

Analisis Kekuatan Sambungan Baut Pada Struktur Baja Gantry Crane Kapasitas 5 Ton Menggunakan Software IDEA StatiCa

Eti Sudarti^{*1}, Windy Stefani, S.T., M.Eng.* Muhammad Irsyad Saihilmi, S.T.,
B.Eng., M.T., M.Sc.*

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: etisudarti469@gmail.com

Abstrak

Sambungan baut merupakan komponen kritis pada struktur *gantry crane* yang menghubungkan elemen struktur utama dalam menahan beban kerja secara aman. Penelitian ini menganalisis kekuatan sambungan baut pada struktur baja *gantry crane* kapasitas 5 ton (12000×10500 mm) menggunakan IDEA StatiCa berbasis *Finite Element Method* (FEM). Struktur dimodelkan dengan Autodesk Inventor menggunakan material S275, profil HE 500 B, pelat sambungan 800×550×20 mm dua lapis, dan baut Hex Bolt M30 grade 8.8 (4 buah per sambungan). Parameter yang dievaluasi meliputi tegangan *von Mises*, tegangan baut, *bearing stress*, deformasi, dan faktor keamanan (SF) berdasarkan standar AISC 360 dan EN 1993. Hasil analisis menunjukkan sambungan balok-kolom memenuhi kriteria keamanan ($SF \geq 1$), dengan utilisasi baut maksimum 27,2%, regangan plastis pelat maksimum 0,2%, dan utilisasi las maksimum 99,0% sebagai parameter paling kritis. Penelitian ini diharapkan menjadi referensi perancangan sambungan baja yang aman dan efisien.

Kata kunci: *Gantry Crane, Sambungan Baut, IDEA StatiCa, Finite Element Method, Safety Factor*

Abstract

Bolt connections are critical components in gantry crane structures that connect main structural elements to safely withstand working loads. This study analyzes the strength of bolt connections in a 5-ton capacity gantry crane structure (12000×10500 mm) using IDEA StatiCa based on the *Finite Element Method* (FEM). The structure was modeled in Autodesk Inventor with S275 steel, HE 500 B profile, 800×550×20 mm connection plates in two layers, and Hex Bolt M30 grade 8.8 (4 bolts per connection). Evaluated parameters include *von Mises* stress, bolt stress, *bearing stress*, deformation, and safety factor (SF) based on AISC 360 and EN 1993 criteria. Results show the beam-column connection satisfies the safety criteria ($SF \geq 1$), with a maximum bolt utilization of 27.2%, a maximum plate plastic strain of 0.2%, and a maximum weld utilization of 99.0% as the most critical parameter. This research is expected to serve as a reference for safe and efficient steel connection design.

Keywords: *Gantry Crane, Bolted Connection, IDEA StatiCa, Finite Element Method, Safety Factor*

1 Pendahuluan

Perkembangan industri manufaktur dan konstruksi saat ini membutuhkan sistem pemindahan material yang efisien, cepat, dan aman. Salah satu peralatan yang paling banyak digunakan untuk proses pemindahan material berat adalah *gantry crane*, yaitu alat angkat yang berfungsi memindahkan beban berat secara vertikal maupun horizontal menggunakan struktur portal yang berdiri di atas rel atau roda. *Gantry crane* banyak digunakan di area terbuka seperti pelabuhan, galangan kapal, dan area konstruksi karena tidak memerlukan struktur bangunan penopang seperti *overhead crane*. Struktur utama *gantry crane* umumnya menggunakan baja struktural karena memiliki kekuatan tinggi serta mampu menahan beban statis maupun dinamis yang terjadi selama proses operasi [1].

Dalam suatu struktur baja, sambungan merupakan bagian yang sangat penting karena berfungsi menghubungkan elemen-elemen struktur seperti balok, kolom, dan pelat agar dapat bekerja sebagai satu kesatuan dalam menahan beban. Kinerja sambungan sangat mempengaruhi kekuatan dan stabilitas struktur secara keseluruhan, sehingga kegagalan pada bagian sambungan dapat terjadi meskipun elemen struktur utama memiliki kekuatan yang cukup. Salah satu jenis sambungan yang paling banyak digunakan pada struktur baja adalah sambungan baut (*bolted connection*) karena memiliki keunggulan dalam hal kemudahan pemasangan, pembongkaran, perawatan, dan inspeksi selama masa operasional struktur [2].

Beban yang bekerja pada struktur *gantry crane* tidak hanya berasal dari berat beban yang diangkat, tetapi juga dari percepatan saat pengangkatan, gaya akibat pergerakan *trolley*, serta getaran yang terjadi selama proses operasi. Kondisi ini menyebabkan sambungan baut harus mampu menahan kombinasi gaya tarik, gaya geser, dan momen secara bersamaan[3]. Oleh karena itu, perancangan sambungan baut yang tepat mencakup pemilihan diameter baut, jumlah baut, jarak antar baut, serta ketebalan pelat sambungan menjadi hal yang sangat kritis dalam menjamin keamanan struktur *crane* secara keseluruhan[4].

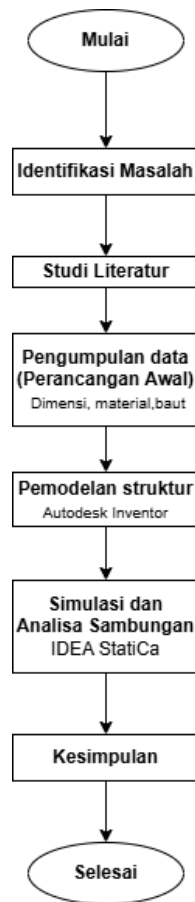
Seiring perkembangan teknologi rekayasa struktur, analisis sambungan tidak lagi hanya dilakukan secara manual, melainkan menggunakan perangkat lunak berbasis *Finite Element Method* (FEM) yang mampu mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan perilaku struktur secara lebih akurat dan menyeluruh[5]. Salah satu perangkat lunak yang dirancang khusus untuk analisis sambungan struktur baja adalah IDEA StatiCa. Perangkat lunak ini memungkinkan evaluasi kekuatan sambungan secara detail, meliputi distribusi tegangan pada baut, pelat sambungan, serta elemen struktur lainnya, sehingga potensi kegagalan dapat diidentifikasi sebelum struktur digunakan dalam kondisi operasional nyata [6][7].

Meskipun analisis sambungan baut pada struktur *crane* telah banyak dilakukan, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada *overhead crane* dan struktur rangka umum, sementara kajian khusus mengenai perilaku sambungan baut pada struktur *gantry crane* menggunakan metode FEM berbasis IDEA StatiCa masih sangat terbatas, sehingga perilaku dan kekuatan sambungan baut pada kondisi operasional nyata belum terdokumentasi secara komprehensif [3].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kekuatan sambungan baut pada struktur baja *gantry crane* kapasitas 5 Ton menggunakan perangkat lunak IDEA StatiCa.

Struktur dimodelkan menggunakan Autodesk Inventor dengan profil HE 500 B, pelat sambungan $800 \times 550 \times 20$ mm dua lapis, dan baut Hex Bolt Metric M30 grade 8.8 sebanyak 4 buah per sambungan. Parameter yang dianalisis meliputi distribusi tegangan *von Mises*, tegangan tarik dan geser baut, *bearing stress*, deformasi, serta faktor keamanan (*safety factor/SF*). Hasil analisis IDEA StatiCa menggunakan kriteria keamanan standar AISC 360 dan EN 1993 untuk memastikan desain sambungan memenuhi syarat keamanan dalam kondisi operasional nyata [5].

2 Metodologi Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1 Identifikasi Masalah

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah mengidentifikasi permasalahan yang menjadi dasar dilakukannya penelitian. Permasalahan yang diangkat adalah bagaimana perilaku dan kekuatan sambungan baut pada struktur baja *gantry crane* ketika menerima beban operasional. Sambungan baut merupakan komponen kritis yang menghubungkan elemen-elemen struktur utama, sehingga kegagalan pada sambungan dapat berdampak langsung terhadap keselamatan dan keandalan struktur crane secara keseluruhan. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang lebih mendalam menggunakan metode elemen hingga (FEM) melalui perangkat lunak IDEA StatiCa.

2.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teori yang kuat dalam mendukung proses analisis. Referensi yang digunakan mencakup teori dasar mekanika struktur, konsep sambungan baut pada konstruksi baja, standar perencanaan sambungan baut berdasarkan SNI 1729 dan standar internasional[8][9][10], serta panduan penggunaan perangkat lunak IDEA StatiCa. Selain itu, studi literatur juga dilakukan terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan analisis sambungan baut pada struktur *crane* menggunakan metode elemen hingga, sehingga dapat dijadikan acuan dalam membandingkan dan memvalidasi hasil penelitian.

2.3 Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data dilakukan untuk memperoleh seluruh informasi teknis yang dibutuhkan dalam proses pemodelan dan analisis. Data yang dikumpulkan meliputi spesifikasi material, dimensi pelat sambungan, dan konfigurasi baut yang digunakan pada struktur *gantry crane* kapasitas 5 ton.

a. Material Struktur

Material yang digunakan pada seluruh komponen struktur *gantry crane* dalam penelitian ini adalah S275 (baja struktural). Dalam pemodelan menggunakan Autodesk Inventor, material ini tercatat sebagai Steel, S275 dengan densitas 7.850 g/cm^3 sesuai dengan sifat mekanik baja struktural berdasarkan EN 1993-1-1 dan EN 10025-2[8]. S275 memiliki kekuatan luluh (yield strength) sebesar 275 MPa, yang setara dengan baja BJ 41 berdasarkan SNI 1729 atau S275 berdasarkan standar Eurocode EN 1993[9], [10]. Sifat mekanik material secara lengkap disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Mekanik Material S275

Properti	Nilai	Standar Setara
Densitas	7.850 g/cm^3	—
Yield Strength	275 MPa	BJ 41 / S275
Tensile Strength	430–580 MPa	SNI 1729 / EN 1993
Modulus Elastisitas	210.000 MPa	—

b. Pelat Sambungan

Pelat sambungan berfungsi sebagai media penghubung antar elemen struktur yang disambung menggunakan baut. Pelat sambungan yang digunakan memiliki dimensi $800 \times 550 \text{ mm}$ dengan ketebalan 20 mm dan dipasang sebanyak dua lapis pada setiap titik sambungan, sehingga total ketebalan efektif pelat adalah 36 mm. Spesifikasi pelat sambungan secara lengkap disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Pelat Sambungan

Parameter	Nilai
Dimensi Pelat	800 × 550 mm
Tebal Pelat	20 mm per lapis
Jumlah Lapis	2 lapis (total tebal = 36 mm)
Material	S275 (<i>Yield Strength</i> 275 MPa)
Standar	ISO 12633-2

c. Baut, Mur, dan Washer

Baut yang digunakan adalah Hex Bolt Metric M30 × 3,5 × 90 dengan grade 8.8 sesuai standar ISO 898-1. Setiap titik sambungan menggunakan 4 baut yang dipasang simetris, dilengkapi dengan mur (nut) dan plain washer M30 pada masing-masing sisi baut. Penggunaan washer bertujuan untuk mendistribusikan gaya penekanan baut secara merata pada permukaan pelat sambungan sehingga mengurangi risiko deformasi lokal. Spesifikasi lengkap komponen baut disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi Baut Sambungan

Parameter	Nilai
Tipe Baut	Hex Bolt Metric
Diameter (d)	M30
Pitch Ulir	3,5 mm
Panjang Baut	90 mm
Grade / Mutu	8.8 (ISO 898-1)
Yield Strength Baut	640 MPa
Tensile Strength Baut	800 MPa
Jumlah Baut per Sambungan	4 buah
Kelengkapan	Nut + Plain Washer M30

2.4 Parameter Mesh Elemen Hingga

Sebelum dilakukan analisis kekuatan sambungan, model 3D struktur pada masing-masing titik sambungan terlebih dahulu didiskritisasi menjadi elemen-elemen kecil (*meshing*) menggunakan pengaturan otomatis (*automatic mesh generator*) pada IDEA StatiCa. Jenis elemen yang digunakan adalah Solid Tetrahedral dengan ukuran elemen rata-rata sebesar 0,100 atau 10% dari dimensi bounding box model, dan ukuran elemen minimum (*minimum element size*) sebesar 0,200 atau 20% dari ukuran rata-rata. *Parameter grading factor* diatur sebesar 1,500 dengan maximum turn *angle* 60,00 derajat, serta opsi *assembly mesh* menggunakan *part-based measure*. Hasil *meshing* menghasilkan total 769.293 node dan 410.111 elemen. Parameter *mesh* elemen hingga yang digunakan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter dan Properti Mesh Struktur Gantry Crane

No	Parameter Mesh	Nilai / Keterangan
1	Jenis Elemen	Solid Tetrahedral
2	Average Element Size	0,100 (10% dari bounding box)
3	Minimum Element Size	0,200 (20% dari average size)
4	Grading Factor	1,500
5	Maximum Turn Angle	60,00 deg
6	Assembly Mesh Option	Part-based measure
7	Total Nodes	769.293
8	Total Elements	410.111

2.5 Analisis Sambungan dengan IDEA StatiCa

Analisis sambungan baut dilakukan menggunakan perangkat lunak IDEA StatiCa dengan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*). Data model dan gaya dalam yang diperoleh dari Autodesk Inventor diimpor ke dalam IDEA StatiCa untuk selanjutnya dilakukan analisis kekuatan sambungan. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan *von Mises* pada pelat sambungan, tegangan tarik dan geser pada baut, tegangan tekan (*bearing stress*) pada lubang baut, serta distribusi gaya pada setiap baut. Analisis ini mengacu pada standar AISC 360 dan EN 1993 (Eurocode 3) yang telah terintegrasi dalam perangkat lunak IDEA StatiCa.

2.6 Evaluasi Hasil Analisis IDEA StatiCa

Setelah analisis menggunakan IDEA StatiCa selesai dilakukan, hasil yang diperoleh kemudian dievaluasi berdasarkan nilai faktor keamanan (*safety factor*). Sambungan dinyatakan aman apabila nilai $SF \geq 1$, yang berarti kapasitas komponen lebih besar atau sama dengan gaya yang bekerja. Secara umum, faktor keamanan dirumuskan sebagai perbandingan antara kapasitas tahanan komponen dan gaya yang bekerja pada komponen tersebut, seperti pada persamaan berikut:

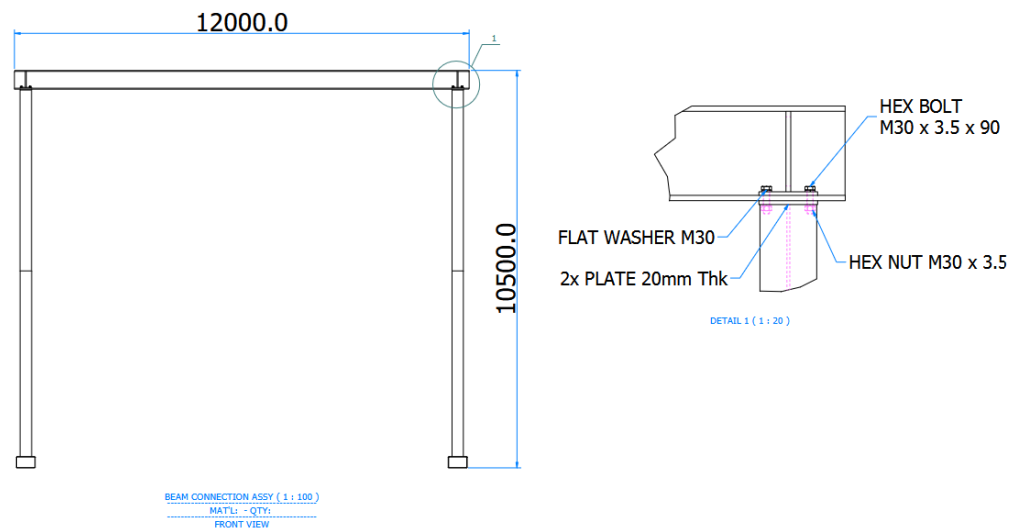
$$SF = \frac{R_d}{E_d} \geq 1 \quad (1)$$

dengan R_d adalah kapasitas tahanan (*design resistance*) komponen sambungan hasil analisis IDEA StatiCa, dan E_d adalah gaya yang bekerja (*design action effect*) pada komponen tersebut yang diperoleh dari hasil pemodelan struktur. Evaluasi dilakukan terhadap seluruh parameter output IDEA StatiCa, meliputi tegangan *von Mises* pada pelat sambungan, tegangan tarik dan geser baut, bearing stress pada lubang baut, deformasi, serta distribusi gaya pada setiap baut. Apabila hasil evaluasi menunjukkan sambungan tidak memenuhi syarat keamanan berdasarkan standar AISC 360 dan EN 1993, maka dilakukan peninjauan ulang terhadap konfigurasi sambungan hingga seluruh parameter memenuhi kriteria yang disyaratkan.

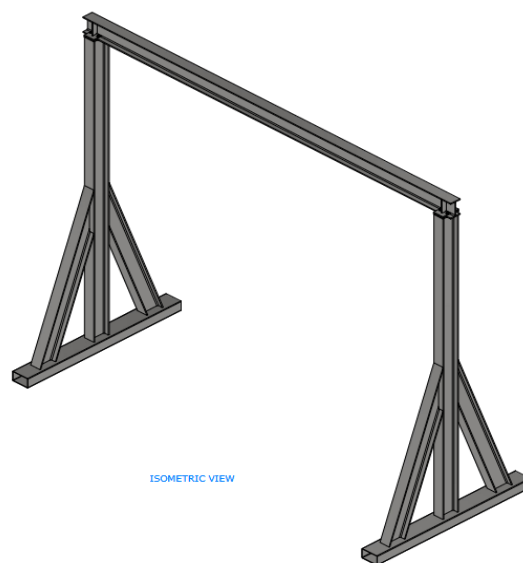
3. Analisa Data dan Pembahasan

3.1 Pemodelan

Pemodelan struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak Autodesk Inventor. Seluruh komponen struktur *gantry crane* dimodelkan secara tiga dimensi sesuai dengan dimensi aktual yang telah dikumpulkan, meliputi profil balok HE 500 B (EURONORM 53-62), kolom, pelat, baut, mur, dan washer. Data gaya dalam (N, Vy, Vz, Mx, My, Mz) pada titik sambungan CON1 diperoleh dari hasil pemodelan struktur gantry crane menggunakan Autodesk Inventor dan digunakan sebagai input beban pada analisis IDEA StatiCa. Sambungan yang dianalisis merupakan sambungan balok-kolom pada bagian atas rangka utama, menggunakan baut Hex Bolt M30 grade 8.8 dengan pelat ujung, pelat pengaku, dan pelat tambahan agar mudah dipasang, dibongkar, dan diinspeksi. Profil yang digunakan adalah HE 500 B dengan material S275.



Gambar 2. Detail Sambungan Baut Struktur Baja *Gantry Crane* Kapasitas 5 Ton



Gambar 3. Model 3D Struktur Baja *Gantry Crane* Kapasitas 5 Ton

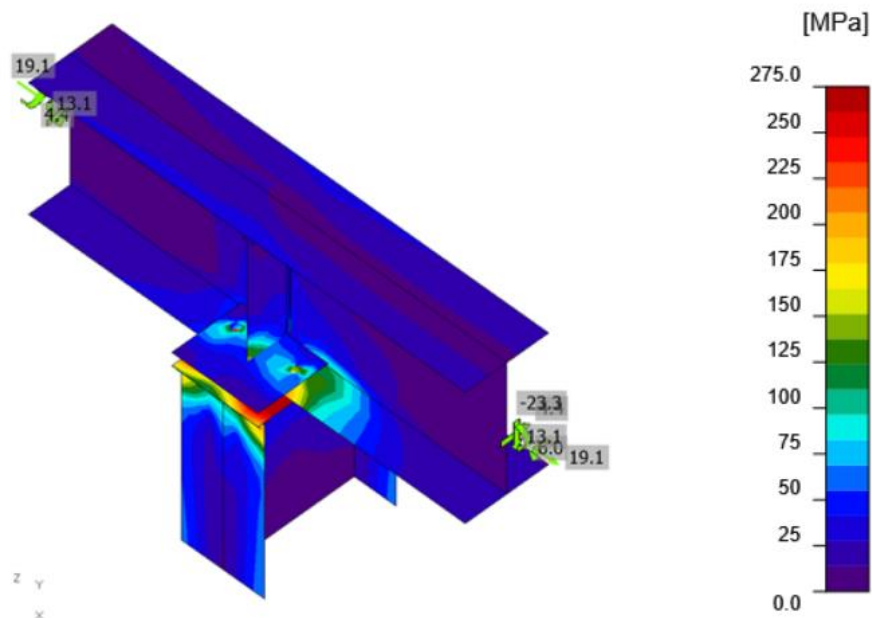
	Member	N [kN]	Vy [kN]	Vz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
>	C / Begin	19.1	4.4	-23.3	6.0	13.1	0.0
	C / End	19.1	4.4	-23.3	6.0	13.1	0.0

Gambar 4. Nilai gaya dalam yang di dapatkan dari hasil analisa frame pada inventor

3.2 Hasil Analisis Sambungan Balok-Kolom dengan Baut Grade 8.8

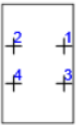
Sambungan balok-kolom menggunakan 4 baut M30 grade 8.8 $f_u = 800$ MPa dengan pelat ujung, *stiffener*, dan *widening plate*. Hasil analisis menunjukkan status keseluruhan aman dengan utilisasi pelat maksimum 0,2% (terhadap batas regangan plastis 5,0%), utilisasi tegangan baut (tarik dan geser gabungan) maksimum 27,2%, dan utilisasi las maksimum 99,0%. Gaya tarik maksimum pada baut sebesar 87,8 kN dari kapasitas $F_t, R_d = 323,1$ kN, dengan kapasitas tegangan kontak (*bearing stress*) pada pelat $F_b, R_d = 144,0$ – $523,4$ kN dan utilisasi *bearing* maksimum 9,8%. Deformasi pelat dievaluasi melalui regangan plastis (ϵ_{Pl}) sebagai indikator ductility pada IDEA StatiCa. Tegangan ekuivalen tertinggi pada pelat sebesar 275,4 MPa pada elemen EP1a, disertai regangan plastis ($\epsilon_{Pl} = 0,2\%$ (masih jauh di bawah batas 5,0%)), yang menandakan deformasi pelat masih bersifat elastis. Seluruh parameter menghasilkan faktor keamanan (SF) di atas 1, meskipun pada elemen las nilai SF mendekati batas ($\approx 1,01$), sehingga las menjadi parameter paling kritis pada sambungan ini

Strain check, LE1



Gambar 5. Simulasi Sambungan Balok-Kolom pada IDEA StatiCa

Bolts

	Name	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	V [kN]	U_{t_t} [%]	$F_{b,Rd}$ [kN]	U_{t_s} [%]	$U_{t_{ts}}$ [%]	Status
	B1	LE1	24.0	14.0	7.4	144.0	9.7	11.8	OK
	B2	LE1	65.7	18.3	20.3	510.8	8.5	23.0	OK
	B3	LE1	20.8	15.7	6.4	159.8	9.8	11.9	OK
	B4	LE1	87.8	15.2	27.2	523.4	7.1	26.5	OK

Gambar 6. Hasil Pemeriksaan Sambungan Balok-Kolom (Baut M30 Grade 8.8)

Selain Tabel 5, hasil analisis IDEA StatiCa juga menampilkan data pemeriksaan tambahan yang mendukung parameter tegangan *von Mises*, *bearing stress*, dan deformasi sesuai tujuan penelitian, sebagaimana disajikan pada Tabel 6, Tabel 7, dan Tabel 8.

Tabel 5. Ringkasan Status Pemeriksaan Sambungan

Pemeriksaan	Nilai	Status
Analysis	100,0%	OK
Plates	$0,2 < 5,0\%$	OK
Bolts	$27,2 < 100\%$	OK
Welds	$99,0 < 100\%$	OK
Buckling	Not calculated	—

Tabel 5. menunjukkan bahwa keempat pemeriksaan utama (Analysis, Plates, Bolts, Welds) berstatus OK, dengan utilisasi las (99,0%) sebagai nilai tertinggi, konsisten dengan hasil bahwa elemen las merupakan parameter paling kritis pada sambungan ini.

Tabel 6. Hasil Tegangan dan Regangan pada Elemen Pelat Sambungan

Nama	Tebal [mm]	σ_{Ed} [MPa]	ε_{Pl} [%]	σ_{cEd} [MPa]	Status
C-bfl 1	28,0	226,4	0,0	57,3	OK
C-tfl 1	28,0	37,7	0,0	0,0	OK
C-w 1	14,5	57,1	0,0	0,0	OK
B-bfl 1	28,0	201,8	0,0	0,0	OK
B-tfl 1	28,0	200,0	0,0	0,0	OK
B-w 1	14,5	259,9	0,0	0,0	OK
EP1a	20,0	275,4	0,2	50,4	OK
EP1b	20,0	114,9	0,0	20,9	OK
EP1c	20,0	127,4	0,0	16,6	OK
STIFF1a	25,0	89,2	0,0	0,0	OK
STIFF1b	25,0	137,1	0,0	0,0	OK

Keterangan: σ_{Ed} = tegangan ekuivalen (*von Mises*); ε_{Pl} = regangan plastis; σ_{cEd} = tegangan kontak (*bearing/contact stress*). Material seluruh pelat S275 dengan $f_y = 275,0$ MPa dan batas regangan plastis $\varepsilon_{lim} = 5,0\%$.

Tabel 6 menunjukkan bahwa tegangan ekuivalen tertinggi terjadi pada elemen EP1a sebesar 275,4 MPa, mendekati tegangan leleh material (275,0 MPa), disertai regangan plastis 0,2% dan tegangan kontak 50,4 MPa. Seluruh elemen pelat lain memiliki tegangan ekuivalen di bawah tegangan leleh dengan regangan plastis 0,0%, menunjukkan bahwa deformasi pada elemen-elemen tersebut masih sepenuhnya elastis.

Tabel 7. Kapasitas Tahanan Baut M30 Grade 8.8

Nama	$F_{t,Rd}$ [kN]	$B_{p,Rd}$ [kN]	$F_{v,Rd}$ [kN]
M30 8.8 - 1	323,1	628,0	215,4

Keterangan: F_t, R_d = kapasitas tarik baut; B_p, R_d = kapasitas tusukan (*punching shear*); F_v, R_d = kapasitas geser baut, seluruhnya berdasarkan EN 1993-1-8.

Sebagai kelengkapan parameter faktor keamanan (SF) sesuai tujuan penelitian, Tabel 8 merangkum nilai SF pada elemen baut, pelat, dan las yang paling kritis, dihitung menggunakan persamaan 1.

Tabel 8. Ringkasan Faktor Keamanan (SF) pada Elemen Kritis

Elemen	Jenis Pemeriksaan	R_d	E_d	SF	Status
Baut B4	Tarik	323,1 kN	87,8 kN	3,68	Aman
Baut B4	Geser/Bearing	215,4 kN	15,2 kN	14,17	Aman
Baut B4	Interaksi Tarik-Geser	–	Utts=26,5%	3,77	Aman
Pelat EP1a	Regangan Plastis	5,0%	0,2%	25,00	Aman, margin besar
Las EP1a–B-tfl 1	Tegangan Ekuivalen	404,7 MPa	400,6 MPa	1,01	Kritis, margin tipis

Tabel 8. menegaskan bahwa seluruh elemen memenuhi syarat $SF \geq 1$ sesuai persamaan (1). Baut dan pelat memiliki margin keamanan yang besar (SF 3,68–25,00), sedangkan las pada sambungan EP1a–B-tfl 1 memiliki margin paling tipis ($SF = 1,01$), sehingga menjadi elemen yang paling menentukan kapasitas keseluruhan sambungan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa sambungan balok-kolom dengan baut M30 grade 8.8 memiliki margin keamanan yang besar pada elemen baut dan pelat, namun margin yang tipis pada elemen las. Utilisasi tegangan baut yang hanya 27,2% dan utilisasi pelat sebesar 0,2% menunjukkan bahwa kapasitas tahanan kedua komponen tersebut jauh melampaui gaya yang bekerja, sehingga beban dapat terdistribusi melalui pelat ujung, pelat pengaku, dan pelat tambahan tanpa membebani satu elemen secara berlebihan. Namun, utilisasi las pada sambungan flens balok ke pelat ujung (EP1a–B-tfl 1) mencapai 99,0%, hampir mendekati kapasitas maksimumnya, sehingga las menjadi elemen paling kritis yang menentukan kapasitas keseluruhan sambungan. Deformasi pelat yang masih bersifat elastis (ϵ_{Pl} maksimum = 0,2%, jauh di bawah batas 5,0%) turut menegaskan bahwa pelat belum mendekati kondisi leleh pada beban kerja yang ditinjau. Hal ini sejalan dengan hasil simulasi pada kondisi *Load Effect 1* (LE1) yang menunjukkan tegangan *ekuivalen* maksimum sebesar 275,4 MPa pada pelat EP1a dengan regangan plastis 0,2%, masih jauh di bawah batas izin 5,0% sehingga sambungan tetap bekerja pada kondisi elastis.

Merujuk pada persamaan (1), nilai SF pada elemen baut dan pelat jauh di atas 1, menunjukkan bahwa kapasitas tahanan komponen (R_d) jauh melampaui gaya yang bekerja (E_d). Kondisi margin besar ini terutama berlaku pada baut dan pelat; sebaliknya, pada elemen las nilai SF mendekati batas minimum ($\approx 1,01$), sehingga perlu menjadi perhatian utama pada tahap perancangan lanjutan. Margin besar pada baut dan pelat terjadi karena keberadaannya bersama pelat ujung dan pelat pengaku menciptakan beberapa jalur transfer gaya sekaligus (*redundant load path*), sehingga kegagalan pada satu elemen tidak serta-merta menyebabkan kegagalan sambungan secara keseluruhan. Pemilihan sambungan baut pada posisi ini juga memberi keuntungan praktis berupa kemudahan pemasangan, pembongkaran, dan inspeksi berkala, sehingga sesuai dengan kebutuhan perawatan struktur *gantry crane* yang beroperasi secara berulang. Margin keamanan yang besar

pada elemen baut dan pelat membuka peluang optimasi pada kedua komponen tersebut, misalnya dengan mengevaluasi kemungkinan pengurangan jumlah baut atau ketebalan pelat pada penelitian atau perancangan selanjutnya. Sebaliknya, margin yang tipis pada elemen las menunjukkan perlunya evaluasi lanjutan, misalnya dengan menambah tebal las (*throat thickness*) pada sambungan *flens* balok ke pelat ujung, agar diperoleh margin keamanan yang lebih memadai, selama tetap memenuhi syarat $SF \geq 1$ sesuai standar AISC 360 dan EN 1993. Perlu dicatat pula bahwa analisis pada penelitian ini masih terbatas pada kondisi pembebanan statis, sehingga pengaruh beban dinamis maupun siklik akibat operasional crane secara berulang (*kelelahan/fatigue*) belum tercakup dan dapat menjadi arah pengembangan penelitian selanjutnya.

4. Kesimpulan

Hasil analisis kekuatan sambungan baut pada struktur baja gantry crane kapasitas 5 ton menggunakan IDEA StatiCa menjawab kelima parameter yang menjadi tujuan penelitian dengan nilai sebagai berikut. Pertama, tegangan *von Mises* tertinggi terjadi pada elemen pelat ujung EP1a sebesar 275,4 MPa, mendekati namun masih di bawah tegangan leleh material S275 (275,0 MPa). Kedua, tegangan baut tertinggi terjadi pada baut B4 dengan gaya tarik $F_{t,Ed} = 87,8$ kN (utilisasi 27,2%) dari kapasitas $F_{t,Rd} = 323,1$ kN, serta gaya geser $V = 15,2$ kN dari kapasitas $F_{v,Rd} = 215,4$ kN. Ketiga, *bearing stress* menghasilkan kapasitas $F_{b,Rd}$ antara 144,0–523,4 kN dengan utilisasi maksimum 9,8% dan tegangan kontak (σ_{cEd}) tertinggi 50,4 MPa. Keempat, deformasi pelat berupa regangan plastis (ϵ_{Pl}) maksimum sebesar 0,2%, jauh di bawah batas 5,0%, menunjukkan seluruh elemen pelat masih berada pada kondisi elastis. Kelima, faktor keamanan (SF) minimum terjadi pada elemen las sambungan *flens* balok–pelat ujung (EP1a–B-tfl 1) sebesar 1,01, sedangkan elemen baut dan pelat memiliki SF jauh lebih besar (3,68–25,00), sehingga elemen las menjadi parameter paling kritis dalam desain sambungan ini. Secara keseluruhan, sambungan balok-kolom dengan baut M30 grade 8.8 memenuhi kriteria keamanan $SF \geq 1$ berdasarkan standar AISC 360 dan EN 1993 sehingga aman digunakan pada kondisi operasional.

5. Daftar Pustaka

- [1] L. Solazzi and I. Tomasi, "Design of an Overhead Crane in Steel, Aluminium and Composite Material Using the Prestress Method," *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.3390/jcs8090380.
- [2] S. Arif, "Strength analysis of girder structure on a 6 Ton capacity overhead crane using statics method," *JTTM : Jurnal Terapan Teknik Mesin*, vol. 6, no. 2, pp. 312–323, Oct. 2025, doi: 10.37373/jttm.v6i2.1855.
- [3] Z. Jinhai, S. Huanhuan, and E. Noroozinejad Farsangi, "Fracture mechanics analysis of steel bolted joints using a 3D global model based on peridynamics theory," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 47, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.1007/s40430-025-05436-w.
- [4] H. K. Du, F. X. Yang, Y. D. Wang, P. F. Zhao, and J. Y. Wang, "Retrofit Effect And Flexural Capacity Of H-Section Beam-Through Beam-Column Connections For Steel Modular Frames," *Advanced Steel Construction*, vol. 21, no. 2, pp. 125–135, Apr. 2025, doi: 10.18057/IJASC.2025.21.2.4.
- [5] S. Dönerkaya, K. Kök, and M. E. Tamer, "Structural Behavior Analysis of Rail-Mounted Portal Cranes Equipped with a 360° Rotatable Spreader Mechanism Using the Finite Element Method," *The European Journal of Research and Development*, vol. 5, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.56038/ejrnd.v5i1.716.
- [6] A. Handoko, Y. R. Aldori, M. Mislani, F. Farsa, N. A. Setyanto, and M. Masrajuddin, "Structural Performance Analysis of an 8-Ton Monorail Crane Using Frame Analysis and Bolt Connection Evaluation," *IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, vol. 4, no. 3, pp. 254–263, Dec. 2025, doi: 10.56862/irajtm.v4i3.359.
- [7] B. Guan, K. Cheng, and E. Zhao, "Experimental and Numerical Study of the Jib Connection Frame of a Wheeled Crane," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 9, May 2025, doi: 10.3390/app15094872.
- [8] European Commission, "Eurocode 3: Design of steel structures," Eurocodes: Building the Future. Accessed: Apr. 18, 2026. [Online]. Available: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-3-design-steel-structures>
- [9] B. C. Zega, P. N. Prasetyono, F. Nadiar, and A. Triarso, "Desain Struktur Bangunan Baja Tahan Gempa Menggunakan SNI 1729:2020," *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, vol. 4, no. 2, pp. 108–113, Dec. 2022, doi: 10.26740/proteksi.v4n2.p108-113.
- [10] S. Desain Elemen Struktur Baja Berdasarkan *et al.*, "Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology," vol. 6, no. 2, pp. 6–13, 2022.