

KALKULASI DAN KOMPARASI KANDUNGAN KARBON DALAM PEMILIHAN BAHAN STRUKTUR UNTUK MEWUJUDKAN STRUKTUR BERKELANJUTAN

I Gusti Ngurah Eka Pratama¹⁾, Tri Hayatining Pamungkas²⁾
E-mail: epartama@gmail.com¹⁾, epartama@gmail.com¹⁾

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ngurah Rai

ABSTRAK

Upaya pengurangan penggunaan beton dalam konstruksi berdampak pada pemilihan bahan alternatif untuk bahan konstruksi selain beton, salah satunya menggunakan baja. Baja untuk bisa diaplikasikan menjadi komponen struktur prosesnya juga cukup panjang, mulai dari pengolahan bijih besi sampai **diinstalasi** menjadi komponen struktur, **yang** sepanjang proses produksi sampai instalasi juga memberikan kontribusi terhadap emisi CO_{2e}. Untuk mendukung semangat struktur keberlanjutan di Kota Denpasar diperlukan suatu kajian berupa komparasi material struktur beton dan baja terkait jejak karbon keduanya. Analisa dilakukan dengan menyusun modeling bangunan lantai 1 yang dirancang dengan material struktur beton dan baja, yang selanjutnya dilakukan perencanaan struktur dan dihitung biaya serta kandungan karbonnya. Hasil kajian dan analisa berdasarkan simulasi dan modeling yang dibuat dapat disimpulkan biaya struktur beton di Kota Denpasar lebih murah dan memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan struktur baja. Simulasi ini merekomendasikan penggunaan struktur beton bertulang untuk mendukung struktur berkelanjutan, namun tetap mengupayakan pengurangan beton dalam konstruksi.

Kata kunci: emisi karbon, kandungan karbon, struktur berkelanjutan, kandungan karbon dalam beton, kandungan karbon dalam baja,

ABSTRACT

Efforts to reduce the use of concrete in construction have an impact on the selection of alternative materials for construction materials other than concrete, one of which is using steel. Steel to be applied as a structural component is also quite a long process, starting from processing iron ore to being installed into a structural component, which throughout the production process to installation also contributes to CO_{2e} emissions. To support the spirit of sustainable structures in Denpasar City, a study is needed in the form of a comparison of concrete and steel structural materials related to the carbon footprint of both. The analysis was carried out by compiling a modeling of a 1st floor building designed with concrete and steel structural materials, which was then carried out structural planning and calculated the costs and carbon content. The results of the study and analysis based on the simulation and modeling made can be concluded that the cost of concrete structures in Denpasar City is cheaper and has a lower carbon footprint compared to steel structures. This simulation recommends the use of reinforced concrete structures to support sustainable structures, but still strives to reduce concrete in construction.

Keywords: carbon emissions, embodied carbon, sustainable structures, embodied carbon in concrete, embodied carbon in steel

1. PENDAHULUAN

Salah satu definisi pembangunan berkelanjutan disampaikan dalam *Bruntland Report* (1987) yaitu: pembangunan yang memenuhi kebutuhan generasi sekarang tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri (Meutia, 2019), (Pertiwi, 2021). Salah satu upaya untuk mewujudkan konsep pembangunan berkelanjutan di bidang lingkungan adalah mengurangi emisi CO_{2e} dalam industri konstruksi dengan meminimalisir penggunaan volume semen, karena semen menyumbang sekitar 90% dari total emisi CO_{2e} yang terkait dengan beton. Strategi untuk mengurangi emisi CO_{2e} dalam industri konstruksi dapat dilakukan sebagai berikut (Adesina, 2020) :

1. Mengurangi klinker dalam semen (*Less clinker in cement*) (Atakan & DeCristofar, 2015), (Black, 2016).

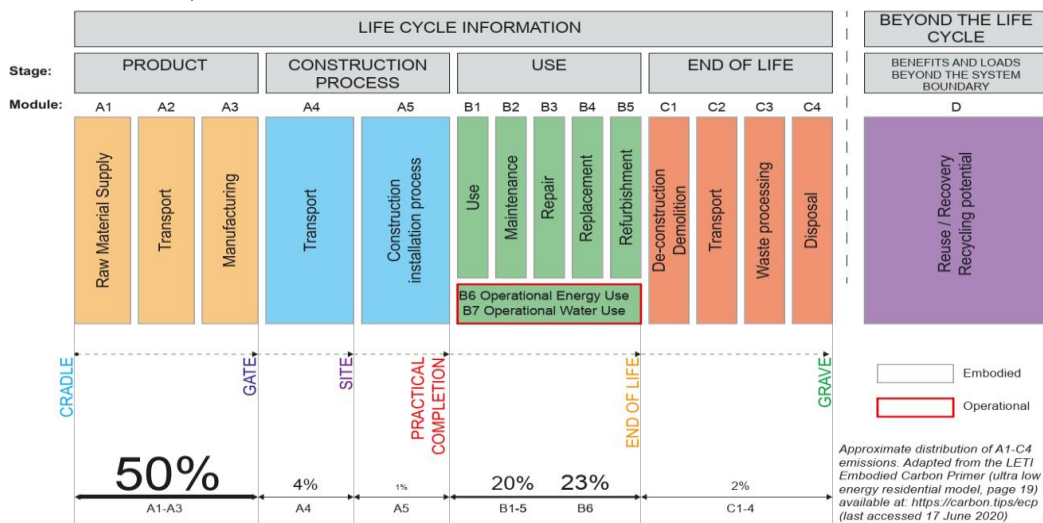
2. Mengurangi semen dalam beton (*Less cement in concrete*) (Watari & Nansai, 2022).
3. Mengurangi beton dalam konstruksi (*Less Concrete in construction*) (Aliento, 2021), (Sizirici & Byon, 2021).

Upaya pengurangan penggunaan beton dalam konstruksi berdampak pada pemilihan bahan alternatif untuk bahan konstruksi lain selain beton, salah satunya menggunakan baja. Baja untuk bisa diaplikasikan menjadi komponen struktur prosesnya juga cukup panjang, mulai dari pengolahan bijih besi sampai diinstalasi menjadi komponen struktur. Sepanjang proses produksi dan instalasi tersebut juga memberikan kontribusi terhadap emisi CO_{2e}. Upaya dalam mengurangi emisi karbon dalam pemanfaatan baja sebagai bahan konstruksi antara lain dengan melakukan kombinasi struktur kayu dengan baja. Baja difungsikan untuk memikul beban tarik dan kayu untuk memikul beban tekan (Chandler, 2021).

2. KAJIAN PUSTAKA

Dua material utama dalam dunia konstruksi sama-sama memberikan kontribusi terhadap emisi CO_{2e} harus ditetapkan secara tepat saat diaplikasikan pada struktur bangunan gedung, jika ingin merealisasikan semangat pengurangan emisi karbon. Pengetahuan tentang komparasi kandungan karbon pada elemen struktur beton dan baja sangat dibutuhkan dalam upaya untuk mewujudkan struktur yang berkelanjutan.

Kandungan karbon dihitung mulai saat produksi material dari bahan mentah sampai masa akhir keberadaan bangunan. Komponen kandungan karbon pada setiap tahapan disajikan pada Gambar 1 (Orr & Arnold, 2020).



Kandungan karbon dihitung dengan formulasi (Orr & Arnold, 2020):

$$EC = V * ECF$$

Dimana:

EC = Kandungan karbon (*Embodied Carbon*, kgCO_{2e})

V = kuantitas atau volume material yang dikerjakan (kg)

ECF = Faktor kandungan karbon (*Embodied Carbon factor*, kgCO_{2e}/kg)

Nilai ECF ditentukan mulai tahapan produksi (*Product*), konstruksi (*Construction*), Pemanfaatan bangunan (*Use*) dan masa akhir keberadaan bangunan (*End of live*). Tabel 1 sampai 5 menyajikan nilai faktor dalam menentukan jumlah kandungan karbon.

Tabel 1. Faktor emisi sesuai jenis material (Orr & Arnold, 2020).

Material	Type	Specification/details	A1–A3 ECF (kgCO ₂ e/kg)	Data source
Concrete	In situ: piling, substructure, superstructure	Unreinforced, C30/37, UK average ready-mixed concrete EPD[1] (35% cement replacement)	0.103	MPA, 2018[2]
		Unreinforced, C32/40, 25% GGBS cement replacement[3]	0.120	ICE V3[4]
		Unreinforced, C32/40, 50% GGBS cement replacement	0.089	ICE V3
		Unreinforced, C32/40, 75% GGBS cement replacement	0.063	ICE V3
		Unreinforced, C40/50, 25% GGBS cement replacement	0.138	ICE V3
		Unreinforced, C40/50, 50% GGBS cement replacement	0.102	ICE V3
		Unreinforced, C40/50, 75% GGBS cement replacement	0.072	ICE V3
	Precast	Unreinforced, C40/50 with average UK cement mix	0.178	ICE V3
		Reinforced, 150mm prestressed hollow core slab: British Precast Concrete Federation average EPD	50.2kgCO ₂ e/m ²	BPCF, 2017[5]
Steel	Reinforcement bars	UK: BRC EPD	0.684	BRC, 2019[6]
		Worldwide: Worldsteel LCI study data, 2018, world average	1.99	ICE V3
	PT strands	Assume the same as reinforcement bars		
	Structural sections	UK open sections: British Steel EPD	2.45	BS, 2020[7]
		Europe (excl. UK): Bauforumstahl[8] average EPD	1.13	Bauforumstahl, 2018
		Worldwide: Worldsteel LCI study data, 2018, world average	1.55	ICE V3
Galvanised profiled sheet (for decking)	UK: TATA Comflor EPD	2.74	TATA, 2018	
Blockwork	Precast concrete blocks	Lightweight blocks	0.28	ICE V3
Brick	Single engineering clay brick	Generic, UK	0.213	ICE V3
Timber, excl. carbon sequestration[9], [10]	Manufactured structural timber	CLT, 100% FSC/PEFC	0.437	ICE V3
		Glulam, 100% FSC/PEFC	0.512	ICE V3
	Studwork/framing/flooring	Softwood, 100% FSC/PEFC	0.263	ICE V3
Formwork	Plywood, 100% FSC/PEFC	0.681	ICE V3	
Plasterboard	Partitioning/ceilings	Minimum 60% recycled content	0.39	ICE V2
Intumescent paint	For steelwork	Specific EPD: Amotherm steel WB, Amonn	2.31	AMONN, 2019[11]

Data taken from CEC Table 2, and correct at time of publication. Check data sources to verify that data presented here are valid at time of your calculation.

Tabel 2. Faktor emisi moda transportasi (Orr & Arnold, 2020).

Mode	TEF _{mode} (gCO ₂ e/kg/km)	Source
Road transport emissions	0.10650	(BEIS, 2020)[1]
Sea transport emissions	0.01614	(BEIS, 2020)[2]
Freight flight emissions	0.59943	(BEIS, 2020)[3]
Rail transport emissions	0.02556	(BEIS, 2020)[4]

Tabel 3. Faktor emisi jarak pengiriman (Orr & Arnold, 2020).

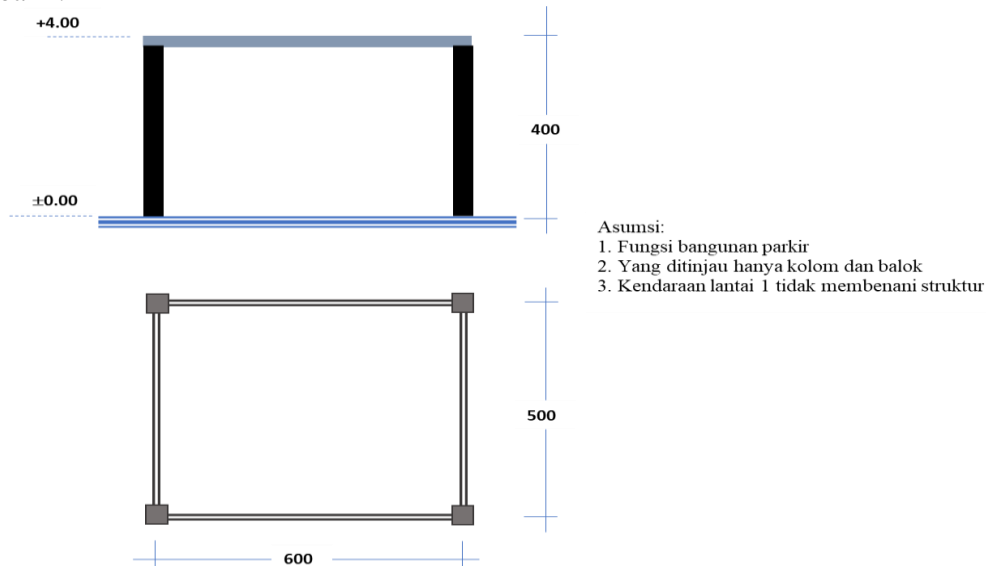
A4 Transport scenario	km travelled by road	A4 ECF (kgCO ₂ e/kg)
Locally manufactured	50	0.005
Nationally manufactured	300	0.032
European manufactured	1500	0.160

Tabel 4. Faktor emisi material sisa (Orr & Arnold, 2020).

Material/product	Waste rate (WR)	Waste factor (WF)[1]	WRAP Net Waste Tool reference
Concrete <i>in situ</i>	5%	0.053	Table 2, concrete <i>in situ</i>
Concrete precast (beams and frames)	1%	0.010	Table 2, concrete precast (large precast elements)
Steel reinforcement	5%	0.053	Appendix 1, frame: <i>in situ</i> concrete frame generic; Table 2, ferrous metals
Steel frame	1%	0.010	Appendix 1, frame: steel frame generic
Blockwork	20%	0.250	Table 2, bricks & blocks
Brick	20%	0.250	Table 2, bricks & blocks
Timber frames (beams, columns, braces)	1%	0.010	Appendix 1, frame: timber frame
Timber floors (joists, boards)	10%	0.111	Appendix 1, floor: wooden floor
Plasterboard	22.5%	0.290	Table 2, plasterboard; Table 3: boarding
Sprayed cementitious fire protection	10%	0.111	Table 3: cementitious sprays

3. METODE PENELITIAN

Kajian ini dilakukan menggunakan simulasi Perencanaan Struktur Gedung Ruang Publik dengan ukuran tapak 5x6m, 2 lantai, berlokasi di Kota Denpasar-Bali. Struktur akan dianalisa dengan modeling pada ETABS 21.2.0 dalam 2 alternatif dan selanjutnya dihitung kandungan karbon serta mengkomparasinya untuk ditetapkan struktur yang memiliki kandungan karbon terendah direkomendasikan untuk aplikasi di lapangan. Alternatif 1 menggunakan struktur beton bertulang dan alternatif 2 menggunakan struktur baja. Gambar simulasi gedung parkir dimaksud tersaji pada Gambar 2.



Gambar 2. Gambar simulasi kajian

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

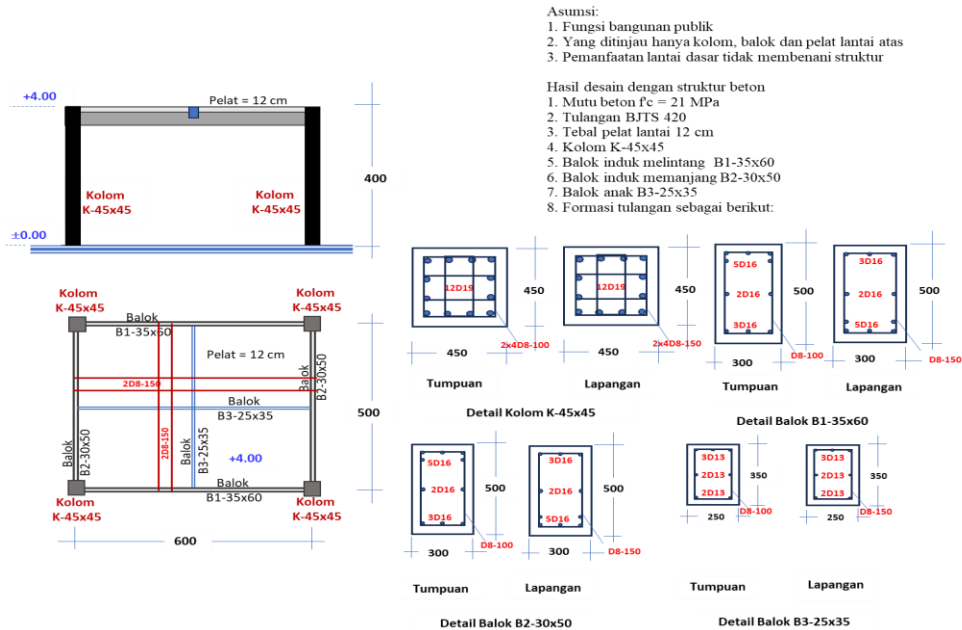
4.1 Hasil Desain Simulasi

Simulasi struktur pada Gambar 2 selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak ETABS 21.2.0 dengan menerapkan standar perencanaan gedung yaitu: Standar pembebanan minimum untuk gedung (SNI 1727:2020) (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2020), Standar pembebanan

gempa untuk gedung (SNI 1726:) (Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2020), Standar perencanaan struktur beton bertulang untuk gedung (SNI 2847:2019) (Badan Standardisasi Nasional, 2019) dan Standar perencanaan struktur bangunan baja (SNI 1729:2020) (Badan Standardisasi Nasional, 2020). Hasil desain akhir (*Final design*) untuk masing-masing alternatif struktur sebagai berikut:

a. Struktur Beton

Resume hasil desain akhir menggunakan struktur beton bertulang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Gambar desain akhir struktur beton bertulang simulasi

Hasil desain akhir dilanjutkan menghitung volume item pekerjaan, menyiapkan Analisa Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) dan menyusun Rencana Anggaran Biaya (RAB) untuk mengetahui biaya pembangunan fisik yang dibutuhkan. RAB bangunan simulasi dihitung dalam *MS Excel* menggunakan AHSP PUPR Tahun 2023 (Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, 2023), harga satuan upah dan bahan tahun 2024 untuk Kota Denpasar, mendapatkan biaya konstruksi struktur beton bertulang simulasi sebesar Rp. 73.667.000,- atau sebesar: Rp. 2.455.567,-/m². Nilai fisik bangunan akan digunakan untuk menghitung kontribusi emisi karbon saat proses instalasi yang ditetapkan sebesar 700 kgCO₂e per £100.000,- nilai fisik bangunan (Orr & Arnold, 2020).

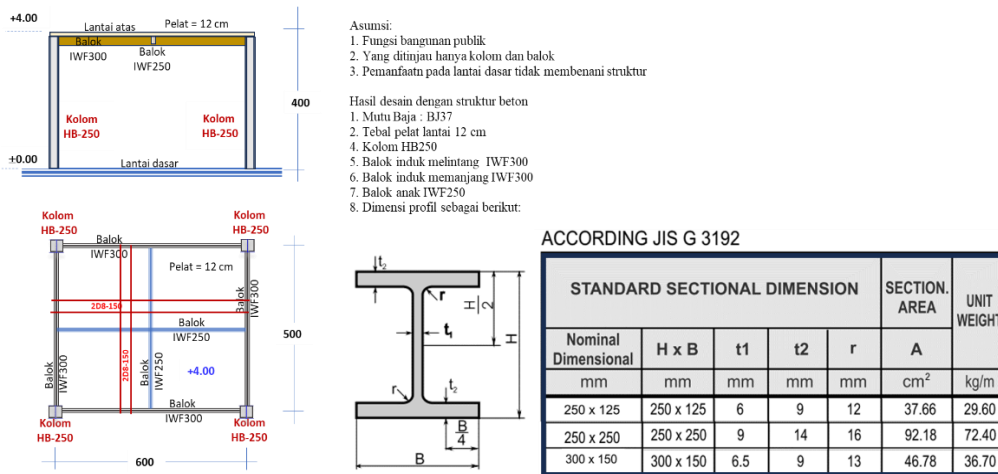
Dalam perhitungan kandungan karbon dibutuhkan volume bahan baku (*raw material*) untuk menyelesaikan seluruh bangunan. Material-material yang dihitung yaitu: beton tanpa tulangan, besi tulangan, kayu dan flywood.

b. Struktur Baja

Resume hasil desain akhir menggunakan struktur baja disajikan pada Gambar 4.

Hasil desain akhir dilanjutkan menghitung volume item pekerjaan, menyiapkan AHSP dan menyusun RAB untuk mengetahui biaya yang dibutuhkan. Nilai RAB yang dihitung dengan parameter yang sama pada struktur beton didapat biaya pelaksanaan konstruksi struktur baja sebesar Rp. 118.958.000,- atau setara Rp. 3.965.267,-/m². Volume bahan baku (*raw material*) untuk pekerjaan struktur baja yaitu berat baja profil juga ditambahkan untuk bisa ditetapkan berat baja profil untuk masing-masing dimensi profil yang dibutuhkan.

Kalkulasi dan Komparasi Kandungan Karbon dalam Pemilihan Bahan Struktur untuk Mewujudkan Struktur Berkelanjutan



Gambar 4. Gambar desain akhir struktur baja simulasi

Perbandingan biaya konstruksi jelas terlihat bahwa struktur baja lebih mahal 62% dibandingkan struktur dengan beton bertulang. Kondisi ini sama untuk wilayah di luar Bali namun dalam selisih persentase yang berbeda (Wahyuni & Octaviani, 2023), (Sabikun & Handika, 2018), (Apriani & Rahmat, 2020). Perbedaan ini muncul tergantung pada lokasi bangunan yang sedang dikerjakan, ketersediaannya tenaga kerja, volume pekerjaan dan faktor lainnya.

4.2 Perhitungan Kandungan Karbon

Perhitungan kandungan karbon masing-masing untuk struktur beton bertulang dan baja dihitung dengan bantuan *MS Excel* disajikan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Perhitungan kandungan karbon (EC) struktur beton bertulang simulasi

Material Struktur	Komponen	Quantity (t)	ECF (kgCO ₂ e/kg)			Kandungan Karbon, Embodied Carbon, EC (tCO ₂ e)			Total EC (tCO ₂ e)
			A1-A3	A4	A5w	A1-A3	A4	A5w	
Beton Bertulang	Beton, K250	26,430	0,120	0,005	0,008	4,54	0,20	0,28	Beton Bertulang: 5,013
	Tulangan	1,998	0,684	0,032	0,039	-	-	-	
Rangka Baja		-	2,450	0,032	0,025	-	-	-	Rangka Baja: -
Kayu	ayu prancah	1,072	0,263	0,032	0,004	0,28	0,03	0,00	Kayu: 0,596
	Plywood	0,382	0,681	0,032	0,008	0,26	0,01	0,00	
	Atap kayu	-	0,437	0,160	0,007	-	-	-	
BETON						BAJA TULANGAN/BAJA PROFIL			Total A1-A5w: 5,609
$A5w = WF \times (A13 + A4 + C2 + C34)$			$A5w = WF \times (A13 + A4 + C2 + C34)$			$A5a: 0,025$			
$WF = 0,053$ (tabel 5, beton cor ditempat)			$WF = 0,053$ Baja Kratau steel			Total A1-A5: 5,634			
$A13 =$ Penggunaan semen pada beton dengan kandungan pengganti semen 25%			$A13 =$ baja tulangan			Penyerapan (Sequestration): -2,384			
$= 0,684$ (tabel 2)			$= 0,684$ (tabel 2, baja tulangan)						
$A4 =$ Transportasi ke lokasi Pekerjaan			$A4 =$ Transportasi ke lokasi Pekerjaan						
$= 0,032$ (tabel 4, transportasi lokal)			$= 0,032$ (Nasional, dari propinsi lain)						
$C2 =$ Traportasi saat pembongkaran			$C2 =$ Traportasi saat pembongkaran						
$= 0,005$ (tabel 4, transportasi lokal)			$= 0,005$ (lokal)						
$C34 =$ material sisa (0,013, default/standar, beton dan baja)			$C34 =$ material sisa (1,77, default/standar, kayu)						
$= 0,013$			$= 1,77$						

Tabel 6. Perhitungan kandungan karbon (EC) struktur baja simulasi

Material Struktur	Komponen	Quantity (t)	ECF (kgCO ₂ e/kg)			Kandungan Karbon, Embodied Carbon, EC (tCO ₂ e)			Total EC (tCO ₂ e)
			A1-A3	A4	A5w	A1-A3	A4	A5w	
Beton Bertulang	Beton, K250	6,906	0,120	0,005	0,008	1,19	0,05	0,07	Beton Bertulang: 1,314
	Tulangan	0,528	0,684	0,032	0,039				
Rangka Baja		2,635	2,450	0,032	0,025	6,46	0,08	0,07	Rangka Baja: 6,606
Kayu	ayu prancah	0,527	0,263	0,032	0,004	0,14	0,02	0,00	Kayu: 0,234
	Plywood	0,105	0,681	0,032	0,008	0,07	0,00	0,00	
	Atap kayu	-	0,437	0,160	0,007	-	-	-	
BETON			BAJA TULANGAN/BAJA PROFIL			Total A1-A5w:			8,154

$$A5w = WF \times (A13 + A4 + C2 + C34) \quad A5w = WF \times (A13 + A4 + C2 + C34) \quad A5a: 0,041$$

$$WF = 0,053 \text{ (tabel 5, beton cor ditempat)} \quad WF = 0,053 \text{ Baja Kratau steel} \quad \text{Total A1-A5: } 8,195$$

$$A13 = \text{Penggunaan semen pada beton dengan kandungan pengganti semen 25\%} \quad A13 = \text{baja tulangan} \quad \text{Penyerapan (Sequestration): } -1,037$$

$$= 0,684 \text{ (tabel 2)} \quad = 0,684 \text{ (tabel 2, baja tulangan)}$$

$$A4 = \text{Transportasi ke lokasi Pekerjaan} \quad A4 = \text{Transportasi ke lokasi Pekerjaan}$$

$$= 0,032 \text{ (tabel 4, transportasi lokal)} \quad = 0,032 \text{ (Nasional, dari propinsi lain)}$$

$$C2 = \text{Transportasi saat pembongkaran} \quad C2 = \text{Transportasi saat pembongkaran}$$

$$= 0,005 \text{ (tabel 4, transportasi lokal)} \quad = 0,005 \text{ (lokal)}$$

$$C34 = \text{material sisa (0,013, default/standar, beton dan baja)} \quad C34 = \text{material sisa (1,77, default/standar, kayu)}$$

$$= 0,013 \quad = 1,77$$

Beberapa artikel menyajikan penggunaan baja murni, kandungan karbonnya lebih tinggi dibandingkan dengan baja daur ulang (*recycle*), namun demikian beton masih memiliki kandungan karbon lebih rendah, hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi selaras dengan kondisi riil, dimana jejak karbon pada beton lebih rendah dari baja (Chilana & Sattler, 2016). Tingginya jejak karbon pada baja disumbang pada proses produksi dan transportasi ke lokasi instalasi (Hemmati, 2024).

Dua hasil hitungan kandungan karbon menunjukkan beton memiliki jejak karbon (*Carbon footprint*) yang lebih rendah dibandingkan dengan struktur baja simulasi. Berdasarkan kedua perbandingan biaya dan kandungan jejak karbon, struktur beton lebih baik dibandingkan dengan baja, sehingga dalam simulasi ini dapat direkomendasikan Bangunan Ruang Publik menggunakan struktur beton bertulang.

Untuk bangunan-bangunan yang kehadiran baja dan beton tidak bisa dihindarkan karena tuntutan arsitektural maupun struktural, solusi agar konsep struktur berkelanjutan tetap terakomodir, maka langkah optimalisasi adalah suatu langkah langkah bijak.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis menggunakan simulasi struktur Bangunan Gedung Ruang Publik di Kota Denpasar dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Biaya pekerjaan struktur beton bertulang lebih rendah dibandingkan dengan struktur baja untuk per m² luas lantai bangunan.
2. Hasil kalkulasi jejak karbon, struktur beton bertulang memiliki kandungan karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan struktur baja.
3. Struktur beton direkomendasikan untuk menjadi alternatif struktur pada bangunan gedung simulasi, karena lebih ekonomis dan selaras dengan konsep struktur berkelanjutan.
4. Untuk meminimalisir jejak karbon dalam struktur, dapat diupayakan dengan melakukan optimalisasi dimensi struktur dan memanfaatkan material daur ulang (*recycle*).

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Bapak Dekan Fakultas Sains dan Teknologi beserta Kaprodi Teknik Sipil Universitas Ngurah Rai yang telah memberikan dukungan moril dalam penyelesaian kajian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan-rekan sejawat yang telah berkontribusi langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian kajian ini sampai dapat terpublikasi pada waktunya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adesina, A. (2020). Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions. *Environmental Challenges*, 1, 100004.
- Aliento, W. (2021). Seven Ways to Use Less Concrete and Save Money on your ProjectsTitle. (<https://www.procore.com/jobsite/seven-ways-to-use-less-concrete-and-save-money-on-your-projects>) diakses 15 September 2024.
- Apriani, W., & Rahmat, H. (2020). REVIEW DESIGN STRUKTUR BETON BERTULANG konstruksi gedung sebenarnya telah diteliti oleh banyak pihak. Penggunaan beton bertulang dalam konstruksi suatu bangunan bertingkat rendah maupun baja dari segi kinerja dan biaya akan menjadi lebih baik daripada be. 1(1), 8-16.
- Atakan, V., Sahu S., & DeCristofar, N. (2015). Low-Clinker Cements Sustainable alternatives. 3, 2–3.
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2020). *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Struktur*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural (ANSI/AISC 360-16, IDT)*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2020). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Black, L. (2016). Low clinker cement as a sustainable construction material. *Sustainability of construction materials*, 415-457.
- Chandler, D.L. (2021). Timber or steel? Study helps builders reduce carbon footprint of truss structures. (<https://news.mit.edu/2021/truss-structure-carbon-materials-1129>) diakses 15 September 2024.
- Chilana, L., Bhatt, A.H., Najafi, M., & Sattler, M. (2016). Comparison of carbon footprints of steel versus concrete pipelines for water transmission. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 66(5), 512-527.
- Hemmati, M., Messadi, T., Gu, H., Seddelmeyer, J., & Hemmati, M. (2024). Comparison of Embodied Carbon Footprint of a Mass Timber Building Structure with a Steel Equivalent. *Buildings*, 14(5).
- Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia. (2023). *Lampiran IV : Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Konstruksi Nomor 73/SE/Dk/2023 tentang Tata Cara Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia.
- Meutia, I. (2019). *Sustainability (Konsep, Kerangka, Standar, dan Indeks)*. Palembang: CV. Latifah.
- Orr, J., Gibbons, O., & Arnold, W. (2020). A brief guide to calculating embodied carbon. *Struct. Eng*, 98(7), 22-27.

- Pertiwi, N. (2021). *Implementasi Sustainable Development di Indonesia*. Bandung: Pustaka Ramadhan.
- Sabikun, A., & Handika, S.W. (2018). Kajian Empiris Perbandingan Biaya Konstruksi Baja dan Beton pada Pembangunan Gedung Fakultas Ilmu Pendidikan Universitas Tribhuwana Tungadewi Malang. *Prosiding Universitas Tribhuwana Tungadewi Malang*, 1, 9-10.
- Sizirici, B., Fseha, Y., Cho, C. S., Yildiz, I., & Byon, Y. J. (2021). A review of carbon footprint reduction in construction industry, from design to operation. *Materials*, 14(20), 6094.
- Wahyuni, N., Yakin, K., & Octaviani, B. (2023). Analisis Perbandingan Biaya dan Waktu Konstruksi Baja dan Beton (Studi Kasus: Proyek Pergudangan Logis Mako Ksatrian Yon 1 Marinir Gedangan Sidoarjo). *Concr. Constr. Civ. Integr. Technol.*, 1(1), 70-76.
- Watari, T., Cao, Z., Hata, S., & Nansai, K. (2022). Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions. *Nature communications*, 13(1), 4158.