

Tantangan dan Peluang: Penggunaan Jembatan Abutment Integral pada Daerah Rawan Gempa

Altho Sagara^{a,1,*}, Try Kurniawan Akhbar^{b,2}, Sugilar Suryanugraha^{c,3}, Handrawan Anggara^{c,4}, Anna Dewi^{c,5}

^a Universitas Katolik Parahyangan, Jalan Ciumbuleuit No. 94, Bandung dan 40141

^b Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kabupaten Bandung Barat, Kota Bandung, 40599

^c PT Enjiniring Pilar Cakrawala/EPIC Studio, Jalan Setradago Utama no 47, Bandung dan 40281

¹ altho.sagara@unpar.ac.id*; ² try.kurniawan@polban.ac.id; ³ sugilar@epicstudio.co.id; ⁴ handrawana@gmail.com; ⁵ annadewi197@gmail.com.

* Corresponding Author

ABSTRACT

Jembatan dengan tipe abutment integral semakin populer karena kemampuannya untuk mengurangi biaya pemeliharaan dan meningkatkan daya tahan terhadap pergerakan tanah. Namun, penerapannya di daerah rawan gempa menghadirkan tantangan teknis yang signifikan, terutama terkait dengan desain pondasi dan respons struktur terhadap getaran seismik. Penelitian ini meninjau berbagai tantangan yang dihadapi dalam penerapan jembatan abutment integral di wilayah yang memiliki kerentanan tinggi terhadap, seperti pergerakan tanah yang tak terduga, deformasi akibat thermal yang terjadi, dan juga aspek pendetailan secara khusus yang perlu diperhatikan. Penelitian ini akan membandingkan efektivitas penggunaan jembatan dengan abutment integral dan jembatan dengan tumpuan sederhana, terutama dalam hal optimasi jumlah pondasi yang dapat dioptimalkan melalui sistem abutment integral. Pemodelan dan analisis struktur atas dan bawah jembatan dilakukan secara 3D dengan variasi bentang 20, 30, dan 40 meter serta variasi ketinggian 5 dan 10 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada bentang 30 meter dengan ketinggian 5 dan 10 meter, penerapan konsep abutment integral memberikan respon struktur terhadap gempa yang optimal, dengan kemampuan mereduksi struktur bawah dan jumlah pondasi sebesar 30-35%.

ABSTRACT

Integral abutment bridges are becoming increasingly popular due to their ability to reduce maintenance costs and improve resistance to ground movement. However, their application in earthquake-prone areas presents significant technical challenges, particularly related to foundation design and structural response to seismic activity. This study reviews various challenges faced in implementing integral abutment bridges in highly vulnerable areas, such as unexpected ground movements, thermal deformation, and specific detailing aspects that need attention. The study will compare the effectiveness of using integral abutment bridges and simply supported bridges, focusing on the optimization of the number of foundations that can be reduced through the integral abutment system. The modeling and analysis of the bridge's superstructure and substructure are performed in 3D with span variations of 20, 30, and 40 meters and height variations of 5 and 10 meters. The analysis results show that, for a span of 30 meters with heights of 5 and 10 meters, the application of the integral abutment concept provides optimal seismic response, with the ability to reduce the substructure and the number of foundations by 30-35%.



This is an open-access article under the CC-BY-SA license



KATA KUNCI

Jembatan abutment integral
Jembatan tumpuan sederhana
Daerah Rawan Gempa
Optimasi Struktur
Respon Struktur

KATA KUNCI

Integral abutment bridges
Simple supported bridge
Earthquake-prone areas
Structural optimization
Structural response

1. Pendahuluan

Jembatan abutment integral (IABs) adalah tipe jembatan tanpa sambungan (*joint-less*), di mana lantai jembatan menerus dan terhubung secara monolitik dengan dinding abutment [1]. Menurut

Setiati et al, IABs merupakan salah satu sistem struktur yang cocok digunakan pada jembatan bentang pendek, dengan panjang bentang yang direkomendasikan kurang dari 40 meter.

Keunggulan utama IABs adalah tidak digunakannya *expansion joint* dan *bearing pad*, meskipun faktor seperti *creep*, *shrinkage*, dan pengaruh temperatur menjadi parameter yang penting dan tidak boleh diabaikan dalam proses analisis struktur. Tanpa adanya penggunaan *expansion joint* memberikan banyak keuntungan seperti dalam segi ekonomi, konstruksi, dan juga pemeliharaan [2]. Penghematan yang diberikan oleh tipe struktur ini sangat mengurangi biaya untuk pemeliharaan karena *expansion joint* dapat mengkorosikan struktur atas jembatan [3]. Selain itu, penggunaan IABs mengubah sistem struktur abutment menjadi portal kaku, yang diharapkan dapat mengurangi kebutuhan pondasi. Penting untuk melakukan kajian dan penelitian yang cermat agar penggunaan IABs tidak mengabaikan parameter struktural dan kondisi lapangan yang ada. Dengan demikian, penerapan IABs dapat dilakukan secara optimal dan aman, terutama di daerah rawan gempa atau wilayah dengan kondisi geoteknik yang kompleks.

Analisis construction stage sangat penting dilakukan pada pemodelan jembatan dengan abutment integral karena jembatan ini memiliki balok yang sudah terhubung secara monolit dengan abutment sejak tahap awal konstruksi. Hal ini menyebabkan distribusi gaya dan deformasi yang berbeda dibandingkan dengan jembatan konvensional yang menggunakan *expansion joint* dan *bearing pad*. Karena balok dan abutment saling terikat secara kaku, beban yang diterima oleh struktur selama setiap tahap konstruksi harus dianalisis secara bertahap untuk memastikan bahwa gaya internal yang terjadi pada setiap elemen tidak melebihi kapasitasnya. Selain itu, pengaruh *creep*, *shrinkage*, dan deformasi termal juga perlu dipertimbangkan sejak awal karena faktor-faktor ini dapat berdampak pada respons jembatan selama dan setelah proses konstruksi. Dengan melakukan analisis construction stage, perilaku jembatan dapat dipantau secara lebih akurat, memastikan bahwa struktur tetap stabil dan aman sepanjang proses konstruksi hingga jembatan berfungsi penuh.

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran secara umum terkait efektivitas penggunaan jembatan *integral abutment* di area rawan gempa, dengan mempertimbangkan keunggulan dalam hal pengurangan kebutuhan pemeliharaan serta peningkatan ketahanan struktur. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan panduan teknis dan rekomendasi terkait desain optimal untuk bentang tertentu, sehingga konsep jembatan *integral abutment* dapat diterapkan secara lebih luas dan aman di wilayah dengan risiko seismik tinggi.

2. Metodologi Penelitian

Pemodelan struktur jembatan yang dilakukan pada penelitian ini meliputi pemodelan struktur pada jembatan abutment integral dan jembatan tumpuan sederhana dengan batasan penelitian sebagai berikut:

- Struktur atas jembatan menggunakan tipe balok gelagar pracetak pratekan berbentuk I dengan variasi pembentangan 20, 30, dan 40 meter
- Struktur bawah jembatan adalah abutment tipe dinding penuh dengan variasi ketinggian abutment 5 dan 10 meter
- Variasi terhadap bentang dan ketinggian abutment yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Table 1.
- Analisis struktur jembatan mengikuti ketentuan SNI 1725:2016 – Pembebaan untuk Jembatan, SNI 2833-2016 – Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan, dan Peta Gempa 2017.
- Pengaruh dari *creep* dan *shrinkage* yang terjadi pada struktur atas akan mengikuti ketentuan CEB-FIP 1990.

- Lokasi proyek berada di area kota Probolinggo dengan tipe tanah sedang (SD). Nilai parameter respons spektral percepatan gempa batuan dasar (PGA) 0.402 g.
- Mutu material beton yang digunakan adalah 30 MPa (dinding abutment, pilecap, dan tiang pondasi) dan 50 MPa (gelagar beton pracetak)
- Mutu material baja adalah BJTS 420B dengan kuat leleh 420 MPa dan mutu material strand memiliki nilai kuat ultimit 1860 MPa
- Pondasi yang digunakan adalah tiang bor berdiameter 80 cm dengan asumsi data tanah yang berada di sekitar area proyek tersebut.
- Konsep pemodelan struktur pada masing-masing tipe jembatan dilakukan secara 3D untuk melakukan pengecekan kapasitas elemen struktur pada berbagai kondisi seperti yang dapat terlihat pada Fig. 1 dan 2
- Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Fig. 3

Table 1. Variasi Pemodelan

Tipe Struktur	Variasi		Kode
	Bentang (meter)	Tinggi (meter)	
IABS	20	5	A-1
	30	5	A-2
	40	5	A-3
	20	10	A-4
	30	10	A-5
	40	10	A-6
<i>Simple Supported Beam</i>	20	5	B-1
	30	5	B-2
	40	5	B-3
	20	10	B-4
	30	10	B-5
	40	10	B-6

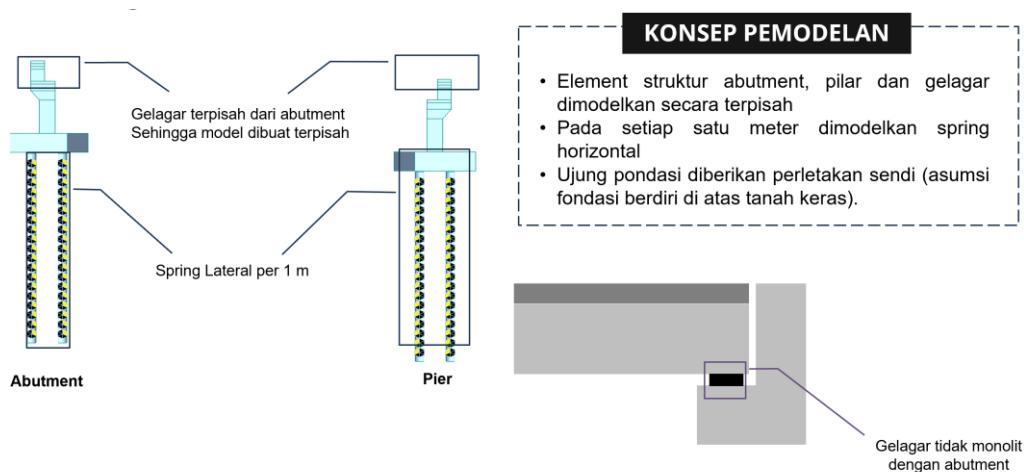


Fig. 1. Pemodelan Struktur Jembatan Tumpuan Sederhana

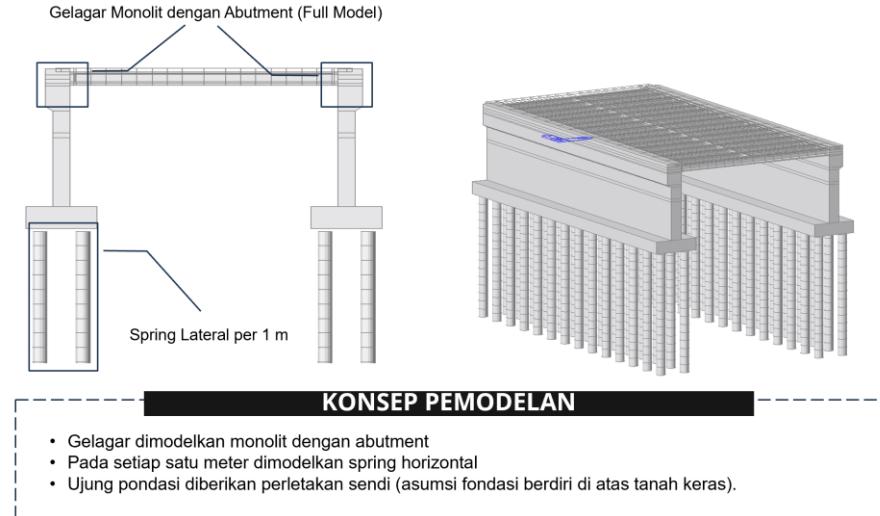


Fig. 2. Pemodelan Struktur Jembatan Abutment Integral

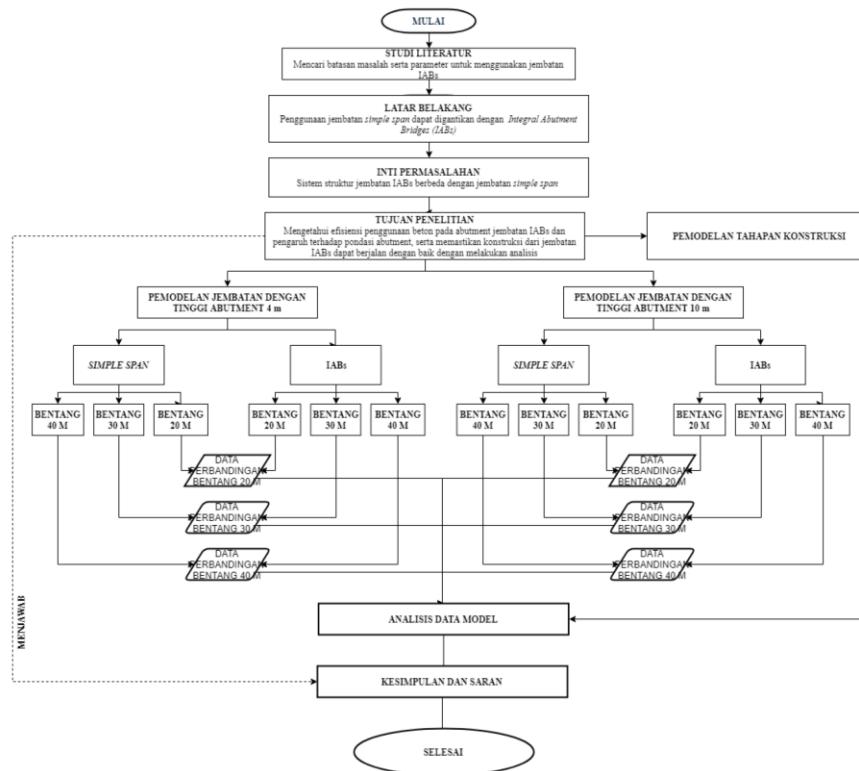


Fig. 3. Diagram Alir Penelitian

3. Pemodelan, Hasil Analisis, dan Pembahasan

3.1. Pemodelan Jembatan Abutment Integral

Pemodelan jembatan abutment integral dilakukan dengan menggunakan analisis tahapan konstruksi/*construction stage analysis* untuk memastikan tegangan yang terjadi pada elemen struktur balok jembatan masih memenuhi tegangan ijin yang terjadi, serta memastikan kapasitas elemen struktur masih memenuhi persyaratan pengecekan kekuatan. Pemodelan analisis tahapan konstruksi dapat ditunjukkan pada Fig 4 dan Table 2 berikut.

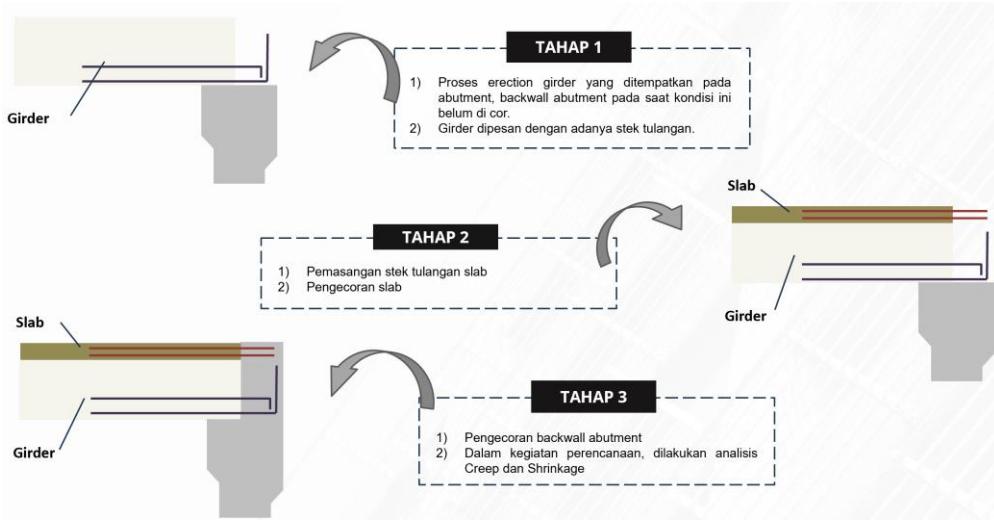


Fig. 4.Tahapan Analisis pada Pemodelan Jembatan IABS

Table 2. Tahapan Konstruksi

Stage	Elemen	Durasi Tahapan Konstruksi (Hari)	Tumpuan	Pembebanan
1	Pile, Abutment Bawah	1	Tumpuan RL PC Pile, Point Spring	Self-Weight
2	Girder	7	Temporary Girder and Abutment Simply Supported	Prestressed
3	Diaphragma	3	-	Pelat beton
4	-	3	-	-
5	Kepala Abutment	3	Rigid Connection	-
5A	-	30	-	-
6	-	1	-	Aspal
7	-	10000	-	Tekanan Tanah, Lalu Lintas, Gempa

3.2. Hasil Analisis Tegangan pada Gelagar IABS

Setiap girder yang terpasang harus memenuhi syarat izin tegangan sesuai SNI 2847:2019 [4] yaitu untuk tegangan tarik adalah $0,25\sqrt{f_c'}$, dan untuk tegangan tekan adalah $0,6 f_c'$. Berdasarkan hasil pemeriksaan tegangan pada model A-1 yang dapat terlihat pada Fig 5 – 8 didapatkan bahwa konfigurasi layout dan jumlah strand yang digunakan pada masing-masing gelagar sudah mampu memenuhi persyaratan tegangan ijin tarik dan tekan.

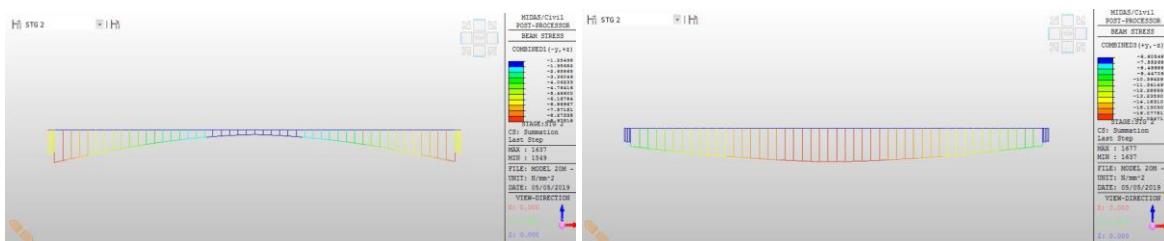


Fig. 5.Tegangan Serat Atas dan Serat Bawah pada Stage 2 model A-1

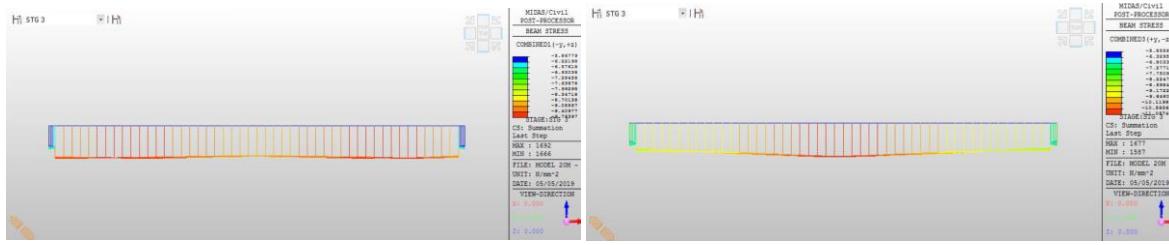


Fig. 6. Tegangan Serat Atas dan Serat Bawah pada Stage 3 model A-1

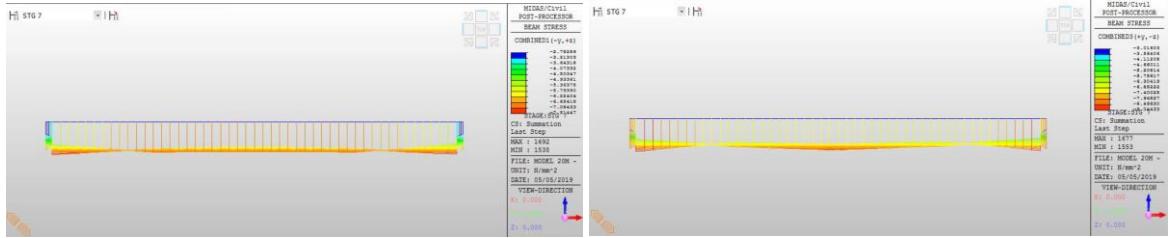


Fig. 7. Tegangan Serat Atas dan Serat Bawah pada Stage 7 model A-1

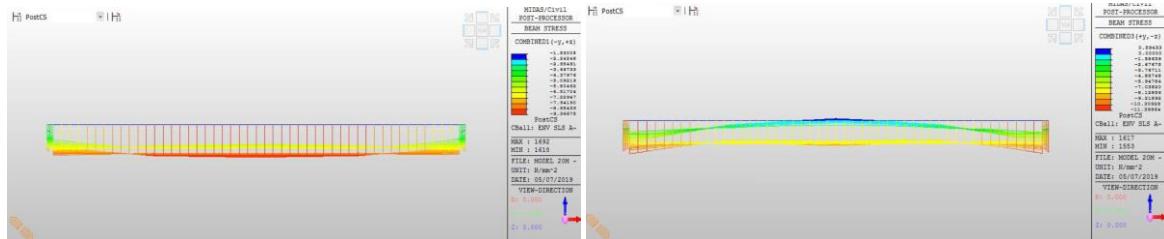


Fig. 8. Tegangan Serat Atas dan Serat Bawah pada masa layan (post CS) model A-1

Gaya dalam yang terjadi pada gelagar struktur jembatan dengan abutment integral menunjukkan perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan struktur jembatan bertumpu sederhana, seperti yang ditunjukkan pada Fig. 9. Perbedaan ini, khususnya keberadaan momen negatif di area tumpuan gelagar, menuntut adanya modifikasi desain girder, termasuk penambahan tulangan pada pelat lantai dan gelagar bawah girder, sebagaimana yang ditampilkan pada Fig. 10. Detail-detail konstruksi tersebut menjadi sangat krusial dalam penerapan konsep jembatan dengan abutment integral, untuk memastikan kesesuaian desain dengan perencanaan yang telah ditetapkan.

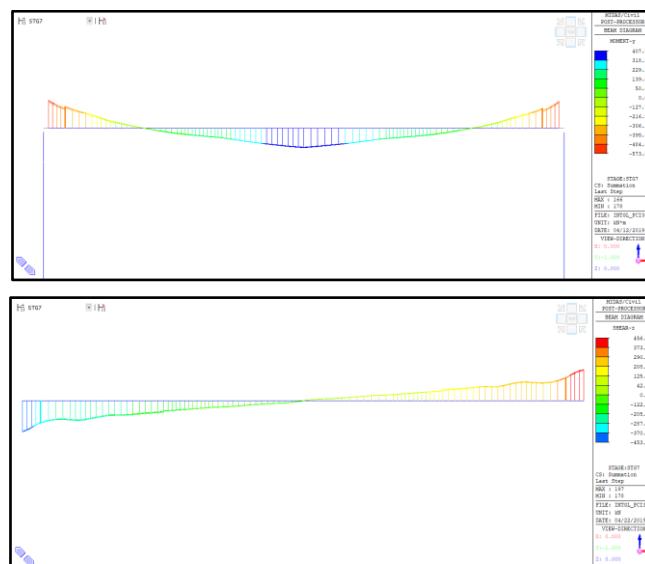


Fig. 9. Gaya dalam Momen dan Geser pada Gelagar Struktur Jembatan Abutment Integral

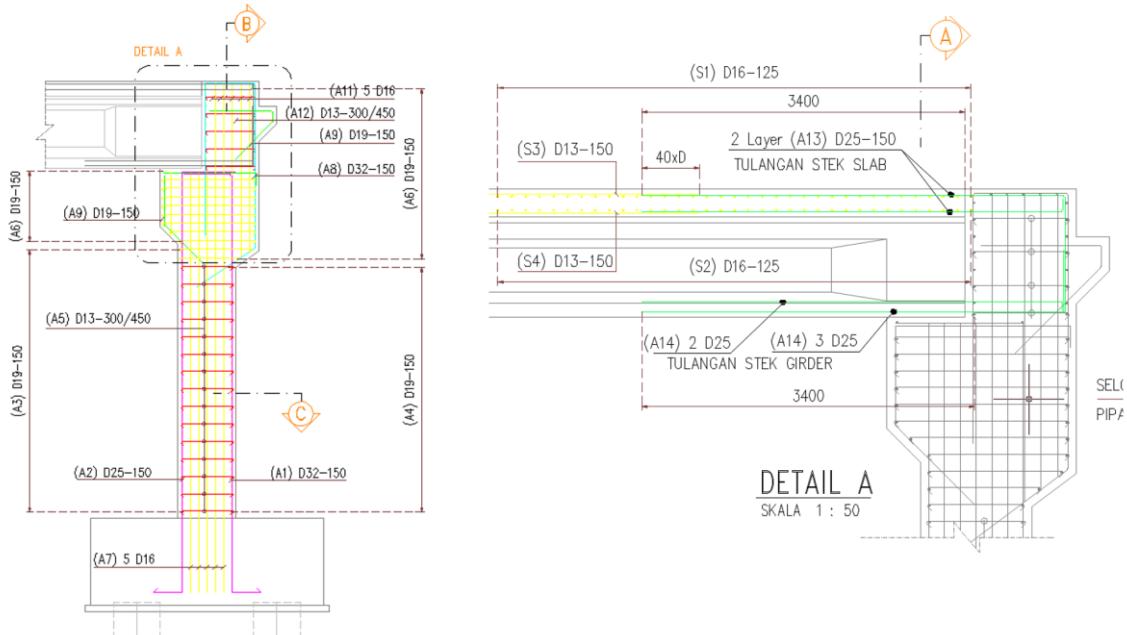


Fig. 10. Detail Sambungan Gelagar dan Kepala Abutment pada Jembatan Abutment Integral

3.3. Deformasi pada Gelagar IABS

Berikut adalah hasil deformasi yang dimunculkan pada salah satu model jembatan IABS yaitu model A-1. Dapat terlihat bahwa deformasi yang terjadi masih memenuhi batas kriteria deformasi yang diijinkan pada struktur atas jembatan.

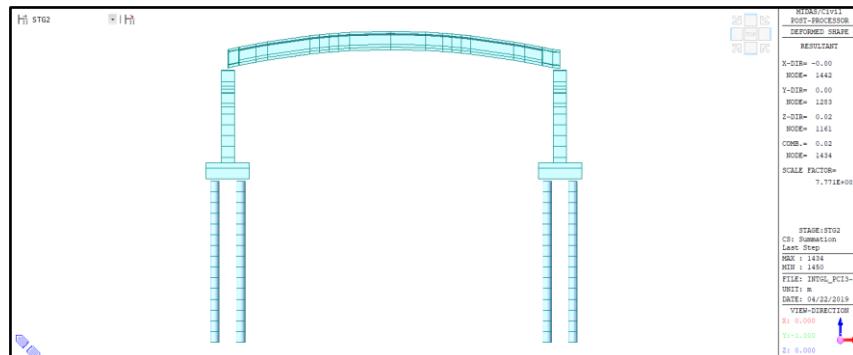


Fig. 11. Deformasi Jembatan pada Tahapan Analisis Konstruksi Stage 2 (Model A-1)

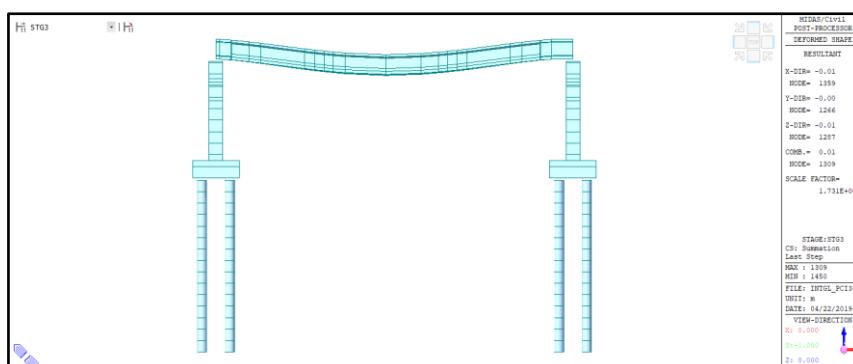


Fig. 12. Deformasi Jembatan pada Tahapan Analisis Konstruksi Stage 3 (Model A-1)

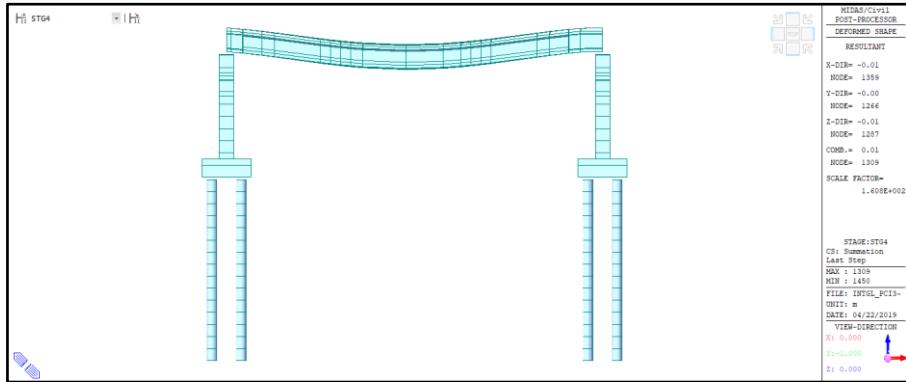


Fig. 13. Deformasi Jembatan pada Tahapan Analisis Konstruksi Stage 4 (Model A-1)

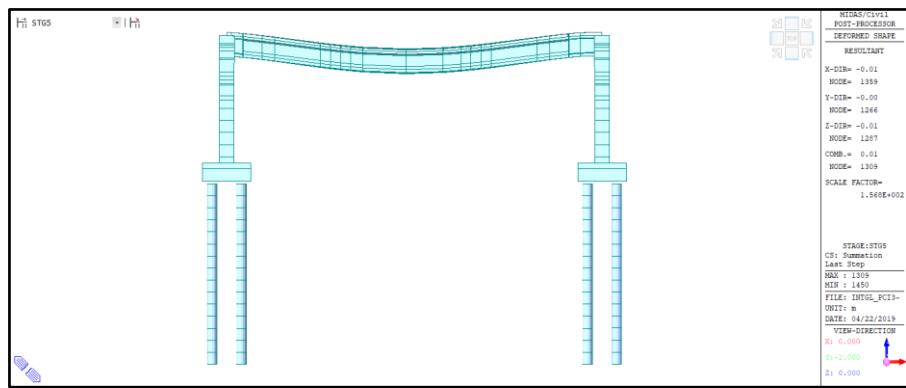


Fig. 14. Deformasi Jembatan pada Tahapan Analisis Konstruksi Stage 5 (Model A-1)

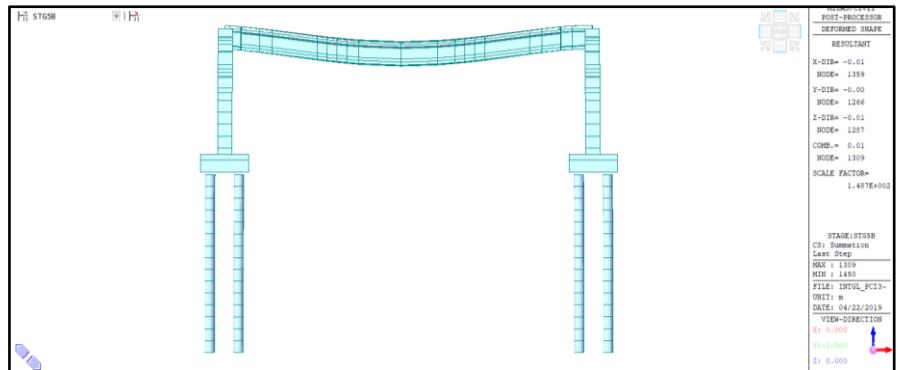


Fig. 15. Deformasi Jembatan pada Tahapan Analisis Konstruksi Stage 5A (Model A-1)

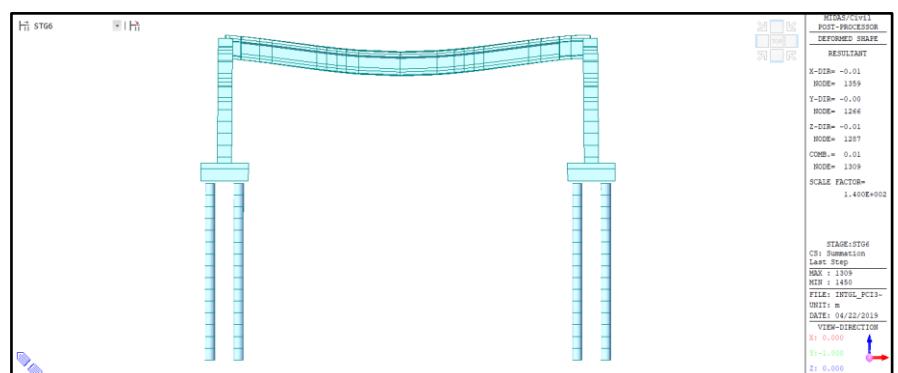


Fig. 16. Deformasi Jembatan pada Tahapan Analisis Konstruksi Stage 6 (Model A-1)

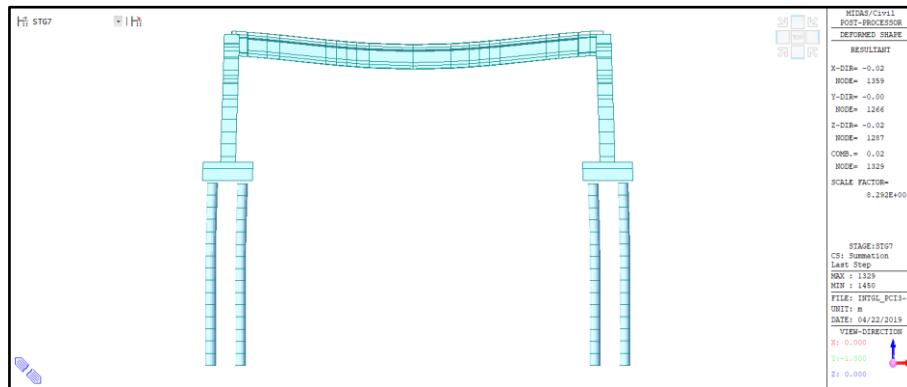


Fig. 17. Deformasi Jembatan pada Tahapan Analisis Konstruksi Stage 7 (Model A-1).

3.4. Hasil Analisis Struktur Bawah

Analisis struktur dilakukan pada dinding abutment serta tiang pondasi untuk memperoleh detail dimensi, jumlah penulangan, dan kebutuhan pondasi dari masing-masing model. Berdasarkan Tabel 3, dapat dilihat bahwa penggunaan sistem struktur Integral Abutment Bridge System (IABS) secara signifikan mampu mengoptimalkan kebutuhan tulangan utama pada dinding abutment, terutama pada bentang pendek 20 meter, baik dengan variasi ketinggian 5 meter maupun 10 meter. Optimasi ini menghasilkan pengurangan volume tulangan utama pada dinding abutment IABS sebesar 15% hingga 44% dibandingkan dengan konsep jembatan dengan tumpuan sederhana.

Sementara itu, Tabel 4 menunjukkan bahwa volume pekerjaan pondasi berkurang secara signifikan pada jembatan dengan sistem IABS, terutama pada variasi ketinggian 10 meter, dengan pengurangan volume mencapai 20% hingga 30% dibandingkan dengan konsep jembatan bertumpu sederhana.

Table 3. Perbandingan Tulangan Utama Dinding Jembatan IABS dan Jembatan Tumpuan Sederhana

Tinggi	Bentang	Tulangan longitudinal SS	Jumlah Tulangan SS	Tulangan longitudinal IABs	Jumlah Tulangan IABs	Perbesaran
5 m	20 m	D32-300	216	D25-250	254	1,39
	30 m	D25-250	460	D25-200	320	1,44
	40 m	D25-250	516	D25-300	400	1,29
10 m	20 m	D32-250	444	D25-200	540	1,34
	30 m	D32-200	596	D32-250	472	1,26
	40 m	D32-150	720	D32-200	616	1,17

Table 4. Perbandingan Pondasi Jembatan IABS dan Jembatan Tumpuan Sederhana

Model	Diameter Tiang Bor	Panjang Tiang	Konfigurasi Baris Pondasi	ρ (Rasio Tulangan)	Tulangan Longitudinal	Tulangan Geser	Cover
A-1	0,8 m	15 m	2 x 14	1,52%	15D25	D16-400	75 mm
A-2	0,8 m	15 m	2 x 14	1,52%	15D25	D16-400	75 mm
A-3	0,8 m	15 m	2 x 14	2,03%	20D25	D16-400	75 mm
A-4	0,8 m	15 m	2 x 14	1,52%	15D25	D16-400	75 mm
A-5	0,8 m	15 m	2 x 14	2,03%	20D25	D16-400	75 mm
A-6	0,8 m	15 m	2 x 14	2,53%	25D25	D16-400	75 mm
B-1	0,8 m	15 m	2 x 14	1,52%	15D25	D16-400	75 mm
B-2	0,8 m	15 m	2 x 14	1,52%	15D25	D16-400	75 mm
B-3	0,8 m	15 m	2 x 14	2,03%	20D25	D16-400	75 mm
B-4	0,8 m	15 m	3 x 14	1,52%	15D25	D16-400	75 mm
B-5	0,8 m	15 m	3 x 14	2,03%	20D25	D16-400	75 mm
B-6	0,8 m	15 m	3 x 14	2,53%	25D25	D16-400	75 mm

4. Kesimpulan

Penggunaan abutment integral pada struktur jembatan menghasilkan perubahan signifikan pada distribusi gaya dalam, khususnya momen negatif di area tumpuan gelagar. Perubahan ini memerlukan penyesuaian desain girder, termasuk penambahan tulangan pada pelat lantai dan gelagar bawah. Detailing yang tepat sangat diperlukan untuk menjamin bahwa desain abutment integral sesuai dengan perencanaan awal, sehingga dapat meningkatkan kinerja dan keselamatan struktur secara keseluruhan

Penerapan struktur jembatan abutmen integral (IABS) pada jembatan menghasilkan optimasi yang signifikan, terutama dalam hal kebutuhan tulangan dan volume pekerjaan pondasi. Penggunaan IABS terbukti mampu mengurangi volume tulangan utama pada dinding abutment hingga 15% hingga 44% untuk bentang pendek 20 meter, baik pada variasi ketinggian 5 maupun 10 meter, dibandingkan dengan sistem tumpuan sederhana. Selain itu, volume pekerjaan pondasi juga mengalami pengurangan yang signifikan, mencapai 20% hingga 30% pada ketinggian 10 meter. Temuan ini menunjukkan bahwa IABS dapat memberikan efisiensi material dan biaya dalam pembangunan jembatan, terutama untuk bentang dan ketinggian tertentu.

Penggunaan sistem jembatan integral (IABS) pada area gempa di Indonesia menunjukkan potensi yang signifikan dalam meningkatkan ketahanan dan efisiensi struktur jembatan. Sistem ini mampu mengurangi kebutuhan tulangan dan volume pekerjaan pondasi secara signifikan dibandingkan dengan jembatan bertumpu sederhana, sekaligus memberikan fleksibilitas yang lebih baik dalam menghadapi pergerakan tanah akibat gempa. Dengan demikian, penerapan IABS dapat menjadi solusi yang efektif dalam perencanaan jembatan di wilayah dengan aktivitas seismik tinggi, memberikan keamanan yang lebih baik serta pengurangan biaya konstruksi dan pemeliharaan.

Acknowledgment

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Enjiniring Pilar Cakrawala yang telah memberikan dukungan penuh dengan memfasilitasi penelitian ini serta menyediakan referensi proyek yang sangat berguna. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Universitas Katolik Parahyangan yang telah memfasilitasi dan mendukung proses riset ini sehingga dapat terlaksana dengan baik.

Declarations

Kontribusi penulis. Semua penulis memberikan kontribusi yang sama kepada kontributor utama untuk makalah ini. Semua penulis membaca dan menyetujui makalah akhir

Pernyataan pendanaan. Tak satu pun dari penulis telah menerima dana atau hibah dari lembaga atau badan pendanaan untuk penelitian.

Konflik kepentingan. Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Informasi tambahan. Tidak ada informasi tambahan yang tersedia untuk makalah ini.

References

- [1] Setiati, N. Retno, 2011, "Jembatan Integral Gelagar Prategang", Bandung, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- [2] S. H. Kim, H.Y. Ji, H. K. Kim, J. C. Kim, J. C. Woo, dan H. A. Jin, 2011. "Structural details of steel girder-abutment joints in integral bridges: An experimental study." Construction Steel Research 190-212.
- [3] S. A. Civjan, B. Christine, F. B. Sergio, D. Jason, C. Daniel, 2007, "Parametric Analysis of a Massachusetts Bridge." *Bridge Engineering* 64-71.
- [4] B. S. Nasional, „Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung (SNI 2847-2019)“, no. 8. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [5] T. Y. Lin and N. H. Burns, 1996, „Desain Struktur Beton Prategang Jilid 2“, Terjemahan. Jakarta: Erlangga.
- [6] H. Nishida, H. Miyata, S. Kimura, and K. Tetsuya, 2012, "Design andconstruction guideline of integral abutment bridges for japanese highways," in Proceedings of The 28th US-Japan Bridge Engineering Workshop.