesh* berfungsi untuk membagi geometri yang dibuat sebelumnya menjadi *node* dan elemen. Modul *mesh* ini juga bisa menentukan jumlah *mesh* yang akan digunakan.
8. *Optimization* berfungsi untuk membuat tugas optimasi yang dapat digunakan untuk mengoptimalkan model yang dibuat dengan tujuan dan batasan tertentu.
9. *Job* berfungsi untuk melakukan proses *running* terhadap model yang telah dibuat. Setelah model yang dibuat selesai, selanjutnya diserahkan ke modul *job* untuk melakukan proses analisis secara numerik. Jika ada kesalahan atau data tidak lengkap, akan diberikan peringatan untuk melengkapi data yang belum dimasukkan.
10. *Visualization* berfungsi untuk menampilkan hasil analisis program ABAQUS. Hasil dari simulasi bisa dilihat pada *view port* dan bisa menampilkan grafik *output* yang diinginkan.
11. *Sketch* berfungsi untuk membuat sketsa geometri yang digunakan untuk pendefinisian bentuk-bentuk yang akan dianalisis.

Dalam ABAQUS “*Getting Started with Abaqus, Interactive Edition*”, menjelaskan bahwa ada tiga tahapan dalam analisis untuk sampai pada hasil akhir menggunakan ABAQUS *Student Edition*, yaitu Proses Awal, Simulasi, dan Proses Akhir.

1. Proses Awal atau *Preprocessing*

Pada tahap ini dilakukan penentuan model awal untuk di analisis. Pemodelan *part* dilakukan dengan memasukkan geometri yang telah ditentukan sebelumnya dalam ABAQUS *Student Edition*. Saat menggambarkan model, ditentukan sistem koordinat yang akan dibuat. Sebelum melakukan simulasi, periksa kata kunci / *keyword* dan parameter yang digunakan agar tidak ada kesalahan dan urutan pemasukan data harus diperhatikan dengan baik.

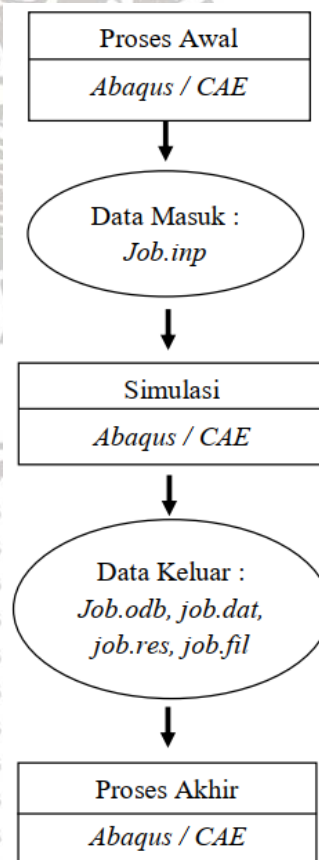
2. Simulasi

Tahap ini merupakan tahap dimana program ABAQUS *Student Edition* memulai proses untuk melakukan pemecahan masalah numerik yang diidentifikasi dalam model.

3. Proses Akhir atau *Post Processing*

Tahap ini merupakan proses terakhir dimana kesimpulan dapat diambil dari hasil simulasi yang telah selesai pada perpindahan, gaya, atau variabel lain yang telah dihitung. Hasil akhir biasanya disajikan dalam bentuk laporan atau catatan.

Berikut merupakan diagram alir dari ketiga tahapan proses *running* menggunakan ABAQUS *Student Edition*.



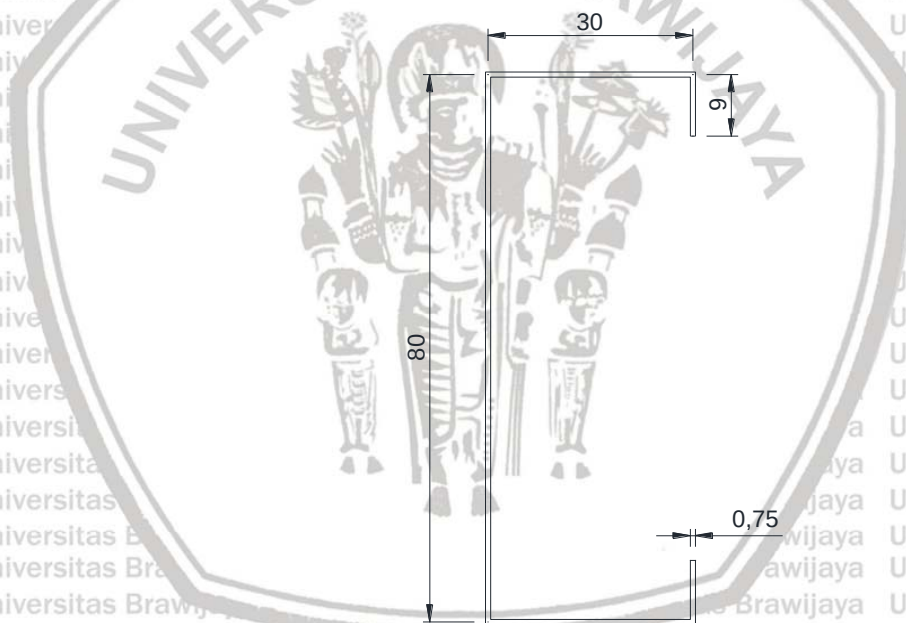
Gambar 2.7 : Diagram Alir Proses Running Program ABAQUS *Student Edition*

BAB III METODE PENELITIAN

Profil baja *Cold-Formed* digunakan sebagai bahan uji dalam pengujian ini. Benda uji tersebut dimodelkan dalam ABAQUS *Student Edition*. Perangkat lunak ini digunakan untuk mendapatkan hasil kuat lentur akibat perubahan beban benda uji. Hasil pengujian kuat tekuk benda uji juga dicari dengan menggunakan perhitungan manual sesuai SNI. Tujuannya adalah untuk mengetahui dan mendapatkan pola perilaku pengaruh perubahan beban terhadap kekuatan profil.

3.1. Data Profil

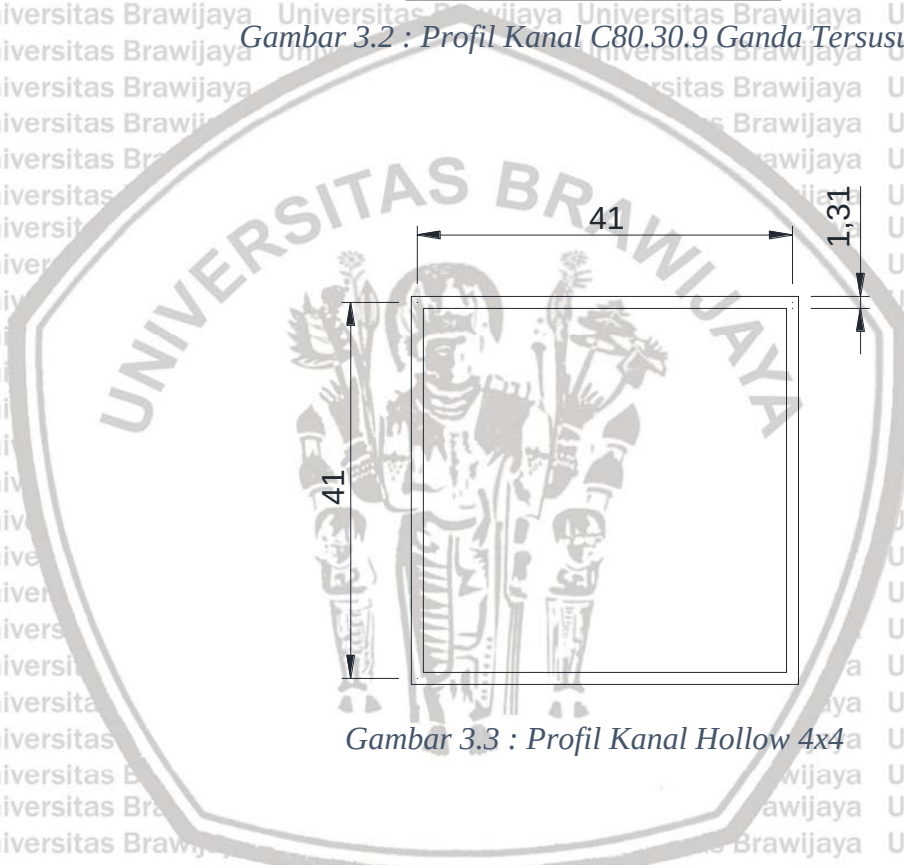
Profil yang digunakan yaitu kanal C80.30.9 dengan ketebalan 0,75mm, profil *Hollow Square* 41x41 dengan tebal 1,31 mm, dan profil I yang terdiri dari dua profil kanal C80.30.9 yang disusun menjadi bentuk I. Berikut gambar detail dimensi profil C80.30.9, *Hollow Square* 4x4 dan I (kanal ganda) :



Gambar 3.1 : Profil Kanal C80.30.9



Gambar 3.2 : Profil Kanal C80.30.9 Ganda Tersusun-I



Gambar 3.3 : Profil Kanal Hollow 4x4

3.2. Mutu Profil

Mutu profil yang digunakan yaitu mutu G550. Berikut merupakan sifat mekanis mutu G550:

Simbol	Uji Tarik			Uji Lengkung Melintang	
	Kuat Luluh Min. (N/mm ²)	Kuat Tarik Min. (N/mm ²)	Regangan Min. (%) Lo=50 mm	Sudut Lengkung (°)	Duri Pelengkung (t)
G300	300	340	20	180	1t
G550	550	550	2	-	-

CATATAN 1: t adalah tebal batang uji

CATATAN 2: Lo adalah panjang batang ukur (*gauge length*)

Tabel 3.1 : Sifat Mekanis G550

3.3. Metode Penelitian

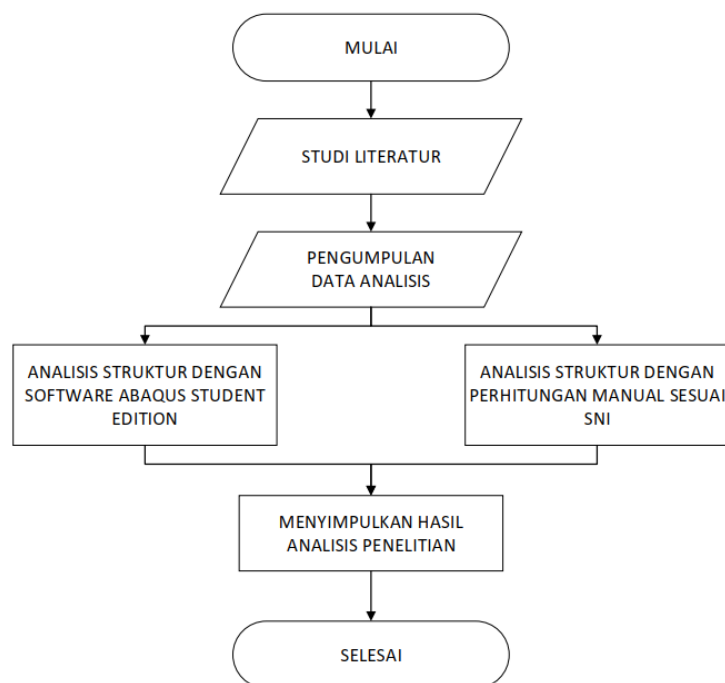
Langkah-langkah penelitian ini dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Menentukan topik yang akan ditinjau untuk penelitian.
2. Melakukan studi literatur sebagai dasar teori untuk menganalisis permasalahan.
3. Mengumpulkan data-data yang dibutuhkan untuk analisis.
4. Analisis struktur melalui *software ABAQUS Student Edition*.
5. Analisis struktur dengan menggunakan perhitungan manual sesuai dengan SNI.
6. Menyimpulkan hasil analisis penelitian.
7. Selesai.

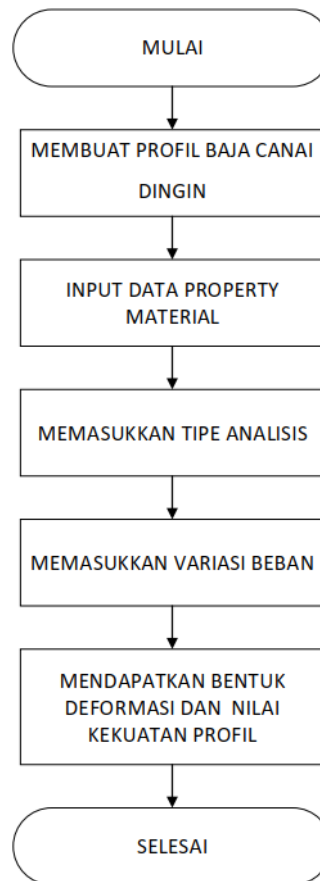
Langkah-langkah untuk mendapatkan kekuatan lentur baja *Cold-Formed* menggunakan *software* ABAQUS *Student Edition* sebagai berikut.

1. Membuat profil baja *Cold-Formed* menggunakan *software* ABAQUS *Student Edition*.
2. Memasukkan input data *property material* ke dalam *software* ABAQUS *Student Edition*.
3. Memasukkan tipe analisis yang telah ditentukan.
4. Memasukkan variasi pembebanan yang telah ditentukan.
5. Mendapatkan bentuk deformasi dan nilai kekuatan lentur pada profil baja *Cold-Formed* melalui *software* ABAQUS *Student Edition*.
6. Selesai.

Diagram alir penelitian ini sebagai berikut.



Gambar 3.4 : Diagram Alir Penelitian



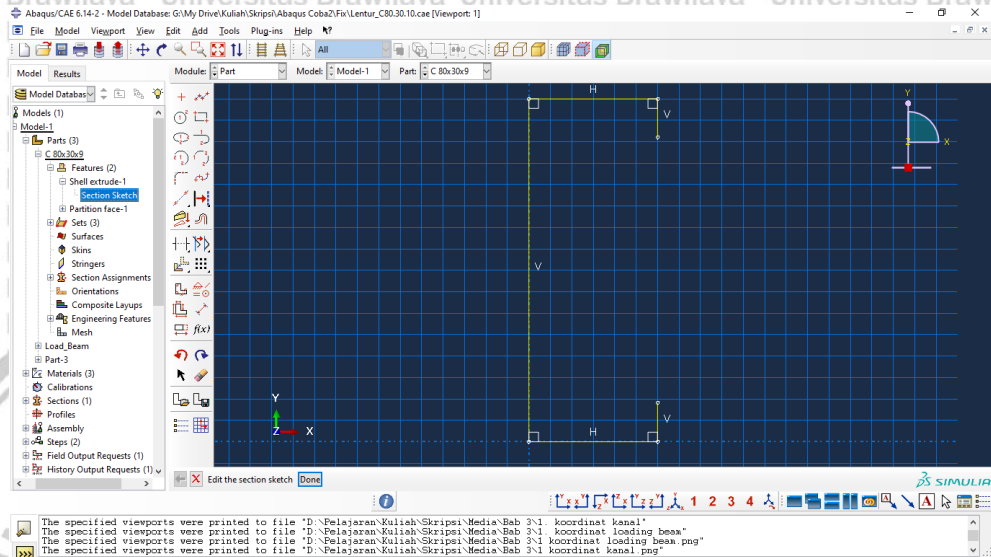
Gambar 3.5 : Diagram Alir Penelitian Menggunakan ABAQUS Student Edition

3.4. Pemodelan dengan Software ABAQUS Student Edition

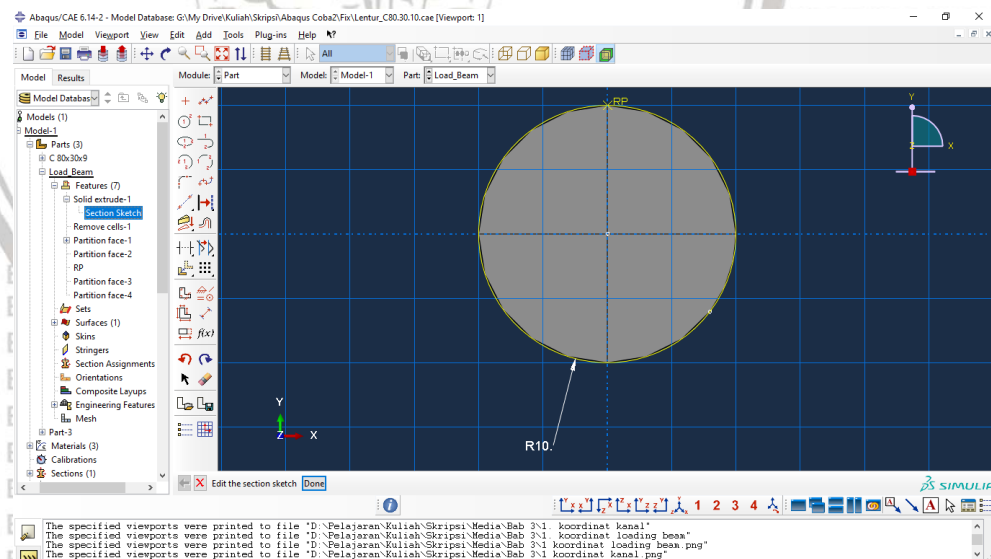
Langkah-langkah untuk pembuatan model uji menggunakan ABAQUS Student Edition adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan benda uji

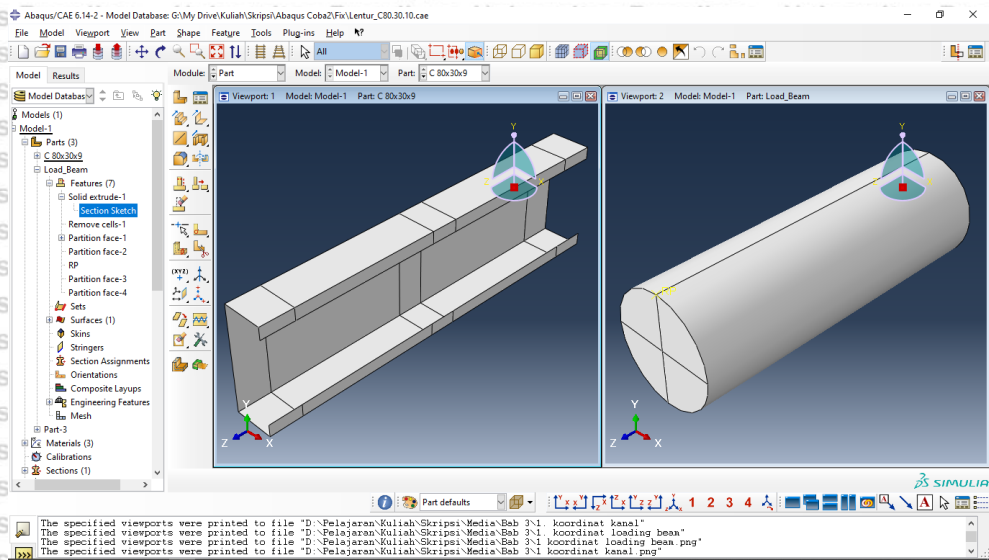
Pada langkah ini benda uji dimodelkan dengan memasukkan koordinat-koordinat sesuai dengan dimensi yang telah ditentukan sehingga membentuk profil kanal (C) tipe C80.30.9 dengan panjang 240 mm dan Loading beam berdimensi 20mm dan panjang 60 mm.



Gambar 3.6 : Memasukkan Koordinat Setiap Titik Pada Profil C80.30.9



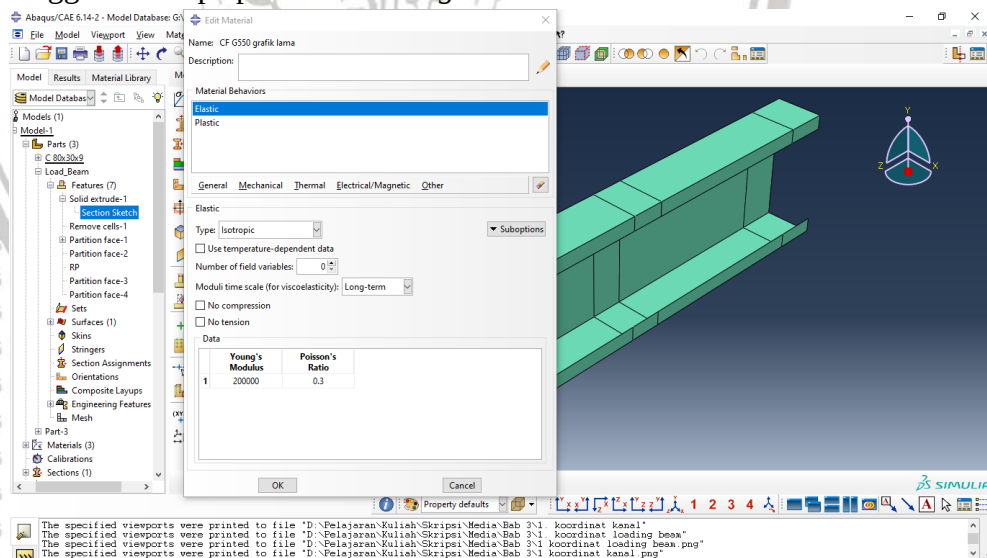
Gambar 3.7 : Memasukkan Koordinat dan Diameter Loading Beam



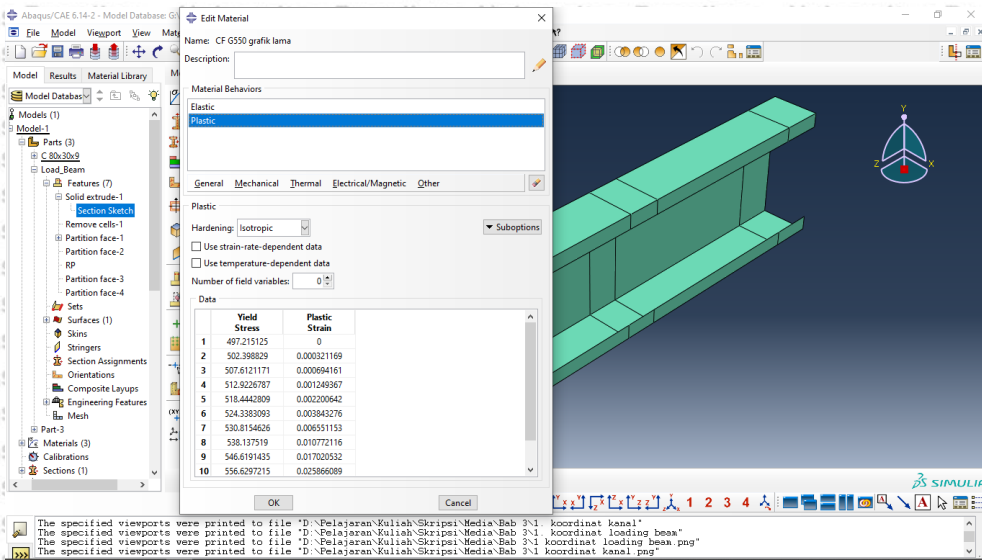
Gambar 3.8 : Hasil Input Koordinat dan Pemberian Panjang Profil

2. Memasukkan data *Material Property*

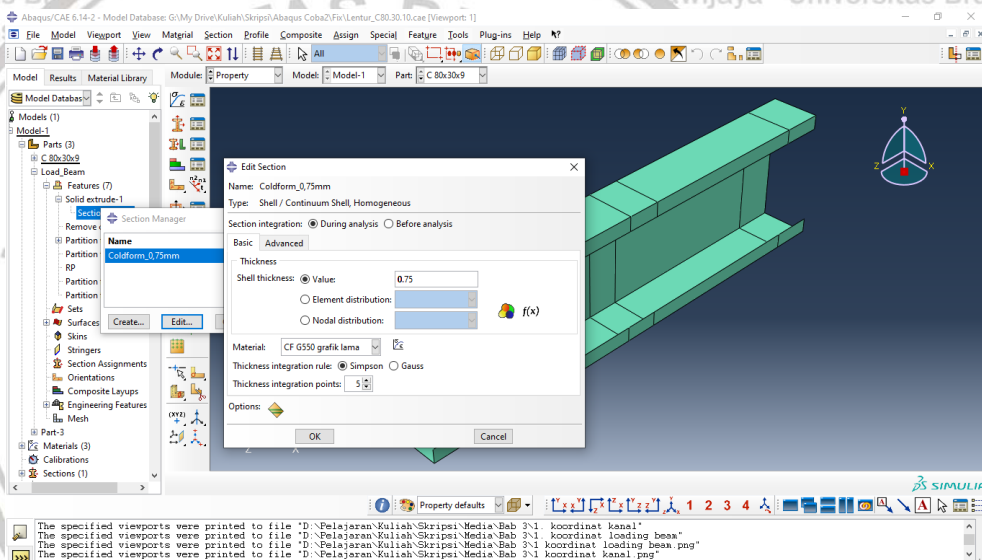
Profil yang telah dibuat dimasukkan data *property* pada modul *Material*, *Section* dan *Section Assignment*. Pada bagian *Edit Material*, dimasukkan modulus elastisitas, *poisson ratio* dan tegangan sesuai dengan mutu baja *Cold-Formed* yang digunakan, yaitu G550. Pada *Section*, dimasukkan ketebalan dari profil yaitu 0,75mm. Untuk *Loading Beam* tidak perlu di berikan data *Property Material* dan *Section* dikarenakan menggunakan tipe part *Discrete Rigid*.



Gambar 3.9 : Memasukkan nilai modulus elastisitas dan poisson ratio

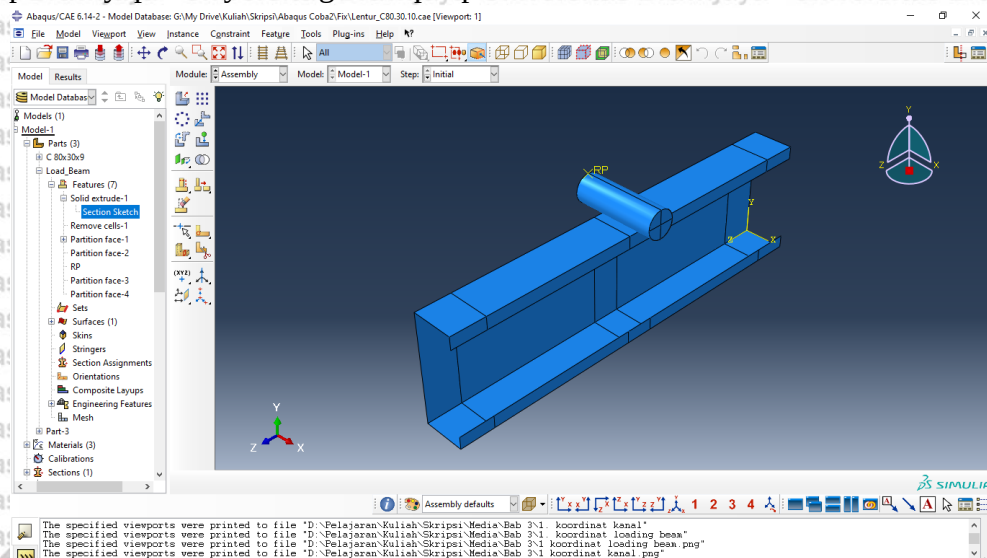


Gambar 3.10 : Memasukkan nilai tegangan leleh dan plastic strain



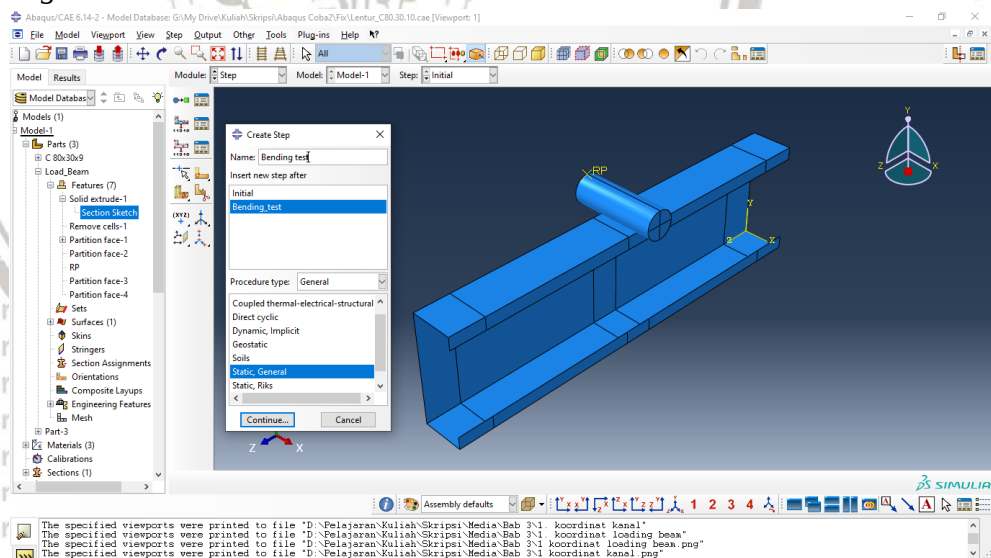
Gambar 3.11 : Memasukkan ketebalan penampang pada Edit Section

3. Menyusun bagian komponen *Instance Part* yang dibuat menjadi satu kesatuan model pada modul Assembly. *Loading Beam* diletakkan di tengah bentang model C80.30.9 pada sayap atasnya sebagai tempat pemberian beban.

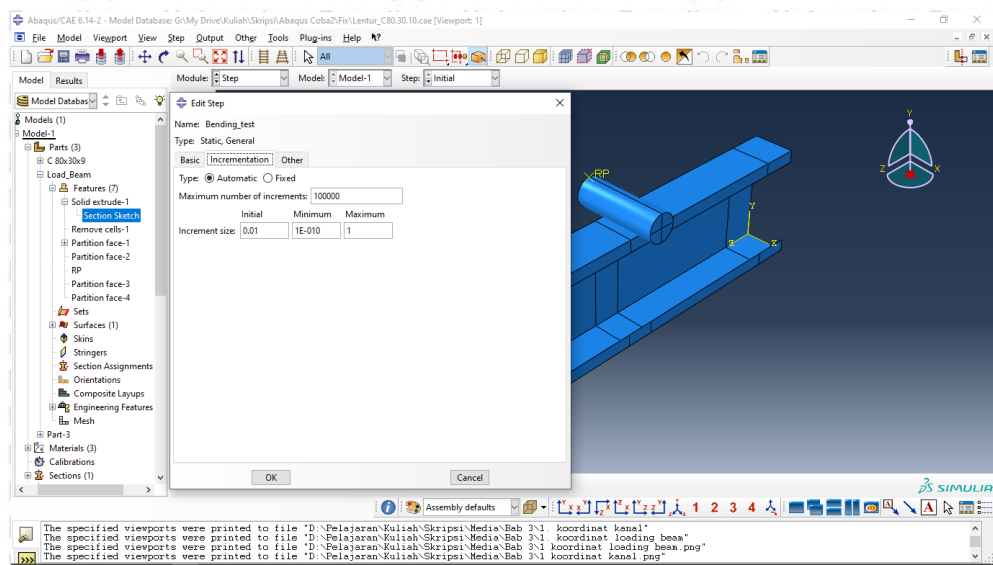


Gambar 3.12 : Menyusun part C80.30.9 dan Loading beam pada Crate Instance

4. Membuat langkah analisis lentur pada modul step
Prosedur analisis yang di gunakan dalam analisis lentur ini menggunakan prosedur *static general*.



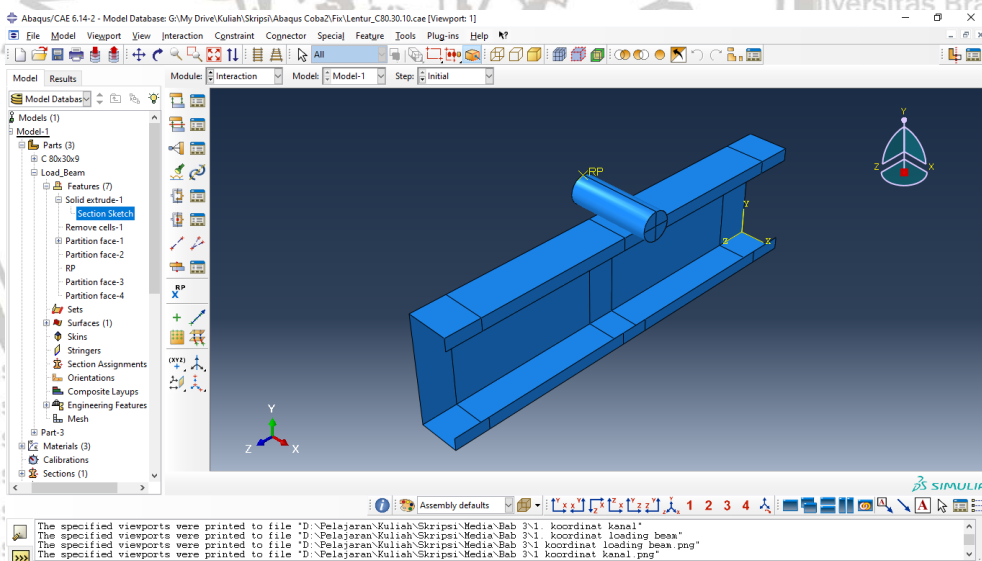
Gambar 3.13 : Membuat step Lentur dan memilih tipe prosedur static general



Gambar 3.14 : Memasukkan nilai increment dan

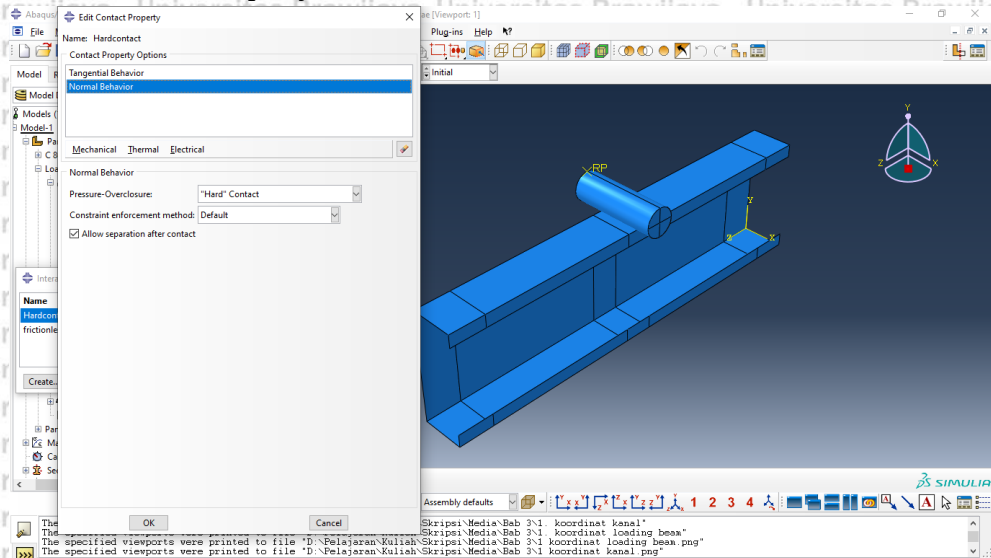
5. Memberikan titik *Reference Point*

Pada tahap ini *Loading Beam* di beri *reference point* sebagai titik acuan sebagai *boundary condition* dan tempat pembebanan nantinya. Kedua *Part* tadi juga diberikan *surface* sebagai bidang kontak antara C80.30.9 dan *Loading Beam*.

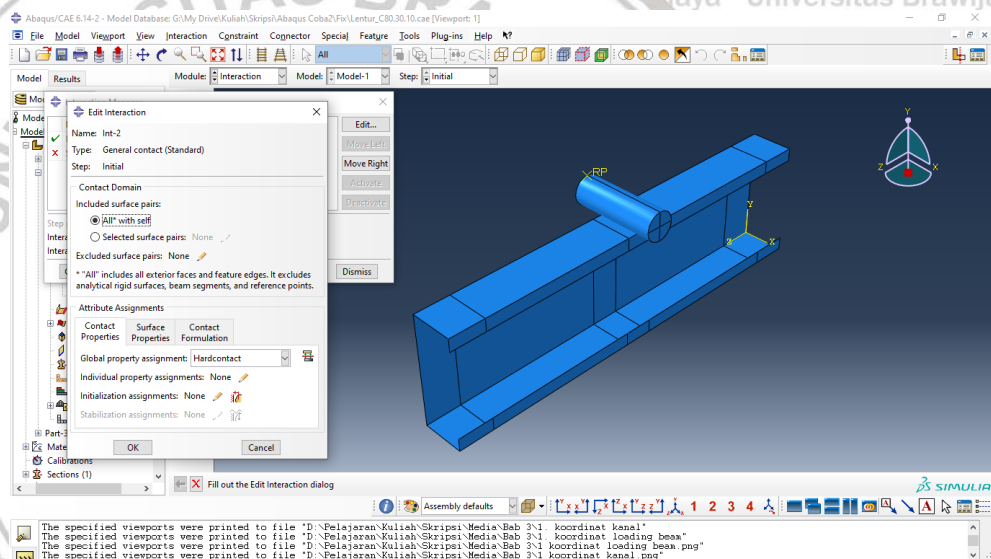


Gambar 3.15 : Membuat *reference point* pada *Loading Beam*

6. Membuat *Contact Property* dan *Interaction*

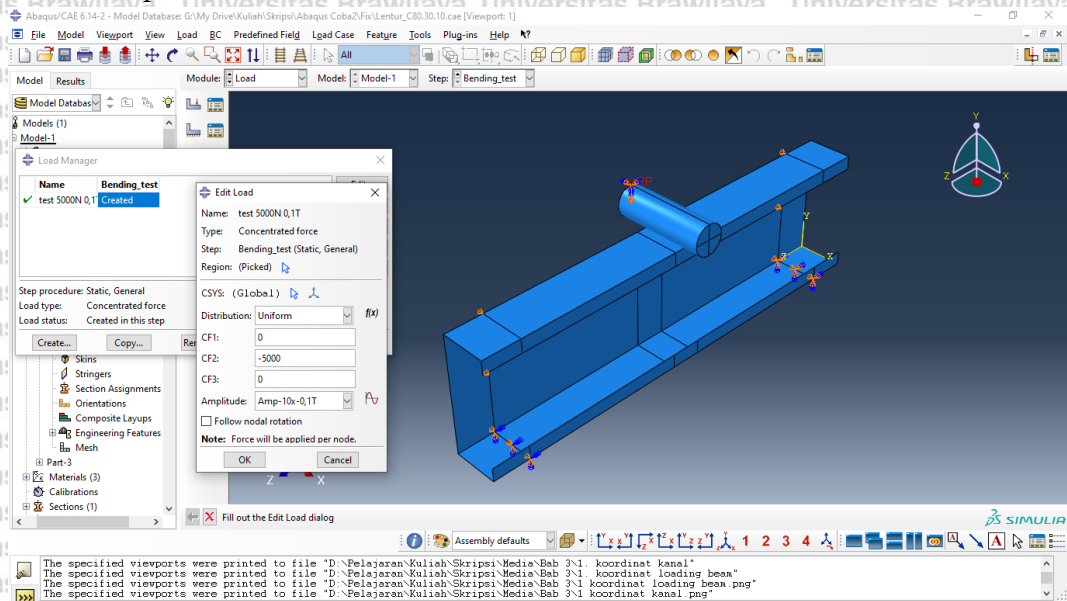


Gambar 3.16 : Mendefinisikan jenis kontak antara permukaan Loading Beam dan permukaan balok C80.30.9

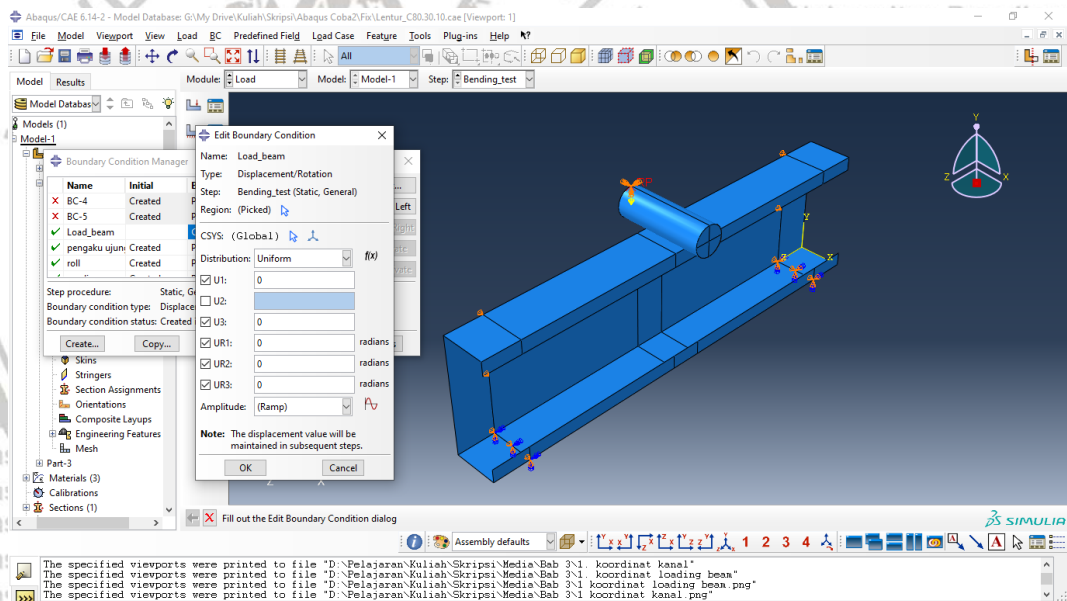


Gambar 3.17 : Mendefinisikan jenis interaksi antara Loading Beam dan C80.30.9

7. Memasukkan gaya yang akan bekerja pada struktur dan memberikan *Boundary Condition* pada modul Load

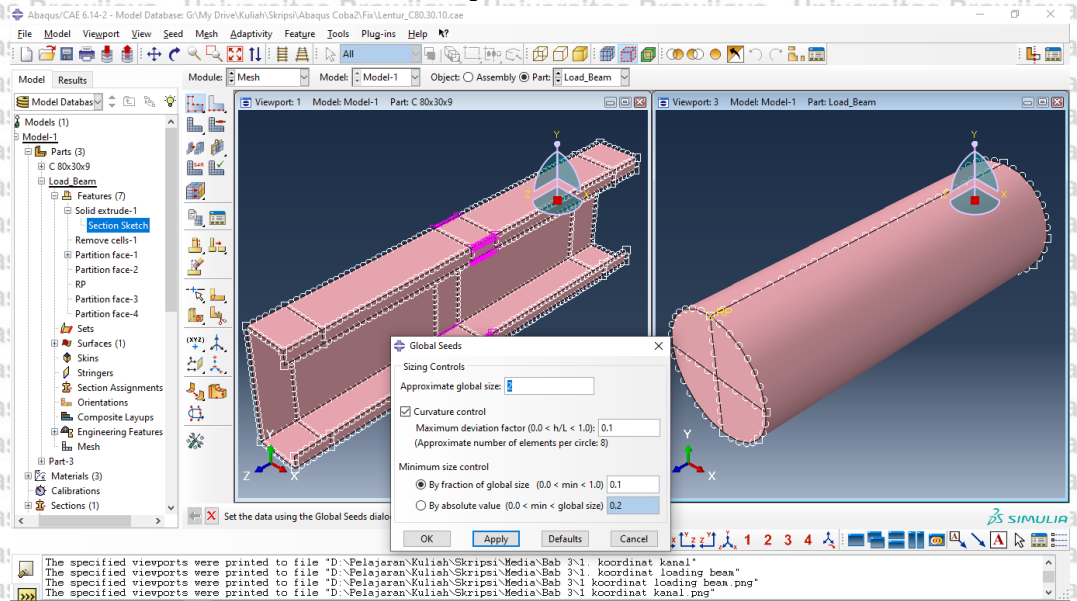


Gambar 3.18 : Memasukkan nilai beban pada reference point Loading Beam

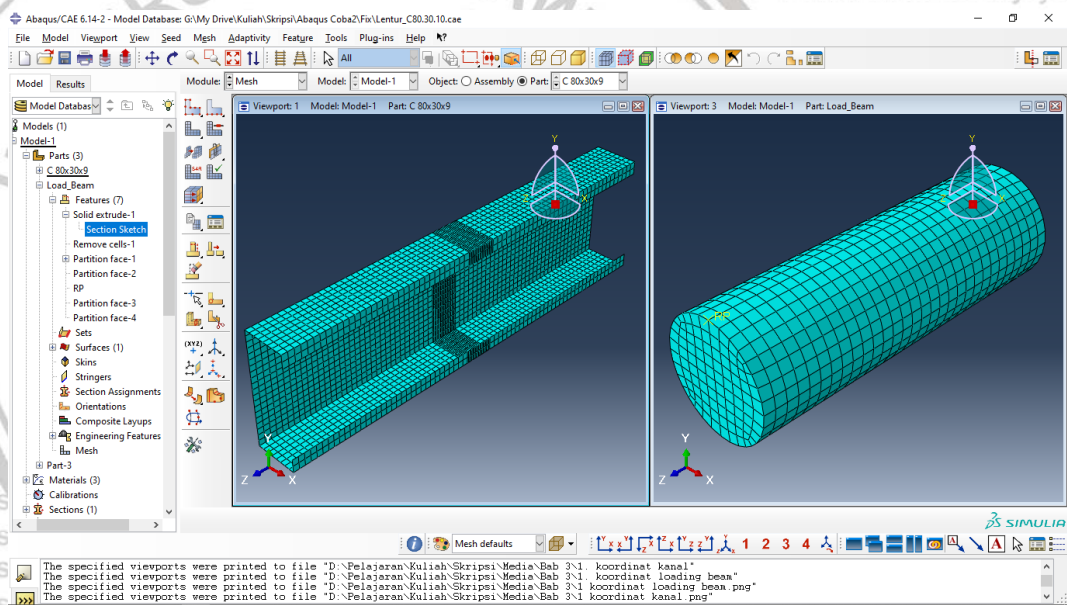


Gambar 3.19 : Mendefinisikan boundary condition pada reference point balok C80.30.9 dan pada Loading Beam

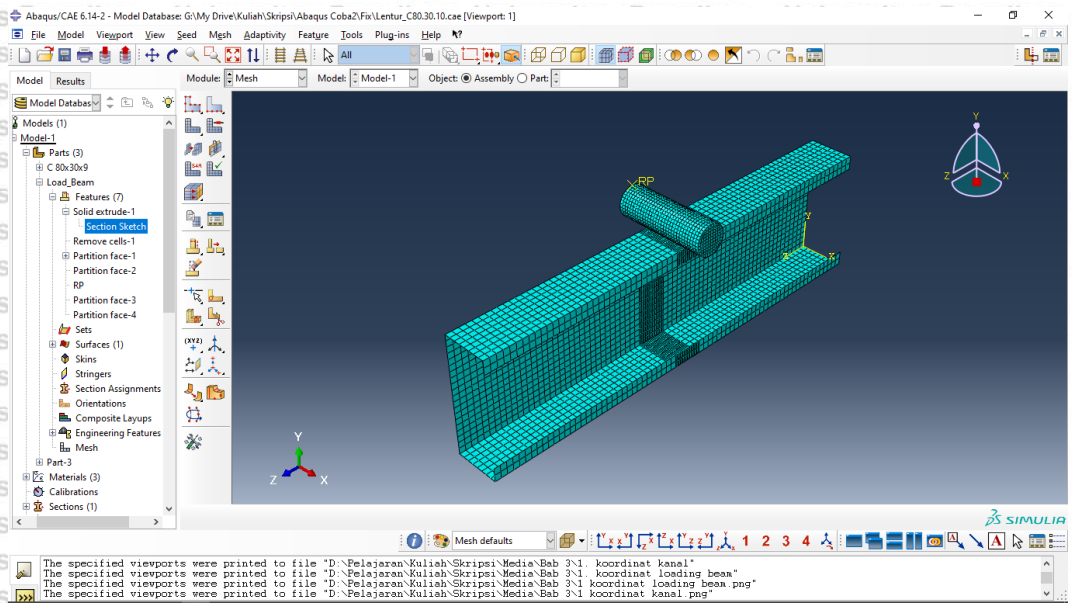
8. Membuat Seed Part dan Mesh Part pada modul Mesh



Gambar 3.20 : Membuat seed part pada Loading Beam dan balok C80.30.9

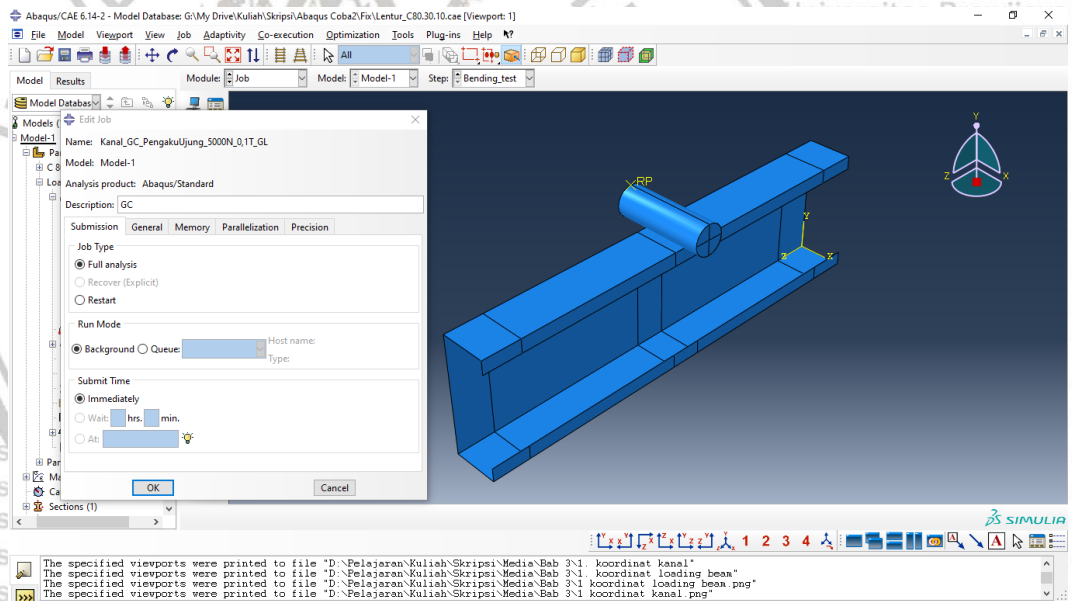


Gambar 3.21 : Melakukan Meshing pada Loading Beam dan balok C80.30.9

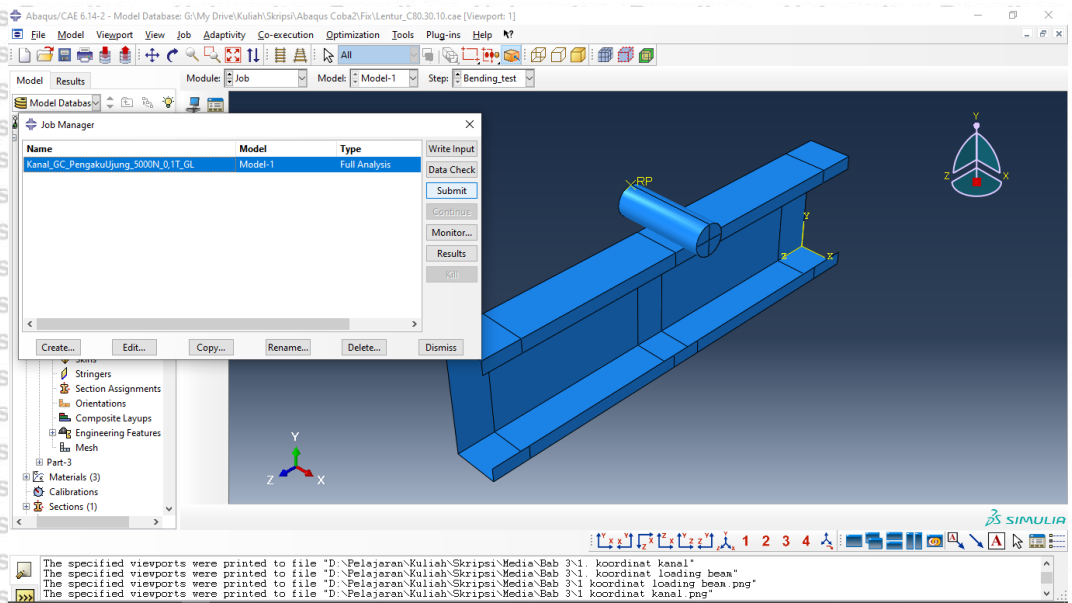


Gambar 3.22 : hasil akhir meshing struktur balok yang akan di uji

9. Mendefinisikan analisis yang akan di olah pada modul **Job**, kemudian melakukan **Submit** untuk melaksanakan analisis



Gambar 3.23 : Membuat perintah Job



Gambar 3.24 : Melakukan submit untuk memulai analisis

10. Mengambil Output yang diinginkan dari hasil analisis yang berupa Tegangan-regangan, Momen, Deformasi (lendutan) dan tipe keruntuhan atau tekuk yang terjadi pada baja cold-formed.



BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dilakukan analisis dan Pembahasan terhadap kapasitas dan hasil uji lentur beberapa profil *Cold-formed* yang dilakukan dengan perhitungan manual berdasarkan SNI 7971:2013 dan secara numerik dengan bantuan *software ABAQUS student edition*.

4.1. Pemodelan Profil Baja Cold-formed

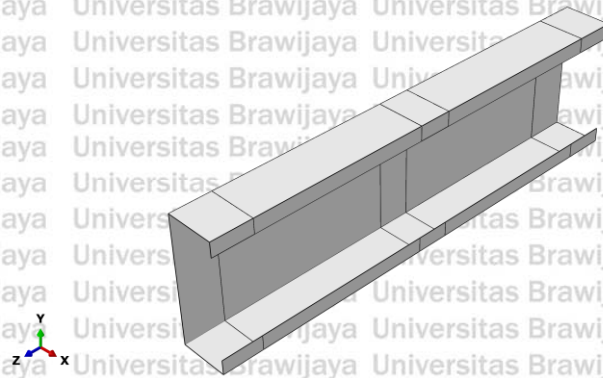
Profil yang akan di analisis yaitu profil kanal, *square hollow*, dan profil *double canal* yang dibuat dari dua profil kanal yang disusun menjadi profil I. Pemodelan menggunakan tumpuan sendi – roll dengan beban terpusat yang diletakkan pada tengah bentang. Pemodelan menggunakan *software ABAQUS Student Edition*.

4.1.1. Gambaran umum

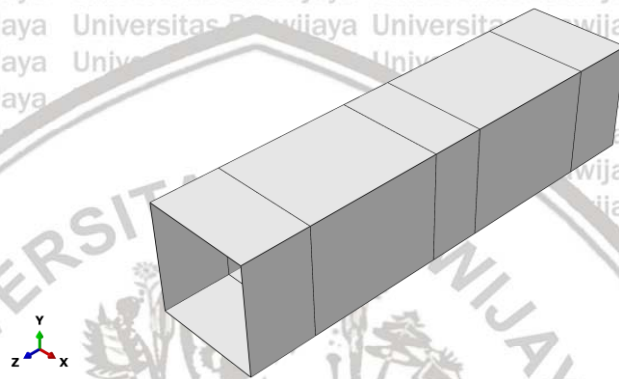
Benda uji lentur di modelkan sesuai dengan ketentuan ASTM C293 dengan panjang bentang sama dengan tiga kali tinggi profil dan ditambah dengan 25 mm pada kedua ujungnya. Beban di tempatkan pada loading beam berdiameter 20mm yang hanya bisa bergerak secara vertikal. Untuk profil kanal tunggal diberikan pengaku vertikal pada web di daerah tumpuan untuk menghindari *sliding* sebelum mencapai kapasitasnya. Dan untuk profil *double canal* diberikan pengaku vertikal pada web di daerah ujung bentang dengan asumsi dua profil kanal disambungkan dengan las di kedua ujung web nya. Gambaran umum pemodelan benda uji sebagai berikut:



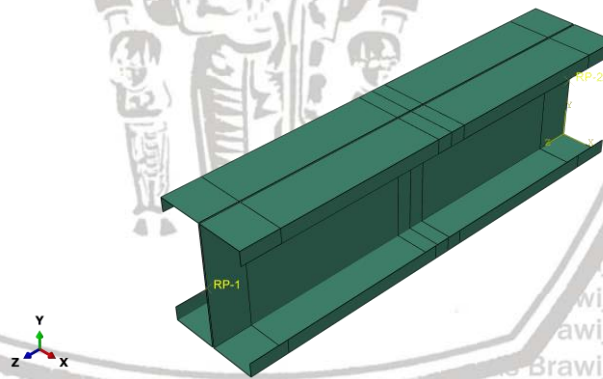
Gambar 4. 1. Loading beam sebagai tempat pemberian beban



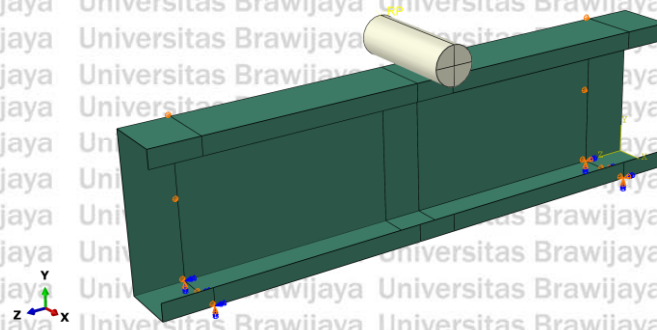
Gambar 4. 2. Pemodelan benda uji profil kanal



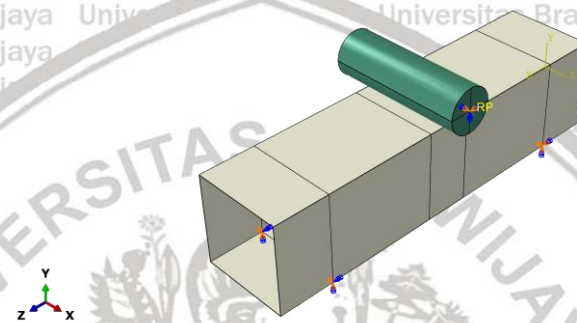
Gambar 4. 3. Pemodelan benda uji profil Square Hollow



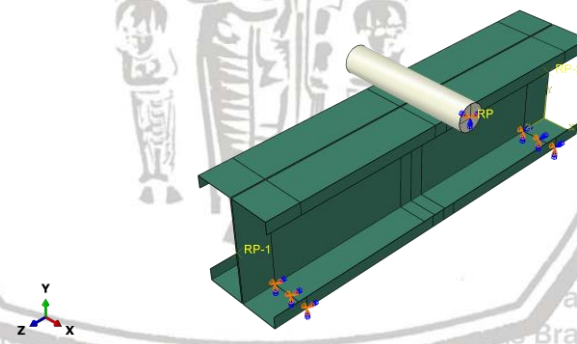
Gambar 4. 4. Pemodelan benda uji profil double canal



Gambar 4. 5. Bentuk pengujian pada profil kanal, letak tumpuan dan letak pengaku web



Gambar 4. 6. Bentuk pengujian pada square hollow dan letak tumpuan



Gambar 4. 7. Bentuk pengujian pada profil double canal, letak tumpuan dan letak pengaku web

4.1.2. Spesifikasi material

Analisis dilakukan dengan baja *cold-formed* dengan mutu G550 yang memiliki nilai f_y dan f_u sebesar 550 MPa. Selain itu untuk nilai modulus elastisitas, modulus geser, dan poisson rasionya sebagai berikut :

Modulus Elastisitas bahan (E) : 200.000 MPa

Modulus Geser (G) : 80.000 MPa

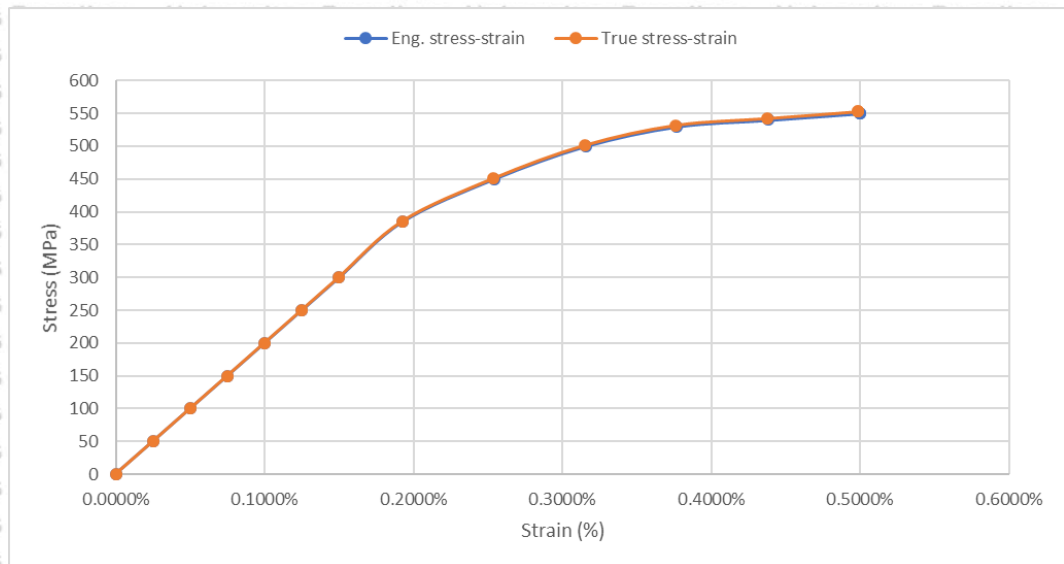
Angka Poisson (ν) : 0,3

Angka modulus elastisitas dan angka poisson digunakan untuk memasukkan material properti elastis model pada ABAQUS. Sedangkan untuk material properti plastis didapatkan dari nilai true stress-strain pada saat plastis. Nilai ini didapatkan dengan menggunakan grafik stress-strain baja ringan untuk mendapatkan engineering stress-strain, lalu data tersebut dikonversi menjadi nilai true stress-strain. Hasil perhitungan true stress dan true strain pada saat plastis ditunjukkan pada Tabel 4.1:

Hasil Perhitungan True Stress dan True Strain

No.	Engineering Stress	Engineering Strain	True Stress	True Strain	Plastic Strain
1	0	0.0000%	0	0.0000%	
2	50	0.0250%	50.0125	0.0250%	
3	100	0.0500%	100.05	0.0500%	
4	150	0.0750%	150.1125	0.0750%	
5	200	0.1000%	200.2	0.1000%	
6	250	0.1250%	250.3125	0.1249%	
7	300	0.1500%	300.45	0.1499%	
8	385	0.1925%	385.741125	0.1923%	
9	450	0.2540%	451.143	0.2537%	
10	500	0.3155%	501.5775	0.3150%	
11	530	0.3770%	531.9981	0.3763%	
12	540	0.4385%	542.3679	0.4375%	
13	550	0.500000%	552.7500000	0.4988%	0.000000%
14	550	0.500001%	552.7500055	0.4988%	0.000001%

Tabel 4. 1. Tabel engineering stress-strain dan true stress-strain



Gambar 4. 8. Grafik Engineering Stress-Strain dan True Stress-Strain



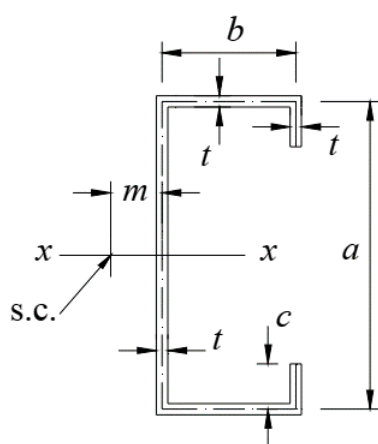
4.2. Perhitungan Manual Kapasitas Profil

Perhitungan manual kapasitas profil di hitung berdasarkan SNI 7971:2013 mengenai struktur baja canal dingin. Kapasitas yang dihitung yaitu kapasitas momen nominal profil dan kapasitas struktur nominal (kapasitas terhadap tekuk global dan lokal). Hasil momen nominal tersebut di konversi menjadi beban terpusat pada tengah bentang dengan tumpuan sendi roll. Kapasitas profil diambil nilai terkecil dari kapasitas nominal dan kapasitas struktur nominal.

4.2.1. Perhitungan kapasitas profil Kanal

4.2.1.1. Data perhitungan

Data yang dipakai untuk perhitungan kapasitas profil kanal sebagai berikut :



a	=	80	mm
b	=	30	mm
c	=	9	mm
t	=	0.75	mm
m	=	14.17615	mm
L	=	240	mm
r _x	=	31.97091	mm
r _y	=	11.55312	mm
I _x	=	121123.4844	mm ⁴
I _y	=	15816.7355	mm ⁴
I _w	=	21400674.5067	mm ⁶
A _g	=	118.5000	mm ²
G	=	80000.0000	Mpa
J	=	22.2188	mm ⁴
Y _{cg}	=	40.0000	mm
Z _f	=	3028.0871	mm ³

4.2.1.2. Perhitungan Kapasitas

A. Kapasitas momen nominal penampang (M_s)

a). Berdasarkan pelelehan awal

$$Z_e = 3028.0871 \text{ mm}^3$$

$$M_s = 1665447.910 \text{ Nmm} \text{ sehingga : } P = 27757.4652 \text{ N}$$

B. Kapasitas momen komponen struktur nominal

a). Mengalami tekuk global

$$X_0 = 23.29007667 \text{ mm}$$

$$Y_0 = 0 \text{ mm}$$

$$r_{o1} = 41.20729718 \text{ mm}$$

$$f_{oy} = 4574.101091 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned}
 f_{oz} &= 3653.58677 \text{ Mpa} \\
 C_b &= 1.315789474 \\
 M_o &= 26265851.23 \text{ Nmm} \\
 M_y &= 1665447.91 \text{ Nmm} \\
 \lambda_b &= 0.251808153 \\
 M_c &= 1665447.91 \text{ Nmm} \\
 f_c &= 550 \text{ Mpa} \\
 M_b &= 1665447.910 \text{ Nmm} \quad \text{sehingga :} \quad P = 27757.4652 \text{ N}
 \end{aligned}$$

b). Kapasitas terhadap tekuk lokal

jika tekuk lokal melibatkan rotasi sayap dan lip

$$\begin{aligned}
 A &= 29.25 \text{ mm}^2 \\
 X &= 20.86956522 \text{ mm} \\
 Y &= 1.038461538 \text{ mm} \\
 J &= 5.484375 \\
 I_x &= 151.7614183 \text{ mm}^4 \\
 I_y &= 3025.694478 \text{ mm}^4 \\
 I_{xy} &= 350.4807692 \text{ mm}^4 \\
 \lambda &= 287.9461387 \\
 \eta &= 0.000119036 \\
 B_1 &= 544.1697232 \\
 \alpha_1 &= 0.033757004 \\
 \alpha_2 &= 0.364942586 \\
 \alpha_3 &= 0.00927945 \\
 f_{od'} &= 169.7046663 \text{ Mpa} \\
 K\phi &= 298.4032009 > 0. \text{ OK} \\
 Z_c &= \text{modulus penuh}
 \end{aligned}$$

Zc = modulus penuh

$$\begin{aligned}
 Z_c &= 3028.0871 \text{ mm}^3 \\
 f_{od} &= 169.7046663 \text{ Mpa} \\
 M_{od} &= 513880.5125 \text{ Nmm} \\
 \lambda_d &= 1.800256769 \\
 M_{c'} &= 812063.1586 \text{ Nmm} \\
 f_c &= 268.1769478 \text{ Mpa} \\
 M_b &= 812063.1586 \text{ Nmm} \quad \text{sehingga :} \quad P = 13534.3860 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi Kapasitas			
No	Nama	Besar kapasitas (N.mm)	Besar beban terpusat (N)
1	Ms	1665447.910	27757.4652
2	Mb (tekuk global)	1665447.910	27757.4652
3	Mb (tekuk lokal)	812063.1586	13534.3860

Tabel 4. 2. Tabel rekapitulasi kapasitas profil kanal

Maka kapasitas dari profil kanal adalah **13534.3860 N**

4.2.2. Perhitungan kapasitas profil Square Hollow

4.2.2.1. Data perhitungan

Data yang dipakai untuk perhitungan kapasitas profil Square Hollow sebagai berikut :

a	=	41	mm
b	=	41	mm
$t_1 = t_2$	=	1.31	mm
I_x	=	60252.45	mm ⁴
I_y	=	60252.45	mm ⁴
Y_{cg}	=	20.5	mm
L	=	123	mm
G	=	80000	Mpa
J	=	90286.51	mm ⁴
Z_f	=	2939.144	mm ³
r_x	=	16.74672	mm
r_y	=	16.74672	mm
A	=	214.84	mm ²

4.2.2.2. Perhitungan Kapasitas

A. Kapasitas momen nominal penampang (M_s)

a). Berdasarkan pelelehan awal

$$Z_e = 2939.1441 \text{ mm}^3$$

$$M_s = 1616529.2667 \text{ Nmm} \quad \text{maka :} \quad P = 52570.0575 \text{ N}$$

B. Kapasitas momen komponen struktur nominal (M_b)

a). Boks tertutup

$$C_b = 1.315789474$$

$$l_u = 8588.43445 \text{ mm} \geq 123 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

untuk $l_u \geq l$

$$r_{o1} = 23.68344077 \text{ mm}$$

$$f_{oy} = 36591.40773 \text{ Mpa}$$

$$f_{oz} = 59938.81072 \text{ Mpa}$$

$$C_b = 1.315789474$$

$$M_o = 313537844.8 \text{ Nmm}$$

$$M_y = 1616529.267 \text{ Nmm}$$

$$\lambda_b = 0.071803696$$

$$M_c = 1616529.267 \text{ Nmm}$$

$$f_c = 550 \text{ Mpa}$$

$$M_b = 1616529.2667 \text{ Nmm} \quad \text{sehingga :} \quad P = 52570.0575 \text{ N}$$

Rekapitulasi Kapasitas			
No	Nama	Besar kapasitas (N.mm)	Besar beban terpusat (N)
1	Ms	1616529.2667	52570.0575
2	Mb	1616529.2667	52570.0575

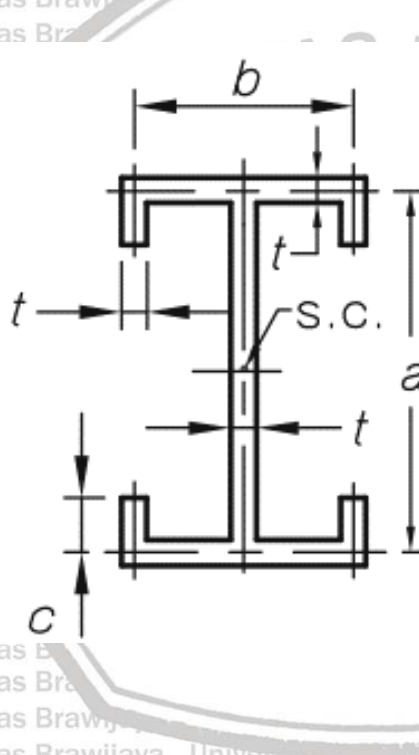
Tabel 4. 3. Tabel rekapitulasi kapasitas profil square hollow

Maka kapasitas dari profil *Square Hollow* adalah **52570.0575 N**

4.2.3. Perhitungan kapasitas profil *Double Canal*

4.2.3.1. Data Perhitungan

Data yang dipakai untuk perhitungan kapasitas profil *double canal* sebagai berikut :

	a	=	80	mm
	b	=	60.75	mm
	c	=	9	mm
	tf & tl	=	0.75	mm
	m	=	0	mm
	L	=	240	mm
	rx	=	31.97091	mm
	ry	=	14.95039	mm
	tw	=	1.5	mm
	Ix	=	242246.9688	mm ⁴
	Iy	=	52972.8750	mm ⁴
	Iw	=	94397271.8906	mm ⁶
	A	=	237	mm ²
	G	=	80000	Mpa
	J	=	112.1484	mm ⁴
	Ycg	=	40	mm
	Zf	=	6056.1742	mm ³

4.2.3.2. Perhitungan kapasitas

A. Kapasitas momen nominal penampang (M_s)

a). Berdasarkan pelelehan awal

$$Z_e = 6056.1742 \text{ mm}^3$$

$$M_s = 3330895.8203 \text{ Nmm} \quad \text{sehingga :} \quad P = 55514.93034 \text{ N}$$

B. Kapasitas momen komponen struktur nominal

a). kapasitas terhadap tekuk global

Komponen struktur penampang terbuka

$$r_{o1} = 35.2938146 \text{ mm}$$

$$f_{oy} = 7659.712259 \text{ Mpa}$$

$$f_{oz} = 10988.13461 \text{ Mpa}$$

$$C_b = 1.315789474$$

$$M_o = 100972141.4 \text{ Nmm}$$

$$M_y = 3530749.57 \text{ Nmm}$$

$$\lambda_b = 0.186996154$$

$$M_c = 3530749.57 \text{ Nmm}$$

$$f_c = 583 \text{ Mpa}$$

$$M_b = 3330895.8203 \text{ Nmm} \quad \text{sehingga :} \quad P = 55514.93034 \text{ N}$$

b). kapasitas terhadap tekuk lokal

$$\text{kapasitas kanal tunggal} = 812063.1586 \text{ N.mm}$$

$$\text{kapasitas double kanal} = 2 \times \text{kapasitas kanal tunggal}$$

$$= 2 \times 812063.1586 \text{ N.mm}$$

$$= 1624126.3172 \text{ N.mm}$$

$$= 27068.7720 \text{ N}$$

Rekapitulasi Kapasitas			
No	Nama	Besar kapasitas (N.mm)	Besar beban terpusat (N)
1	Ms	3330895.8203	58845.8262
2	Mb (tekuk global)	3330895.8203	58845.8262
3	Mb (tekuk lokal)	1624126.3172	27068.7720

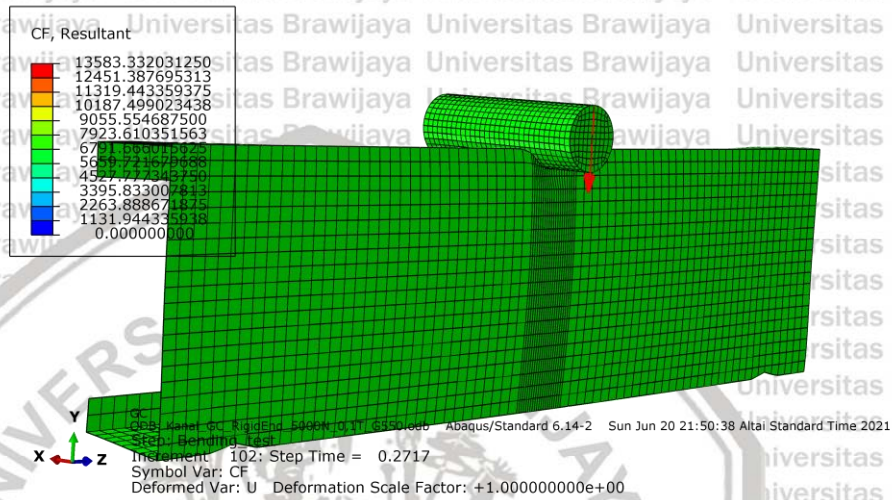
Tabel 4. 4. Rekapitulasi kapasitas Profil double canal

Maka kapasitas dari profil *double canal* adalah **27068.7720 N**

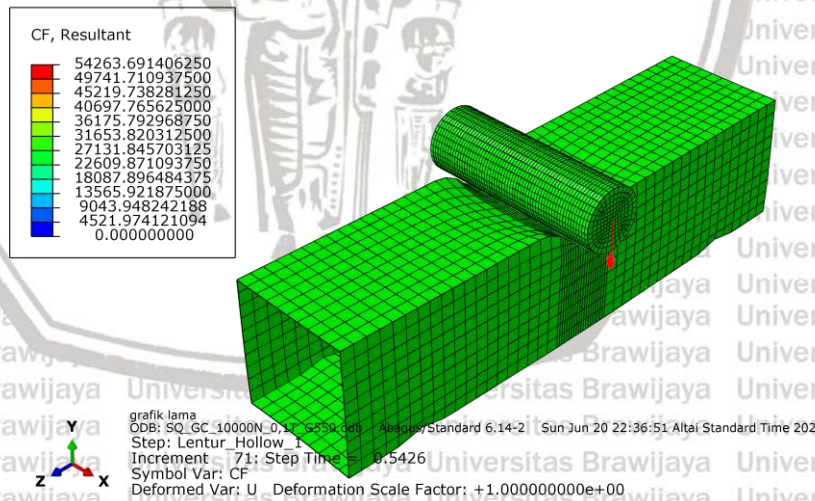
4.3. Analisis Profil menggunakan Software ABAQUS

4.3.1. Kapasitas Profil

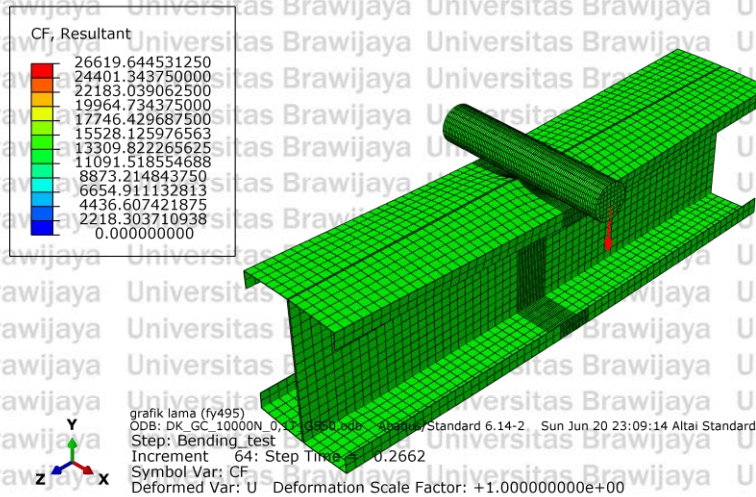
Kapasitas suatu profil didapatkan dengan cara memberikan beban secara bertahap menggunakan *amplitude* yang di letakkan pada *loading beam* hingga proses analisis berhenti atau *abort*. *Output* hasil analisis ini berupa beban maksimum yang di tunjukkan pada *loading beam*. Hasil kapasitas profil dari analisis ABAQUS sebagai berikut:



Gambar 4. 9. Kapasitas profil kanal hasil analisis abaqus.



Gambar 4. 10. Kapasitas profil square hollow hasil analisis abaqus



Gambar 4. 11. Kapasitas profil double canal hasil analisis abaqus

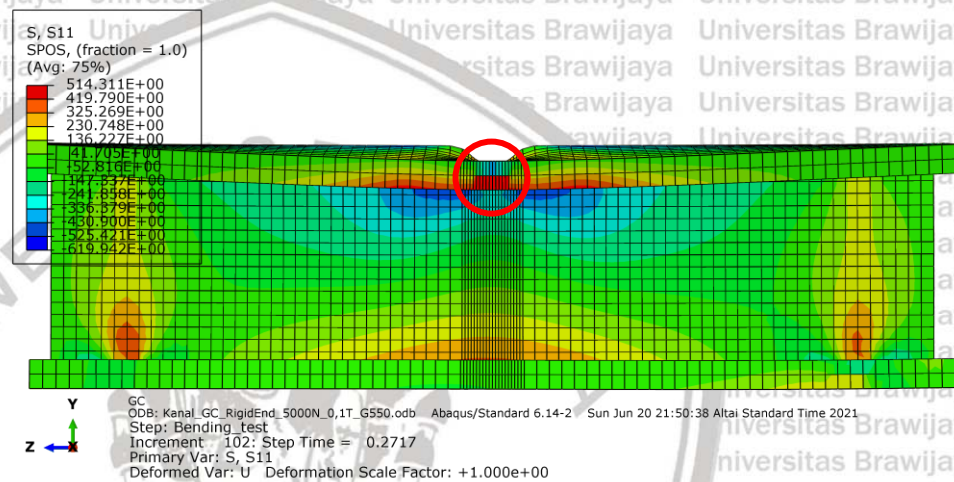
No	Nama Profil	Kapasitas dari analisis ABAQUS (N)	Kapasitas dari analisis SNI (N)	Selisih Hasil ABAQUS dan SNI
1	Kanal C80.30.9.0,75 mm	13558.7832	13534.3860	0.18%
2	Square hollow 41.41.1,31 mm	54263.6914	52570.0575	3.12%
3	Profil <i>double canal</i>	26619.6445	27068.7720	1.69%

Tabel 4. 5. Hasil Kapasitas dari ABAQUS dan SNI

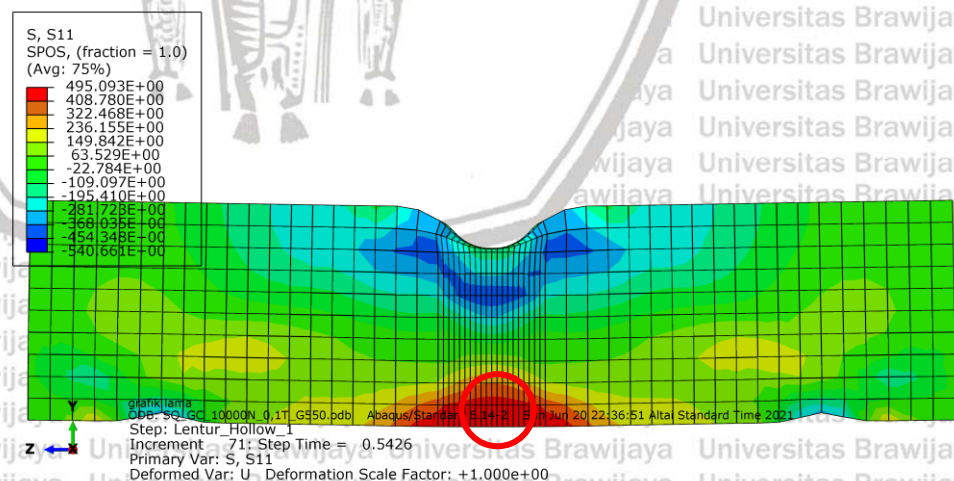
Berdasarkan Tabel 4.4 diketahui bahwa Hasil analisis ABAQUS didapatkan kapasitas profil kanal sebesar 13558.7832N, untuk profil *Square Hollow* sebesar 54263.6914 N, dan untuk profil *double canal* sebesar 26619.6445 N. kapasitas yang di dapatkan dari ABAQUS pada profil kanal dan profil *double canal* cukup mendekati dengan hasil kapasitas dari SNI dengan selisih terkecil terdapat pada profil kanal (0,18%) dan selisih terbesar terdapat pada profil *square hollow* (3,12%).

4.3.2. Tegangan – Regangan

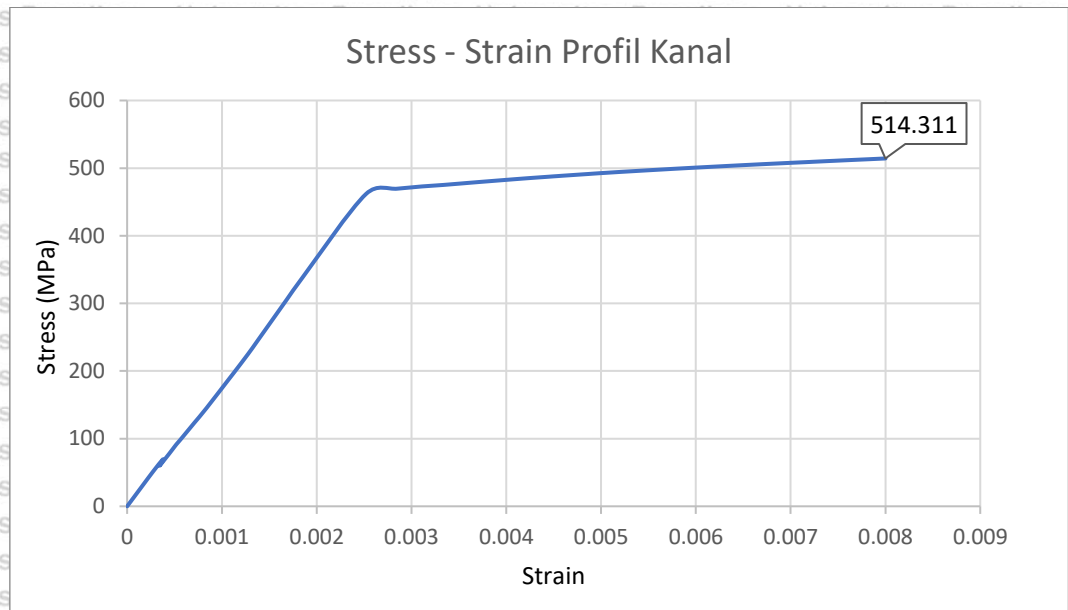
Titik acuan untuk nilai tegangan-regangan ini terletak pada tengah bentang yang memiliki nilai tegangan terbesar. Hal ini dikarenakan pembebanan dilakukan pada bentang tengah sehingga pada bentang tengah mengalami tegangan puncak pertama kali. Tegangan dan regangan yang diambil merupakan tegangan yang searah dengan sumbu longitudinal atau S11 dan E11. Tegangan dan regangan puncak tiap profil bervariasi. Profil Kanal memiliki tegangan puncak sebesar 514,311 MPa dan regangan 0,008 yang terletak pada lip nya. Profil *Square Hollow* memiliki tegangan puncak sebesar 484,468 MPa dengan regangan 0,0038 yang terletak pada web bagian bawah. Pada profil *Double Canal* memiliki tegangan puncak sebesar 530,91 MPa dan regangan 0,0134 yang terletak pada lip nya.



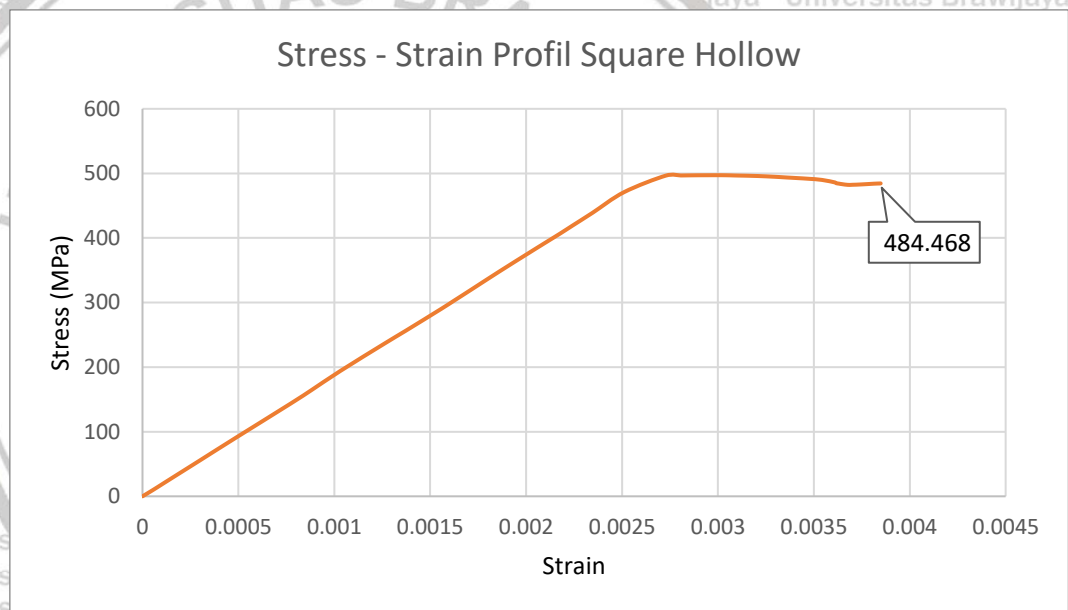
Gambar 4. 12. Stress maksimum pada lip kanal



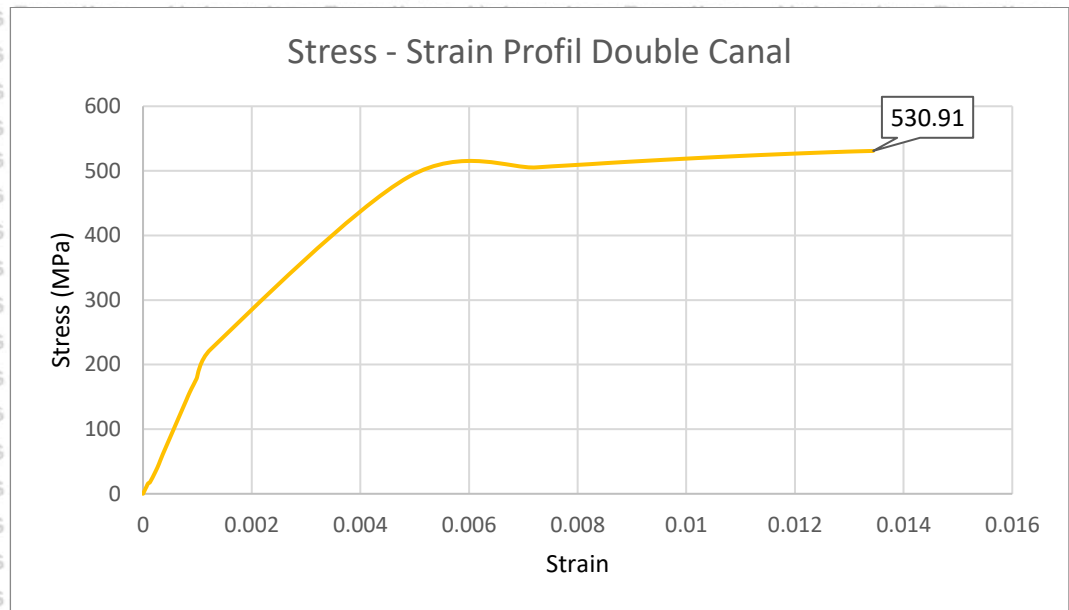
Gambar 4. 13. Stress maksimum pada profil square hollow pada web bawah



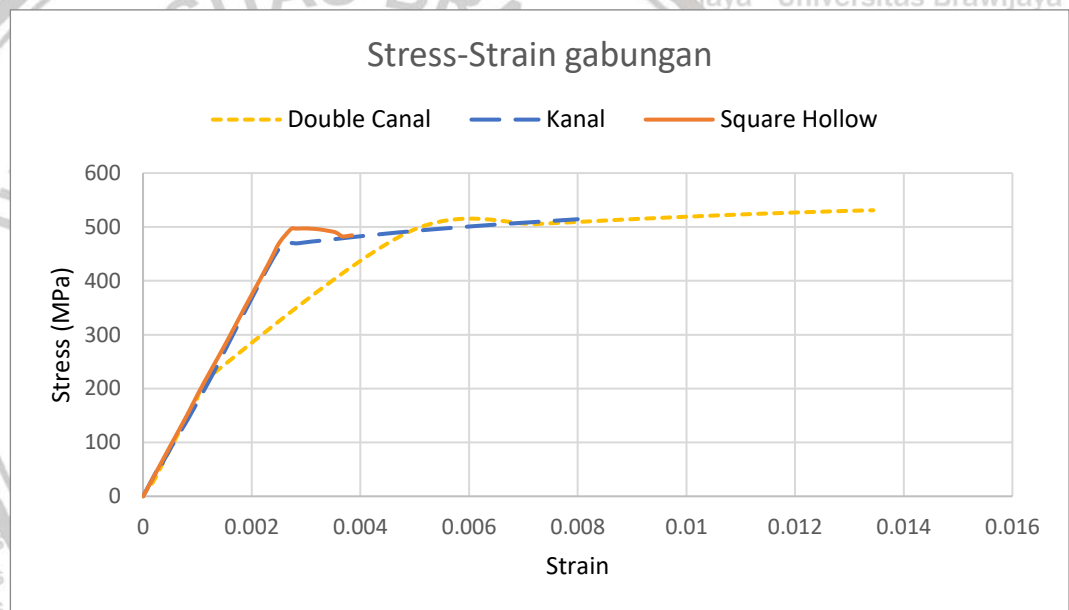
Gambar 4. 14. Grafik Stress - Strain pada profil kanal



Gambar 4. 15. Grafik stress - strain pada profil square hollow



Gambar 4. 16. Grafik stress - strain pada grafik profil double canal



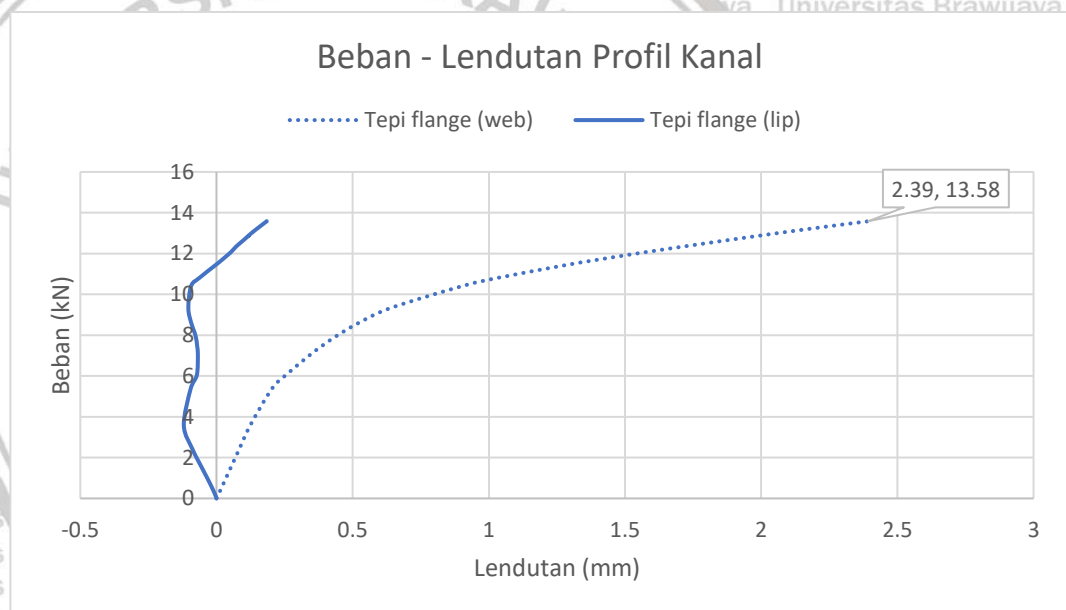
Gambar 4. 17. Grafik stress - strain gabungan

4.3.3. Hubungan Beban Dan Lendutan

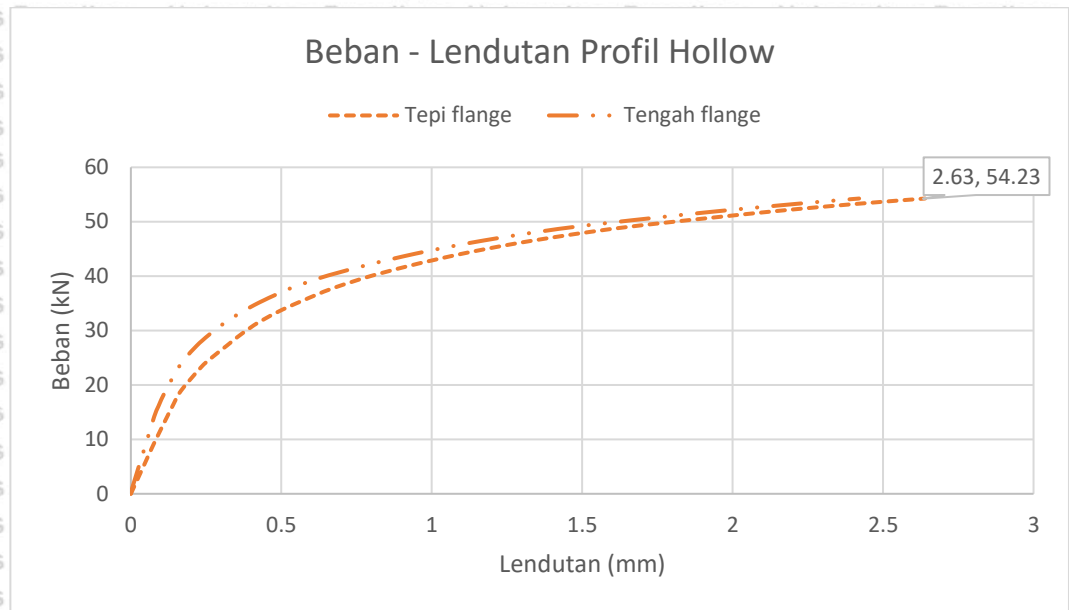
Hubungan beban dan lendutan ini merupakan reaksi pada profil kanal, square hollow dan I (double canal) pada saat diberikan interval beban secara berkala. Reaksi ini di tunjukkan pada nilai lendutan yang terjadi di tengah bentang. Untuk nilai lendutan pada profil kanal dan profil *double canal* di ukur pada ujung – ujung *flange* bawah (ujung yang dekat dengan *web* dan lip). Untuk profil *square hollow*, nilai lendutan di ukur pada ujung *flange* (ujung yang dekat dengan *web*) dan tengah *flange*.

Berdasarkan grafik 4.21 didapatkan bahwa profil *double canal* bisa menahan beban dua kali profil kanal dan lendutan yang terjadi lebih kecil 1,5 kali dari lendutan profil kanal. Pada profil kanal, lendutan yang terdapat pada ujung *flange* yang dekat dengan lip terjadi kenaikan dan penurunan. Hal ini di karenakan efek dari tekuk yang terjadi pada penampangnya.

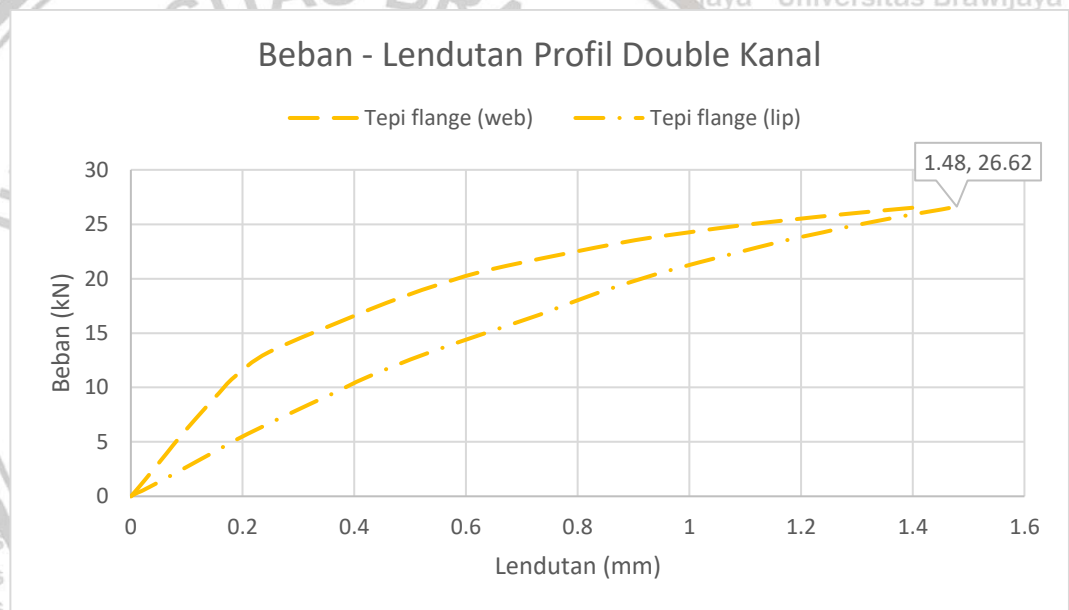
Untuk profil *square hollow* tidak bisa di bandingkan dengan profil kanal dan *double canal*, jika yang di tinjau merupakan beban maksimum yang dapat diterima suatu profil. Hal ini dikarenakan panjang bentang profil *square hollow* berbeda dengan profil kanal dan *double canal*.



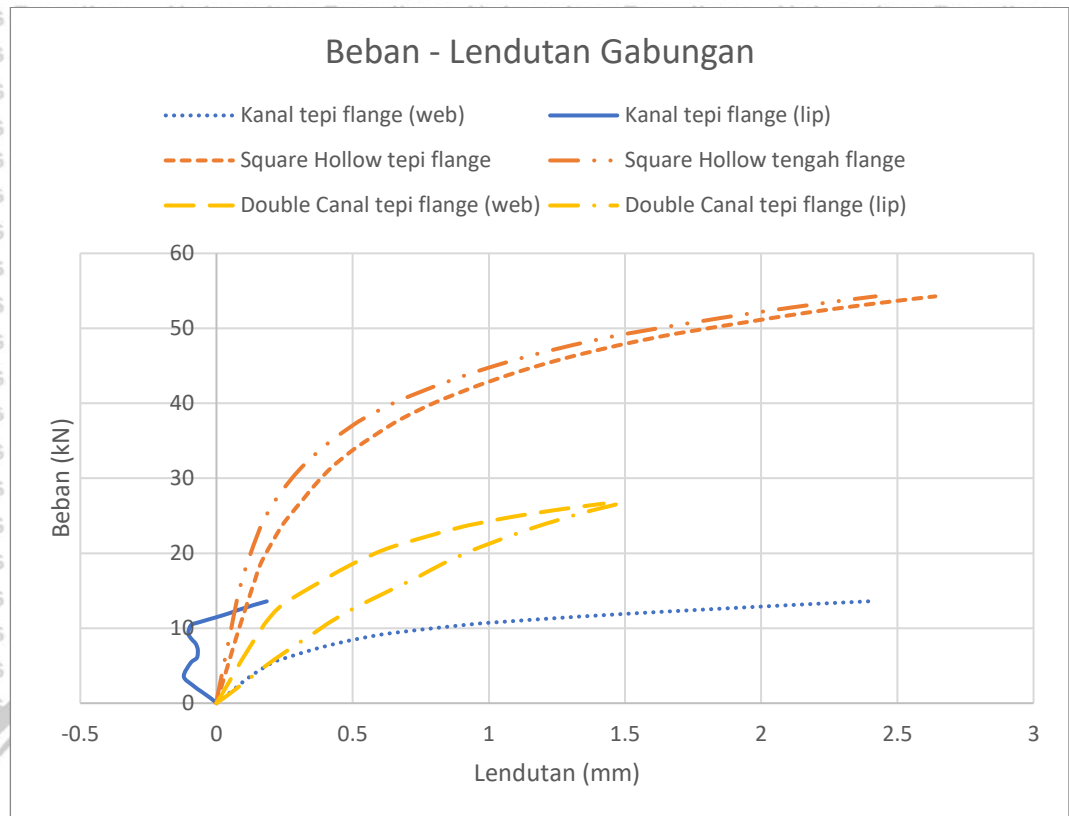
Gambar 4. 18. Grafik hubungan beban dan lendutan profil kanal



Gambar 4. 19. Grafik hubungan beban dan lendutan profil square hollow



Gambar 4. 20. Grafik hubungan beban dan lendutan profil double kanal

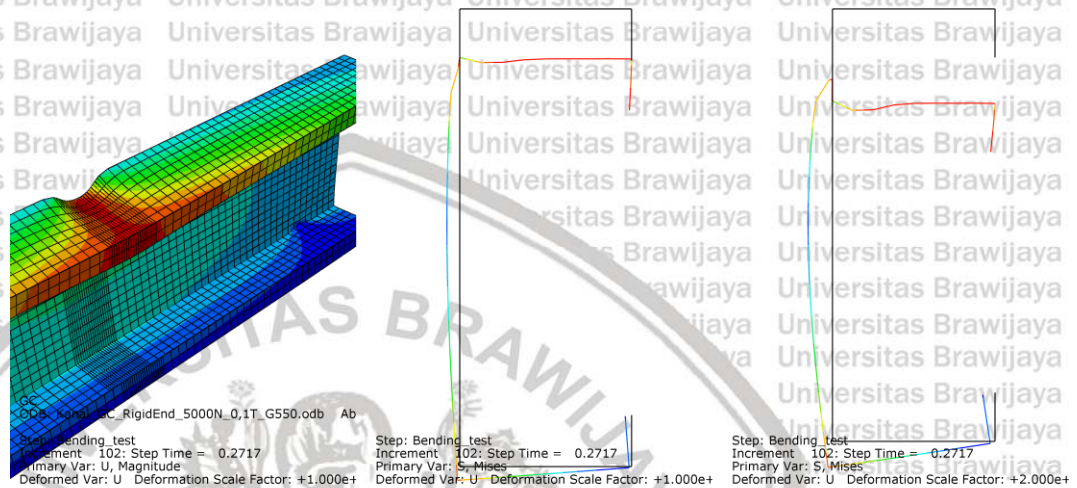


Gambar 4. 21. Grafik gabungan beban dan lendutan

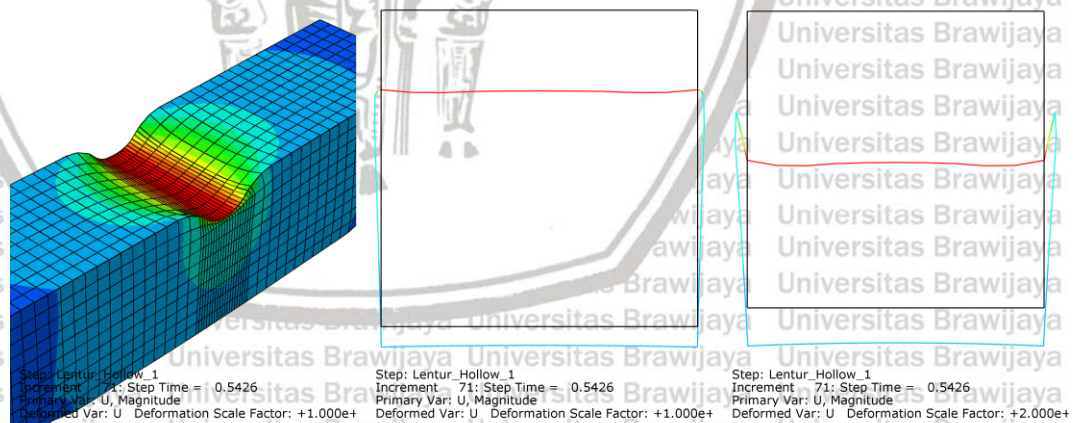


4.3.4. Bentuk Keruntuhan

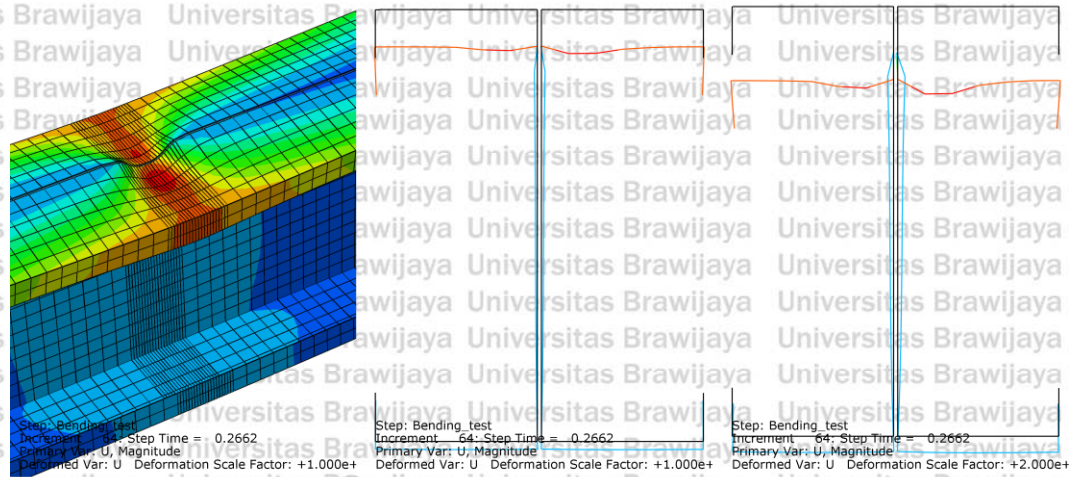
Bentuk keruntuhan yang terjadi pada benda uji bisa beragam bentuk seperti tekuk global dan tekuk lokal. Berdasarkan gambar 4.22, 4.23, dan 4.24 didapatkan bahwa tekuk terjadi pada tengah bentang yaitu pada daerah pembebanan. Bentuk tekuk yang terjadi pada profil ini termasuk kedalam kategori tekuk lokal karena tekuk terjadi pada bagian flens. Tekuk ini terjadi dikarenakan ketebalan profil yang terlalu tipis.



Gambar 4. 22. Bentuk keruntuhan pada profil kanal dengan skala 1 (tengah) dan skala 2 (kanan)



Gambar 4. 23. Bentuk keruntuhan pada profil square hollow dengan skala 1 (tengah) dan skala 2 (kanan)



Gambar 4. 24. Bentuk keruntuhan pada profil double canal dengan skala 1 (tengah) dan skala 2 (kanan)

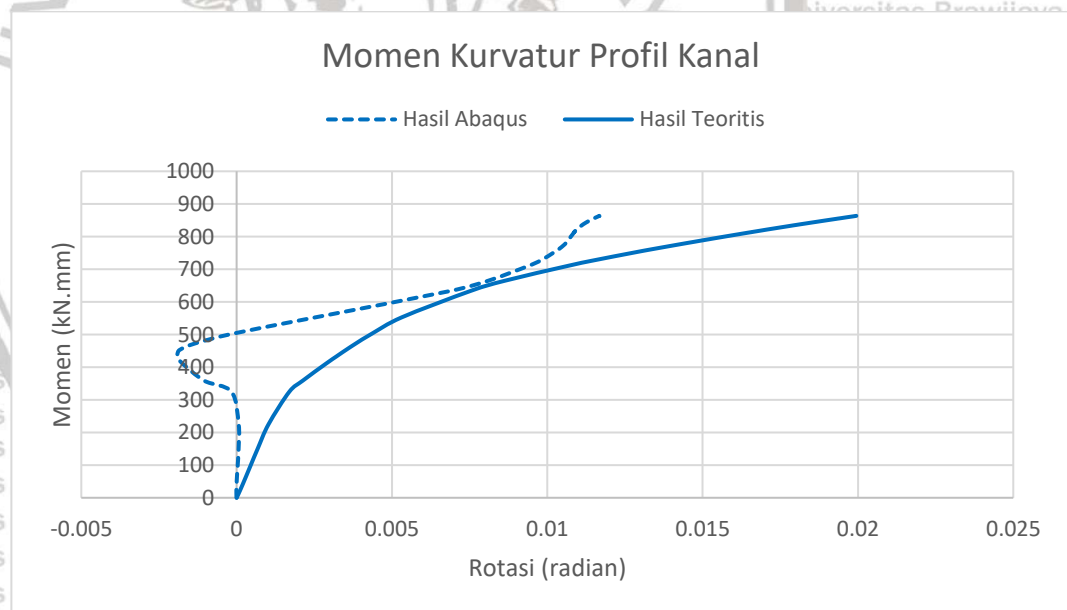


4.3.5. Momen Kurvatur

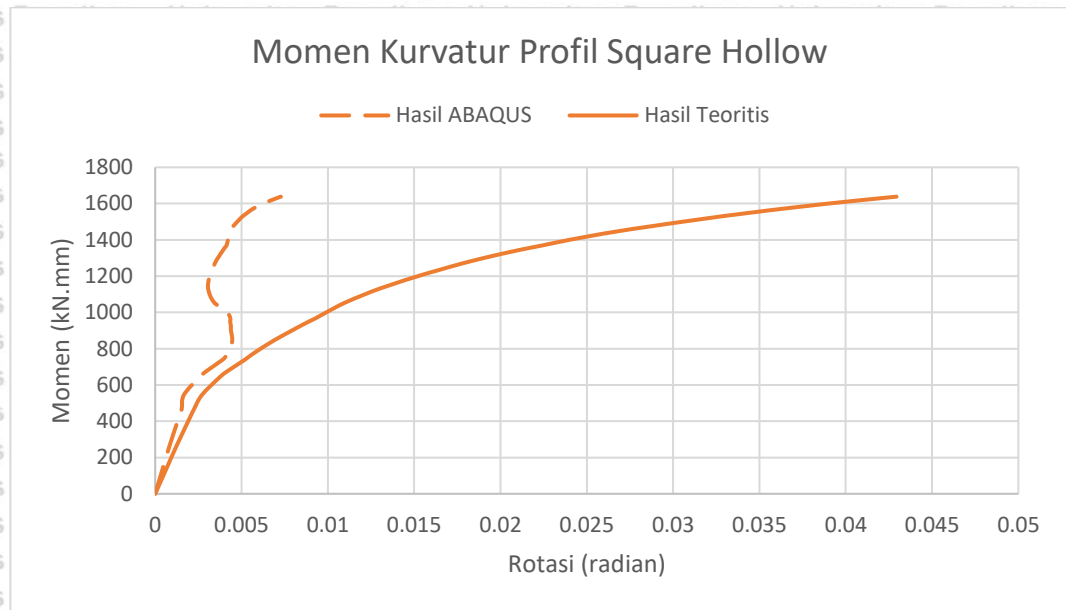
Grafik momen kurvatur merupakan grafik yang menghubungkan momen yang terjadi pada struktur terhadap sudut rotasi struktur. Momen berikut ini merupakan momen maksimum yang terjadi pada tengah bentang. Momen ini didapatkan dengan cara mengkalikan reaksi vertikal tumpuan dan panjang setengah bentang. Untuk rotasi di hitung secara teoritis dengan arc tangen dari lendutan dan panjang setengah bentang, dan rotasi sebenarnya hasil analisis *software ABAQUS student edition*.

Hasil yang di dapatkan dari gambar 4.28 yaitu secara teoritis momen yang dapat di tahan oleh profil *double canal* hampir dua kali dari momen yang dapat di tahan oleh profil kanal. Bahkan rotasi yang terjadi lebih pada profil *double canal* lebih kecil dari profil kanal. Untuk profil *square hollow* bisa menahan momen yang hampir sama dengan profil *double canal*, tetapi rotasi yang terjadi pada profil *square hollow* sangat besar hingga 3,5 kali profil *double canal*.

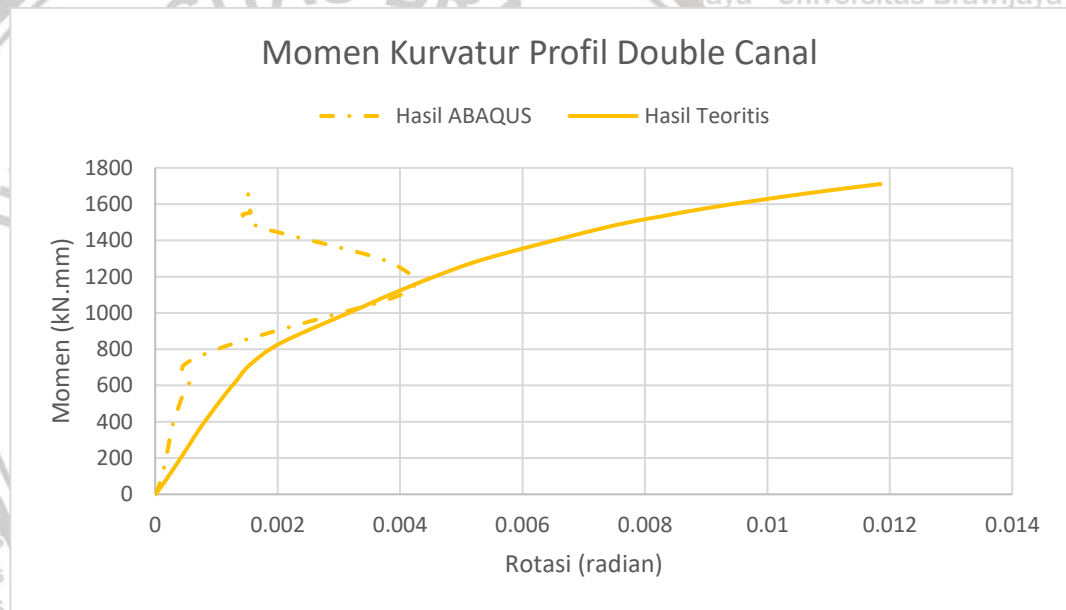
Dari grafik pada gambar 4.28 dan gambar 4.29 didapatkan bahwa nilai rotasi berdasarkan hasil analisis ABAQUS pada profil kanal, *square hollow*, dan *double canal* terjadi kenaikan dan penurunan. Hal ini disebabkan terjadinya tekuk lokal di daerah tumpuan.



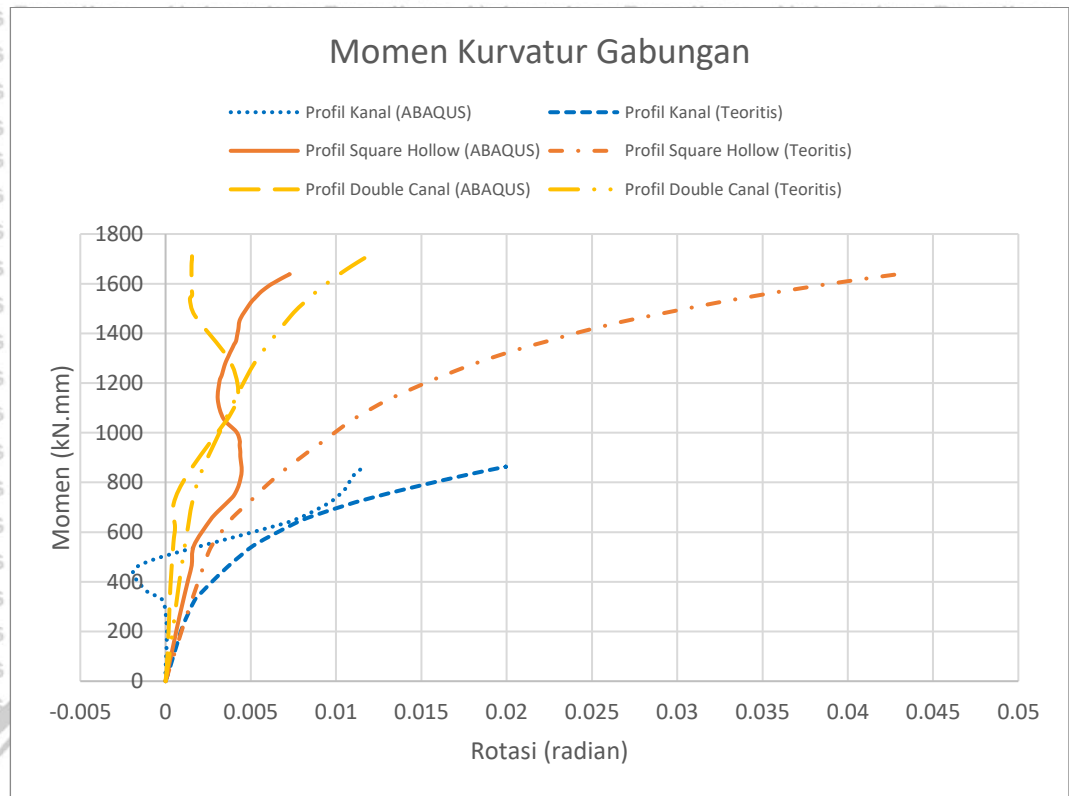
Gambar 4. 25. Grafik momen kurvatur pada profil kanal



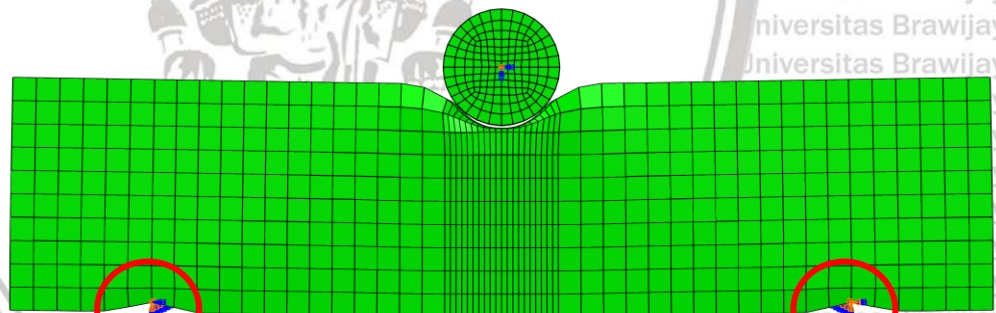
Gambar 4. 26. Grafik momen kurvatur pada profil square hollow



Gambar 4. 27. Grafik momen kurvatur pada profil double canal



Gambar 4. 28. Grafik gabungan momen kurvatur



grafik lamina: GC_10000N_0,1T_G550.odb Abaqus/Standard 6.14-2 Fri Jul 09 14:56:32 SE Asia Standard Time 2021

Step: Lentur_Hollow_1
Increment: 71: Step Time = 0.5426

Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Gambar 4. 29. Tekuk pada tumpuan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis pemodelan perilaku lentur pada baja *cold-formed* dalam menahan beban menggunakan perhitungan manual berdasarkan SNI 7971:2013 dan menggunakan software ABAQUS Student Edition, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Kapasitas Profil Kanal berdasarkan SNI 7971:2013 adalah 13534,386 N dan berdasarkan hasil dari ABAQUS adalah 13558,7832 N dengan persentase selisihnya sebesar 0,18%. Kapasitas Profil *Square Hollow* berdasarkan SNI 7971:2013 adalah 52570,0575 N dan berdasarkan hasil dari ABAQUS adalah 54263,6914 N dengan persentase selisihnya sebesar 3,12%. Kapasitas Profil *Double Canal* berdasarkan SNI 7971:2013 adalah 27068,7720 N dan berdasarkan hasil dari ABAQUS adalah 26619,6445 N dengan persentase selisihnya sebesar 1,69%.
- Tegangan dan regangan puncak Profil Kanal sebesar 514,311 MPa dan regangan 0,008 yang terletak pada lip nya. Profil *Square Hollow* memiliki tegangan puncak sebesar 484,468 MPa dengan regangan 0,0038 yang terletak pada web bagian bawah. Pada profil *Double Canal* memiliki tegangan puncak sebesar 530,91 MPa dan regangan 0,0134 yang terletak pada lip nya.
- Profil *double canal* bisa menahan beban dua kali profil kanal dan lendutan yang terjadi lebih kecil 1,5 kali dari lendutan profil kanal.
- Pada profil kanal, lendutan pada ujung flange yang dekat dengan lip terjadi kenaikan dan penurunan yang dikarenakan efek dari tekuk yang terjadi pada penampangnya.
- Berdasarkan beban maksimum yang dapat di terima, profil *square hollow* tidak bisa di bandingkan dengan profil kanal dan *double canal* dikarenakan panjang bentang profil *square hollow* berbeda dengan profil kanal dan *double canal*.
- Tekuk yang terjadi pada profil kanal, *square hollow*, dan *double canal* merupakan tekuk lokal karena tekuk terjadi pada bagian flens. Tekuk ini terjadi dikarenakan ketebalan profil yang terlalu tipis.
- Secara teoritis momen yang dapat di tahan oleh profil *double canal* hampir dua kali dari profil kanal dengan rotasi yang terjadi lebih kecil dari profil kanal. Untuk profil *square hollow* bisa menahan momen hampir sama dengan profil *double canal*, tetapi rotasi yang terjadi pada profil *square hollow* 3,5 kali profil *double canal*.
- Berdasarkan nilai rotasi hasil analisis ABAQUS, rotasi pada profil kanal, *square hollow*, dan *double canal* terjadi kenaikan dan penurunan yang disebabkan terjadinya tekuk lokal di daerah tumpuan.

5.2. Saran

- Untuk analisis selanjutnya di sarankan menggunakan data grafik stress – strain dari uji laboratorium supaya analisis bisa akurat dengan benda uji sebenarnya.
- Untuk analisis selanjutnya, bisa menggunakan jenis profil lainya atau dengan menggunakan variasi *width-thickness ratio*.
- Untuk analisis selanjutnya di sarankan untuk menggunakan panjang bentang yang sama supaya bisa membandingkan secara langsung kekuatan profil yang di analisis.



Daftar Pustaka

- Chen, Xiaolin dan Yijun Liu. (2014). *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. London: CRC Press
- Yu, Wei-Wen, Roger A. LaBoube dan Helen Chen. (2020). *Cold-formed steel design (5th edition)*. Hoboken : John Wiley & Sons, Inc.
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). *SNI 7971:2013 Struktur Baja Cold-Formed*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Departemen Pekerjaan Umum. (2002). *SNI 1729:2002 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- *Abaqus Analysis User's Manual 6.9*. Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- Cook, Robert D. (1990). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. Providence WI, USA: John Wiley & Sons Inc.
- Hu, Jack, Zdzislaw Marciniak, John Duncan. (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*. London: Butterworth-Heinemann.
- Gardner, L. dan Yun, X. (2018). *Description of stress-strain curves for cold-formed steels*. London: Imperial College London

