

Analisis Perbandingan dan Biaya Girder Baja Modular Unibridge dan Girder Baja Konvensional Pada Proyek Fly Over Teluk Lamong Surabaya

Comparison Analysis of Unibridge Modular Steel Girders and Conventional Steel Girders in the *Teluk Lamong Fly Over Project*, Surabaya

Kunto Dwi Wicaksono^{1,a)}, Farida Rachmawati^{2,b)} & M.Arif Rohman^{3,c)}

¹⁾Mahasiswa program Studi Pascasarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh November, ITS, Surabaya

²⁾Program Studi Pascasarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.

Koresponden: ^{a)}kuntodwiw@gmail.com^{b)} & farida_rahma@ce.its.ac.id

ABSTRAK

Perkembangan infrastruktur menuntut konstruksi yang lebih mudah, murah, dan cepat pada proses konstruksinya. Konsep konstruksi modular menjadi solusi efektif untuk perkembangan infrastruktur tersebut. Konsep konstruksi ini melakukan fabrikasi di luar area proyek, kemudian ditransportasikan dan dirakit di dalam proyek untuk selanjutnya diinstal. Teknologi konstruksi modular mampu menjawab tingkat kesulitan teknologi girder konvensional sebelumnya, serta mengurangi waktu konstruksi tanpa mengabaikan kualitas. Penelitian ini berfokus pada sistem Jembatan Modular *Unibridge* yang merupakan jembatan girder baja menggunakan pin pada setiap sambungan antara box girder dengan konsep modular. Identifikasi dan analisis dilakukan dalam pemilihan Girder Baja Modular *Unibridge* dengan girder baja konvensional lainnya menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Pengambilan data primer dilakukan dengan observasi di proyek dan wawancara dengan responden. Penelitian ini menggunakan 3 alternatif yaitu: Girder Baja *Unibridge*, Girder Baja Bolted, Girder Baja Welded. Selanjutnya analisis kriteria finansial dilakukan dengan metode *Life Cycle Cost* (LCC) pada ketiga alternatif tersebut. Hasil analisis menunjukkan Girder Baja *Unibridge* menempati peringkat pertama dalam tabel sintesa keputusan dengan nilai 0,405 menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process*, sehingga Girder Baja *Unibridge* adalah alternatif terbaik yang dapat digunakan dalam proyek. Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa Girder Baja *Unibridge* memiliki nilai NPV Rp. 32,150,725,298, dimana nilai tersebut paling tinggi daripada alternatif lain.

Kata Kunci : manajemen infrastruktur, konstruksi modular, girder *unibridge*, *analytical hierarchy process*, *life cycle cost*

PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur menuntut konstruksi yang lebih mudah, lebih murah, dan lebih cepat pada proses konstruksinya. Konstruksi prefabrikasi merujuk pada proses konstruksi di mana komponen bangunan dibuat di pabrik dan diangkut ke lokasi konstruksi untuk pemasangan (Deluxe Modular, 2024). Metode prefabrikasi menawarkan manfaat signifikan dibandingkan konstruksi tradisional di lokasi, seperti pembuatan yang lebih cepat

dan aman, kontrol kualitas yang lebih baik, dan dampak lingkungan yang lebih rendah (Jin dkk., 2020; Lawson & Britain), 1999; Thai dkk., 2020; Yu & Chen, 2018). Sehingga memberikan manfaat keberlanjutan dalam hal efisiensi material, pengurangan limbah di lokasi hingga 90% (WRAP, 2018), dan kondisi kerja yang lebih baik (Jiang dkk., 2019; Kamali & Hewage, 2016). Konsep konstruksi prefabrikasi bukanlah hal baru, namun teknologi, permintaan ekonomi, dan perubahan pola pikir banyak menarik minat dan investasi. Berdasarkan tingkat prefabrikasi, terdapat tiga kelas konstruksi prefabrikasi: elemen tunggal 1D, sistem panelisasi 2D, dan sistem volumetrik 3D (Boafo dkk., 2016; Smith dkk., 2011). Konstruksi panelisasi dan volumetrik, yang juga dikenal sebagai konstruksi modular, adalah kelas konstruksi prefabrikasi yang paling efisien karena memungkinkan 70% hingga 95% dari bangunan dibuat di pabrik sebelum diangkut untuk perakitan di lokasi (Mortice, 2024). Penggunaan teknologi konstruksi modular dapat mengurangi waktu konstruksi sebesar 50% dan menghemat biaya sebesar 20% berdasarkan studi kasus proyek-proyek terkini (McKinsey, 2019). Oleh karena itu, metode ini diyakini akan membentuk masa depan industri konstruksi.

Dunia konstruksi di bidang jembatan dan Elevated Construction terus mengalami perkembangan, baik dengan material beton maupun baja. Konstruksi jembatan modern menggunakan beton dan baja bermutu tinggi untuk efisiensi dan kemudahan fabrikasi. Dalam desainnya terdapat struktur girder atau gelagar jembatan. Girder mendukung beban dan menyalurkannya ke struktur bawah. Percepatan konstruksi Jembatan dengan konsep prefabrikasi dan dengan material bermutu tinggi sering digunakan dalam proyek jembatan (Tumbeva dkk., 2021). Salah satu teknologi girder baja modular adalah *Unibridge*, teknologi ini diklaim memiliki kelebihan dimana kecepatan produksi dan instalasi di lapangan lebih mudah daripada girder baja konvensional (Matiere et al. 2018). Untuk itulah perlu dilakukan analisis sistem Jembatan Modular *Unibridge* sebagai alternatif dalam proyek konstruksi.

Penelitian ini mengambil studi kasus proyek *Fly Over* Teluk Lamong yang merupakan proyek pertama di Indonesia yang menggunakan girder baja modular seperti *unibridge*. Analisis terhadap Girder Baja Modular *Unibridge* dibandingkan dengan girder baja konvensional lainnya. Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) digunakan untuk memilih girder terbaik berdasarkan kriteria tertentu dan menganalisis aspek keuangan dengan metode *Life Cycle Cost* (LCC). Penelitian dapat memberikan pemahaman lebih mendalam tentang keunggulan, kinerja, dan keandalan girder baja dalam proyek konstruksi. Hasil analisis dapat menjadi dasar untuk mengambil keputusan dalam memilih alternatif girder baja yang paling sesuai dengan kebutuhan proyek, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti keandalan, kualitas dan biaya konstruksi.

METODA PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi metode LCCA dan metode. AHP digunakan untuk menentukan pilihan terbaik dari alternatif yang ada, sedangkan metode LCCA digunakan untuk menganalisis biaya yang ditimbulkan oleh masing-masing alternatif girder. Dengan menerapkan metode LCCA, penelitian ini dapat mengidentifikasi dan memperhitungkan semua biaya yang terkait dengan siklus hidup proyek, termasuk biaya pengadaan, operasional, perawatan, pembongkaran, dan nilai sisa. Ketiga, metode perbandingan penjadwalan digunakan untuk menganalisis waktu konstruksi yang dibutuhkan oleh masing-masing alternatif girder baja dengan menganalisis durasi setiap tahapan pekerjaan pada alternatif girder baja. Kombinasi ketiga metode tersebut memberikan pendekatan yang komprehensif dan terintegrasi dalam memilih alternatif girder baja yang paling optimal. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan informasi yang komprehensif dan relevan dalam implementasi pemilihan girder baja pada studi kasus pelaksanaan Proyek *Fly Over* Teluk Lamong Surabaya.

Pengambilan Sampel

Pemilihan sampel responden dalam penelitian ini dengan teknik Purposive sampel bersifat non probability. Yaitu pihak-pihak yang terlibat dalam proyek *Fly Over* Teluk Lamong beserta alasan pemilihan dapat dilihat pada **Tabel 1** berikut:

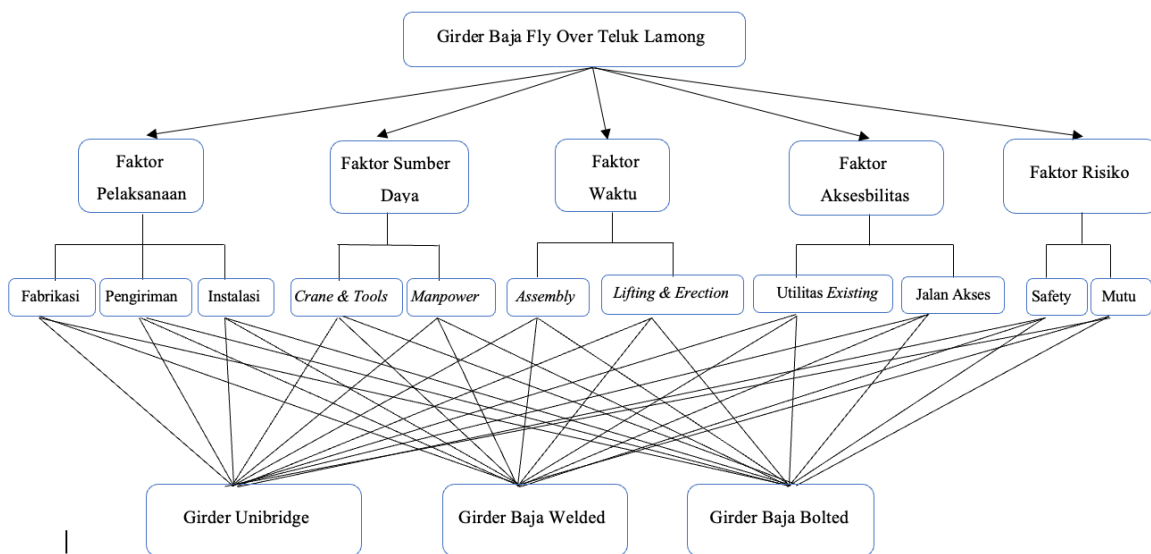
Tabel 1. Daftar Responden Penelitian

Jabatan	Pengalaman
Manager Divisi	Masa Kerja $\pm$ 26 Tahun
Manager Proyek	Masa Kerja $\pm$ 13 Tahun
Manager Konstruksi	Masa Kerja $\pm$ 7 Tahun
Kepala Seksi Komersial	Masa Kerja $\pm$ 8 Tahun
Pelaksana Utama	Masa Kerja $\pm$ 6 Tahun
Kepala Seksi Quality	Masa Kerja $\pm$ 7 Tahun

Pengumpulan Data

Data primer adalah data yang langsung bisa diperoleh oleh penulis, seperti wawancara, survey langsung, dan data dari lapangan.

Data sekunder adalah data yang didapat dari dokumen pendukung proyek dimana pada penelitian ini adalah data rencana biaya pelaksanaan. Data-data yang diperoleh dianalisis dengan menggunakan metode AHP dengan kerangka kerja pengambil keputusan yang disesuaikan dengan kondisi proyek. AHP girder baja dapat dilihat seperti pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Proses Analisis Hirarki Pemilihan Girder Baja

Metode AHP dilakukan berdasarkan kriteria-kriteria utama untuk mendapatkan bobot dan menentukan prioritas. Kriteria-kriteria tersebut adalah variabel kualitatif, yaitu selain kriteria waktu dan biaya proyek. Kriteria kuantitatif ini didapatkan dari hasil brainstorming melalui wawancara dengan expert. Keseluruhan kriteria yang akan digunakan pada studi ini baik dari kualitatif maupun kuantitatif sesuai **Tabel 2** berikut:

Tabel 2. Penentuan Kriteria Pemilihan Alternatif

Kriteria	Jenis Variabel
Lokasi proyek <i>Fly Over</i> Teluk Lamong	Kualitatif
Kondisi existing proyek, kondisi jalan akses	Kualitatif
Alternatif metode kerja untuk <i>crossing</i> sungai, rel kereta, jalan tol	Kualitatif
Alternatif pemilihan girder untuk bentang panjang.	Kualitatif
Proses pengadaan sumber daya material dan <i>man power</i>	Kualitatif
Jadwal pelaksanaan konstruksi (Fabrikasi, Pengiriman, dan Instalasi)	Kuantitatif
Perkiraan biaya konstruksi dengan Girder <i>Unibridge</i> untuk <i>Fly Over</i> Teluk Lamong	Kuantitatif

Data di atas menjadi penentu pembobotan kriteria pada analisis berdasarkan kriteria non-finansial dengan menggunakan AHP. Sedangkan data finansial seperti estimasi biaya dari aktifitas-aktifitas pekerjaan jembatan dianalisis menggunakan Life Cycle Cost. Data – data tersebut dirinci pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Data Primer Untuk Perhitungan LCC

Data Diperlukan	Kriteria	Sumber Data	Keterangan				
RAB Fabrikasi Girder	Finansial	Kantor Proyek	Data diperoleh dari RAB	Komersial	fungsi		
RAB Mobilisasi Girder	Finansial	Kantor Proyek	Data diperoleh dari RAB	Komersial	fungsi		
RAB Instalasi Girder	Finansial	Kantor Proyek	Data diperoleh dari RAB	Komersial	fungsi		
RAB Maintenance Girder	Finansial	Kantor Proyek	Data diperoleh dari RAB	Komersial	fungsi		

Adapun alternatif yang akan dianalisis pada studi ini adalah:

1. Girder Baja Unibridge
2. Girder Baja Welded
3. Girder Baja Bolted

Pemilihan Alternatif Girder Baja Modular

Penelitian menggunakan 2 jenis kriteria yang akan digunakan yaitu: Kriteria dan Kriteria Non Finansial. Kriteria Finansial adalah kriteria yang berhubungan dengan biaya, analisis dilakukan menggunakan metode LCCA. Pada kriteria finansial berdasarkan biaya yang dikeluarkan saat proses fabrikasi, mobilisasi, dan instalasi. Selanjutnya untuk kriteria finansial dalam penelitian ini akan dianalisis dengan menggunakan metode LCCA. Masing-masing alternatif pemilihan girder baja untuk proyek *Fly Over* Teluk Lamong akan dihitung biaya secara keseluruhan, baik biaya langsung maupun biaya tak langsung seperti pada **Tabel 4** di bawah ini.

Tabel 4. Metode LCCA

No	Uraian	Girder <i>Unibridge</i>	Girder Baja Welded	Girder Baja Bolted
1	Biaya Konstruksi	.....	.....	.....
2	Biaya Perawatan	.....	.....	.....
3	Biaya lain lain	.....	.....	.....
4	Nilai Sisa	.....	.....	.....
	Nilai LCCA	.....	.....	.....

Kriteria Non Finansial adalah kriteria yang selain berhubungan dengan biaya atau non cost. Pada Kriteria Non Finansial terdapat 5 Kriteria yang akan digunakan yaitu:

1. Kemudahan metode pelaksanaan di lapangan
2. Kemudahan mendapatkan alat, *manpower* dan *tools*
3. Kemudahan akses menuju lokasi dan lokasi *existing*
4. Berapa lama waktu assembly dan pelaksanaan *erection*.
5. Kajian Resiko terhadap aspek *safety* dan mutu

ANALISIS PENELITIAN

Analisa Analytical Hierarchy Process (AHP)

Dari hasil wawancara yang dilakukan kepada para responden pada tabel di atas, didapatkan hasil pembobotan matriks perbandingan berpasangan.

Tabel 5. Matriks Sistesa Penilaian untuk Kriteria-Kriteria

	Kriteria				
	Faktor Pelaksanaan	Faktor Sumber Daya	Faktor Waktu	Faktor Aksesibilitas	Faktor Resiko
Faktor Pelaksanaan	1	2	3	5	6
Faktor Sumber Daya	0,5	1	5	3	5
Faktor Waktu	0,33	0,2	1	3	3
Faktor Aksesibilitas	0,2	0,33	0,33	1	2
Faktor Resiko	0,17	0,2	0,33	0,5	1
Jumlah	2,2	3,7	9,7	12,5	17,0

Tabel 6. Normalisasi Matriks Kriteria

	Kriteria					Σ	Rating
	Faktor Pelaksanaan	Faktor Sumber Daya	Faktor Waktu	Faktor Aksesibilitas	Faktor Resiko		
Faktor Pelaksanaan	0,45	0,54	0,31	0,4	0,35	2,05	0,41
Faktor Sumber Daya	00,23	0,27	0,52	0,24	0,29	1,55	0,31
Faktor Waktu	0,15	0,05	0,10	0,24	0,18	0,73	0,15
Faktor Aksesibilitas	0,09	0,09	0,03	0,08	0,12	0,41	0,08
Faktor Resiko	0,08	0,05	0,03	0,04	0,06	0,26	0,05

Kemudian pada tahap selanjutnya, dari pengumpulan data didapat 3 alternatif yang akan digunakan sebagai alternatif pemilihan girder baja yang terbaik pada proyek *Fly Over* Teluk Lamong.

Tabel 7. Matriks alternatif dengan kriteria lama Pelaksanaan

Pelaksanaan	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted
Unibridge	1	0,33	0,33
Girder Welded	3	1	0,5
Girder Bolted	3	2	1
Jumlah	7	3,33	1,83

Tabel 8. Normalisasi Matriks alternatif dengan kriteria lama Pelaksanaan

Pelaksanaan	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted	Σ	Rating
Unibridge	0,14	0,10	0,18	0,42	0,14
Girder Welded	0,45	0,30	0,27	1	0,33
Girder Bolted	0,43	0,60	0,55	1,57	0,52

Tabel 9.Matriks alternatif dengan kriteria Sumber Daya

Sumber Daya	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted
Unibridge	1	2	2
Girder Welded	0,5	1	0,5
Girder Bolted	0,5	2	1
Jumlah	2	5	3,5

Tabel 10.Normalisasi Matriks alternatif dengan kriteria Sumber Daya

Sumber Daya	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted	Σ	Rating
Unibridge	0,5	0,4	0,57	1,47	0,49
Girder Welded	0,25	0,20	0,14	0,59	0,20
Girder Bolted	0,25	0,40	0,29	0,94	0,31

Tabel 11. Matriks alternatif dengan kriteria waktu

Waktu	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted
Unibridge	1	5	5
Girder Welded	0,2	1	0,5
Girder Bolted	0,2	2	1
Jumlah	1,4	8	6,5

Tabel 12. Normalisasi Matriks alternatif dengan kriteria waktu

Waktu	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted	Σ	Rating
Unibridge	0,71	0,63	0,77	2,11	0,70
Girder Welded	0,14	0,13	0,08	0,34	0,11
Girder Bolted	0,14	0,25	0,15	0,55	0,18

Tabel 13. Matriks alternatif dengan kriteria Aksesibilitas

Aksesibilitas	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted
Unibridge	1	7	5
Girder Welded	0,14	1	0,33
Girder Bolted	0,2	3	1
Jumlah	1,34	11	6,33

Tabel 14. Normalisasi Matriks alternatif dengan kriteria Aksesibilitas

Akseabilitas	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted	Σ	Rati ng
Unibridge	0,74	0,64	0,79	2,17	0,72
Girder Welded	0,11	0,09	0,08	0,25	0,02
Girder Bolted	0,15	0,27	0,16	0,58	0,19

Tabel 15. Matriks alternatif dengan kriteria Risiko

Risiko	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted
Unibridge	1	5	3
Girder <i>Welded</i>	0,2	1	0,33
Girder <i>Bolted</i>	0,3	3	1
Jumlah	1,53	9	4,33

Tabel 16. Normalisasi Matriks alternatif dengan kriteria Risiko

Risiko	Unibridge	Girder Welded	Girder Bolted	Σ	Rating
Unibridge	0,65	0,56	0,69	1,90	0,63
Girder <i>Welded</i>	0,13	0,11	0,08	0,32	0,11
Girder <i>Bolted</i>	0,22	0,33	0,23	0,78	0,26

Berdasarkan data hasil matriks pada setiap alternatif dan kriteria, normalisasi matriks kriteria dan alternatif yang telah dihitung pada tabel di atas, maka didapat matriks sistesa keputusan terhadap pemilihan girder baja alternatif yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 17. Sintesa Keputusan

Tujuan	Kriteria					Penjumlahan Perkalian Matriks
	Plksn	SD	Waktu	Akses	Risiko	
Kriteria Rata Rata	0,41	0,31	0,15	0,08	0,05	
Alter Unibridge	0,14	0,49	0,70	0,72	0,63	0,405 (I)
natif G. <i>Welded</i>	0,33	0,20	0,11	0,08	0,11	0,227 (III)
G. <i>Bolted</i>	0,52	0,31	0,19	0,19	0,26	0,368 (II)
Jumlah	1	1	1	1	1	

Dari hasil analisis metode *Analytical Hierarchy Process*, dapat disimpulkan bahwa girder baja unibridge adalah alternatif terbaik dalam pemilihan alternatif – alternatif girder baja pada proyek *fly over* teluk lamong tersebut, karena berhasil menduduki peringkat pertama dengan nilai 0.405 untuk alternatif girder terbaik pada tabel sintesa keputusan dan kriteria yang paling penting adalah kriteria pelaksanaan dengan nilai 0,41.

Analisa Life Cycle Cost (LCC)

Analisa LCC pada girder baja Unibridge

Tabel 18. Biaya Pengadaan dan Instalasi Girder Baja Unibridge

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Pengadaan dan Instalasi	Kg	451,668	Rp. 34,974	Rp. 15,797,084,092

Tabel 19. Biaya Operasional dan Perawatan

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Operasional dan Perawatan	Kg	451,668	Rp. 8,773	Rp. 3,962,567,950

Tabel 20. Biaya Pembongkaran

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Pembongkaran	Kg	451,668	Rp. 2300	Rp. 1,038,881,463

Tabel 21. Nilai Sisa

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Nilai Sisa	Kg	451,668	Rp. 6277	Rp. 2,835,264,455

Analisa LCC pada girder baja *Welded*

Tabel 22. Biaya Pengadaan dan Instalasi Girder

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Pengadaan dan Instalasi	Kg	493,660	Rp. 30,582	Rp. 15,097,319,980

Tabel 23. Biaya Operasional dan Perawatan

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Operasional dan Perawatan	Kg	493,660	Rp. 9,773	Rp. 4,824,868,401

Tabel 24. Biaya Pembongkaran

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Pembongkaran	Kg	493,660	Rp. 2,315	Rp. 1,142,643,162

Tabel 25. Nilai Sisa

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Nilai Sisa	Kg	493,660	Rp. 4,700	Rp. 2,320,202,000

Analisa LCC pada girder baja *Bolted*

Tabel 26. Pengadaan Steel Bridge dan Instalasi

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Operasional dan Perawatan	Kg	503,533	Rp. 30,520	Rp. 15,367,904,899

Tabel 27. Operasional dan Perawatan baja Bolted (umur rencana 50 tahun)

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Operasional dan Perawatan	Kg	503,533	Rp. 8,491	Rp.4,275,560,481

Tabel 28. Pembongkaran baja Bolted

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Biaya Pembongkaran	Kg	503,533	Rp. 2,418	Rp. 1,217,643,162

Tabel 29. Nilai Sisa baja Bolted

No	Item	Unit	Volume	Unit Price	Total
1	Nilai Sisa	Kg	503,533	Rp. 4,798	Rp. 2,415,700,527

Tabel 30a. Nilai LCC pada semua alternatif

No	Komponen LCC	Alternatif Girder Baja		
		Unibridge	Welded	Bolted
1	Biaya Pengadaan Jembatan	Rp. 15,797,084,092	Rp. 15,097,319,980	Rp. 15,367,904,899

Tabel 31b. Nilai LCC pada semua alternatif

No	Komponen LCC	Alternatif Girder Baja		
		Unibridge	Welded	Bolted
2	Biaya Operasional dan Perawatan	Rp. 3,962,567,951	Rp. 4,824,868,401	Rp. 4,275,560,482
3	Biaya Pembongkaran	Rp. 1,038,881,463	Rp. 1,142,643,163	Rp. 1,217,643,163
4	Nilai Sisa	Rp. 2,835,264,455	Rp. 2,320,202,544	Rp. 2,439,618,354

Setelah menghitung LCC selanjutnya menghitung PV (Present Value) dan NPV (Net Present Value) dari ketiga alternatif tersebut untuk mengetahui investasi mana alternatif yang terbaik. Dengan menggunakan asumsi minimum *attractive rate of return* , 0,852%, maka didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 32. Nilai NPV pada semua alternatif.

No	Item	NPV
1	Jembatan Baja Unibridge	Rp. 32,150,725,298
2	Jembatan Baja Welded	Rp. 31,812,313,484
3	Jembatan Baja Bolted	Rp. 31,665,088,086

Dari perhitungan tersebut jembatan dengan girder baja alternatif terbaik adalah jembatan Unibridge dengan nilai NPV terbesar yaitu Rp. 32,150,725,298. Karena memiliki nilai NPV paling besar antara tiga alternatif yang ada.

KESIMPULAN

Dari hasil kajian yang telah dilakukan *Analytical Hierarchy Process* girder baja unibridge menempati peringkat pertama dalam tabel sintesa keputusan dengan nilai 0.405 , metode AHP menunjukkan bahwa Girder Baja *Unibridge* adalah alternatif terbaik yang dapat digunakan dalam proyek. Sedangkan berdasarkan metode LCCA untuk Girder Baja *Unibridge* mempunyai nilai LCC Rp. 23.633.797.961. Dan dengan nilai NPV terbesar yaitu Rp. 32,150,725,298, menjadi alternatif terbaik dalam penelitian ini. Penelitian selanjutnya, dapat melakukan analisis biaya dengan memperhitungkan biaya awal dan biaya jangka panjang serta perlu melibatkan lebih banyak *stakeholder* untuk memberikan perspektif beragam dan memastikan proses pengambilan keputusan yang komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Boafo, F. E., Kim, J. H., & Kim, J. T. (2016). "Performance of modular prefabricated architecture: Case study-based review and future pathways". *Dalam Sustainability (Switzerland) (Vol. 8, Nomor 6)*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su8060558>
- [2] Deluxe Modular. (2024). "The differences between prefab and modular construction". <https://www.deluxemodular.com/learning-center/modular-vs-prefab>.
- [3] Jiang, Y., Zhao, D., Wang, D., & Xing, Y. (2019). "Sustainable performance of buildings through modular prefabrication in the construction phase: A comparative study". *Sustainability (Switzerland)*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/su11205658>
- [4] Jin, R., Hong, J., & Zuo, J. (2020). "Environmental performance of off-site constructed facilities: A critical review". *Dalam Energy and Buildings (Vol. 207)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109567>
- [5] Kamali, M., & Hewage, K. (2016). "Life cycle performance of modular buildings: A critical review". *Dalam Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 62, hlm. 1171–1183)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.031>
- [6] Lawson, R. M., & Britain, S. C. I. (Great. (1999). "Modular Construction Using Light Steel Framing: An Architect's Guide". *Steel Construction Institute*. <https://books.google.co.id/books?id=Oli-PAAACAAJ>
- [7] McKinsey. (2019, Juni 18). "Modular construction: From projects to products". <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>.
- [8] Mortice, Z. (2024, Juli 24). "Can this Chicago apartment factory make new homes affordable?". <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-07-22/singapore-s-hdb-white-flats-give-public-housing-an-open-concept-makeover>.
- [9] Smith, R. E., Timberlake, J., & Smith, F. (2011). "PREFAB ARCHITECTURE". *Jhon Wiley & Sons*. www.itac.utah.edu
- [10] Thai, H. T., Ngo, T., & Uy, B. (2020). "A review on modular construction for high-rise buildings". *Dalam Structures (Vol. 28, hlm. 1265–1290)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.070>
- [11] Tumbeva, M. D., Thrall, A. P., & Zoli, T. P. (2021). "Modular Joint for the Accelerated Fabrication and Erection of Steel Bridges". *Journal of Bridge Engineering*, 26(6), 04021022. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001706](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001706)
- [12] WRAP. (2018). "WAS 003-003: Offsite Construction Case Study Waste Reduction Potential of Offsite Volumetric Construction". www.wrap.org.uk.
- [13] Yu, Y., & Chen, Z. (2018). "Rigidity of corrugated plate sidewalls and its effect on the modular structural design". *Engineering Structures*, 175, 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.039>

