TUGAS AKHIR

ANALISIS KAPASITAS SISA JEMBATAN SETELAH MASA LAYAN (STUDI KASUS JEMBATAN KA PANGUKAN)

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

ADISTI REGITA PRAMESTI

20511447

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

PROGRAM SARJANA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

2025

TUGAS AKHIR

ANALISIS KAPASITAS SISA JEMBATAN SETELAH MASA LAYAN (STUDI KASUS JEMBATAN KA PANGUKAN)

Disusun oleh:

Adisti Regita Parmesti
20511447

Telah diterima sebagai satu persyaratan untuk
Memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 26 Februari 2025

Oleh Dewan Penguji

Penguji 1	Penguji 2	Penguji 3
Astriana Hardawati, S.T., M.Eng	**Elvis Saputra S.T., M.T.**	**Ir. Suharyatma, M.T.**
NIK: 165111301	**NIK: 205111302**	**NIK: 865110201**

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

10/3 2025

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM.
NIK: 095110101

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian 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 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 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, 26 Februari 2025

Yang membuat pernyataan,



Adisti Regita Pramesti

(20511447)

LEMBAR DEDIKASI



Tugas Akhir ini didedikasikan untuk kedua orang tua saya, yang telah membimbing, merawat, dan memberikan segala yang dimiliki dengan penuh kasih sayang. Terima kasih atas doa, dukungan, dan perjuangan yang telah mengantarkan saya hingga ke titik ini. Tak lupa untuk saudara kandung saya yang selalu memberikan semangat dan doa.

Kepada diri sendiri, Adisti Regita Pramesti, terima kasih telah berjuang dan bertahan demi mencapai cita-cita. Tetaplah semangat untuk masa depan, karena ini bukan akhir perjalanan, melainkan awal langkah menuju kehidupan yang lebih baik.

Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi umat manusia dan bisa menjadi dasar untuk perbaikan serta pengembangan oleh peneliti lain.

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena berkah rahmat serta hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul "Analisis Kapasitas Sisa Jembatan Setelah Masa Layan (Studi Kasus Jembatan KA Pangukan). Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

Pada penyusunan Tugas Akhir ini terdapat banyak permasalahan yang ditemui oleh penulis, penelitian ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa, atas anugerah-Nya yang tak terhingga, kesehatan, kekuatan, serta kesempatan yang diberikan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
2. Bapak Junaedi Ibnu Kadaryanto, S.E dan Sarini, S.P selaku orang tua atas nasihat, doa, serta dukungan yang telah diberikan.
3. Hardi Casmita, Vistianingrum Ayu Werdani, S.H., Azzelia Putri Elora, dan Axcella Quenzza Aleefa yang telah memberikan motivasi serta kekuatan kepada penulis untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Keluarga tercinta, atas doa, dukungan, dan kasih sayang yang tiada henti kepada penulis selama menempuh pendidikan hingga penyusunan skripsi ini.
5. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng)., IPM. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
6. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M. Eng selaku Dosen Pembimbing tersayang yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan motivasi yang tiada henti selama proses penyusunan skripsi ini.

7. Bapak Ir. Suharyatma, M.T. dan Bapak Elvis Saputra S.T., M.T. selaku Penguji 1 dan Penguji 2 yang telah memberikan banyak masukan berharga dan bantuan bagi penulis. Serta seluruh dosen, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan ilmu yang sangat bermanfaat kepada penulis selama menempuh studi.
8. Nabiilah Sari Anggraini, Reyhan Garneta Lana Andrea, Neta Putri Evriency, Shafa Anugerah, Tamara Novania Kirana, Guntur Tri Widyanto, Syawqy Al Haq, Zierly Mauliya As-Shofa, Geraldin Firyan Shandy, Ramadhika Gusti Permana, Muhammad Rangga H, Muhammad Ichsan Ansari, Muhammad Aulia Abrar, S.T., Nurrazzaq Barru Fitradi, Abrar Hibrizy, Arvien Dwi Rivaldy, Aryo Damar Hatuwe, Amanda Alisya, teman seperjuangan penulis selama menempuh studi di Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia, terima kasih sudah berjuang bersama dengan segala drama, lika-liku, serta telah memberikan semangat dan kerjasama yang baik selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik sipil, khususnya dalam Analisis Kapasitas Sisa Jembatan Setelah Masa Layan.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii

LEMBAR DEDIKASI iv

KATA PENGANTAR v

DAFTAR ISI vii

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR TABEL xv

LAMPIRAN xvi

ABSTRAK xx

ABSTRACT xxi

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Tujuan Penelitian 3

1.4 Manfaat 3

1.5 Batasan Penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5

2.1 Studi Penelitian 5

BAB III LANDASAN TEORI 9

3.1 Jembatan Rangka Baja 9

3.1.1 Tipe-Tipe Jembatan Rangka Baja 9

3.1.2 Komponen Jembatan Rangka Baja 11

3.1.3 Material Baja 11

3.1.4 Sifat dan Karakteristik Material Baja 12
3.1.5 Bentuk Profil Baja 13
3.2 Kereta Api 15
3.3 Jalan Rel 20
3.4 Bantalan Kayu 21
3.5 Pembebanan Pada Jembatan 21
3.5.1 Beban Mati 22
3.5.2 Beban Hidup 22
3.5.3 Beban Kejut (i) 23
3.5.4 Beban Horizontal 24
3.5.5 Beban Angin 25
3.5.6 Beban Gempa 25
3.5.7 Kombinasi Pembebanan 29
3.6 Analisis Kapasitas Penampang 30
3.6.1 Kapasitas Tarik Maksimum 31
3.6.2 Kapasitas Tekan (Buckling Elastis) 32
3.6.3 Kapasitas Lentur 34
3.6.4 Pengekang Lateral 36
3.6.5 Interaksi Aksial dan Lentur 38
3.7 Non-Destructive Testing (NDT) 39
3.7.1 Ultrasonic thickness gauge 40
3.7.2 Coating thickness gauge. 40
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN 42
4.1 Tinjauan Umum 42
4.2 Lokasi Jembatan 42

4.3 Data Penelitian 43
4.4 Metode Penggunaan Alat 47
4.5 Tahapan Penelitian 49
4.6 Bagan Alir Penelitian 50
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN 52
5.1 Analisis Pembebanan 52
5.1.1 Beban Mati 52
5.1.2 Beban Hidup 54
5.1.3 Beban Kejut 57
5.1.4 Beban Lateral 58
5.1.5 Beban pengereman dan traksi 59
5.1.6 Beban Angin 60
5.1.7 Beban Gempa 61
5.1.8 Kombinasi Pembebanan 65
5.2 Permodelan Struktur Berdasarkan Pengukuran Manual 65
5.2.1 Material Jembatan 65
5.2.2 Dimensi Batang (*Frame Properties)* 66
5.2.3 Tumpuan (Restraint) 72
5.3 Permodelan Struktur berdasarkan Hasil Pengujian NDT 72
5.3.1 Material Jembatan 72
5.3.2 Dimensi Batang Pengujian NDT (Frame Properties) 72
5.2.4 Tumpuan (Restraint) 78
5.4 Hasil Analisis Berdasarkan program SAP2000 79
5.4.1 Run Analysis Deformed Shape 79
5.5 Analisis Kapasitas Penampang Berdasarkan Pengukuran Manual 80

5.5.1 Perhitungan Kapasitas Tekan Maksimum 80
5.5.2 Perhitungan Kapasitas Tarik Maksimum 84
5.5.3 Perhitungan Kapasitas Momen Lentur 86
5.6 Analisis Kapasitas Penampang Berdasarkan Hasil *NDT* 90
5.6.1 Perhitungan Kapasitas Tekan Maksimum 91
5.6.2 Perhitungan Kapasitas Tarik Maksimum 94
5.6.3 Perhitungan Kapasitas Momen Lentur 96
5.7 Perbandingan Kasus Pembebanan 100
5.7.1 Pengukuran Manual 100
5.7.2 Pengukuran *NDT* 104
5.8 Rekapitulasi Gaya Aksial Maksimum 110
5.9 Ketebalan Coating Baja menggunakan Coating Thickness Gauge 112
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 114
DAFTAR PUSTAKA 116
LAMPIRAN 118

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Jembatan Rangka Baja 9
Gambar 3. 2 Rangka Baja Tipe Warren Truss 10
Gambar 3. 3 Rangka Baja Tipe Pratt Truss 10
Gambar 3. 4 Rangka Baja Tipe Howe Truss 10
Gambar 3. 5 Profil Baja WF 13
Gambar 3. 6 Profil Baja C 14
Gambar 3. 7 Profil Baja L 15
Gambar 3. 8 Lokomotif BB 17
Gambar 3. 9 Lokomotif CC 206 17
Gambar 3. 10 Lokomotif CC 203 18
Gambar 3. 11 Lokomotif CC 201 18
Gambar 3. 12 Kereta Ekomoni 19
Gambar 3. 13 Letak Bogie Kereta 20
Gambar 3. 14 Skema Pembebanan Rencana Muatan 1921 (RM 21) 23
Gambar 3. 15 Beban Lateral Kereta 24
Gambar 3. 16 Bentuk Tipikal Respon Spektra di Permukaan Tanah 28
Gambar 3. 17 Ultrasonic thickness gauge 40
Gambar 3. 18 Coating thickness gauge 41
Gambar 4. 1 Faktor Panjang Tekuk 33
Gambar 4. 2 Lokasi Jembatan Kereta Api Pangukan 42
Gambar 4. 3 Jembatan KA Pangukan 44
Gambar 4. 4 Permodelan Jembatan KA Pangukan 44
Gambar 4. 5 Tampak Atas Jembatan KA Pangukan 45
Gambar 4. 6 Kodefikasi Profil Jembatan Tampak Samping 45
Gambar 4. 7 Kodefikasi Profil Jembatan Tampak Bawah 45
Gambar 4. 8 Penggunaan Ultrasonic thickness gauge 47
Gambar 4. 9 Penggunaan Coating thickness gauge 48
Gambar 4. 10 Meteran 49

Gambar 4. 11 Bagan Alir (Flowchart) Pekerjaan Penelitian Tugas Akhir 51
Gambar 5. 1 Proyeksi arah datangnya Beban Mati 54
Gambar 5. 2 Proyeksi Pembebanan pada Lokomotif 55
Gambar 5. 3 Proyeksi Pembebanan pada Kereta/Gerbong 56
Gambar 5. 4 Proyeksi Arah datangnya Beban Kejut Lokomotif 57
Gambar 5. 5 Proyeksi Arah datangnya Beban Kejut Kereta 58
Gambar 5. 6 Proyeksi Arah datangnya Beban Lateral Lokomotif 58
Gambar 5. 7 Proyeksi Arah datangnya Beban Lateral Kereta 59
Gambar 5. 8 Proyeksi Arah datangnya Beban Rem Lokomotif 59
Gambar 5. 9 Proyeksi Arah datangnya Beban Rem Kereta 60
Gambar 5. 10 Beban Angin 61
Gambar 5. 11 Profil Gelagar Melintang Kode A 67
Gambar 5. 12 Profil Rangka Vertikal Kode B 67
Gambar 5. 13 Profil Gelagar Memanjang Tengah Kode C 68
Gambar 5. 14 Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah Kode D 69
Gambar 5. 15 Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas Kode E 69
Gambar 5. 16 Profil Rangka Diagonal 1 Kode F 70
Gambar 5. 17 Profil Rangka Diagonal 2 Kode G 71
Gambar 5. 18 Profil Ikatan Angin Kode H 71
Gambar 5. 19 Tumpuan Jembatan Pangukan 72
Gambar 5. 20 Profil Gelagar Melintang Kode A 73
Gambar 5. 21 Profil Rangka Vertikal Kode B 74
Gambar 5. 22 Profil Gelagar Memanjang Tengah Kode C 75
Gambar 5. 23 Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah Kode D 75
Gambar 5. 24 Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas Kode E 76
Gambar 5. 25 Profil Rangka Diagonal 1 Kode F 77
Gambar 5. 26 Profil Rangka Diagonal 2 Kode G 77
Gambar 5. 27 Profil Ikatan Angin Kode H 78
Gambar 5. 28 Tumpuan Jembatan Pangukan 79
Gambar 5. 29 *Run Analysis Deformed Shape* manual 79
Gambar 5. 30 *Run Analysis Deformed Shape* NDT 79

Gambar 5. 31 Gaya Aksial Beban Mati 80
Gambar 5. 32 Gaya Momen Beban Mati 80
Gambar 5. 33 Letak Batang 393 Kode E 81
Gambar 5. 34 Property Data Kode E 81
Gambar 5. 35 Diagram aksial (NFD) batang 393 83
Gambar 5. 36 Letak Batang 279 Kode D 84
Gambar 5. 37 Property Data Kode D 84
Gambar 5. 38 Diagram aksial (NFD) batang 279 86
Gambar 5. 39 Letak Batang 312 Kode A 86
Gambar 5. 40 Property Data Kode A 87
Gambar 5. 41 Diagram Momen (BMD) batang 312 90
Gambar 5. 42 Letak Batang 281 Kode D 91
Gambar 5. 43 Property Data Kode D 91
Gambar 5. 44 diagram aksial (NFD) batang nomor 281 93
Gambar 5. 45 Letak Batang 269 Kode D 94
Gambar 5. 46 Property Data Kode D 94
Gambar 5. 47 Diagram aksial (NFD) batang 269 96
Gambar 5. 48 Letak Batang 311 Kode A 96
Gambar 5. 49 Property Data Kode A 97
Gambar 5. 50 diagram momen (BMD) batang nomor 311 100
Gambar 5. 51 Rangkaian Kereta dengan beban kereta ¾ Jembatan 101
Gambar 5. 52 Rangkaian Beban Kereta dengan beban kereta ¾ Jembatan 101
Gambar 5. 53 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan 101
Gambar 5. 54 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan 102
Gambar 5. 55 Rangkaian Kereta dengan beban kereta ½ Jembatan 102
Gambar 5. 56 Rangkaian Beban Kereta dengan beban kereta ½ Jembatan 102
Gambar 5. 57 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan 103
Gambar 5. 58 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan 103
Gambar 5. 59 Rangkaian Kereta dengan beban ¾ Bentang Jembatan 104
Gambar 5. 60 Rangkaian Beban Kereta dengan beban ¾ Bentang Jembatan 104
Gambar 5. 61 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan 105

Gambar 5. 62 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan 105
Gambar 5. 63 Rangkaian Beban Kereta dengan beban ½ Bentang Jembatan 105
Gambar 5. 64 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan 106
Gambar 5. 65 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan 106
Gambar 5. 66 Diagram NFD Maksimal dari seluruh kasus pembebanan (Manual) 109
Gambar 5. 67 Diagram NFD Maksimal dari seluruh kasus pembebanan (NDT) 110

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Studi Sebelumnya dengan Studi Tugas Akhir 7
Tabel 3. 1 Sifat Mekanis baja struktur 12
Tabel 3. 2 Standar Jalan Rel 20
Tabel 3. 3 Berat Jenis Bahan 22
Tabel 3. 4 PGA dan Faktor Amplikasi untuk 0,2 detik (FPGA/Fa) 26
Tabel 3. 5 Besarnya nilai faktor amplikasi untuk periode 1 detik (Fv) 26
Tabel 3. 6 Kombinasi Pembebanan 29
Tabel 4. 1 Perbandingan Maksimum Lebar Terhadap Tebal 33
Tabel 4. 2 Faktor Reduksi Kekuatan untuk Keadaan Batas Ultimit 34
Tabel 4. 3 Panjang Bentang Untuk Pengekangan Lateral 37
Tabel 4. 4 Tipe Profil 45
Tabel 4. 5 Profil Jembatan 46
Tabel 5. 14. Dimensi Penampang Rel 53
Tabel 5. 2 Kombinasi Pembebanan Jembatan Kereta 65
Tabel 5. 3 Profil Baja pada Jembatan Kereta Api Pangukan 66
Tabel 5. 4 Profil Baja pada Jembatan Kereta Api Pangukan 73
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Gaya Aksial Maksimal Pada Tiap Kasus Pembebanan pada Pengujian Manual 107
Tabel 5. 6 Rekapitulasi Gaya Aksial Maksimal Pada Tiap Kasus Pembebanan Pengujian NDT 108
Tabel 5. 7 Rekapitulasi Pengambilan data Lapangan NDT & Manual 110
Tabel 5. 8 Rekapitulasi Output Permodelan SAP2000 111
Tabel 5. 9 Rekapitulasi Kapasitas 112
Tabel 5. 10 Rekapitulasi Coating Baja pada Jembatan KA Pangukan 113

LAMPIRAN

Lampiran 1 Input Material pada Define Materials 119

Lampiran 2 Input Mutu Baja pada SAP2000 119

Lampiran 3 Frame Properties Profil Gelagar Melintang kode A (Manual) 120

Lampiran 4 Profil Gelagar Melintang kode A (Manual) 120

Lampiran 5 Frame Properties Profil Rangka Vertikal kode B (Manual) 121

Lampiran 6 Profil Gelagar Melintang kode B (Manual) 121

Lampiran 7 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tengah kode C (Manual) 122

Lampiran 8 Profil Gelagar Melintang kode C (Manual) 122

Lampiran 9 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah kode D (Manual) 123

Lampiran 10 Profil Gelagar Melintang kode D (Manual) 123

Lampiran 11 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas kode E (Manual) 124

Lampiran 12 Profil Gelagar Melintang kode E (Manual) 124

Lampiran 13 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode F (Manual) 125

Lampiran 14 Profil Gelagar Melintang kode F (Manual) 125

Lampiran 15 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode G (Manual) 126

Lampiran 16 Profil Gelagar Melintang kode G (Manual) 126

Lampiran 17 Frame Properties Profil Ikatan Angin Kode H (Manual) 127

Lampiran 18 Profil Gelagar Melintang kode H (Manual) 127

Lampiran 3 Frame Properties Profil Gelagar Melintang kode A (NDT) 128

Lampiran 4 Profil Gelagar Melintang kode A (NDT) 128

Lampiran 5 Frame Properties Profil Rangka Vertikal kode B (NDT) 129

Lampiran 6 Profil Gelagar Melintang kode B (NDT) 129

Lampiran 7 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tengah kode C (NDT) 130
Lampiran 8 Profil Gelagar Melintang kode C (NDT) 130
Lampiran 9 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah kode D (NDT) 131
Lampiran 10 Profil Gelagar Melintang kode D (NDT) 131
Lampiran 11 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas kode E (NDT) 132
Lampiran 12 Profil Gelagar Melintang kode E (NDT) 132
Lampiran 13 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode F (NDT) 133
Lampiran 14 Profil Gelagar Melintang kode F (NDT) 133
Lampiran 15 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode G (NDT) 134
Lampiran 16 Profil Gelagar Melintang kode G (NDT) 134
Lampiran 17 Frame Properties Profil Ikatan Angin Kode H (NDT) 135
Lampiran 18 Profil Gelagar Melintang kode H (NDT) 135
Lampiran 19 Define Grid System Data 136
Lampiran 20 Tumpuan Jepit 136
Lampiran 21 Tumpuan Roll 137
Lampiran 22 Define Load Patterns 137
Lampiran 23 Define Load Cases 138
Lampiran 24 Define Load Combinations 138
Lampiran 25 Define Combination 1 139
Lampiran 26 Define Combination 2 139
Lampiran 27 Define Combination 3 140
Lampiran 28 Define Combination 4 140
Lampiran 29 Define Combination 5 141
Lampiran 30 Define Combination 6 141
Lampiran 31 Define Combination 7 142
Lampiran 32 Define Combination 8 142

Lampiran 33 Define Combination 9 143
Lampiran 34 Define Combination 10 143
Lampiran 35 Kalibrasi Coating Thickness Gauge 144
Lampiran 36 Kalibrasi Coating Thickness Gauge 144
Lampiran 37 Pengukuran Coating Thickness Gauge 145
Lampiran 38 Pengukuran Ultrasonic Thickness Gauge 147

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Fy = Kuat leleh baja (MPa)

Fu = Tegangan putus minimum (MPa)

w = Berat volume (kN/m³)

E = Modulus Elastisitas (MPa)

Tw = Tebal badan (mm)

Tf = Tebal sayap (mm)

Ag = Luas Penampang (mm^2)

K = Kondisi tumpuan

R = Radius Girasi (mm)

I = Momen inersia (mm)

γ = Gama kayu

$\emptyset$ = Faktor reduksi

b = Lebar (mm)

t = Tinggi (mm)

L = Panjang bentang (mm)

g = Percepatan gravitasi (MPa)

Fcr = Tegangan kritis (kN)

Pn = Kapasitas Tekan Nominal (kN)

Pt = Gaya tarik maksimum (kN)

Nu = Gaya Aksial Ultimate (Terfaktor) (KN)

Nn = Gaya Aksial Nominal Penampang (KN)

Mu = Momen Ultimate (Terfaktor) (KNm)

Mn = Momen Nominal Penampang (KNm)

Mp = Kondisi Leleh Sempurna (KNm)

ABSTRAK

Jembatan rangka baja adalah jenis struktur jembatan yang terdiri dari susunan batang-batang baja yang saling terhubung membentuk suatu rangkaian. beban yang bekerja pada jembatan ini akan diteruskan dan didistribusikan melalui batang-batang tersebut dalam bentuk gaya tekan dan gaya tarik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas sisa Jembatan KA Pangukan setelah mencapai masa layan dengan menggunakan metode *Non-Destructive Testing (NDT)* untuk mengetahui apakah Jembatan KA Pangukan ini masih layak untuk di gunakan atau tidak melihat dari umur jembatan ini sudah mencapai 128 tahun.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pengukuran ketebalan lapisan menggunakan metode *Non-Destructive Testing (NDT)* dengan menggunakan alat *ultrasonic thickness gauge* dan *coating thickness gauge,* Pengukuran *NDT* akan dibandingkan dengan pengukuran manual untuk memverifikasi hasil yang lebih akurat. Kemudian akan dilakukan permodelan struktur jembatan menggunakan program *SAP2000* untuk menghitung distribusi gaya pada elemen rangka baja akibat beban yang bekerja pada jembatan. Penelitian ini mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api dan RSNI T-03-2005 tentang Perencanaan Struktur Baja.

Hasil pengujian *NDT (Non-Destructive Testing)* pada struktur jembatan KA Pangukan menunjukan bahwa ketebalan elemen cenderung lebih besar dibandingkan pengukuran manual dengan rasio rata-rata sebesar 1,05. Hal ini terjadi karena metode *NDT* tanpa *coating* memiliki keunggulan dalam mendeteksi ketebalan aktual material dengan mempertimbangkan ketidakrataan atau pelapisan tambahan yang tidak terdeteksi pada pengukuran manual. Selain itu pengujian *NDT* juga dapat berperan dalam pengukuran *coating* pada strtuktur jembatan baja. Hal ini membuktikan bahwa *NDT* mampu memberikan informasi tambahan untuk analisis kapasitas elemen jembatan baja.

Kata kunci: Jembatan rangka baja, Masa Layan, *NDT, Ultrasonic*

ABSTRACT

A steel truss bridge is a type of bridge structure consisting of interconnected steel members forming a truss system. The loads acting on this bridge are transmitted and distributed through these members in the form of compressive and tensile forces. This study aims to analyze the remaining capacity of the Pangukan Railway Bridge after reaching its service life using the Non-Destructive Testing (NDT) method to determine whether the bridge is still suitable for use, considering its age of 128 years.

The method used in this research involves measuring layer thickness using the Non-Destructive Testing (NDT) method with ultrasonic thickness gauge and coating thickness gauge instruments. The NDT measurements will be compared with manual measurements to verify the accuracy of the results. Additionally, a structural model of the bridge will be created using SAP2000 software to calculate the force distribution in the steel truss elements due to applied loads. This study refers to the Minister of Transportation Regulation No. 60 of 2012 concerning Technical Requirements for Railway Tracks and RSNI T-03-2005 regarding Steel Structure Design.

The results of the NDT (Non-Destructive Testing) on the Pangukan Railway Bridge structure show that the element thickness tends to be greater than manual measurements, with an average ratio of 1.05. This occurs because the NDT method without coating has the advantage of detecting the actual material thickness by considering surface irregularities or additional coatings that are not detected in manual measurements. Furthermore, NDT testing also plays a role in measuring coatings on steel bridge structures. This demonstrates that NDT can provide additional information for analyzing the capacity of steel bridge elements.

***Keywords**: Steel Frame Bridge, Service Life, NDT, Ultrasonic*

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masa Layan Jembatan adalah periode waktu dimana jembatan diharapkan dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan desain dan spesifikasinya. Bila masa pelayanan suatu jembatan mencapai akhir masa layan, maka diprediksi akan mengalami penurunan kondisi yang diakibatkan oleh beberapa faktor, diantaranya faktor lingkungan seperti korosi dan faktor fisik jembatan dan besarnya beban yang melebihi kapasitas penampang. Menurut RSNI T-03-2005, umur rencana jembatan pada umumnya disyaratkan 50 tahun, namun untuk jembatan penting, jembatan bentang panjang atau yang bersifat khusus, disyaratkan mempunyai umur rencana 100 tahun. Oleh karena itu, untuk dapat menghindari terjadinya kegagalan fungsi jembatan akibat kegagalan layak dan penurunan kekuatan secara tiba-tiba, maka perlu dilakukan evaluasi komponen jembatan terhadap pembebanan-pembebanan tertentu secara berkala, sehingga jembatan dapat berfungsi secara optimal. Salah satu komponen sistem manajemen yang paling penting adalah pemeriksaan jembatan.

Jembatan rangka harus memiliki beberapa komponen yang diperhatikan termasuk material beton, material baja, celah karet, elastomer, trotoar, lapisan aspal, dan lubang drainase. Dalam BMS-K8-1992, terdapat pemeriksaan inventarisasi, rutin, mendetail, dan khusus. Jembatan yang sudah melewati masa layan, seringkali secara visual masih dalam kondisi yang baik. Perlu ditekankan bahwa jembatan-jembatan seperti kebanyakan struktur modern memerlukan pemeriksaan rutin, dimana harus mempertimbangkan sarana dan langkah yang diperlukan untuk mempermudah pemeriksaan dan pemeliharaan Jembatan. Meski begitu, pemanfaatan jembatan yang telah melewati masa layan perlu melewati suatu kajian terlebih dahulu.

Studi ini menggunakan Jembatan KA Pangukan sebagai studi kasus. Jembatan tersebut terletak di desa Pangukan, Tridadi, Sleman. Jembatan KA Pangukan melintas 20 meter di atas Sungai Bedog. Jembatan KA Pangukan memiliki panjang 30 meter dan lebar 2,5 meter dengan orientasi timur-barat. Jembatan KA Pengukan dibangun pada 1896 oleh Nederlandsch Indische Spoorweg Maatschappij (NISM) dan digunakan sebagai sarana transportasi barang maupun manusia dari Jalur Yogyakarta – Magelang. Seperti halnya jalur kereta Semarang-Jogja yang dibangun pada tahun 1864 untuk memudahkan perekonomian rakyat karena pada saat itu banyak warga Tionghoa yang membuka usaha di Magelang. Menurut Wikipedia (2024), wacana penghidupan kembali jalur kereta Semarang-Jogja via Secang merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan konektivitas antar kota di Jawa Tengah dan Yogyakarta. Jalur ini pernah ada di masa lalu namun sudah tidak beroperasi lagi. Dengan dihidupkannya kembali jalur ini, diharapkan akan ada beberapa manfaat yang bisa dirasakan oleh masyarakat dan perekonomian daerah. Namun, penghidupan kembali jalur ini tentunya memerlukan kajian studi kelayakan yang matang terkait kelayakan, biaya, dan manfaat dari proyek ini.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan pengujian NDT *(Non-Destructive Test)* dengan metode pengukuran ketebalan lapisan coating baja dan lapisan baja dengan menggunakan alat *ultrasonic thickness gauge* dan *coating thickness gauge* sebagai *instrument* pengujian. Lalu akan dilakukan analisis struktur dan evaluasi terhadap standar/peraturan yang berlaku. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah Jembatan KA Pangukan ini masih layak untuk di gunakan atau tidak melihat dari umur jembatan ini sudah mencapai 128 tahun.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan yang akan di tinjau dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana hasil pengujian NDT pada struktur jembatan pada jembatan KA Pangukan?
2. Bagaimana hasil analisis jembatan berdasarkan hasil pengujian NDT lapangan pada jembatan KA Pangukan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui hasil pengujian NDT pada struktur jembatan pada jembatan KA Pangukan.
2. Mengetahui hasil analisis jembatan berdasarkan hasil pengujian NDT lapangan pada jembatan KA Pangukan.

1.4 Manfaat

Manfaat pada pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagi penulis, dapat menambah pemahaman dan wawasan tentang evaluasi kapasitas penampang pada jembatan baja.
2. Bagi pembaca secara umum dan mahasiswa, dapat menjadi bahan referensi atau acuan untuk penelitian-penelitian selanjutnya mengenai kapasitas penampang pada jembatan baja.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada studi ini dibuat agar dapat memberikan gambaran tentang batas-batas studi yang akan dan yang tidak akan dilakukan. Berikut adalah poin-poin dari batasan masalah dalam studi ini.

1. Data yang digunakan adalah data hasil pengukuran dan pemeriksaan di lapangan
2. Pengujian *NDT* dilakukan di lokasi jembatan KA Pangukan

3. Peraturan yang digunakan dalam analisis adalah RSNI T-03-2005 tentang Perencanaan struktur baja untuk jembatan.
4. Peraturan yang digunakan dalam analisis adalah Permenhub No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.
5. Peraturan untuk analisis beban gempa menggunakan SNI 2833:2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa
6. Peraturan untuk analisis beban gempa menggunakan SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan.
7. Instrumen yang digunakan untuk uji *NDT* adalah *ultrasonic thickness gauge* dan *coating thickness gauge.*
8. Program perhitungan menggunakan *Microsoft Excel* dan *SAP2000.*

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Penelitian

Analisis perhitungan pada tugas akhir ini mengacu pada perencanaan dan analisis jembatan baja yang sudah ada. Rangkuman penelitian-penelitian tersebut adalah sebagai berikut.

1. Penelitian Widya Apriani, Shanti W dan Wella Alrisa (2018).
   Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi jembatan rangka baja di Riau serta merumuskan langkah-langkah perbaikan atau pemeliharaan yang diperlukan. Hasil kajian ini menghasilkan rekomendasi tindakan penanganan yang disusun berdasarkan skala prioritas untuk memastikan efektivitas dan efisiensi pemeliharaan jembatan.
2. Penelitian Fikri, Hadimijaya, Prasetyo, Wilujeng, Putra (2021).
   Beberapa studi telah memanfaatkan metode *Magnetic Particle Inspection (MPI)* dalam pemeriksaan *Non-Destructive Testing (NDT)* untuk mengidentifikasi cacat. Penelitian serupa menunjukkan bahwa efektivitas deteksi menggunakan *MPI* cenderung menurun seiring dengan meningkatnya ketebalan lapisan *non-conductive coating*, sehingga memengaruhi akurasi pengukuran retakan sebenarnya. Dalam metode pemeriksaan partikel magnetik ini, magnetisasi dapat dilakukan menggunakan yoke elektromagnetik yang dialiri arus AC atau dengan magnet permanen.
3. Penelitian Algazt Aryad Masagala (2022).
   Penelitian ini bertujuan untuk menentukan dimensi struktur, kebutuhan tulangan, serta nilai lendutan yang terjadi pada jembatan. Analisis ini dilakukan dengan mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Rel Kereta Api, SNI 2833-2016 mengenai

Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa, dan RSNI T-12 2004 yang digunakan sebagai pedoman dalam perencanaan struktur beton untuk jembatan.

4. Penelitian Algazt Aryad Masagala (2022).

   Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi jembatan kereta api BH 935 sebagai bahan pertimbangan dalam kegiatan pemeliharaan jembatan tersebut. Proses evaluasi dilakukan melalui analisis gaya dalam, faktor keamanan terhadap gaya dalam, jumlah baut pada sambungan, serta lendutan struktur jembatan. Hasil evaluasi ini akan memberikan informasi terkait kelayakan operasional jembatan kereta api BH 935, apakah masih dapat digunakan dengan aman atau memerlukan tindakan perbaikan lebih lanjut.

5. Penelitian Adolf Asih S dan Syafrizal (2022).

   Dalam penelitian ini, penentuan cacat material dilakukan menggunakan metode pengujian ultrasonik (Ultrasonic Testing). Sebelum mengidentifikasi cacat, langkah awal adalah menentukan titik indeks dan melakukan kalibrasi jarak pada Probe Sudut. Metode uji tidak merusak *(Non-Destructive Testing/NDT)* telah banyak diterapkan di berbagai sektor industri, seperti industri aerospace, otomotif, baja, minyak dan gas, serta sektor lainnya. Permasalahan seperti korosi pada peralatan industri sering mengakibatkan penipisan material, terutama seiring dengan bertambahnya usia peralatan. Untuk menghindari gangguan operasional dalam industri, kendali mutu yang ketat sangat diperlukan. Metode NDT memainkan peran penting dalam pengendalian mutu tersebut. Beberapa teknik uji NDT yang umum digunakan antara lain *Liquid Penetrant Testing (PT), Magnetic Particle Testing (MT), Radiography Testing (RT), Ultrasonic Testing (UT), dan Eddy Current Testing (ET)*. Penelitian ini secara khusus menggunakan pengujian ultrasonik untuk mengukur kedalaman serta panjang cacat pada material yang diuji.

Dari beberapa penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, dapat dibandingkan persamaan dan perbedaan dibandingkan studi tugas akhir ini. Perbandingan penelitian sebelumnbya dengan penelitian tugas akhir ini dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Perbandingan Studi Sebelumnya dengan Studi Tugas Akhir

Penelitian Terdahulu					
Peneliti	Widya Apriani, Shanti W, Wella Alrisa (2018)	Fikri, Hadimijaya, Prasetyo, Wilujeng Putra (2021)	Masagala, Algazt Aryad (2022)	Masagala, Algazt Aryad (2022)	Adolf Asih dan Syafrizal (2022)
Judul Penelitian	Penilaian Kondisi Jembatan Rangka Baja di Riau dengan Metode BMS	Rancang Bangun Yoke Permanen Magnet Untuk Pendeteksian Subsurface Defect dengan Metode MPI	Desain Struktur Jembatan Kereta Api Tipe Concrete Through Arch: Studi Kasus Jembatan Kereta Api Bh 1828 Purworejo	Evaluasi jembatan kereta api rangka baja jalur tunggal tipe Welded through truss	Penentuan Cacat Dengan Metode Ultrasonic Testing
Tujuan Penelitian	Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi jembatan rangka baja di Riau dan untuk mendapatkan tindakan perbaikan atau pemeliharaan yang tepat.	Untuk mengurangi spekulasi inspector tentang terbatasnya sumber daya listrik di area terbuka tersebut maka dibuatlah rancang bangun Permanent magnetic yoke Permanent sebagai alat pengujian NDT dengan metode magnetic particle inspection	Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh dimensi dan kebutuhan tulangan, serta besar nilai lendutan dengan mengacu pada PM No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Rel Kereta Api, SNI 2833-2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa dan RSNI T-12 2004 sebagai perencanaan struktur beton untuk jembatan.	Mengetahui hasil analisis kekuatan dan keamanan struktur jembatan serta lendutan pada jembatan kereta api BH 935 dengan mengacu pada menggunaan PM No. 60 tahun 2012 tentang persyaratan teknis kereta api Indonesia	Untuk menentukan cacat suatu bahan menggunakan metode ultrasonic testing.

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Studi Sebelumnya dengan Studi Tugas Akhir

Hasil Penelitian	Jembatan Merangin S, Jembatan Jangkang Jembatan Parak Suak Buaya. Jembatan Parit Darauf adalah jembatan paling kritis yang memiliki nilai kritis untuk bangunan atas. Sementara Jembatan Siak II memiliki nilai kondisi rusak berat yang terdiri dari bangunan atas rusak berat, lantai bangunan rusak berat, bangunan bagian bawah rusak ringan dan DAS rusak ringan.	Disimpulkan sebagai berikut. 1. Presentase tingkat keakuratan dalam pembacaan cacat (defect) Permanent Magnetic Yoke adalah 96,78%. Hasil ini diperoleh dengan acuan pembacaan dari Yoke DC Magnaflux yang sudah terkalibrasi dengan standar internasional. 2. Peningkatan trend pada grafik hasil pengujian Permanent Magnetic Yoke menunjukkan bahwa efektifitas alat uji dengan bahan dasar magnet permanen.	Berdasarkan perhitungan diperoleh dimensi; girder eksterior, interior, diafragma, dan arch memiliki dimensi 450x650 mm; dimensi 450x650 mm; dimensi hanger dan bracing 450x450 mm. Untuk nilai lendutan maksimal tengah bentang sebesar 0,054 m dengan lendutan izin 0,058 m, maka berdasarkan analisis tersebut desain struktur jembatan telat memenuhi.	Berdasarkan hasil analisis maka diperoleh bahwa semua frame yang ada di jembatan dinyatakan aman, karena dari perhitungan kontrol lentur, kontrol kuat geser, tahanan nominal tekan dan tarik gaya output yang dihasilkan lebih kecil dari nilai maksimum rencana.	1. Sebelum melakukan penentuan cacat pada Benda Uji sebelum melakukan penentuan titik indeks dan kalibrasi jarak Probe Sudut. 2. Ditemukan 3 buah cacat yang masing-masing cacat pertama berada pada kedalaman 37,14 mm sepanjang 30 mm; cacat kedua berada pada kedalaman 11,87 mm sepanjang 45 mm; dan cacat ketiga berada pada kedalaman 23,71 mm sepanjang 38 mm.

Sumber: (Apriani et al., 2018, Fikri et al., 2021Masagala, 2022a, Masagala, 2022b,Supriyanto, 2022)

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Jembatan Rangka Baja

Jembatan rangka baja adalah jenis struktur jembatan yang terdiri dari susunan batang-batang baja yang saling terhubung membentuk suatu rangkaian. Beban yang bekerja pada jembatan ini akan diteruskan dan didistribusikan melalui batang-batang tersebut dalam bentuk gaya tekan dan gaya tarik, yang ditransmisikan melalui titik-titik pertemuan antar batang. Berikut merupakan Gambar 3.1 Jembatan rangka baja.



Gambar 3. 1 Jembatan Rangka Baja

(Sumber: Rajawali Jaya Konstruksi, 2023)

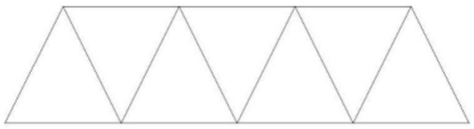
3.1.1 Tipe-Tipe Jembatan Rangka Baja

Tipe-tipe jembatan rangka baja ini memiliki jumlah yang banyak dan bervariasi karena banyak para ahli mengembangkan setiap tipe-tipe jembatan rangka baja, maka diantaranya sebagai berikut:

1. Tipe Warren *(Warren Truss)*

   Tipe jembatan ini pertama kali diperkenalkan oleh James Warren dan Willoughby Theobald Monzani pada tahun 1848 di Britania Raya. Jembatan

rangka baja ini memiliki rangka dengan batang vertikal yang membentuk segitiga sama kaki atau segitiga sama sisi. Pada struktur rangkanya, batang diagonal menerima gaya tekan (compression), sementara sebagian lainnya menahan gaya tarik (tension).

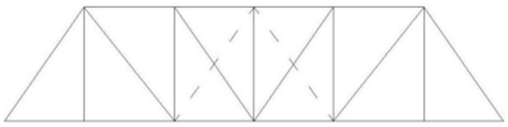


Gambar 3. 2 Rangka Baja Tipe *Warren Truss*

(Sumber: Candrazr, 2012)

2. Tipe Pratt (Pratt Truss)

   Tipe jembatan rangka baja ini ditemukan oleh Thomas dan Caleb Pratt pada tahun 1844. Jembatan ini memiliki batang diagonal yang mengarah ke bawah dan batang tersebut berada di tengah batang jembatan bagian bawah.

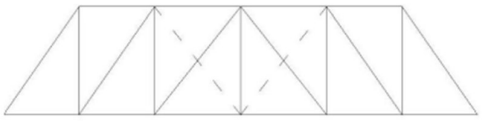


Gambar 3. 3 Rangka Baja Tipe *Pratt Truss*

(Sumber: Candrazr, 2012)

3. Tipe Howe (Howe Truss)

   Tipe jembatan rangka baja ini ditemukan oleh William Howe di Massachusetts, Amerika Serikat, pada tahun 1840. Jembatan ini merupakan kebalikan dari tipe Pratt, di mana batang diagonalnya mengarah ke atas dan menahan gaya tekan, sedangkan batang vertikalnya menerima gaya tarik.



Gambar 3. 4 Rangka Baja Tipe *Howe Truss*

(Sumber: Candrazr, 2012)

3.1.2 Komponen Jembatan Rangka Baja

Komponen struktur jembatan dibagi menjadi 2 bagian yaitu struktur jembatan atas (upper structure) dan struktur jembatan bawah (sub structure). Setiap komponen struktur pada jembatan memiliki fungsi masing-masing.

1. Struktur Atas (Upper Structure)

   Struktur atas jembatan (upper structure) adalah komponen strukur jembatan yang dirancang untuk meneruskan beban yang diterima oleh lantai jembatan hingga ke perletakan, yang dimana lantai jembatan adalah bagian jembatan yang langsung menerima beban lalu lintas dan pejalan kaki. Bagian-bagian dari struktur atas jembatan (upper structure) adalah sebagai berikut.

   a. Dinding sandaran (railing)
   b. Trotoar jembatan
   c. Lantai jembatan
   d. Gelagar (girder)
   e. Diafragma, dan
   f. Tumpuan (bearing)

2. Struktur Bawah (Sub structure)

   Struktur bawah jembatan (sub structure) adalah komponen yang mendukung beban yang terjadi pada struktur atas jembatan (upper structure), dan akan meneruskan beban tersebut ke tanah. Bagian-bagian dari struktur bawah jembatan (sub structure) adalah sebagai berikut.

   a. Pondasi (pile),
   b. Pilar (pier), dan
   c. Kepala jembatan (abutment)

3.1.3 Material Baja

Baja yang diguanakan dalam struktur dapat diklasifikasikan menjadi 3 yaitu, baja karbon, baja panduan rendah mutu tinggi dan baja panduan.

1. Baja Karbon

   Baja karbon ini dibagi menjadi 3 kategori tergantung dari presentase kandungan karbonya. Baja karbon rendah (C= 0,03-0,35%), baja karbon medium (C= 0,35- 0,50%), dan baja karbon tinggi (C= 0,55-1,70%), untuk baja yang sering digunakan dalam struktur ini adalah baja karbon medium. Baja karbon memiliki tegangan leleh antara 210-250 MPa

2. Baja panduan rendah mutu tinggi

   Yang termasuk dalam kategori baja paduan rendah mutu tinggi mempunyai tegangan leleh berkisaran antara 290-550 Mpa dengan tegangan putus antara 415-700 Mpa.

3. Baja panduan

   Baja panduan rendah dapat di tempa dan dipanaskan untuk memperoleh tegangan leleh antara 550-760 Mpa.

3.1.4 Sifat dan Karakteristik Material Baja

Sifat mekanis baja struktural yang digunakan dalam perencanaan harus memenuhi persyaratan minimum seperti yang diberikan pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Sifat Mekanis baja struktur

Jenis Baja	Tegangan putus minimum, fu (MPa)	Tegangan leleh minimum, fy (MPa)	Peregangan minimum (%)
BJ 34	340	210	22
BJ 37	370	240	20
BJ 41	410	250	18
BJ 50	500	290	16
BJ 55	550	410	13

Sumber: RSNI T-03-2005

Sifat-sifat mekanis baja structural lainnya untuk maksud perencanaan ditetapkan sebagai berikut:

Modulus elastisitas (E) : 200.000 MPa

Modulus geser (G) : 80.000 MPa

Angka poisson (μ) : 0,3

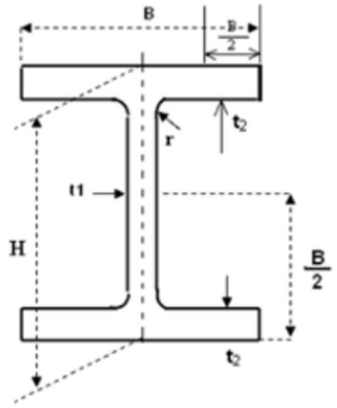
Koefisien pemuaian ($\propto$) : 12 x 10-6 per °C

3.1.5 Bentuk Profil Baja

Beberapa standar konstruksi di Indonesia menggunakan baja profil. Memastikan bahwa bangunan tetap, kokoh, dan stabil adalah prioritas utama dalam perencanaan konstruksi yang kuat. Pada proyek pembangunan konstruksi yang dimiliki oleh pemerintah. Bahan dan jenis baja yang umum digunakan di Indonesia sesuai kebutuhan adalah sebagai berikut.

1. *Wide Flange (WF)*

   Profil WF merupakan salah satu jenis profil baja struktural yang sangat populer dalam konstruksi baja. Profil ini sering digunakan untuk berbagai keperluan, seperti balok, kolom, tiang pancang, elemen top and bottom chord pada jembatan truss, composite beam atau kolom, kanopi kantilever, dan lain sebagainya. Meski demikian, profil ini dikenal dengan berbagai nama di masyarakat, seperti profil H, HWF, HBEAM, IWF, atau I. Bahkan, di beberapa daerah, istilah seperti WH, SH, dan MH juga digunakan untuk menyebut profil ini.

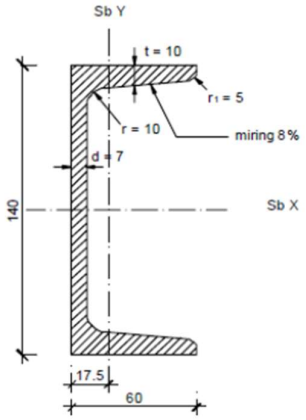


Gambar 3. 5 Profil Baja WF

(Sumber: RSNI T-03-2005)

2. UNP (Baja C)

   Profil baja kanal dilambangkan dengan tanda "[" diikuti kode "NP" dan sebuah angka yang menunjukkan tinggi profil dalam satuan sentimeter. Misalnya, NP 20 berarti profil tersebut memiliki tinggi 20 cm. Baja kanal ini tersedia dalam panjang bervariasi, mulai dari 4 hingga 12 meter, dan umumnya digunakan pada struktur rangka.

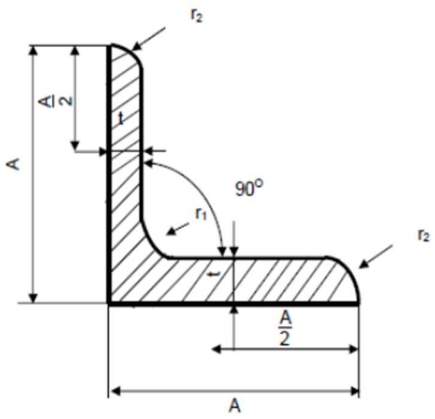


Gambar 3. 6 Profil Baja C

(Sumber: RSNI T-03-2005)

3. *Equal Angle and Unequal Angel*

   Profil ini dilambangkan dengan huruf "L" diikuti tiga angka yang menunjukkan tinggi, lebar, dan ketebalan profil dalam milimeter. Untuk baja siku sama kaki, tinggi dan lebar profil memiliki ukuran yang sama. Sebagai contoh, baja siku sama kaki dengan kode (L50.50.5) berarti memiliki tinggi 50 mm, lebar 50 mm, dan ketebalan 5 mm.



Gambar 3. 7 Profil Baja L

(Sumber: RSNI T-03-2005)

3.2 Kereta Api

Kereta Api adalah alat transportasi yang menggunakan jalur rel untuk mengangkut penumpang dan barang. Kereta api bergerak di atas rel yang terdiri dari rel baja dan bantalan kayu atau beton, yang terhubung satu sama lain membentuk jalur rel yang panjang. Komponen utama pada kereta api adalah Lokomotif, kereta penumpang, kereta barang, dan jalur rel. Lokomotif dan rangkaian kereta atau gerbong masing-masing memiliki bogie sebagai pengelompokan roda dan pegas pada kereta api. Adapun lokomotif, kereta (gerbong), dan bogie memiliki gaya vertikal serta dimensi masing-masing yaitu pada Tabel 3.2

Tabel 3. 2 Profil Lokomotif dan Gerbong Kereta Api

Jenis	Panjang (m)	Lebar (m)	Berat (Ton)	Daya Mesin (HP)	Kecepatan Maksimum (km/Jam)
Lokomotif CC 201	14,134	2,642	84	1950	120
Lokomotif CC 203	14,134	2,642	84	2150	120
Lokomotif CC 204	14,134	2,642	88	2000	120
Lokomotif CC 206	15,849	2,743	90	2250	120
Gerbong Penumpang	20,92	2,99	14	-	120
Gerbong Angkutan Barang	20,92	2,99	33	-	100-120
Gerbong Datar	12,495	2,435	57	-	80

Sumber: www.inka.co.id (2020)

1. Gaya Lokomotif

   Lokomotif yang digunakan PT. Kereta Api (Persero) ialah lokomotif yang ditumpu oleh 2 bogie. Berdasarkan atas jumlah gandar (satu gandar terdiri atas 2 roda) pada masing-masing *bogie*, secara garis besar lokomotif yang digunakan dapat dikelompokkan atas 2 jenis, yaitu Lokomotif CC yang masing-masing *bogie* terdiri dari atas 3 gandar.



Gambar 3. 8 Lokomotif BB

(Sumber: https:balai3d.com)



Gambar 3. 9 Lokomotif CC 206

(Sumber: https:balai3d.com)



Gambar 3. 10 Lokomotif CC 203

(Sumber: https:balai3d.com)



Gambar 3. 11 Lokomotif CC 201

(Sumber: https:balai3d.com)

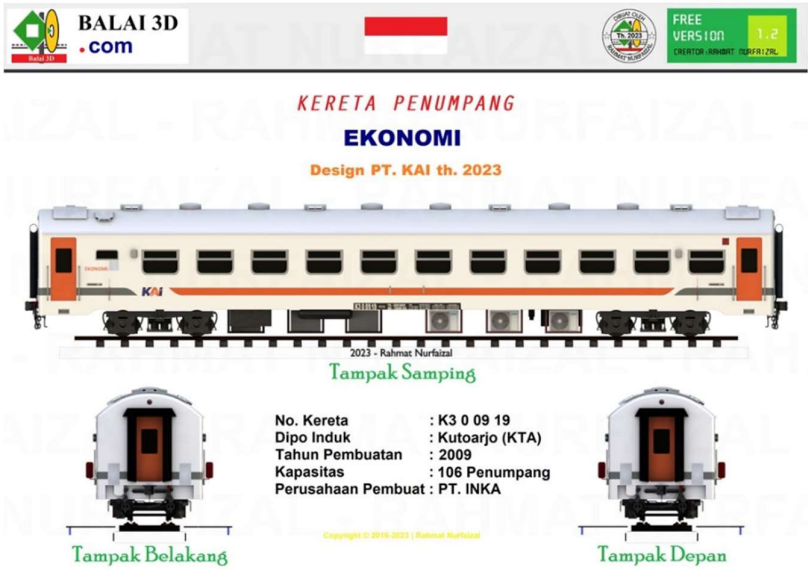
Perhitungan beban gandar dan beban masing-masing roda jenis lokomotif dijelaskan sebagai berikut:

a. Lokomotif BB, jika lokomotif (Wlok) = 52 ton, maka:
   1. Gaya pada bogie (Pb) = Wlok/2 = 52/2 = 26 ton
   2. Gaya gandar (Pg) = Pb/2 = 26/2 = 13 ton
   3. Gaya roda statis (Ps) = pg/2 = 13/2 = 6,5 ton

b. Lokomotif CC, jika lokomotif (Wlok) = 90 ton, maka:
   1. Gaya pada bogie (Pb) = Wlok/2 = 52/2 = 26 ton
   2. Gaya gandar (Pg) = Pb/2 = 26/2 = 13 ton
   3. Gaya roda statis (Ps) = pg/2 = 13/2 = 6,5 ton

2. Gaya Kereta

Berat kereta penumpang ialah 40 ton. Kereta ditumpu oleh 2 *bogie* (Pb = 20 ton), masing-masing *bogie* terdiri atas 2 ganda, sehingga Pg = 10 ton, dan Ps = 5 ton. Berikut adalah contoh gambar kereta ekonomi yang saat ini digunakan oleh PT. KAI untuk beroperasi:



Gambar 3. 12 Kereta Ekomoni

(Sumber: https:balai3d.com)

3. Dimensi Bogie

Bogie adalah komponen yang berfungsi sebagai kerangka penopang roda dan rel. Bogie terdiri dari rangka baja yang dilengkapi dengan dua set roda yang terpasang pada poros. Berikut merupakan letak *bogie* pada kereta.



Gambar 3. 13 Letak Bogie Kereta

(Sumber: https:balai3d.com)

3.3 Jalan Rel

Struktur atau fasilitas yang terdiri dari rel, bantalan (sleeper), dan elemen-elemen lainnya yang digunakan untuk mendukung dan menuntun pergerakan kereta api. Berikut merupakan standar jalan rel di Indonesia pada Tabel 3.3

Tabel 3. 3 Standar Jalan Rel

Kelas Jalan Rel	Kapasitas Lintas Angkut ($x10^6$ton/tahun)	Kecepatan Maksimum (km/jam)	Tipe Rel	Jenis Bantalan/Jarak (mm)	Jenis Penambat Rel
I	>20	120	R.60/R.54	Beton/600	Elastis Ganda
II	10 - 20	110	R.54/R.60	Beton/Kayu/600	Elastis Ganda
III	5 - 10	100	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja/ 600	Elastis Ganda
IV	2,5 - 5	90	R.54/R.50/ R.42	Beton/Kayu/Baja/600	Elastis Ganda/ Tunggal
V	< 2,5	80	R.42	Kayu/Baja/600	Elastis Tunggal

Jalan rel juga memiliki berat dengan tipe sebagai berikut:

1. Tipe R.42 dengan berat (W) = 42,59 kg/m
2. Tipe R.50 dengan berat (W) = 50,40 kg/m
3. Tipe R.54 dengan berat (W) = 54,43 kg/m
4. Tipe R.60 dengan berat (W) = 60,34 kg/m

3.4 Bantalan Kayu

Komponen yang digunakan dalam sistem jalan rel kereta api, berfungsi untuk mendukung dan menahan rel kereta agar tetap stabil pada posisinya di atas ballast (kerikil) dan subgrade (tanah dasar). Bantalan kayu ini biasanya terbuat dari kayu keras yang kuat, seperti kayu ulin atau jenis kayu lainnya yang memiliki ketahanan terhadap kelembapan dan tekanan tinggi. Berikut merupakan standar jalan rel di Indonesia pada Tabel 3.4

Tabel 3. 4 Dimensi Bantalan Kayu dan Toleransi di Indonesia

No	Letak	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)
1	Jalan Lurus	2000 (+40, -20)	220 (+20, -10)	130 (+10, -0)
2	Jembatan	1800 (+40, -20)	220 (+20, -10)	200 (+10, -0)

Keterangan: angka dalam lurung ( ) ialah toleransi yang diizinkan.

3.5 Pembebanan Pada Jembatan

Pembebanan dalam pengerjaan tugas akhir ini merujuk pada Permenhub No. 60 Tahun 2012 Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api Pembebanan yang digunakan dalam perencanaan struktur pada jalur Kereta Api dan SNI 2833-2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa. Berdasarkan standar tersebut, jembatan harus didesain untuk menahan beban serta beberapa efek beban yang harus di perhatikan, jenis-jenis beban tersebut yaitu.

1. Beban Mati
2. Beban Hidup
3. Beban Kejut

4. Beban Horizontal
    a. Beban Lateral Kereta
    b. Beban Rem dan Traksi
5. Beban Rel Panjang
6. Beban Angin
7. Beban Gempa

3.5.1 Beban Mati

Berat jenis bahan yang biasanya digunakan dalam perhitungan beban mati sebagaimana dalam Tabel 3.5

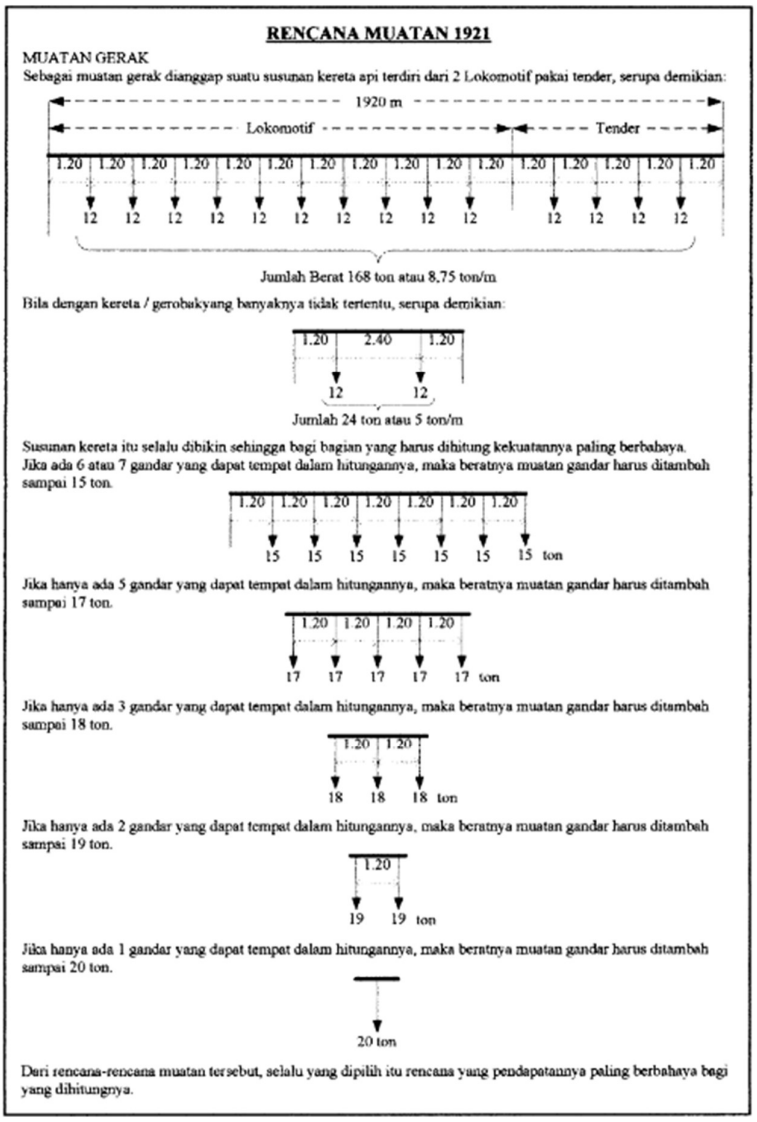
Tabel 3. 5 Berat Jenis Bahan

Baja, Baja Cor	78.50 kN/m3
Besi Cor	72.50 kN/m3
Kayu	8.00 kN/m3
Beton	24.00 kN/m3
Aspal Anti Air	11.00 kN/m3
Ballast Gravel atau Batu Pecah	19.00 kN/m3

Sumber: PM No.60 Tahun 2012

3.5.2 Beban Hidup

Beban hidup yang digunakan adalah beban gandar terbesar sesuai rencana sarana perkereta apian yang dioperasikan atau skema dari rencana muatan. Dalam penentuan beban hidup pada jembatan kereta api mengacu pada PM.60 Tahun 2012. Untuk beban gandar sampai dengan 18ton dapat digunakan skema rencana muatan 1921 (RM 21) sebagaimana tersebut dalam Gambar 3.14 untuk beban gandar lebih besar dari 18 ton, rencana muatan disesuaikan dengan kebutuhan tekanan gandar.



Gambar 3. 14 Skema Pembebanan Rencana Muatan 1921 (RM 21)

(Sumber: PM No.60 Tahun 2012)

3.5.3 Beban Kejut (i)

Beban kejut diperoleh dengan mengalikan faktor i terhadap beban kereta. Perhitungan paling sederhana untuk faktor i adalah dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

1. untuk rel pada alas balas, $i = \frac{0.1 + 22.5}{50+L}$

2. untuk rel pada Perletakan kayu, $i = \frac{0.2 + 25}{50+L}$
3. untuk rel secara langsung pada baja, $i = \frac{0.3 + 25}{50+L}$

dimana i = faktor kejut, L = panjang bentang (m)

3.5.4 Beban Horizontal

1. Beban Sentrifugal

Beban sentrifugal diperoleh dengan mengalikan faktor a terhadap beban kereta. Beban bekerja pada pusat gaya berat kereta pada arah tegak lurus rel secara horizontal. Namum pada analisis ini rel kereta tidak ada belokan maka tidak terjadi gaya sentrifungal, maka nilai beban sentrifungal nol.

$$a = \frac{V}{127\,R}^{2}$$

Dimana:

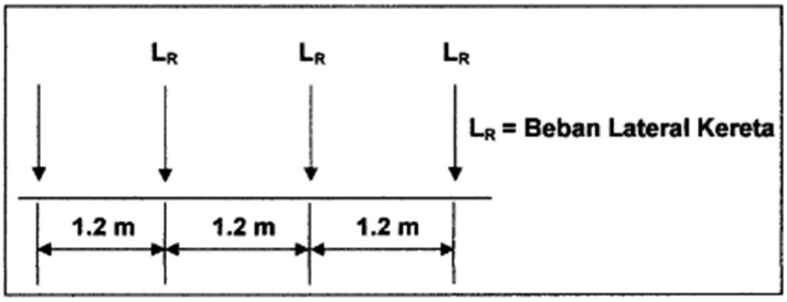
a : Koefisien Beban Sentrifugal

v : Kecepatan maksimum kereta pada tikungan (km/jam)

R : Radius tikungan (m)

2. Beban Lateral Kereta (LR)

Beban lateral kereta adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar di bawah. Beban bekerja pada bagian atas dan tegak lurus arah rel, secara horizontal. Besaran adalah 15% atau 20% dari beban gandar untuk masing-masing lokomotif atau kereta listrik/diesel.



Gambar 3. 15 Beban Lateral Kereta

(Sumber: PM No.60 Tahun 2012)

3. Beban Pengereman dan Traksi

   Beban Pengereman dan Traksi masing-masing adalah 25% dari beban kereta, bekerja pada pusat gaya berat kereta ke arah rel (secara longitudinal).

4. Beban Rel Panjang Longitudinal

   Beban rel panjang longitudinal pada dasarnya adalah 10 kN/m, maksimum 2,000 kN. Beban ini mencerminkan distribusi gaya yang bekerja secara merata sepanjang rel, dan dapat mempengaruhi beban total yang diterima oleh struktur jembatan. Penentuan beban ini penting untuk memastikan bahwa kapasitas struktural jembatan mencukupi untuk menahan gaya yang diterapkan selama operasional dan mencegah potensi kerusakan atau kegagalan struktural.

3.5.5 Beban Angin

Beban angin bekerja tegak lurus rel, secara horizontal, tipikal nilainya adalah.

1. 3.0 kN/m2 pada area proyeksi vertikal jembatan tanpa kereta di atasnya. Namun demikian, 2.0 kN/m2, pada areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin, tidak termasuk areal sistem lantai.
2. 1.5 kN/m2 pada area kereta dan jembatan, dengan kereta di atasnya, pengecualian 1.2 kN/m2 untuk jembatan selain getagar dek/rasuk atau jembatan komposit, sedangkan 0.8 kN/m2 untuk areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin.

3.5.6 Beban Gempa

Berdasarkan SNI 2833:2016 Jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh namun dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan pelayanan akibat gempa terhadap akibat gempa dengan kemungkinan terlampaui 7% dalam 75 tahun. Penggantian secara parsial atau lengkap pada struktur diperlukan untuk beberapa kasus. Kinerja yang lebih tinggi seperti kinerja operasional dapat ditetapkan oleh pihak yang berwenang.

Untuk penetuan respon spektra di permukaan tanah, diperlukan faktor amplikasi untuk PGA, periode pendek (T=0,2) (SS) dan periode 1 detik (S1). PGA adalah percepatan puncak batuan dasar sesuai peta percepatan puncak di batuan

dasar untuk probilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun, SS adalah parameter respon spektra percepatan gempa untuk periode pendek (T=0,2) dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun dan S1 adalah parameter respon spektra percepatan gempa untuk periode 1 detik dengan probabilitas terlampaui 7% dalam 75 tahun. Faktor amplifikasi teriri dari faktor amplifikasi untuk PGA dalam 0,2 detik $FPGA/Fa$ dan faktor amplifikasi untuk periode 1 detik (Fv). Tabel 3.3 dan Tabel 3.4 memberikan nilai-nilai $FPGA$, Fa, FV untuk berbagai klasifikasi jenis tanah

Tabel 3. 6 PGA dan Faktor Amplikasi untuk 0,2 detik (FPGA/Fa)

Kelas Situs	PGA Ss	PGA Ss	PGA Ss	PGA Ss	PGA Ss
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah Sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah Lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Sumber: SNI 2833:2016

Tabel 3. 7 Besarnya nilai faktor amplikasi untuk periode 1 detik (Fv)

Kelas Situs	PGA	PGA	PGA	PGA	PGA
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah Keras (SC)	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
Tanah Sedang (SD)	2,4	2,0	1,8	1,6	1,5
Tanah Lunak (SE)	3,5	3,2	2,8	2,4	2,4
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Catatan: untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linier

Sumber: SNI 2833:2016

Respon spektra di permukaan tanah ditentukan melalui 3 nilai percepatan puncak yang mengacu pada peta gempa Indonesia, yakni peta gempa 2017 dengan probabilitas terlampaui 7% dan 75 tahun (PGA, SS, S1), serta nilai faktor amplifikasi F_{PGA}, F_a, F_V . Berikut adalah perumusan respon spektra,

As = F_{PGA} x PGA

SDS = Fa x SS

SD1 = Fv x S1

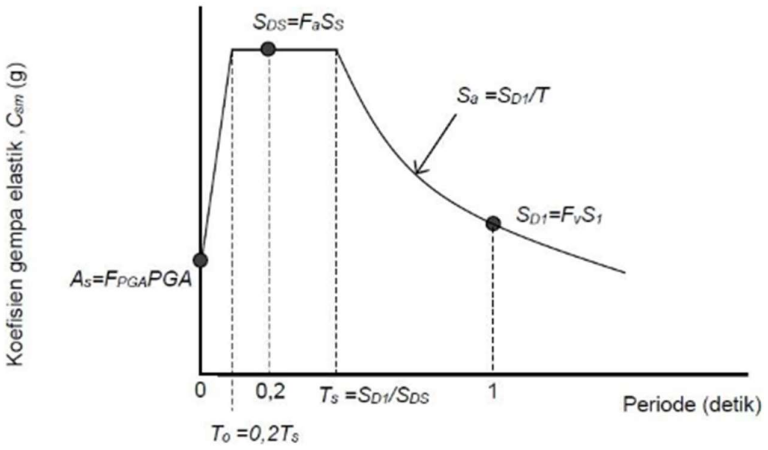
Untuk dapat membentuk grafik respon spektra di permukaan tanah, terdapat koefisien respon gempa elastik yang harus di perhitungan. Terhadap 3 kondisi periode.

1. Untuk T < $T_{o,}$ koefisien respon gempa elastik (Csm) didapat melalui persamaan berikut,
   Csm = (SDS – As) $\frac{T}{TO}$ + As
2. T ≤ $T_{o,}$ ≤ Ts, koefisien respon gempa elastik (Csm) sama dengan SDS.
3. Untuk periode T > Ts, koefisien respon gempa elastik (Csm) didapat melalui persamaan berikut,
   Csm = $\frac{SD1}{T}$

SDS adalah nilai spektra permukaan tanah pada periode (T=0,2), SD1 adalah nilai spektra permukaan tanah pada periode 1 detik. Sedangkan nilai T_o dan Ts didapat melalui persamaan berikut,

To = 0,2 Ts

Ts = $\frac{SD1}{SDS}$



Gambar 3. 16 Bentuk Tipikal Respon Spektra di Permukaan Tanah

(Sumber: SNI 2833:2016)

Beban gempa diambil sebagai gaya horizontal yang ditentukan berdasarkan perkalian antara koefisien respons elastik (Csm) dengan berat struktur ekivalen yang kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi respons (Rd) dengan formulasi sebagai berikut.

$E_Q = \frac{C_{sm}}{R_d}$ x W_t

Keterangan:

EQ : gaya gempa horizontal statis (kN)

C_{sm} : koefisien respons gempa elastis

R_d : faktor modifikasi respons

W_t : berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai kN

Koefisien respons elastik (C_sm) ditentukan berdasarkan peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan yang disesuaikan dengan zona gempa serta periode ulang gempa rencana. Koefisien percepatan ini diperoleh dari peta gempa, kemudian dikalikan dengan faktor amplifikasi yang mempertimbangkan kondisi tanah hingga kedalaman 30 meter di bawah struktur jembatan.

3.5.7 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi Pembebanan untuk jembatan kereta api di Indonesia mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan No.60 Tahun 2012 tentang persyaratan teknis jembatan untuk kereta api.

Berikut merupakan Tabel 3.8 kombinasi pembebanan yang akan digunakan untuk permodelan struktur Jembatan KA Pangukan, Sleman

Tabel 3. 8 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi Pembebanan	**Faktor**										
	Beban Tetap	**Beban Transien**									
	D	**L**	**I**	**C**	**LR**	**LF**	**B**	**W1**	**W2**	**EQY**	**EQX**
COMB1	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0						
COMB2	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0			1,0		
COMB3	1,0	1,1			1,0		1,0		1,0		
COMB4	1,0							1,2			
COMB5					1,0		1,1				
COMB6						1,1			1,0		
COMB7							1,1		1,0		
COMB8	1,0	1,0		1,0							1,0
COMB9										1,0	
COMB10	1,0	1,0		1,0							

(Sumber: PM No. 60 Tahun 2012)

Keterangan:

D : Beban Mati

L : Beban Hidup

I : Beban Kejut

Lf : Beban Lateral

Lr : Beban rel Panjang longitudinal

B : Beban rem dan traksi

C : Beban Sentrifungal

E : Beban Gempa

W1 : Beban Angin (Tanpa kereta)

W2 : Beban Angin (Dengan kereta)

3.6 Analisis Kapasitas Penampang

Kapabilitas struktural suatu elemen bergantung pada kapasitas penampangnya dalam menahan beban, seperti tarik, tekan, lentur, dan geser. Kapasitas ini dipengaruhi oleh beberapa faktor utama:

1. Momen inersia: berdampak pada kekakuan elemen dalam menahan beban lentur.
2. Kekuatan material: Batas kekuatan elemen ditentukan oleh sifat material seperti tegangan luluh dan ultimit.
3. Luas Penampang efektif pengurangan luas akibat korosi atau kerusakan akan mengurangi kemampuan elemen.

Menurut AISC (American Institute of Steel Construction) atau SNI 1729, penilaian kapasitas penampang harus mempertimbangkan kondisi material aktual dan ketebalan efektif komponen yang digunakan dalam perhitungan struktur. Ketebalan material adalah faktor kunci yang memengaruhi kapasitas penampang, terdapat dua metode utama untuk mengukur ketebalan material yaitu pengukuran Non-Destructive Testing (NDT), metode ini menggunakan alat seperti Ultrasonic Thickness Gauge untuk mengukur ketebalan tanpa merusak elemen. Selain itu pengukuran dapat dilakukan secara manual atau biasa dilakukan dengan menggunakan alat seperti caliper atau mikrometer.

Analisis Kapasitas Berdasarkan Ketebalan material merupakan proses penilaian kekuatan elemen struktural berdasarkan hasil pengukuran ketebalan material, yang dilakukan menggunakan metode *Non-Destructive Testing (NDT)* atau pengukuran manual. Proses ini bertujuan untuk menentukan kemampuan aktual elemen dengan memperhitungkan pengurangan ketebalan akibat kerusakan, seperti korosi, keausan, atau degradasi lainnya. Berdasarkan gaya dalam yang diperoleh dari pemodelan, kapasitas elemen dihitung untuk setiap jenis gaya (tarik, tekan, lentur, dan geser). Kapasitas dihitung dengan memperhitungkan ketebalan efektif, luas penampang. Dengan melakukan analisis ini dapat terindentifikasi elemen-elemen kritis yang memerlukan perhatian lebih lanjut maupun perbaikan.

Kekuatan pada struktur jembatan rangka baja berkaitan dengan kapasitas yang mampu diterima oleh mutu pada material suatu elemen. Kapasitas nominal komponen struktur dalam penelitian didapat dari perhitungan analisis yang mengacu pada RSNI-T-03-2005.

3.6.1 Kapasitas Tarik Maksimum

Kapasitas tarik bergantung pada kekuatan luluh dan kekuatan ultimate baja. Komponen-komponen struktur yang memikul gaya tarik aksial harus memenuhi persyaratan sebagai berikut.

1. Persyaratan Kuat Tarik

   $P_u \leq \emptyset\ P_n$ atau $N_u \leq \emptyset\ N_n$

   Dengan

   $\emptyset$ = 0,90 untuk kondisi leleh, dan

   $\emptyset$ = 0,75 untuk kondisi fraktur

   P_n = Kuat tarik nominal yang nilainya diambil dari nilai terendah dari nilai persamaan di bawah ini

   a. Kuat tarik nominal pada penampang bruto

      $P_n = A_g f_y$

   b. Kuat tarik nominal pada penampang efektif

      $P_n = A_e f_u$

      Dengan

      A_g = Luas penampang bruto (mm^2)

      A_e = Luas penampang efektif (mm^2)

      f_y = Tegangan leleh (Mpa)

      f_u = Tegangan tarik putus (Mpa)

2. Penampang efektif

   Luas penampang efektif komponen struktur yang mengalami gaya tarik ditentukan sebagai berikut:

   A_e = A x U

   $U = 1 - (\frac{x}{L}) \leq 0{,}90$

Keterangan:

A = Luas penampang (mm^2)

U = faktor *lag geser* untuk sambungan ke komponen struktur tarik

x = Eksentrisitas sambungan, jarak antara tegak lurus arah gaya tarik, antara titik berat penampang komponen yang disambung dengan bidang sambungan (mm)

L = Panjang sambungan dalam arah gaya tarik, yaitu antara dua baut terjauh pada suatu sambungan atau Panjang las dalam arah gaya tarik (mm)

3.6.2 Kapasitas Tekan (Buckling Elastis)

Kapasitas Tekan Maksimum bergantung pada stabilitas elemen terhadap tekuk (buckling). Kapasitas nominal tekan (Pn) dihitung berdasarkan Panjang efektif elemen dan faktor reduksi tekuk ($\emptyset$). Komponen-komponen struktur yang memikul gaya tarik aksial harus memenuhi persyaratan sebagai berikut.

$P_u \leq \emptyset\ P_n$ atau $N_u \leq \emptyset\ N_n$

Dengan: $\emptyset$ = 0,85 untuk kondisi leleh, dan

Pu = Beban terfaktor, (Pu= Nu)

P_n = Kuat tekan nominal komponen struktur, (Pn = Nn)

1. Perbandingan Kelangsingan:
   a) Kelangsingan elemen penampang
   b) Kelangsingan komponen struktur tekan, $\lambda = \frac{Lk}{r} \leq 140$
2. Kuat tekan nominal akibat tekuk lentur, ditentukan sebagai berikut:

   Nn = $0{,}66^{\lambda c^2}$ x Ag x fy untuk $\lambda c \leq 1{,}5$

   Nn = $\frac{0{,}66^{\lambda c^2}}{\lambda c^2}$ Ag x fy untuk $\lambda c \leq 1{,}5$

   $\lambda c = \frac{Lk}{ry\pi} \times \sqrt{\frac{fy}{E}}$

   Lk = kc x L

   Dimana:

   Ag= Luas Penampang bruto (mm^2)

   E = Modulus elastisitas bahan baja (Mpa)

λc = Parameter kelangsingan

L = Panjang batang (mm)

L = Panjang batang tekuk (mm)

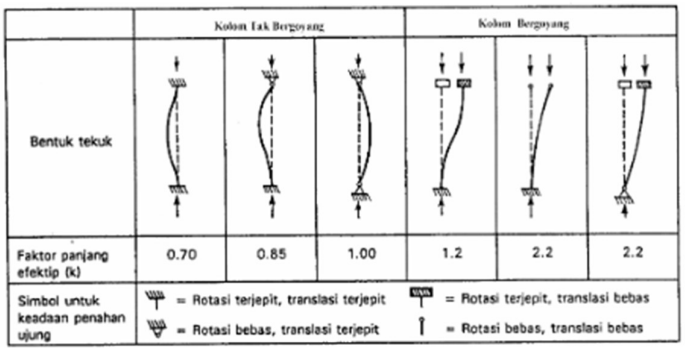
Untuk perbandingan maksimum lebar terhadap tebal ada pada keterangan Tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4. 1 Perbandingan Maksimum Lebar Terhadap Tebal

Jenis Elemen	**λ**	**λp (kompak)**	**λp (tidak kompak)**
Pelat sayap balok -I	b/t	170/ $\sqrt{fy}$	370/ $\sqrt{fy} - fr$
Pelat Badan	h/tw	1680/ $\sqrt{fy}$	2550/ $\sqrt{fy}$

Sumber: RSNI T-03-2005

Untuk faktor Panjang tekuk dapat dilihat pada Gambar4.1 dan faktor reduksi kekuatan untuk keadaan batas ultimit dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut.



Gambar 4. 1 Faktor Panjang Tekuk

(Sumber: RSNI T-03-2005)

Tabel 4. 2 Faktor Reduksi Kekuatan untuk Keadaan Batas Ultimit

Situs Rencana	Faktor Reduksi (Ø)
a. Lentur	0,90
b. Geser	0,90
c. Aksial Tekan	0,85
d. Aksial Tarik	
1. Terhadap Kuat Tarik Leleh	0,90
2. Terhadap Kuat Tarik *Fraktur*	0,75
e. Penghubung Geser	0,75
f. Sambungan Baut	0,75
g. Hubungan Las	
1. Las Tumpul Penetrasi Penuh	0,90
2. Las Sudut dan Las Tumpul Penetrasi Sebagian	0,75

Sumber: RSNI T-03-2005

3.6.3 Kapasitas Lentur

Berdasarkan RSNI T-03-2005 suatu komponen struktur yang memikul momen lentur terhadap sumbu kuat, harus memenuhi:

$Mu \leq \emptyset Mn$

Keterangan:

$\emptyset = 0{,}90$

Mu = Momen Lentur Terfaktor (Nmm)

Mn = Momen Lentur Nominal (Nmm)

1. Penampang Kompak

   Penampang yang memenuhi $\lambda \leq \lambda p$, kuat lentur nominal penampang:

   Mn = Mp = fy. Z

2. Penampang Tidak Kompak

   Penampang yang memenuhi $\lambda p \leq \lambda \leq \lambda r$, kuat lentur nominal penampang:

   Mn = Mp – (Mp – Mr) x $\frac{\lambda - \lambda p}{\lambda r \quad \lambda p}$

   Mr = (fy – fr) x S

3. Penampang Langsing

   Pelat sayap yang memenuhi $\lambda \geq \lambda r$, kuat lentur nominal penampang adalah sebagai berikut.

   Mn = Mr x $(\frac{\lambda \text{ r}}{\lambda})^2$

   Pelat badan yang memenuhi $\lambda \geq \lambda r$, kuat lentur nominal penampang adalah sebagai berikut:

   Mn = Kg x S x fcr

   Kg = 1 – $(\frac{\text{a}_\text{r}}{1200+300 \text{ x a}_\text{r}})$ x $(\frac{\text{h}}{\text{tw}} \text{ x } \frac{2500}{\sqrt{\text{fcr}}})$

   Fcr ditentukan dengan syarat:

   1) Elemen struktur yang memenuhi $\lambda G \leq \lambda p$

   Fcr = fy

   2) Elemen struktur yang memenuhi $\lambda p \leq \lambda G \leq \lambda r$

   fcr = Cb x fy x $(1- \frac{\lambda_\text{G} - \lambda_P}{2\ (\lambda(- \lambda_\text{P})})$ ≤ fy

   a) Elemen yang memenuhi $\lambda p \leq \lambda G$

      Fcr = f"c x $(\frac{\lambda_r}{\lambda_\text{G}})^2$

      Fc = $(\frac{\text{C}_b - fy}{2})$ ≤ fy

      C_b = $(\frac{12{,}5\ x\ \text{M}_{max}}{2{,}5\text{M}_{max} +3\ \text{M A x 4 M B+3 M C}})$ ≤ 2,3

      Keterangan:

      Mp = momen lentur yang menyebabkan seluruh penampang mengalami tegangan leleh disebut juga momen lentur plastis penampang (Nmm)

      Mr = momen batas tekuk (Nmm)

S = modulus penampang elastis (mm3)

Z = modulus penampang plastis (mm3), dengan asumsi

Z = 1,1 x S

λp = parameter kelangsingan untuk penampang kompak

λr = parameter kelangsingan utnuk penampang tidak kompak

λG = faktor kelangsingan berdasarkan tebal pelat sayap yang didapat dari $(\frac{2\ bf}{2\ x\ tf})$ dimana bf adalah lebar plat sayap (mm), dan tf adalah tebal plat sayap (mm).

fr = tegangan tekan residual pada pelat sayap

= 70 MPa untuk penampang digilas (panas)

= 110 MPa untuk penampang dilas

fcr = tegangan kritis (Mpa)

ar = perbandingan luas pelat badan terhadap pelat sayap tekan

Cb = faktor pengali momen

Mmax = momen maksimum absolut pada bentang yang ditinjau, serta MA, MB, dan Mc adalah masing-masing momen absolut pada ¼ bentang, tengah bentang, dan ¾ bentang komponen struktur yang ditinjau

3.6.4 Pengekang Lateral

Kuat lentur nominal suatu penampang harus mampu menahan pengaruh tekuk lateral dan tergantung dari panjang bentang antara dua pengekang lateral yang berdekatan. Berdasarkan RSNI T-03-2005 tekuk lateral dapat dihitung dengan rumus sebagai berkut.

1. Bentang Pendek

Untuk komponen struktur yang memenuhi L ≤ Lp kuat nominal komponen struktur terhadap momen lentur adalah:

Mn = Mp

2. Bentang Menengah

Komponen struktur yang memenuhi Lp ≤ L ≤ Lr, kuat nominal komponen struktur terhadap momen lentur adalah:

3. Bentang Panjang

Komponen stukrtur yang memenuhi L ≥ Lr kuat nominal komponen struktur terhadap lentur adalah:

Mn = Mcr ≤ Mp

Keterangan:

L = panjang bentang diantara dua pengekang lateral terhadap displacement

lateral dari sayap tekan, atau diantara dua pengekang untuk menahan potongan terhadap twist (mm). Perhitungan panjang bentang untuk pengekang lateral dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3 Panjang Bentang Untuk Pengekangan Lateral

Profil	Lp	Lr
Profil-I dan kanal ganda	$1{,}76\gamma_y\sqrt{\frac{E}{f_y}}$ dengan $\gamma_y\sqrt{\frac{I_y}{A}}$	$\gamma_y\left[\frac{X_1}{f_L}\right]\sqrt{1+\sqrt{1+X_2{f_L}^2}}$ dengan $f_L = f_y - f_r$ $X_1 = \frac{\pi}{S}\sqrt{\frac{EGJA}{2}}$ $X_2 = 4\left(\frac{S}{GJ}\right)^2\frac{I_w}{I_y}$
Profil kotak pejal atau berongga	$0{,}13E\gamma_y\frac{\sqrt{JA}}{M_F}$	$2E\gamma_y\frac{\sqrt{JA}}{M_f}$

Sumber: RSNI T-03-2005

Dimana,

$f_L = f_y - f_r$

$J = \frac{1}{3} \times (b \times t^3)$

$I_w = I_y \times (\frac{h}{2})^2$

$G = \frac{E}{(2\ x\ (1+v))}$

Keterangan:

E = modulus elastisitas baja (MPa)

Iy = Inersia pada sumbu y (mm4)

G = modulus geser baja (MPa)

Iw = konstanta warping (mm6)

J = konstanta torsi (mm4)

ry = jari-jari girasi pada sumbu y (mm)

3.6.5 Interaksi Aksial dan Lentur

Komponen struktur yang mengalami momen lentur dan gaya aksial harus direncanakan memenuhi ketentuan berikut.

Keterangan:

Jika $\frac{Nu}{\emptyset_{c\,Nn}} \geq 0{,}2$; maka,

$\frac{Nu}{\emptyset_{Nn}} + \frac{8}{9} (\frac{Mux}{\emptyset_{b\,Mnx}} + \frac{Muy}{\emptyset_{b\,Mny}}) \leq 1{,}0$

Jika $\frac{Nu}{\emptyset_{c\,Nn}} \leq 0{,}2$; maka,

$\frac{Nu}{\emptyset c_{\,Nn}} + (\frac{Mux}{\emptyset_{b\,Mnx}} + \frac{Muy}{\emptyset_{b\,Mny}}) \leq 1{,}0$

Nu = gaya aksial (tarik atau tekan) terfaktor (N)

Nn = kuat nominal penampang (N)

Φc = faktor reduksi kekuatan komponen tekan

Mux = momen lentur terfaktor terhadap sumbu x (Nmm)

Muy = momen lentur terfaktor terhadap sumbu y (Nmm)

Mnx = kuat nominal lentur penampang terhadap sumbu x (Nmm)

Mny = kuat nominal lentur penampang terhadap sumbu y (Nmm)

Φb = faktor reduksi kuat lentur

3.7 Non-Destructive Testing (NDT)

Non-destructive Testing (NDT) adalah metode pengujian atau inspeksi yang dilakukan pada suatu objek untuk mendeteksi adanya cacat, retakan, atau ketidaksesuaian lainnya tanpa merusak objek tersebut. Tujuan utama dari NDT adalah memastikan bahwa material yang digunakan tetap aman dan belum melampaui batas toleransi kerusakan (damage tolerance). Hal ini penting untuk mencegah kegagalan material selama masa penggunaannya. Pengujian NDT umumnya dilakukan minimal dua kali. Pertama, selama dan setelah proses fabrikasi untuk memastikan bahwa komponen yang dihasilkan memenuhi standar kualitas. Pengujian ini merupakan bagian dari pengendalian mutu. Kedua, NDT dilakukan setelah komponen digunakan dalam periode tertentu untuk mendeteksi potensi kerusakan parsial sebelum mencapai batas toleransi.

Salah satu metode NDT yang sering digunakan adalah *ultrasonic testing,* yang berfungsi untuk mendeteksi ketidaksesuaian internal, seperti cacat dalam, sekaligus mengukur ketebalan material. Pengukuran ini biasanya diterapkan pada material berbasis logam. Metode ini menggunakan gelombang ultrasonik dengan frekuensi tinggi, yaitu lebih dari 20 kHz. Prinsip kerjanya adalah memanfaatkan gelombang ultrasonik yang dipancarkan oleh transducer ke objek yang diuji. Gelombang ini kemudian dipantulkan kembali dan diterima oleh receiver. Data dari gelombang yang diterima dianalisis berdasarkan intensitas, waktu rambat, atau resonansi yang terjadi. Pemeriksaan ultrasonik ini pada dasarnya memanfaatkan perbedaan intensitas gelombang yang diterima serta durasi perambatannya.

3.7.1 Ultrasonic thickness gauge

Ultrasonic thickness gauge merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengukuran ketebalan pada benda-benda padat, terkhusus pada benda yang memiliki daya hantar gelombang *ultrasonic* yang baik seperti baja pada Jembatan KA Pangukan. Alat ini digunakan untuk memastikan bahwa tidak terjadi korosi dengan cara melihat dari ketebalan pada baja. Alat ini juga memiliki kecepatan pengukuran yang tinggi, sehingga pengguna dapat menghemat waktu dalam proses pengukuran.



Gambar 3. 17 *Ultrasonic thickness gauge*

(Sumber: Blibli.com, 2023)

Selain akurasi dan kecepatan, alat pengukur ketebalan ini juga memiliki desain yang ergonomis. Alat ini ringan dan mudah digenggam, sehingga Anda dapat menggunakannya dengan nyaman dalam jangka waktu yang lama. Selain itu, alat ini juga tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras, seperti suhu ekstrem atau kelembaban tinggi.

3.7.2 Coating thickness gauge.

Coating thickness gauge merupakan sebuah alat ukur ketebalan yang secara khusus digunakan untuk melakukan pengukuran ketebalan pada lapisan/coating permukaan pada suatu benda. Biasanya yang diukur adalah permukaan benda yang berbahan logam, baik yang memiliki sifat *ferrous* ataupun *non-ferrous.*



Gambar 3. 18 ***Coating thickness gauge***

(Sumber: Amazon, 2023)

Alat ini menerapkan prinsip prinsip pengukuran induktif atau magnetik. Ketika sensor ditempatkan di atas permukaan yang akan diukur, alat ini akan mengukur jarak antara permukaan tersebut dan bahan dasarnya. Perbedaan antara jarak ini dengan tanpa lapisan akan memberikan informasi tentang ketebalan lapisan yang ada (Dinas kebudayaan Kundha Kabudayaan kabupaten Sleman, 2020).

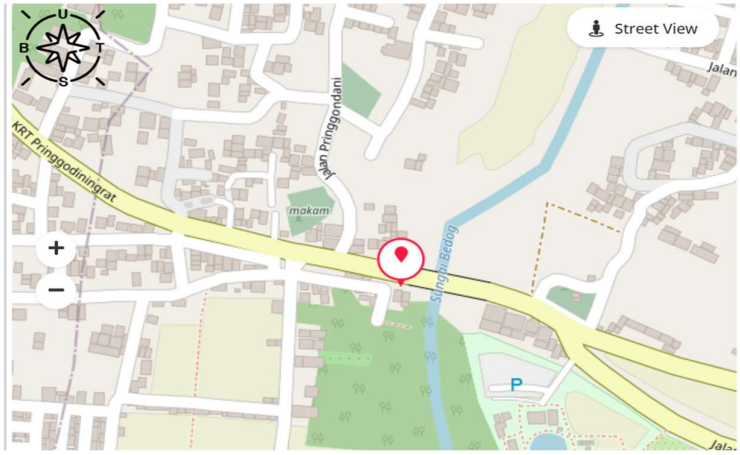
BAB IV
METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur atas dari sebuah jembatan rangka baja. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode pengukuran ketebalan lapisan non destruktif dengan menggunakan alat *ultrasonic thickness gauge* dan *coating thickness gauge.* Lalu hasil pengukuran *NDT* dibandingkan dengan pengukuran manual dan di modelkan dengan program *SAP2000* berdasarkan data yang diperoleh dilapangan. *Output* dari permodelan ini adalah gaya gaya pada elemen rangka akibat dari beban yang telah di masukkan kedalam permodelan ini. Pengujian ini dilakukan di lokasi jembatan KA pangukan, Sleman.

4.2 Lokasi Jembatan

Jembatan Kereta Api Pangukan, Sleman terletak Jl. KRT Pringgodiningrat Padukuhan Pangukan, di atas Sungai Bedog Kel. Tridadi Kec. Sleman Kab. Sleman Prov. Daerah Istimewa Yogyakarta dapat dilihat pada gambar 4.2 berikut.



Gambar 4. 2 Lokasi Jembatan Kereta Api Pangukan

(Sumber: *Google Maps*)

4.3 Data Penelitian

Pada penelitian ini, salah satu yang penting adalah data-data yang dapt menunjang untuk menganalisis struktur jembatan. Data tersebut didapatkan langsung dari sumber pertama berupa data pengamatan dan pengujian lapangan dalam bentuk pemeriksaan jembatan. Jembatan KA Pangukan ini sudah berumur 128 tahun. Dibangun pada 1896 oleh Nederlandsch Indische Spoorweg Maatschappij (NISM), sehingga adanya keterbatasan dalam mencari data perencanaan Jembatan ini. Dari data pengamatan dan pengujian lapangan tersebut akan dilakukan analisis kekuatan pada jembatan berdasarkan masa layan. Terdapat beberapa data yang terkumpul yaitu sebagai berikut

4.3.1 Data Primer

Berikut merupakan data primer yang digunakan untuk menunjang analisis struktur Jembatan KA Pangukan.

Nama Jembatan : Jembatan Pangukan
Tahun Pembuatan : 1896
Tipe Bangunan Atas : Pratt Truss
Jumlah Bentang : 1 bentang
Panjang Bentang : 30 meter
Lebar Jembatan : 2,5 meter
Tinggi Jembatan : 4,45 meter

4.3.2 Material Jembatan

Pada Jembatan Kereta Api Pangukan Sleman ini tersusun dari susunan lempengan dan batang baja yang disambung menggunakan sistem baut, mur, dan las. Penentuan nilai mutu material baja seharusnya menggunakan standar jembatan struktur rangka baja.

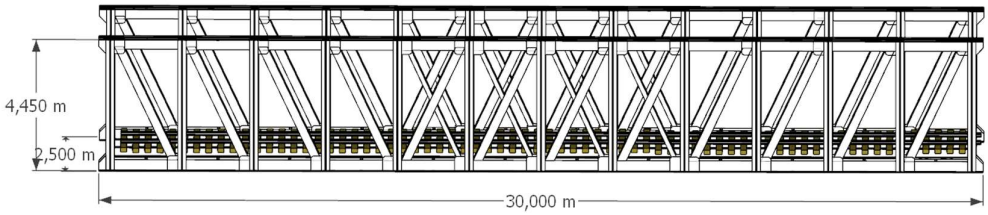
4.3.3 Data Gambar Jembatan

Berikut merupakan gambar Jembatan KA Pangukan, Sleman:



Gambar 4. 3 Jembatan KA Pangukan

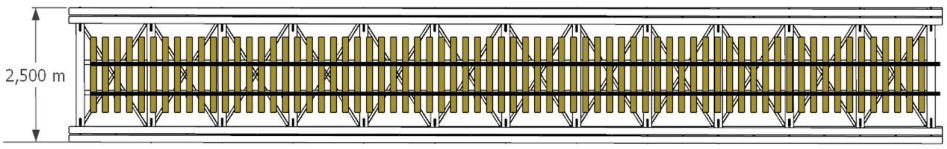
(Sumber: Dinas Kebudayaan DIY, 2025)



Gambar 4. 4 Permodelan Jembatan KA Pangukan

(Sumber: Permodelan Struktur, 2025)

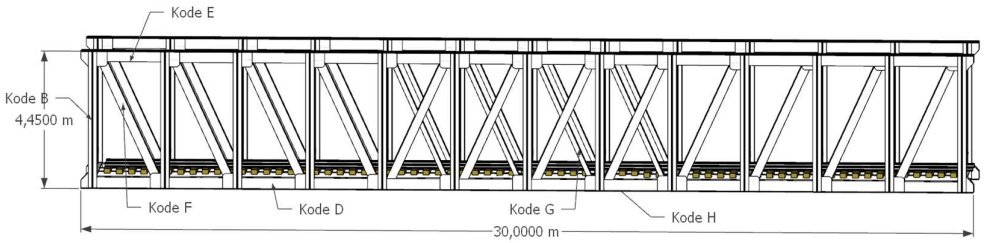
Berdasarkan Gambar 4.4 di atas menunjukkan elemen jembatan yang akan dianalisis kapasitasnya hanyalah elemen dari titik tumpuan A (Tumpuan rol) ke titik tumpu B (Tumpuan Sendi), yaitu sepanjang 30 m. Sedangkan pada Gambar 4.5 di bawah ini merupakan Tampak Atas dari Jembatan Kereta Api Pangukan Sleman.



Gambar 4. 5 Tampak Atas Jembatan KA Pangukan

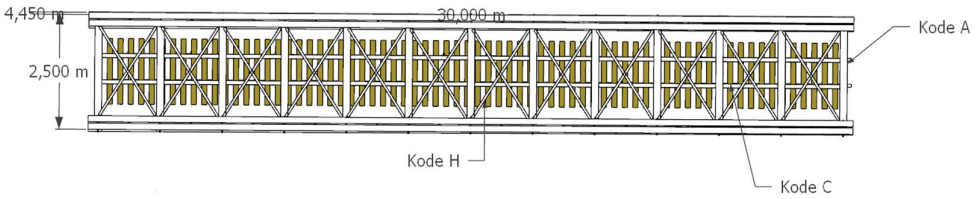
(Sumber: Permodelan Struktur, 2025)

4.3.4 Data Profil Jembatan



Gambar 4. 6 Kodefikasi Profil Jembatan Tampak Samping

(Sumber: Permodelan Struktur, 2025)



Gambar 4. 7 Kodefikasi Profil Jembatan Tampak Bawah

(Sumber: Permodelan Struktur, 2025)

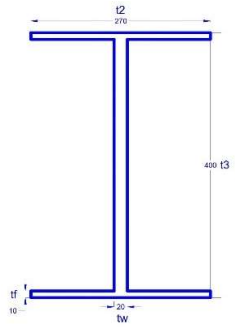
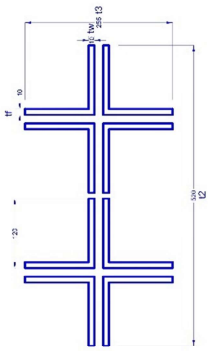
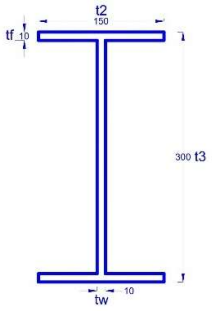
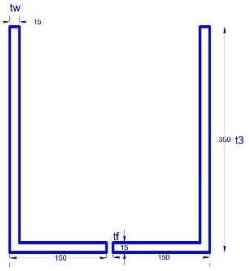
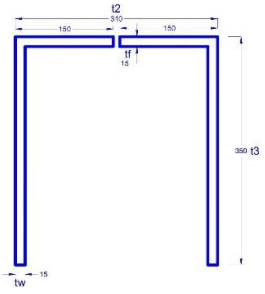
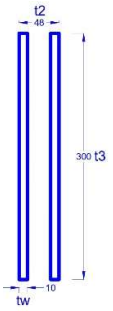
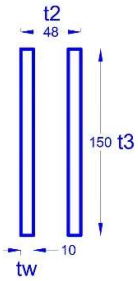
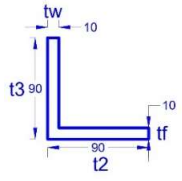
Tabel 4. 4 Tipe Profil

No	Elemen	Tipe Profil	Kode
1	Gelagar Melintang	Plate Girder	A
2	Rangka Vertikal	Built Up Member	B
3	Gelagar Memanjang Tengah	Plate Girder	C
4	Gelagar Memanjang Tepi Bawah	Built Up Member	D
5	Gelagar Memanjang Tepi Atas	Built Up Member	E
6	Rangka Diagonal 1	Rectangular	F
7	Rangka Diagonal 2	Rectangular	G
8	Ikatan Angin Bawah	L	H

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Berikut ini merupakan Profil – profil pada Jembatan KA Pangukan, Sleman

Tabel 4. 5 Profil Jembatan

PROFIL JEMBATAN			
Kode A	Kode B	Kode C	Kode D
			
Kode E	Kode F	Kode G	Kode H
			

Sumber: Hasil Analisis, 2025

4.4 Metode Penggunaan Alat

Pada penelitian ini, dibutuhkan alat penelitian agar penelitian berjalan dengan lancar. Alat penelitian yang dibutuhkan selama penelitian adalah sebagai berikut.

1. *Ultrasonic thickness gauge*

Ultrasonic thickness gauge merupakan alat yang digunakan untuk melakukan pengukuran ketebalan pada benda-benda padat, terkhusus pada benda yang memiliki daya hantar gelombang ultrasonic yang baik seperti baja pada Jembatan KA Pangukan. Alat ini digunakan untuk memastikan bahwa tidak terjadi korosi dengan cara melihat dari ketebalan pada baja. Untuk mengukur ketebalan material, perlu menempatkan probe di permukaan material yang ingin diukur. Kemudian, gelombang ultrasonik akan dipancarkan melalui probe dan merambat melalui material. Pantulan gelombang tersebut kemudian akan diterima oleh probe. Unit pengukur akan menghitung waktu tempuh gelombang ini dan mengkonversinya menjadi nilai ketebalan material yang ditampilkan di layar.



Gambar 4. 8 Penggunaan *Ultrasonic thickness gauge*

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

2. *Coating thickness gauge*

Coating thickness gauge merupakan sebuah alat ukur ketebalan yang secara khusus digunakan untuk melakukan pengukuran ketebalan pada lapisan/coating permukaan pada suatu benda. Biasanya yang diukur adalah permukaan benda yang berbahan logam, baik yang memiliki sifat ferrous ataupun non-ferrous. Setelah menyalakan coating thickness gauge dan tempatkan probe pada permukaan yang akan diukur. Patikan probe berada di posisi tengah permukaan. Tekan dan tahan probe. Ketika pengukuran sudah valid, muncul bunyi 'bip' dan hasil pengukuran akan ditampilkan pada layar LCD. Angkat probe ±2 inci (5 cm) dari permukaan, dan letakkan probe di lokasi yang sama untuk pengukuran berkelanjutan setiap 2 detik.



Gambar 4. 9 Penggunaan *Coating thickness gauge*

(Sumber: Dokumentasi Pribadi, 2025)

3. Meteran

Meteran adalah salah satu Measurement Tools paling umum yang digunakan dalam konstruksi. Alat ini digunakan untuk mengukur panjang atau jarak antara dua titik.



Gambar 4. 10 Meteran

(Sumber: LKPP, 2022)

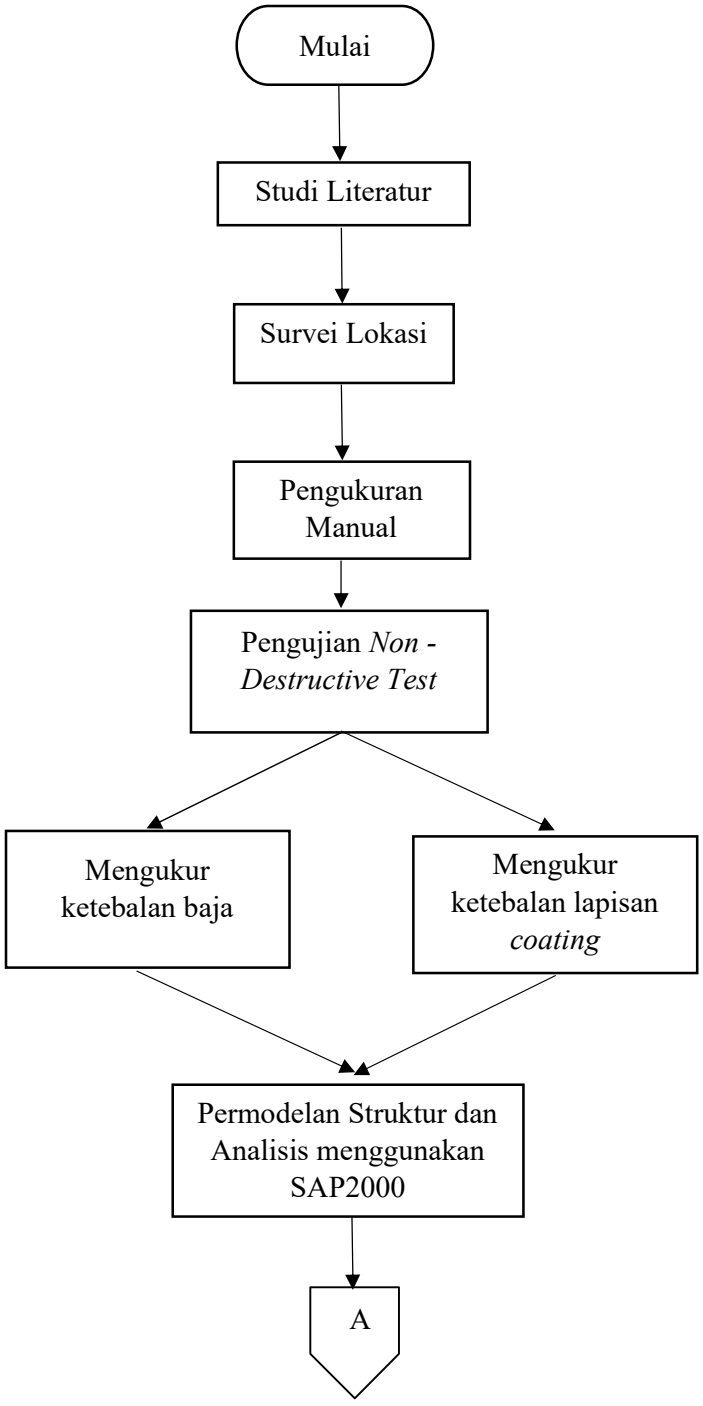
4.5 Tahapan Penelitian

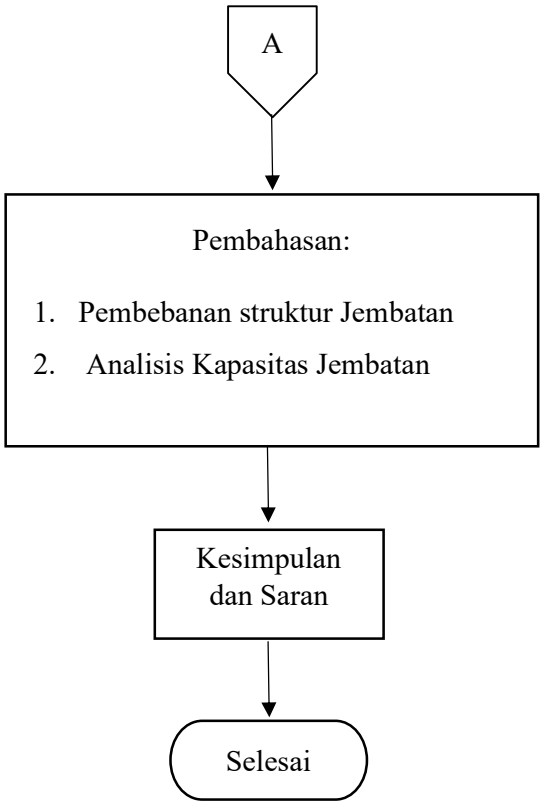
Pada tugas akhir ini dilakukan analisis dengan melakukan pengukuran ketebalan lapisan non destruktif menggunakan alat *ultrasonic thickness gauge* dan *coating thickness gauge.* Lalu dari hasil pengujian akan dianalisis apakah Jembatan KA Pangukan masih layak untuk digunakan setelah masa layan. Tahapan penelitian adalah sebagai berikut.

1. Melakukan pengukuran dimensi jembatan KA Pangukan
2. Melakukan Pengujian *Non-Destructive Test:*
3. Mengukur ketebalan permukaan pada baja dengan menggunakan *Ultrasonic thickness gauge.*
4. Melakukan pengukuran ketebalan lapisan/coating permukaan pada baja dengan menggunakan *Coating thickness gauge.*
5. Melakukan permodelan berdasarkan hasil pengukuran lapangan dengan *instrument NDT*
6. Melakukan analisis struktur terhadap standar/peraturan yang berlaku.
7. Menyimpulkan hasil dari perngujian dan analisis yang sudah dilakukan.

4.6 Bagan Alir Penelitian

Berikut bagan alir penelitian yang dilakukan oleh penulis.





Gambar 4. 11 Bagan Alir *(Flowchart)* Pekerjaan Penelitian Tugas Akhir

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

BAB V
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Pembebanan

Pada struktur jembatan KA Pangukan terdapat beberapa tinjauan beban atau gaya yang bekerja statis maupun dinamis yaitu terdiri dari beban mati, beban hidup, beban kejut, beban lateral, beban pengereman, beban rel Panjang, beban angin, dan beban gempa. Dalam tugas akhir ini, pembebanan jembatan mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api dan RSNI T-03-2005 tentang Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan yang kemudian akan dilakukan permodelan dengan *SAP2000.*

5.1.1 Beban Mati

Pada penelitian ini, yang termasuk kategori beban mati adalah seluruh beban yang berasal dari baja rel kereta api dan bantalan rel yang terbuat dari material kayu dan sambungan dari rel yang menumpu pada struktur. Berikut merupakan perhitungannya.

1. Bantalan Kayu

   Dimensi bantalan rel yang digunakan untuk jembatan ini yaitu:

   Panjang bantalan (p) = 1,5 m
   Lebar bantalan (l) = 0,20 m
   Tinggi bantalan (t) = 0,15 m
   Jarak bantalan (x) = 0,2 m

2. Rel kereta

   Panjang rel (p) = 30 m
   Jenis rel = Tipe R.42
   Berat rel (W) = 0,41766522 kN/m
   Jarak kedua rel = 1,067 m

Tabel 5. 14. Dimensi Penampang Rel

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm^2)	54,26	64,20	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I_x (cm^4)	1369	1960	2346	3055
Y_b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
A = luas penampang				
W = berat rel permeter				
I_x = momen inersia terhadap sumbu x				
Y_b = jarak tepi bawah rel ke garis netral				

Sumber: PM No. 60 Tahun 2012

3. Perhitungan Berat Titik

   Berat rel (W) = 0,41766522 kN/m

   Berat 0,2 m Rel = 0,41766522 X 0,2

   = 0,083533 kN/m

   Tumpuan Kayu = Volume kayu x Masa jenis kayu / 2

   = (p x l x t x 9 kN/m) /2

   = (1,5m x 0,20 x 0,15m x 9) /2

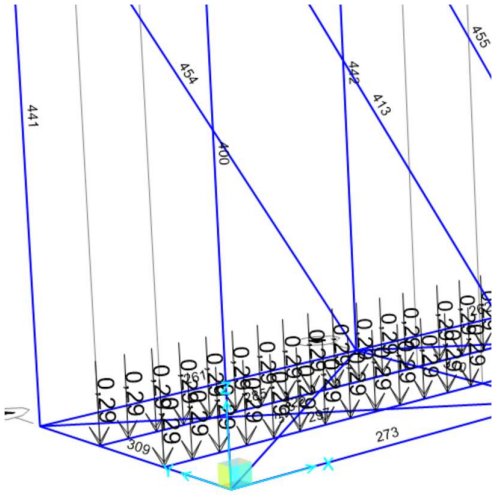
   = 0,2025 kN/m

   Berat Titik = 0,104416 + 0,3375

   = 0,286 kN/m

4. Proyeksi Beban Mati pada SAP2000

   Berikut merupakan hasil proyeksi arah beban mati pada Jembatan Kereta Api Pangukan



Gambar 5. 1 Proyeksi arah datangnya Beban Mati

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.1.2 Beban Hidup

Beban hidup adalah beban yang dapat berpindah. Penentuan beban hidup pada jembatan kereta api mengacu pada PM.60 Tahun 2021.

1. Lokomotif CC 206

   Lokomotif tipe CC 206 diambil yang paling relevan dan paling sering dioperasikan oleh PT. KAI dan juga dinilai yang paling berat sehingga kapasitas jembatan dirancang untuk beban maksimum dari lokomotif terberat karena memiliki jumlah 2 bogie dengan 3 roda statis.

2. Berat Titik Lokomotif CC 206

   Berat (wlok) = 90 Ton

   Gaya pada bogie (Pb)

   Pb $= \frac{Wlok}{2}$

   $= \frac{90}{2}$

   = 45 ton/bogie

   = 441,3 kN

Gaya gandar (Pg)

Pg $= \frac{Pb}{3}$

$= \frac{45}{3}$

= 15 ton/gandar

= 147,1 kN

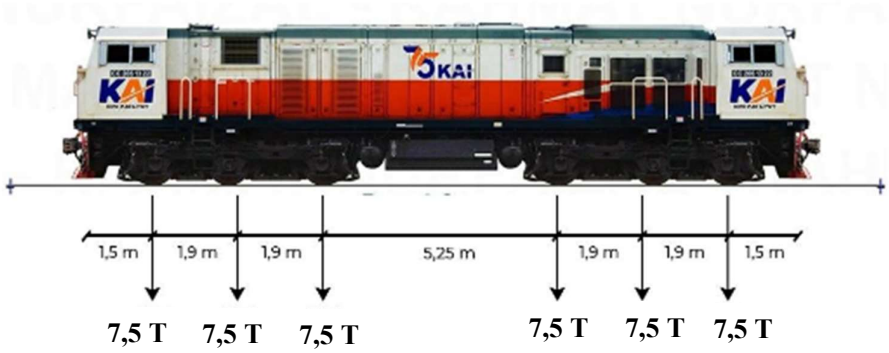
Gaya roda statis (Ps)

Ps $= \frac{Pg}{2}$

$= \frac{15}{2}$

= 7,5 ton/roda

= 73,549 kN



Gambar 5. 2 Proyeksi Pembebanan pada Lokomotif

(Sumber: https://www.balai3d.web.id)

3. Kereta

   Kereta pada tahun 1896 memiliki berat lebih ringan sekitar 40 untuk kereta barang. Kereta memiliki jumlah 2 bogie dengan 3 roda statis.

4. Berat Titik Kereta

   Berat total kereta = 40 Ton

   Gaya pada bogie (Pb)

   Pb $= \frac{Wlok}{2}$

   $= \frac{40}{2}$

   = 20 ton/bogie

= 196,13 kN

Gaya gandar (Pg)

Pg $= \frac{Pb}{3}$

$= \frac{20}{3}$

= 6,667 ton/gandar

= 65,38 kN

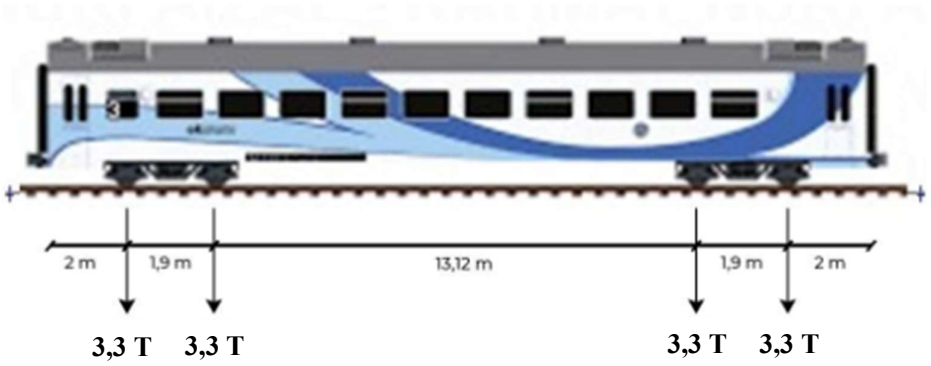
Gaya roda statis (Ps)

Ps $= \frac{Pg}{2}$

$= \frac{6,667}{2}$

= 3,3 ton/roda

= 32,362 kN



Gambar 5. 3 Proyeksi Pembebanan pada Kereta/Gerbong

(Sumber: https://www.balai3d.web.id)

5. Bogie

   Jarak antar roda statis pada bogie as ke as adalah 1,9m

6. Perhitungan Beban Hidup

   Beban hidup dihitung sesuai dengan jarak beban dari ujung depan lokomotif sampai ujung belakang kereta menyesuaikan dengan panjang jembatan. Pada Jembatan KA Pangukan jumlah lokomotif dan kereta yang dapat tertumpu adalah 1 lokomotif dan 1 kereta, hal tersebut dilakukan karena 1 lokomotif dengan 1 kereta adalah beban terbesar yang lewat pada Jembatan KA Pangukan.

5.1.3 Beban Kejut

Beban kejut Besaran nilai beban kejut adalah:

Panjang rel pada Jembatan = 30 m

Rel perletakan kayu (i) = $0{,}2 + \frac{25}{50+L}$

$= 0{,}2 + \frac{25}{50+3}$

$= 0{,}5125$

Untuk beban lokomotif = 0,5125 x 9

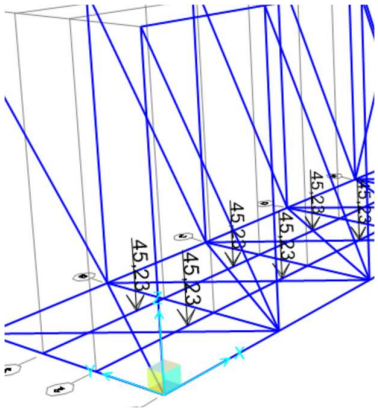
= 4,6125 Ton

= 45,233 kN/m

Untuk beban kereta = 0,5125 x 5

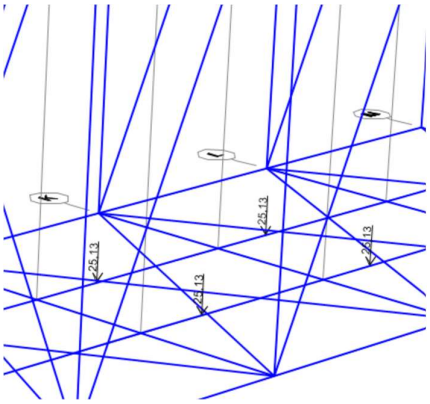
= 2,5625 Ton

= 25,129 kN/m



Gambar 5. 4 Proyeksi Arah datangnya Beban Kejut Lokomotif

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 5 Proyeksi Arah datangnya Beban Kejut Kereta

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.1.4 Beban Lateral

Beban bekerja pada bagian atas dan tegak lurus arah rel secara horizontal. Besaran nya adalah 15% atau 20% dari beban gandar untuk masing-masing lokomotif. Diambil 20% karena dinilai paling besar.

Untuk beban lokomotif = 0,2 x 9

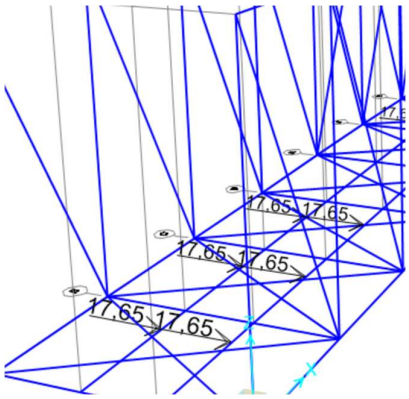
= 1,8 Ton

= 17,652 kN/m

Untuk beban kereta = 0,2 x 5

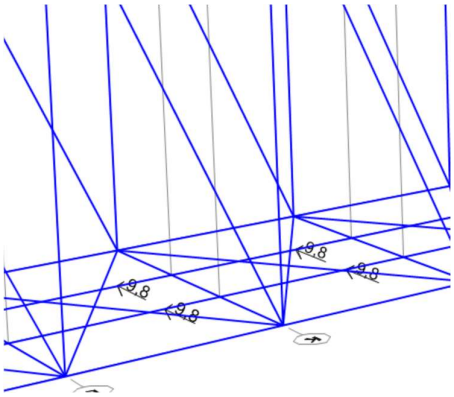
= 1 Ton

= 9,8067 kN/m



Gambar 5. 6 Proyeksi Arah datangnya Beban Lateral Lokomotif

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 7 Proyeksi Arah datangnya Beban Lateral Kereta

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.1.5 Beban pengereman dan traksi

Beban pengereman dan traksi masing-masing adalah 25% dari beban kereta dan bekerja pada pusat gaya berat kereta kea rah rel (secara longitudinal)

Untuk beban lokomotif = 0,25 x 9

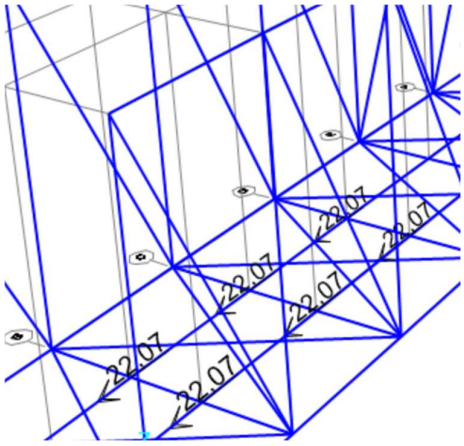
= 2,25 Ton

= 22,065 kN/m

Untuk beban kereta = 0,25 x 5

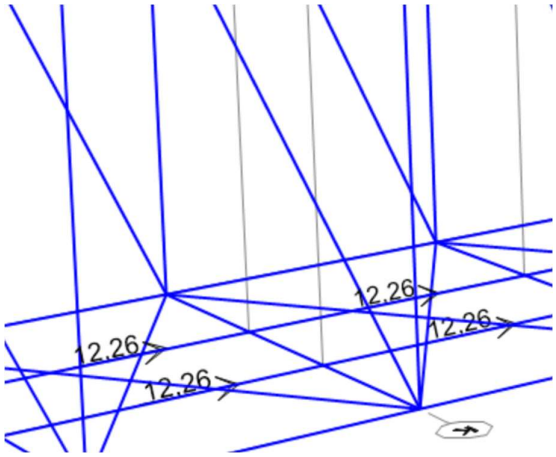
= 1,25 Ton

= 12,258 kN/m



Gambar 5. 8 Proyeksi Arah datangnya Beban Rem Lokomotif

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 9 Proyeksi Arah datangnya Beban Rem Kereta

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.1.6 Beban Angin

Berdasarkan beban angin yang di bahas dalam PM no.60 th 2021 dimana besarnya beban angin yang bekerja pada jembatan kereta api berlaku dibagi menjadi 2 jenis yaitu W1 =3 kN/m dan W2 = 1,5 kN/m.

Panjang jembatan (b) = 30 m

Tinggi jembatan (h) = 4,45 m

Luas Penampang (Ag) = b x h

= 30 m x 4,45 m

= 133,5 m^2

A efektif = Ag x 30%

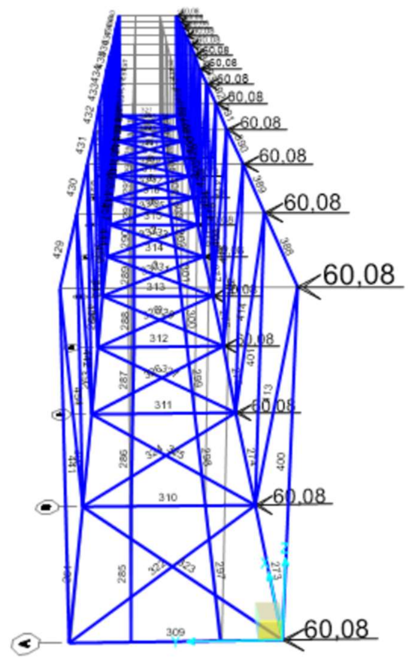
= 133,5 x 30%

= 40,05 m^2

Beban Angin = W x A efektif

= 3 kN/m^2 x 40,05 m^2

= 120,15 kN/m^2



Gambar 5. 10 Beban Angin

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.1.7 Beban Gempa

Pembebanan gempa akan merujuk pada SNI 2833-2016 yaitu standar perencanaan ketahanan gempa untuk jembatan dan juga analisis struktur jembatan dengan software SAP2000. Adapun perhitungan nya ialah sebagai berikut:

1. Level Gempa

   Pada peta gempa SNI 2833-2016 dengan level gempa terlampaui 7% dalam 75 tahun (gempa 1000 tahun).

2. Kelas Situs

   Pada kelas situs diketahui Tanah Lunak berdasarkan data yang ada di lapangan.

3. Menentukan Respons Spektra untuk Periode Nol Detik

   Didapatkan nilai koefisien gempa (Spga) pada daerah DI Yogyakarta sebesar 0,415 g

4. Menentukan nilai PGA dan As

   Nilai PGA dan kelas situs digunakan untuk menentukan nilai faktor amplifikasi. Nilai PGA diplotkan pada Tabel 3 SNI 2833:2016 dengan proses interpolasi linear diperoleh nilai faktor amplifikasinya (Fpga) = 1,085
   Maka nilai As= Fpga x Spga = 1,085 x 0,415 g = 0,450 g

5. Menentukan Respons Spektra di permukanaan tanah untuk periode pendek (T = 0,2 detik)

   Menggunakan peta pada Gambar 2 SNI 2833:2016, untuk daerah DI Yogyakarta didapatkan nilai koefisien gempa (Ss 0,2 detik) = 0,919 g. Nilai Ss 0,2 detik dan kelas situs digunakan untuk menentukan nilai faktor amplifikasi (Fa).

6. Menentukan Nilai Faktor Amplifikasi (Fa)

   Nilai Fa diplotkan pada Tabel 3 SNI 2833:2016 dengan proses interpolasi linear dan diperolerh faktor amplifikasinya (Fa)= 1,132. Kemudian nilai SMS dan SDS dapat ditentukan sebagai berikut:

   SMS = Fa x Ss 0,2 dt = 1,132x 0,919
   = 1,041

   SDS = 2/3 x SMS = 0,694

7. Menentukan Respon Sprektra di permukaan tanah untuk periode 1 detik

   Menggunakan peta pada Gambar 3 SNI 2833:2016, untuk daerah DI Yogyakarta didapatkan nilai koefisien gempa (Ss 1 detik) = 0,366 g. Nilai Ss 1 detik dan kelas situs digunakan untuk menentukan faktor amplifikasi (Fv)

8. Menentukan Nilai Faktor Amplifikasi (Fv)

   Nilai Fv diplotkan pada Tabel 4 SNI 2833:2016 dengan proses interpolasi linear diperoleh nilai faktor amplifikasinya (Fv) = 1,667. Kemudian nilai SM1 dan SD1 dapat ditentukan sebagai berikut:

   SM1 = Fv x Ss 1 dt = 1,667 x 0,366
   = 0,610

   SD1= 2/3 x SM1 = 2/3 x 0,610
   = 0,407

9. Menentukan nilai T0 dan Ts dari nilai SDS dan SD1

   Untuk nilai Ts, didapatkan nilai sebagai berikut:

   Ts = SD1/SDS = 0,407/0,610

   = 0,586 detik

   Sedangkan untuk nilai T0, didapatkan nilai sebagai berikut:

   T0 = 0,2 x Ts = 0,2 x 0,586

   = 0,117 detik

10. Plot Grafik Tipikal Respon Spektra di Permukaan

    Berikut merupakan gambar plot dari T0 dan Ts

11. Menentukan Nilai Penggunaan atau Keutamaan Struktur

    Untuk jembatan nilai keutamaan strukturnya adalah 1, maka I= 1

12. Menentukan Tingkat Daktilitas Struktur (R)

    Nilai R didapat dari Tabel 6 SNI 2833:2016 yaitu 8

13. Menentukan Periode Getar Struktur

    H (tinggi) elemen paling tinggi adalah 4,45 m. Maka T (periode) baja pemikul momen nya menurut SNI 2833:2016 adalah sebagai berikut:

    T Baja pemikul momen = 0,0724 x H^0,8

    = 0,0724 x 4,45^0,8

    = 0,239

14. Menentukan Cs

    Kemudian dicari Cs, kita asumsikan sebagai V,

    V pakai (Cs1) = (SDS x I) / R
    = (0,694 x 1)/8
    = 0,086

    V upper bound (Cs2) = (SD1 x I) / (T x R)
    = (0,407 x 1) / (0,239 x 8)
    = 0,2127

    V lower bound (Cs3) = (0,5x I x SM1)/R
    = (0,5 x 1 x 0,610)/8
    = 0,0381

15. Menentukan Cs Ambil

    Menurut SNI 2833:2016, ketika V pakai (Cs1) lebih besar dari pada V lower

bound (Cs3) dan lebih kecil dari V upper bound (Cs2) maka V yang digunakan adalah V pakai (Cs1). Ketika V pakai (Cs1) lebih besar dari V upper bound (Cs2) maka yang digunakan adalah V upper bound (Cs2). Jika Cs2 > Cs1 > Cs3 maka dipakai Cs1 dan ketika Cs1 > Cs2 maka dipakai Cs2

Maka nilai Cs yang diambil adalah Cs1 yaitu 0,08669

16. Menentukan W (Berat) Total Jembatan

Berat beban mati (W dead) = W dead x faktor beban
= 498,151 x 1
= 498,151 KN

Berat beban hidup (W live) = W live x faktor beban
= 1012,04 x 1,1
= 1113,24 KN

W Total = W dead + W live
= 1611,391 KN

17. Faktor Gempa

Fi = 1 x Cs diambil x W total x Total Joint pada Jembatan
= 1 x 0,08669 x 1611,391 x 52 = 2,69 KN

Maka faktor pembebanan dari beban gempa adalah 2,69 KN.

5.1.8 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi Pembebanan pada struktur ini diambil dari kombinasi pembebanan pada PM No. 60 Tahun 2012. Kombinasi pembebanan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.2 dibawah ini.

Tabel 5. 2 Kombinasi Pembebanan Jembatan Kereta

Kombinasi Pembebanan	Faktor								
	Beban Tetap	Beban Transien							
	D	L	I	LF	B	W1	W2	EQY	EQX
COMB1	1,0	1,1	1,1						
COMB2	1,0	1,1	1,1	1,0			1,0		
COMB3	1,0	1,1			1,0		1,0		
COMB4	1,0					1,2			
COMB5					1,1				
COMB6				1,1			1,0		
COMB7					1,1		1,0		
COMB8	1,0	1,0							1,0
COMB9								1,0	
COMB10	1,0	1,0							

Sumber: PM No. 60 Tahun 2012

5.2 Permodelan Struktur Berdasarkan Pengukuran Manual

Pemodelan struktur yang dilakukan pada Jembatan Kereta Api Pangukan dilakukan dengan menggunakan program *SAP2000* berdasarkan data yang diperoleh dilapangan. Output dari permodelan ini adalah gaya-gaya pada elemen rangka akibat dari beban yang telah di masukkan kedalam permodelan ini.

5.2.1 Material Jembatan

Pada struktur atas Jembatan Kereta Api menggunakan material baja dengan spesifikasi baja BJ55 yaitu baja dengan tegangan putus minimum (fu) =410 Mpa dan tegangan leleh minimum (fy) = 550 Mpa dengan peregangan minimum modulus elastisitas sebesar 13% dan modulus elastisitasnya sebesar 200.000 Mpa.

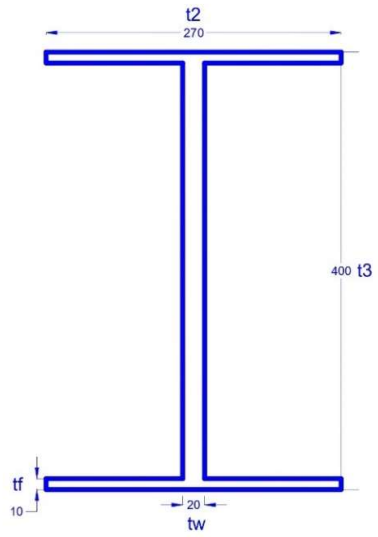
5.2.2 Dimensi Batang (*Frame Properties)*

Pada Jembatan Kereta Api Pangukan sebagian besar profil nya menggunakan profil baja lama yang sudah tidak keluar lagi pada era *modern* ini dan beberapa profilnya memakai pengaku karena dari tahun ke tahun modifikasi tidak pernah mengganti profil sehingga perlu dilakukan asumsi pada proses *input* profil pada program SAP2000 v.22. Tabel 5.3 berikut ini berisi daftar dari penamaan profil dan terdapat 8 jenis profil baja pada Jembatan Kereta Api Pangukan.

Tabel 5. 3 Profil Baja pada Jembatan Kereta Api Pangukan

No	Elemen	Tipe Profil	Kode
1	Gelagar Melintang	Plate Girder	A
2	Rangka Vertikal	Built Up Member	B
3	Gelagar Memanjang Tengah	Plate Girder	C
4	Gelagar Memanjang Tepi Bawah	Built Up Member	D
5	Gelagar Memanjang Tepi Atas	Built Up Member	E
6	Rangka Diagonal 1	Rectangular	F
7	Rangka Diagonal 2	Rectangular	G
8	Ikatan Angin Bawah	L	H

Sumber: Hasil Analisis, 2025



Gambar 5. 11 Profil Gelagar Melintang Kode A

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

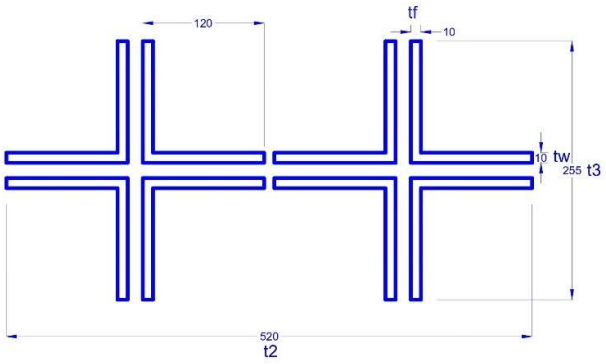
Berdasarkan gambar 5.11 diketahui dimensi pada profil Kode A adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 400 mm

Lebar profil (t2) = 270 mm

Tebal sayap (tf) = 10 mm

Tebal badan (tw) = 20 mm



Gambar 5. 12 Profil Rangka Vertikal Kode B

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

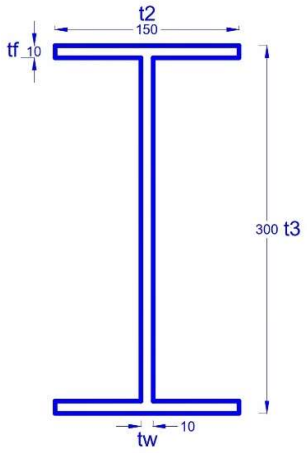
Berdasarkan gambar 5.12 diketahui dimensi pada profil Kode B adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 255 mm

Lebar profil (t2) = 520 mm

Tebal sayap (tf) = 10 mm

Tebal badan (tw) = 10 mm



Gambar 5. 13 Profil Gelagar Memanjang Tengah Kode C

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

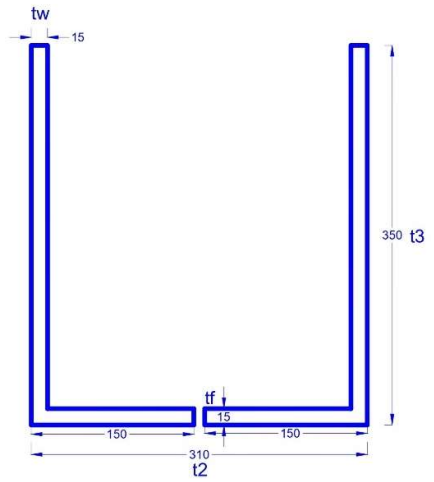
Berdasarkan gambar 5.13 diketahui dimensi pada profil Kode C adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 300 mm

Lebar profil (t2) = 150 mm

Tebal sayap (tf) = 10 mm

Tebal badan (tw) = 10 mm



Gambar 5. 14 Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

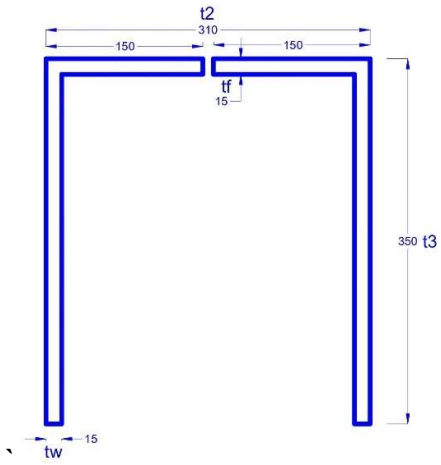
Berdasarkan gambar 5.14 diketahui dimensi pada profil Kode D adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 350 mm

Lebar profil (t2) = 310 mm

Tebal sayap (tf) = 15 mm

Tebal badan (tw) = 15 mm



Gambar 5. 15 Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas Kode E

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

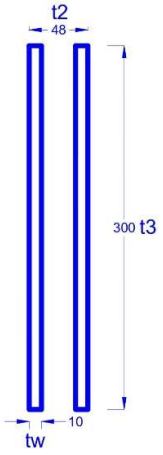
Berdasarkan gambar 5.15 diketahui dimensi pada profil Kode E adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 350 mm

Lebar profil (t2) = 310 mm

Tebal sayap (tf) = 15 mm

Tebal badan (tw) = 15 mm



Gambar 5. 16 Profil Rangka Diagonal 1 Kode F

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

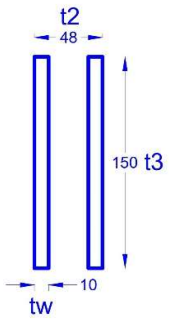
Berdasarkan gambar 5.16 diketahui dimensi pada profil Kode F adalah sebagai berikut.

Panjang Batang = 4500 mm

Tinggi Profil (t3) = 300 mm

Lebar profil (t2) = 48 mm

Tebal Profil (tw) = 10 mm



Gambar 5. 17 Profil Rangka Diagonal 2 Kode G

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

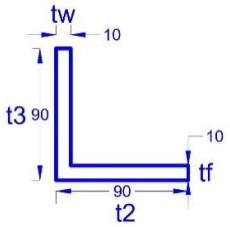
Berdasarkan gambar 5.17 diketahui dimensi pada profil Kode G adalah sebagai berikut.

Panjang Batang = 4500 mm

Tinggi Profil (t3) = 150 mm

Lebar profil (t2) = 48 mm

Tebal Profil (tf) = 10 mm



Gambar 5. 18 Profil Ikatan Angin Kode H

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Berdasarkan gambar 5.18 diketahui dimensi pada profil Kode H adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 90 mm

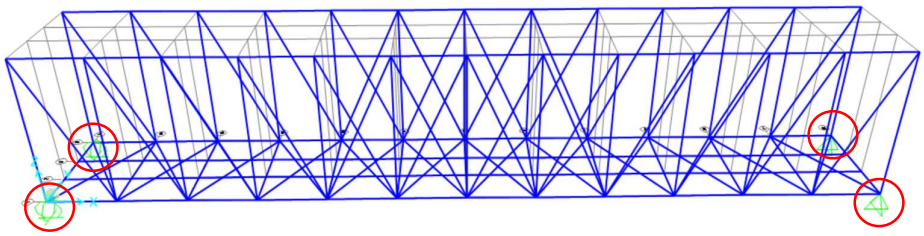
Lebar profil (t2) = 90 mm

Tebal sayap (tf) = 10 mm

Tebal badan (tw) = 10 mm

5.2.3 Tumpuan (Restraint)

Pada umumnya jembatan memiliki tumpuan untuk meneruskan reaksi yang dihasilkan dari suatu sistem pembebanan di struktur atas ke struktur bawah dari jembatan tersebut. Berdasarkan hasil pengamatan secara langsung di lapangan, Jembatan Kereta Api Pangukan menggunakan tumpuan berjenis sendi dan rol. Tumpuan rol mampu menahan reaksi dari segala arah, Untuk tumpuan sendi mampu menahan reaksi dari segala arah pada satu titik dan tidak dapat berpindah tempat. Berikut ini merupakan Gambar 5.19 tumpuan pada jembatan Pangukan.



Gambar 5. 19 Tumpuan Jembatan Pangukan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.3 Permodelan Struktur berdasarkan Hasil Pengujian NDT

Permodelan struktur pada penelitian ini menggunakan *software* SAP2000 untuk menganalisis perilaku struktur terutama untuk mengevaluasi kekuatan, deformasi atau faktor keamanan.

5.3.1 Material Jembatan

Pada struktur atas Jembatan Kereta Api menggunakan material baja dengan spesifikasi baja BJ55 yaitu baja dengan tegangan putus minimum (fu) = 410 Mpa dan tegangan leleh minimum (fy) = 550 dengan peregangan minimum modulus elastisitas sebesar 13%. Spesifikasi lainnya adalah dengan modulus elastisitas sebesar 200.000 Mpa.

5.3.2 Dimensi Batang Pengujian NDT (Frame Properties)

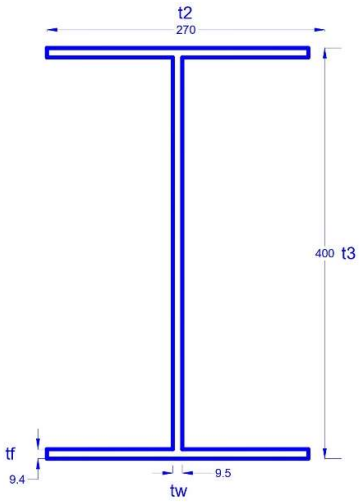
Pada Jembatan Kereta Api Pangukan sebagian besar profil nya menggunakan profil baja lama yang sudah tidak keluar lagi pada era *modern* ini dan

beberapa profilnya memakai pengaku karena dari tahun ke tahun modifikasi tidak pernah mengganti profil sehingga perlu dilakukan asumsi pada proses *input* profil pada program SAP2000. Tabel 5.4 berikut ini berisi daftar dari penamaan profil dan terdapat 8 jenis profil baja pada Jembatan Kereta Api Pangukan yang diambil menggunakan alat *NDT Ultrasonic thickness gauge*

Tabel 5. 4 Profil Baja pada Jembatan Kereta Api Pangukan

No	Elemen	Tipe Profil	Kode
1	Gelagar Melintang	Plate Girder	A
2	Rangka Vertikal	Built Up Member	B
3	Gelagar Memanjang Tengah	Plate Girder	C
4	Gelagar Memanjang Tepi Bawah	Built Up Member	D
5	Gelagar Memanjang Tepi Atas	Built Up Member	E
6	Rangka Diagonal 1	Rectangular	F
7	Rangka Diagonal 2	Rectangular	G
8	Ikatan Angin Bawah	L	H

Sumber: Hasil Analisis, 2025



Gambar 5. 20 Profil Gelagar Melintang Kode A

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

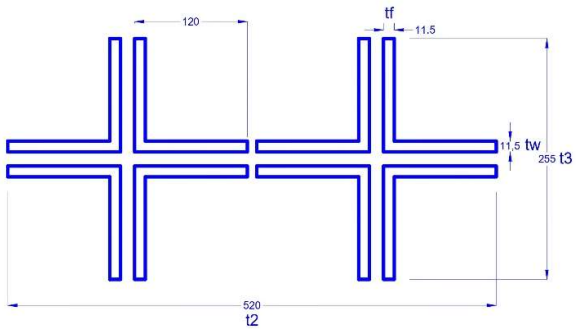
Berdasarkan gambar 5.20 diketahui dimensi pada profil Kode A adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 400 mm

Lebar profil (t2) = 270 mm

Tebal sayap (tf) = 9,4 mm

Tebal badan (tw) = 9,5 mm



Gambar 5. 21 Profil Rangka Vertikal Kode B

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

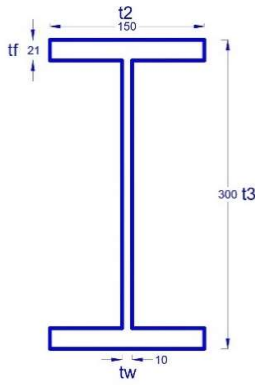
Berdasarkan gambar 5.21 diketahui dimensi pada profil Kode B adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 255 mm

Lebar profil (t2) = 520 mm

Tebal sayap (tf) = 11,5 mm

Tebal badan (tw) = 11,5 mm



Gambar 5. 22 Profil Gelagar Memanjang Tengah Kode C

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

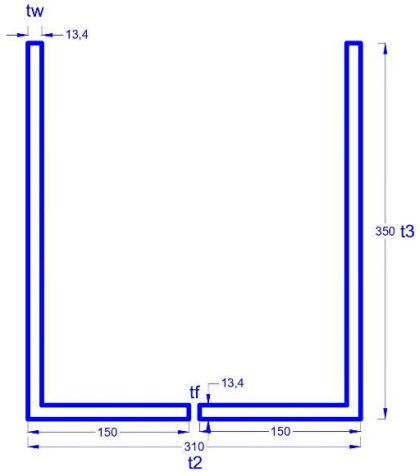
Berdasarkan gambar 5.22 diketahui dimensi pada profil Kode C adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 300 mm

Lebar profil (t2) = 150 mm

Tebal sayap (tf) = 21 mm

Tebal badan (tw) = 10 mm



Gambar 5. 23 Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

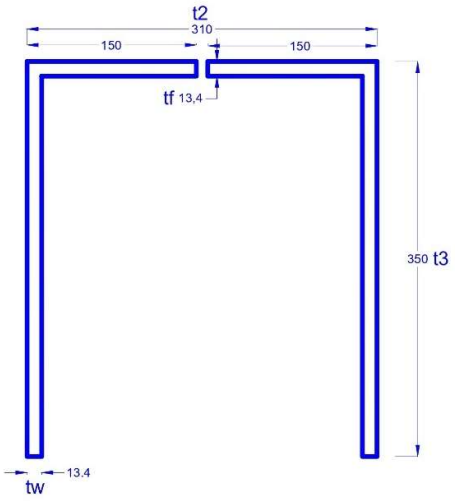
Berdasarkan gambar 5.23 diketahui dimensi pada profil Kode D adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 350 mm

Lebar profil (t2) = 310 mm

Tebal sayap (tf) = 13,4 mm

Tebal badan (tw) = 13,4 mm



Gambar 5. 24 Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas Kode E

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

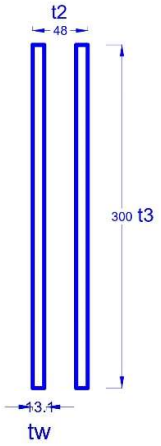
Berdasarkan gambar 5.24 diketahui dimensi pada profil Kode E adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 350 mm

Lebar profil (t2) = 310 mm

Tebal sayap (tf) = 13,4 mm

Tebal badan (tw) = 13,4 mm



Gambar 5. 25 Profil Rangka Diagonal 1 Kode F

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

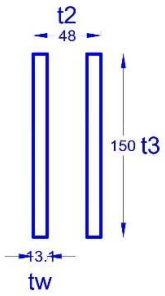
Berdasarkan gambar 5.25 diketahui dimensi pada profil Kode F adalah sebagai berikut.

Panjang batang = 4500 mm

Tinggi Profil (t3) = 300 mm

Lebar profil (t2) = 48 mm

Tebal Profil (tf) = 13,1 mm



Gambar 5. 26 Profil Rangka Diagonal 2 Kode G

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

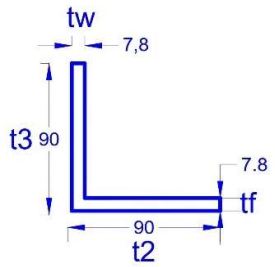
Berdasarkan gambar 5.26 diketahui dimensi pada profil Kode G adalah sebagai berikut.

Panjang batang = 4500 mm

Tinggi Profil (t3) = 150 mm

Lebar profil (t2) = 48 mm

Tebal Profil (tf) = 13,1 mm



Gambar 5. 27 Profil Ikatan Angin Kode H

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Berdasarkan gambar 5.27 diketahui dimensi pada profil Kode H adalah sebagai berikut.

Tinggi Profil (t3) = 90 mm

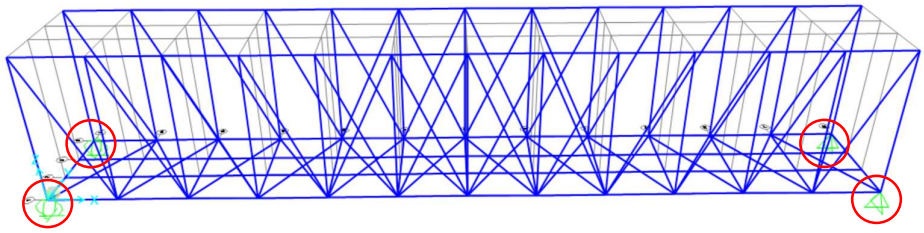
Lebar profil (t2) = 90 mm

Tebal sayap (tf) = 7,8 mm

Tebal badan (tw) = 7,8 mm

5.2.4 Tumpuan (Restraint)

Pada umumnya jembatan memiliki tumpuan untuk meneruskan reaksi yang dihasilkan dari suatu sistem pembebanan di struktur atas ke struktur bawah dari jembatan tersebut. Berdasarkan hasil pengamatan secara langsung di lapangan, Jembatan Kereta Api Pangukan menggunakan tumpuan berjenis sendi dan rol. Tumpuan rol mampu menahan reaksi dari segala arah, Untuk tumpuan sendi mampu menahan reaksi dari segala arah pada satu titik dan tidak dapat berpindah tempat. Berikut ini merupakan Gambar 5.28 tumpuan pada jembatan Pangukan.



Gambar 5. 28 Tumpuan Jembatan Pangukan

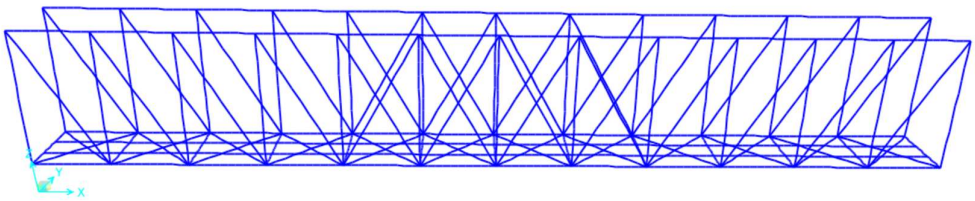
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.4 Hasil Analisis Berdasarkan program SAP2000

Berikut merupakan hasil dari fitur *Run Analysis* dari program *SAP2000* yang mana mengetahui rekapitulasi hasil analisis yang terjadi pada gaya-gaya dalam struktur jembatan serta terdapat gambar hasil diagram gaya yang terjadi, Berikut adalah permodelan final dari program *SAP2000*.

5.4.1 Run Analysis Deformed Shape

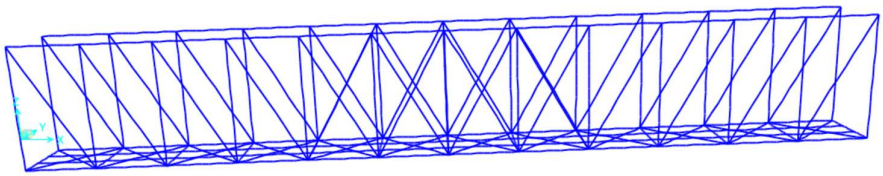
a) Pengukuran Manual



Gambar 5. 29 *Run Analysis Deformed Shape* manual

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

b) Pengukuran *NDT*

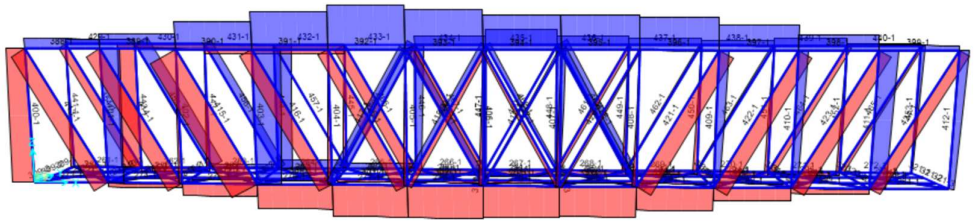


Gambar 5. 30 *Run Analysis Deformed Shape* NDT

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

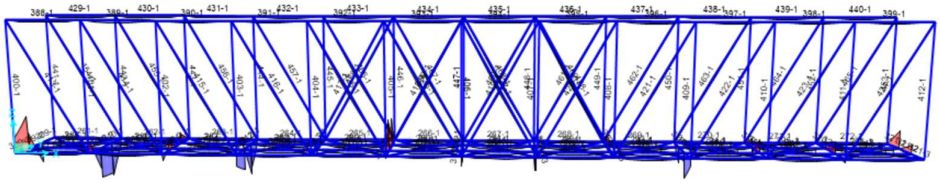
c) Gaya Aksial

Berikut ini merupakan gambar diagram hasil dari *fitur Run Analysis* dari program SAP2000 v.22 yaitu contoh gambar diagram yang terjadi akibat beban mati



Gambar 5. 31 Gaya Aksial Beban Mati

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 32 Gaya Momen Beban Mati

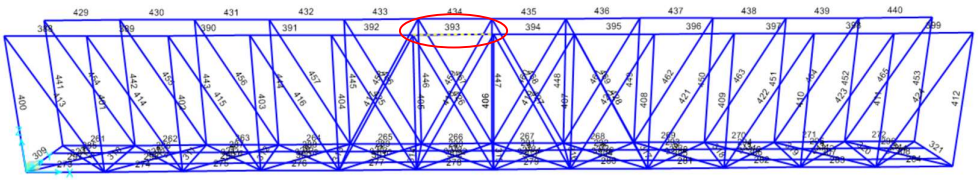
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.5 Analisis Kapasitas Penampang Berdasarkan Pengukuran Manual

Analisis kapasitas dilakukan dengan perhitungan manual mengacu pada RSNI T-03-2005. Analisis kapasitas dilakukan dengan menggunakan data hasil pengukuran langsung (manual) di lapangan lalu dilakukan hitungan manual dengan bantuan Microsoft Excel. Sedangkan program SAP2000 digunakan untuk mencari rekapitulasi dari masing-masing gaya ultimate pada tampang yang terjadi. Kapasitas yang dihitung terdiri terdiri dari kapasitas penampang lentur, tekan, dan tarik maksimum.

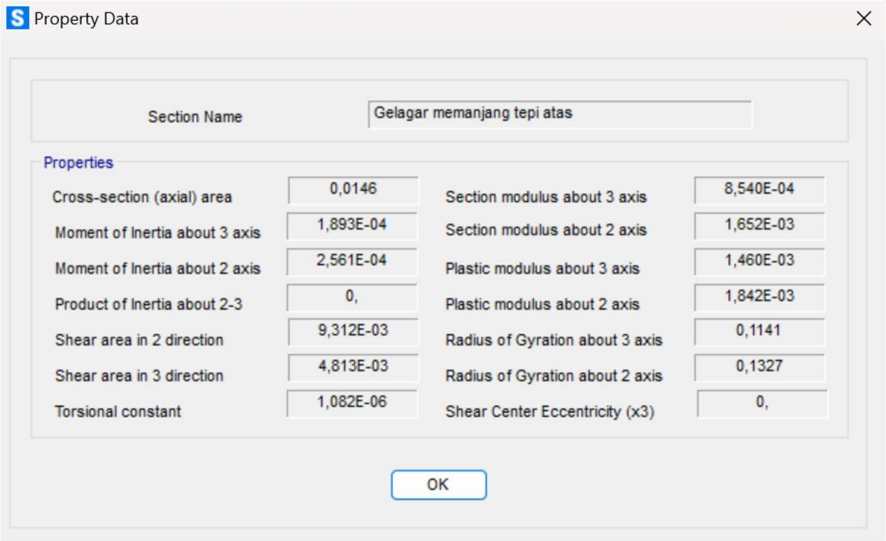
5.5.1 Perhitungan Kapasitas Tekan Maksimum

Berikut merupakan perhitungan kapasitas gaya tekan terbesar menggunakan RSNI T-03-2005. Nilai terbesar berada pada batang 393 dengan nilai 1487,2 KN pada COMB1. Berikut merupakan perhitungan kapasitas tekan maksimum.



Gambar 5. 33 Letak Batang 393 Kode E

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 34 Property Data Kode E

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

a) Data Profil

B = 310 mm

H = 350 mm

Tw = 15 mm

Tf = 15 mm

Ag = 14600 mm^2

Ix = 189300000 mm^4

Iy = 256100000 mm^4

Rx = 114 mm

Ry = 132,7 mm

Sx = 854000 mm^3

Sy = 1652000 mm^3

Zx = 1460000 mm^3

K = 1

Fy = 550 Mpa

E = 200000 Mpa

Fr = 70 Mpa

G = 80.000 Mpa

b) Cek Kelangsingan Sayap

$\lambda f < \lambda r$

$bf/tf < 370 / \sqrt{fy - fr}$

$\frac{(0,5 \times 150)}{(15)} < 370/\sqrt{550 - 70}$

10,33 < 16,888 (tidak langsing)

c) Cek Kelangsingan Badan

$\lambda w < \lambda r$

$\frac{ht-(2 \times tf)}{9} < \frac{2550}{\sqrt{fy}}$

$\frac{350-(2 \times 15)}{9} < \frac{2550}{\sqrt{550}}$

13,333 < 108,732 (tidak langsing)

d) Cek Kelangsingan Komponen Struktur

$\frac{Lk}{r} \leq 140$

$\frac{2500\ x\ 1}{114} \leq 140$

22 $\leq$ 140 (tidak langsing)

e) Parameter Kelangsingan

$\lambda c = \frac{L \times kc}{r \times \pi} \times \sqrt{fy/E}$

$\lambda c = \frac{2500 \times 1}{114 \times 3,14} \times \sqrt{550/200000}$

λc = 0,364

Karena $\lambda c \leq 1,5$ maka rumus ($Pn = 0,66\ \lambda c^2 \times Ag \times fy$) digunakan untuk mencari aksial tekan nominal.

$Pn = 0,66\ \lambda c^2 \times Ag \times fy$

$Pn = 0,66^{0,292^2} \times 14600 \times 550$

$Pn = 7597.644,3\ N$

f) Faktor Reduksi

$\emptyset Tekan = 0,85$

$\emptyset Pn = Pn \times \emptyset$

$\emptyset Pn = 0,85 \times 7597.644,3\ N$

$= 6457.997,6\ N$

$= 6458\ KN$

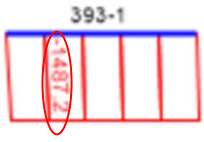
g) Cek Keamanan Profil

$Pu \leq \emptyset Pn$

$1487,2\ KN < 6458\ KN$

Maka profil Gelagar Memanjang Tepi Atas Aman

h) Berikut merupakan gambar diagram aksial (NFD) dari batang 393. Dilihat dari diagram batang NFD berikut ini, batang nomor 393 merupakan batang aksial tekan yang menunjukkan angka 1487,2 KN.

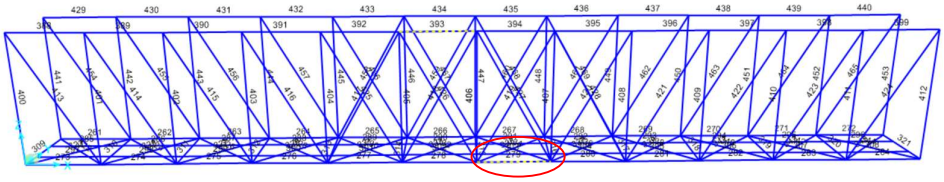


Gambar 5. 35 Diagram aksial (NFD) batang 393

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

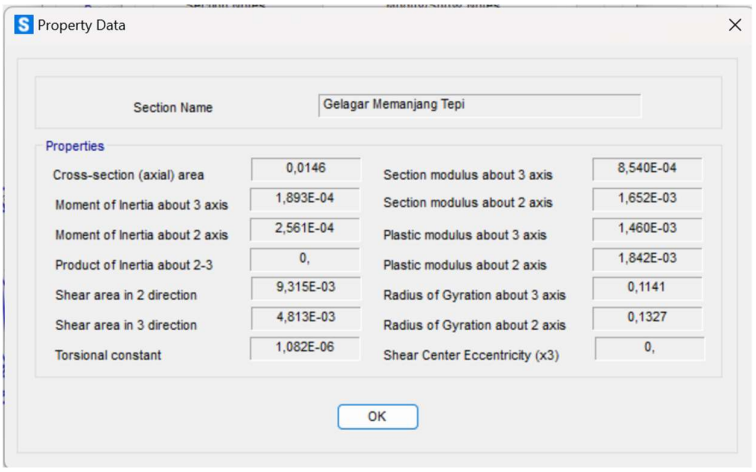
5.5.2 Perhitungan Kapasitas Tarik Maksimum

Berikut merupakan perhitungan kapasitas gaya tarik terbesar menggunakan RSNI T-03-2005. Nilai terbesar berada pada batang 279 dengan nilai 1185,25 KN pada COMB1. Berikut merupakan perhitungan kapasitas tarik maksimum.



Gambar 5. 36 Letak Batang 279 Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 37 Property Data Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

a. Data Profil

B = 310 mm

H = 350 mm

Tw = 15 mm

Tf = 15 mm

Ag = 14600 mm^2

Ix = 189300000 mm^4

Iy = 256100000 mm^4

Rx = 114 mm

Ry = 132,7 mm

Sx = 854000 mm^3

Sy = 1652000 mm^3

Zx = 1460000 mm^3

K = 1

Fy = 550 Mpa

E = 200000 Mpa

Fr = 70 Mpa

G = 80.000 Mpa

b. Gaya Tarik Maksimum

Pt = Fy x Ag

Pt = 550 x 14.600 mm^2

Pt = 8030 N

c. Faktor Reduksi

ØTarik = 0,9

ØPt = Pt x Ø

ØPt = 8030.000 N x 0,9

= 7227.000 N

i) Cek Keamanan Profil

Pu ≤ ØPt

1185,25 KN < 7227 KN

Maka profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah Aman

j) Berikut merupakan gambar diagram aksial (NFD) dari batang nomor 279. Dilihat dari diagram batang NFD berikut ini, batang nomor merupakan batang aksial tarik yang menunjukkan angka 1165,1 KN.

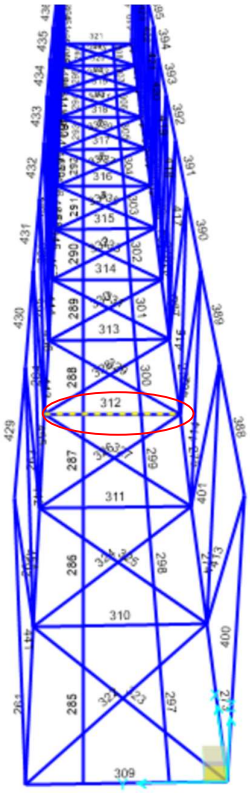


Gambar 5. 38 Diagram aksial (NFD) batang 279

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

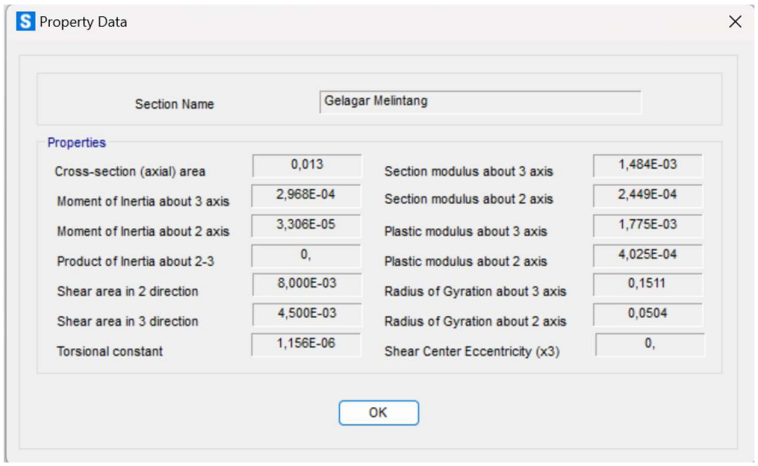
5.5.3 Perhitungan Kapasitas Momen Lentur

Berikut merupakan contoh perhitungan kapasitas momen yang diambil pada bagian gelagar melintang. Setelah dilakukannya rekapitulasi pada program SAP2000 diketahui gaya momen terbesar terjadi pada batang 312 pada COMB1:



Gambar 5. 39 Letak Batang 312 Kode A

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 40 Property Data Kode A

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

a) Data Profil Gelagar melintang pada batang 312:

B = 270 mm

H = 400 mm

Tw = 20 mm

Tf = 10 mm

Ag = 13000 mm^2

Ix = 296800000 mm^4

Iy = 33060000 mm^4

Rx = 151,1 mm

Ry = 50,4 mm

Sx = 1484000 mm^3

Sy = 244900 mm^3

Zx = 1775000 mm^3

K = 1

Fy = 550 Mpa

E = 200000 Mpa

Fr = 70 Mpa

G = 80.000

b) Gaya yang Bekerja

Diambil dari data momen terbesar yaitu pada batang 312

L = 2500 mm

Nu1 = 5,913 KN

Nu2 = 5,913 KN

Mnt1 = 421,1927 KNm

Mnt2 = 421,1927 KNm

Nu pakai = 5,913 KN

Mu pakai = 421,1927 KNm

c) Efek Kolom / Tekuk

KL/rx = 16,5453

KL/ry = 49,6032

λc = 0,82

Untuk,

$\lambda c < 0.25$ maka $\omega = 1$

$0.25 < \lambda c < 1.2$ maka $\omega = 1.43 / (1.6 - 0.67.\ \lambda c)$

$\lambda c \geq 1.2$ maka $\omega = 1.25\lambda c^2$

ω = 0,86

fcr = 641,1510 Mpa

$\varphi c.Nn$ = 7085 KN

d) Efek Balok

Mp = fy.Zx = 976,25000 KNm

Mr = (fy-fr). Sx = 712,32000 KNm

Panjang batang maksimum yang mampu menerima momen plastis,

$Lp = 1{,}76\ ry\ (\frac{E}{fy})^{0,5} = 1{,}691$ m

Panjang bentang minimum yang kekuatannya mulai ditentukan oleh momen kritis tekuk torsi lateral,

$Lr = ry\ (\frac{X1}{fL})\ (1+(X2.\ fL^2))^{0,5}))^{0,5}$

Dengan fL = fy-fr = 480 Mpa

Konstanta puntir torsi,

$J = \Sigma\ (bt^3)\ /3 = 1193333\ mm^4$

Konstanta punter lengkung,

$lw = (lf.\ H^2)\ /\ 2$ $= 1{,}24741E+12\ mm^6$

$X1 = (3{,}1416/Sx).\ ((E.G.J.Ag)/2)^{0,5})$ $= 23{,}584$ Mpa

$X2 = 4.\ (\frac{Sx}{G}.J)^3.\ (\frac{lw}{ly})$ $= 0{,}000036470$ Mpa

Maka,

$Lr = 50{,}4.\ (\frac{23{,}584}{480})\ (1+(0{,}000036470.\ 480^2))^{0,5}))^{0,5}$

Lr = 4,994 m

Karena Lp < L < Lr maka kuat nominal komponen struktur terhadap momen lentur adalah

Mn = Cb ((M1+(Mp-Mr). (Lr-L)/(Lr-Lp) ≤ Mp

Diperiksa apakah profil cukup kompak untuk fy = 550 Mpa

Syarat penampang kompak

Tekuk lokal flens $= \lambda p = 170/(fy)0{,}5 = 7{,}249$

Tekuk lokal badan $= \lambda p = 1680/(fy)0{,}5 = 71{,}635$

Nilai tekuk lokal flens baja profil yang digunakan

b/2tf = 13,5 > 7,249 (tidak kompak)

Nilai tekuk lokal badan baja profil yang digunakan

h/tw = 20 < 71,635 (kompak)

Penampang tersebut kompak.

$Mn = Mp - ((Mp- Mr).\ \frac{(\lambda-\lambda p)}{(\lambda r-\lambda p)}$

MA =1/4 L = 625 mm = 192,728 KNm

MB =1/2L = 1250 mm = 290,898 KNm

MC =3/4L = 1875 mm = 159,4755 KNm

Mmax = 421,1927 KNm

Cb = 12.5. Mmax/ (2.5 Mmax + 3 MA + 4 MB + 3 MC) ≤ 2.3

= 12.5. 421,1927/ (2.5. 421,1927+ 3. 192,728 + 4. 290,898 +
3. 159,4755)

Cb = 1,609 < 2,3

$Mn = Mp - ((Mp - Mr). \frac{(\lambda - \lambda p)}{(\lambda r - \lambda p)}$

$= 976{,}25000 - ((976{,}25000 - 712{,}32000). \frac{(13{,}5 - 7{,}249)}{(19{,}069 - 7{,}249)}$

Mn = 836,672 kNm

$Mu \leq \emptyset Mn$

421,1927 kNm < 836,672 kNm

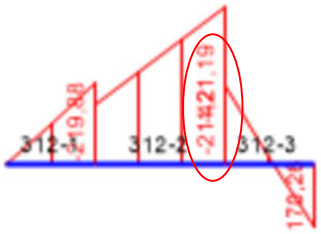
karena (Nu / (φNn)) = 0,5 > 0,2

Maka,

(Nu/(φ.Nu))+(8/9((Mux/(φb.Mnx)) < 1

0,00682 < 1, (Aman)

e) Berikut merupakan gambar diagram momen (BMD) dari batang nomor 312 yang menunjukkan angka 21421,19 KN.



Gambar 5. 41 Diagram Momen (BMD) batang 312

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

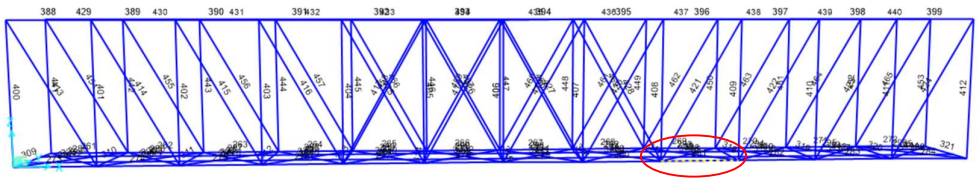
5.6 Analisis Kapasitas Penampang Berdasarkan Hasil *NDT*

Analisis kapasitas dilakukan dengan perhitungan *NDT* mengacu pada RSNI T-03-2005. Analisis kapasitas dilakukan dengan hitungan manual dengan bantuan Microsoft Excel sedangkan program SAP2000 digunakan untuk mencari rekapitulasi dari masing-masing gaya ultimate pada tampang yang terjadi.

Kapasitas yang dihitung terdiri terdiri dari kapasitas penampang lentur, tekan, dan tarik maksimum.

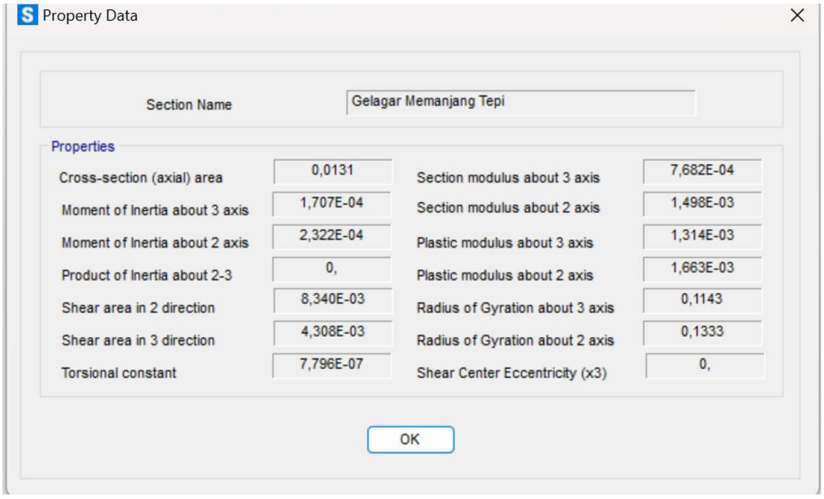
5.6.1 Perhitungan Kapasitas Tekan Maksimum

Berikut merupakan perhitungan kapasitas gaya tekan terbesar menggunakan RSNI T-03-2005. Nilai terbesar berada pada batang 281 dengan nilai 1544,6 KN pada COMB4. Berikut merupakan perhitungan kapasitas tekan maksimum.



Gambar 5. 42 Letak Batang 281 Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 43 Property Data Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

a) Data Profil

B = 310 mm

H = 350 mm

Tw = 13,4 mm

Tf = 13,4 mm

Ag = 13100 mm^2

Ix = 170700000 mm^4

Iy = 232200000 mm^4

Rx = 114 mm

Ry = 133,3 mm

Sx = 768200 mm^3

Sy = 1498000 mm^3

Zx = 1314000 mm^3

K = 1

Fy = 550 Mpa

E = 200000 Mpa

Fr = 70 Mpa

G = 80.000 Mpa

b) Cek Kelangsingan Sayap

$\lambda f < \lambda r$

$bf/tf < 370 / \sqrt{fy - fr}$

$\frac{(0,5 \times 310)}{(13,4)} < 370/\sqrt{550 - 70}$

35,91 < 16,888 (tidak langsing)

c) Cek Kelangsingan Badan

$\lambda w < \lambda r$

$\frac{ht \quad (2 \times tf)}{9} < \frac{2550}{\sqrt{fy}}$

$\frac{150-(2 \times 13,4)}{9} < \frac{2550}{\sqrt{550}}$

35,911 < 108,732 (tidak langsing)

d) Cek Kelangsingan Komponen Struktur

$\frac{Lk}{r} \leq 140$

$\frac{2500}{114} \leq 140$

22 $\leq$ 140 (tidak langsing)

e) Parameter Kelangsingan

$\lambda c = \frac{L \times kc}{r \times \pi} \times \sqrt{fy/E}$

$\lambda c = \frac{2500 \times 1}{114 \times 3{,}14} \times \sqrt{550/200000}$

$\lambda c = 0{,}365$

Karena $\lambda c \leq 1{,}5$ maka rumus ($Pn = 0{,}66\ \lambda c^2 \times Ag \times fy$) digunakan untuk mencari aksial tekan nominal.

$Pn = 0{,}66\ \lambda c^2 \times Ag \times fy$

$Pn = 0{,}66^{0{,}292^2} \times 13100 \times 550$

$Pn = 6816.403\ N$

f) Faktor Reduksi

$\emptyset Tekan = 0{,}85$

$\emptyset Pn = Pn \times \emptyset$

$\emptyset Pn = 0{,}85 \times 6816.403\ N$

$= 5793.943\ N$

$= 5793{,}9\ KN$

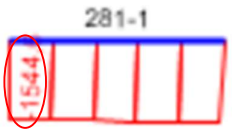
g) Cek Keamanan Profil

$Pu \leq \emptyset Pn$

$1544{,}6\ KN < 5793{,}9\ KN$

Maka profil Gelagar Memanjang Tepi Aman

h) Berikut merupakan gambar diagram aksial (NFD) dari batang 281. Dilihat dari diagram batang NFD berikut ini, batang 281 merupakan batang aksial tekan yang menunjukkan angka 1544,6 KN.

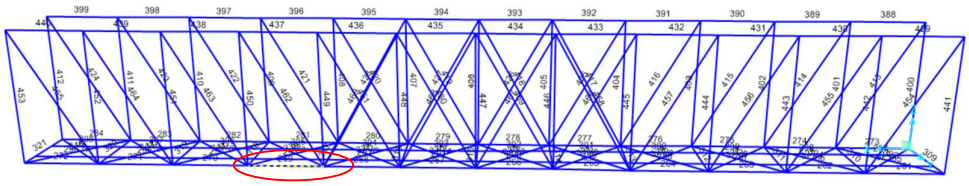


Gambar 5. 44 diagram aksial (NFD) batang nomor 281

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

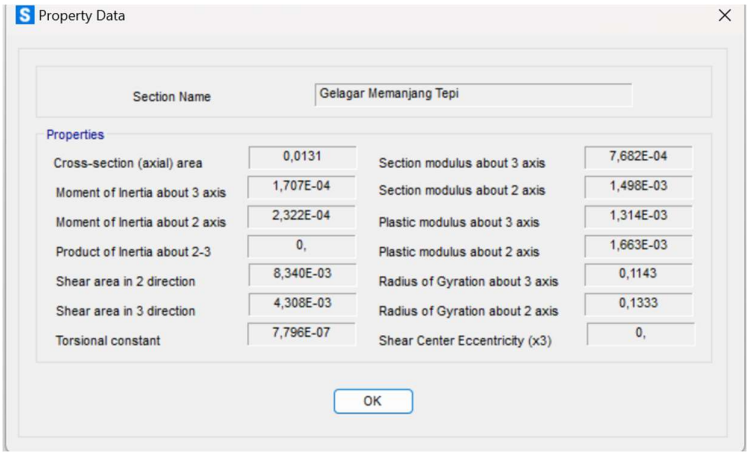
5.6.2 Perhitungan Kapasitas Tarik Maksimum

Berikut merupakan perhitungan kapasitas gaya tarik terbesar menggunakan RSNI T-03-2005. Nilai terbesar berada pada batang 269 dengan nilai 1450 KN pada COMB4. Berikut merupakan perhitungan kapasitas tarik maksimum.



Gambar 5. 45 Letak Batang 269 Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 46 Property Data Kode D

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

a. Data Profil

B = 310 mm

H = 350 mm

Tw = 13,4 mm

Tf = 13,4 mm

Ag = 13100 mm^2

Ix = 170700000 mm^4

Iy = 232200000 mm^4

Rx = 114 mm

Ry = 133,3 mm

Sx = 768200 mm^3

Sy = 1498000 mm^3

Zx = 1314000 mm^3

K = 1

Fy = 550 Mpa

E = 200000 Mpa

Fr = 70 Mpa

G = 80.000 Mpa

b. Gaya Tarik Maksimum

Pt = Fy x Ag

Pt = 550 x 13100 mm^2

Pt = 7205.000 N

c. Faktor Reduksi

ØTarik = 0,9

ØPt = Pt x Ø

ØPt = 7205.000 N x 0,9

= 6484.500 N

= 6484,5 KN

d. Cek Keamanan Profil

Pu ≤ ØPt

1450 KN < 6484,5 KN

Maka profil Gelagar Memanjang Tepi Aman

e. Berikut merupakan gambar diagram aksial (NFD) dari batang nomor 269. Dilihat dari diagram batang NFD berikut ini, batang nomor 269 merupakan batang aksial tarik yang menunjukkan angka 1450 KN.

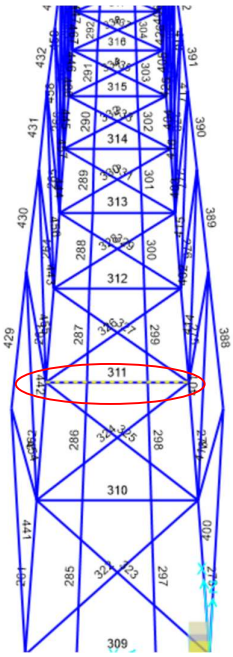


Gambar 5. 47 Diagram aksial (NFD) batang 269

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

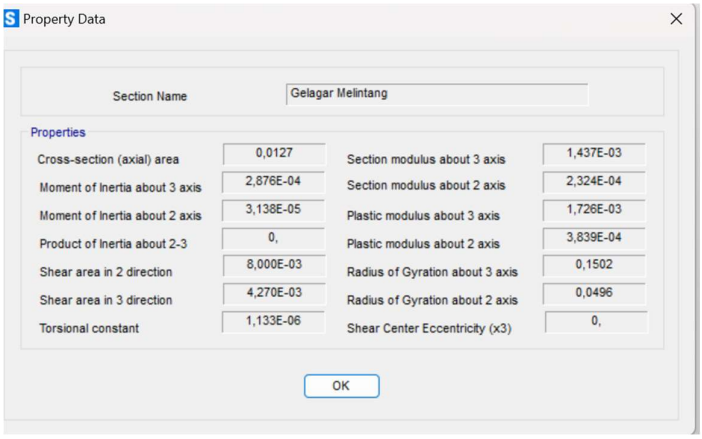
5.6.3 Perhitungan Kapasitas Momen Lentur

Berikut merupakan contoh perhitungan kapasitas momen yang diambil pada bagian gelagar melintang. Setelah dilakukannya rekapitulasi pada program SAP2000 diketahui gaya momen terbesar terjadi pada batang 311 pada COMB1:



Gambar 5. 48 Letak Batang 311 Kode A

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 49 Property Data Kode A

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

a) Data Profil Gelagar melintang pada batang 309:

B = 270 mm

H = 400 mm

Tw = 9,5 mm

Tf = 9,4 mm

Ag = 12700 mm^2

Ix = 287600000 mm^4

Iy = 31380000 mm^4

Rx = 150,2 mm

Ry = 49,6 mm

Sx = 1437000 mm^3

Sy = 232400mm^3

Zx = 1726000 mm^3

K = 1

Fy = 550 Mpa

E = 200000 Mpa

Fr = 70 Mpa

G = 80.000

b) Gaya Dalam

L = 2500 mm

Nu1 = 0,825 KN

Nu2 = 0,825 KN

Mnt1 = 189,1524 kNm

Mnt2 = 189,1524 kNm

Nu pakai = 0,825 KN

Mu pakai = 189,1524 kNm

c) Efek Kolom / Tekuk

KL/rx = 16,6445

KL/ry = 50,4032

λc = 0,8417

Untuk,

λc < 0.25 maka ω = 1

0.25 <λc<1.2 maka ω = 1.43 / (1.6 – 0.67.λc)

λc ≥ 1.2 maka ω = 1.25λc²

ω = 0,89

fcr = 620,95 MPa

φc.Nn = 6703 KN

d) Efek Balok

Mp = fy.Zx = 949,30 KNm

Mr = (fy-fr). Sx = 689,76 KNm

Panjang batang maksimum yang mampu menerima momen plastis,

$Lp = 1{,}76\ ry\ (\frac{E}{fy})^{0,5}$

= 1,664 m

Panjang bentang minimum yang kekuatannya mulai ditentukan oleh momen kritis tekuk torsi lateral,

$Lr = ry\ (\frac{X1}{fL})\ (1+(X2.\ fL^2))^{0,5}))^{0,5}$

Momen kritis tekuk torsi lateral

FL= fy-fr = 480 Mpa

Konstanta Puntir torsi,

J = Σ (bt^3) /3 = 258448,9033 mm^4

Konstanta punter lengkung,

lw = (lf. H^2) / 2 = 1,17618E+12 mm^6

X1 = $(3{,}1416/Sx).((E.G.J.Ag)/2)^{0,5}$ = 112030 MPa

X2 = $4.(\frac{Sx}{G}.J)^3.(\frac{lw}{ly})$ = 0,000724208 MPa

Maka,

Lr = $49{,}2.(\frac{112030}{480})(1+(0{,}000724208.480^2))^{0,5}))^{0,5}$

= 4,325 m

Karena Lp < L < Lr maka kuat nominal komponen struktur terhadap momen lentur adalah

Mn = Cb ((M1+(Mp-Mr). (Lr-L)/(Lr-Lp) ≤ Mp

Diperiksa apakah profil cukup kompak untuk fy = 550 Mpa

Syarat penampang kompak

Tekuk lokal flens = λp = $170/(fy)0{,}5$ = 7,249

Tekuk lokal badan = λp = $1680/(fy)0{,}5$ = 71,635

Nilai tekuk lokal flens baja profil yang digunakan

b/2tf = 14,362 > 7,249 (tidak kompak)

Nilai tekuk lokal badan baja profil yang digunakan

h/tw = 20 < 71,635 (kompak)

Penampang tersebut kompak.

Mn = Mp – ((Mp- Mr). $\frac{(\lambda-\lambda p)}{(\lambda r-\lambda p)}$

MA =1/4 L = 625 mm = 164,77 KNm

MB =1/2L = 1250 mm = 185,035 KNm

MC =3/4L = 1875 mm = 156,443 KNm

Mmax = 189,1524 KNm

Cb = 12.5. Mmax/ (2.5 Mmax + 3 MA + 4 MB + 3 MC) ≤ 2.3

= 12.5. 189,1524 /(2.5 189,1524 + 3. 164,77+ 4. 185,035 + 3. 156,443)

Cb = 1,086 < 2,3 (ok!)

$Mn = Mp - ((Mp- Mr). \frac{(\lambda-\lambda p)}{(\lambda r-\lambda p)}$

$= 949,3 - ((949,3 - 689,76). \frac{(14,362-7,249)}{(19,069-7,249)}$

Mn = 793,123 KNm

Mu ≤ ∅ Mn

189,1524 kNm < 793,123 kNm

karena (Nu / (φNn)) = 0,00279 < 0,2

Maka,

(Nu/(φ.Nu))+(8/9((Mux/(φb.Mnx)) < 1

0,197 < 1, (Aman)

e) Berikut merupakan gambar diagram momen (BMD) dari batang nomor 311 yang menunjukkan angka 185,33 KN.



Gambar 5. 50 diagram momen (BMD) batang nomor 311

Sumber: Hasil Analisis, 2025

5.7 Perbandingan Kasus Pembebanan

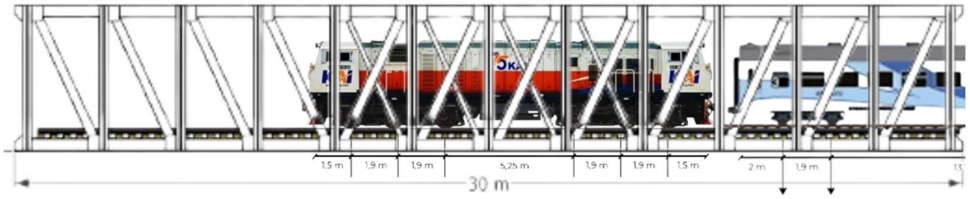
Perbandingan kasus akan dilakukan dengan membandingkan gaya aksial tarik/tekan yang terjadi dari kedua kasus. Untuk kedua gaya akan ditinjau dengan metode space truss (gaya-gaya luar dialihkan melalui perilaku aksial) pada keseluruhan batang dengan seluruh kombinasi beban.

5.7.1 Pengukuran Manual

Berikut ini yaitu beban kereta masuk ¾ jembatan dan dengan beban kereta hanya masuk ½ jembatan dengan Pengukuran Manual.

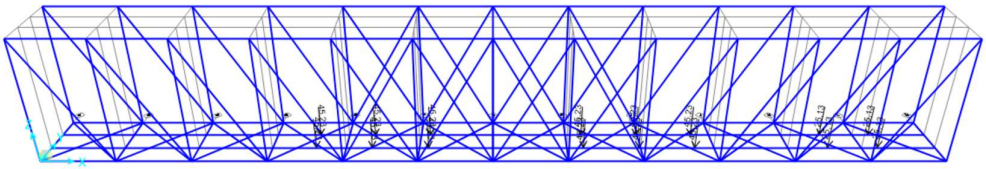
1. Beban Kereta ¾ Jembatan

   Dibawah ini menunjukkan kereta dengan lokomotif ¾ perjalanan masuk area jembatan.



Gambar 5. 51 Rangkaian Kereta dengan beban kereta ¾ Jembatan

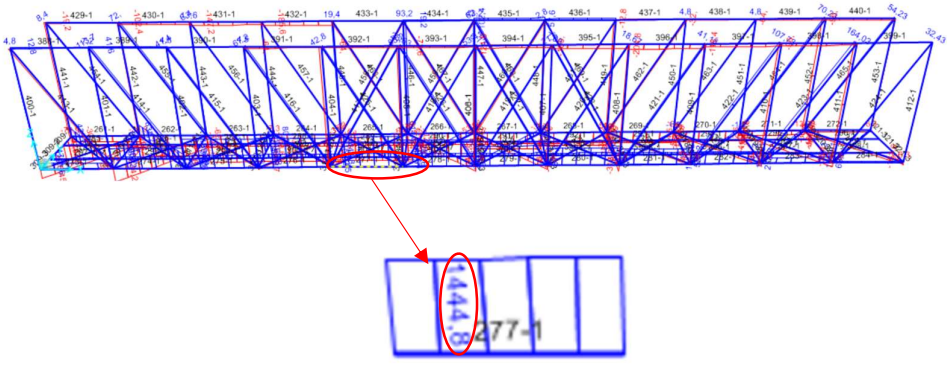
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 52 Rangkaian Beban Kereta dengan beban kereta ¾ Jembatan

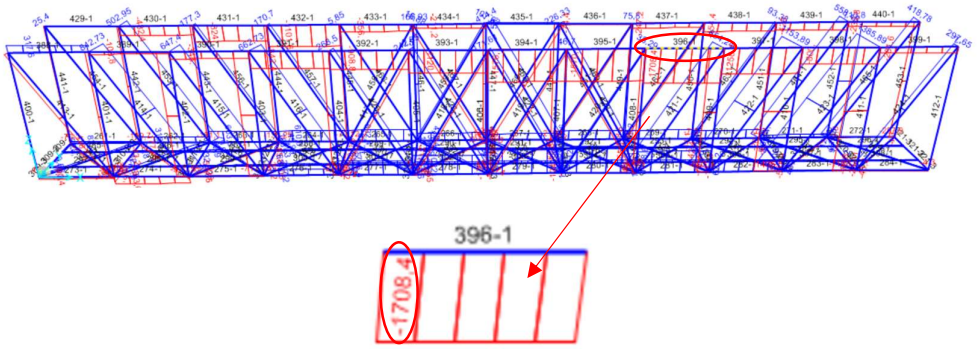
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Dari kasus tersebut, pada beban kereta seluruh jembatan memperoleh kombinasi gaya aksial tarik maksimal sebesar 1444,8 KN pada profil Gelagar memanjang tepi bawah batang 277 dan gaya aksial tekan maksimal sebesar -1708,4 KN pada profil Gelagar memanjang tepi atas batang 396. Berikut merupakan gambar dari letak batang tersebut serta gambar diagram NFD nya.



Gambar 5. 53 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

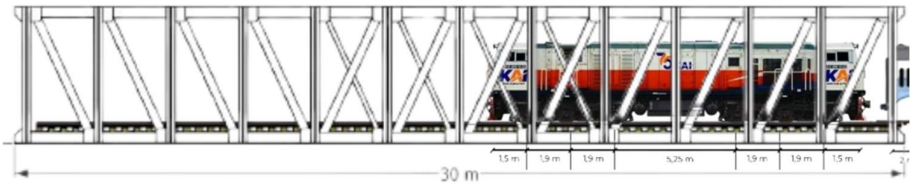


Gambar 5. 54 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

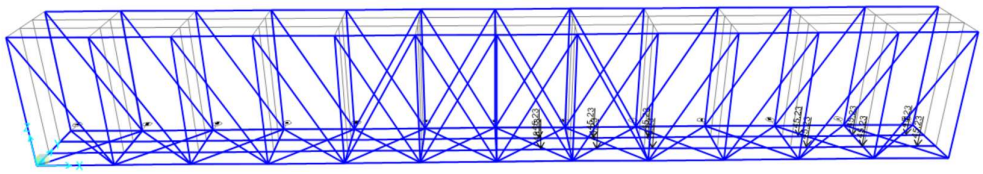
2. Beban Kereta ½ Jembatan

Dibawah ini menunjukkan kereta dengan lokomotif ½ perjalanan masuk area jembatan.



Gambar 5. 55 Rangkaian Kereta dengan beban kereta ½ Jembatan

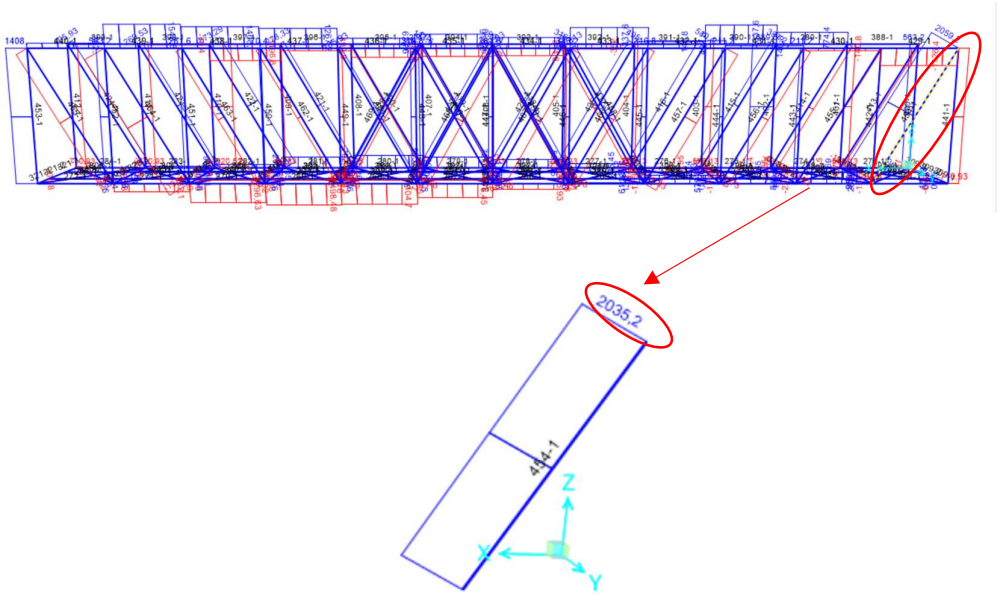
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 56 Rangkaian Beban Kereta dengan beban kereta ½ Jembatan

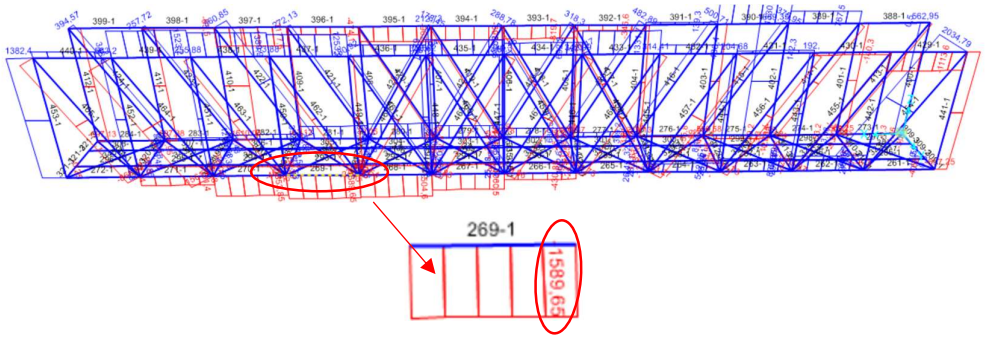
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Dari kasus tersebut, pada beban kereta seluruh jembatan memperoleh gaya aksial tarik maksimal sebesar 2035,2 KN pada profil Rangka Diagonal 2 batang 454 dan tekan maksimal sebesar -1589,65 KN pada profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah batang 269. Berikut merupakan gambar dari letak batang tersebut serta gambar diagram NFD nya.



Gambar 5. 57 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 58 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan

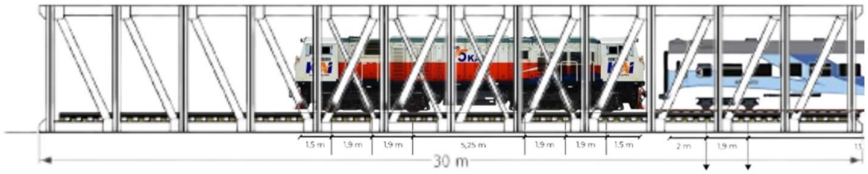
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.7.2 Pengukuran *NDT*

Berikut ini yaitu beban kereta masuk ¾ jembatan dan dengan beban kereta hanya masuk ½ jembatan dengan Pengukuran *NDT.*

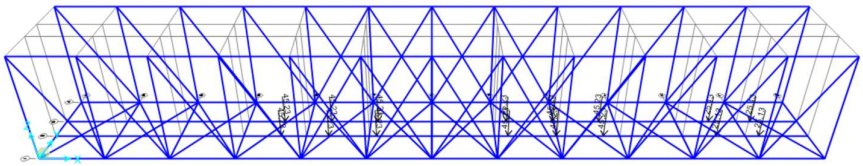
1. Beban ¾ Jembatan

   Dibawah ini menunjukkan kereta dengan lokomotif ¾ perjalanan masuk area jembatan.



Gambar 5. 59 Rangkaian Kereta dengan beban ¾ Bentang Jembatan

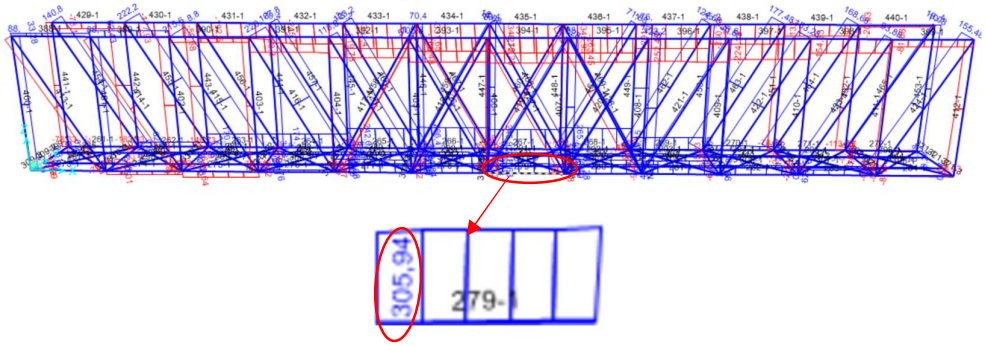
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 60 Rangkaian Beban Kereta dengan beban ¾ Bentang Jembatan

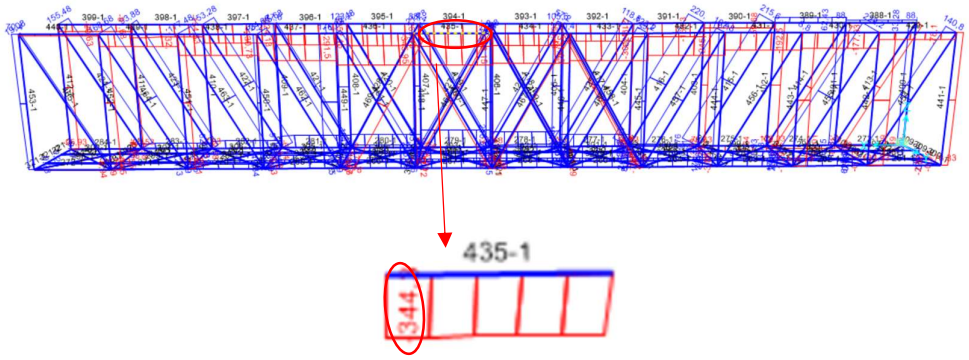
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Dari kasus tersebut, pada beban kereta seluruh jembatan memperoleh gaya aksia tarik maksimal sebesar 305,938 KN pada profil Gelagar memanjang tepi bawah batang 279 dan gaya tekan maksimal sebesar -344,3 KN pada Gelagar memanjang tepi atas batang 435. Berikut merupakan gambar dari letak batang tersebut serta gambar diagram NFD nya.



Gambar 5. 61 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

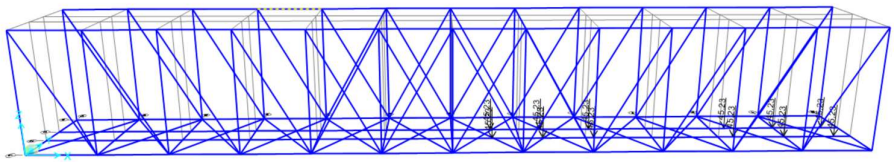


Gambar 5. 62 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ¾ Jembatan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

2. Beban ½ Jembatan

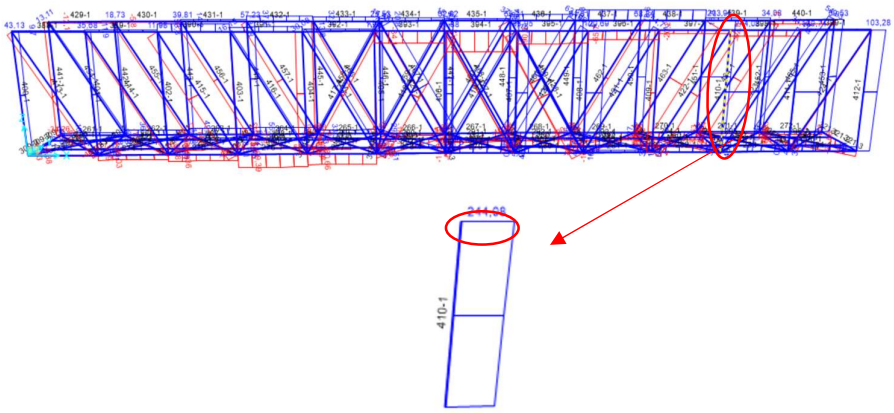
   Dibawah ini menunjukkan kereta dengan lokomotif ½ perjalanan masuk area jembatan.



Gambar 5. 63 Rangkaian Beban Kereta dengan beban ½ Bentang Jembatan

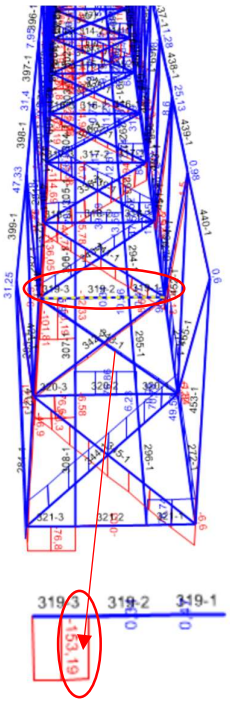
(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

Dari kasus tersebut, pada beban kereta seluruh jembatan memperoleh gaya aksial tarik maksimal sebesar 244,075 KN pada profil Rangka Vertikal batang 410 dan gaya tekan maksimal sebesar -153,194 KN pada profil Gelagar Melintang batang 319. Berikut merupakan gambar dari letak batang tersebut serta gambar diagram NFD nya.



Gambar 5. 64 Diagram NFD Tarik Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 65 Diagram NFD Tekan Maksimal Beban Kereta ½ Jembatan

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

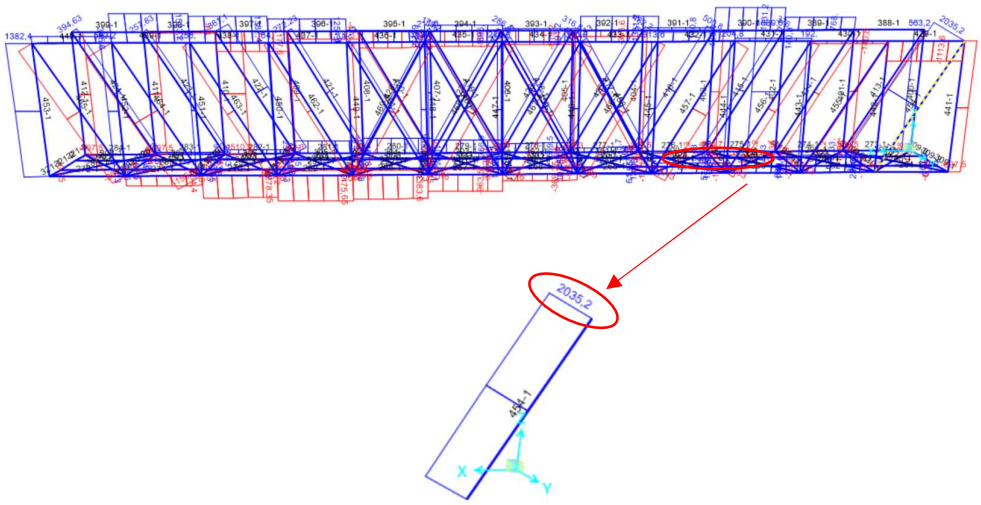
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Gaya Aksial Maksimal Pada Tiap Kasus Pembebanan pada Pengujian Manual

Kode Profil	Elemen	Ket	Beban Kereta Seluruh Jembatan		Beban Kereta 3/4 Jembatan		Beban Kereta 1/2 Jembatan	
			Aksial *Ultimit* Maksimal (Pu) (KN)	Aksial Nominal Maksimal (Pn) (KN)	Aksial *Ultimit* Maksimal (Pu) (KN)	Aksial Nominal Maksimal (Pn) (KN)	Aksial *Ultimit* Maksimal (Pu) (KN)	Aksial Nominal Maksimal (Pn) (KN)
A	Gelagar Melintang	Tarik	76,55	6435	614	6435	77	6435
		Tekan	-152,975	6435	-1213	6078	-153	6078
B	Rangka Vertikal	Tarik	1126,65	9108	714	9108	1690	9108
		Tekan	-1274,133	4083	-1415	4083	-1521	4083
C	Gelagar Memanjang Tengah	Tarik	128,138	2871	158	2871	100	2871
		Tekan	-47,441	2575	-149	2575	-124	2575
D	Gelagar Memanjang Tepi	Tarik	1301,1	7227	1445	7227	1033	7227
		Tekan	-574,9	6458	-1424	6458	-1590	6458
E	Gelagar Memanjang Tepi Atas	Tarik	554,4	7227	318	7227	1549	7227
		Tekan	-1487,2	6458	-1725	6458	-1197	6458
F	Rangka Diagonal 1	Tarik	492,8	506	422	2970	482	2970
		Tekan	-393,861	2970	-205	506	-720	506
G	Rangka Diagonal 2	Tarik	793,13	1485	1400	1485	2035	1485
		Tekan	-440	412	-224	412	-1561	412
H	Ikatan Angin	Tarik	101,572	842	633	842	102	842
		Tekan	-103,556	70	-634	70	-104	70

Tabel 5. 6 Rekapitulasi Gaya Aksial Maksimal Pada Tiap Kasus Pembebanan Pengujian NDT

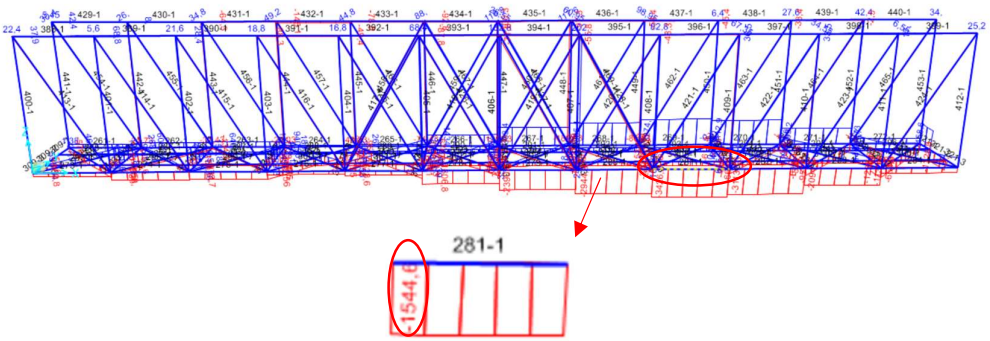
Kode Profil	Elemen	Ket	Beban Kereta Seluruh Jembatan		Beban Kereta 3/4 Jembatan		Beban Kereta 1/2 Jembatan	
			Aksial *Ultimit* Maksimal (Pu) (KN)	Aksial Nominal Maksimal (Pn) (KN)	Aksial *Ultimit* Maksimal (Pu) (KN)	Aksial Nominal Maksimal (Pn) (KN)	Aksial *Ultimit* Maksimal (Pu) (KN)	Aksial Nominal Maksimal (Pn) (KN)
A	Gelagar Melintang	Tarik	1229,8	6287	26	4325	78	6287
		Tekan	-616,4	5750	-115	3978	-153	5750
B	Rangka Vertikal	Tarik	105,6	9851	176	10395	246	9851
		Tekan	-139,513	4011	-184	4543	-61	4011
C	Gelagar Memanjang Tengah	Tarik	209,4	4438	43	4438	15	4438
		Tekan	-224,3	3999	-48	3999	-59	3999
D	Gelagar Memanjang Tepi	Tarik	1450	6485	306	6485	118	6485
		Tekan	-1544,6	5794	-105	5794	-136	5794
E	Gelagar Memanjang Tepi Atas	Tarik	42,5	6485	62	6485	82	6485
		Tekan	-203,25	5794	-348	5794	-149	5794
F	Rangka Diagonal 1	Tarik	217,631	2707	123	2707	150	2707
		Tekan	-120,73	3892	-127	3892	-100	3892
G	Rangka Diagonal 2	Tarik	134,2	1946	222	1946	67	1946
		Tekan	-132	540	-88	540	-128	540
H	Ikatan Angin	Tarik	490,725	668	40	668	81	668
		Tekan	-509,937	58	-48	58	-82	58

Dari Tabel 5.5 dapat disimpulkan bahwa gaya aksial maksimal pada pengujian manual terjadi ketika rangkaian kereta dengan beban kereta seluruh jembatan dan ½ jembatan yaitu sebesar 2059 KN pada profil Rangka Diagonal 2 batang 454 yang merupakan batang aksial tarik. Pada Tabel 5.6 gaya aksial maksimal pada pengujian NDT terjadi ketika rangkaian kereta dengan beban kereta seluruh jembatan sebesar -1544,6 KN pada profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah batang 281 yang merupakan batang aksial tekan. Setelah dilakukan perhitungan cek keamanan profil seluruh balok yang menerima gaya aksial dari studi kasus pada pengujian manual dinyatakan aman dan memenuhi syarat, sedangkan studi kasus pada pengujian *NDT* dinyatakan tidak aman dan tidak memenuhi syarat, perhitungan cek keamanan tersebut akan dilampirkan. Berikut merupakan *NFD* Maksimal dari seluruh kasus pembebanan.



Gambar 5. 66 Diagram NFD Maksimal dari seluruh kasus pembebanan (Manual)

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)



Gambar 5. 67 Diagram NFD Maksimal dari seluruh kasus pembebanan (NDT)

(Sumber: Hasil Analisis, 2025)

5.8 Rekapitulasi Gaya Aksial Maksimum

Berikut tabel 5.7 merupakan data lapangan pengujian manual maupun *NDT* pada Jembatan KA Pangukan.

Tabel 5. 7 Rekapitulasi Pengambilan data Lapangan NDT & Manual

Elemen	NDT (m)	MANUAL (m)	Rasio
Gelagar Melintang	0,009474	0,01	0,95
	0,009502	0,02	0,48
Rangka Vertikal	0,011513	0,01	1,15
Gelagar Memanjang Tengah	0,021129	0,01	2,11
	0,010194	0,01	1,02
Gelagar Memanjang Tepi	0,013427	0,015	0,90
Gelagar Memanjang Tepi Atas	0,013427	0,015	0,90
Rangka Diagonal 1	0,013103	0,015	0,87
Rangka Diagonal 2	0,013103	0,01	1,31
Ikatan Angin	0,007834	0,01	0,78

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan tabel diatas, dapat disimpulkan perbandingan ketebalan elemen baja antara hasil pengujian *NDT (Non-Destructive Testing)* dan pengukuran manual menyimpulkan hasil *NDT* cenderung menunjukkan ketebalan elemen yang lebih besar dibandingkan pengukuran manual, hal ini bisa terjadi karena metode *NDT* lebih akurat dalam mendeteksi ketebalan aktual dengan mempertimbangkan ketidakrataan material atau pelapisan tambahan. Sehingga *NDT* relevan digunakan di berbagai sektor industri yang memerlukan inspeksi material atau struktur tanpa merusaknya, terutama dalam industri yang berisiko tinggi terhadap kegagalan material, seperti konstruksi, penerbangan, minyak & gas, dan manufaktur.

Tabel 5. 8 Rekapitulasi *Output* Permodelan *SAP2000*

REKAPITULASI OUTPUT SAP				
Pengujian manual				
P lentur max (kNm)	=	421	Batang 312	COMB1
P tekan max (KN)	=	1487	Batang 393	COMB1
P tarik max (KN)	=	1301	Batang 279	COMB1
Pengujian NDT				
P lentur max (kNm)	=	189	Batang 311	COMB1
P tekan max (KN)	=	1545	Batang 281	COMB4
P tarik max (KN)	=	1450	Batang 269	COMB4

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Tabel 5. 9 Rekapitulasi Kapasitas

REKAPITULASI KAPASITASI				
Pengujian Manual		Pu	ØPn	Syarat
P lentur max (kNm)	=	421	837	Aman
P tekan max (KN)	=	1487	6458	Aman
P tarik max (KN)	=	1185,25	7227	Aman
Pengujian NDT		Pu	ØPn	Syarat
P lentur max (kNm)	=	189	793	Aman
P tekan max (KN)	=	1544,6	5794	Aman
P tarik max (KN)	=	1450	6485	Aman

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Berdasarkan Tabel 5.9, nilai maks pada Pengujian manual dan NDT adalah nilai P kapasitas (*P* Maks < P Kapasitas) Menunjukkan bahwa struktur dapat menangani beban yang ditanggung.

5.9 Ketebalan Coating Baja menggunakan Coating Thickness Gauge

Pengecekan Ketebalan *Coating* Baja menggunakan *Coating Thickness Gauge* merupakan salah satu metode *non-destruktif* yang digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan pelindung (*coating*) pada permukaan logam, seperti pada baja yang digunakan untuk jembatan KA Pangukan ini. Berikut merupakan rekapitulasi pengukuran *coating* baja pada Jembatan KA Pangukan akan ditunjukkan pada Tabel 5.10

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Coating Baja pada Jembatan KA Pangukan

Elemen	NDT *(Coating)*	Satuan
Rangka Vertikal	0,000144	m
Gelagar Melintang	0,000182	m
	0,000113	m
Gelagar Memanjang Tengah	0,000239	m
	0,000331	m
Gelagar Memanjang Tepi	0,000147	m
Rangka Diagonal	0,000113	m
Ikatan Angin Bawah	0,000234	m

Sumber: Hasil Analisis, 2025

Pengecekan Ketebalan *Coating* Baja menggunakan *Coating Thickness Gauge* pada penelitian ini menjadi bukti bahwa *NDT* juga dapat berperan dalam pengukuran coating pada struktur jembatan baja, bukan hanya berfokus pada ketebalan material baja saja. Data ini dapat membuktikan bahwa *NDT* mampu memberikan informasi tambahan untuk analisis kapasitas elemen jembatan baja, termasuk perlindungan dari korosi melalui *coating.*

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kapasitas sisa jembatan KA Pangukan berdasarkan tujuan penelitian ini dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Berdasarkan dari hasil pengujian *NDT (Non-Destructive Testing)* pada struktur jembatan KA Pangukan menunjukan ketebalan elemen cenderung lebih besar dibandingkan pengukuran manual dengan rata-rata rasio perbandingan 1,05. Hal ini bisa terjadi karena metode *NDT* lebih akurat dalam mendeteksi ketebalan aktual dengan mempertimbangkan ketidakrataan material atau pelapisan tambahan.
2. Berdasarkan dari hasil analisis pengujian *NDT (Non-Destructive Testing)* pada struktur jembatan KA Pangukan dinyatakan aman sesuai dengan peraturan pembebanan yang mengacu pada Peraturan Menteri Perhubungan Nomor: PM.60 Tahun 2012, Standar Teknis Kereta Api untuk Jembatan Baja 2006 dan literasi lainnya serta analisis tampang baja yang mengacu pada RSNI T-03-2005 yaitu dengan gaya aksial maksimal sebesar 1544,6 kN terletak pada profil Gelagar Memanjang Tepi pada batang 281 (beban rangkaian kereta seluruh jembatan) yang merupakan gaya aksial tekan. Sedangkan hasil analisis pengukuran manual dinyatakan tidak aman dengan gaya aksial maksimal sebesar 2059 kN terletak pada profil Rangka Diagonal 2 pada batang 309 (beban rangkaian kereta ½ jembatan) yang merupakan gaya aksial tarik.

6.2 Saran

Setelah dilakukan penelitian diatas, penulis dapat menyarankan untuk melakukan penelitian untuk selanjutnya sebagai berikut.

1. Pengembangan Metode Pengujian *NDT*, mengkombinasikan beberapa metode *NDT (Non-Destructive Testing)* atau *radiographic testing,* untuk memverifikasi keakuratan ketebalan material jembatan dan mengindentifikasi area kerusakan tersembunyi.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan kalibrasi antara hasil pengukuran manual dan metode *NDT* dengan alat lain yang memiliki akurasi tinggi.
3. Dilakukan penelitian mendalam terkait proses degradasi material baja yang terjadi selama usia jembatan untuk memahami lebih baik faktor penyebab penurunan kekuatan.

DAFTAR PUSTAKA

Apriani, W. *Et Al.* (2018) *Penilaian Kondisi Jembatan Rangka Baja Di Riau Dengan Metode Bridge Management System*, *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*.

Badan Standardisasi Nasional (2005) *Perencanaan Struktur Baja Untuk Jembatan*, *Badan Standardisasi Nasional*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional (2012) *PERSYARATAN TEKNIS JALUR KERETA API*, *Badan Standardisasi Nasional*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional (2016a) *PEMBEBANAN UNTUK JEMBATAN* , *Badan Standardisasi Nasional*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional (2016b) *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*, *Badan Standardisasi Nasional*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jendral Bina Marga And Direktorat Bina Program Jalan (1992) *3-Bridge-Design-Code-Vol-1*, *Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jendral Bina Marga, Direktorat Jendral Bina Marga*.

Dinas Kebudayaan Kundha Kabudayaan Kabupaten Sleman (2020) *JEMBATAN REL KERETA API PANGUKAN*, *Dinas Kebudayaan Kundha Kabudayaan Kabupaten Sleman*. Available At: Dinas Kebudayaan Kundha Kabudayaan Kabupaten Sleman (Accessed: 9 April 2020).

Devie Arisandy, M. H. (2021). Evaluasi Nilai Sisa Kapasitas Jembatan Voided Slay Bako. *Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*, 4.

Fikri, M.A. *Et Al.* (2021) 'Rancang Bangun Yoke Permanen Magnet UNTUK Teknik Mesin Alat Berat , Politeknik Negeri Madura , Jalan Raya Camplong KM 4 , Taddan , Camplong , Sampang , 69281 Teknik Bangunan Kapal ,

Politeknik Negeri Madura , Jalan Raya Camplong KM 4 , Taddan , Camplong ', Pp. 371–378.

Masagala, A.A. (2022a) *Desain Struktur Jembatan Kereta Api Tipe Concrete Through Arch: Studi Kasus Jembatan Kereta Api Bh 1828 Purworejo*.

Masagala, A.A. (2022b) 'Evaluasi Jembatan Kereta Api Rangka Baja Jalur Tunggal Tipe Welded Through Truss', 8(2), Pp. 25–31.

Mahardika, K. M. (2017). Evaluasi Kinerja Struktur Atas Jembatan Sardjito 1 Dengan Metode Pushover Analysys. *Tugas Akhir* , 99.

Muhammad Azhari, M. T. (2022). Assesment Kondisi Jembatan Rangka Baja Callender Hamilton Dengan Menggunakan Metode Bridge Management System. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 10.

Lilu, D. F. (2020). Alternatif Perencanaan Struktur Atas Jembatan Rangka Baja. *Jurnal*, 14.

Shintike, Y. L. (2015). Analisa Nilai Sisa Kapasitas Bangunan Atas Jembatan Bahanpu Dengan Menggunakan Metode Rating Factor. *Jurnal Teknik Sipil*, 12.

Supriyanto, A.A. (2022) 'Penentuan Cacat Dengan Metode Ultrasonic Testing', *Ramatekno*, 2(1), Pp. 7–13. Available At: Https://Doi.Org/10.61713/Jrt.V2i1.33.

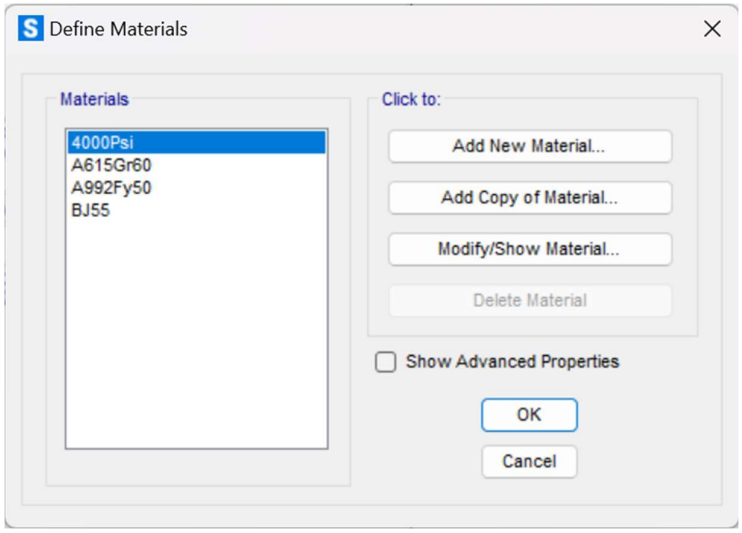
Wikipedia (2025) *Jalur Kereta Api Secang–Yogyakarta*, *Wikimedia*.

Yohanes Murwanto, E. P. (2015). Kajian Nilai Lendutan Pada Jembatan Rangka Baja. *Teknik Sipil Fakultas Teknik Untan*, 16.

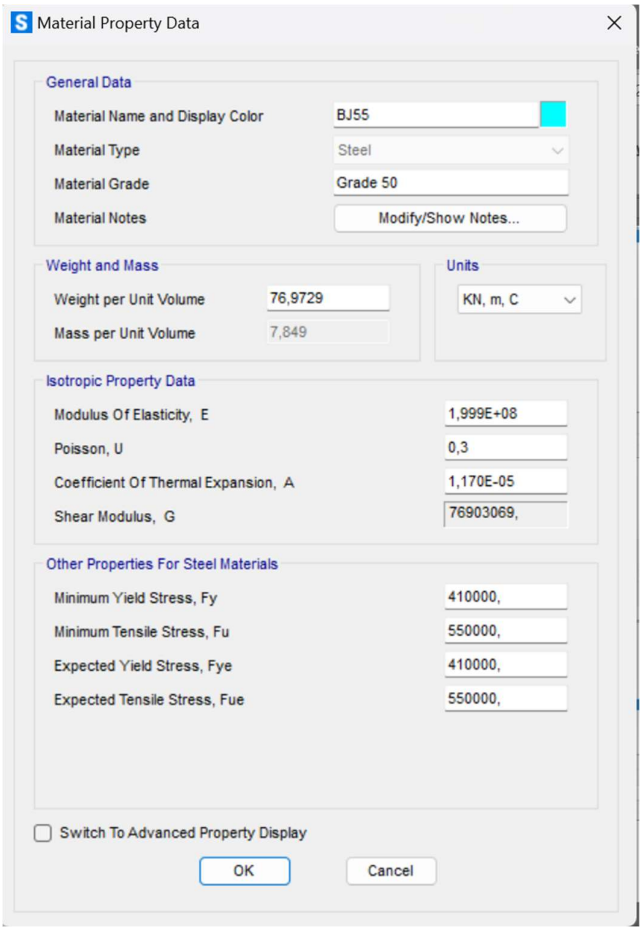
Yulius Herry, S. M. (2020). Penilaian Kondisi Jembatan Rangka Baja Di Kabupaten Sintang Menggunakan Metode BMS. *Tugas Akhir Universitas Tanjungpura Pontianak*, 7.

LAMPIRAN

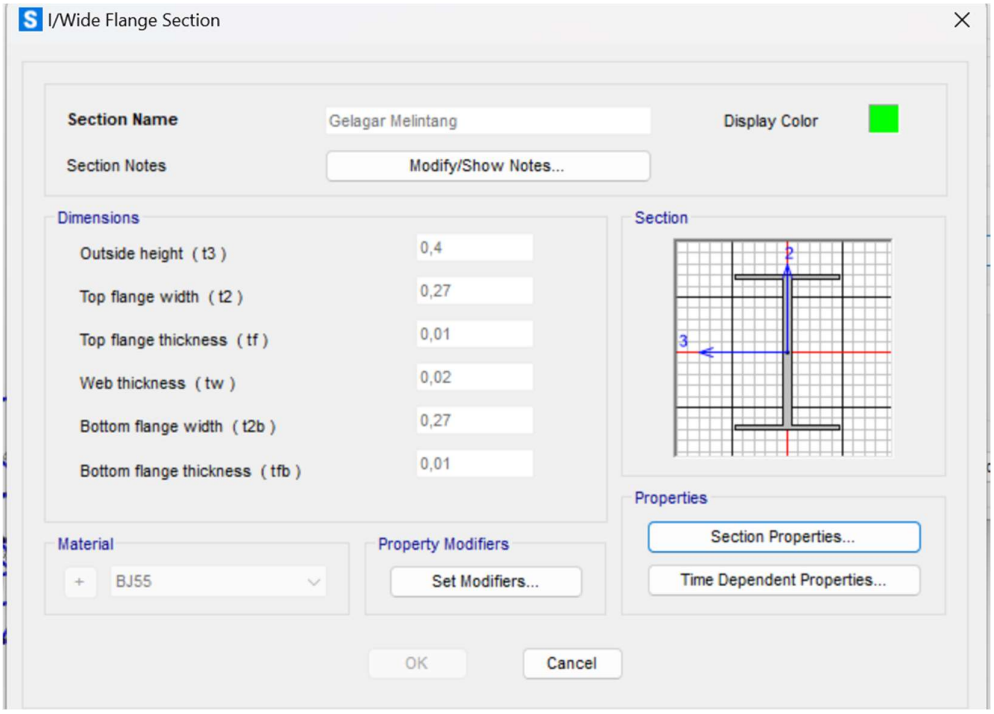
Lampiran 1 Input Material pada *Define Materials*



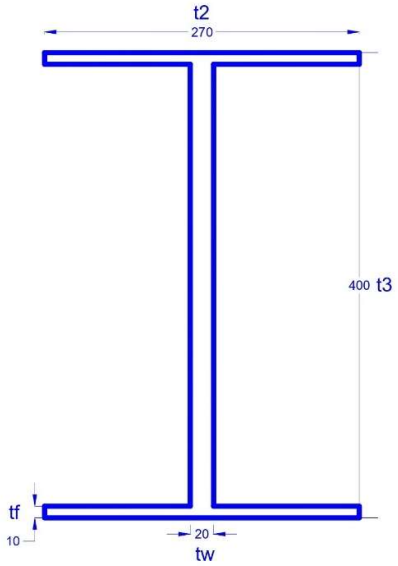
Lampiran 2 Input Mutu Baja pada SAP2000



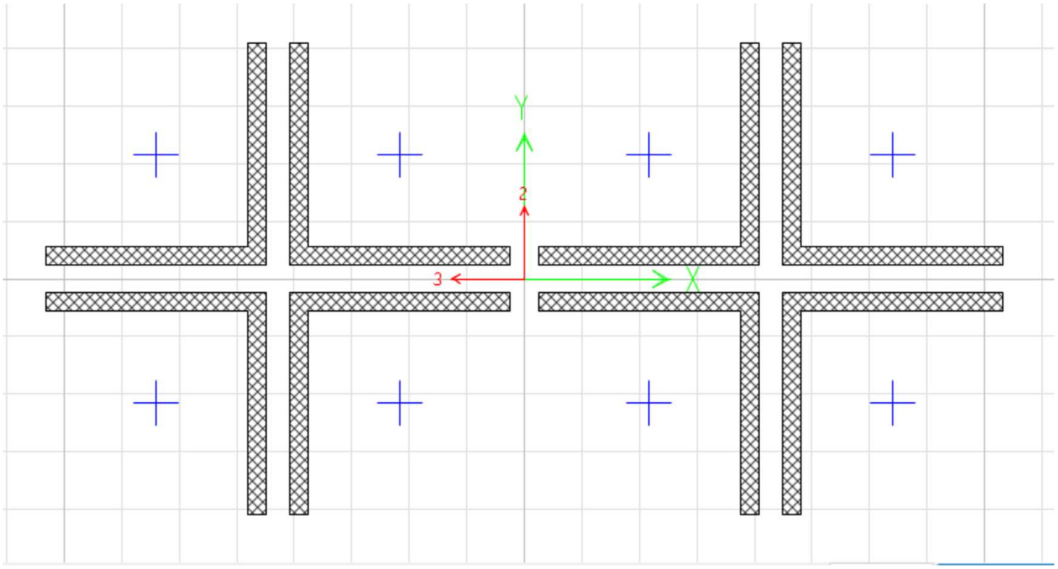
Lampiran 3 Frame Properties Profil Gelagar Melintang kode A (Manual)



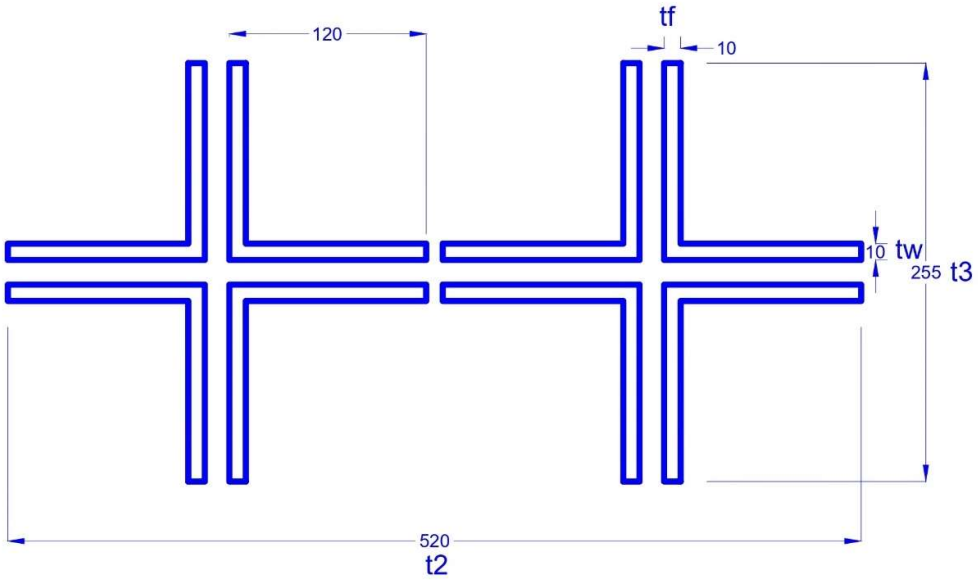
Lampiran 4 Profil Gelagar Melintang kode A (Manual)



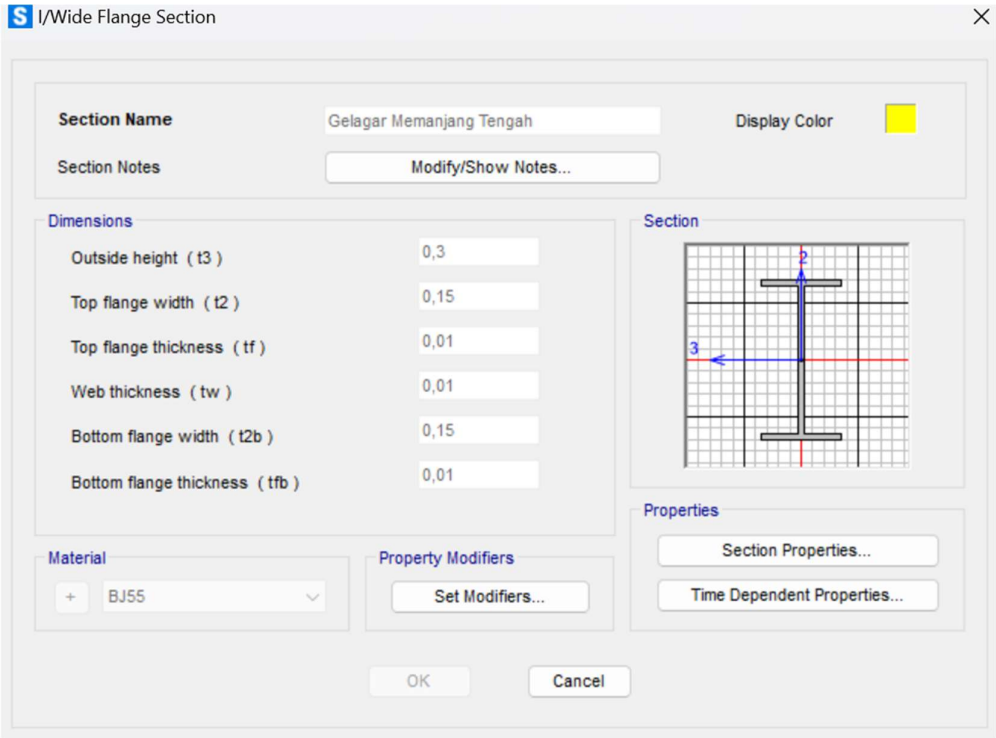
Lampiran 5 Frame Properties Profil Rangka Vertikal kode B (Manual)



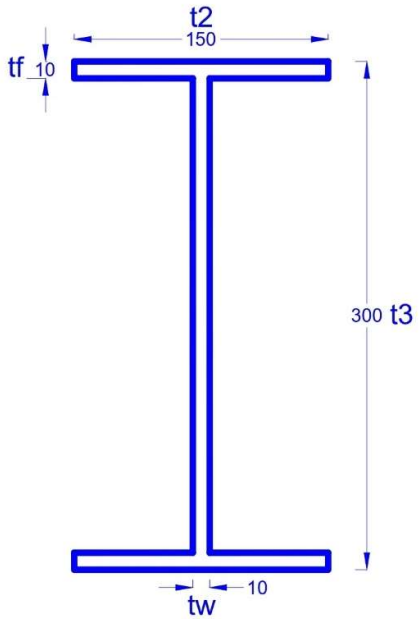
Lampiran 6 Profil Gelagar Melintang kode B (Manual)



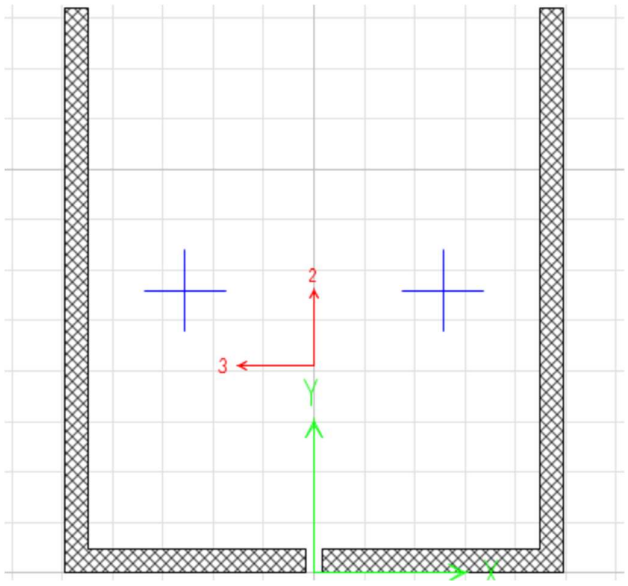
Lampiran 7 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tengah kode C (Manual)



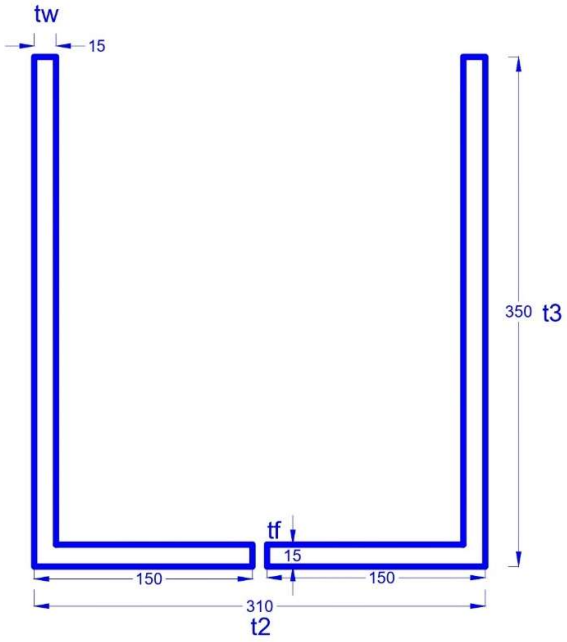
Lampiran 8 Profil Gelagar Melintang kode C (Manual)



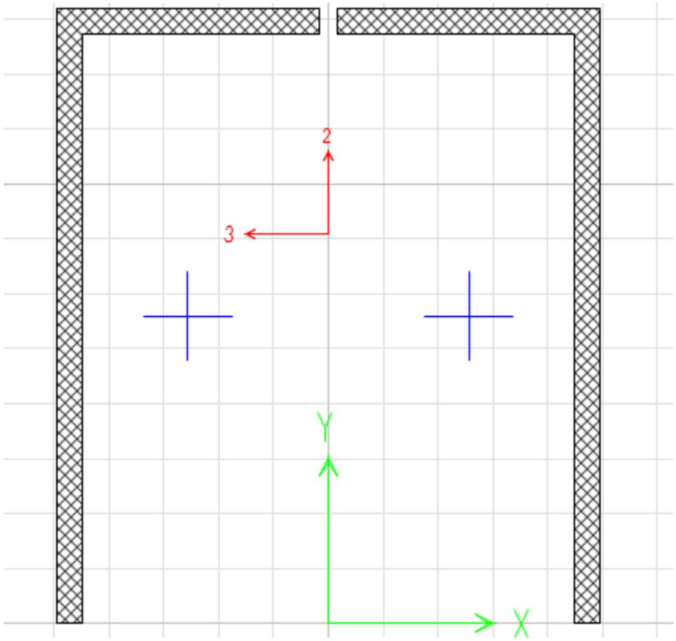
Lampiran 9 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah kode D (Manual)



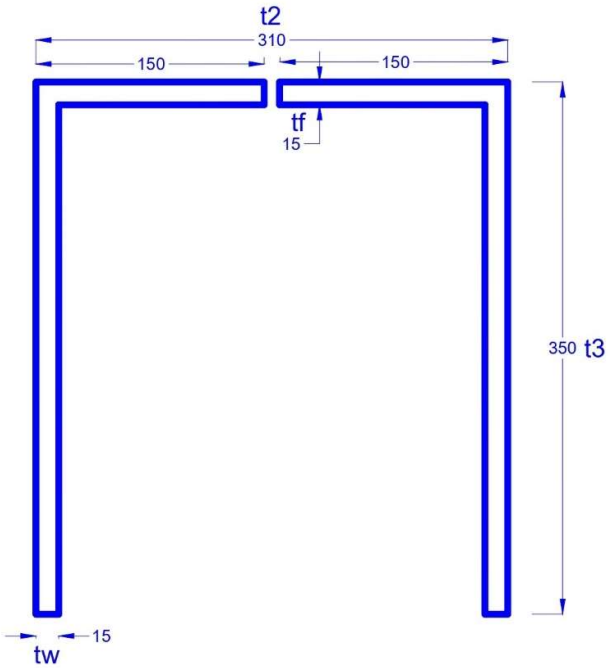
Lampiran 10 Profil Gelagar Melintang kode D (Manual)



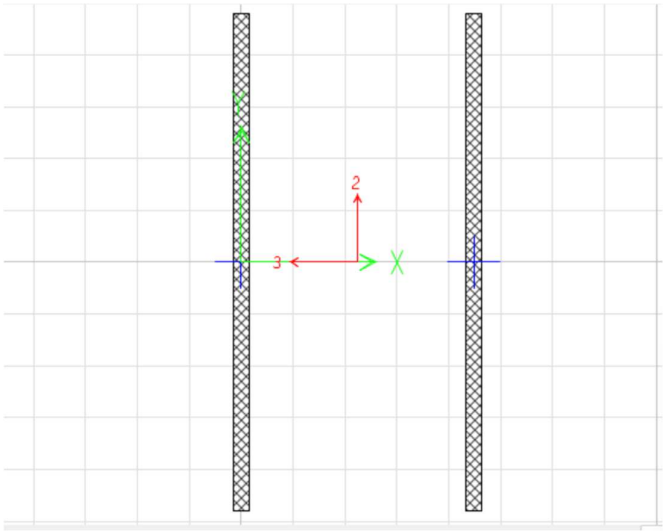
Lampiran 11 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas kode E (Manual)



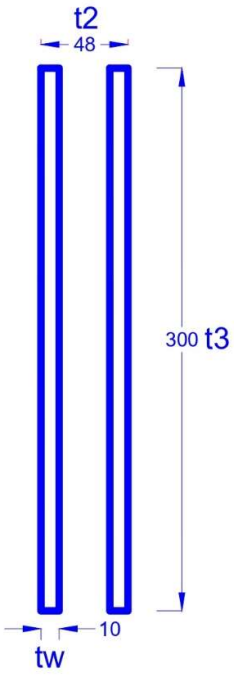
Lampiran 12 Profil Gelagar Melintang kode E (Manual)



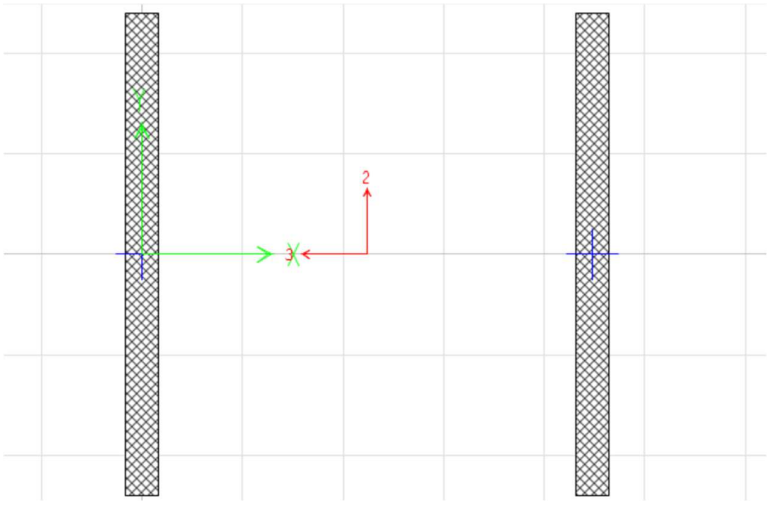
Lampiran 13 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode F (Manual)



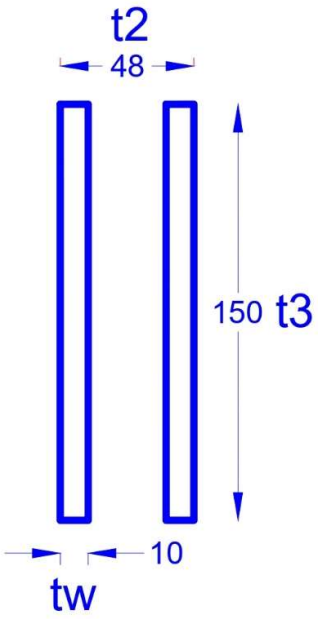
Lampiran 14 Profil Gelagar Melintang kode F (Manual)



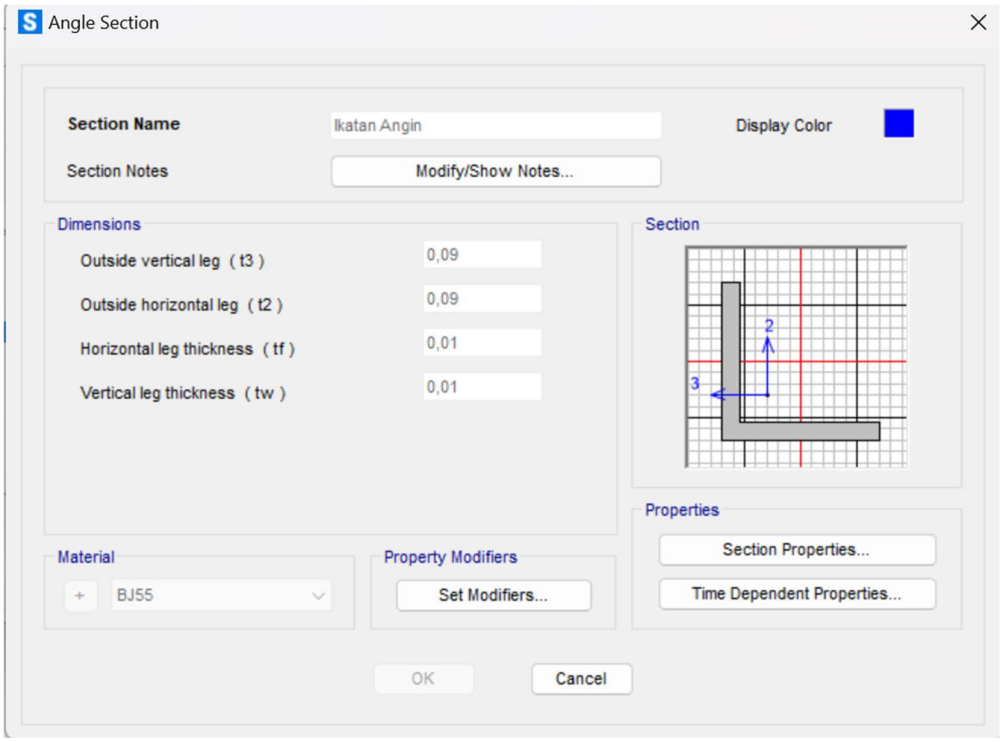
Lampiran 15 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode G (Manual)



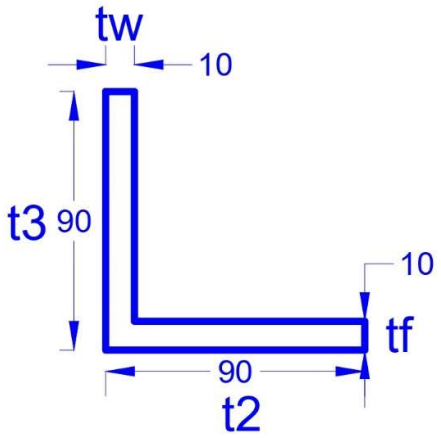
Lampiran 16 Profil Gelagar Melintang kode G (Manual)



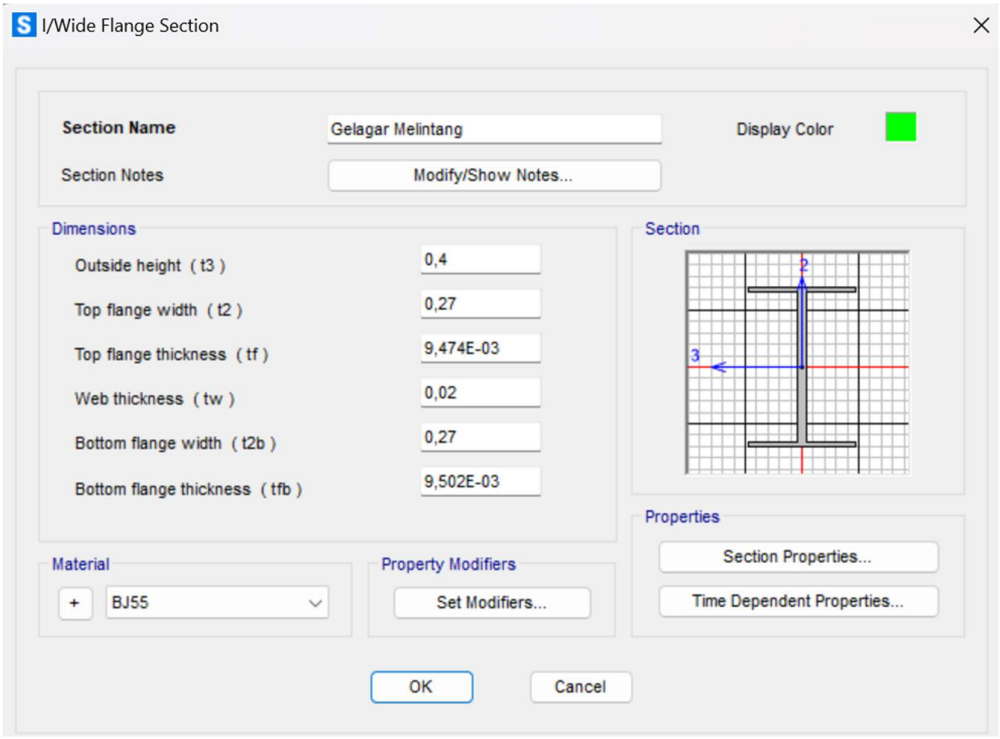
Lampiran 17 Frame Properties Profil Ikatan Angin Kode H (Manual)



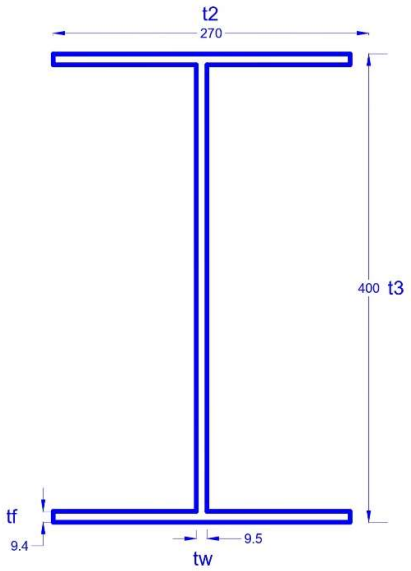
Lampiran 18 Profil Gelagar Melintang kode H (Manual)



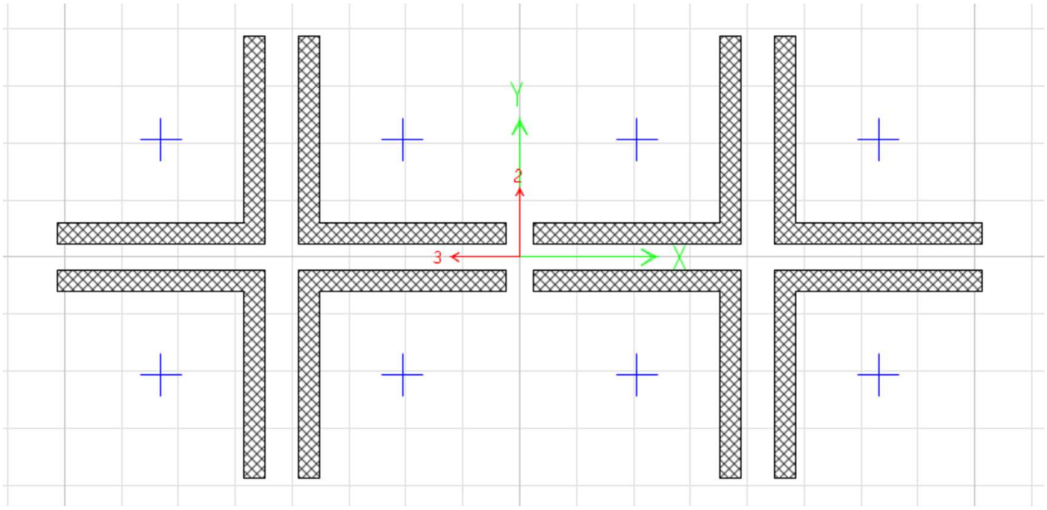
Lampiran 19 Frame Properties Profil Gelagar Melintang kode A (*NDT)*



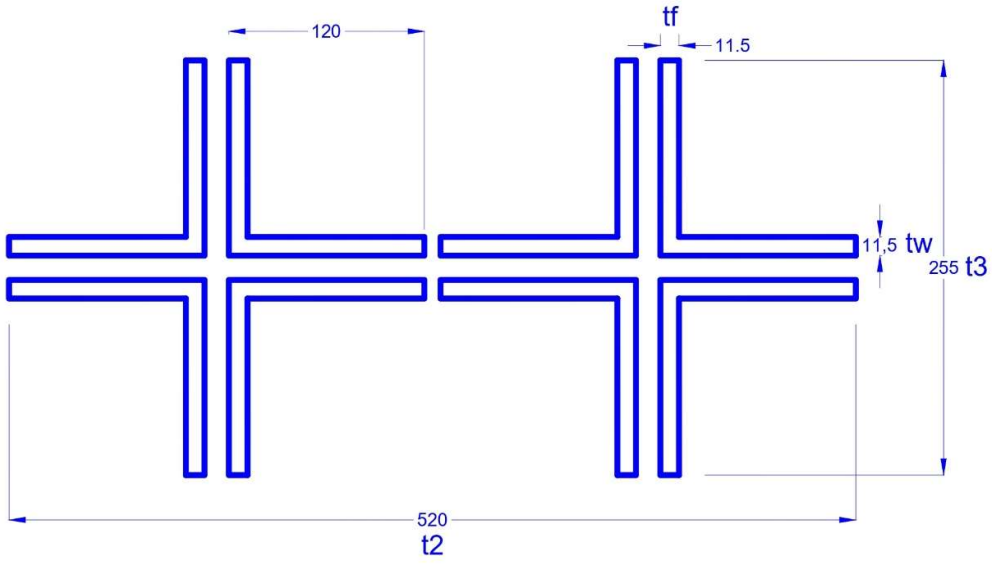
Lampiran 20 Profil Gelagar Melintang kode A (*NDT)*



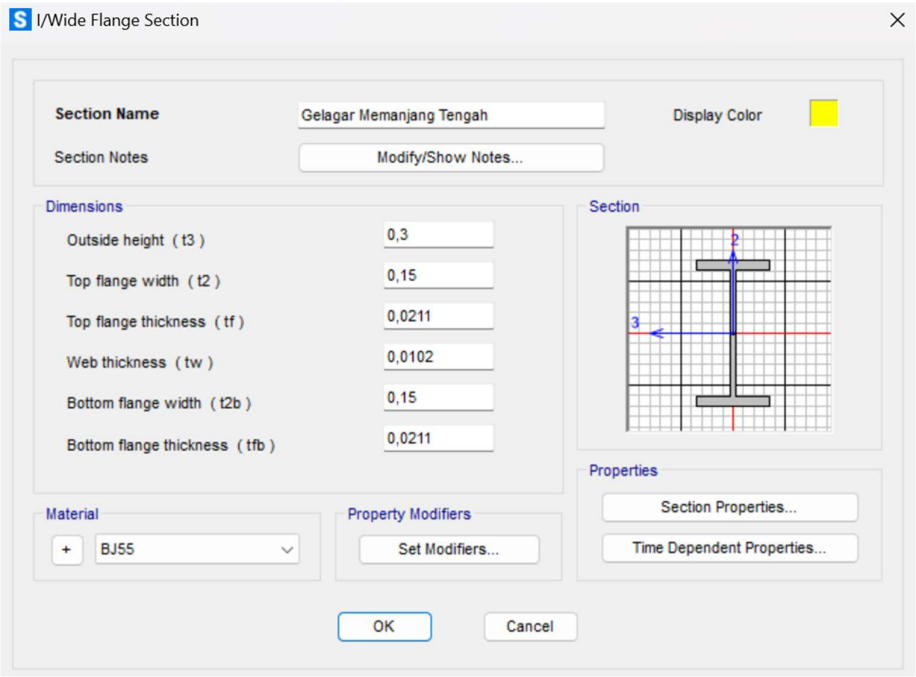
Lampiran 21 Frame Properties Profil Rangka Vertikal kode B (*NDT)*



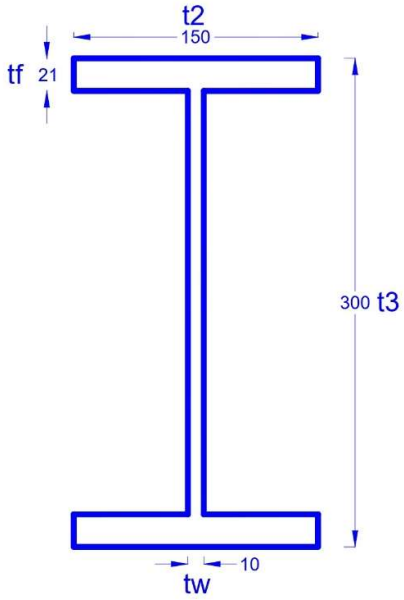
Lampiran 22 Profil Gelagar Melintang kode B (*NDT)*



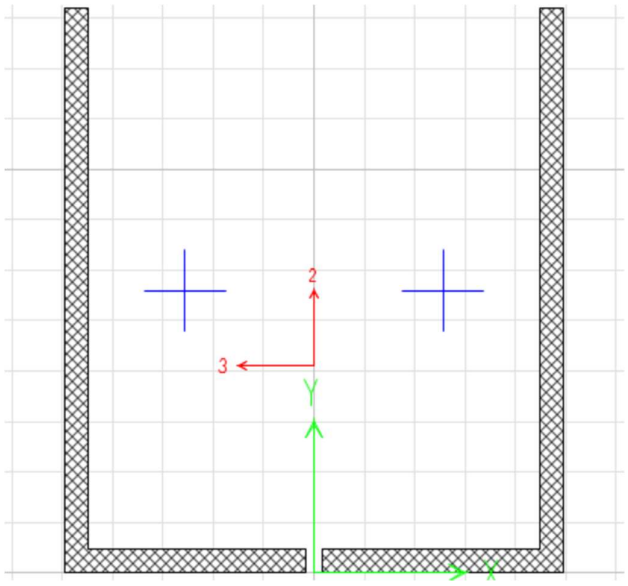
Lampiran 23 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tengah kode C (*NDT)*



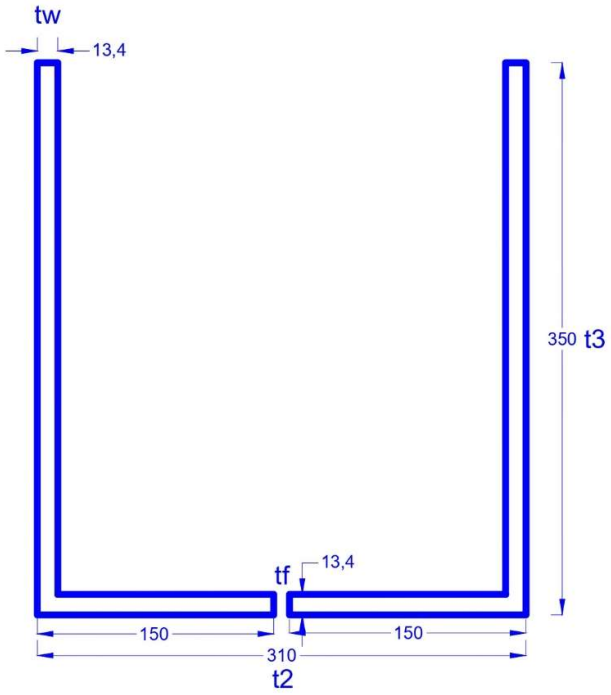
Lampiran 24 Profil Gelagar Melintang kode C (*NDT)*



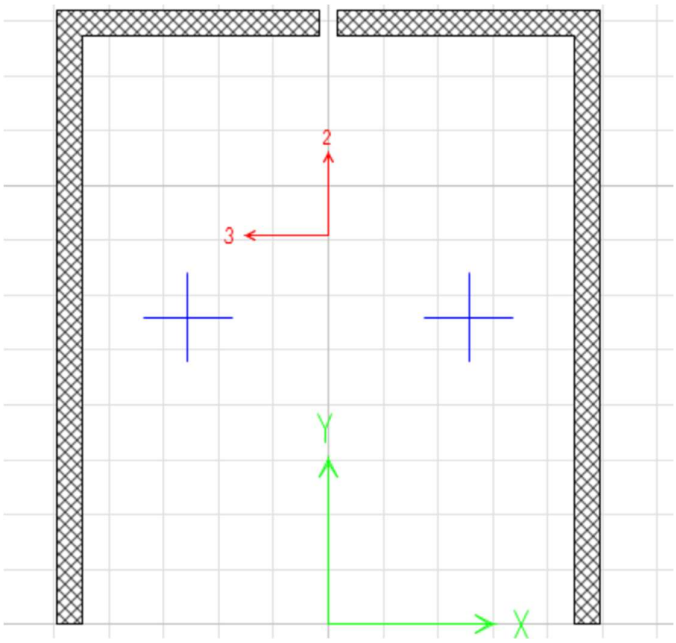
Lampiran 25 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Bawah kode D (*NDT)*



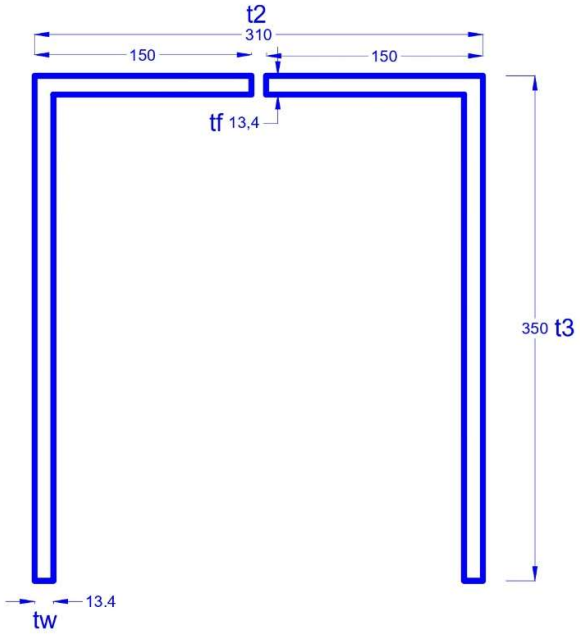
Lampiran 26 Profil Gelagar Melintang kode D (*NDT)*



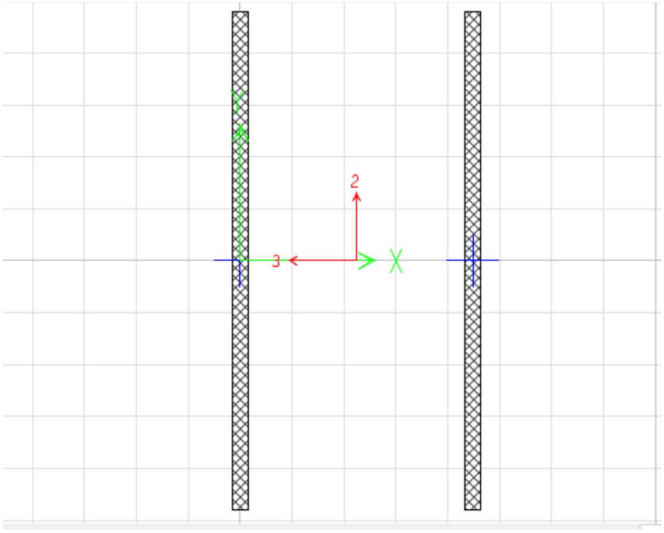
Lampiran 27 Frame Properties Profil Gelagar Memanjang Tepi Atas kode E (*NDT)*



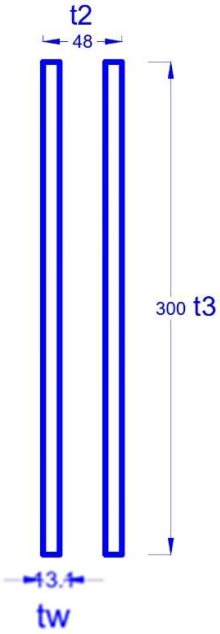
Lampiran 28 Profil Gelagar Melintang kode E (*NDT)*



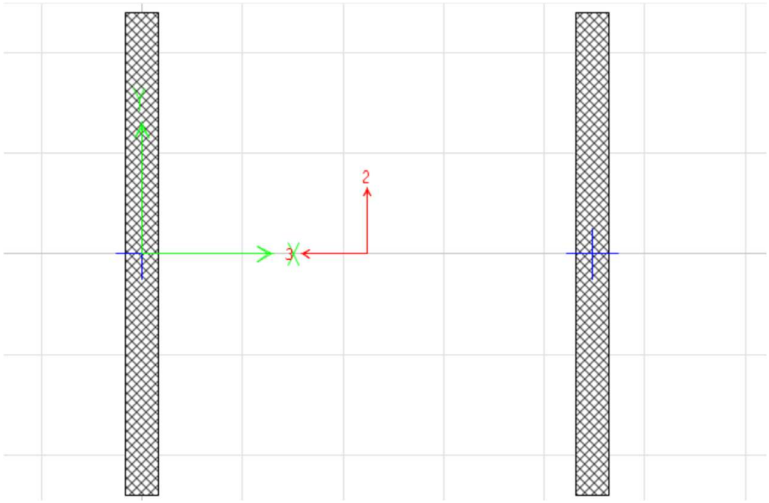
Lampiran 29 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode F (*NDT)*



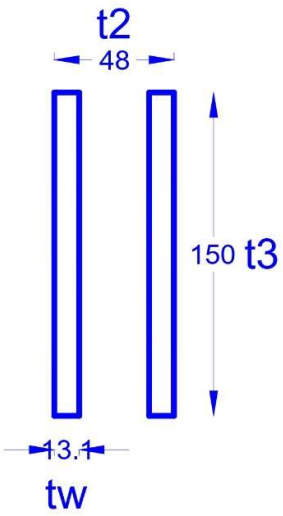
Lampiran 30 Profil Gelagar Melintang kode F (*NDT)*



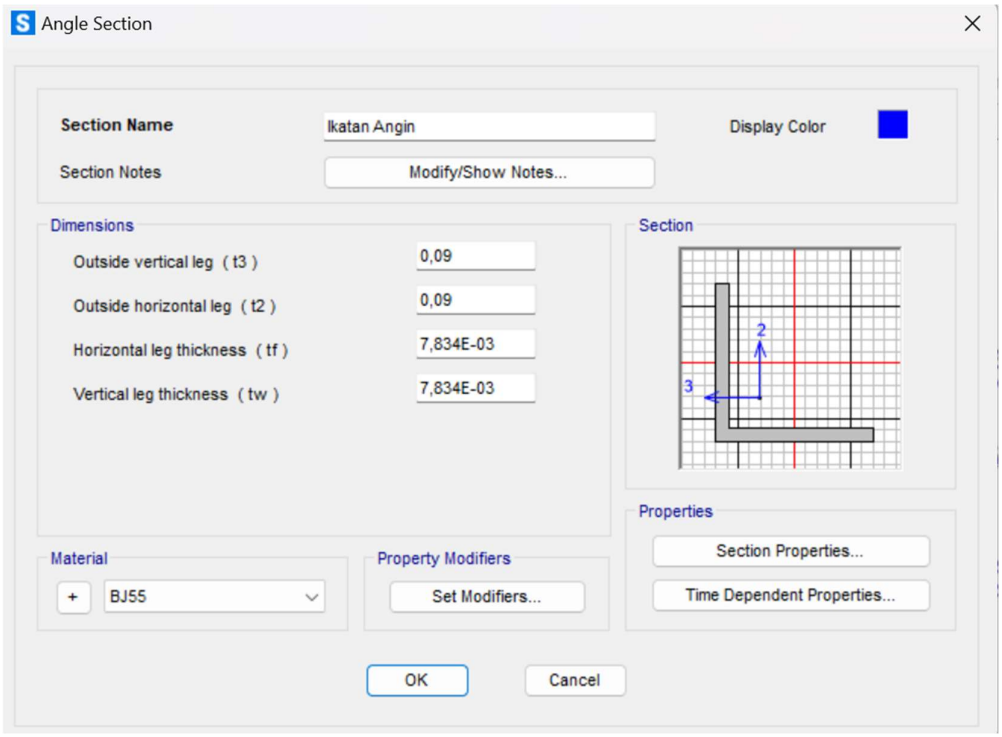
Lampiran 31 Frame Properties Profil Rangka Diagonal 1 Kode G (*NDT)*



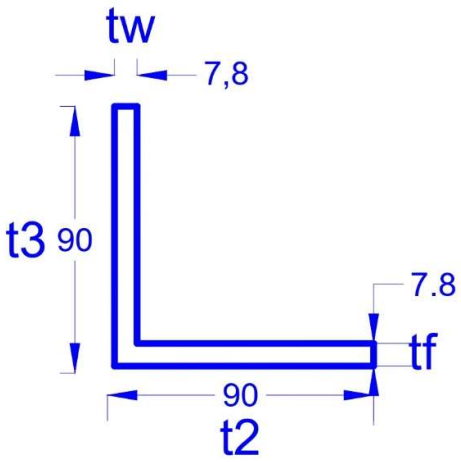
Lampiran 32 Profil Gelagar Melintang kode G (*NDT)*



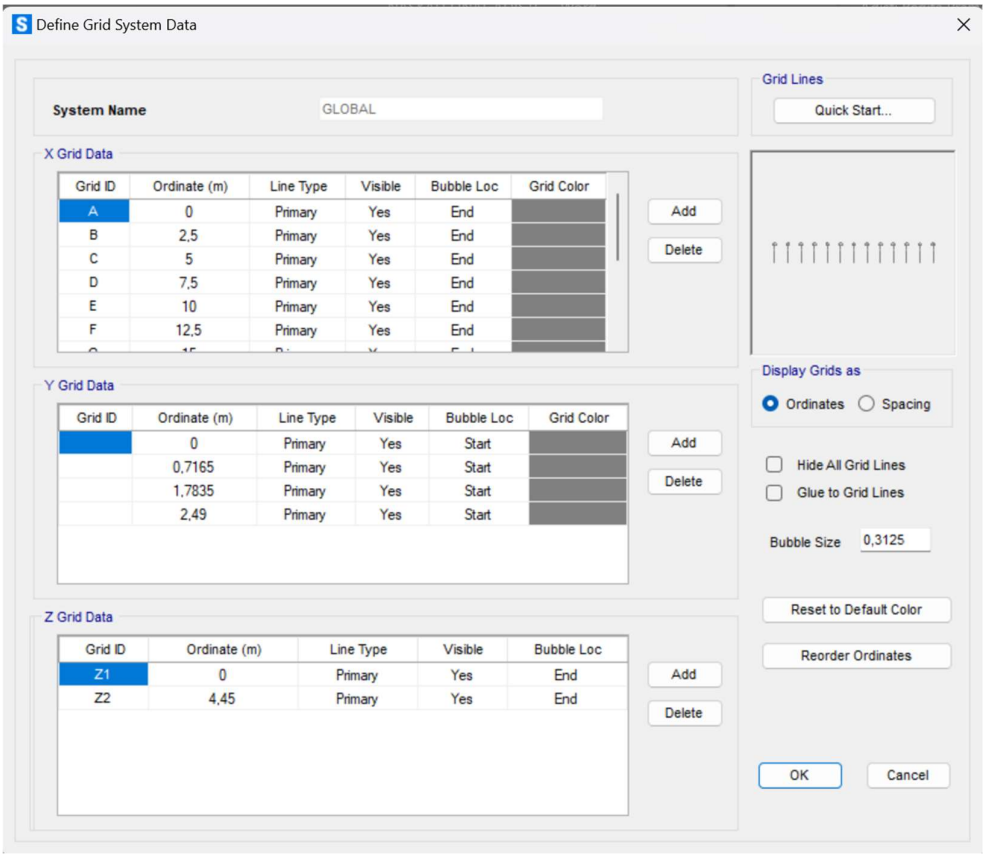
Lampiran 33 Frame Properties Profil Ikatan Angin Kode H (*NDT)*



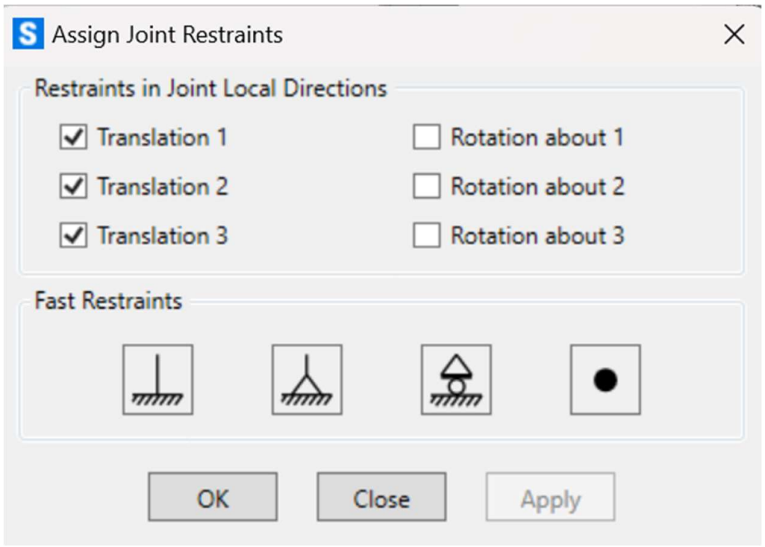
Lampiran 34 Profil Gelagar Melintang kode H (*NDT)*



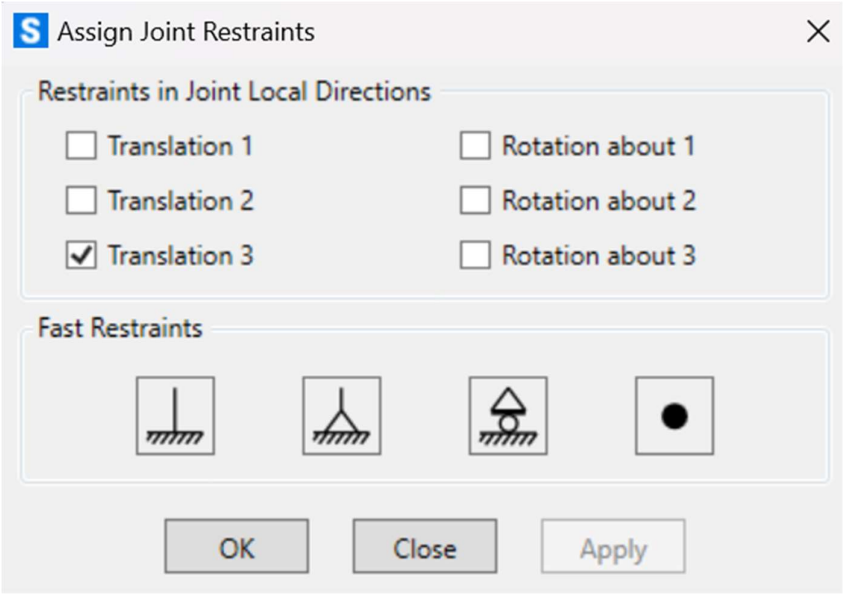
Lampiran 35 *Define Grid System Data*



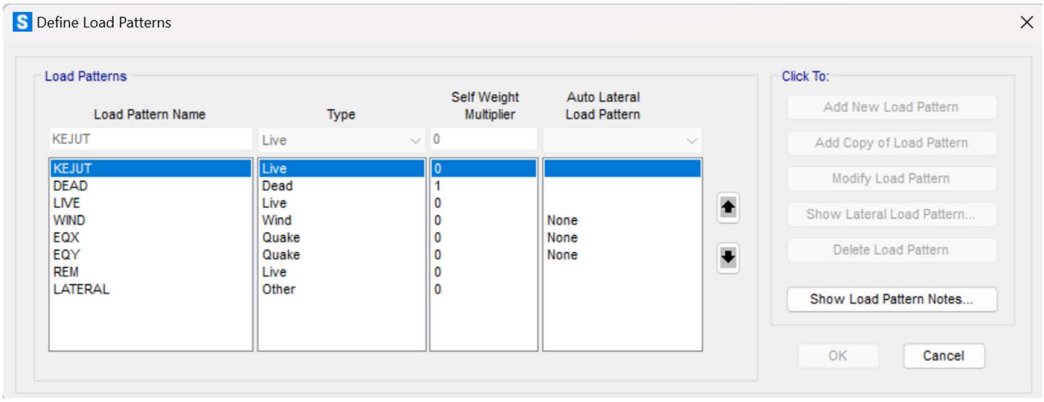
Lampiran 36 Tumpuan Jepit



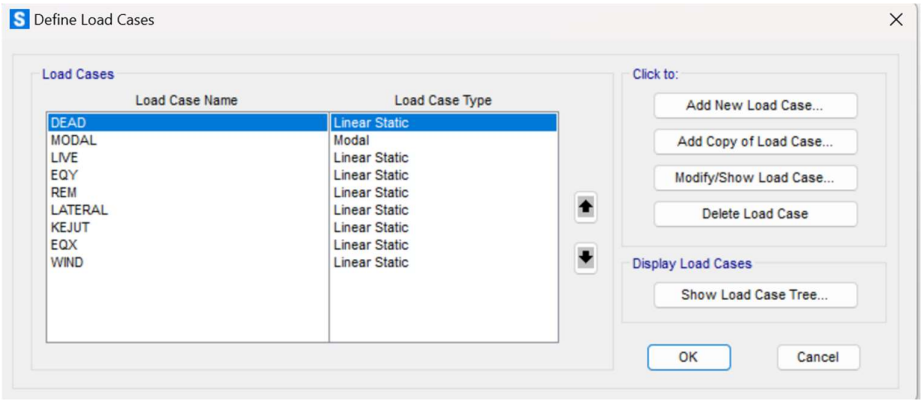
Lampiran 37 Tumpuan Roll



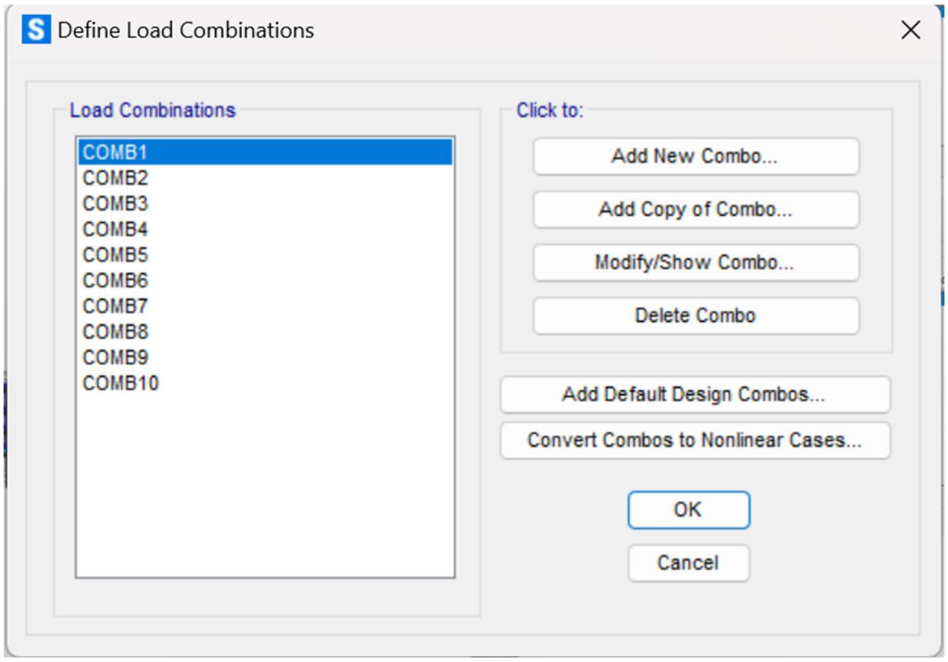
Lampiran 38 *Define Load Patterns*



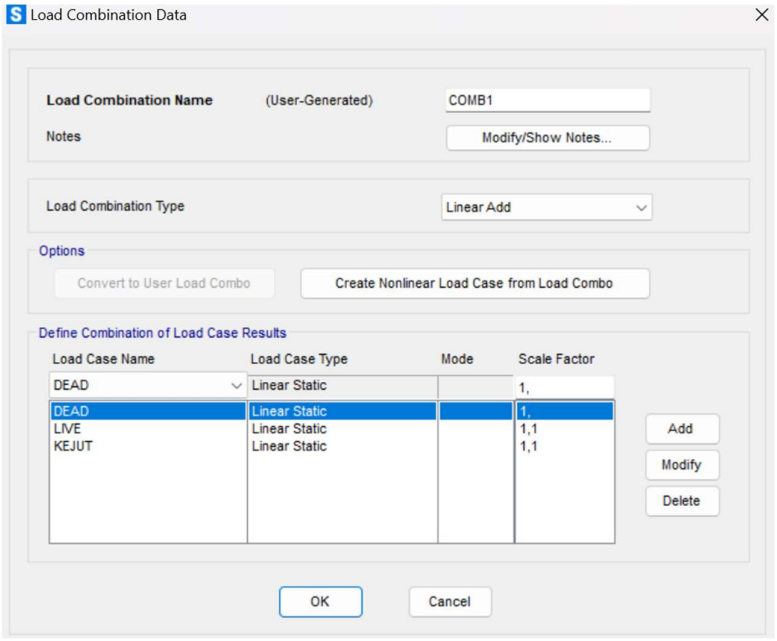
Lampiran 39 ***Define Load Cases***



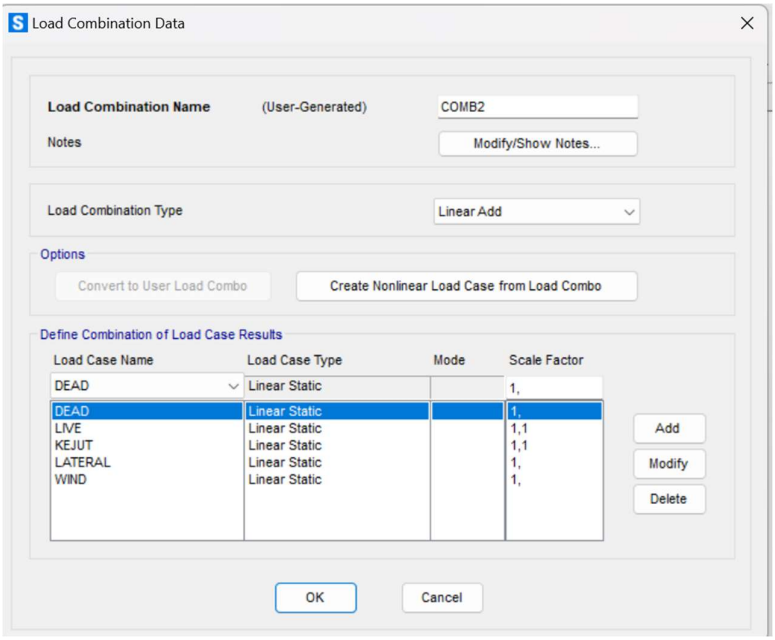
Lampiran 40 ***Define Load Combinations***



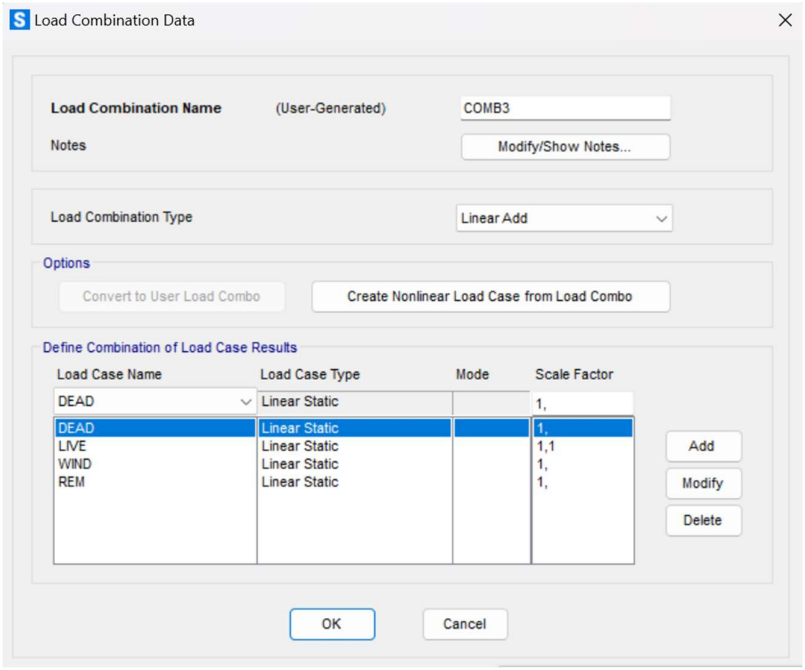
Lampiran 41 *Define Combination 1*



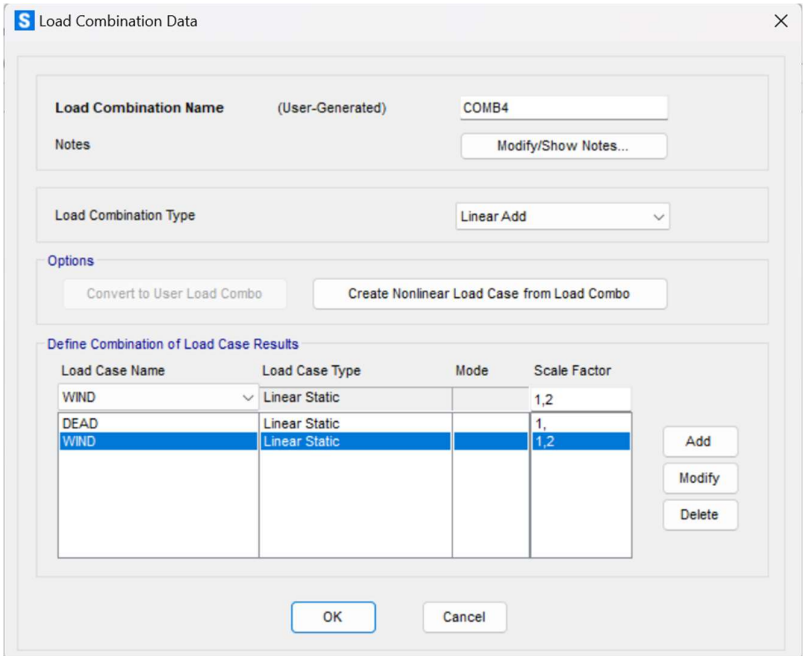
Lampiran 42 *Define Combination 2*



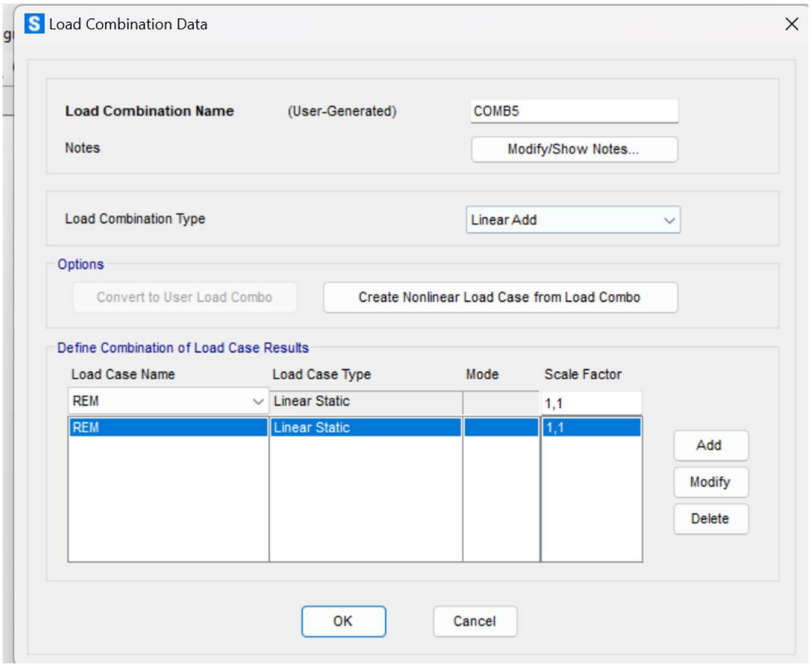
Lampiran 43 ***Define Combination 3***



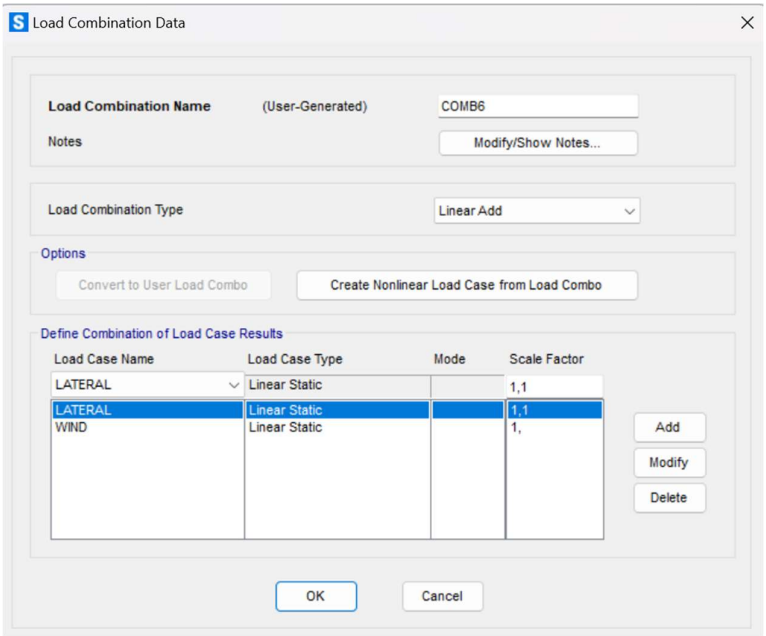
Lampiran 44 ***Define Combination 4***



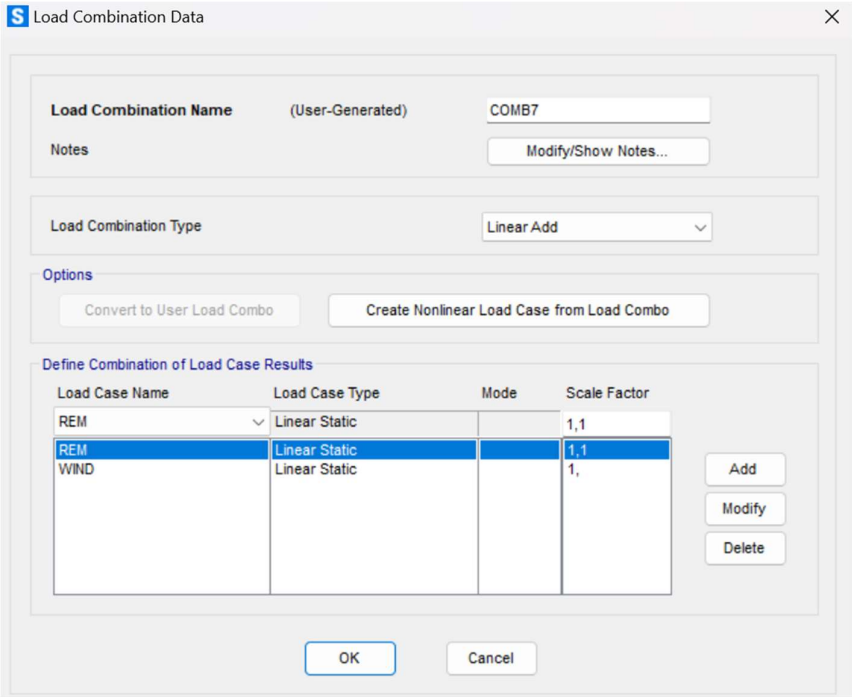
Lampiran 45 ***Define Combination 5***



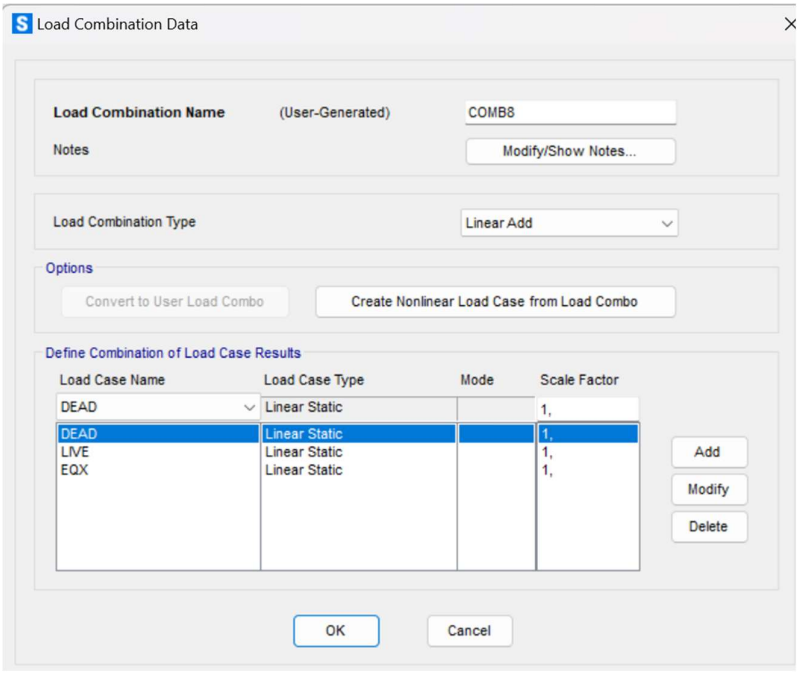
Lampiran 46 ***Define Combination 6***



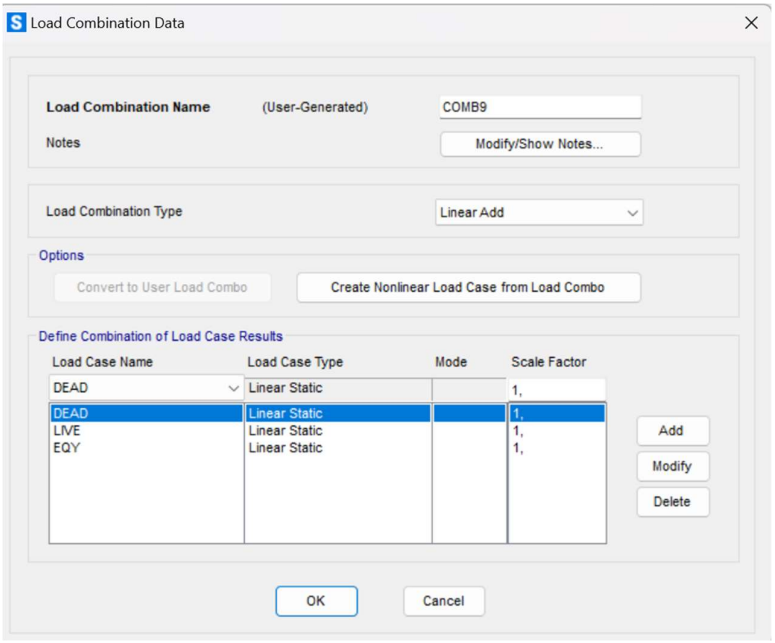
Lampiran 47 ***Define Combination 7***



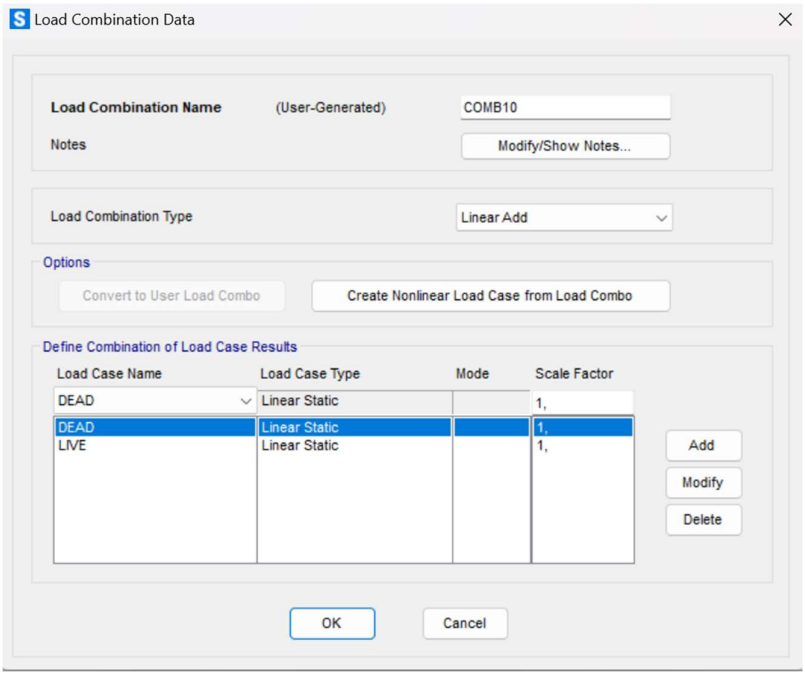
Lampiran 48 ***Define Combination 8***



Lampiran 49 ***Define Combination 9***



Lampiran 50 ***Define Combination 10***



Lampiran 51 Kalibrasi *Coating Thickness Gauge*



Lampiran 52 Kalibrasi *Coating Thickness Gauge*



Lampiran 53 Pengukuran *Coating Thickness Gauge*






SNDWAY SW-6310B
46.8 µm
Mat :Fe Num : 2
Max : 52.4 µm
Min : 46.8 µm
COATING THICKNESS METER
REC
µm/mil
ZERO
SET
CAL

Lampiran 54 Pengukuran *Ultrasonic Thickness Gauge*






SNOWAY
8.66
mm
MAT Steel 5720
AVG 7.75 mm
MAX 8.66 mm
MIN 7.46 mm
CNT 11