

TUGAS AKHIR

ANALISIS STRUKTUR RANGKA ATAP BAJA KELANGSINGAN TINGGI MENGGUNAKAN *DIRECT ANALYSIS METHOD* YANG DIVERIFIKASI MELALUI UJI KUAT TEKAN PROFIL *HOLLOW SQUARE SECTION*

**Studi kasus: Rangka Atap HSS Kelangsingan Tinggi dengan Pelat Sambung
Tunggal**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**FAISAL BUDIMAN
16511238**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2022**

TUGAS AKHIR

ANALISIS STRUKTUR RANGKA RANGKA ATAP BAJA KELANGSINGAN TINGGI MENGGUNAKAN *DIRECT ANALYSIS METHOD* YANG DIVERIFIKASI MELALUI UJI KUAT TEKAN PROFIL *HOLLOW SQUARE SECTION*

**Studi kasus: Rangka Atap HSS Kelangsingan Tinggi dengan Pelat Sambung
Tunggal**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**FAISAL BUDIMAN
16511238**

Disetujui:

Pembimbing

HARIADI YULIANTO, S.T., M.Eng.

Tanggal: 6/8 '22

TUGAS AKHIR

ANALISIS STRUKTUR RANGKA RANGKA ATAP BAJA KELANGSINGAN TINGGI MENGGUNAKAN *DIRECT ANALYSIS METHOD* YANG DIVERIFIKASI MELALUI UJI KUAT TEKAN PROFIL *HOLLOW SQUARE SECTION*

**Studi kasus: Rangka Atap HSS Kelangsingan Tinggi dengan Pelat Sambung
Tunggal**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**

Disusun oleh:



Telah diterima sebagai salah satu persyaratan
Untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 15 Agustus 2022

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Penguji 1

Penguji 2

Hariadi Yulianto, S.T.,M.Eng.
NIK: 155111305

Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.
NIK: 185111304

Astriana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK: 165111301

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Yunalia Muntafi, S.T., M.T.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk menyelesaikan program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, Juli 2022

Yang membuat pernyataan,



Faisal Budiman

(16511238)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang sehingga berkat rahmat dan karunianya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul Analisis Struktur Rangka Atap Baja Kelangsingan Tinggi Menggunakan *Direct Analysis Method* yang Diverifikasi Melalui Uji Kuat Tekan Profil *Hollow Square Section*. Adapun Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik yang harus diselesaikan pada studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini terdapat beberapa hambatan yang dihadapi penulis. Namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan hal tersebut, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sepenuh hati kepada:

1. Bapak Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan memberi banyak ilmu dengan saran, kritik, dan diskusi yang membangun selama penyusunan Proposal Tugas Akhir ini.
2. Bapak Hari dan Mas Yahya selaku petugas di Laboratorium MR&Struktur yang telah membantu saya dalam menyiapkan kebutuhan saya semasa melakukan eksperimen di laboratorium.
3. Bapak, Ibu, kakak, dan keluarga lainnya yang selalu memberi dukungan baik doa dan dorongan semangat untuk penulis dalam menyusun Proposal Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen, karyawan, dan asisten Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia yang telah membarikan ilmu dan menyediakan fasilitas penunjang selama masa perkuliahan penulis.
5. Pihak-pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Semoga Proposal Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis maupun bagi pembaca pada umumnya.

Yogyakarta, Juli 2022

Penulis,

Faisal Budiman

(16511238)



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
HALAMAN PERNYATAAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
ABSTRAK	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Perbedaan dengan Penelitian Sebelumnya	9
BAB III LANDASAN TEORI	12
3.1 Struktur Rangka	12
3.1.1 Rangka atap	12
3.2 Baja	13
3.2.1 Sifat mekanik baja	14
3.3 Direct Analysis Method	16
3.3.1 Pengaruh cacat bawaan (<i>Initial Imperfection</i>)	18
3.3.2 Penyesuaian Kekakuan	19
3.3.3 Kuat nominal penampang	20
3.4 Batang Tekan	21
3.4.1 Kelangsingan	22
3.4.2 Keruntuhan akibat tegangan leleh terlampaui	24
3.4.3 Klasifikasi penampang dan tekuk	25
3.5 Kuat Lentur Profil Persegi Panjang	30
3.6 Sambungan Rangka Baja	33
3.6.1 Kuat tumpu baut	34

3.6.2 Kuat geser baut	35
BAB IV METODE PENELITIAN	36
4.1 Gambaran Umum	36
4.2 Variabel Penelitian	36
4.3 Teknik Pengumpulan Data	37
4.4 Bahan-Bahan yang Digunakan	37
4.5 Peralatan Penelitian	38
4.6 Tahapan Penelitian dan Set Up Pengujian	41
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	48
5.1 Uji Kuat Tarik Material Baja	48
5.2 Uji Kuat Geser Baut	52
5.3 Uji Kuat Tekan Profil	54
5.4 <i>Trial and Error</i> Permodelan Batang Tekan SAP2000 dengan Uji Laboratorium	57
5.4.1 Permodelan SAP2000 Batanag Tekan Variasi 1 Baut	57
5.4.2 Permodelan SAP2000 Batang Tekan Variasi 3 Baut	71
5.5 Analisis Kapasitas Rangka Atap pada <i>Direct Analysis Method</i> SAP2000	74
5.5.1 Analisis Kapasitas Rangka Atap Variasi 1 Baut	74
5.5.2 Analisis Kapasitas Rangka Atap Variasi 3 Baut	83
5.6 Pembahasan	90
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	93
6.1 Kesimpulan	93
6.2 Saran	94
DAFTAR PUSTAKA	95
LAMPIRAN	97

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Ringkasan Penelitian-Penelitian Sebelumnya	9
Tabel 3.1 Klasifikasi Elemen Pada Batang Tekan Aksial	26
Tabel 3.2 Kondisi Batas Terhadap Klasifikasi Penampang	31
Tabel 5. 1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Material Baja	51
Tabel 5. 2 Rekapitulasi Pengujian Kuat Geser Baut	53
Tabel 5.4 Perbandingan Jumlah Step dan Nilai Kuat Tekan Batang Tekan Variasi 1 Baut	68
Tabel 5.5 Nilai P-Delta Hasil Pengujian dengan DAM	70
Tabel 5.6 Rekapitulasi Kuat Tekan Batang Variasi 1 Baut dengan DAM	70
Tabel 5.7 Perbandingan Jumlah Step dan Nilai Kuat Tekan Batang Tekan Variasi 1 Baut	73
Tabel 5.8 Rekapitulasi Kuat Penampang pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 1 Baut	82
Tabel 5.9 Hasil Prediksi Kuat Tekan pada Permodelan SAP2000 Rangka Atap Variasi 1 Baut	83
Tabel 5.10 Rekapitulasi Kuat Penampang pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 1 Baut	89
Tabel 5.11 Hasil Prediksi Kuat Tekan pada Permodelan SAP2000 Rangka Atap Variasi 3 Baut	90
Table 5.12 Perbandingan Nilai Kuat Tekan Profil <i>Hollow Square Section</i>	90
Tabel 5.13 Nilai Error Terhadap Pengujian Laboratorium	91
Tabel 5.14 Perbandingan Hasil Prediksi Kuat Tekan Rangka Atap dengan DAM	92

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Komponen Penyusun Rangka Atap	13
Gambar 3.2 Diagram Hubungan Tegangan dan Regangan	15
Gambar 3.3 Pengaruh Orde ke-2	18
Gambar 3.4 Kurva Tegangan Tekan Aksial dengan Nilai KL/r	24
Gambar 3.5 Batang Tertekan	28
(Sumber: Salmon, Et Al 2009)	28
Gambar 3.6 Sambungan Baut	34
Gambar 4.1 Universal Testing Machine	38
Gambar 4.2 Loading Frame	39
Gambar 4.3 Hydraulic Jack	40
Gambar 4.4 Dukungan Rol dan Sendi	40
Gambar 4.5 Linear Variable Differential Transformer	41
Gambar 4.6 Benda Uji Kuat Tarik Pelat Baja	44
Gambar 4.7 Set Up Pengujian Geser baut	44
Gambar 4.8 Set Up pengujian Kuat Tekan Profil Baja	45
Gambar 4.9 Flow Chart Penelitian	47
Gambar 5.1 Sampel Uji Kuat Tarik Baja	48
Gambar 5. 2 Grafik Tegangan-Regangan Sampel 1	49
Gambar 5. 3 Grafik Tegangan-Regangan Sampel 2	49
Gambar 5.4 Offset 0,2%	50
Gambar 5.5 Detail Slip Awal Grafik Tegangan-Regangan	51
Gambar 5.6 Pengujian Kuat Geser Baut Sampel 1	52
Gambar 5.7 Pengujian Kuat Geser Baut Sampel 2	53
Gambar 5.8 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 1 Baut Sampel 1	54
Gambar 5.9 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 1 Baut Sampel 2	55
Gambar 5.10 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 3 Baut Sampel 1	55
Gambar 5.11 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 3 Baut Sampel 2	56
Gambar 5.12 Grafik Rekapitulasi P-Delta Pengujian Kuat Tekan Profil	56
Gambar 5.13 Model – Model Struktur pada SAP2000	58

Gambar 5.14 Dimensi Benda Uji Pada SAP2000	58
Gambar 5.15 Dimensi Penampang Benda Uji	59
Gambar 5.16 Hasil Permodelan Awal SAP2000	59
Gambar 5.17 Permodelan Sesuai dengan Pengujian Laboratorium	60
Gambar 5.18 Permodelan Sendi Pada Ujung Batang Tekan Variasi Baut 1, (A) Atas (B) Bawah	60
Gambar 5.19 Automatic Frame Mesh	61
Gambar 5.20 Pembebanan pada Batang Tekan	61
Gambar 5.21 Beban Notional pada Tengah Bentang Batang Tekan	62
Gambar 5.22 Pemodelan kolom tertambat untuk 2nd Order Elastic Analysis mencari Mu.	63
Gambar 5.23 Setting Data Load Cell untuk P-Delta	63
Gambar 5.24 Running pada Batang Tekan Variasi B yang telah didesain	64
Gambar 5.25 Plot Perilaku Batang Tekan Hasil Analisis	64
Gambar 5.26 Fungsi Untuk Plot Perilaku Batang, (A) Horizontal (B) Vertikal...	65
Gambar 5.27 Grafik P-Delta Batang tekan Variasi 1 Baut	65
Gambar 5.28 Grafik P-Delta dengan <i>Trial and Error</i> Nilai $\tau b = 0.9$	66
Gambar 5.29 Grafik P-Delta dengan <i>Trial and Error</i> Nilai $\tau b = 0.8$	66
Gambar 5.30 Grafik P-Delta dengan <i>Trial and Error</i> Nilai $\tau b = 0.7$	67
Gambar 5.31 Grafik P-Delta dengan <i>Trial and Error</i> Nilai $\tau b = 0.6$	67
Gambar 5.32 Grafik P-Delta dengan <i>Trial and Error</i> Nilai $\tau b = 0.5$	68
Gambar 5.33 Cara Menampilkan Tabel P-Delta Hasil Pengujian pada SAP2000	69
Gambar 5.34 Permodelan Sendi Pada Ujung Batang Tekan Variasi 3 Baut, (A) Atas (B) Bawah	71
Gambar 5.35 Grafik Hubungan <i>Trial and Error</i> Jumlah Step dengan Nilai Kuat Tekan	72
Gambar 5.36 Grafik Perbandingan P-Delta Pengujian Laboratorium dengan P- Delta dengan <i>Trial and Error</i> pada Nilai τb	73
Gambar 5.37 Grafik Perbandingan P-Delta Pengujian Laboratorium dengan P- Delta dengan <i>Trial and Error</i> pada Nilai τb	74
Gambar 5.38 Permodelan SAP2000 rangka atap variasi 1 baut	75

Gambar 5.39 Beban notional pada rangka atap variasi 1 baut pada SAP2000	76
Gambar 5.40 Kalibrasi Nilai $EI = 180000$ MPa	77
Gambar 5.41 Releases/Partial Fixity	78
Gambar 5.42 Grouping pada Joint dan Batang Tekan Rangka Atap	78
Gambar 5.43 Section Cut Data Beban Loadcell pada Rangka Atap	79
Gambar 5.44 Bending Moment Diagram Rangka Atap Variasi 1 Baut pada SAP2000	79
Gambar 5.45 Moment P-Delta pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 1 Baut	80
Gambar 5.46 Grafik P-Delta Batang Gagal Tekuk pada Rangka Atap Variasi 1 Baut	81
Gambar 5.47 Permodelan SAP2000 rangka atap variasi 1 baut	83
Gambar 5.48 Beban notional pada rangka atap variasi 1 baut pada SAP2000	84
Gambar 5.49 Kalibrasi Nilai $\tau_b = 0,953$	85
Gambar 5.50 Grouping pada Joint dan Batang Tekan Rangka Atap	86
Gambar 5.51 Section Cut Data Beban Loadcell pada Rangka Atap	86
Gambar 5.52 Bending Moment Diagram Rangka Atap Variasi 3 Baut pada SAP2000	87
Gambar 5.53 Moment P-Delta pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 3 Baut	87
Gambar 5.54 Grafik P-Delta Batang Gagal Tekuk pada Rangka Atap Variasi 3 Baut	88

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Set Up Pengujian Kuat Tarik	98
Lampiran 2. Set Up Pengujian Kuat Geser Baut	98
Lampiran 3. Set Up Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 1 Baut	99
Lampiran 4. Set Up Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 3 Baut	99
Lampiran 5. Grafik Rekapitulasi P-Delta Pengujian Kuat Tekan Profil Pengujian Labiratorium	100



ABSTRAK

Metode ELM memiliki kekurangan pada kecepatan dan ketelitian analisa yang mendekati sifat alami struktur di lapangan, karena metode ini tidak memasukkan faktor ketidaksempurnaan geometri dan reduksi kekakuan selama proses analisis struktur. Pembaruan metode ini memberi keuntungan bagi para perencana karena dapat mengatasi keterbatasan analisa struktur elastik yang tidak dapat mengevaluasi stabilitas. Direct Analysis Method (DAM) merupakan strategi penyederhanaan analisis cara manual memakai program komputer dengan akurasi yang dapat diandalkan. Ekperimen kedua dirancang untuk memperoleh perilaku $P-\delta$ tanpa terjadi efek $P-\Delta$. Setelah didapatkan hasil dari kedua tahap pengujian tersebut, dilakukan analisis DAM menggunakan bantuan program analisis SAP2000 untuk memprediksi kuat tekan profil HSS yang kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium untuk dievaluasi nilai akurasinya. Pada *effective length method* nilai kuat tekan yang dihasilkan untuk batang tekan variasi 1 baut sebesar 6,708 KN sedangkan batang tekan variasi 3 baut sebesar 8,161 KN. Untuk pengujian laboratorium nilai kuat tekan yang dihasilkan untuk batang tekan variasi 1 baut sebesar 7,599 KN sedangkan batang tekan variasi 3 baut sebesar 8,976 KN. Pada *direct analysis method* nilai kuat tekan yang dihasilkan untuk batang tekan variasi 1 baut sebesar 7,484 KN sedangkan batang tekan variasi 3 baut sebesar 8,778 KN. permodelan SAP2000 pada rangka atap variasi 1 baut rangka atap variasi 3 baut terdapat pada kapasitas tekan yang dihasilkan. Pada rangka atap variasi 1 baut memiliki nilai kuat tekan sebesar 5,597 KN sedangkan untuk rangka atap variasi 3 baut memiliki nilai kuat tekan sebesar 7,320 KN. Pengaruh jumlah baut pada permodelan batang tekan maupun rangka atap kedua variasi memiliki perbedaan pada nilai kuat tekan. Karena rangka atap variasi 3 baut lebih mampu menahan momen. Hal ini terjadi karena pada rangka atap variasi 1 baut dimodelkan dengan fitur release partial fixity sehingga permodelan rangka atap variasi 3 baut mampu menahan momen yang lebih besar dibandingkan rangka atap variasi 1 baut.

Kata kunci: *Effective Leght Method, Direct Analysis Method, Kapasitas Tekan*

ABSTRACT

Effective leght method has the disadvantage of speed and accuracy of analysis that is close to the nature of the structure in the field, because this method does not include factors of geometry imperfections and stiffness reduction during the structural analysis process. The update of this method gives an advantage to the planners because it can overcome the limitations of elastic structure analysis that can not evaluate the stability. Direct Analysis Method (DAM) is a strategy of simplifying manual analysis using computer programs with reliable accuracy. The second experiment was designed to elicit $P-\delta$ behavior without $P-\Delta$ effect. After obtaining the results of both stages of the test, DAM analysis using the help of SAP2000 analysis program to predict the compressive strength of the HSS profile which is then compared with the results of laboratory tests to evaluate the accuracy value. In the effective length method, the compressive strength value produced for the 1 bolt variation of 6.708 KN while the 3 bolt variation of 8.161 KN. For laboratory testing the value of compressive strength produced for the variation of 1 bolt Rod is 7.599 KN while the variation of 3 bolt Rod is 8.976 KN. In direct analysys method, the compressive strength value produced for 1 bolt variation of 7.484 KN while the 3 bolt variation of 8.778 KN. SAP2000 modeling on the roof truss Variation 1 bolt roof truss variation 3 bolts contained in the resulting compressive capacity. On the roof truss Variation 1 Bolt has a compressive strength value of 5.597 KN while for the roof truss variation 3 Bolt has a compressive strength value of 7.320 KN. The influence of the number of bolts on the model of the rod and roof truss press both variations have differences in the value of the compressive strength. Because the 3 bolt variation roof truss is better able to withstand the moment. This happens because the roof truss Variation 1 Bolt is modeled with the partial fixity release feature so that the 3 bolt variation roof truss modeling is able to withstand a larger moment than the 1 bolt variation roof truss.

Keywords: Effective Leght Method, Direct Analysis Method, Compressive Capacity

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perencanaan gedung dengan struktur baja harus direncanakan dengan Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung SNI 1729:2020 yang mengacu kepada *American Institute of Steel Construction* (AISC 2010). Dalam SNI 1729:2020, terdapat metode desain yang baru yaitu *Direct Analysis Method* (DAM) yang akan digunakan dalam perencanaan stabilitas struktur. DAM direkomendasikan dalam perencanaan stabilitas struktur baja yang memperhitungkan efek orde kedua dengan bantuan perangkat lunak.

Atas dasar alasan tersebut, juga adanya keinginan mendapatkan kemajuan dalam analisis dan desain, maka SNI 1729:2020 menetapkan *Direct Analysis Method* (DAM) sebagai cara baru perencanaan pada struktur baja yang telah memasukkan prinsip modern dalam analisis stabilitas. Memang untuk itu diperlukan analisis struktur berbasis komputer. Tetapi analisis yang dipilih bukan yang rumit seperti *Advanced Analysis*, cukup yang minimalis, yaitu *Second-Order Elastic Analysis*. Dengan sedikit manipulasi dan strategi perhitungan yang cocok, maka problem stabilitas, yang bersifat nonlinier geometri dan sekaligus nonlinier material, dapat juga diatasi.

Strategi penyelesaian yang digunakan DAM tidak persis sama seperti jenis analisis yang rasional, tetapi yang penting telah dibuktikan dengan cara kalibrasi berdasarkan data eksperimental (AISC 2010) sehingga hasilnya berkorelasi dengan problem real. Itulah DAM yang telah menggantikan cara lama ELM (*Effective Length Method*), suatu prinsip penyelesaian stabilitas standar sejak dipakainya rumus Euler dahulu. Cara lama tersebut (ELM) tidak dibuang tetapi dipindah jadi AISC 2010, dan dapat dipakai sebagai cara alternatif, khususnya jika tidak tersedia program komputer yang sesuai. (Wiryanto, 2014)

Perkembangan pada perencanaan desain untuk stabilitas struktur baja telah berubah dari metode panjang efektif menjadi metode analisis langsung. Meski

demikian metode panjang efektif tetap bisa digunakan para perencana bangunan dalam mendesain bangunan.

Pada metode panjang efektif terdapat kekurangan pada kecepatan dan ketelitian analisa yang mendekati sifat alami struktur di lapangan. Hal ini terjadi dikarenakan metode panjang efektif tidak memasukkan faktor ketidaksempurnaan geometri dan reduksi kekakuan selama proses analisa struktur. Pembaruan kode desain ini memberi dampak keuntungan bagi para perencana karena metode ini dapat mengatasi keterbatasan analisa struktur elastik yang tidak dapat mengevaluasi stabilitas. (Sugawa, 2017)

Metode perencanaan langsung pada batang tekan terkesan efisien karena nilai K cukup ditentukan $K=1$, tetapi efek P -delta pada perilaku struktur harus diperhitungkan. Efek P -delta merupakan beban gravitasi yang memiliki pengaruh terhadap perpindahan horizontal. Ketika beban lateral akibat gempa bekerja pada suatu elemen struktural sehingga menyebabkan simpangan atau *drift* (Δ) yang mengakibatkan timbulnya eksentrisitas beban gravitasi (P) terhadap sumbu vertikal kolom, dari eksentrisitas yang timbul tersebut menghasilkan momen internal tambahan yang dapat mempengaruhi momen hasil analisis orde pertama. *P-Delta Effect* yang terjadi berasal dari 2 sumber, yaitu perpindahan secara global pada batang kolom yang diakibatkan oleh beban lateral atau biasa disebut dengan *P-Large Delta* ($P-\Delta$) dan deformasi lokal yang terjadi dari dalam batang kolom itu sendiri atau biasa disebut dengan *P-Small Delta* ($P-\delta$). (Istiono, 2020)

Analisa stabilitas struktur baja berdasarkan DAM (AISC 2010) sampai saat ini ditulis dianggap sebagai cara perancangan struktur baja sederhana terbaik, dibanding metode perancangan baja sebelumnya, yaitu ELM (AISC 2005). Salah satu alasan adalah telah digunakan *Second Order Elastic Analysis* untuk analisis stabilitas mendapatkan respons struktur terhadap pembebanan pada kondisi batas. Meskipun tidak bisa dipakai untuk melacak secara otomatis keruntuhan struktur (analisis struktur inelastis nonlinier dengan program komputer berbasis 3D-FEM akan berkinerja lebih baik), tetapi jika DAM dapat dipakai untuk melacak setiap tahapan beban secara teliti, akhirnya akan terdeteksi juga besarnya beban *ultimate*. Hasilnya bahkan dapat dibandingkan dengan hasil uji empiris (Dewobroto, 2013)

Pada perencanaan ini peneliti akan membandingkan metode analisis langsung tersebut pada sampel rangka atap baja dengan profil hollow persegi panjang. Perbandingan yang akan ditinjau difokuskan pada nilai Kuat tekan. Adapun variasi dalam penelitian ini yaitu jenis sambungan menggunakan baut tunggal dan baut jamak. Dimana, kedua variasi tersebut memiliki tingkat kekakuan yang berbeda. Sambungan rangka atap dengan baut tunggal secara teori tidak memiliki kekakuan untuk menahan momen, sehingga cocok dengan asumsi *Direct Analysis Method* yang menggunakan nilai $k=1,0$. Adapun sambungan rangka atap dengan baut jamak memiliki kekakuan menahan momen pada sambungan. Hal ini yang perlu diteliti mengenai pengaruh terhadap akurasi *Direct Analysis Method*, mengingat *Direct Analysis Method* hanya mengasumsikan nilai $k=1,0$.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dibahas, maka rumusan masalah dalam studi ini adalah sebagai berikut

1. Bagaimana perbandingan nilai kuat tekan profil baja HSS dengan *effectivce leght method* dan *direct analysis method* terhadap hasil pengujian laboratorium?
2. Bagaimana perbandingan permodelan SAP2000 rangka atap profil HSS terhadap variasi sambungan 1 baut dan variasi sambungan 3 baut menggunakan *Direct Analysis Method*?
3. Bagaimana pengaruh jumlah baut sambungan terhadap prediksi kuat tekan struktur rangka atap baja yang dianalisis menggunakan *Direct Analysis Method*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari adanya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui perbandingan nilai kuat tekan profil baja HSS terhadap *effectivce leght method*, hasil pengujian laboratorium, dan *direct analysis method*.

2. Mengetahui perbandingan permodelan SAP2000 rangka atap profil HSS terhadap variasi sambungan 1 baut dan variasi sambungan 3 baut menggunakan *Direct Analysis Method*.
3. Mengetahui pengaruh jumlah baut sambungan terhadap prediksi kuat tekan struktur rangka atap baja yang dianalisis menggunakan *Direct Analysis Method*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah memberikan informasi perbedaan proses perencanaan *Direct Analysis Method* pada rangka atap baja. Serta sebagai acuan literatur bagi penelitian berikutnya khususnya terhadap stabilitas rangka atap baja berdasarkan standart SNI.

1.5 Batasan Penelitian

Adanya batasan penelitian adalah supaya tujuan penelitian ini dapat tercapai dan membatasi pembahasan agar tetap dalam lingkup permasalahan pada penelitian ini. Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Analisa struktur memakai program SAP2000 dan analisis perhitungan manual menggunakan program aplikasi excel.
2. Perbandingan metode tersebut dilakukan pada benda uji berupa struktur rangka atap.
3. Pengujian yang dilakukan terhadap material benda uji ada 3 yaitu pengujian kuat tekan baja, pengujian kuat tarik baja dan pengujian geser baut.
4. Acuan desain dan spesifikasi rangka atap baja ringan mengacu pada SNI 1729:2020.
5. Beban pada proses pengujian mengacu pada SNI 1729:2020.
6. Desain kekuatan berdasarkan Desain Faktor Kekuatan dan Ketahanan (DFBK).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Raflesia dkk. (2017) melakukan penelitian dengan judul “Studi Perbandingan *Stress Ratio* dengan ELM (*Effective Length Method*) dan DAM (*Direct Analysis Method*) Bangunan Workshop pada Proyek di Cirebon”. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hasil perbandingan nilai *stress ratio* dan untuk mengetahui metode mana yang menghasilkan profil baja yang lebih kecil.

Dalam penelitian ini diaplikasikan pada bangunan 3 dimensi 1 lantai yaitu bangunan workshop pada proyek di Cirebon dengan detail pengujian ialah profil untuk balok kolom dan rafter yang berupa profil IWF. Pada perencanaan metode ELM menggunakan rasio kelangsingan atau K yang didapat dari nomogram setelah perhitungan GA dan GB. Metode ELM dan DAM menggunakan beban notional yang didapat dari 0.002 beban gravitasi yang bekerja. Peneliti memiliki hipotesis jika nilai *stress ratio* pada metode DAM lebih kecil daripada metode ELM dan juga profil baja yang dihasilkan pada perhitungan metode DAM lebih kecil daripada metode ELM.

Dari penelitian tersebut didapatkan hasil berupa nilai *stress ratio* pada profil balok IWF antar kedua metode tersebut sama yaitu sebesar 0,695. Pada kolom nilai *stress ratio* untuk metode DAM sebesar 0,629 sedangkan pada metode ELM sebesar 0,533. Sehingga nilai *stress ratio* pada kolom antar kedua metode tersebut memiliki selisih sebesar 9,60%. Pada rafter nilai *stress ratio* antar kedua metode ini memiliki selisih sebesar 0,90%. Berdasarkan hasil analisis tersebut peneliti menyimpulkan bahwa kedua metode tersebut tidak bisa menyatakan efisiensi dari pemilihan penggunaan profil baja/dimensi dikarenakan selisih nilai *stress ratio* tidak terlalu signifikan.

Kesimpulan dari penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Nilai *stress ratio* balok metode ELM sama dengan metode DAM.
2. Nilai *stress ratio* kolom metode ELM lebih besar daripada metode DAM.

3. Nilai *stress ratio* rafter metode ELM lebih kecil daripada metode DAM.
4. Dikarenakan selisih ratio yang tidak terlalu signifikan, maka penggunaan kedua metode tersebut tidak bisa menyatakan efisiensi dari penggunaan profil baja/dimensi.

Sugawa (2017) melakukan penelitian dengan judul "Evaluasi *Stress Ratio* dengan Metode Panjang Efektif dan Metode Perencanaan Langsung pada Portal Gable". Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil *stress ratio* pada perencanaan Metode Panjang Efektif dan Metode Perencanaan Langsung sehingga dapat dipilih metode yang lebih efektif dan efisien khususnya pada portal gable.

Benda uji portal gable pada penelitian ini menggunakan profil WF 350×157×7×11 dan WF 400×200×8×13. Pada penelitian ini digunakan desain kekuatan berdasarkan Desain Faktor Kekuatan dan Ketahanan (DFBK). Standar desain stabilitas struktur baja yang dulunya dipakai Metode panjang efektif pada SNI 2002 sekarang telah dipindahkan dibagian lampiran SNI 2015 yang mana telah digantikan dengan Metode perencanaan langsung sebagai desain stabilitas yang utama. Metode panjang efektif mengharuskan perencana untuk mencari panjang efektif K untuk elemen bangunan serta analisisnya masih orde pertama untuk faktor amplifikasi efek P -delta. Metode perencanaan langsung mengidentifikasi nilai $K=1$ untuk semua perilaku struktur serta analisa P -delta menggunakan second-orde pada komputer. Pada tulisan ini maka dievaluasi *stress ratio* pada Metode panjang efektif dan Metode perencanaan langsung untuk tipe struktur portal gable kemudian dicari nilai perbandingan *stress ratio* dari kedua metode tersebut.

Hasil penelitian yang dilakukan terhadap Metode panjang efektif dan Metode perencanaan langsung menunjukkan perbedaan yang signifikan di beberapa model. Perbedaan ini terjadi karena beberapa faktor sebagai berikut.

1. Pemodelan portal gable yang dilakukan dengan variasi sudut rafter memberikan variasi tegangan pada struktur. Variasi ini memberikan pembebanan dan stabilitas struktur yang berbeda-beda yang berdampak pada kekuatan dan sifat mekanis struktur pada level elemen.

2. Pada sudut 10 derajat sampai 15 derajat mengalami beban angin hisap. Sudut 25 sampai 45 mengalami angin hisap dan tekan tetapi angin tekan yang dominan menyebabkan tegangan terbesar.
3. Perhitungan stabilitas yang dilakukan dengan cara lama yaitu metode panjang efektif dan cara baru yang direkomendasikan dengan metode perencanaan langsung terdapat perbedaan. Metode perencanaan langsung menggunakan komputer untuk menghitung efek P-delta sehingga bisa lebih cepat dan memberikan ketelitian yang baik karena proses analisa struktur untuk menghitung P-delta dimodelkan kemudian diiterasi secara langsung di SAP2000 sehingga hasil mendekati kondisi real dilapangan.

Ivanfebraja (2015) dengan penelitian yang berjudul “Kajian Stress Ratio Pada *Direct Analysis Method* dan *Effective Length Method* Sesuai Dengan AISC 2010”. AISC sendiri sudah berulang kali merevisi peraturan dalam perencanaan stabilitas. Hal ini tampak pada peraturan AISC 2010 yang telah memindahkan *Effective Length Method* (ELM), sebuah metode yang direkomendasikan dalam SNI 2002, sebagai metode alternatif dalam perencanaan stabilitas struktur dan merekomendasikan *Direct Analysis Method* (DAM) yang telah memperhitungkan efek orde-kedua secara langsung. Maka, pada tulisan ini akan dibandingkan kedua metode tersebut pada portal bidang 4 lantai dimana perbandingan kedua metode difokuskan pada nilai *stress ratio*. Tujuan dari perbandingan ini adalah untuk memberikan gambaran kepada pembaca tentang kedua metode tersebut sehingga dapat dipilih metode yang lebih efektif dan efisien dalam pembangunan ruko yang menggunakan profil baja di kota Medan.

Perbandingan nilai stress ratio dalam perhitungan penelitian ini dilakukan pada struktur 2 dimensi portal 4 lantai *unbraced frame* dengan mutu baja yang dipakai adalah BJ41. Analisa struktur untuk ELM menggunakan metode matriks kekakuan. Pada analisa struktur dengan metode DAM dimasukkan persyaratan yang dikeluarkan oleh AISC 2010, yakni:

1. Memperhitungkan deformasi-deformasi lentur, geser dan aksial dalam semua komponen struktur maupun sambungannya.

2. Memperhitungkan pengaruh Orde ke-2 ($P-\delta$ dan $P-\Delta$). Adapun yang dimaksud $P-\delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat deformasi elemen (diantara dua nodal) dan $P-\Delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat terjadinya perpindahan titik nodal elemen.
3. Memperhitungkan semua beban-beban arah gravitasi dan beban-beban lainnya yang mempengaruhi stabilitas suatu struktur.
4. Untuk design menggunakan LRFD, analisa orde ke-2 harus mengacu kepada kombinasi beban untuk metode LRFD.

Hasil dari penelitian ini disimpulkan bahwa *Direct Analysis Method* (DAM) merupakan metode yang lebih ekonomis dari segi ukuran profil jika dibandingkan dengan *Effective Length Method* (ELM). Hal ini dikarenakan nilai *stress ratio* untuk *Direct Analysis Method* (DAM) lebih kecil daripada *Effective Length Method* (ELM). Perbedaan *stress ratio* untuk kedua metode bervariasi antara 0,5-28%. Meskipun pada kasus portal 4 lantai ini tidak menunjukkan status kolom maupun balok yang berbeda, namun jika dilakukan desain ulang untuk mencapai nilai *stress ratio* mendekati 1, maka ada kemungkinan profil yang dinyatakan aman oleh *Direct Analysis Method* (DAM), dinyatakan tidak aman oleh *Effective Length Method* (ELM) sehingga pada *Effective Length Method* (ELM), perlu diperbesar profilnya. Hal ini berarti bahwa struktur untuk *Effective Length Method* mempunyai penampang yang lebih besar. Maka dari hasil tersebut, didapatkan hasil yang sesuai dengan hipotesa dan referensi-referensi, salah satunya adalah cara DAM menghasilkan kapasitas profil yang lebih tinggi (hemat) dibandingkan rancangan kolom cara ELM. (Wiryanto Dewobroto, 2014)

2.2 Perbedaan dengan Penelitian Sebelumnya

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya yang dipaparkna di atas, terdapat perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan. Ringkasan dari penelitian-penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 2.1 sebagai berikut.

Tabel 2.1 Ringkasan Penelitian-Penelitian Sebelumnya

Peneliti	Ivanfebraja, Daniel Rumbi Teruma (2015)	Eryana Raflesia, Hidayat Mughnie (2017)	Arif Aryadhana Sugawa, Romy Pandalake, Banu Dwi Handono (2017)	Faisal Budiman (2021)
Judul	Studi Eksperimental Rangka Atap Baja Kelangsingan Tinggi yang Dianalisis Menggunakan <i>Direct Analysis Method</i> SNI 1729:2020 dengan Variasi Jumlah Baut Sambungan.	Studi Perbandingan <i>Stress Ratio</i> dengan ELM (<i>Effective Length Method</i>) dan DAM (<i>Direct Analysis Method</i>) Bangunan Workshop pada Proyek di Cirebon	Evaluasi <i>Stress Ratio</i> dengan Metode Panjang Efektif dan Metode Perencanaan Langsung pada Portal Gable	Studi Eksperimental Rangka Atap Baja Kelangsingan Tinggi yang Dianalisis Menggunakan <i>Direct Analysis Method</i> SNI 1729:2020 dengan Variasi Jumlah Baut Sambungan.
Tujuan	Membandingkan hasil pengujian laboratotium terhadap analisis SNI 1729-2020 dalam perencanaan struktur rangka atap baja profil kotak dengan batang tekan kelangsingan tinggi dan pengaruh jumlah baut	Mengetahui hasil perbandingan nilai <i>stress ratio</i> dan untuk mengetahui metode mana yang menghasilkan profil baja yang lebih kecil.	Membandingkan hasil <i>stress ratio</i> pada perencanaan Metode Panjang Efektif dan Metode Perencanaan Langsung sehingga dapat dipilih metode yang lebih efektif dan efisien khususnya pada portal gable.	Membandingkan hasil pengujian laboratotium terhadap analisis SNI 1729-2020 dalam perencanaan struktur rangka atap baja profil kotak dengan batang tekan kelangsingan tinggi dan pengaruh jumlah baut pada sambungan struktur rangka atap baja.

Peneliti	Ivanfebraja, Daniel Rumbi Teruma (2015)	Eryana Raflesia, Hidayat Mughnie (2017)	Arif Aryadhana Sugawa, Romy Pandalake, Banu Dwi Handono (2017)	Faisal Budiman (2021)
	pada sambungan struktur rangka atap baja.			
Parameter	<i>Direct Analysis Method</i> , Ratio kelangsingan tinggi, jumlah baut.	<i>Effective Length Method</i> , <i>Direct Analysis Method</i> , <i>Stress ratio</i> , Efisiensi	Metode panjang efektif, Metode perencanaan langsung, <i>stress ratio</i> , stabilitas.	<i>Direct Analysis Method</i> , Ratio kelangsingan tinggi, jumlah baut.
Metode	Penelitian ini dilakukan dengan eksperimen di laboratorium untuk membandingkan kekuatan rangka baja yang dianalisis dengan <i>Direct Analysis Method</i> (SNI 1729-2020) menggunakan aplikasi SAP2000 terhadap hasil pengujian laboratorium. Sampel uji dalam penelitian ini berupa struktur rangka atap baja hollow dengan kelangsingan (KL/r) batang tekan yang tinggi dengan variasi jumlah baut sambungan. Secara umum, terdapat 5 pengujian dalam penelitian ini, meliputi:	Benda uji penelitian ini adalah rangka bangunan workshop yang meliputi profil balok IWF 200x150x6x9, rafter dan kolom yang menggunakan profil IWF 369x369x7x11. Benda uji tersebut kemudian didesain dan dianalisis menggunakan software SAP2000 dengan metode ELM dan metode DAM. Dalam mendesain benda uji di SAP2000 diberikan beban berupa beban mati, beban hidup, beban angin, dan beban gempa yang kemudian dianalisis dengan kedua metode tersebut.	Pengujian ini dilakukan dengan aplikasi SAP2000 dengan mendesain portal gable. Pada portal gable terdiri dari profil WF 350x175x7x11 untuk kolom dan profil WF 400x200x8x13 untuk rafter dengan menggunakan mutu baja $F_y + 240$ Mpa. Variasi sudut yang diaplikasikan pada rafter portal gable yaitu 10° , 15° , 25° , 35° , dan 45° . Pada analisis dilakukan pembebanan sesuai dengan standar SNI 1727:2013. Untuk metode perencanaan langsung dimasukkan beban reduksi kekuatan serta set P-	Penelitian ini dilakukan dengan eksperimen di laboratorium untuk membandingkan kekuatan rangka baja yang dianalisis dengan <i>Direct Analysis Method</i> (SNI 1729-2020) menggunakan aplikasi SAP2000 terhadap hasil pengujian laboratorium. Sampel uji dalam penelitian ini berupa struktur rangka atap baja hollow dengan kelangsingan (KL/r) batang tekan yang tinggi dengan variasi jumlah baut sambungan. Secara umum, terdapat 5 pengujian dalam penelitian ini, meliputi: pengujian pengujian tarik pelat material, pengujian geser baut, pengujian lentur profil, pengujian tekan profil,

Peneliti	Ivanfebraja, Daniel Rumbi Teruma (2015)	Eryana Raflesia, Hidayat Mughnie (2017)	Arif Aryadhana Sugawa, Romy Pandalake, Banu Dwi Handono (2017)	Faisal Budiman (2021)
	pengujian pengujian tarik pelat material, pengujian geser baut, pengujian lentur profil, pengujian tekan profil, dan pengujian rangka atap baja. Setelah pengujian dilakukan, maka data hasil pengujian dianalisis dan dibandingkan antara hasil analisis dengan metode <i>Direct Analysis Method</i> (SNI 1729-2020) terhadap hasil pengujian laboratorium, sehingga dapat ditarik kesimpulan berupa pengaruh jumlah baut sambungan terhadap nilai akurasi dari <i>Direct Analysis Method</i> menggunakan SNI 2020 dibanding hasil uji laboratorium		Δ sedangkan untuk metode panjang efektif dimasukkan beban mati, beban hidup dan beban angin.	dan pengujian rangka atap baja. Setelah pengujian dilakukan, maka data hasil pengujian dianalisis dan dibandingkan antara hasil analisis dengan metode <i>Direct Analysis Method</i> (SNI 1729-2020) terhadap hasil pengujian laboratorium, sehingga dapat ditarik kesimpulan berupa pengaruh jumlah baut sambungan terhadap nilai akurasi dari <i>Direct Analysis Method</i> menggunakan SNI 2020 dibanding hasil uji laboratorium.
Hasil	<i>Direct Analysis Method</i> (DAM) merupakan metode yang lebih ekonomis dari segi ukuran profil jika	Pada kolom nilai <i>stress ratio</i> untuk metode DAM sebesar 0,629 sedangkan pada metode ELM sebesar 0,533.	Perhitungan stabilitas yang dilakukan dengan cara lama yaitu metode panjang efektif dan cara baru yang	

Peneliti	Ivanfebraja, Daniel Rumbi Teruma (2015)	Eryana Raflesia, Hidayat Mughnie (2017)	Arif Aryadhana Sugawa, Romy Pandalake, Banu Dwi Handono (2017)	Faisal Budiman (2021)
	dibandingkan dengan <i>Effective Length Method</i> (DAM). Hal ini dikarenakan nilai <i>stress ratio</i> untuk <i>Direct Analysis Method</i> (DAM) lebih kecil daripada <i>Effective Length Method</i> (ELM). Perbedaan <i>stress ratio</i> untuk kedua metode bervariasi antara 0,5-28%. Meskipun pada kasus portal 4 lantai ini tidak menunjukkan status kolom maupun balok yang berbeda, namun jika dilakukan desain ulang untuk mencapai nilai <i>stress ratio</i> mendekati 1, maka ada kemungkinan profil yang dinyatakan aman oleh <i>Direct Analysis Method</i> .	Sehingga nilai <i>stress ratio</i> pada kolom antar kedua metode tersebut memiliki selisih sebesar 9,60%. Pada rafter nilai <i>stress ratio</i> antar kedua metode ini memiliki selisih sebesar 0,90%. Berdasarkan hasil analisis tersebut peneliti menyimpulkan bahwa kedua metode tersebut tidak bisa menyatakan efisiensi dari pemilihan penggunaan profil baja/dimensi dikarenakan selisih nilai <i>stress ratio</i> tidak terlalu signifikan.	direkomendasikan dengan metode perencanaan langsung terdapat perbedaan. Metode perencanaan langsung menggunakan komputer untuk menghitung efek P-delta sehingga bisa lebih cepat dan memberikan ketelitian yang baik karena proses analisa struktur untuk menghitung P-delta dimodelkan kemudian diiterasi secara langsung di SAP2000 sehingga hasil mendekati kondisi real dilapangan.	

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Struktur Rangka

Struktur rangka adalah bagian bangunan yang menahan dan mengalirkan beban-beban dari atap. Struktur atap terbagi menjadi rangka atap dan penopang rangka atap. Berdasarkan posisi ini maka muncul istilah gording, kasau dan reng.

Prinsip dari sistem struktur rangka adalah sebagai berikut:

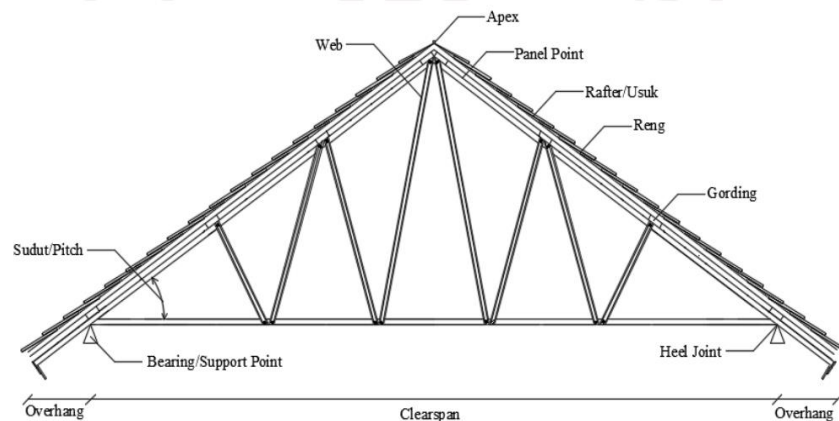
1. Rangka selalu membentuk segitiga atau kombinasi segitiga
2. Batang dianggap lurus dan hanya menerima beban aksial berupa gaya tarik atau gaya tekan, yang merupakan gaya batang yang bekerja sepanjang sumbu.
3. Joint merupakan penghubung antar tiap batang yang dianggap sebagai sendi, sehingga tidak ada momen yang terjadi pada joint.
4. Beban hanya bekerja pada joint.

Didalam menerima beban aksial struktur rangka memiliki 2 jenis batang yaitu batang tarik dan batang tekan.

3.1.1 Rangka atap

Rangka atap berfungsi menahan beban dari bagian penutup atap sehingga umumnya berupa susunan baja atau kayu secara vertikal dan horizontal. Pada struktur rangka atap dikenal istilah pengaruh eksentrisitas yang berarti suatu kondisi dimana sambungan tiap batang saling over-lapping, sehingga sumbunya tidak segaris (Dewobroto 2006). Eksentrisitas dapat menimbulkan momen sebidang yang mengakibatkan batang baut mengalami gaya geser, sedangkan tepi lubang pelat akan mengalami gaya tekan akibat adanya kontak tumpu dari batang baut.

Pada umumnya komponen penyusun rangka atap terdiri dari 3 bagian utama yaitu penutup atap. Gording, dan rangka kuda-kuda. Komponen rangka atap juga terdiri dari elemen lain yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 sebagai berikut



Gambar 3.1 Komponen Penyusun Rangka Atap

(sumber: Hidayat, 2017)

3.2 Baja

Baja adalah logam murni dengan unsur paduan Ferro (Besi) dan sedikit zat arang(C), Silisium (Si), Mangan (Mn), Phospor (P), Belerang (S), dan lain-lain. Baja mempunyai keteguhan yang keras dan ke-liatannya, titik lelehnya 1460°C - 1520°C , berat jenis 7,85 dan angka pemuaianya sampai 0,000012 tiap 1°C (Daryanto, 1998). Beberapa kelebihan dari baja adalah sebagai berikut :

1. Mempunyai kekuatan yang cukup tinggi
2. Ukuran batang yang cukup kecil jika dibandingkan dengan konstruksi yang lain
3. Sangat baik digunakan untuk bentang yang panjang
4. Dapat dibongkar dengan cepat serta ringan
5. Pengangkutan elemen struktur mudah dikerjakan.

Selain memiliki kelebihan, baja juga memiliki beberapa kekurangan sebagai berikut :

1. Ukuran penampang yang kecil, sehingga angka kelangsingan besar dan mengakibatkan bahaya tekuk
2. Kurang tahan terhadap suhu tinggi
3. Memerlukan pemeliharaan yang tetap, yang membutuhkan biaya yang tidak sedikit.

3.2.1 Sifat mekanik baja

Sifat mekanik baja adalah kemampuan baja dalam memikul dan memberikan perlawanan apabila diberikan beban. Baja memiliki kekuatan tinggi pada kekuatan tarik sehingga sifat mekanik baja dapat diperoleh dengan melakukan uji tarik. Dari pengujian tarik pada akan diperoleh tegangan dan regangan yang dapat dihitung dengan rumus.

Tegangan adalah besarnya gaya yang bekerja tiap satu satuan luas penampang. Tegangan dapat diperoleh dengan menggunakan Persamaan 3.1.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

Keterangan

σ = Tegangan (MPa)

P = Beban/Gaya aksial (N)

A = Luas penampang (mm²)

Regangan adalah perubahan pada ukuran benda karena gaya dalam keseimbangan dibandingkan dengan ukuran semula. Regangan dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} = \frac{L - L_o}{L_o} \quad (3.2)$$

Keterangan:

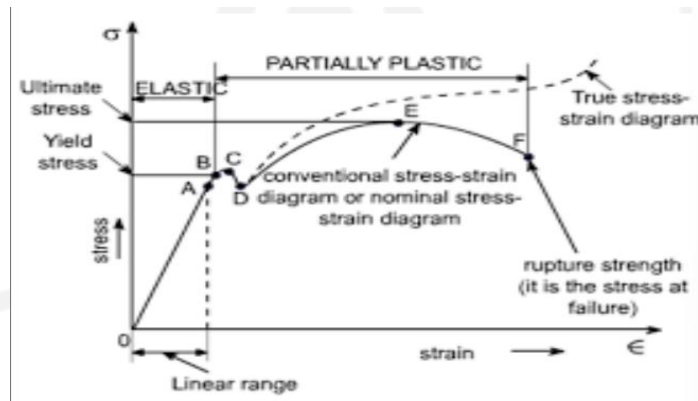
ε = regangan

ΔL = Pertambahan panjang

L = Panjang akhir (mm)

L_o = Panjang awal (mm)

Hubungan antara tegangan dan regangan terdapat pada diagram tegangan dan regangan. Diagram ini memberikan informasi mengenai karakteristik dan jenis perilaku dari suatu bahan. Diagram hubungan tegangan dan regangan ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Hubungan Tegangan dan Regangan
(sumber: Joshi, 2018)

Berdasarkan diagram di atas hubungan tegangan dan regangan dimulai dari titik 0 membentuk garis lurus menuju titik A. garis ini disebut daerah proporsional yaitu daerah dimana penambahan tegangan akan diikuti dengan penambahan regangan secara proporsional dan linier. Pada titik A adalah limit proporsional dimana terjadi tegangan maksimum dan tidak terjadi perubahan bentuk ketika diberikan beban. Pada titik A juga merupakan batas elastis, sehingga daerah OA merupakan daerah elastis yang berarti daerah dimana baja akan kembali ke bentuk semula bila tegangan dihilangkan. Jika tegangan yang diberikan ke beban terus meningkat hingga melewati batas elastis maka regangan mulai meningkat secara lebih cepat untuk setiap pertambahan tegangan dan bahan tidak akan kembali ke bentuk semula. Titik A adalah batas dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Kemudian kurva akan mengalami kemiringan yang berangsur-angsur semakin kecil sampai pada titik B.

Mulai dari titik B hingga titik C kurva membentuk garis horisontal yang cukup panjang. Garis yang membentuk pola horisontal menunjukkan bahwa pada daerah ini terjadi regangan yang cukup panjang dan tidak ada penambahan gaya tarik. Pada titik B merupakan titik luluh, sehingga daerah BC merupakan daerah luluh atau plastis sempurna yang berarti daerah dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Tegangan yang menyebabkan baja menjadi luluh adalah tegangan luluh (yield stress).

Setelah mengalami regangan yang cukup panjang pada daerah BC, baja mulai mengalami pengerasan regang (strain hardening). Pada daerah ini membutuhkan peningkatan beban tarik, sehingga akan membentuk kurva dengan kemiringan positif mulai dari titik C hingga mencapai titik maksimum di titik D. Pada titik D merupakan tegangan ultimit yaitu tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh baja. Setelah baja mencapai titik ultimate, maka tegangan akan terus berkurang dan terjadi proses necking atau penciutan sampai akhirnya terjadi putus/patah (fracture) pada titik E.

3.3 Direct Analysis Method

Perencanaan struktur baja yang umumnya langsing, memerlukan analisis stabilitas. Hasilnya dipengaruhi adanya imperfection (non-linier geometri) dan kondisi inelastis (non-linier material). Oleh sebab non-linier, analisisnya dikerjakan secara incremental dan iterasi. Sekarang ini dukungan teknologi komputer canggih tetapi terjangkau menyebabkan cara analisis non-linier bukan kendala. Berbagai jenis analisis berbasis komputer berkembang mulai analisis tekuk elastis, analisis elastis orde-2, analisis plastis, analisis elastis-plastis, dan analisis inelastis orde-2, yang disebut juga Advance Analysis. Umumnya jenis analisis seperti itu sudah tersedia sebagai opsi pada program analisa struktur modern.

Semakin canggih jenis analisisnya ternyata semakin banyak data yang dilibatkan, sehingga diperlukan pemahaman atau kompetensi tertentu agar hasilnya dapat dipakai secara efektif. Jika dipilih Advance Analysis maka hasilnya tentu mencukupi untuk analisis stabilitas. Tetapi jika dipakai untuk pekerjaan perencanaan struktur baja secara rutin (bukan riset), tentunya berlebihan dan tidak praktis. Maklum, pekerjaan perencanaan adalah termasuk bisnis, yang tentunya juga memegang prinsip : sedikit bekerja tetapi keuntungan adalah sebanyak-banyaknya. Pemikiran seperti itu tentu menjadi pertimbangan.

Menurut Wiryanto (2015), Direct Analysis Method (DAM) dibuat untuk mengatasi keterbatasan Effective Length Method (ELM) yang merupakan strategi penyederhanaan analisis cara manual. Akurasi DAM dapat diandalkan karena

memakai komputer, dan mensyaratkan program analisis struktur yang dipakai, seperti :

1. Dapat memperhitungkan deformasi komponen-komponen struktur dan sambungannya yang mempengaruhi deformasi struktur keseluruhan. Deformasi komponen yang dimaksud berupa deformasi akibat lentur, aksial dan geser. Persyaratan ini cukup mudah, hampir sebagian besar program komputer analisa struktur berbasis metoda matrik kekakuan, apalagi 'metoda elemen hingga' yang merupakan algoritma dasar analisa struktur berbasis komputer sudah memasukkan pengaruh deformasi pada elemen formulasinya (Dewobroto 2013).
2. Pengaruh *orde ke- 2* ($P\Delta$ & $P-\delta$) perlu diperhitungkan dalam mencari gaya-gaya internal batang. Umumnya program komersil bisa melakukan analisa struktur orde ke-2, meskipun kadangkala hasilnya bisa berbeda satu dengan lainnya. Oleh sebab itu perlu verifikasi terhadap kemampuan program yang dipakai. Ketidak-sempurnaan terjadi ketika program ternyata hanya mampu memperhitungkan pengaruh $P-\Delta$ saja, tetapi tidak $P-\delta$. Adapun yang dimaksud $P-\Delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat terjadinya perpindahan titik-titik nodal elemen, sedangkan $P-\delta$ adalah pengaruh pembebanan akibat deformasi di elemen (diantara dua titik nodal), seperti terlihat pada Gambar 3.3 di bawah.



Gambar 3.3 Pengaruh Orde ke-2
(sumber: AISC 2010)

3.3.1 Pengaruh cacat bawaan (*Initial Imperfection*)

Perhitungan stabilitas struktur modern didasarkan anggapan bahwa perhitungan gaya-gaya batang diperoleh dari analisa struktur elastis orde-2, yang memenuhi kondisi keseimbangan setelah pembebanan, yaitu setelah deformasi. Ketidak-sempurnaan atau cacat dari elemen struktur, seperti ketidak-lurusan batang akibat proses fabrikasi atau konsekuensi adanya toleransi pelaksanaan lapangan, akan menghasilkan apa yang disebut efek destabilizing. Beban notional merupakan beban lateral yang diberikan pada titik nodal di semua level, berdasarkan prosentasi beban vertikal yang bekerja di level tersebut, dan diberikan pada sistem struktur penahan beban gravitasi melalui rangka atau kolom vertikal, atau dinding, sebagai simulasi pengaruh adanya cacat bawaan (*initial imperfection*).

Beban notional harus ditambahkan bersama-sama beban lateral lain, juga pada semua kombinasi, kecuali kasus tertentu yang memenuhi kriteria pada Section 2.2b(4) (AISC 2010). Besarnya beban notional yang didapatkan dari AISC 2010 adalah

$$N_i = 0.002 Y_i \quad (3.3)$$

Keterangan:

N_i = beban notional di level i

Y_i = beban gravitasi di level i hasil beban kombinasi LRFD

Jadi penempatan notional load diatur sedemikian rupa agar jangan sampai hasil akhir kombinasinya akan lebih ringan. Bukankah notional load adalah untuk memodelkan ketidaksempurnaan.

3.3.2 Penyesuaian Kekakuan

Adanya leleh setempat (partial yielding) akibat tegangan sisa pada profil baja (hot rolled atau welded) akan menyebabkan pelemahan kekuatan saat mendekati kondisi batasnya. Kondisi tersebut pada akhirnya menghasilkan efek destabilizing seperti yang terjadi akibat adanya geometry imperfection. Kondisi tersebut pada Direct Analysis Method (DAM) akan diatasi dengan penyesuaian kekakuan struktur, yaitu memberikan faktor reduksi kekakuan. Nilainya diperoleh dengan cara kalibrasi dengan membandingkan dengan analisa distribusi plastisitas maupun hasil uji tes empiris (Galambos 1998).

Rumus modulus elastisitas setelah disesuaikan faktor reduksi kekakuan :

$$EI^* = 0.8 \tau_b EI \quad (3.4)$$

Keterangan:

τ_b = Kekakuan lentur

EI^* = Modulus elastisitas setelah reduksi

EI = modulus elastisitas

Faktor τ_b mirip dengan reduksi kekakuan inelastis kolom akibat hilangnya kekakuan batang.

Jika gaya tekannya besar, $P_r > 0.5 P_y$ maka persamaan yang digunakan adalah:

$$\tau_b = 4 \frac{P_r}{P_y} \left(1 - \frac{P_r}{P_y}\right) \quad (3.5)$$

Keterangan:

P_r = Gaya tekan hasil perlu kombinasi LRFD

P_y = Kuat tekuk lentur

Pemakaian reduksi kekakuan hanya berlaku untuk memperhitungkan kondisi batas kekuatan dan stabilitas struktur baja, dan tidak digunakan pada perhitungan drift (pergeseran), lendutan, vibrasi dan penentuan periode getar.

3.3.3 Kuat nominal penampang

Jika digunakan analisis stabilitas struktur cara DAM, maka untuk perhitungan kuat struktur nominalnya cukup memakai prosedur biasa seperti yang digunakan pada cara ELM, yaitu nilai faktor K pada kelangsingan batang (KL/r) diambil konstan sebesar $K=1$.

Tekuk global ditentukan oleh kelangsingan elemen penampang dan bentuknya. Adapun tekuk global atau lokal tergantung klasifikasi penampang, jika penampangnya tidak langsing maka tidak terjadi tekuk lokal, dan sebaliknya penampang langsing berisiko tekuk lokal terlebih dahulu.

Seperti yang dijelaskan pada sub bab 3.3 tentang *Direct Analysis Method*, dimana, terdapat pengaruh orde ke-2 (Gambar 3.3) pada batang tekan akan menghasilkan gaya tekan dan *bending moment* akibat gaya yang bekerja pada batang antara 2 nodal yang berubah bentuk. Oleh karena itu, diperlukan interaksi lentur dan gaya tekan pada komponen struktur simetris ganda dan komponen simetris tunggal yang melentur terhadap sumbu geometris (h dan/atau y) yang harus dibatasi oleh persamaan 3.6 dan persamaan 3.7 yang didapat menurut SNI 1729-2020 pada sub bab Komponen Struktur Simetris Ganda dan Tunggal yang Memikul Lentur dan Gaya Aksial, sebagai berikut:

$$\text{apabila } \frac{Pr}{P_c} \geq 0,2$$

$$\frac{Pr}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mr_x}{M_{cx}} + \frac{Mr_y}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (3.6)$$

$$\text{apabila } \frac{Pr}{P_c} \leq 0,2$$

$$\frac{Pr}{P_c} + \left(\frac{Mr_x}{M_{cx}} + \frac{Mr_y}{M_{cy}} \right) \leq 1,0 \quad (3.7)$$

Keterangan:

Pr = Kekuatan aksial perlu

P_c = Kekuatan aksial tersedia

Mr = Kekuatan lentur perlu

M_c = Kekuatan lentur tersedia

x = Indeks sehubungan dengan lentur sumbu mayor

y = Indeks sehubungan dengan lentur sumbu minor

3.4 Batang Tekan

Batang tekan ditujukan untuk komponen struktur yang memikul beban tekan sentris tepat pada titik berat penampang, atau kolom dengan gaya aksial saja. Ini tentu anggapan ideal, karena umumnya pastilah terdapat eksentrisitas, oleh ketidak-lurusan batang, atau oleh ketidak-tepatan pembebanan, juga kekangan dari tumpuannya yang menimbulkan momen. Tetapi jika momen relatif kecil sehingga dapat diabaikan, maka prosedur desain berikut dapat digunakan. Umumnya batang tekan ditempatkan pada konfigurasi geometri berbentuk pola segitiga, agar tetap stabil. Jenis struktur yang secara keseluruhan tersusun dalam pola segitiga disebut *truss* atau rangka batang.

Batang tekan didefinisikan sebagai batang struktural yang menerima gaya tekan aksial. Pada struktur gedung, batang tekan sering dijumpai sebagai kolom,

sedangkan pada struktur rangka batang dapat berupa batang tepi, batang diagonal, batang vertikal dan batang-batang pengekang (*bracing*). (Padosbajayo, 1992)

Masalah yang paling penting diperhatikan dalam perencanaan batang tekan adalah masalah stabilitas, karena elemen struktur tekan sangat peka terhadap faktor-faktor yang dapat menimbulkan peralihan lateral atau tekuk. Dalam praktek, tekuk diartikan sebagai batas antara lendutan stabil dan tak stabil pada suatu batang tekan. (Salmon Johnson, 1992)

Keruntuhan batang tekan dapat diklasifikasikan menjadi 2 kategori, yaitu :

1. Keruntuhan yang diakibatkan tegangan lelehnya terlampaui. Hal semacam ini terjadi pada batang tekan yang pendek (*stocky column*) dan penampangnya kompak. Penampang kompak adalah penampang yang mempunyai rasio kelangsingan atau rasio lebar terhadap tebal (*bit*) kecil sehingga penampang tersebut tidak mengalami tekuk setempat (*local buckling*).
2. Keruntuhan akibat tekuk (*buckling*). Hal semacam ini terjadi pada batang tekan yang langsing (*slender column*). Kegagalan tekuk dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu tekuk lokal dan tekuk total (*overall buckling*); Tekuk total (*overall buckling*), batang tekan mengalami tekuk total bila penampang batang kompak dan langsing (KL/r besar). Tekuk lokal (*local buckling*), batang yang mengalami tekuk lokal memiliki penampang yang tidak kompak dan elemen penampangnya langsing (rasio *bit* besar). (Kusuma, 1983).

3.4.1 Kelangsingan

Batang tekan pendek tidak mengalami tekuk, jika dibebani aksial tekan tanpa eksentrisitas, tegangan bertambah dan dapat mencapai kondisi leleh. Perilakunya seperti batang tarik, kekuatannya tergantung luas penampangnya, tetapi bentuk tidak berpengaruh. Beda dengan batang tekan langsing, jika dibebani dengan beban yang sama, sebelum leleh bisa terjadi tekuk, yaitu adanya perpindahan lateral, seperti efek lentur balok, yang besar pada kondisi konstan.

Kelangsingan suatu kolom dapat dinyatakan dalam suatu rasio yang disebut rasio kelangsingan. Rasio kelangsingan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\lambda = \sqrt{\frac{KL}{r}} \quad (3.8)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3.9)$$

Keterangan:

λ = rasio kelangsingan

K = faktor panjang efektif komponen struktur tekan;

L = panjang struktur tekan yang tidak ditopang;

r = jari-jari putaran (radius of gyration) potongan lintang komponen struktur tekan.

I = momen inersia penampang struktur tekan;

A = luas penampang struktur tekan.

Harga KL/r dibatasi pada 200 untuk elemen struktur tekan. Harga KL/r yang memisahkan tekuk elastis (perilaku kolom panjang) dari tekuk inelastis (perilaku kolom pendek) ditentukan secara sembarang sebagai harga dimana tegangan tekuk Euler (f_e) sama dengan $F_y / 2$. Harga KL/r ini disebut C_c dapat dilihat pada gambar 3.2 ditentukan sebagai berikut:

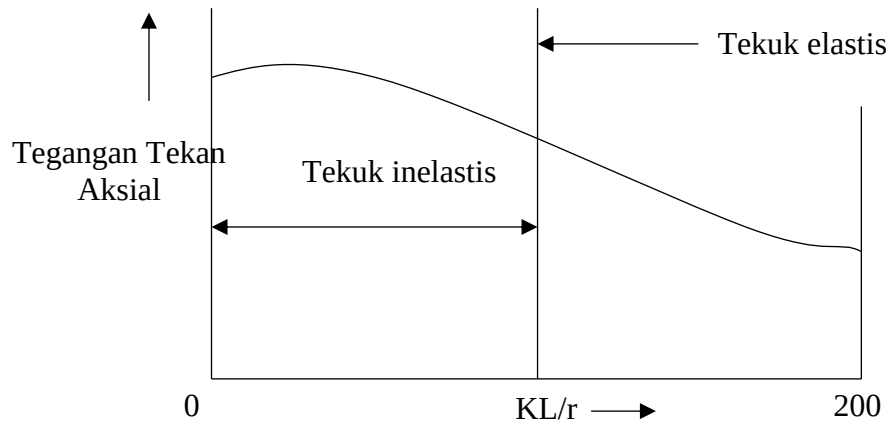
$$C_c = \sqrt{\frac{KL}{r}} = \sqrt{\frac{2\pi r^2}{F_y}} \quad (3.10)$$

Keterangan:

C_c = batas tekuk elastis;

E = modulus elastisitas;

F_y = tegangan leleh.



Gambar 3.4 Kurva Tegangan Tekan Aksial dengan Nilai KL/r

3.4.2 Keruntuhan akibat tegangan leleh terlampaui

Batang tekan yang pendek dan mempunyai rasio kelangsingan atau rasio lebar terhadap tebal (b/t) kecil dapat dibebani sampai bahan meleleh atau bahkan mungkin hingga mencapai daerah pengerasan regangan (Strain Hardening). Pada kondisi ini tegangan kritis (F_{cr}) lebih besar dari tegangan leleh (F_y), sehingga tegangan tegangan kritis (F_{cr}) yang digunakan sama dengan tegangan leleh (F_y). Pada umumnya keruntuhan akibat tegangan leleh terlampaui dijumpai pada jenis batang dengan karakteristik tersebut.

Menurut Charles G. Salmon dan Johnson (1992) salah satu faktor yang berpengaruh pada kegagalan ini adalah luas penampang dari batang tekan tersebut. Semakin besar luas penampang melintang batang maka kapasitas tekannya akan semakin meningkat, sehingga risiko untuk keruntuhan ini dapat diminimalisir dan sebaliknya. Berdasarkan SNI 1729-2015 nilai kuat tekan dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_n = F_{cr} \times A_g \quad (3.11)$$

Keterangan:

P_n = Kuat tekan

F_{cr} = Tegangan aksial kritis

A_g = luas penampang gross

3.4.3 Klasifikasi penampang dan tekuk

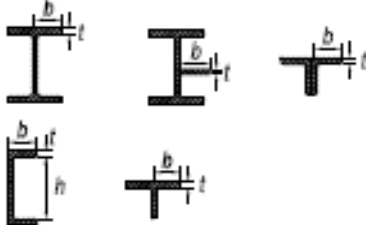
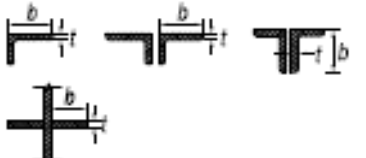
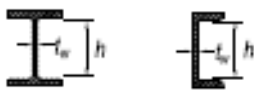
Perilaku tekuk dibedakan menjadi 2, yaitu tekuk lokal dan tekuk global. Hal tersebut dibedakan berdasarkan tempat terjadinya tekuk dan solusi penyelesaian jika tekuk tersebut terjadi pada batang tekan.

Penyelesaian masalah tekuk lokal lebih kompleks dibanding tekuk global, yang terakhir ini sudah dirumuskan oleh Euler (1757), dan menjadi pengetahuan dasar perancangan kolom untuk berbagai design-code di dunia. Jika terjadi tekuk lokal, selain penyelesaiannya tidak sederhana, maka pemakaian penampangnya akan tidak efisien karena terjadi pada kondisi beban elastis (belum leleh).

Agar strukturnya optimal, maka risiko tekuk lokal harus dihindari. Untuk itu dibuat klasifikasi untuk memisahkan penampang tidak langsing dan langsing. itu dilakukan dengan cara mengevaluasi rasio lebar-tebal (b/t) tiap-tiap elemen dari penampang. Elemen-elemen dipilah berdasarkan kondisi kekangannya, apakah ke dua sisinya tersambung kepada elemen lain; atau masih ada sisi bebas. Nilai b/t setiap elemen profil penampang selanjutnya dibandingkan dengan nilai batas rasio b/t dari Tabel 3.1.

Masing-masing elemen penampang perlu ditinjau, jika semua elemen tidak melebihi nilai batas rasio b/t di Tabel 3.1, maka penampang diklasifikasikan sebagai penampang tidak langsing (ideal) dan sebaliknya sebagai penampang langsing.

Tabel 3.1 Klasifikasi Elemen Pada Batang Tekan Aksial

Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio λ , (nonslender/slender)	Examples
Unstiffened Elements	1 Flanges of rolled I-shaped sections, plates projecting from rolled I-shaped sections; outstanding legs of pairs of angles connected with continuous contact, flanges of channels, and flanges of tees	b/t	$0.56 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	2 Flanges of built-up I-shaped sections and plates or angle legs projecting from built-up I-shaped sections	b/t	$0.64 \sqrt{\frac{k_c E}{F_y}}$ [a]	
	3 Legs of single angles, legs of double angles with separators, and all other unstiffened elements	b/t	$0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	4 Stems of tees	d/t	$0.75 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
Stiffened Elements	5 Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	h/t_w	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	6 Walls of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	7 Flange cover plates and diaphragm plates between lines of fasteners or welds	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	8 All other stiffened elements	b/t	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	
	9 Round HSS	D/t	$0.11 \frac{E}{F_y}$	

(Sumber: AISC 2010)

Tabel 3.1 mengklasifikasikan profil penampang batang sebagai tidak langsing atau langsing. Struktur efisien jika penampangnya tidak langsing, karena tidak ada risiko tekuk lokal. Penyelesaian AISC (2010) untuk batang tekan dengan klasifikasi langsing, juga sekedar memberikan faktor reduksi, sehingga beban kritis terhadap tekuk lokal tidak tercapai terlebih dahulu. Jadi pada dasarnya strategi perencanaan batang tekan AISC (2010) adalah didasarkan pada tekuk global.

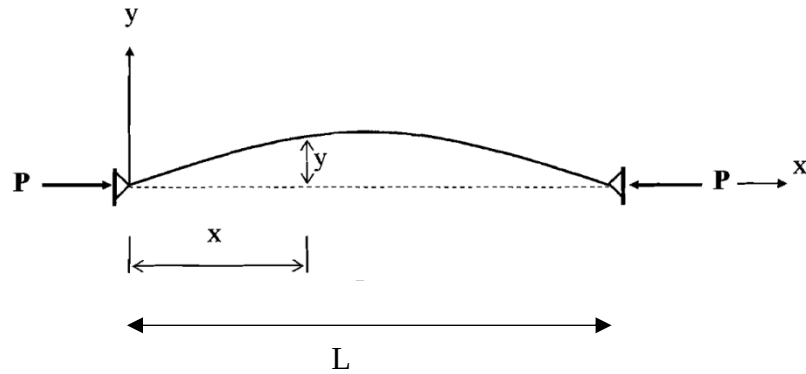
Pada keruntuhan akibat tekuk global dapat terjadi dalam keadaan elastis maupun inelastis.

1. Tekuk Elastis

Tekuk elastis terjadi pada kolom langsing. Kolom langsing adalah kolom yang memiliki kelangsingan lebih besar dari kelangsingan batas. Pada keruntuhan akibat tekuk elastis, tegangan yang terjadi pada seluruh penampang masih dalam keadaan elastis, sehingga biasa disebut tekuk elastis.(Padosbaajayo,1992).

Menurut persamaan Euler yang dikemukakan oleh Salmon dan Johnson (1992), Beban kritis batang tekan diturunkan dari persamaan sebuah batang lurus yang semua seratnya tetap elastis sehingga batang tersebut tidak mampu lagi menahan penambahan beban, batang tersebut memiliki dukungan sederhana pada ujung-ujungnya dan diberi gaya aksial tekan sentries.

Kuat tekan kolom langsing dijabarkan secara matematis oleh Euler. Pada sebuah batang lurus yang ujung-ujungnya sendi dikerjakan gaya tekan P , akibatnya batang akan melengkung seperti pada gambar berikut.



Gambar 3.5 Batang Tertekan
(Sumber: Salmon, Et Al 2009)

Di suatu titik sejarak x , Momen lentur M_x (terhadap sumbu x) pada batang yang sedikit melengkung (batang tertekan) adalah

$$M_x = P \times Y \quad (3.12)$$

Dalam keadaan kolom elastis dan deformasi yang terjadi kecil, hubungan momen (M), kelengkungan dan factor kekakuan (EI) adalah

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{Mx}{EI} \quad (3.13)$$

Persamaan differensialnya menjadi

$$\frac{d^2y}{dz^2} + \frac{P}{EI}y = 0 \quad (3.14)$$

Penyelesaian persamaan menghasilkan beban tekuk Euler (Euler buckling load), yaitu

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3.15)$$

Bila persamaan (3.15) dibagi dengan luas penampang batang A, maka

$$Fe = \frac{\pi^2 EI}{AKL^2} \quad (3.16)$$

Dimana I adalah inersia bahan, $I = A i$ atau $i = \sqrt{I/A}$, maka diperoleh tegangan tekan kritis Euler seperti terlihat pada Persamaan (3.17) berikut ini:

$$Fe = \frac{\pi^2 E}{KL/r^2} \quad (3.17)$$

Keterangan:

E = modulus elastisitas baja,
r = jari-jari inersia minimum
L = panjang tekuk.

Berdasarkan persamaan di atas terlihat bahwa kekuatan batang tekan berbanding terbalik dengan kuadrat kelangsingan (KL/r). Semakin besar kelangsingan elemen tekan tegangan kritisnya akan semakin kecil, sehingga beban yang dapat mengakibatkan elemen tekan mengalami tekuk semakin kecil.

2. Tekuk Inelastis

Dalam struktur kolom biasanya mengalami tekuk dalam keadaan sebagian penampangnya elastis sebagian lagi tidak elastis, tekuk batang pada keadaan ini dinamakan tekuk tidak elastis (*inelastic buckling*). Banyak teori tekuk inelastis, salah satu diantaranya adalah Tangen modulus theory yang dikemukakan oleh Engesser (Salmon dan Johnson, 1992). Berdasarkan teori ini tegangan kritis kolom dinyatakan dengan persamaan berikut.

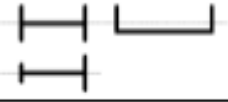
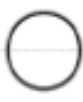
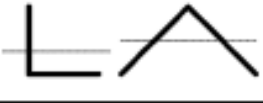
$$Fcr = \frac{\pi^2 Et}{KL/r^2} \quad (3.18)$$

dengan E_t adalah modulus tangent yang nilainya berubah-ubah dan lebih kecil dari modulus elastis. Karena $E_t < E$ maka tegangan kritis yang diperoleh berdasarkan persamaan tersebut selalu lebih kecil dibanding persamaan yang lain menginformasikan tegangan kritis batang tekan berbanding terbalik dengan kuadrat kelangsingan, semakin langsing suatu batang tegangan kritisnya semakin kecil. Pada persamaan di atas berlaku untuk batang tekan yang elemen-elemen penampangannya tidak mengalami tekuk lokal.

3.5 Kuat Lentur Profil Persegi Panjang

Berdasarkan bentuk dan klasifikasi penampang kolom, perilaku lentur dapat dilihat pada tabel (F1.1) melalui SNI 1729-2020 guna mendapatkan ketentuan dalam penggunaan rumus, sebagai berikut:

Tabel 3.2 Kondisi Batas Terhadap Klasifikasi Penampang

Pasal dalam Bab F	Penampang Melintang	Kelangsingan Sayap	Kelangsingan Badan	Keadaan Batas
F2		C	C	Y, LTB
F3		NC, S	C	LTB, FLB
F4		C, NC, S	C, NC	CFY, LTB, FLB, TFY
F5		C, NC, S	S	CFY, LTB, FLB, TFY
F6		C, NC, S	N/A	Y, FLB
F7		C, NC, S	C, NC, S	Y, FLB, WLB, LTB
F8		N/A	N/A	Y, LB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, FLB, WLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Bentuk Tidak-Simetris, selain siku tunggal	N/A	N/A	Semua keadaan batas

Y = leleh, CFY = leleh sayap tekan, LTB = tekuk torsi-lateral, FLB = tekuk lokal sayap, WLB = tekuk lokal badan, TFY = leleh sayap tarik, LLB = tekuk lokal kaki, LB = tekuk lokal, C = kompak, NC = nonkompak, S = langsing, N/A = tidak berlaku

Berdasarkan bentuk dan klasifikasi penampang menggunakan profil persegi panjang SNI 1729-2020, didapatkan penjelasan bahwasannya kekuatan lentur nominal, M_n , harus nilai terendah yang diperoleh sesuai dengan keadaan batas leleh (momen plastis), tekuk lokal badan dan tekuk torsi lateral akibat lentur murni, yang kemudian disajikan kembali melalui persamaan:

1. Leleh

$$M_n = M_p = F_y Z \quad (3.19)$$

Keterangan:

Z = Modulus penampang plastis terhadap sumbu lentur

2. Tekuk torsi lateral

a. Apabila $L_b \leq L_p$, keadaan batas tekuk torsi lateral tidak berlaku

b. Apabila $L_p < L_b \leq L_r$, maka

$$M_n = C_b (M_p - (M_p - 0,7F_y S_x) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right)) \leq M_p \quad (3.20)$$

c. Apabila $L_b > L_r$, maka

$$M_n = 2EC_b \frac{\sqrt{JAg}}{L_b/ry} \leq M_p \quad (3.21)$$

Keterangan

A_g = Luas penampang melintang bruto komponen struktur

L_p = Batas panjang tak terbreis secara lateran untuk keadaan batas leleh, dimana:

$$L_p = 0,133E_r y \frac{\sqrt{JAg}}{M_p} \quad (3.22)$$

dengan;

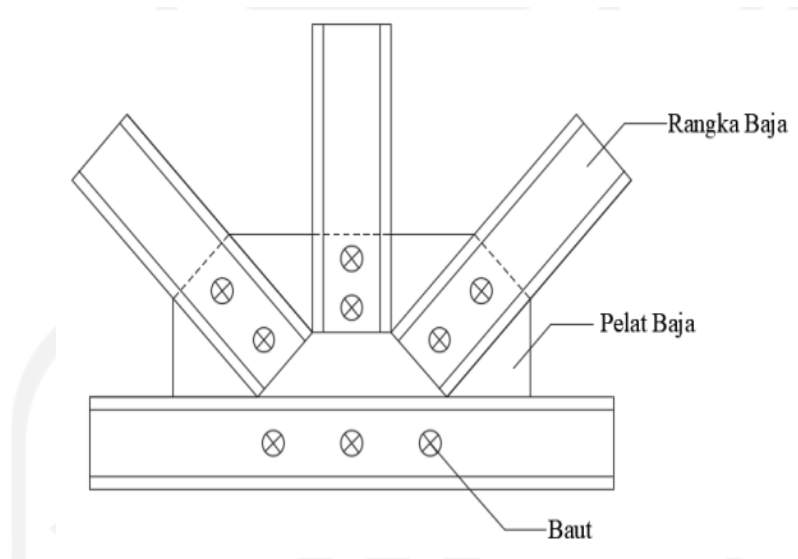
L_r = batas panjang tak terbreis secara lateral untuk keadaan batas tekuk torsi lateral inelastik, adalah:

$$L_r = 2E r_y \frac{\sqrt{J A g}}{M_p 0,7 F_y S_x} \quad (3.23)$$

Catatan: tekuk torsi lateral tidak terjadi pada penampang-penampang bujur sangkar atau penampang-penampang yang melentur terhadap sumbu lemahnya. Pada ukuran PSR, defleksi biasanya akan menentukan seblum ada reduksi yang signifikan dalam kekuaan lentur akibat tekuk torsi lateral. Hal yang sama berlaku untuk penampang-penampang kotak, dan tekuk torsi lateral yang biasanya hanya akan diperhitungkan untuk penampang-penampang dengan rasio tinggi terhadap lebar yang besar

3.6 Sambungan Rangka Baja

Sambungan elemen struktur yang digunakan pada baja adalah sambungan menggunakan baut. Semakin tebal elemen yang digunakan maka semakin besar pula diameter baut yang digunakan. Elemen yang digunakan sebagai media penyambung adalah berupa pelat baja. Bentuk dari sambungan baut ditunjukkan pada Gambar di bawah ini.



Gambar 3.6 Sambungan Baut
(sumber: Fatkhurrohman, 1999)

Desain sambungan memiliki prinsip bahwa sistem sambungan harus lebih kuat daripada elemen yang disambung. Sistem akan dievaluasi sebagai sambungan baut tipe geser dengan mekanisme tumpu, dianggap memenuhi syarat jika kekuatannya lebih besar dari batang tarik/tekan tergantung pada batang tersebut terjadi kuat tarik/tekan. Analisis pada sambungan berupa analisis kuat tumpu profil, kuat geser baut dan kuat geser balok.

3.6.1 Kuat tumpu baut

Kuat tumpu pelat sambungan memperhitungkan pengaruh deformasi. Jika deformasi memengaruhi fungsi struktur sehingga kekuatannya perlu dibatasi maka dapat dipakai persamaan 3.24 dengan mengambil nilai terkecil

$$R_n = 1,2lctFu \leq 2,4dtFu \quad (3.24)$$

Jika terjadi deformasi pada sambungan dianggap tidak mempengaruhi fungsi maka kuat tumpu ditingkatkan dengan menggunakan nilai terkecil dari persamaan 3.25 berikut.

$$R_n = 1,5lctFu \leq 3dtFu \quad (3.25)$$

Untuk kuat tumpu dengan lubang baut tipe slot-panjang yang arahnya tegak lurus arah gaya, maka kekuatannya berkurang dan dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$R_n = 1lctFu \leq 2dtFu \quad (3.26)$$

Keterangan:

- R_n = Kuat tumpu lubang baut (N)
- d = Diameter baut (mm)
- lc = Jarak bersih (mm)
- F_u = tegangan tarik (Mpa)
- t = Ketebalan material yang disambung (mm)

3.6.2 Kuat geser baut

Kuat geser per satu baut dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$R_n = F_{nv} \times A_b \quad (3.27)$$

Keterangan:

- R_n = Kuat geser desain (N)
- F_{nv} = Tegangan geser nominal baut (Mpa)
- A_b = Luasan baut (mm²)

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Gambaran Umum

Penelitian ini dilakukan dengan eksperimen di laboratorium dan analisis numerik SAP 2000 untuk membandingkan prediksi kekuatan rangka atap baja yang dianalisis dengan *Direct Analysis Method* SAP2000 yang telah terkalibrasi terhadap uji batang tekan laboratorium. Sampel uji dalam penelitian ini berupa profil *hollow square section* kelangsingan tinggi dengan pelat sambung tunggal. Secara umum, pengujian dalam penelitian ini meliputi: pengujian tarik pelat material, pengujian geser baut, pengujian tekan profil. Kemudian dilanjutkan dengan proses kalibrasi pemodelan DAM SAP2000, serta analisis kapasitas rangka atap dengan metode DAM yang telah terkalibrasi. Data hasil analisis kuat tekan rangka atap dengan metode DAM SAP 2000 yang terkalibrasi dengan hasil uji tekan profil, dibahas hingga dapat ditarik kesimpulan mengenai pengaruh jumlah baut sambungan terhadap prediksi kuat tekan rangka atap kelangsingan tinggi dengan pelat sambung tunggal.

4.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian adalah segala karakteristik umum yang ditetapkan oleh seorang peneliti yang dapat diukur dan diubah dalam objek penelitian untuk dipelajari dengan tujuan didapatkan informasi mengenai hal tersebut dan dapat ditarik kesimpulan. Terdapat dua variabel dalam penelitian ini:

1. Variabel bebas (*independent variable*) pada penelitian ini ialah jumlah baut pada benda uji rangka atap yang pada penelitian ini baut tunggal dan multi baut pada sambungan. Adapula variabel bebas lain pada penelitian ini yaitu metode analisis yang menjadi pembanding hasil uji eksperimen di laboratorium. Metode tersebut adalah *Direct Analysis Method* (DAM).
2. Variabel terikat (*dependent variable*) berupa: metode analisis kekuatan rangka baja *Direct Analysis Method* (DAM) sesuai SNI 1729-2020, ratio kelangsingan batang tekan (KL/r) = 185 yang termasuk dalam kategori

kelangsingan tinggi, profil hollow kotak yang memiliki sumbu simetri, dan penggunaan pelat tunggal pada sistem sambungannya.

4.3 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan menganalisis perbandingan antara *Direct Analysis Method* menggunakan aplikasi SAP2000 berdasarkan SNI baja tahun 2020 terhadap pengujian laboratorium. Data yang digunakan dalam penelitian ini ialah:

1. Data primer

Dalam penelitian ini, data primer yang diperoleh dari hasil pengujian yang dilakukan. Data tersebut berupa data dari hasil pengujian tarik baja berupa penambahan panjang sampel uji dan beban, pengujian geser baut berupa beban maksimal yang dapat diterima oleh baut, pada pengujian tekuk profil didapatkan data arah lekukan dan lendutan maksimal yang dapat terjadi pada profil tersebut, dan pengujian kuat lentur profil berupa inersia penampang profil dan kapasitas lentur profil.

2. Data sekunder

Data sekunder adalah data yang diperoleh dari beberapa sumber seperti media dan literasi lainnya baik yang dipublikasikan maupun yang tidak dipublikasikan. Pada penelitian ini data sekunder yang digunakan berupa *Direct Analysis Method* yang didapatkan dari SNI 1729:2020 sebagai acuan pembanding dengan hasil laboratorium.

4.4 Bahan-Bahan yang Digunakan

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian ini untuk mencapai maksud dan tujuan dari penelitian ialah sebagai berikut profil baja kotak dengan ukuran tebal 1,6 mm, lebar 15 mm dan tinggi 30 mm, mur baut Ø12 mm - Ø14 mm, dan pelat buhul berukuran 3 mm.

4.5 Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Alat pengukur

Alat pengukur digunakan untuk mengukur dimensi rangka atap dan mengukur kelendutan yang terjadi pada proses pengujian.

2. Mesin uji kuat tarik

Mesin uji kuat tarik baja ini digunakan untuk mengetahui kuat tarik baja. Pada penelitian ini digunakan mesin uji kuat tarik baja yaitu *UNIVERSAL TESTING MATERIAL* (UTM) merk Shimatsu tipe UMH 30, kapasitas 30 ton.

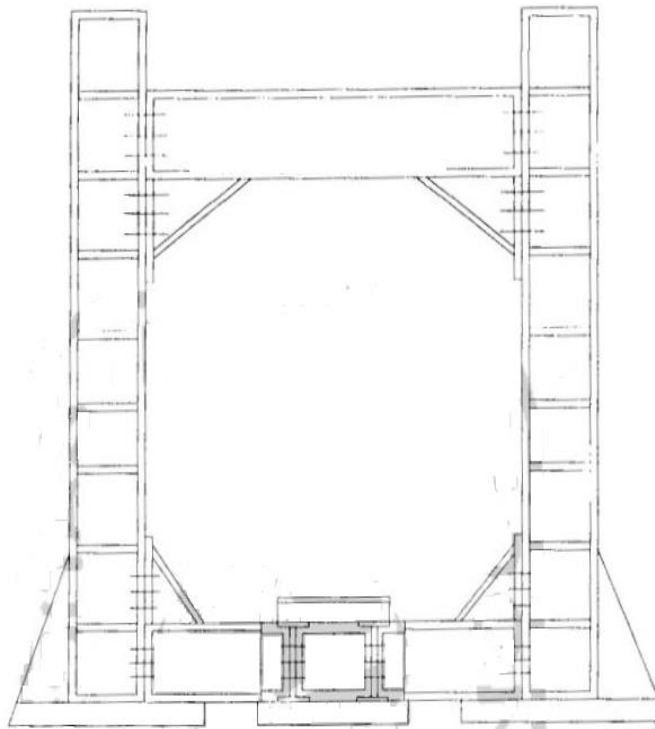


Gambar 4.1 Universal Testing Machine

3. Loading Frame

Loading frame digunakan untuk menempatkan benda uji pada penelitian ini.

Loading frame terdiri dari bahan profil WF 450x200x9x14



Gambar 4.2 Loading Frame

4. Hydraulic Jack

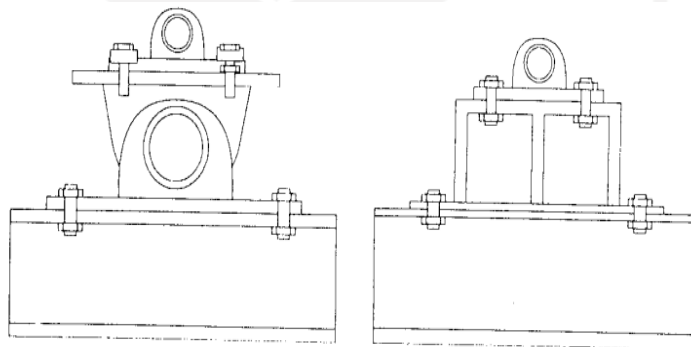
Hydraulic jack digunakan untuk memberikan pembebanan pada benda uji pada proses pengujian lentur benda uji kuda-kuda rangka atap. Pada penelitian ini digunakan *hidraulic jack* dengan kapasitas maksimal beban 30 ton.



Gambar 4.3 Hydraulic Jack

5. Dukungan rol dan sendi

Dukungan rol dan sendi digunakan untuk membuat model rangka atap sederhana dan sama dengan di lapangan dan juga mencegah terjadinya gesekan antara benda uji dengan loading frame pada saat proses pengujian.



Gambar 4.4 Dukungan Rol dan Sendi

6. *Linear Variable Differential Transformer (LVDT)*

LVDT adalah sensor linear yang berfungsi sebagai transducer elektromagnetik yang bisa mengkonversikan gerak lurus pada suatu material menjadi sinyal listrik. Pada penelitian ini LVDT digunakan untuk mengukur lendutan yang terjadi pada tengah bentang profil. LVDT yang digunakan memiliki kapasitas mengukur lendutan sebesar 100 mm.



Gambar 4.5 Linear Variable Differential Transformer

4.6 Tahapan Penelitian dan Set Up Pengujian

Tahapan-tahapan dalam proses penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tahap Persiapan

Pada tahap persiapan ini akan dilaksanakan persiapan segala hal yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilaksanakan seperti mempersiapkan alat dan bahan penelitian serta merancang dimesi rangka atap yang akan dianalisis. Penentuan dan perhitungan dimensi rangka dilakukan dengan perhitungan kuat tekan profil *hollow square section* kelangisngan tinggi serta prediksi kuat tekan rangka atap. Adapun tahapan perhitungan untuk menentukan kuat tekan profil dan rangka atap ialah sebagai berikut:

Data penampang

Lebar Penampang Profil (B) = 30 mm

Tinggi Penampang Profil (H) = 15 mm

Tebal Penampang Profil (T) = 1,6 mm

Jari-jari Grasi Sumbu Lemah Profil (Ry) = 5,97

Rasio Kelangisngan Efektif

$$\frac{KL}{r} \geq 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\frac{1 \times 1037}{5,97} \geq 4.71 \times \sqrt{\frac{200000}{254}}$$

$$173,702 \geq 132,1658$$

Dari hasil perhitungan rasio kelangsingan efektif didapatkan nilai dimana, $\frac{KL}{r} > 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, maka dapat disimpulkan bahwa kondisi benda uji yaitu tekuk elastic.

Tegangan Tekuk Elastis

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 200000}{(1 \times 1037/5,97)^2}$$

$$F_e = 65,279 \text{ MPa}$$

Setelah rasio kelangsingan efektif didapatkan dan diketahui bahwa hollow square section yang digunakan mengalami tekuk inelastic, digunakan persamaan tegangan kritis sebagai berikut.

$$F_{cr} = 0,877 \times F_e$$

$$F_{cr} = 0,877 \times 65,279$$

$$F_{cr} = 57,251$$

Setelah diketahui nilai tegangan kritis dari perhitungan diatas, kuat tekan nominal dapat dicari untuk mengetahui nilai kuat tekan terhadap batas tekuk lentur dengan cara dibawah ini.

$$P_n = F_{cr} \times A_g$$

$$P_n = 55,726 \times 133,76$$

$$P_n = 7,453 \text{ KN}$$

$$\phi P_n = 0,9 \times P_n$$

$$\phi P_n = 0,9 \times 7,453$$

$$\phi P_n = 6,708 \text{ KN}$$

Berikut merupakan perhitungan *effective length method* pada batang tekan variasi 3 baut.

Data penampang

Lebar Penampang Profil (B) = 30 mm

Tinggi Penampang Profil (H) = 15 mm

Tebal Penampang Profil (T) = 1,6 mm

Jari-jari Grasi Sumbu Lemah Profil (R_y) = 5,97

Rasio Kelangsingan Efektif

$$\frac{KL}{r} \leq 4.71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

$$\frac{0,7 \times 1033}{5,97} \leq 4.71 \times \sqrt{\frac{200000}{254}}$$

$$124,887 \leq 132,1658$$

Dari hasil perhitungan rasio kelangsingan efektif didapatkan nilai dimana,

$\frac{KL}{r} \leq 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{F_y}}$, maka dapat disimpulkan bahwa kondisi benda uji yaitu tekuk elastic.

Tegangan Tekuk Elastis

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 200000}{(1 \times 1033/5.97)^2}$$

$$F_e = 126,555 \text{ MPa}$$

Setelah rasio kelangsingan efektif didapatkan dan diketahui bahwa hollow square section yang digunakan mengalami tekuk inelastic, digunakan persamaan tegangan kritis sebagai berikut.

$$F_{cr} = (0,658^{\frac{F_y}{F_e}}) F_e$$

$$F_{cr} = (0,658^{\frac{254}{126,555}}) 126,425$$

$$F_{cr} = 109,555$$

Setelah diketahui nilai tegangan kritis dari perhitungan diatas, kuat tekan nominal dapat dicari untuk mengetahui nilai kuat tekan terhadap batas tekuk lentur dengan cara dibawah ini.

$$P_n = F_{cr} \times A_g$$

$$P_n = 109,555 \times 82,733$$

$$P_n = 9,068 \text{ KN}$$

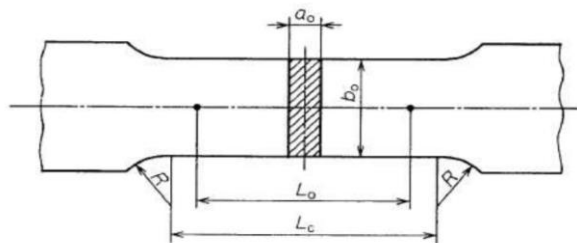
$$\phi P_n = 0.9 * P_n$$

$$\phi P_n = 0.9 * 9,068$$

$$\phi P_n = 8,1612 \text{ KN}$$

2. Pengujian Tarik Material

Pengujian kuat tarik pelat baja pada pengujian ini menggunakan pelat baja berukuran kurang dari 3 mm. Pada pengujian ini akan menghasilkan nilai tegangan leleh, modulus elastisitas dan kuat tarik maksimum pada pelat. Benda uji pada pengujian ini dibuat berdasarkan SNI 8389-2017 yang bisa dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.6 Benda Uji Kuat Tarik Pelat Baja

3. Pengujian Geser Baut

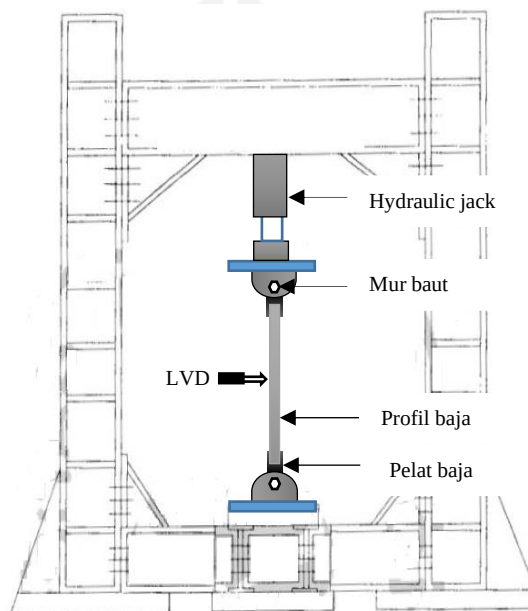
Uji geser baut dilakukan untuk mengetahui kekuatan baut untuk menerima beban maksimal jika baut berada dalam satu kesatuan struktur rangka atap baja. Agar baut bekerja dengan baik maka diperlukan pengencangan pada baut sedemikian rupa sehingga baut mengalami prategang Tarik



Gambar 4.7 Set Up Pengujian Geser baut

4. Pengujian Kuat Tekan Profil

Uji kuat tekan profil baja yang akan dilakukan di laboratorium bahan konstruksi teknik, di fakultas teknik sipil universitas islam indonesia. Dari pengujian ini data yang dihasilkan adalah kapasitas tekan maksimum. Pada pengujian ukuran yang digunakan yaitu $L=1037$ mm. Di bawah ini adalah set up pengujian kuat tekan profil baja dengan tipe baut tunggal pada sambungan. Data yang dihasilkan dari pengujian ini yaitu kapasitas tekan batang dan defleksi pada tengah batang tekan.



Gambar 4.8 Set Up pengujian Kuat Tekan Profil Baja

5. Kalibrasi Permodelan Profil pada SAP2000

Kalibrasi permodelan pada SAP2000 dilakukan setelah pengujian kuat tekan pada laboratorium telah dilakukan. Hal ini berkaitan dengan kalibrasi jumlah step dan nilai reduksi kekakuan pada permodelan yang direncanakan menghasilkan nilai P-Delta mendekati P-Delta hasil pengujian laboratorium.

6. Analisis DAM pada Rangka Atap

Analisis DAM pada rangka atap dilakukan dengan memodelkan rangka atap yang akan diuji pada SAP2000. Dengan parameter nilai reduksi kekakuan dan jumlah step terkalibrasi dimodelkan mengacu pada kalibrasi permodelan profil

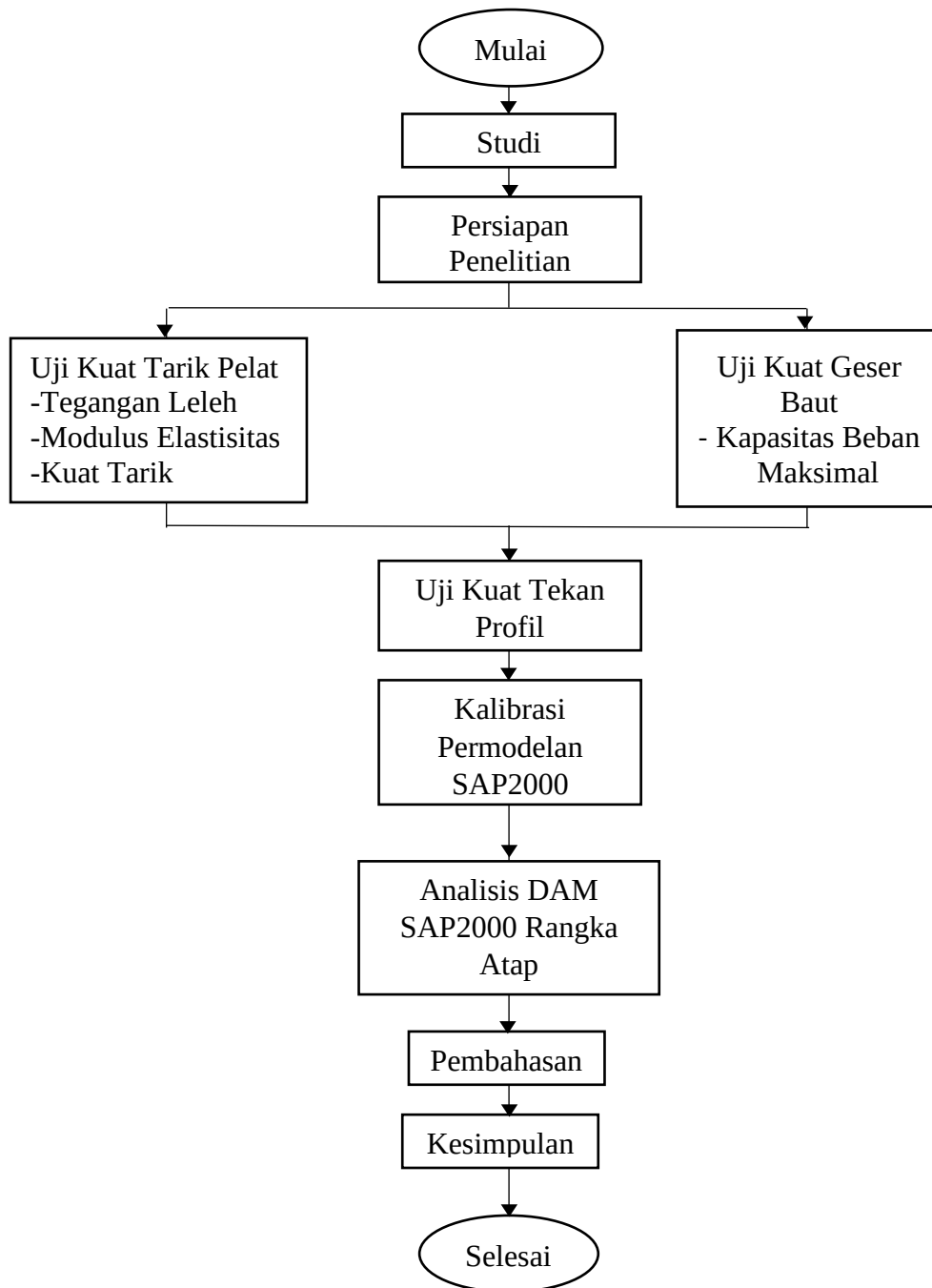
yang telah dilakukan sebelumnya. Pada analisis ini akan menghasilkan nilai kapasitas tekan rangka atap kedua variasi.

7. Tahap Pembahasan

Pembahasan dilakukan setelah pengujian dan analisis dilakukan. Pembahasan dilakukan mengenai prediksi kuat tekan yang dibandingkan antara hasil pengujian laboratorium dengan hasil kalibrasi permodelan SAP2000. Dalam hal permodelan batang tekan pada SAP2000, pengaruh jumlah baut pada permodelan dibedakan dengan cara kalibrasi jumlah step dan kalibrasi nilai reduksi kekakuan. Kemudian factor apa saja yang menjadi pengaruh terhadap pengujian dan permodelan pada SAP2000 juga menjadi pembahasan.

8. Tahap Penarikan Kesimpulan

Kesimpulan pada penelitian ini diambil setelah segala tahap penelitian dan pembahasan telah dilakukan. Kesimpulan yang diambil berupa perbandingan nilai kuat tekan profil baja HSS terhadap *effectivce leght method* dan *direct analysis method* yang terkalibrasi dengan hasil uji laboratorium. Kemudian, pengaruh jumlah baut sambungan pada batang tekan dan rangka atap terhadap meode pemodelan SAP2000 serta kuat tekannya.



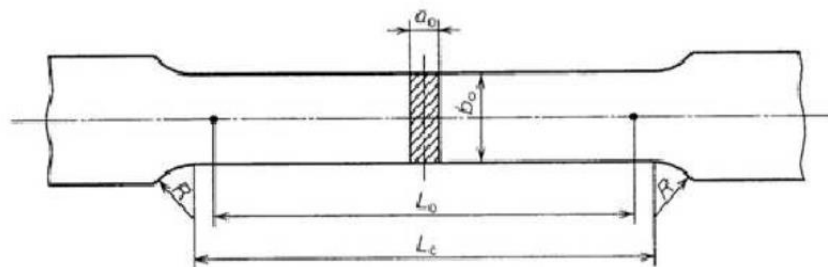
Gambar 4.9 Flow Chart Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Uji Kuat Tarik Material Baja

Uji kuat tarik material baja yang diambil dari profil Hollow Square Section dengan bentuk dan dimensi sampel berdasarkan SNI 8389:2017 seperti gambar 5.1 di bawah ini.



Gambar 5.1 Sampel Uji Kuat Tarik Baja

Dimensi pada sampel uji kuat Tarik material baja direncanakan sebagai berikut sesuai SNI 8389:2017, dimana:

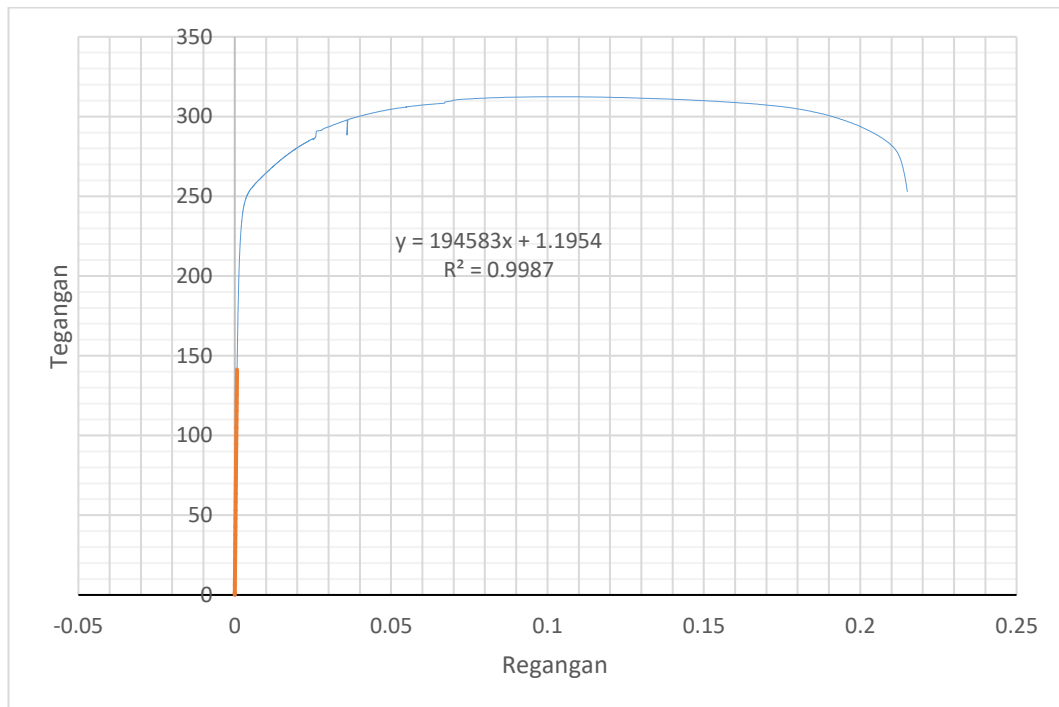
$$L_o = 100mm$$

$$L_c = 120mm$$

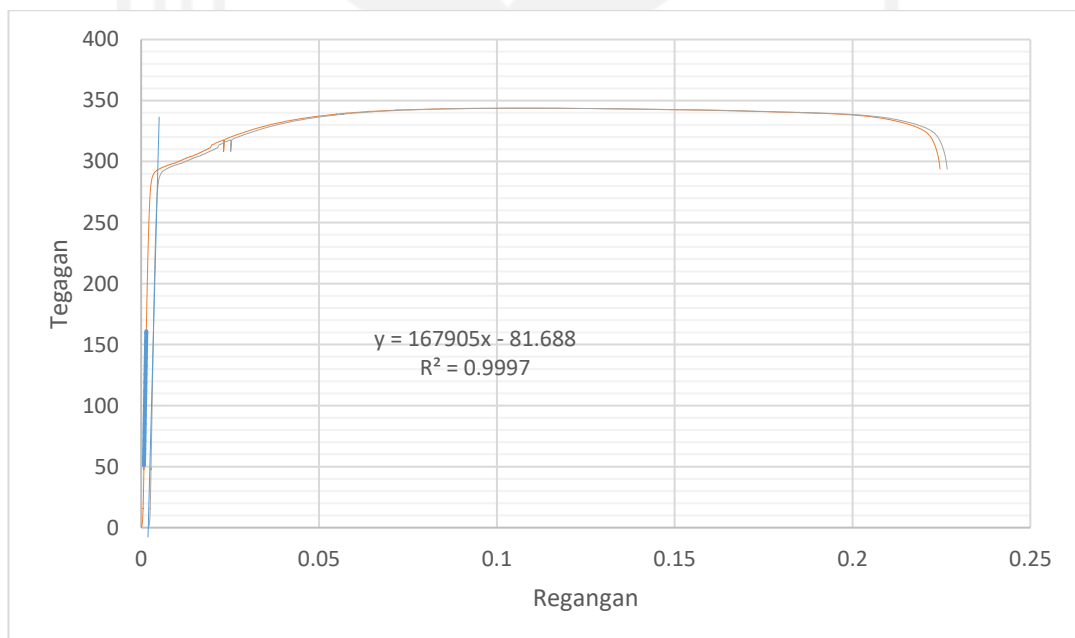
$$R = 25^o$$

$$b_o = 20mm$$

Pengujian tersebut menggunakan alat Universal Testing Machine (UTM) dan dilaksanakan di laboratorium bahan konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indoensia. Dari eksperimen didapatkan nilai tegangan leleh (f_y) dan kuat tarik maksimum (f_u) yang disajikan dalam grafik tegangan-regangan di bawah ini.



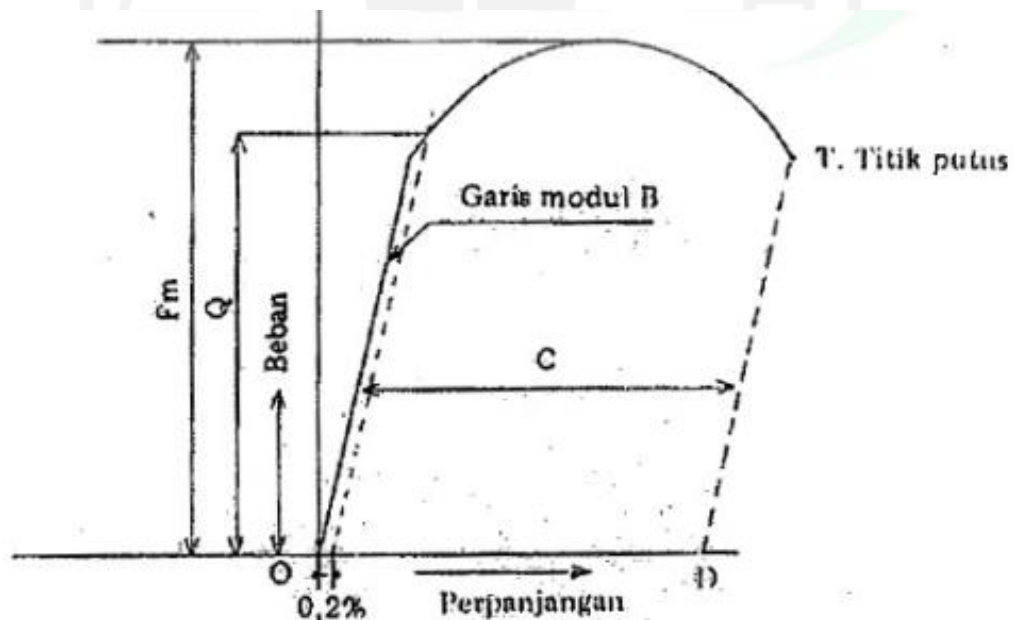
Gambar 5. 2 Grafik Tegangan-Regangan Sampel 1



Gambar 5. 3 Grafik Tegangan-Regangan Sampel 2

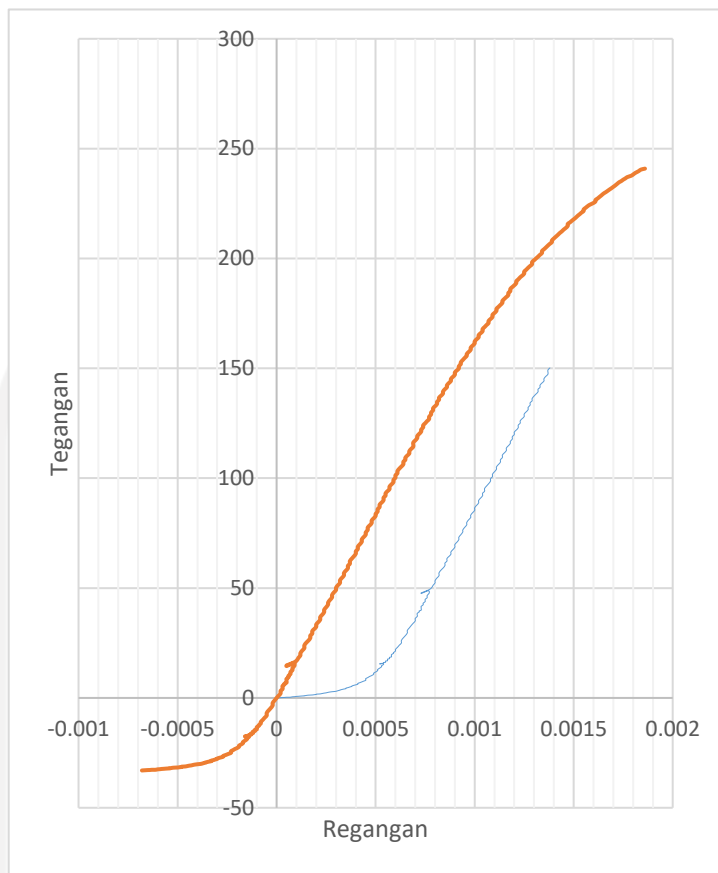
Pada grafik sampel 1 tidak mengalami koreksi sedangkan grafik pada sampel 2 mengalami koreksi. Koreksi dilakukan apabila nilai modulus elastisitas pada grafik tegangan-regangan tidak memenuhi standar SNI. Standar SNI untuk nilai modulus elastisitas sendiri yaitu berkisar antara 200000 MPa – 210000 MPa.

Sedangkan, pada grafik tegangan-regangan sampel 2 terlihat tidak masuk dalam standar SNI dikarenakan adanya slip pada awal pengujian. Maka dari itu, untuk menentukan titik leleh pada grafik 2 menggunakan Teknik offset 0,2%. Teknik offset 0,2% dilakukan dengan mengurangi data awal dimana diperkirakan adanya slip. Teknik offset 0,2% diambil dari SNI 0408-1989.



Gambar 5.4 Offset 0,2%
(sumber: SNI 0408-1989)

Setelah dilakukan Teknik offset 0,2% pada sampel 2 yang menghasilkan detail slip awal pada grafik di bawah, didapatkan nilai modulus elastisitas yang masuk dalam kategori SNI 1829. Nilai modulus elastisitas diperoleh dari regresi (nilai kemiringan grafik).



Gambar 5.5 Detail Slip Awal Grafik Tegangan-Regangan

Pengujian tersebut menggunakan alat Universal Testing Machine (UTM) dan dilaksanakan di laboratorium bahan konstruksi Teknik, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indoensia. Dari eksperimen didapatkan nilai kuat tarik baja yang ditunjukkan pada Table 5.1.

Tabel 5. 1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Material Baja

NO	Benda Uji	Fy (MPa)	Fu (MPa)
1	Sampel 1	271	343.748
2	Sampel 2	237	312.389
	Rata-rata	254	328.069

Nilai F_y rata-rata :

$$F_y = \frac{271 + 237}{2} = 254 \text{ MPa}$$

Nilai F_u rata-rata

$$F_u = \frac{343.748 + 312.389}{2} = 328.069$$

5.2 Uji Kuat Geser Baut

Uji geser baut dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat geser maksimal pada baut. Pengujian ini dilakukan karena sambungan pada pengujian batang tekan menggunakan 2 variasi baut sambungan yaitu kuat tekan variasi baut 1 dan kuat tekan variasi baut 2. Pengujian ini dilakukan sebanyak 2 kali dengan baut berdiameter 10mm. Pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.6 dan Gambar 5.7 di bawah ini.



Gambar 5.6 Pengujian Kuat Geser Baut Sampel 1



Gambar 5.7 Pengujian Kuat Geser Baut Sampel 2

Hasil dari pengujian kuat geser baut dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. 2 Rekapitulasi Pengujian Kuat Geser Baut

Keterangan	Baut Sampel 1	Baut Sampel 2
Diameter Baut (mm)	10	10
Berat Baut (gram)	37	38
Pmax (KN)	18	20

Dari hasil pegujian yang didapatkan mengartikan bahwa baut yang akan digunakan sudah masuk dalam kondisi aman dari tekuk saat pengujian karena memiliki nilai kuat geser yang jauh dari kapasitas tekan benda uji.

5.3 Uji Kuat Tekan Profil

Pengujian kuat tekan profil dimaksudkan untuk mendapatkan nilai kapasitas tekan suatu batang tekan. Di bawah ini merupakan gambar pada saat pengujian kuat tekan batang. Pada pengujian kuat tekan batang tekan pada variasi bau 1 dan baut 3 dilakukan terhadap 4 sampel uji, 2 sampel untuk batang tekan variasi 1 baut dan 2 sampel untuk batang tekan variasi 3 baut.



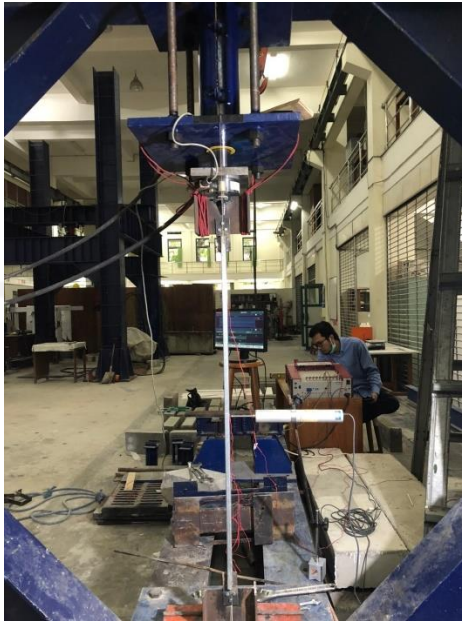
Gambar 5.8 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 1 Baut Sampel 1



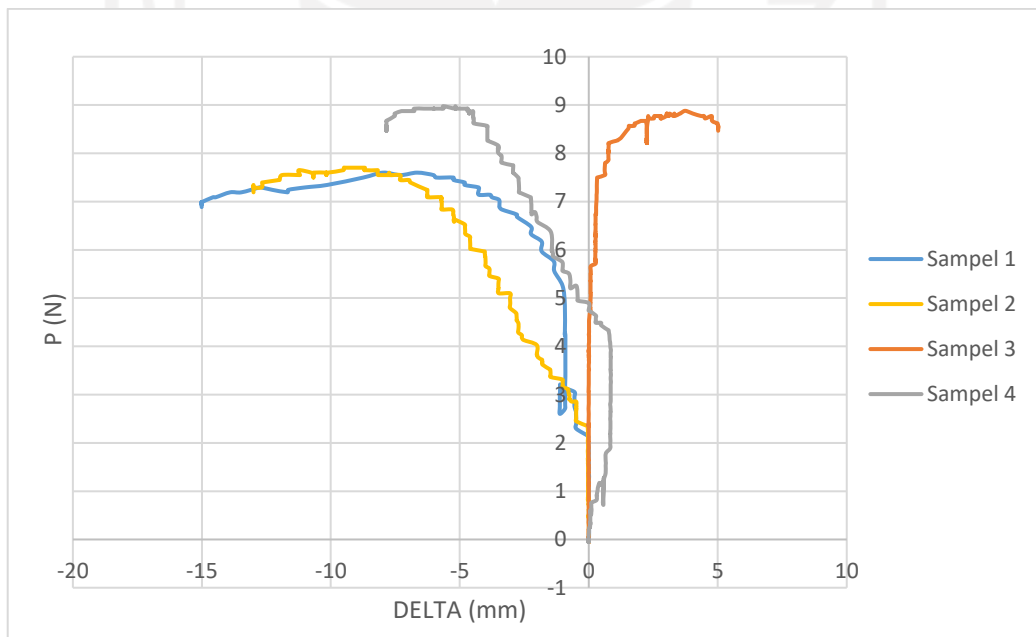
Gambar 5.9 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 1 Baut Sampel 2



Gambar 5.10 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 3 Baut Sampel 1



Gambar 5.11 Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 3 Baut Sampel 2



Gambar 5.12 Grafik Rekapitulasi P-Delta Pengujian Kuat Tekan Profil

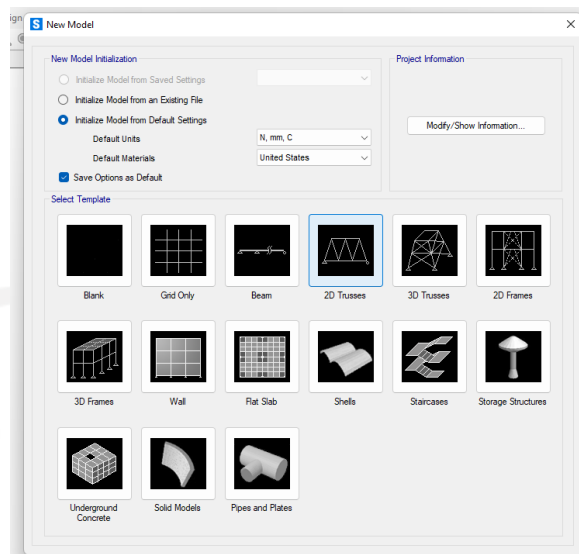
Grafik di atas merupakan grafik hubungan antara nilai P dan nilai delta untuk keempat sampel setelah dilakukan pengujian. Dari data di atas didapatkan bilangan kedua variasi memiliki nilai yang identik antar variasi. Untuk batang tekan variasi 1 baut memiliki kapasitas kuat tekan sebesar 7,599 KN, sedangkan untuk variasi batang tekan variasi 3 baut memiliki kapasitas kuat tekan sebesar 8,976 KN. Hal tersebut dikarenakan friksi yang terjadi pada batang tekan variasi 1 baut sehingga nilai kuat tekan yang dihasilkan mendekati sampel batang tekan variasi 3 baut. Tekuk yang terjadi pada saat pengujian terjadi pada tengah batang tekan.

5.4 Trial and Error Permodelan Batang Tekan SAP2000 dengan Uji Laboratorium

Trian and error permodelan batang tekan dilakukan untuk membandingkan kapasitas batang tekan antara hasil uji laboratorium (ELM) dengan kapasitas tekan batang pada SAP2000 (DAM). Dalam hal ini dilakukan permodelan terlebih dahulu menggunakan SAP2000 untuk batang tekan.

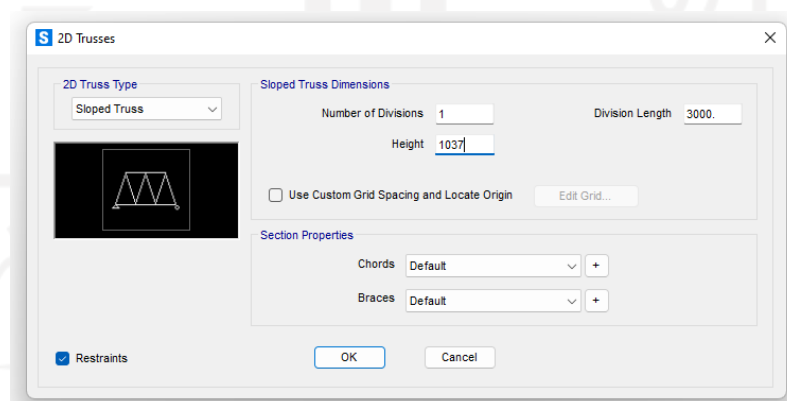
5.4.1 Permodelan SAP2000 Batang Tekan Variasi 1 Baut

Memodelkan batang tekan pada SAP2000 untuk batang tekan variasi 1 baut memiliki beberapa persamaan pada tahap permodelannya dengan permodelan batang tekan variasi 3 baut. Langkah-langkah permodelan batang tekan variasi 1 baut sebagai berikut.



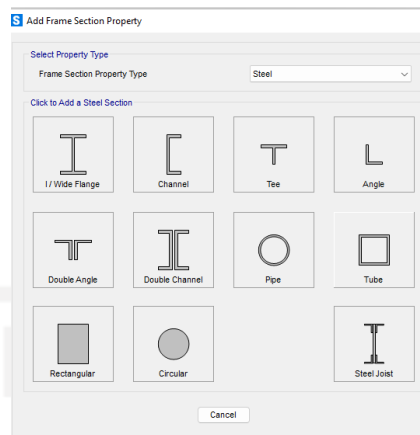
Gambar 5.13 Model – Model Struktur pada SAP2000

Pada awal SAP2000 dibuka diberikan pilihan untuk menentukan permodelan batang yang akan diuji pada SAP2000. Dipilih 2D truss yang kemudian akan diarahkan untuk memasukkan data dimensi batang tekan yang akan dilakukan pengujian.



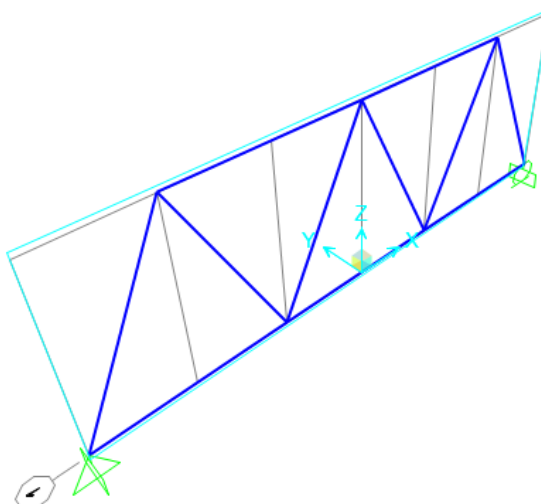
Gambar 5.14 Dimensi Benda Uji Pada SAP2000

Untuk memodelkan jenis penampang dapat dipilih pada ikon (+) pada item chords dan dipilih sesuai dengan benda uji yang digunakan pada pengujian batang tekan.



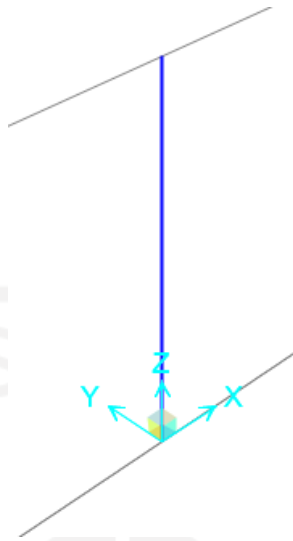
Gambar 5.15 Dimensi Penampang Benda Uji

Setelah memilih dan memasukkan dimensi penampang batang tekan variasi 1 baut maka permodelan awal akan mendapatkan model pada SAP2000 seperti gambar di bawah ini.



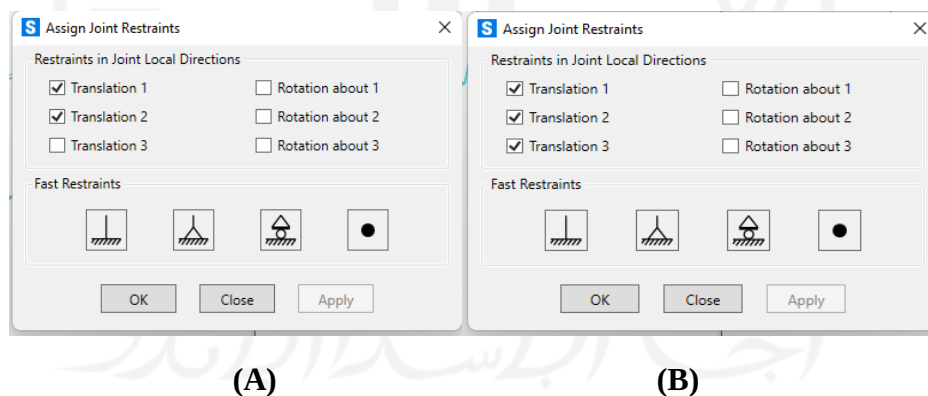
Gambar 5.16 Hasil Permodelan Awal SAP2000

Seluruh rangka yang ada kemudian dihapus untuk digambarkan ulang sesuai dengan pengujian yang dilakukan di laboratorium.



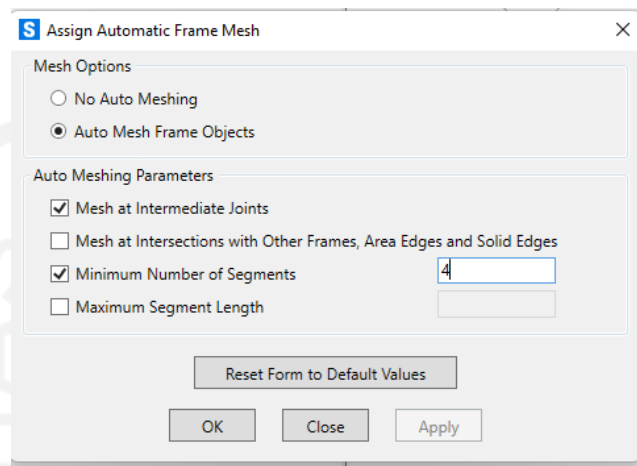
Gambar 5.17 Permodelan Sesuai dengan Pengujian Laboratorium

Batang tekan yang telah dibuat diberikan sendi pada setiap ujung batang guna menggambarkan sendi seperti pengujian. Dalam hal ini sendi pada batang tekan variasi baut 1 didesain agar tidak terjadi pergeseran yang mengarah ke arah sumbu X.

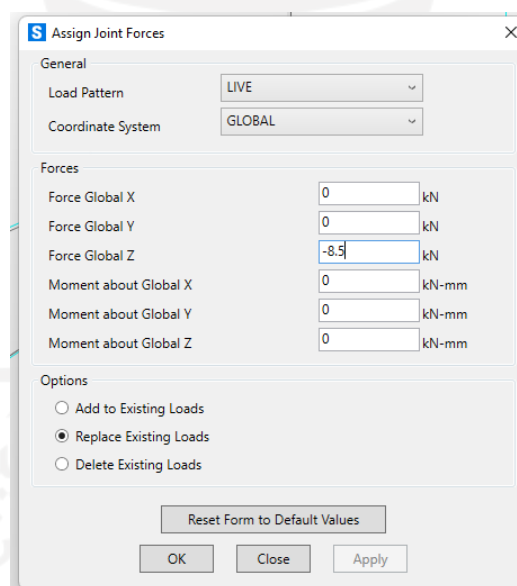


Gambar 5.18 Permodelan Sendi Pada Ujung Batang Tekan Variasi Baut 1, (A) Atas (B) Bawah

Langkah selanjutnya yaitu membagi elemen frame secara otomatis yang dapat dilakukan dengan langkah seperti di bawah ini.

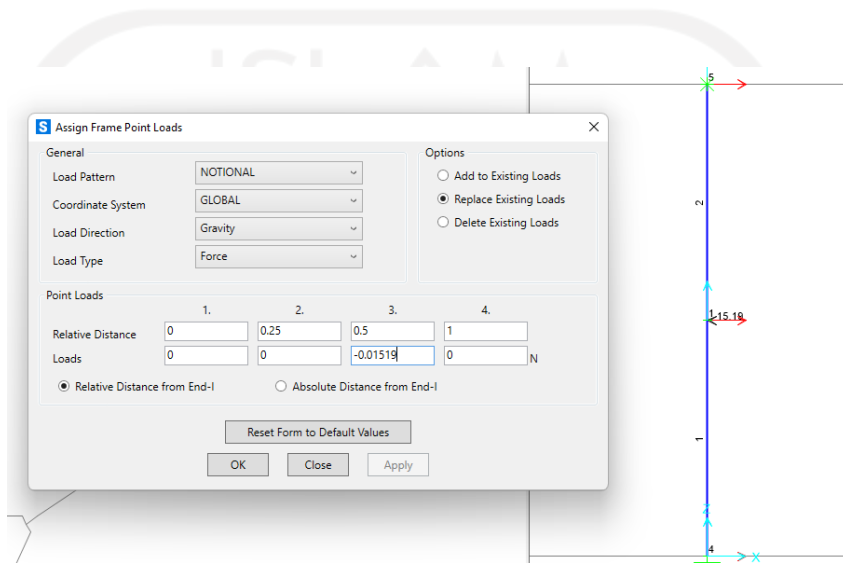


Gambar 5.19 Automatic Frame Mesh



Gambar 5.20 Pembebanan pada Batang Tekan

Pembebanan pada ujung batang tekan diberikan ke arah bawah sumbu Z. Beban yang diberikan melebihi kapasitas tekan batang yang telah dilakukan pada pengujian laboratorium. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi apabila *direct analysis method* dapat menghasilkan nilai kapasitas tekan batang yang lebih besar daripada *effective length method*.



Gambar 5.21 Beban Notional pada Tengah Bentang Batang Tekan

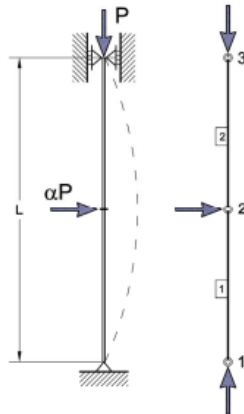
Beban notional yang diberikan di tengah bentang dilakukan untuk mendapatkan momen akibat *imperfection* pada desain batang tekan di SAP2000. Hal tersebut dikarenakan apabila beban notional diberikan pada tumpuan batang tekan maka tidak akan mendapatkan momen akibat *imperfection* tersebut atau hasil yang dikeluarkan akan sama seperti cara *effective length method*. Karena hal tersebut, pemberian beban notional di tengah bentang adalah pilihan konservatif.

Adanya ketidaksempurnaan geometri pada elemen benda uji maka dilakukan perhitungan beban notional yang akan memberika efek destabilizing pada permodelan SAP2000. Perhitungan beban notional dapat dilakukan dengan persamaan di bawah ini.

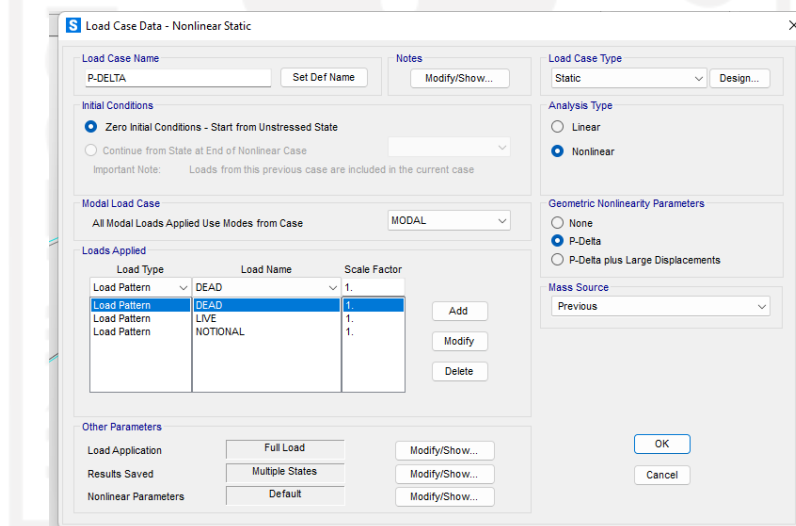
$$N_i = 0,002 \times \phi P_n$$

$$N_i = 0,002 \times 7,327$$

$$N_i = 14.655 \text{ KN}$$



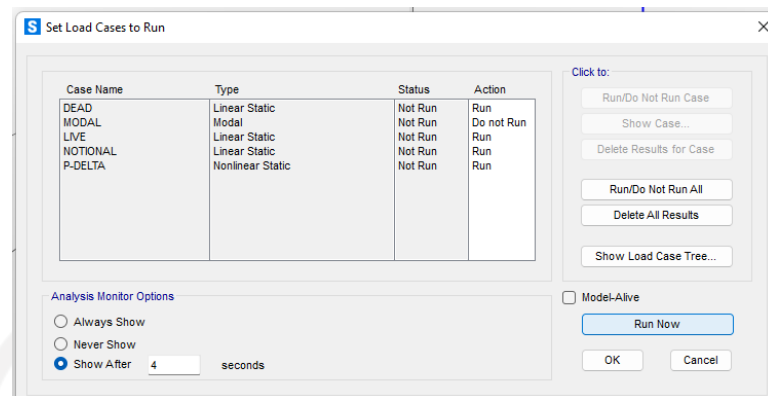
Gambar 5.22 Pemodelan kolom tertambat untuk 2nd Order Elastic Analysis mencari Mu.



Gambar 5.23 Setting Data Load Cell untuk P-Delta

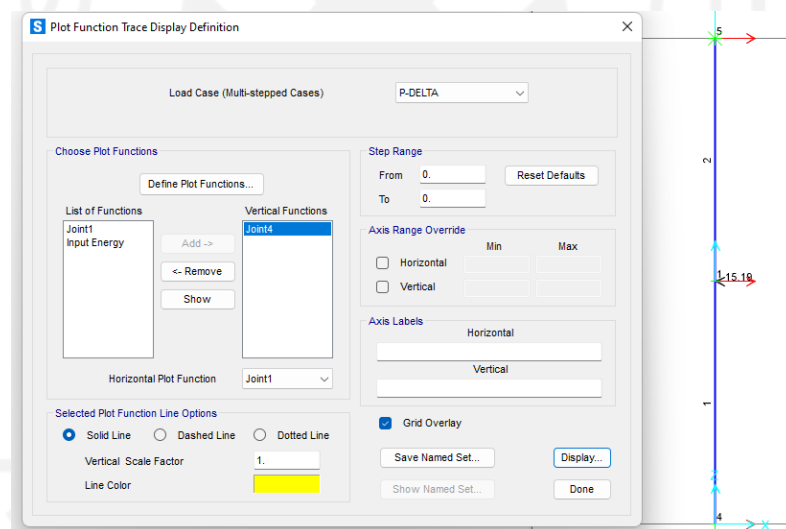
Opsi P-Delta pada SAP2000 perlu diaktifkan guna penggambaran analisis orde ke-2 yang diperlukan untuk perhitungan dalam mencari gaya internal yang terjadi pada batang tekan.

Setelah langkah – langkah di atas telah dilaksanakan, hal yang selanjutnya dilakukan yaitu running aplikasi SAP2000.



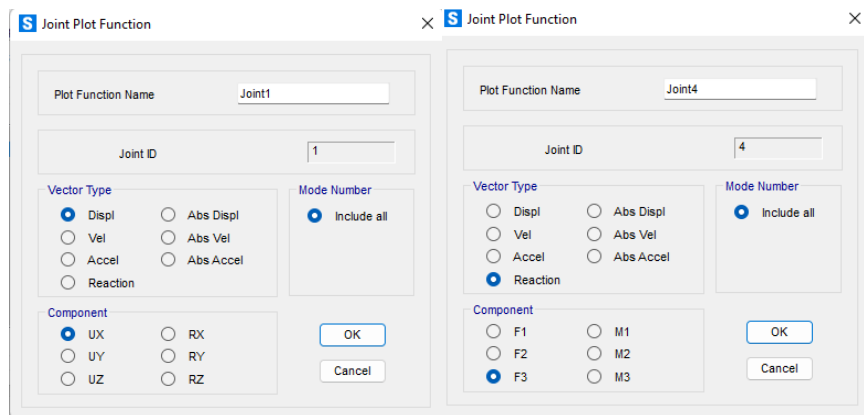
Gambar 5.24 Running pada Batang Tekan Variasi B yang telah didesain

Untuk memudahkan dalam melihat perilaku batang tekan, SAP2000 menyediakan opsi *show plot functions* seperti di bawah ini.



Gambar 5.25 Plot Perilaku Batang Tekan Hasil Analisis

Perlu pembuatan *functions* yang berguna untuk SAP2000 melacak fungsi gaya dari reaksi tumpuan dan fungsi deformasi lateral titik di tengah bentang. Dalam hal ini perlu dilihat pada penomoran sesuai dengan model yang tertera pada SAP2000.

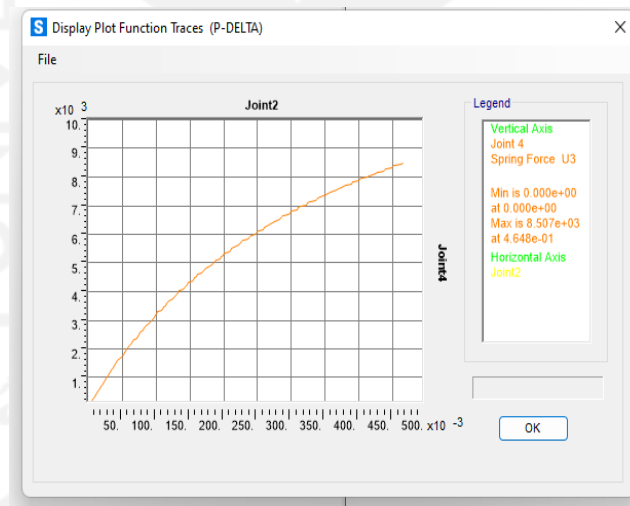


(A)

(B)

Gambar 5.26 Fungsi Untuk Plot Perilaku Batang, (A) Horizontal (B) Vertikal

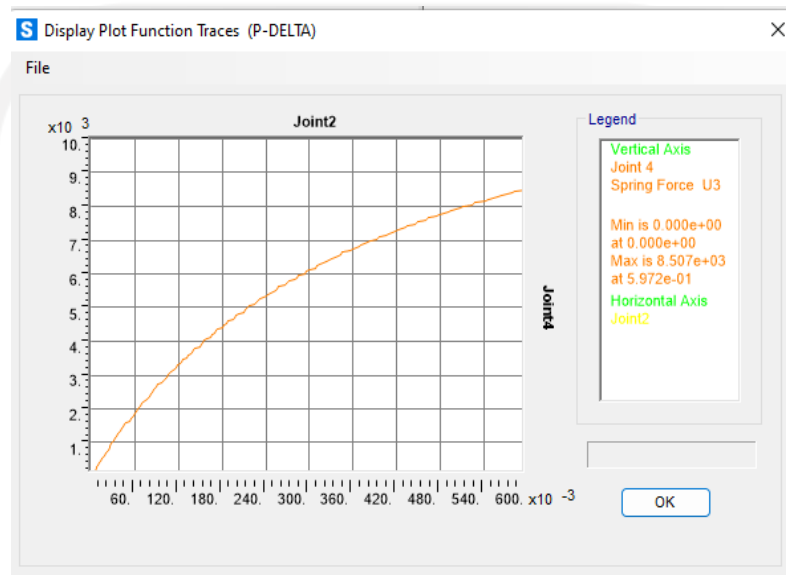
Untuk *vertical funtions* yang digambarkan dengan *joint 4* merupakan gaya, sedangkan *horizontal funtions* yang digambarkan pada *joint 1* merupakan deformasi arah lateral di tengah bentang batang tekan.



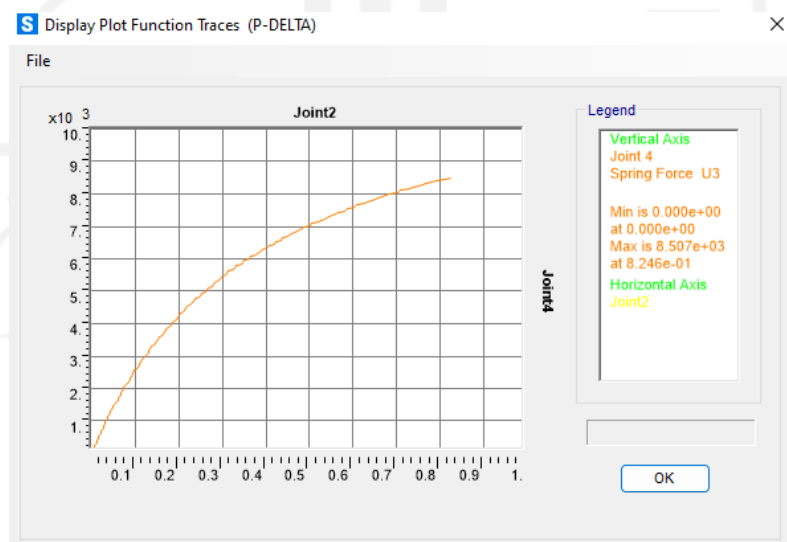
Gambar 5.27 Grafik P-Delta Batang tekan Variasi 1 Baut

Grafik P-Delta batang tekan variasi 1 baut menunjukkan bahwasannya permodelan batang tekan variasi 1 baut dengan SAP2000 tidak menghasilkan tekuk pada batang setelah dilakukan pengujian pada SAP2000. Hal ini dapat terjadi karena beberapa kemungkinan, salah satunya yaitu pada saat pengujian batang

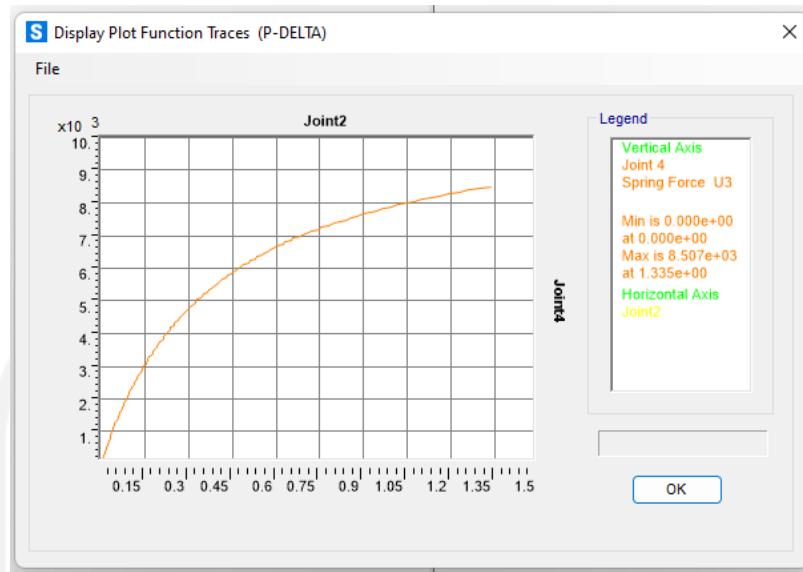
tekan variasi 1 baut di laboratorium terjadi friksi antara baut dan plat sambung yang menghasilkan sendi ujung batang menjadi tumpuan jepit. Untuk itu, perlu dilakukan penyesuaian pada permodelan batang tekan variasi 1 baut di SAP2000 guna menggambarkan terjadinya friksi pada ujung batang tekan variasi 1 baut.



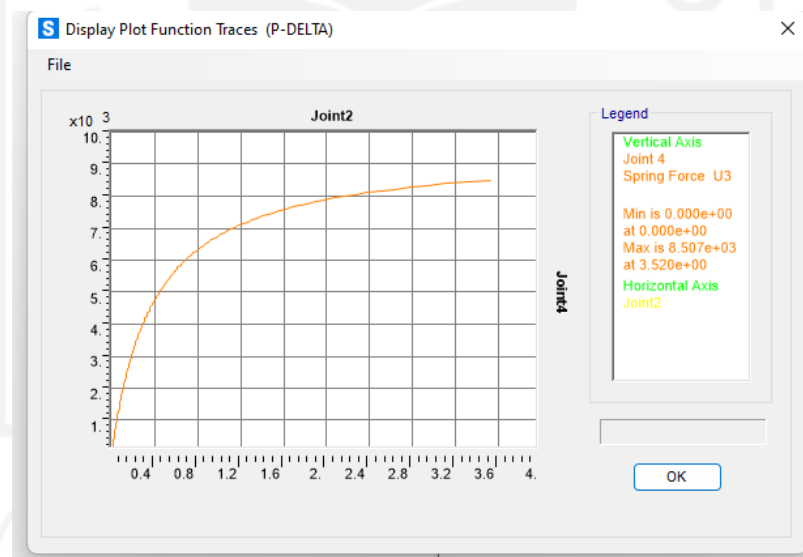
Gambar 5.28 Grafik P-Delta dengan *Trial and Error* Nilai $\tau_b = 0.9$



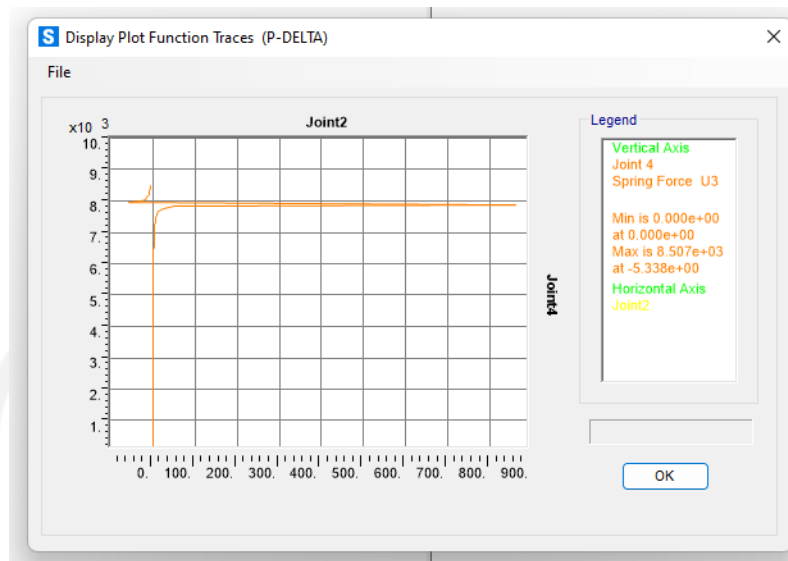
Gambar 5.29 Grafik P-Delta dengan *Trial and Error* Nilai $\tau_b = 0.8$



Gambar 5.30 Grafik P-Delta dengan *Trial and Error* Nilai $\tau b = 0.7$



Gambar 5.31 Grafik P-Delta dengan *Trial and Error* Nilai $\tau b = 0.6$



Gambar 5.32 Grafik P-Delta dengan *Trial and Error* Nilai $\tau_b = 0.5$

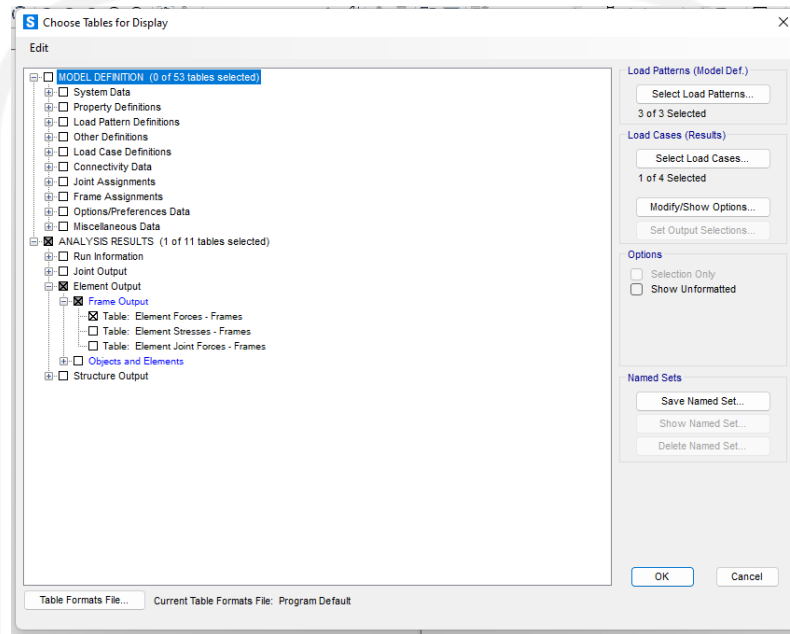
Trial and error reduksi kekakuan yang dilakukan dianggap berhasil apabila hasil grafik P-Delta baut tekan variasi baut 1 pada SAP2000 mengalami tekuk. Dalam kasus ini, nilai τ_b dilakukan *trial and error* hingga 0,5 sampai grafik mengalami tekuk.

Tabel 5.4 Perbandingan Jumlah Step dan Nilai Kuat Tekan Batang Tekan Variasi 1 Baut

Jumlah Step	Nilai Kuat Tekan (KN)
10	6.82
25	7.28
50	7.41
75	7.41
100	7.41
150	7.48
200	7.44

Trial and error jumlah step dilakukan dengan melakukan percobaan dengan mengganti jumlah step ke nilai 10, 25, 50, 75, 100, 150, dan 200. Parameter nilai

trial and error yang akan diambil yaitu apabila nilai kuat tekan pada jumlah step tertentu mulai stabil atau tidak berubah dengan signifikan. Dari data yang dihasilkan setelah *trial and error* jumlah step dapat digunakan jumlah step 75 pada permodelan batang tekan variasi 1 baut pada SAP2000



Gambar 5.33 Cara Menampilkan Tabel P-Delta Hasil Pengujian pada SAP2000

Setelah *trial and error* dianggap berhasil kemudian data pengujian pada SAP2000 dapat digunakan untuk diolah guna mendapatkan nilai kuat tekan nominal pada DAM yang masuk dalam batas *safety factor* sesuai dengan SNI 1729:2020. Berikut adalah data dari hasil pengujian menggunakan DAM pada SAP2000.

Tabel 5.5 Nilai P-Delta Hasil Pengujian dengan DAM

Frame Text	Station mm	OutputCase	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-mm	M2 KN-mm	KN
1	0	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	129.13	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	129.13	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	387.38	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	387.38	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	516.5	P-DELTA	NonStatic	Step	0	0	0	0	0	0	0
1	0	P-DELTA	NonStatic	Step	1	-0.113	-0.0001005	0	0	0	0
1	129.13	P-DELTA	NonStatic	Step	1	-0.113	-0.0001005	0	0	0	0
1	129.13	P-DELTA	NonStatic	Step	1	-0.113	-9.962E-05	0	0	0	0
1	258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	1	-0.113	-9.962E-05	0	0	0	0
1	258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	1	-0.113	-9.962E-05	0	0	0	0
1	387.38	P-DELTA	NonStatic	Step	1	-0.113	-9.962E-05	0	0	0	0
1	387.38	P-DELTA	NonStatic	Step	1	-0.113	-0.0001005	0	0	0	0

Data table P-Delta dari SAP2000 dapat diekspor ke excel guna memudahkan pada proses pengolahan data. Pada tahap ini data kuat tekan tersebut akan dicari nilai kuat tekan pada step tertentu yang menghasilkan nilai Mr negatif. Dikarenakan pada step tersebut terdapat step yang mendekati nilai interaksi lentur dan gaya tekan yang telah masuk ke dalam batas *safety factor* SNI 1729:2020. Adapun perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan *safety factor* ialah sebagai berikut.

$$\frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{7484.3}{7.599} + \frac{8}{9} \left(\frac{2.98}{112.618} \right) \leq 1,0$$

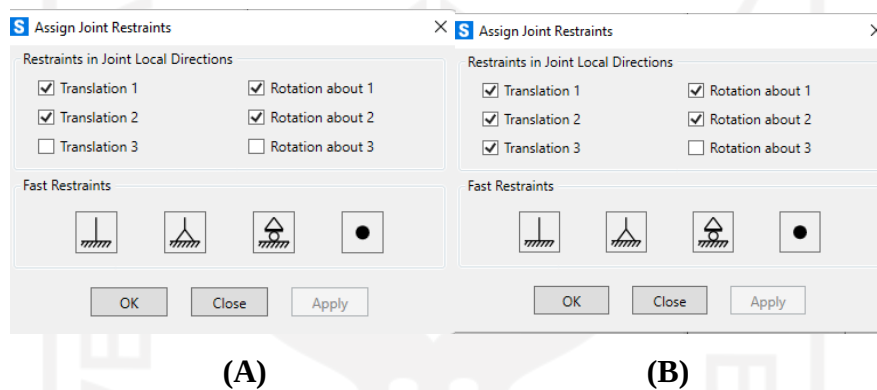
$$1,008 \leq 1,0$$

Tabel 5.6 Rekapitulasi Kuat Tekan Batang Variasi 1 Baut dengan DAM

TABLE: Element Forces - Frames								
Station	OutputCa	CaseTy	StepTy	StepNu	P	P Ab	Mr	SF
mm	Text	Text	Text	Unitless	N	N	N-mm	
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	62	-7030.71	7030.71	1.38	0.936107
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	63	-7144.11	7144.11	1.69	0.953477
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	64	-7257.51	7257.51	1.7	0.968479
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	65	-7370.91	7370.91	2.19	0.98727
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	66	-7484.3	7484.3	2.98	1.008427
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	67	-7597.7	7597.7	4.15	1.032585
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	68	-7711.1	7711.1	7.11	1.070871
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	69	-7824.5	7824.5	20.92	1.194796
258.25	P-DELTA	NonStatic	Step	70	-7937.9	7937.9	-24.75	0.849247

5.4.2 Permodelan SAP2000 Batang Tekan Variasi 3 Baut

Permodelan batang tekan variasi 3 baut pada SAP2000 tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan permodelan batang tekan variasi baut 1 seperti yang telah dijabarkan pada sub bab 5.4.1 Permodelan SAP2000 Batang Tekan Variasi 1 Baut. Perbedaan mendasar terdapat pada tahap permodelan sendi karena pada batang tekan variasi 3 baut menggunakan sendi jepit di kedua ujung batang tekan. Permodelan sendi jepit-jepit pada ujung batang tekan dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 5.34 Permodelan Sendi Pada Ujung Batang Tekan Variasi 3 Baut, (A) Atas (B) Bawah

Adanya ketidaksempurnaan geometri pada elemen benda uji maka dilakukan perhitungan beban notional yang akan memberika efek destabilizing pada permodelan SAP2000. Perhitungan beban notional dapat dilakukan dengan persamaan di bawah ini.

$$N_i = 0.002 \times \phi P_n$$

$$N_i = 0.002 \times 8,1612$$

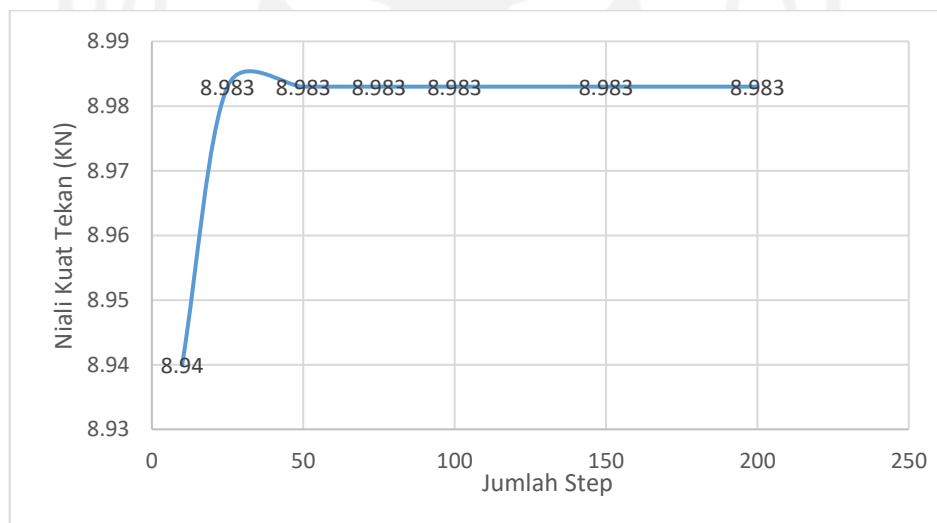
$$N_i = 16,323 \text{ KN}$$

Beban notional ini akan diaplikasikan kedalam batang tekan dengan *direct analysis method*. Pada *direct analysis method* tidak dikenal istilah kolom saja. Oleh sebab itu stabilitas ptofil terhadap tekuk local juga perlu dilihat dengan memberikan kuat lentur nominal pada sumbu lemah batang tekan.

Pada permodelan SAP2000 pada batang tekan variasi 3 baut dilakukan pada beberapa factor yang dianggap perlu dilakukan kalibrasi. Faktor-faktor tersebut diantaranya yaitu jumlah step, factor reduksi dan nilai tb. *Trial and error* dilakukan untuk memodelkan batang tekan pada SAP2000 sesuai dengan hasil yang terdapat pada saat pengujian laboratorium.

1. *Trial and error* Jumlah Step

Trial and error jumlah step dilakukan dengan melakukan percobaan dengan mengganti jumlah step ke nilai 10, 25, 50, 75, 100, 150, dan 200. Parameter nilai kalibrasi yang akan diambil yaitu apabila nilai kuat teka pada jumlah step tertentu mulai stabil atau tidak berubah dengan signifikan.



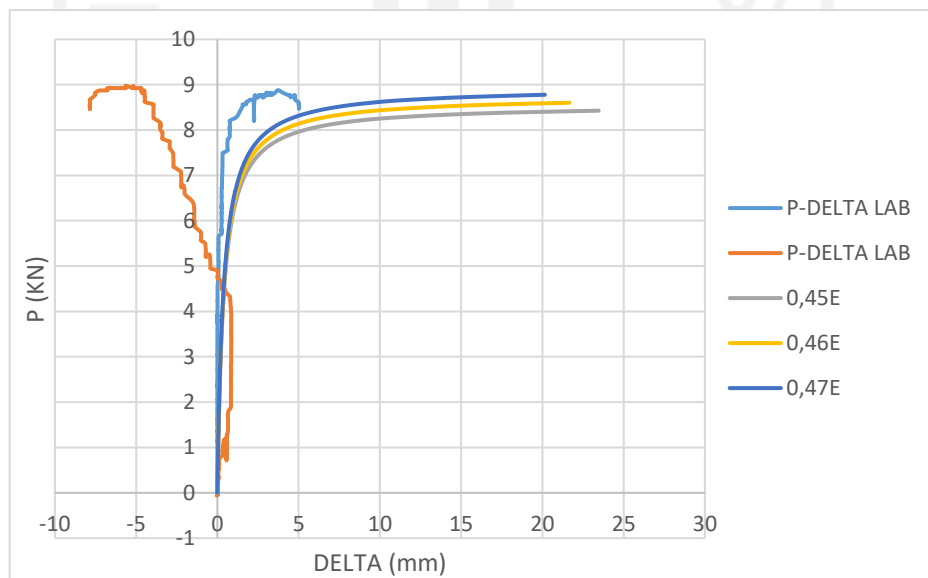
Gambar 5.35 Grafik Hubungan *Trial and Error* Jumlah Step dengan Nilai Kuat Tekan

Tabel 5.7 Perbandingan Jumlah Step dan Nilai Kuat Tekan Batang Tekan Variasi 1 Baut

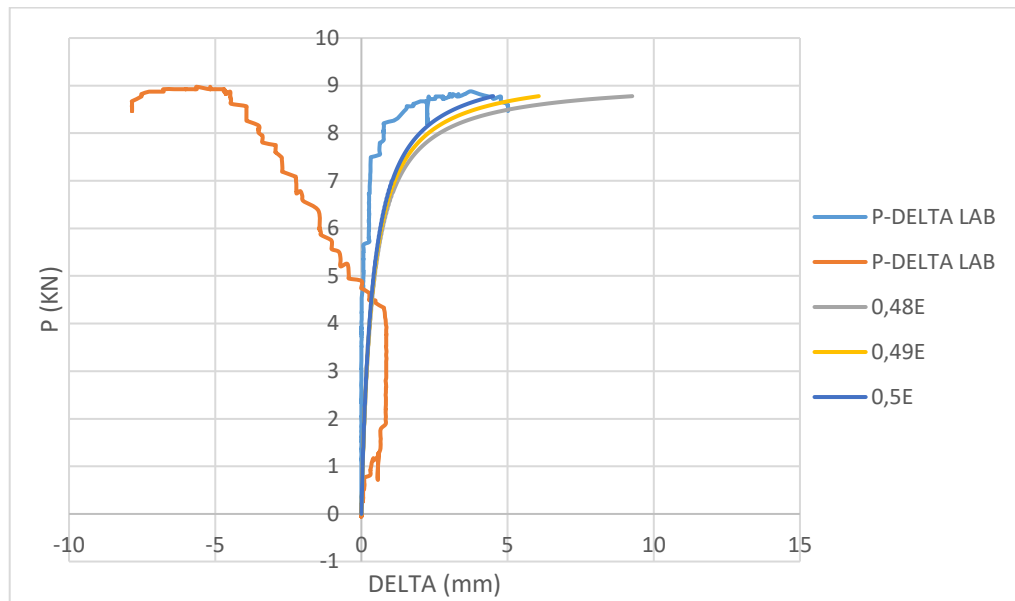
Jumlah Step	Nilai Kuat Tekan (KN)
10	8.94
25	8.983
50	8.983
75	8.983
100	8.983
150	8.983
200	8.983

2. *Trial and Error* Kekakuan Reduksi

Trial and error nilai kekakuan reduksi pada permodelan batang tekan variasi 3 baut pada SAP2000 dilakukan dengan cara mereduksi nilai EI^- . *Trial and error* nilai kekakuan reduksi dilakukan hingga SAP2000 menghasilkan grafik P-Delta yang identic dengan hasil uji tekan batang pada pengujian laboratorium.



Gambar 5.36 Grafik Perbandingan P-Delta Pengujian Laboratorium dengan P-Delta dengan *Trial and Error* pada Nilai τb



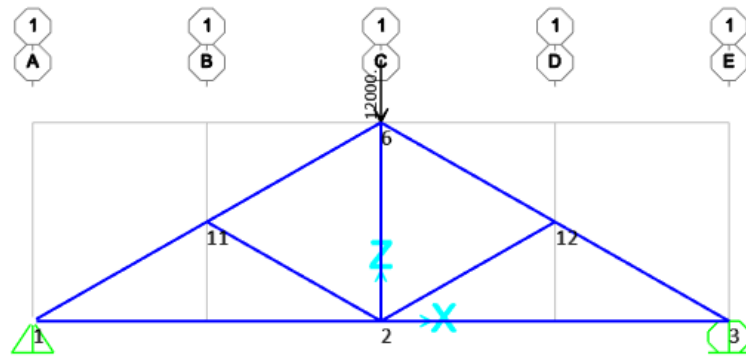
Gambar 5.37 Grafik Perbandingan P-Delta Pengujian Laboratorium dengan P-Delta dengan *Trial and Error* pada Nilai τb

5.5 Analisis Kapasitas Rangka Atap pada *Direct Analysis Method* SAP2000

Analisis kapasitas rangka atap pada SAP2000 dilakukan untuk mendapatkan kapasitas tekan rangka atap dengan menggunakan *direct analysis method*. Dalam hal ini dilakukan permodelan terlebih dahulu menggunakan SAP2000 untuk rangka atap.

5.5.1 Analisis Kapasitas Rangka Atap Variasi 1 Baut

Analisis rangka atap variasi 1 baut guna menggambarkan permodelan *Direct Analysis Method* pada SAP2000.



Gambar 5.38 Permodelan SAP2000 rangka atap variasi 1 baut

1. Data penampang rangka atap pada SAP2000 variasi 1 baut

$$L = 2000 \text{ mm}$$

$$H = 1037 \text{ mm}$$

$$b = 13,82667 \text{ mm}$$

$$h = 28,78833 \text{ mm}$$

$$A_g = 126,144 \text{ mm}^2$$

$$I_y = 2673.8244 \text{ mm}^4$$

$$R_y = 5,4799 \text{ mm}$$

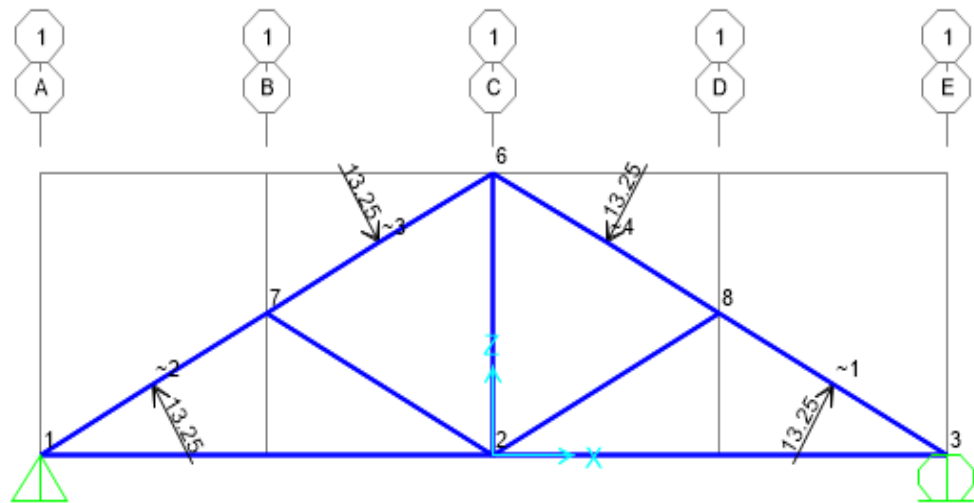
2. Beban notional rangka atap pada SAP2000 variasi 1 baut

Beban notional yang ada pada setiap batang tekan diberikan berdasarkan perhitungan berikut ini

$$N_i = 0,002 \times \phi P_n$$

$$N_i = 0,002 \times 6,8 \text{ KN}$$

$$N_i = 13,6 \text{ N}$$



Gambar 5.39 Beban notional pada rangka atap variasi 1 baut pada SAP2000

3. Reduksi kekakuan

Kekakuan pada profil baja dipengaruhi dengan adanya sifat leleh setempat yang menimbulkan berkurangnya kekuatan yang ada pada profil baja. Maka dari itu dilakukan reduksi kekakuan guna mendapatkan nilai kekakuan yang sesuai dengan pengujian laboratorium.

$$Pr < 0,5 Py \text{ maka, } \tau_b = 1$$

$$Py = \frac{83,78}{254}$$

$$Py = 21,28012 \text{ KN}$$

$$Pr < 0,5 Py$$

$$7,599 < 10,64$$

$$\tau_b = 1$$

$$EI^* = \phi \times \tau_b \times 200000$$

$$EI^* = \phi \times 1 \times 200000$$

$$EI^* = 160000 \text{ MPa}$$

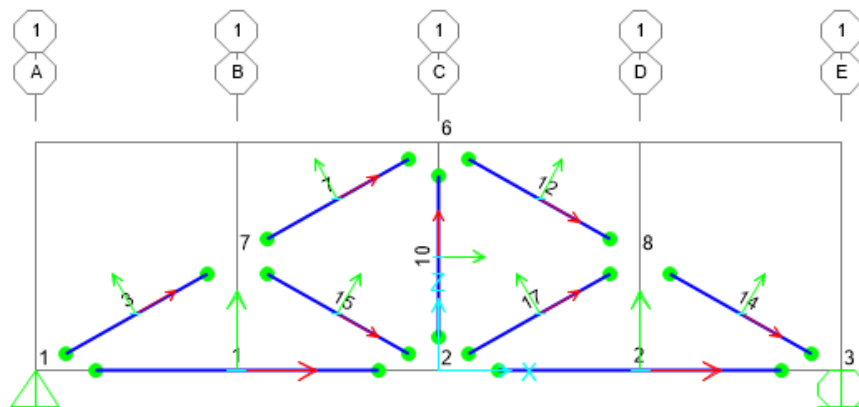
Dari hasil kekakuan reduksi yang telah dihitung kemudian diaplikasikan ke dalam SAP2000. Tetapi, hasil perhitungan tersebut menghasilkan grafik P-Delta rangka atap baut 1 jauh dari perkiraan nilai kuat tekan. Oleh

karena itu, dilakukan beberapa kali kalibrasi nilai reduksi kekakuan sehingga didapatkan nilai EI sebesar 180000 dan diaplikasikan kembali ke aplikasi SAP2000.

Gambar 5.40 Kalibrasi Nilai $EI = 180000$ MPa

4. Releases/Partial Fixity

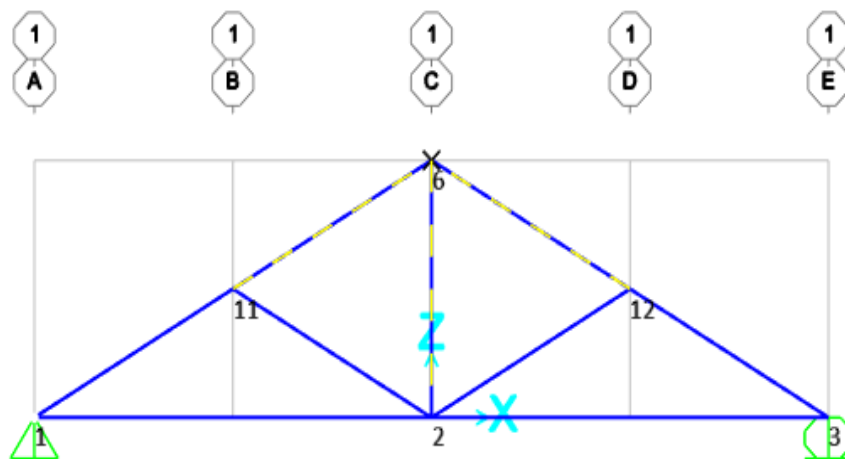
Tahap release/partial fixity dimaksudkan untuk memodelkan rangka atap variasi satu baut menggunakan sendi sempurna pada sambungan antar batang.



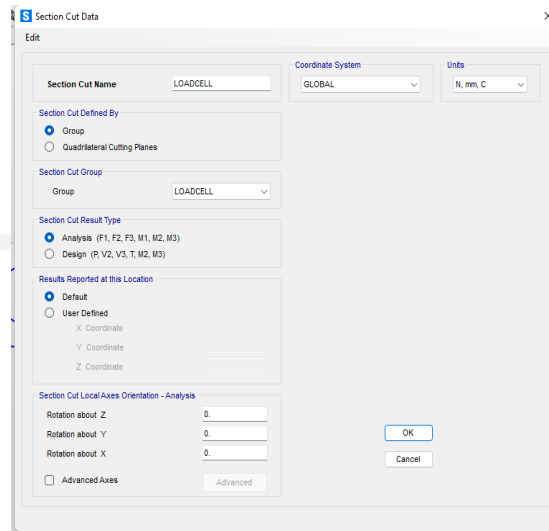
Gambar 5.41 Releases/Partial Fixity

5. Pemodelan section cut pembebanan

Permodelan section cut pada SAP2000 dilakukan untuk mendapatkan nilai kapasitas rangka atap dengan lebih mudah. Di bawah merupakan batang-batang yang digroup untuk diberikan section cut



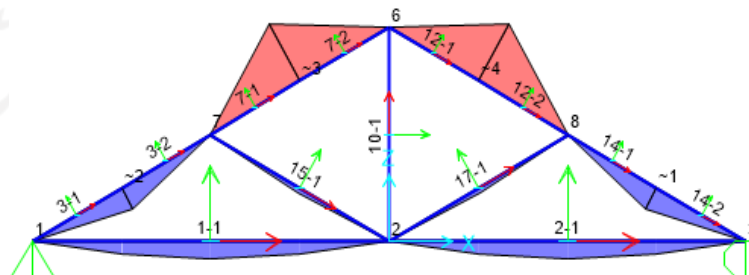
Gambar 5.42 Grouping pada Joint dan Batang Tekan Rangka Atap

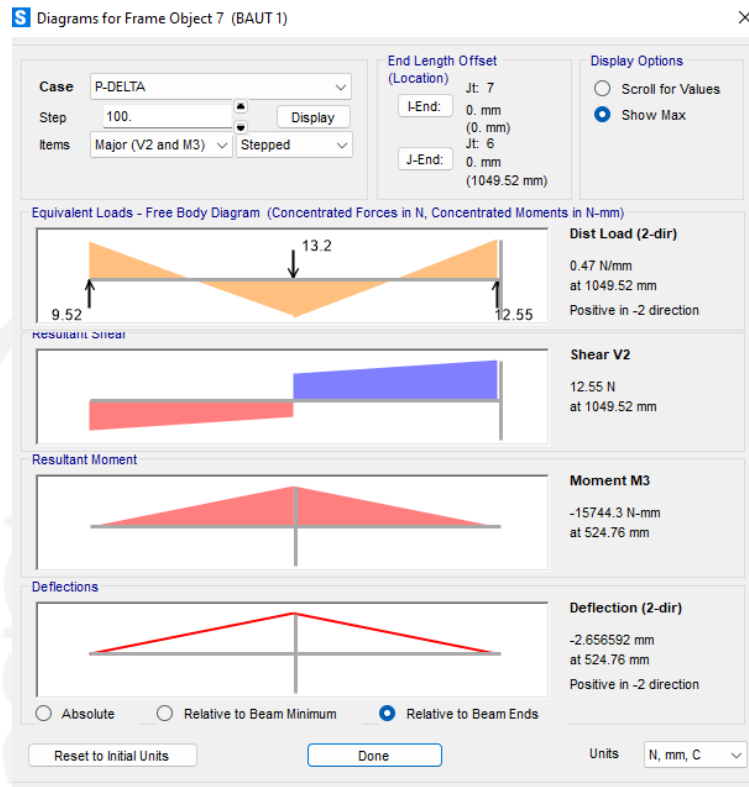


Gambar 5.43 Section Cut Data Beban Loadcell pada Rangka Atap

6. Penentuan Batang Gagal Tekuk

Pada tahap penentuan batang gagal tekuk perlu dilakukan running SAP2000 pada permodelan rangka atap variasi 1 baut untuk dapat melihat bending moment yang terjadi pada rangka atap. Dalam hal ini bending moment yang terbesar akan disimpulkan menjadi batang gagal tekuk. Bending moment diagram dari hasil running SAP2000 pada rangka atap variasi 1 baut dapat dilihat pada gambar di bawah ini



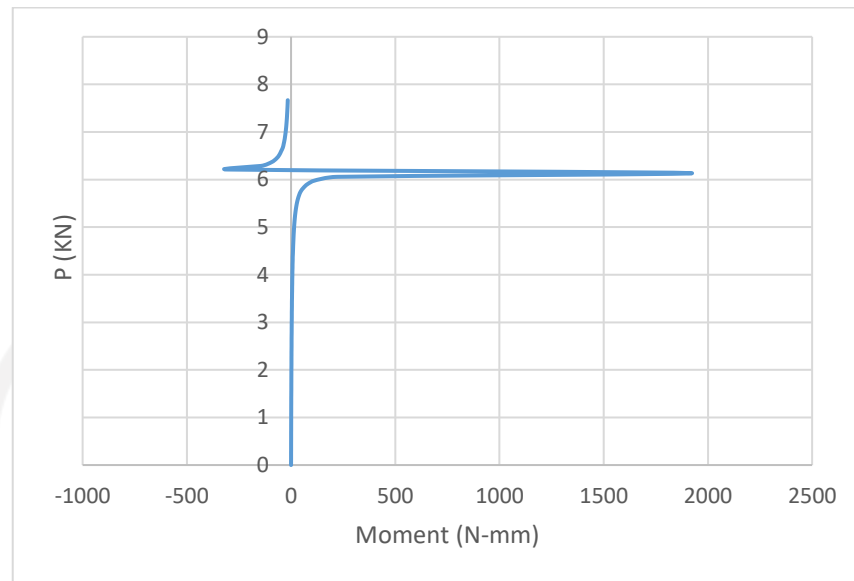


Gambar 5.45 Moment P-Delta pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 1 Baut

Dari grafik tersebut didapatkan bahwa batang gagal tekuk pada rangka atap variasi 1 baut terdapat pada batang tekan bagian bawah dengan nilai moment sebesar 15744,3 Nmm.

7. Perilaku Tekuk Rangka Atap

Dengan didaptkannya batang tekuk yang terjadi pada rangka atap maka hal yang selanjutnya dilakukan yaitu mendapatkan grafik P-Delta pada batang gagal tekuk tersebut. Adapun grafik P-Delta pada batang gagal tekuk pada rangka atap variasi 1 baut dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 5.46 Grafik P-Delta Batang Gagal Tekuk pada Rangka Atap Variasi 1 Baut

Dari grafik P-Delta yang dihasilkan didapatkan bahwa beban yang dapat diterima batang gagal tekuk sebelum mencapai tekuknya yaitu sebesar 6,135 KN.

8. Nilai kuat nominal penampang

Nilai kuat nominal penampang dicari untuk mendapatkan nilai kuat tekan yang masuk dalam batas nilai safety factor yang telah ditentukan dalam SNI 1729:2020. Adapun perhitungan nilai safety factor untuk mendapatkan kuat nominal penampang sebagai berikut.

$$\frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{5,597}{7,599} + \frac{8}{9} \left(\frac{33,14}{112,618} \right) \leq 1,0$$

$$0,998 \leq 1,0$$

Berikut adalah table rekapitulasi dari perhitungan mencari kuat nominal penampang yang masuk dalam safety factor.

Tabel 5.8 Rekapitulasi Kuat Penampang pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 1 Baut

Frame	Statio	OutputCa	CaseTy	StepTy	StepNu	P	V2	M3	FrameEle	ElemStati	SF
Text	mm	Text	Text	Text	Unitless	KN	KN	KN-mm	Text	mm	
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	70	-5.367	5.367	22.68	7-1	524.76	0.88529
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	71	-5.444	5.444	25.43	7-1	524.76	0.917128
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	72	-5.521	5.521	28.83	7-1	524.76	0.954097
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	73	-5.597	5.597	33.14	7-1	524.76	0.998118
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	74	-5.674	5.674	38.78	7-1	524.76	1.052767
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	75	-5.751	5.751	46.49	7-1	524.76	1.123755
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	76	-5.827	5.827	59.64	7-1	524.76	1.237549
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	77	-5.904	5.904	78.99	7-1	524.76	1.400411
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	78	-5.981	5.981	114.86	7-1	524.76	1.693665
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	79	-6.057	6.057	219.76	7-1	524.76	2.531639
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	80	-6.135	6.135	1920.69	7-1	524.76	15.9673
7	524.76	P-DELTA	NonStatic	Step	81	-6.211	6.211	-304.73	7-1	524.76	-1.58788

9. Kapasitas Tekan Rangka Atap Variasi 1 baut

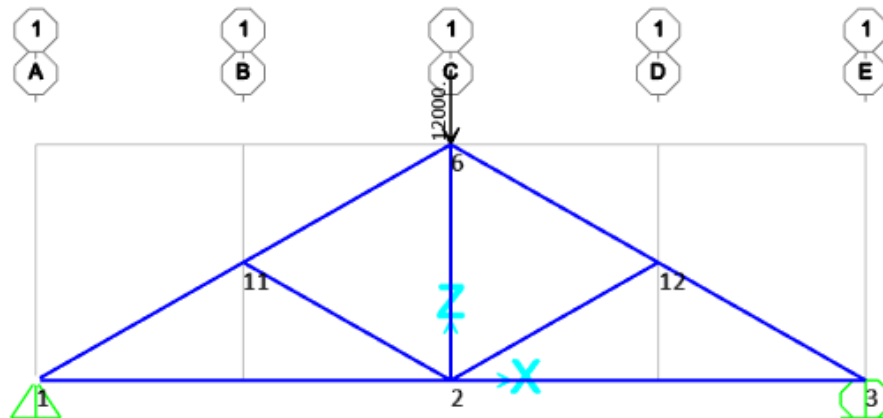
Kapasitas tekan rangka atap didapatkan dengan mengetahui beban maksimal yang bekerja pada rangka atap itu sendiri. Setelah sebelumnya diperoleh dari perhitungan kuat nominal penampang. Maka untuk memperoleh nilai kuat tekan yang bekerja pada rangka dapat dilihat dari step yang bekerja pada kuat nominal penampang. Setelah itu, dilihat pada hasil grafik pada beban loadcell yang diperoleh dari running SAP2000. Berikut adalah hasil yang diperoleh output beban hasil DAM SAP2000 dari section cut loadcell pada step ke-73 yaitu sebesar 5,745 KN.

Tabel 5.9 Hasil Prediksi Kuat Tekan pada Permodelan SAP2000 Rangka Atap Variasi 1 Baut

TABLE: Section Cut Forces - Analysis					
SectionCut	OutputCase	CaseType	StepType	StepNum	P
Text	Text	Text	Text	Unitless	N
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	66	-4950.05
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	67	-5025.06
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	68	-5100.07
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	69	-5175.08
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	70	-5250.1
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	71	-5325.12
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	72	-5400.15
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	73	-5475.2
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	74	-5550.26
BEBAN LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	75	-5625.36

5.5.2 Analisis Kapasitas Rangka Atap Variasi 3 Baut

Analisis rangka atap variasi 1 baut guna menggambarkan permodelan Direct Analysis Method pada SAP2000.



Gambar 5.47 Permodelan SAP2000 rangka atap variasi 1 baut

1. Data penampang rangka atap pada SAP2000 variasi 3 baut

$$\begin{aligned}
 L &= 2000 \text{ mm} \\
 H &= 1033 \text{ mm} \\
 b &= 13,82667 \text{ mm} \\
 h &= 28,78833 \text{ mm} \\
 A_g &= 82,773 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$I_y = 2673,8244 \text{ mm}^4$$

$$R_y = 5,7899 \text{ mm}$$

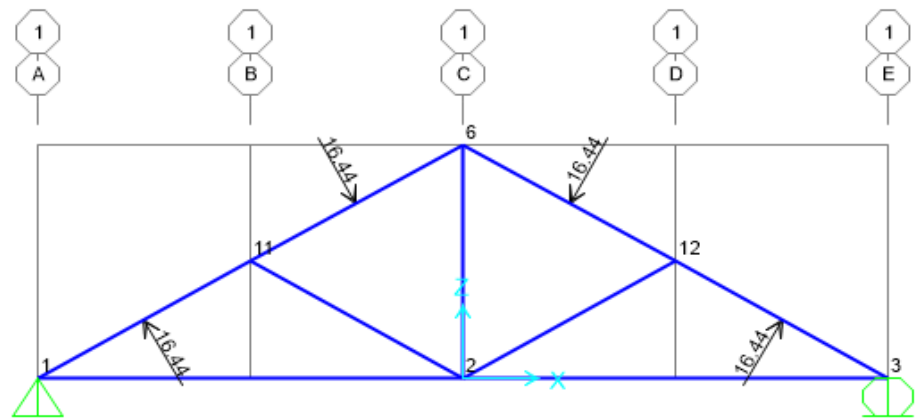
2. Beban notional rangka atap pada SAP2000 variasi 3 baut

Beban notional yang ada pada setiap batang tekan diberikan berdasarkan perhitungan berikut ini

$$N_i = 0,002 \times \phi P_n$$

$$N_i = 0,002 \times 8,078 \text{ KN}$$

$$N_i = 16,4413 \text{ N}$$



Gambar 5.48 Beban notional pada rangka atap variasi 1 baut pada SAP2000

3. Reduksi kekakuan

Kekuan pada profil baja dipengaruhi dengan adanya sifat leleh setempat yang menimbulkan berkurangnya kekuatan yang ada pada profil baja. Maka dari itu dilakukan reduksi kekakuan guna mendapatkan nilai kekakuan yang sesuai dengan pengujian laboratorium.

$$Pr < 0,5 Py \text{ maka, } \tau b = 1$$

$$Py = \frac{82,773}{254}$$

$$Py = 21,0243 \text{ KN}$$

$$Pr < 0,5 Py$$

$$8,976 < 10,5122$$

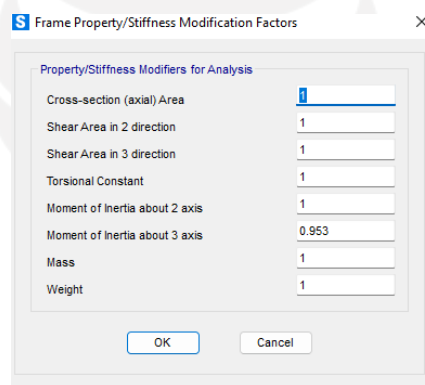
$$\tau b = 1$$

$$EI = \varphi \times \tau b \times 200000$$

$$EI = \varphi \times 1 \times 200000$$

$$EI = 160000 \text{ MPa}$$

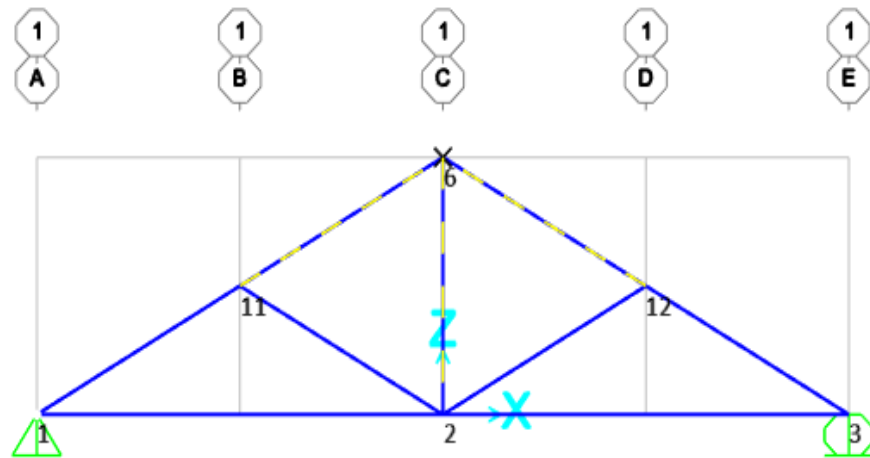
Dari hasil kekakuan reduksi yang telah dihitung kemudian diaplikasikan ke dalam SAP2000. Tetapi, hasil perhitungan tersebut menghasilkan grafik P-Delta rangka atap baut 3 jauh dari perkiraan nilai kuat tekan. Oleh karena itu, dilakukan beberapa kali kalibrasi nilai reduksi kekakuan sehingga didapatkan nilai τb sebesar 0,953 dan diaplikasikan kembali ke aplikasi SAP2000.



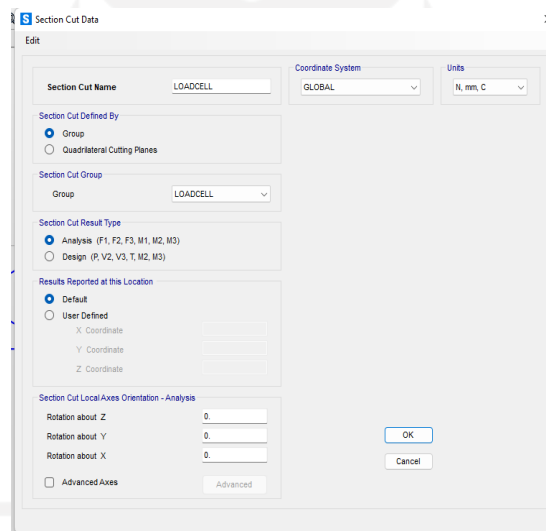
Gambar 5.49 Kalibrasi Nilai $\tau b = 0,953$

4. Pemodelan section cut pembebanan

Permodelan section cut pada SAP2000 dilakukan untuk mendapatkan nilai kapasitas rangka atap dengan lebih mudah. Di bawah merupakan batang-batang yang digroup untuk diberikan section cut



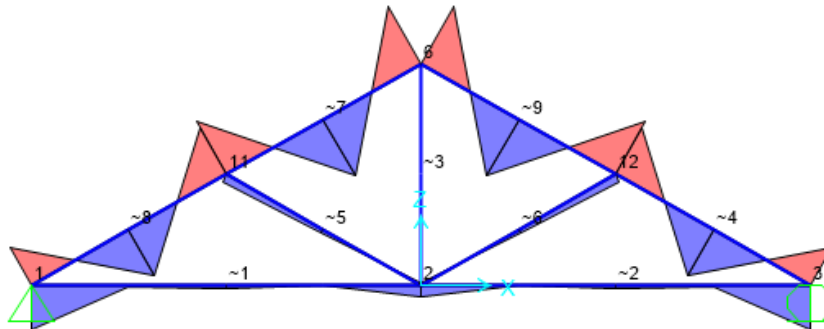
Gambar 5.50 Grouping pada Joint dan Batang Tekan Rangka Atap



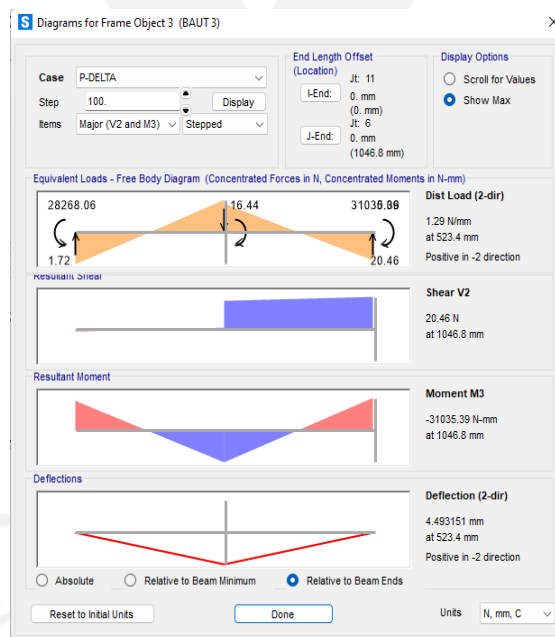
Gambar 5.51 Section Cut Data Beban Loadcell pada Rangka Atap

5. Penentuan Batang Gagal Tekuk

Pada tahap penentuan batang gagal tekuk perlu dilakukan running SAP2000 pada permodelan rangka atap variasi 3 baut untuk dapat melihat bending moment yang terjadi pada rangka atap. Dalam hal ini bending moment yang terbesar akan disimpulkan menjadi batang gagal tekuk. Bending moment diagram dari hasil running SAP2000 pada rangka atap variasi 3 baut dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar 5.52 Bending Moment Diagram Rangka Atap Variasi 3 Baut pada SAP2000

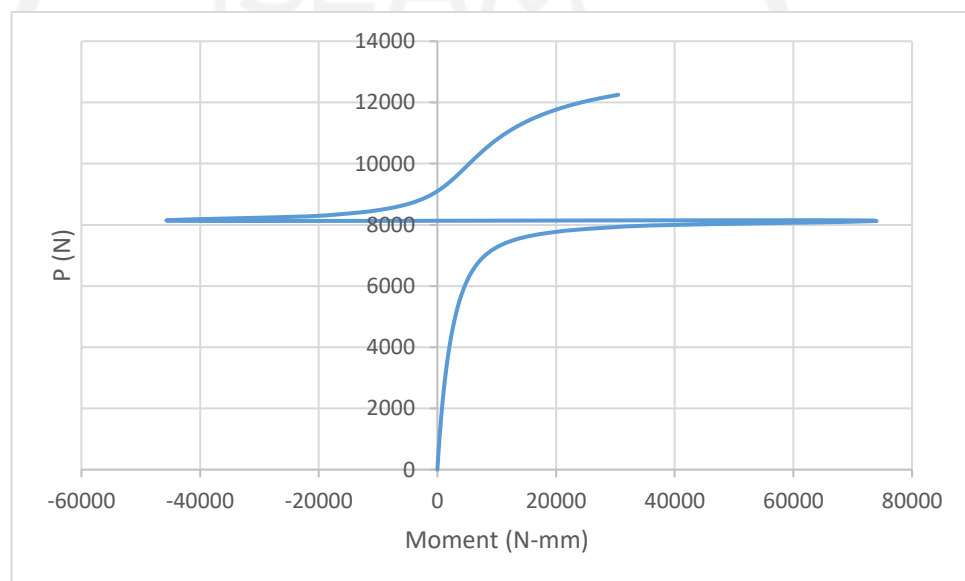


Gambar 5.53 Moment P-Delta pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 3 Baut

Dari grafik tersebut didapatkan bahwa batang gagal tekuk pada rangka atap variasi 3 baut terdapat pada batang tekan nomor 9 dengan nilai moment sebesar 31035,39 N-mm.

6. Perilaku Tekuk Rangka Atap

Dengan didapatkannya batang tekuk yang terjadi pada rangka atap maka hal yang selanjutnya dilakukan yaitu mendapatkan grafik P-Delta pada batang gagal tekuk tersebut. Adapun grafik Moment P-Delta pada batang gagal tekuk pada rangka atap variasi 3 baut dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 5.54 Grafik P-Delta Batang Gagal Tekuk pada Rangka Atap Variasi 3 Baut

Dari grafik P-Delta yang dihasilkan didapatkan bahwa beban yang dapat diterima batang gagal tekuk sebelum mencapai tekuknya yaitu sebesar 8146,14 N.

7. Nilai kuat nominal penampang

Nilai kuat nominal penampang dicari untuk mendapatkan nilai kuat tekan yang masuk dalam batas nilai safety factor yang telah ditentukan dalam SNI 1729:2020. Adapun perhitungan nilai safety factor untuk mendapatkan kuat nominal penampang sebagai berikut.

$$\frac{Pr}{Pc} + \frac{8}{9} \left(\frac{Mrx}{Mcx} + \frac{Mry}{Mcy} \right) \leq 1,0$$

$$\frac{7464}{8161,4} + \frac{8}{9} \left(\frac{12293,67}{112617,7} \right) \leq 1,0$$

$$1,01 \leq 1,0$$

Berikut adalah table rekapitulasi dari perhitungan mencari kuat nominal penampang yang masuk dalam safety factor.

Tabel 5.10 Rekapitulasi Kuat Penampang pada Batang Gagal Tekuk Rangka Atap Variasi 1 Baut

Frame	Statio	OutputCa	CaseTy	StepTy	StepNu	P	Pr	M3	ElemStati	SF
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	53	-6479.56	6479.56	5832.64	523.4	0.839964
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	54	-6602.18	6602.18	6239.92	523.4	0.858203
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	55	-6724.86	6724.86	6703.36	523.4	0.876893
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	56	-6847.63	6847.63	7238.13	523.4	0.896157
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	57	-6970.51	6970.51	7865.68	523.4	0.916166
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	58	-7093.53	7093.53	8617.42	523.4	0.937173
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	59	-7216.77	7216.77	9541.25	523.4	0.959565
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	60	-7340.32	7340.32	10729.28	523.4	0.984081
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	61	-7464.33	7464.33	12293.67	523.4	1.011623
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	62	-7589.1	7589.1	14493.72	523.4	1.044276
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	63	-7715.28	7715.28	17874.01	523.4	1.086417
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	64	-7844.42	7844.42	23708.52	523.4	1.148292
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	65	-7981.42	7981.42	36094.44	523.4	1.26284
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	66	-8146.14	8146.14	71549.85	523.4	1.562871
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	67	-8130.4	8130.4	-43296.63	523.4	0.654462
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	68	-8278.39	8278.39	-21746.62	523.4	0.842689
3	523.4	P-DELTA	NonStatic	Step	69	-8411.2	8411.2	-12847.34	523.4	0.929204

8. Kapasitas Tekan Rangka Atap Variasi 3 baut

Kapasitas tekan rangka atap didapatkan dengan mengetahui beban maksimal yang bekerja pada rangka atap itu sendiri. Setelah sebelumnya diperoleh dari perhitungan kuat nominal penampang. Maka untuk memperoleh nilai kuat tekan yang bekerja pada rangka dapat dilihat dari step yang bekerja pada kuat nominal penampang. Setelah itu, dilihat pada hasil grafik pada beban loadcell yang diperoleh dari running SAP2000. Berikut adalah hasil yang diperoleh output beban hasil DAM SAP2000 dari section cut loadcell pada step ke-53 yaitu sebesar 6,006 KN.

Tabel 5.11 Hasil Prediksi Kuat Tekan pada Permodelan SAP2000 Rangka Atap Variasi 3 Baut

TABLE: Section Cut Forces - Analysis						
SectionCut	OutputCase	CaseType	StepType	StepNum	F3	P
Text	Text	Text	Text	Unitless	N	N
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	54	-6480	6480
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	55	-6600	6600
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	56	-6720	6720
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	57	-6840	6840
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	58	-6960.01	6960.01
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	59	-7080.01	7080.01
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	60	-7200	7200
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	61	-7320	7320
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	62	-7440.01	7440.01
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	63	-7560	7560
LOADCELL	P-DELTA	NonStatic	Step	64	-7680.01	7680.01

Hasil ratio yang didapatkan tidak memenuhi syarat dari SNI 1729.2020 dimana nilai ratio harus $\leq 1,0$. Maka dari itu, ditentukan step yang perhitungan dalam mencari safety factorya dengan nilai $\leq 1,0$.

5.6 Pembahasan

Pembahasan yang didapatkan setelah dilakukannya penelitian ialah sebagai berikut

1. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil perbandingan yang dapat dilihat pada Table 5.12 Perbandingan Nilai Kuat Tekan Profil *Hollow Square Section*.

Table 5.12 Perbandingan Nilai Kuat Tekan Profil *Hollow Square Section*

METODE	NILAI KUAT TEKAN	
	1 BAUT	3 BAUT
<i>Effective Length Method</i>	6,708	8,161
<i>Direct Analysis Method</i>	7,484	8,778
Pengujian Laboratorium	7,599	8,976

Dari hasil yang telah didapatkan diketahui bahwa nilai kuat tekan batang pada *effective length method* dan lebih kecil dibandingkan hasil pengujian laboratorium. hal ini dapat terjadi dikarenakan beberapa factor, salah satunya kemungkinan terjadi friksi pada baut dan sambungan plat, sehingga pada saat pengujian batang tekan variasi baut 1 yang awalnya didesain untuk menggunakan sendi sempurna pada kedua ujungnya berubah menjadi sendi jepit. Pada *direct analysis method* memiliki nilai yang mendekati pengujian laboratorium karena pada permodelan didesain mendekati hasil pengujian laboratorium dengan beberapa *trial and error* pada permodelannya. *Direct analysis method* memiliki nilai yang lebih kecil daripada pengujian laboratorium dikarenakan beban notional pada permodelan batang tekan diletakkan pada tengah bentang, sehingga nilai kuat tekan dari *direct analysis method* memiliki nilai yang lebih konservatif. Nilai error yang didapatkan dari penelitian ini dapat dilihat pada table 5.13.

Tabel 5.13 Nilai Error Terhadap Pengujian Laboratorium

METODE	NILAI ERROR (%)	
	1 BAUT	3 BAUT
<i>Effective Length Method</i>	11,725	9,097
<i>Direct Analysis Method</i>	1,513	2,205

- Untuk rangka atap, nilai kuat tekan rangka atap variasi baut 1 senilai 5,597 KN lebih kecil dibandingkan nilai kuat tekan rangka atap variasi baut 3 yaitu sebesar 7,320 KN. Hal tersebut dapat terjadi akibat pada rangka atap variasi baut 1 dilakukan *release / partial fixity* yang membuat rangka atap baut variasi 1 baut tidak memiliki efek penahan momen pada sambungannya. Selain itu, kalibrasi pada analisis juga berpengaruh pada hasil kuat tekan kedua variasi. Untuk permodelan rangka atap variasi 1 nilai reduksi kekakuan dimodelkan dengan nilai $\tau_b = 1,0$ sedangkan rangka atap variasi 3 baut nilai reduksi kekakuan dimodelkan dengan nilai $\tau_b = 0,953$. Hal ini berarti rangka atap variasi 3 baut lebih mampu menahan momen sehingga diperlukan reduksi kekakuan yang

lebih besar agar dapat memodelkan tekuk pada DAM SAP 2000. Berikut adalah table perbandingan hasil prediksi kuat tekan rangka atap variasi 1 baut dan 3 baut dengan *direct analysis method*.

Tabel 5.14 Perbandingan Hasil Prediksi Kuat Tekan Rangka Atap dengan DAM

Sampel	Nilai Kuat Tekan
Rangka atap variasi 1 baut	5,597 KN
Rangka atap variasi 3 baut	7,320 KN

3. Pengaruh jumlah baut sambungan terhadap prediksi kuat tekan menghasilkan peningkatan nilai yang cukup signifikan yaitu 17,42%. Hal ini terjadi karena pada rangka atap baut 3 dimodelkan mampu menahan momen sehingga rangka atap lebih sulit terjadi tekuk, akibat nilai kuat tekan yang dihasilkan meningkat.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari hasil perbandingan antara *effective length method*, *direct analysis method*, dan pengujian laboratorium dapat disimpulkan sebagai berikut

1. Pada *effective length method* nilai kuat tekan yang dihasilkan untuk batang tekan variasi 1 baut sebesar 6,708 KN sedangkan batang tekan variasi 3 baut sebesar 8,161 KN. Untuk pengujian laboratorium nilai kuat tekan yang dihasilkan untuk batang tekan variasi 1 baut sebesar 7,599 KN sedangkan batang tekan variasi 3 baut sebesar 8,976 KN. Pada *direct analysis method* nilai kuat tekan yang dihasilkan untuk batang tekan variasi 1 baut sebesar 7,484 KN sedangkan batang tekan variasi 3 baut sebesar 8,778 KN
2. Perbedaan pada permodelan SAP2000 pada rangka atap variasi 1 baut rangka atap variasi 3 baut terdapat pada kapasitas tekan yang dihasilkan. Pada rangka atap variasi 1 baut memiliki nilai kuat tekan sebesar 5,597 KN sedangkan untuk rangka atap variasi 3 baut memiliki nilai kuat tekan sebesar 7,320 KN. Hal ini terjadi karena pada rangka atap variasi 1 baut dimodelkan dengan fiur *release partial fixity* sehingga permodelan rangka atap variasi 3 baut mampu menahan momen yang lebih besar dibandingkan rangka atap variasi 1 baut
3. Pengaruh jumlah baut pada permodelan batang tekan maupun rangka atap kedua variasi memiliki perbedaan pada nilai kuat tekan. Karena rangka atap variasi 3 baut lebih mampu menahan momen.

6.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian yang menggunakan tema yang sama kedepannya ialah sebagai berikut.

1. Dalam pembelian sampel profil *hollow square section* dilakukan pengecekan secara detail terkait dimensi profil tersebut
2. Melakukan pengecekan Kembali terhadap sambungan baut jika dimodelkan sendi sempurna agar tidak terjadinya friksi antar baut dan sambungan sehingga tidak ada penahan momen.
3. Menambahkan sampel pada pengujian untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

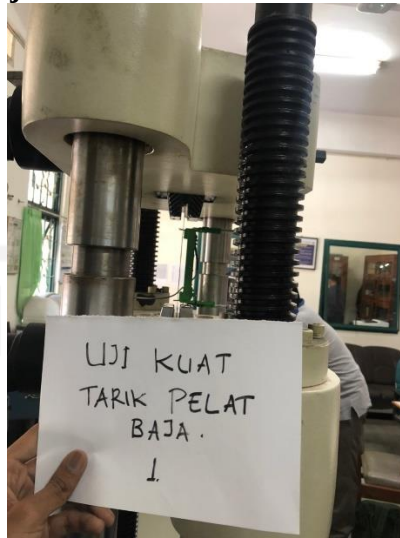
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung SNI 03-1729-2002. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2020. Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural SNI 1729-2020. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2015. Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural SNI 03-1729-2015. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 1998. Batang Uji Tarik Untuk Bahan Logam SNI 07-0371-1998. BSN. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 1989. Cara Uji Mekanis Mur & Baut SNI 06-0571-1989 ICS. BSN. Jakarta.
- AISC.(2010). “An American National Standard ANSI/AISC 360-10 : Load Specification for Structural Steel Buildings”, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, Illinois
- Dewobroto, W., (2014) : “Rekayasa Komputer dalam Analisis dan Desain Struktur Baja Studi Kasus Direct Analysis Method (AISC 2010)”, Seminar dan Lokakarya Rekayasa Struktur, Universitas Kristen Petra.
- Dewobroto, W.. 2015. Struktur Baja – Perilaku, Analisis, & Desain – AISC 2010. Lumina Press. Jakarta.
- Fransiska(2015), Analisis dan Desain dan Perencanaan Struktur *Scaffolding* sebagai Alat Penyokong *Bekisting* Beton, Universitas Sumatera Utara, Indonesia.
- Setiawan, Agus (2008).” *Perencanaan struktur baja dengan metode LRFD*”, PT. Penerbit Erlangga, Semarang.
- Salmon, C.G., John E. Johnson dan Faris A.Malhas.(2009).”*Steel Structures : Design and Behaviour 4th Ed*”, Pearson Education, Inc.
- Ivanfebraja, Teruna, DR., (2012) : “Kajian Stress Ratio pada Analysis Method dan Effective Length Method Sesuai dengan AISC 2010”. Jurnal, Universitas Sumatera Utara

- Rafflesia. Eryana., (2017): “Studi Perbandingan *Stress Ratio* dengan ELM (*Effective Length Method*) dan DAM (*Direct Analysis Method*) Bangunan Workshop pada Proyek di Cirebon”. Jurnal, Universitas Muhammadiyah Jakarta.
- Sugawa. Aryadhana. Arif., (2017): “Evaluasi *Stress Ratio* dengan Metode Panjang Efektif dan Metode Perencanaan Langsung pada Portal Gable”. Jurnal, Universitas Sam Ratulangi Manado.
- Talim. Michael., (2015) : Analisis Pengaruh Kuat tekuk Pada Sistem Perancah Bangunan dengan Metode Analisa Langsung (*Direct Analysis Method*). Jurnal, Universitas Sumatera Utara





Lampiran 1. Set Up Pengujian Kuat Tarik



Lampiran 2. Set Up Pengujian Kuat Geser Baut



Lampiran 3. Set Up Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 1 Baut



Lampiran 4. Set Up Pengujian Kuat Tekan Profil Variasi 3 Baut



Lampiran 5. Grafik Rekapitulasi P-Delta Pengujian Kuat Tekan Profil Pengujian Labiratorium

