

Analisis Penerapan *Bracket System* Sebagai Inovasi Pengendali Vertikalitas *Girder* dan Peningkat Keselamatan Kerja dalam Proses *Erection* di Proyek Tol Manado Bitung

Tri Cipto Tunggul Wardoyo^{1*}, Yulita Arni Priastiwi^{1,2}, Sumardi^{1,3}

¹Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro,

²Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,

³Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*}Corresponding author: triciptotunggul@students.undip.ac.id

(Received: January 17, 2026; Accepted: February 25, 2026)

Abstract

Analysis of the Implementation of a Bracket System as an Innovation for Controlling Girder Verticality and Enhancing Workplace Safety During the Erection Process at the Manado-Bitung Toll Road Project. The erection process for precast prestressed concrete I (PCI) girders on the Manado-Bitung Toll Road Project requires a lifting method capable of maintaining girder stability and verticality. Site constraints and the variety of available erection methods highlight the need for technical innovation to enhance installation precision while providing an increased occupational safety margin. This study aims to analyze the effectiveness of implementing a bracket system—an innovation expected to improve safety margins and verticality control during erection. The research methodology encompasses field observations, a review of technical standards, structural analysis, Finite Element Method (FEM) simulations, and a performance comparison of three methods: crawler crane with slings, the bracket system, and the launching gantry. Analysis results indicate that the bracket system addresses three of the six primary erection challenges. The maximum von Mises stress of 179.12 MPa and maximum deflection of 1.725 mm fall within safe limits, yielding a structural safety factor of 3.22. In the optimization phase, the bracket system v2 achieved a safety margin of 208%, an erection duration of 7 days, and a cost of IDR 1.437 billion. The study demonstrates that the bracket system is a viable alternative for PCI girder erection, as it offers a balanced improvement in time efficiency, cost-effectiveness, and safety.

Keywords: erection girder, safety factor, system bracket

Abstrak

Proses *erection precast prestressed concrete I (PCI) girder* pada Proyek Tol Manado Bitung membutuhkan metode pengangkatan yang mampu menjaga stabilitas dan vertikalitas *girder*. Kondisi lapangan yang terbatas serta variasi metode *erection* yang tersedia menunjukkan perlunya inovasi teknis yang meningkatkan ketelitian pemasangan sekaligus memberikan tambahan margin keselamatan kerja. Penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas penerapan *bracket system* sebagai inovasi yang diharapkan mampu meningkatkan margin keselamatan dan kendali vertikalitas selama proses *erection*. Metode penelitian meliputi observasi lapangan, pemeriksaan standar teknis, analisis struktural, simulasi *Finite Element Method* (FEM), serta perbandingan kinerja metode *crawler crane* menggunakan *sling*, *bracket system* dan *launcher gantry*. Hasil analisis menunjukkan bahwa *bracket system* mampu mengatasi tiga dari enam faktor utama permasalahan *erection*. Tegangan von Mises maksimum 179,12 MPa dan defleksi maksimum 1,725 mm berada dalam batas aman dengan *safety factor* struktural 3,22. Pada tahap optimasi, *bracket system v2* memberikan margin keselamatan 208% dengan durasi *erection* 7 hari dan biaya Rp1,437

miliar. Penelitian ini menunjukkan bahwa *bracket system* dapat dipertimbangkan sebagai alternatif metode *erection* PCI girder karena meningkatkan efisiensi waktu, biaya dan keselamatan secara seimbang.

Kata kunci: *erection girder, safety factor, system bracket*

How to Cite This Article: Wardoyo, T. C. T., Priastiwi, Y. A., & Sumardi, S. (2026). Analisis Penerapan Bracket System Sebagai Inovasi Pengendali Vertikalitas Girder dan Peningkat Keselamatan Kerja dalam Proses *Erection* di Proyek Tol Manado Bitung. *JPII*, 4(1), 39-44. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2026.32295>

PENDAHULUAN

Dalam rentang waktu 2017 hingga Maret 2018, terjadi 13 insiden kecelakaan konstruksi dan 2 insiden kegagalan konstruksi. Kementerian PUPR menghentikan sementara 36 proyek konstruksi layang untuk dievaluasi. Salah satu yang terdampak adalah Proyek Tol Manado Bitung. Audit yang dilakukan mengidentifikasi beberapa faktor penyebab kecelakaan, seperti ketidakstabilan pemasangan *girder* dan kesulitan dalam mengontrol vertikalitas *girder* (Parampara, 2018).

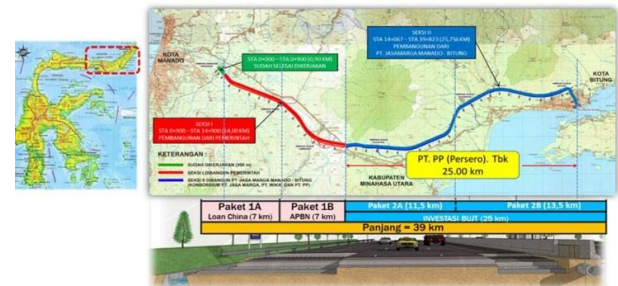
Penelitian yang dilakukan oleh Dewobroto (2024) mengungkapkan bahwa meskipun pedoman standar *erection girder* telah disusun, masih terdapat kelemahan yang memungkinkan kegagalan *girder* terjadi. Pentingnya penyesuaian dan revisi standar, terutama dalam hal penggunaan penyangga standar pada tumpuan *girder* dengan pengembangan inovasi dalam metode *erection* untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi konstruksi.

Upaya meningkatkan efisiensi konstruksi jembatan terus dikembangkan melalui optimalisasi desain struktur dan pemilihan metode *erection* serta inovasi yang tepat. Penelitian oleh Pandji (2021) pada Jembatan Teluk Kendari menunjukkan bahwa metode *crawler crane* menyelesaikan *erection* dalam 62 hari, lebih cepat dibanding *launcher gantry* 72 hari dengan efisiensi waktu 86,1% dan efisiensi biaya 101,33%. Selanjutnya, penelitian oleh Sriyadi (2022) pada Jembatan Ngaglik menemukan bahwa metode *crawler crane* menyelesaikan pekerjaan dalam 3 hari, jauh lebih cepat dari *launcher gantry* 10 hari dengan efisiensi biaya 107,46%. Penelitian oleh Dewantari (2023) pada Jembatan Jebol juga memperlihatkan keunggulan *crawler crane* yang menyelesaikan *erection* dalam 6 hari dibandingkan *launcher* 12 hari dengan efisiensi biaya 47,57%. Kemudian, penelitian oleh Suci (2024) pada Jembatan Soran Jalan Tol Solo Yogyakarta menunjukkan bahwa metode *crawler crane* dapat menyelesaikan pekerjaan hanya 9 hari dibandingkan *launcher gantry* 20 hari dengan efisiensi waktu 45% dan efisiensi biaya 92,50%. Lebih lanjut, penelitian oleh Rizkianto (2025) menunjukkan perbedaan biaya signifikan antara penggunaan *crawler crane* (Rp24,679 miliar) dan *launcher* (Rp30,838 miliar) dengan efisiensi biaya 80,03%. Meski berbagai penelitian tersebut telah membahas efisiensi waktu dan biaya secara

komprehensif, namun belum terdapat kajian yang secara khusus memasukkan parameter keselamatan sebagai dasar evaluasi pemilihan metode *erection* PCI girder. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi penerapan *bracket system* sebagai inovasi metode *erection prestressed concrete I* (PCI) girder pada penggunaan *crawler crane* dengan menambahkan parameter keselamatan sebagai aspek tambahan dalam alternatif pengambilan keputusan teknis.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada proyek Jalan Tol Manado Bitung seksi 2 STA 14+900 sampai dengan STA 39+900 yang dibangun PT PP (Persero) Tbk. oleh owner BUJT PT Jasamarga Manado Bitung (JMB) dilaksanakan pada tahun 2016 hingga 2021 dengan peta *layout* seperti pada Gambar 1



Gambar 1. Peta *layout* proyek Jalan Tol Manado Bitung

Metode empiris digunakan untuk menggambarkan kondisi nyata di lapangan berdasarkan hasil observasi dan dokumentasi proses *erection girder*. Langkah-langkah yang dilakukan meliputi:

1. Pengamatan terhadap tahapan pekerjaan *erection* mulai dari perencanaan, persiapan alat, pengangkatan, hingga pemasangan *girder*.
2. Pencatatan spesifikasi teknis, SOP dan persyaratan keselamatan kerja (K3L) yang diterapkan di lapangan.
3. Identifikasi permasalahan umum dan risiko yang muncul selama pelaksanaan *erection girder*.
4. Evaluasi kesesuaian pelaksanaan lapangan terhadap standar dan pedoman teknis yang berlaku.

Metode analitik digunakan untuk melakukan perhitungan teoritis dan simulasi teknis terhadap kestabilan *system* pengangkatan *girder* dengan pendekatan mekanika teknik dan teori struktur. Langkah-langkah yang dilakukan meliputi:

1. Menentukan parameter analisis seperti berat *girder*, konfigurasi titik angkat, bentang, alat bantu (*sling* atau *bracket*) dan kondisi batas tumpuan.
2. Melakukan perhitungan gaya dalam, momen lentur, serta momen puntir (torsi) yang terjadi selama proses pengangkatan dengan menggunakan rumus analisis struktur yang sesuai standar (SNI 2847:2019, SNI 1729:2020).
3. Menganalisis kestabilan dan keamanan struktur sementara terhadap potensi kegagalan seperti guling (*overturning*), defleksi berlebih dan tegangan maksimum.
4. Melakukan simulasi *Finite Element Method* (FEM) untuk memverifikasi hasil perhitungan serta memvisualisasikan distribusi tegangan dan deformasi.
5. Membandingkan hasil perhitungan analitik dengan data empiris untuk memperoleh tingkat akurasi, efisiensi dan faktor keselamatan yang realistis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari beberapa laporan kecelakaan *erection girder* di Indonesia dan hasil investigasi Kementerian PUPR seperti pada Tabel 1 hasil analisis menunjukkan bahwa tanpa *system bracket*, *girder* cenderung mengalami rotasi bebas yang signifikan terutama pada saat pengangkatan dan pemindahan. Hal ini menyebabkan deformasi vertikal dan lateral yang berpotensi membahayakan keselamatan kerja.

Tabel 1. Hasil audit Kementerian PUPR terhadap kecelakaan konstruksi

No.	Faktor Penyebab Utama	Penjelasan
1	Kondisi pemasangan <i>girder</i> yang tidak stabil.	Posisi <i>girder</i> tidak memiliki penopang sementara yang memadai.
2	Gantungan derek mengalami <i>slack</i> gelagar berotasi.	Pelonggaran pada <i>sling/shackle</i> sehingga <i>girder</i> berputar saat diangkat.
3	Vertikalitas gantungan yang sulit dikontrol.	Ketidaktepatan sudut tali gantung sehingga beban tidak merata.
4	<i>Bracing</i> baja tidak mampu menahan gaya guling.	Perkuatan (<i>temporary bracing</i>) tidak cukup menahan gaya lateral.
5	<i>Jack hydraulic</i> tidak	Gangguan atau

	bekerja dengan baik hingga proses <i>stressing</i> .	ketidaktepatan tekanan hidrolik saat penegangan tidak seimbang
6	Sambungan beton basah (<i>wet joint</i>).	Kualitas atau waktu pengerasan beton sambungan tidak memenuhi syarat teknis

Perbandingan Biaya dan Waktu Pemilihan Metode *Erection Girder* dengan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan komparasi perbandingan dengan 5 penelitian terdahulu terkait metode *erection* PCI *girder* menunjukkan rata-rata metode *crawler crane* lebih efisien dibandingkan metode *launcher gantry* dengan efisiensi waktu 53,33% dan efisiensi biaya 83,34% seperti pada Tabel 3.

Perhitungan Analisis *Bracket System*

Perhitungan kekuatan *bracket system* dengan mempertimbangkan beban desain, reaksi terhadap *sling*, tegangan lokal (*double plate*), *tension and shear capacity lug*, gaya aksial dan geser *spreader beam*, serta penambahan untuk perkuatan *bracket system* sehingga didapat dimensi penampang *bracket system* disajikan seperti pada Gambar 2. Berdasarkan hasil perhitungan analitik didapatkan *safety factor* SF untuk menahan geser yang akan mengakibatkan momen puntir sebesar $1.154.000 \text{ N} > 323.730 \text{ N}$ atau setara dengan $117,7 \text{ kg} > 33 \text{ kg}$ terhadap beban yang ditopang *spreader beam* sehingga nilai *safety factor* geser didapat 3,57 mengenai hasil pada item lain dapat dilihat pada Tabel 2.

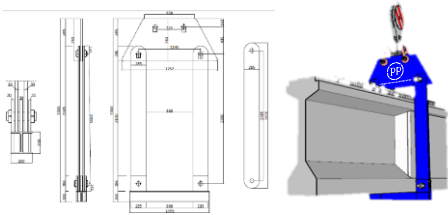
Tabel 2. Perhitungan analitik *bracket system*

Item	Nilai/Beban	Nilai Izin	SF/Keterangan
Beban desain	66,00 ton	SF 1,2	Total beban
Tegangan lokal (<i>double-plate</i> efektif)	143,75 MPa	240 MPa	SF 1,67
<i>Tension capacity Lug</i>	388.800 N	373.813 N	SF 1,04
<i>Shear capacity Lug</i>	388.800 N	373.813 N	SF 1,04
<i>Spreader Beam</i> aksial	373.813 N	1.528.130 N	SF 8,16
<i>Spreader Beam</i> geser	—	N	—
<i>Spreader Beam</i> geser	324.000 N	323.730 N	SF 1,001
<i>Spreader Beam</i> geser	—	N	—
<i>Spreader Beam</i> geser	1.154.000 N	323.730 N	SF 3,57
<i>additional plate 2 sisi</i>	—	N	—

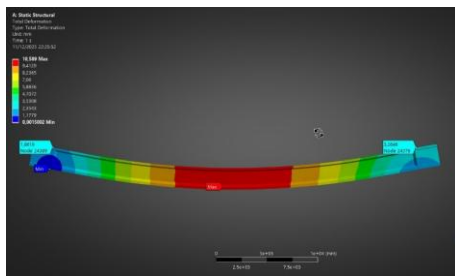
Analisis *Finite Element Method* (FEM)

Analisis ini mencakup pemodelan geometri PCI *girder* sepanjang 40,8 meter, penentuan properti material

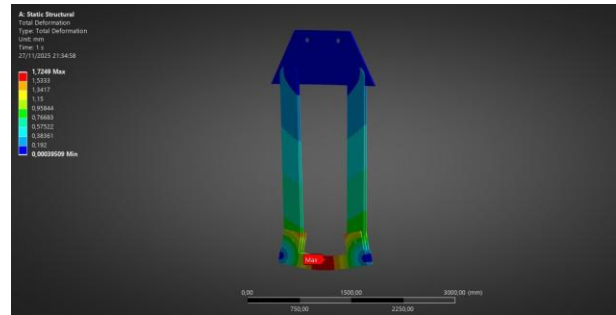
beton prategang dan tendon, kekuatan *bracket system* serta penerapan kondisi batas dan pembebanan sesuai kondisi aktual pada tahap *prestressed* dan saat *lifting* disajikan seperti pada Gambar 3 hingga 5.



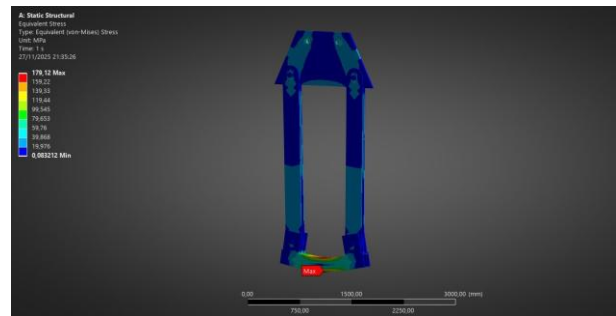
Gambar 2. Hasil desain perhitungan *bracket system*



Gambar 3. Defleksi maksimal saat pengangkatan



Gambar 4. Defleksi maksimal *bracket system*



Gambar 5. Tegangan maksimum *bracket system*

Tabel 3. Data hasil komparasi biaya & waktu *erection girder* dengan penelitian terdahulu

No	Judul Penelitian	Sumber Penelitian	Waktu Pelaksanaan (Hari)		Efisiensi Waktu (%)	Biaya Pelaksanaan (Miliar)		Efisiensi Biaya (%)
			<i>Crawler crane</i>	<i>Launcher Gantry</i>		<i>Crawler crane</i>	<i>Launcher Gantry</i>	
1	Perbandingan <i>Erection PCI Girder</i> Proyek Jembatan Teluk Kendari	Pandji et al. (2021)	62	72	86,1%	7,565	7,466	101,33%
2	Perbandingan Metode <i>Erection</i> Pada Jembatan Ngaglik	Sriyadi et al. (2022)	3	10	30%	0,138	0,128	107,46%
3	Perbandingan Metode <i>Erection PCI Girder</i> Jembatan Jebol 2 Proyek Tol Solo Yogyakarta	Dewantari et al. (2023)	6	12	50%	0,536	1,127	47,57%
4	Perbandingan Biaya dan Waktu <i>Erection PCI Girder</i> Jembatan Soran Proyek Tol Solo Yogyakarta	Suci et al. (2024)	9	20	45%	9,220	9,967	92,50%
5	Analisis Pemilihan Metode <i>Erection Girder</i> Berdasarkan Waktu dan Biaya	Rizkianto et al. (2025)	-	-	-	24,679	30,838	80,03%
6	Analisis Penerapan <i>Bracket System</i>		5	9	55,56%	1,164	1,636	71,15%

Proyek Tol Manado Bitung		
Rata-rata efisiensi waktu & biaya (%)	53,33%	83,34%

Tabel 4. Hasil simulasi FEA/FEM *bracket system*

Item	Nilai/Beban	
	FEM	Hitungan
Tegangan <i>von-Mises</i> maksimum (FEA)	179,12MPa	143,75 MPa
Defleksi maksimum beban aman (FEA)	1,7249 mm	-
	55,1 ton	66 ton

Hasil komparasi perhitungan dan simulasi *Finite Element Method* (FEM) *Bracket System* seperti Gambar 3 hingga 5 dan pada Tabel 4 menunjukkan nilai tegangan *von-Mises* maksimum pada perhitungan sebesar 143,75 MPa (SF 1,67) sedangkan pada simulasi FEM sebesar 179,12 MPa (SF 1,34) lebih kecil dari tegangan leleh baja 240 MPa.

Tabel 5. Hasil komparasi defleksi maksimum perhitungan dan simulasi

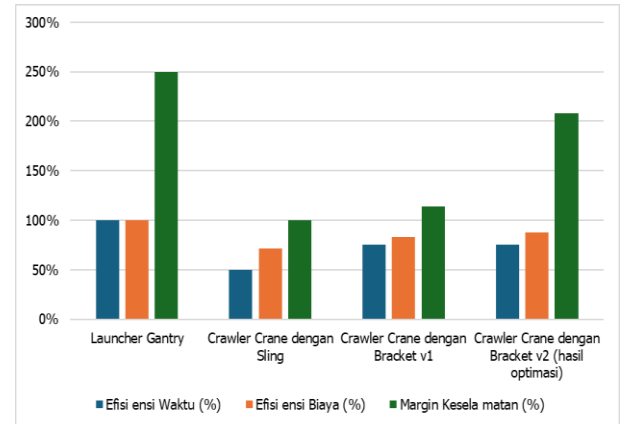
Lokasi	Defleksi Beban Sendiri (mm)		Defleksi Prategang (mm)		Defleksi Total (mm)	
	Hitungan	FEM	Hitungan	FEM	Hitungan	FEM
<i>Lifting</i> (2m)	11,8	3,7	-6,7	-6,9	5,05	-3,4
Tengah	75,9	19,1	-36,2	-41,2	39,70	-23,8

Hasil analisis komparasi defleksi maksimal perhitungan dan simulasi FEM seperti pada Tabel 5 menunjukkan defleksi total di titik *lifting* pada perhitungan sebesar 5,05 mm (SF 8,08) dan pada simulasi FEM 3,26 mm (SF 12,50), sedangkan defleksi total di tengah pada perhitungan sebesar 39,70 mm (SF 1,03) dan pada simulasi FEM 10,59 mm (SF 3,85).

Tabel 6. Hasil komparasi tegangan serat perhitungan dan simulasi pada *lifting point* 2m

Lokasi Tegangan	Tegangan Serat Atas (MPa)			
	Hitungan	SF	FEM	SF
Serat atas	-0,41	-	0,73	2,16
Serat bawah	-11,14	1,62	-16,01	1,12

Hasil analisis komparasi tegangan serat seperti Tabel 6 menunjukkan nilai tegangan serat atas pada perhitungan -0,41 MPa (tekan) dan simulasi FEM 0,73 MPa (tarik) lebih kecil dari tegangan izin tarik 1,58 MPa SF = 2,16 sedangkan nilai tegangan serat bawah pada perhitungan -11,14 MPa (tekan) SF 1,62 dan simulasi FEM -16,01 MPa (tekan) lebih kecil dari tegangan izin tekan -18 MPa SF = 1,12.



Gambar 6. Perbandingan efisiensi waktu, biaya dan persentase margin keselamatan

Bracket system v1 membutuhkan waktu (7 hari) dan biaya yang moderat (1,358 M) dengan margin keselamatannya 114% sedikit penambahan dari batas kelayakan teknis. Pada optimasi *bracket system* v2 menunjukkan peningkatan pada faktor keselamatan (SF 2,5) dan menghasilkan margin keselamatan 208% dengan durasi yang tetap (7 hari) menegaskan potensi metode ini sebagai alternatif pilihan dalam konteks keselamatan, efisiensi dan kesesuaian terhadap kondisi lapangan seperti pada Gambar 6.

Hasil komparasi biaya, waktu dan *safety factor* seperti pada Tabel 7 menunjukkan *launcher gantry* menampilkan performa margin keselamatan paling tinggi yaitu 250% namun memerlukan biaya paling besar (1,636 M) dan waktu pengerjaan paling panjang (9 hari), sehingga lebih sesuai untuk proyek dengan prioritas keselamatan maksimal.

Tabel 7. Hasil komparasi biaya, waktu dan *safety* faktor keselamatan

Metode	Biaya (Miliar)	Waktu (Hari)	Safety Factor (SF) Torsi Efek	Safety Factor SOP 2024
<i>Launcher gantry</i>	1,636	9	5	2
<i>Crawler crane dengan sling</i>	1,164	5	5	5
<i>Crawler crane dengan Bracket v1</i>	1,358	7	1,24	1,2

<i>Crawler crane</i> dengan <i>bracket v2</i> (optimasi)	1,437	7	2,5	1,2
--	-------	---	-----	-----

Metode *sling* menunjukkan durasi tercepat (5 hari) dan biaya paling rendah (1,164 M), namun margin keselamatan minimal pada ambang batas kelayakan teknis 100% sehingga perlu ketergantungan tinggi pada kontrol lapangan yang ketat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis metode pekerjaan *erection girder* pada Proyek Tol Manado-Bitung, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *bracket system* mampu mengatasi tiga dari enam faktor utama penyebab permasalahan pada proses *erection* PCI *girder* yang menjadi fokus studi. Hasil analisis dan simulasi *Finite Element Method* (FEM) menunjukkan bahwa tegangan *von-Mises* maksimum sebesar 179,12 MPa masih berada di bawah tegangan leleh material sebesar 240 MPa, dengan *safety factor* sebesar 1,67 berdasarkan perhitungan analitis dan 1,34 berdasarkan simulasi FEM. Selain itu, deformasi maksimum yang terjadi pada bagian tengah *spreader beam* sebesar 1,7249 mm juga masih berada di bawah batas defleksi yang diizinkan (5,56 mm), sehingga *bracket system* dinyatakan aman digunakan dengan *safety factor* sebesar 3,22. Dari aspek keselamatan kerja, metode ini mampu menurunkan potensi kecelakaan dengan *margin safety factor* masing-masing sebesar 100% untuk *crawler crane sling*, 104% untuk *crawler crane Bracket* versi 1, 208% untuk *crawler crane Bracket* versi 2 dan 250% untuk *launcher gantry*. Perbandingan waktu pelaksanaan menunjukkan bahwa metode *crawler crane sling* memerlukan waktu 5 hari, *crawler crane bracket* versi 1 dan versi 2 masing-masing 7 hari, sedangkan *launcher gantry* membutuhkan waktu 9 hari. Dari sisi biaya, metode *crawler crane sling* merupakan alternatif yang paling ekonomis dengan biaya sebesar Rp1.164.000.000,00, diikuti *crawler crane Bracket* versi 1 sebesar Rp1.358.128.000,00, *crawler crane Bracket* versi 2 sebesar Rp1.437.020.000,00, dan *launcher gantry* sebesar Rp1.636.000.000,00.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 363. (2010). *Report on High-Strength Concrete* (Issue 2). America Concrete Institute.
- American Association of State Highway Officials. (1968). *Guide specifications for highway construction*. American Association of State Highway Officials.
- Dewobroto, W., & Canny, K. A. (2024). Evaluation of the Indonesian Standard Guidelines for Long-Span PC Girder Erection. *Practice Periodical on*

Structural Design and Construction, 29(4). <https://doi.org/10.1061/ppscfx.sceng-1424>

- Komite Keselamatan Konstruksi. (2024). Standar Pelaksanaan Pemasangan Gelagar Jembatan Beton Pratekan Pracetak Tipe-I (PCI Girder) Komite Keselamatan Konstruksi. *Kementerian Pekerjaan Umum*, 1–22.
- Parampara, T. R. B. (2018). Media Komunikasi BPSDM Kementerian PUPR Edisi 08. *Safety Konstruktion: Komitmen dan Konsistensi Terapkan SMK3. Buletin Parampara, April*, 1–35.
- Prasetya, M. R. (2021). Perencanaan Ulang Struktur Jembatan Overpass Bandara Soekarno – Hatta Kota Tangerang. *Jurnal Polinema*, 2, 63–69.
- Rizkianto, H., & Nugraheni, F. (2025). Analisis Pemilihan Metode *Erection girder* Menggunakan *Crawler crane* dan Launcher Berdasarkan Waktu dan Biaya. *Jurnal Teslink UII*, 6141(Seksi 1).
- Suci, R. A., Wibawa, S. A., Firdausi, A. A., & Safarizki, H. A. (2025). Perbandingan Biaya dan Waktu Erection PCI Girder dengan *Crawler crane* dan Gantry Launcher Jembatan Soran Proyek Jalan Tol Solo Yogyakarta Seksi 1 Paket 1.2. *Rekonstruksi Tadulako: Civil Engineering Journal on Research and Development*, 1–12. <https://doi.org/10.22487/renstra.v6i1.698>