



BAB 5 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Estimasi *Embodied Energy* Menggunakan *Software* SimaPro

Proses estimasi *embodied energy* menggunakan *software* SimaPro dilakukan sesuai dengan tahapan-tahapan metode penelitian pada Bab 3. Proses yang dilakukan dimulai dari penentuan basis data yang akan digunakan, penentuan proses pengolahan material, proses input data, hingga proses kalkulasi seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.3 sampai dengan Gambar 3.18. Hasil yang diperoleh dari proses estimasi menggunakan *software* SimaPro yaitu *output* berupa *embodied energy* dengan satuan *Mega Joule* (MJ). Estimasi *embodied energy* menggunakan *software* SimaPro terbagi menjadi tahap produksi dan tahap konstruksi yang diuraikan sebagai berikut:

a. Tahap produksi

Estimasi *embodied energy* dari *software* SimaPro pada tahap produksi dikalkulasi berdasarkan data desain campuran pada setiap material serta volume material yang terdapat pada Bab 4. Hasil estimasi *embodied energy* pada tahap produksi yang telah dikalkulasi menggunakan *software* SimaPro berdasarkan jenis material diuraikan sebagai berikut:

a.1. Material beton

Hasil estimasi *embodied energy* pada material beton yang diestimasi menggunakan *software* SimaPro diperlihatkan Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Material Beton Menggunakan *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Volume Beton (m ³)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	165,240	350.000
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	132,840	282.000
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	132,840	282.000
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	240,206	425.000
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	222,386	393.000
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	149,040	263.000

Tabel 5.1 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Material Beton Pada *Software* SimaPro (lanjutan)

Keterangan	Segmen (m)	Volume Beton (m ³)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	149,040	263.000
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	149,040	263.000
Total			2.521.000

a.2. Material baja

Hasil estimasi *embodied energy* pada material baja tulangan yang diestimasi menggunakan *software* SimaPro diperlihatkan Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Material Baja Tulangan Pada *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Volume Baja (kg)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	23.094,45	529.000
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	17.072,080	391.000
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	17.072,080	391.000
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	62.150,45	1.420.000
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	57.812,81	1.320.000
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	20.959,18	480.000
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	20.959,18	480.000
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	20.959,18	480.000
Total			5.491.000

a.3. Material aspal

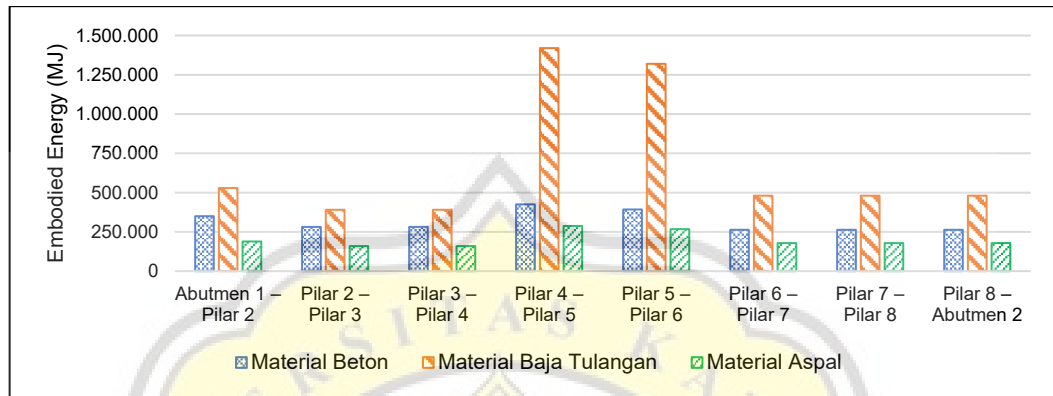
Hasil estimasi *embodied energy* pada material aspal yang diestimasi menggunakan *software* SimaPro diperlihatkan Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Material Aspal Pada *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Volume Aspal (m ³)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	17,952	189.000
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	14,432	159.000
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	14,432	159.000
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	26,096	288.000
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	24,160	267.000
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	16,192	179.000
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	16,192	179.000
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	16,192	179.000
Total			1.599.000



Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* pada material beton, baja, dan aspal menggunakan *software* SimaPro pada tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Estimasi *Embodied Energy* Pada Tahap Produksi Menggunakan *Software* SimaPro

b. Tahap konstruksi

Estimasi *embodied energy* pada tahap konstruksi menggunakan *software* SimaPro diestimasi berdasarkan konsumsi bahan bakar alat berat pada proses pekerjaan di lapangan yang telah diestimasi pada Bab 4. Hasil estimasi *embodied energy* pada tahap konstruksi diuraikan sebagai berikut:

b.1. Material beton

Alat berat yang digunakan pada tahap pekerjaan pengecoran material beton meliputi *concrete mixer truck* dan *concrete pump truck*. Hasil estimasi *embodied energy* pada alat berat *concrete mixer truck* dan *concrete pump truck* menggunakan *software* SimaPro diperlihatkan pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5.

Tabel 5.4 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Concrete Mixer Truck* Menggunakan *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	1.616,307	72.100
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	1.299,384	58.000
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	1.299,384	58.000
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	2.349,587	105.000

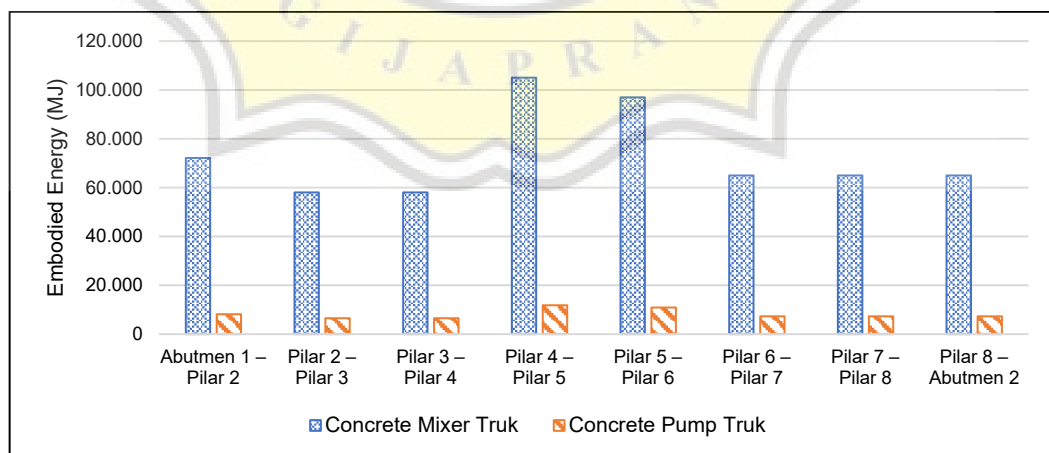
Tabel 5.4 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Concrete Mixer Truck* Menggunakan *Software* SimaPro (lanjutan)

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	2.175,280	97.000
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	1.457,845	65.000
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	1.457,845	65.000
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	1.457,845	65.000
Total			585.100

Tabel 5.5 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Concrete Pump Truck* Menggunakan *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	182,052	8.120
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	146,356	6.530
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	146,356	6.530
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	264,645	11.840
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	245,012	10.900
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	164,204	7.320
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	164,204	7.320
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	164,204	7.320
Total			65.880

Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* alat berat *concrete mixer truck* dan *concrete pump truck* menggunakan *software* SimaPro pada tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.2.

Gambar 5.2 Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Concrete Mixer Truck* dan *Concrete Pump Truck* Menggunakan *Software* SimaPro



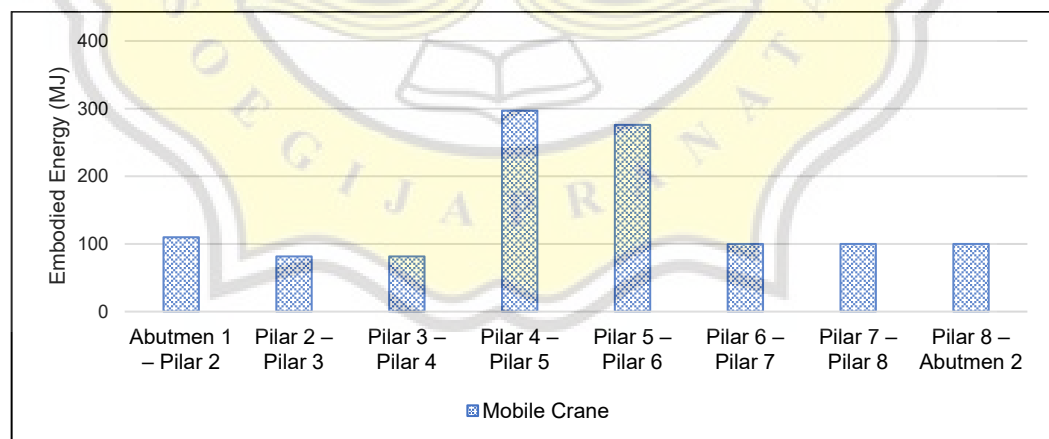
b.2. Material baja tulangan

Alat berat yang digunakan pada tahap pekerjaan pemasangan tulangan baja yaitu *mobile crane*. Estimasi *embodied energy* pada alat berat *mobile crane* yang diestimasi menggunakan *software* SimaPro diperlihatkan pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Mobile Crane* Menggunakan *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	2,470	110
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	1,830	81,6
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	1,830	81,6
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	6,650	297
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	6,190	276
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	2,240	99,9
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	2,240	99,9
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	2,240	99,9
Total			1.146

Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* alat berat *mobile crane* menggunakan *software* SimaPro pada tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3 Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Mobile Crane* Menggunakan *Software* SimaPro

b.3. Material aspal

Alat berat yang digunakan pada tahap pekerjaan lapisan perkerasan aspal AC-WC



meliputi *dump truck*, *asphalt finisher*, *tandem roller*, dan *pneumatic tire roller*. Estimasi *embodied energy* pada alat berat *dump truck*, *asphalt finisher*, *tandem roller*, dan *pneumatic tire roller* yang diestimasi menggunakan *software* SimaPro diperlihatkan pada Tabel 5.7 sampai dengan Tabel 5.8.

Tabel 5.7 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Dump Truck* Pada *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	85,298	3.800
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	68,573	3.060
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	68,573	3.060
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	123,995	5.530
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	114,796	5.120
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	76,935	3.430
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	76,935	3.430
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	76,935	3.430
Total			30.860

Tabel 5.8 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Asphalt Finisher* Pada *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	15,450	689
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	12,240	546
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	12,240	546
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	22,470	1.000
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	20,790	927
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	13,940	622
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	13,940	622
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	13,940	622
Total			5.574

Tabel 5.9 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Tandem Roller* Pada *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	21,840	974
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	17,560	783
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	17,560	783
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	31,750	1.410
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	29,400	1.310

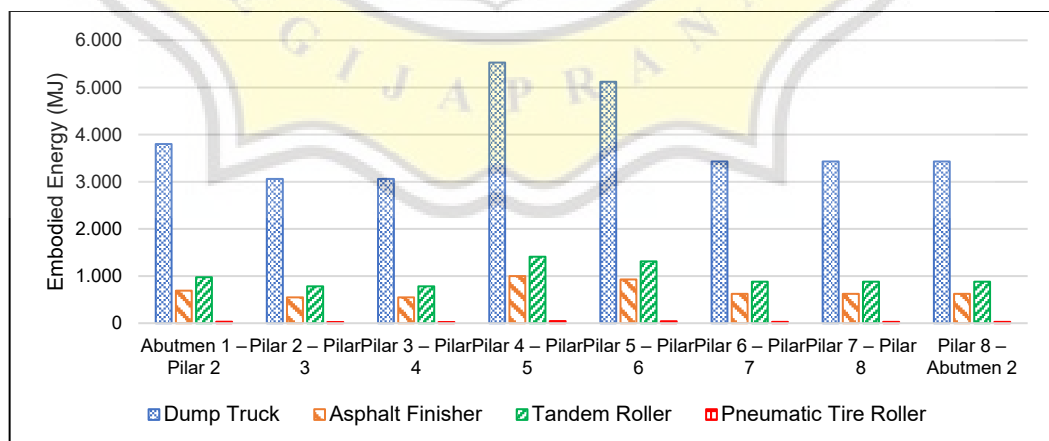
Tabel 5.9 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Tandem Roller* Pada *Software* SimaPro (lanjutan)

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	19,700	879
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	19,700	879
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	19,700	879
Total			7.897

Tabel 5.10 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Pneumatic Tire Roller* Pada *Software* SimaPro

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	0,700	31,2
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	0,560	25
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	0,560	25
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	1,020	45,5
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	0,940	41,9
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	0,630	28,1
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	0,630	28,1
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	0,630	28,1
Total			253

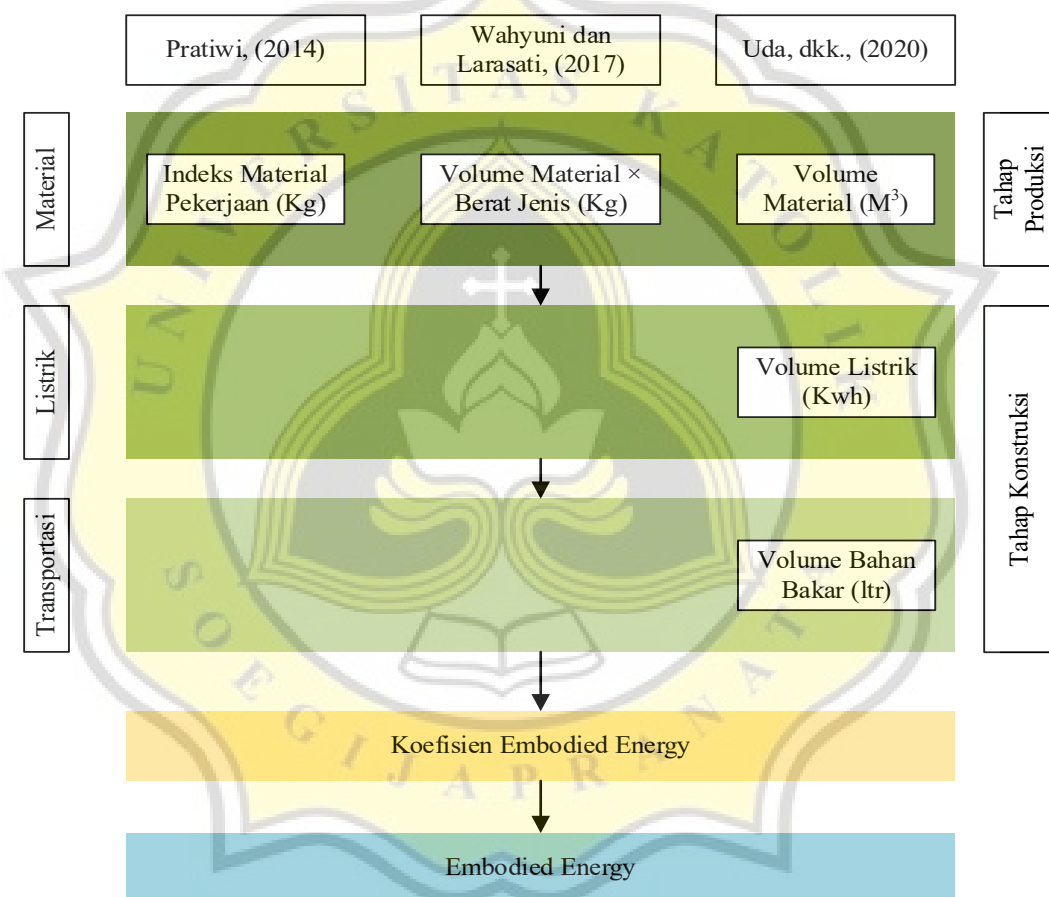
Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* alat berat *dump truck*, *asphalt finisher*, *tandem roller*, dan *pneumatic tire roller* menggunakan *software* SimaPro pada tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.4.

Gambar 5.4 Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Dump Truck*, *Asphalt Finisher*, *Tandem Roller*, dan *Pneumatic Tire Roller* Menggunakan *Software* SimaPro



5.2 Estimasi *Embodied Energy* Menggunakan Perhitungan Konvensional

Estimasi *embodied energy* pada perhitungan konvensional menggunakan Persamaan 2.1 sampai dengan Persamaan 2.12. Persamaan tersebut kemudian dilakukan proses penggabungan agar estimasi *embodied energy* dapat lebih komprehensif. Agar memudahkan proses penggabungan, terlebih dahulu menguraikan konsep perhitungan *embodied energy* yang diperlihatkan pada Gambar 5.5



Gambar 5.5 Konsep Estimasi *Embodied Energy*

Berdasarkan Gambar 5.5, maka persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung *embodied energy* diuraikan sebagai berikut:

a. Tahap produksi

Estimasi *embodied energy* pada tahap produksi material diestimasi berdasarkan



volume material yang terdapat pada satuan pekerjaan. Volume material harus menggunakan satuan kilogram (kg) agar dapat dikonversi ke dalam bentuk *embodied energy* menggunakan koefisien *Inventory of Carbon and Energy*. Oleh karena itu persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung *embodied energy* pada tahap produksi dapat menggunakan Persamaan 2.1. Hasil estimasi *embodied energy* pada tahap produksi struktur lantai jembatan diuraikan sebagai berikut:

a.1. Material beton

Estimasi *embodied energy* tahap produksi material beton segmen 40,8:

$$\begin{aligned} EE &= V_{\text{beton}} \times W_{\text{beton}} \times \text{Koef. } EE_{\text{beton}} \\ &= 165,24 \text{ m}^3 \times 2433,64 \text{ kg/m}^3 \times 0,82 \text{ MJ/kg} \\ &= 329.750,432 \text{ MJ} \end{aligned}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.11.

Tabel 5.11 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Material Beton Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Volume (m ³)	Berat Jenis (Kg/m ³)	Koef. EE (MJ/kg)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	165,240	2.433,64	0,82	329.750,432
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	132,840	2.433,64	0,82	265.093,485
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	132,840	2.433,64	0,82	265.093,485
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	240,206	2.433,64	0,82	479.350,445
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	222,386	2.433,64	0,82	443.789,124
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	149,040	2.433,64	0,82	297.421,959
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	149,040	2.433,64	0,82	297.421,959
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	149,040	2.433,64	0,82	297.421,959
Total					2.675.342,846

a.2. Material baja tulangan

Estimasi *embodied energy* tahap produksi material baja tulangan segmen 40,8:

$$\begin{aligned} EE &= V_{\text{baja}} \times \text{Koef. } EE_{\text{baja}} \\ &= 23.094,45 \text{ kg} \times 22,3 \text{ MJ/kg} \\ &= 515.006,235 \text{ MJ} \end{aligned}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan



pada Tabel 5.12.

Tabel 5.12 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Material Baja Tulangan Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Volume (kg)	Koef. EE (MJ/kg)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	23.094,450	22,3	515.006,235
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	17.072,080	22,3	380.707,384
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	17.072,080	22,3	380.707,384
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	62.150,450	22,3	1.385.955,035
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	57.812,810	22,3	1.289.225,663
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	20.959,180	22,3	467.389,714
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	20.959,180	22,3	467.389,714
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	20.959,180	22,3	467.389,714
Total				5.353.770,843

a.3. Material aspal

Estimasi *embodied energy* tahap produksi material aspal AC-WC segmen 40,8:

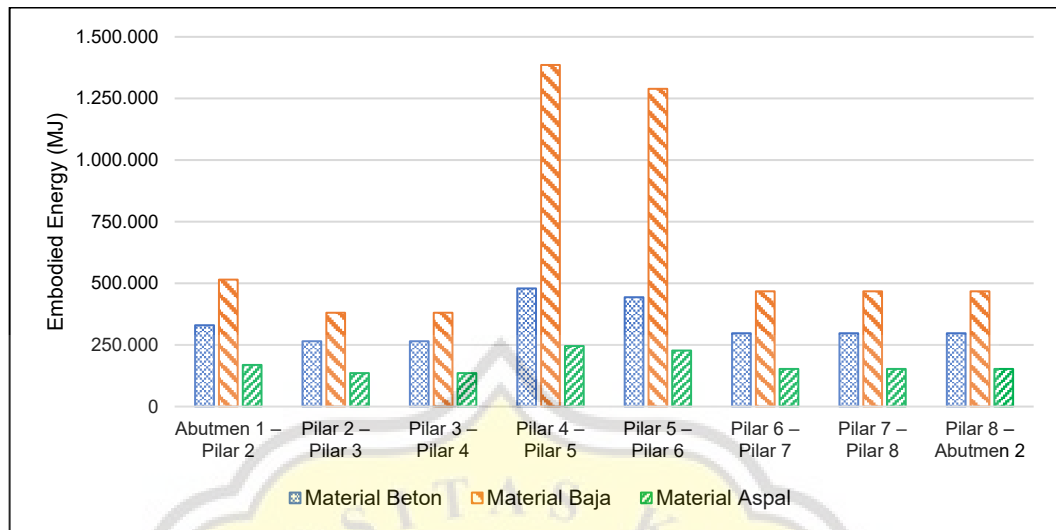
$$\begin{aligned}
 EE &= V_{\text{aspal}} \times W_{\text{aspal}} \times \text{Koef. EE}_{\text{aspal}} \\
 &= 17,952 \text{ kg} \times 2395 \text{ kg/m}^3 \times 3,93 \text{ MJ/kg} \\
 &= 168.970,507 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.13.

Tabel 5.13 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Material Baja Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Volume (m ³)	Berat Jenis (Kg/m ³)	Koef. EE (MJ/kg)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	17,952	2395	3,93	168.970,507
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	14,432	2395	3,93	135.839,035
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	14,432	2395	3,93	135.839,035
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	26,096	2395	3,93	245.628,451
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	24,160	2395	3,93	227.406,141
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	16,192	2395	3,93	152.404,771
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	16,192	2395	3,93	152.404,771
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	16,192	2395	3,93	152.404,771
Total					1.370.897,483

Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* pada material beton, baja, dan aspal menggunakan perhitungan konvensional tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Estimasi *Embodied Energy* Tiap Segmen Struktur Lantai Jembatan Pada Tahap Produksi Menggunakan Perhitungan Konvensional

b. Tahap konstruksi

Estimasi *embodied energy* pada tahap konstruksi diestimasi berdasarkan konsumsi bahan bakar alat berat yang dibutuhkan pada proses pekerjaan di lapangan. Total konsumsi tersebut kemudian dikalikan oleh koefisien *embodied energy*. Oleh karena itu persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung *embodied energy* pada tahap konstruksi berdasarkan Persamaan 2.11. Hasil estimasi *embodied energy* pada tahap konstruksi struktur lantai jembatan diuraikan sebagai berikut.

b.1. Material beton

Alat berat yang digunakan pada tahap pekerjaan pengecoran meliputi *concrete mixer truck* dan *concrete pump truck*. Estimasi *embodied energy* pada struktur lantai jembatan segmen 40,8 m menggunakan perhitungan konvensional diuraikan sebagai berikut:

Estimasi *embodied energy* alat berat *concrete mixer truck*:

$$V_t = 1.616,307 \text{ liter}$$

$$E_t = V_t \times CF_t$$

$$= 1.616,307 \text{ liter} \times 38,6 \text{ MJ/liter}$$

$$= 62.389,446 \text{ MJ}$$



Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.14.

Tabel 5.14 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Concrete Mixer Truck* Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	1.616,307	38,6	62.389,446
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	1.299,384	38,6	50.156,221
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	1.299,384	38,6	50.156,221
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	2.349,587	38,6	90.694,069
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	2.175,280	38,6	83.965,796
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	1.457,845	38,6	56.272,833
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	1.457,845	38,6	56.272,833
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	1.457,845	38,6	56.272,833
Total				506.180,253

Estimasi *embodied energy* alat berat *concrete pump truck*:

$$V_t = 182,052 \text{ liter}$$

$$E_t = V_t \times CF_t$$

$$= 182,052 \text{ liter} \times 38,6 \text{ MJ/liter}$$

$$= 7.027,211 \text{ MJ}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.15.

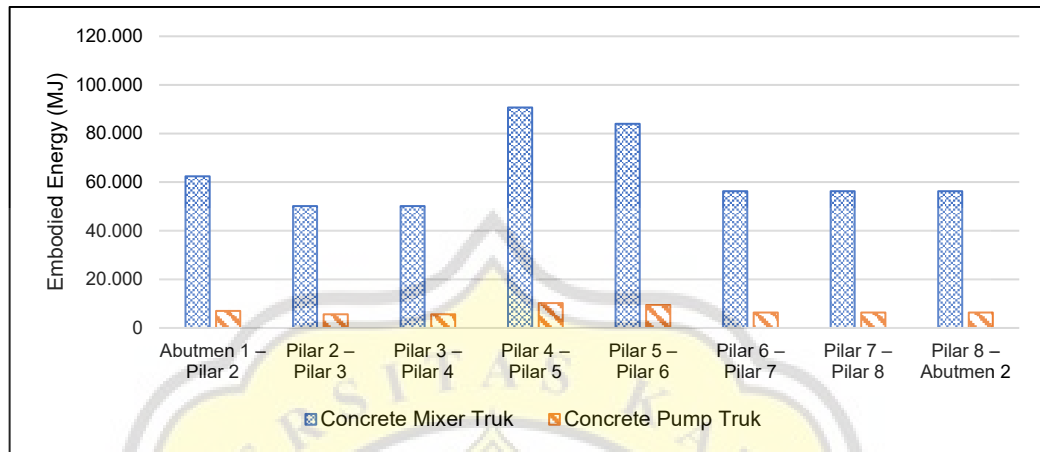
Tabel 5.15 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Concrete Pump Truck* Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	182,052	38,6	7.027,211
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	146,356	38,6	5.649,326
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	146,356	38,6	5.649,326
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	264,645	38,6	10.215,291
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	245,012	38,6	9.457,454
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	164,204	38,6	6.338,269
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	164,204	38,6	6.338,269
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	164,204	38,6	6.338,269
Total				57.013,414

Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* alat berat *concrete mixer truck* dan



concrete pump truck menggunakan perhitungan konvensional pada tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.7.



Gambar 5.7 Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Concrete Mixer Truck* dan *Concrete Pump Truck* Menggunakan Perhitungan Konvensional

b.2. Material baja tulangan

Alat berat yang digunakan pada tahap pekerjaan pemasangan tulangan yaitu *mobile crane*. Estimasi *embodied energy* pada struktur lantai jembatan segmen 40,8 m menggunakan perhitungan konvensional diuraikan sebagai berikut:

Estimasi *embodied energy* alat berat *mobile crane*:

$$\begin{aligned}
 V_t &= 2,470 \text{ liter} \\
 E_t &= V_t \times CF_t \\
 &= 2,470 \text{ liter} \times 38,6 \text{ MJ/liter} \\
 &= 95,342 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.16.

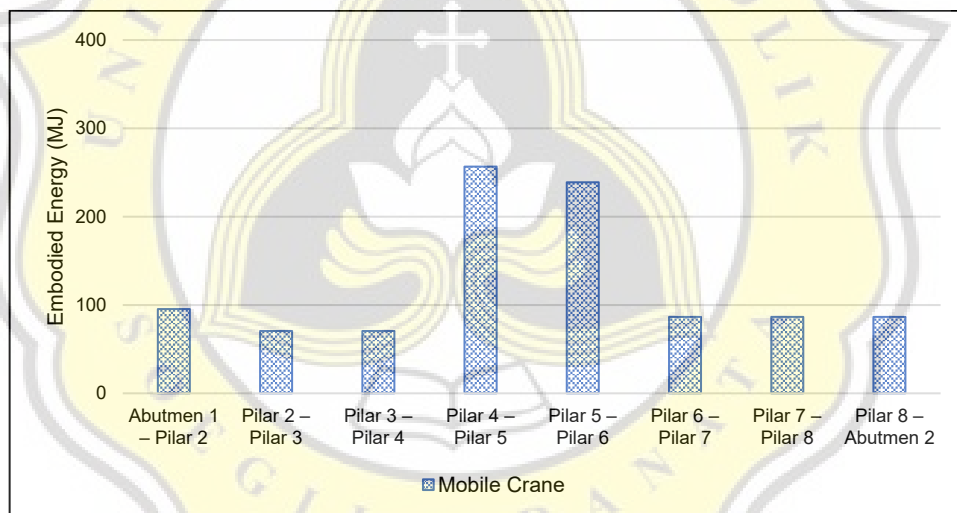
Tabel 5.16 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Mobile Crane* Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	Embodied Energy (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	2,470	38,6	95,342
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	1,830	38,6	70,638

Tabel 5.16 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Mobile Crane* Pada Perhitungan Konvensional (lanjutan)

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	1,830	38,6	70,638
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	6,650	38,6	256,690
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	6,190	38,6	238,934
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	2,240	38,6	86,464
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	2,240	38,6	86,464
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	2,240	38,6	86,464
Total				991,634

Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* alat berat *mobile crane* menggunakan perhitungan konvensional pada tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.8.

Gambar 5.8 Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Mobile Crane* Menggunakan Perhitungan Konvensional

b.3. Material aspal

Alat berat yang digunakan pada tahap pekerjaan lapisan perkerasan aspal AC-WC meliputi *dump truck*, *asphalt finisher*, *tandem roller*, dan *pneumatic tire roller*. Estimasi *embodied energy* pada struktur lantai jembatan segmen 40,8 m menggunakan perhitungan konvensional diuraikan sebagai berikut:

Estimasi *embodied energy* alat berat *dump truck*:



Tugas Akhir

Perbandingan Hasil Estimasi *Embodied Energy* Berdasarkan *Software* SimaPro Versi 9.4.0.2 *Faculty* dan Perhitungan Konvensional Pada Struktur Lantai Jembatan (Studi Kasus: Proyek Flyover Ganefo Mranggen)

$$V_t = 85,298 \text{ liter}$$

$$E_t = V_t \times CF_t$$

$$= 85,298 \text{ liter} \times 38,6 \text{ MJ/liter}$$

$$= 3.292,489 \text{ MJ}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.17.

Tabel 5.17 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Dump Truck* Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	85,298	38,6	3.292,489
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	68,573	38,6	2.646,903
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	68,573	38,6	2.646,903
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	123,995	38,6	4.786,213
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	114,796	38,6	4.431,141
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	76,935	38,6	2.969,696
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	76,935	38,6	2.969,696
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	76,935	38,6	2.969,696
Total				26.712,734

Estimasi *embodied energy* alat berat *asphalt finisher*:

$$V_t = 15,540 \text{ liter}$$

$$E_t = V_t \times CF_t$$

$$= 15,540 \text{ liter} \times 38,6 \text{ MJ/liter}$$

$$= 596,370 \text{ MJ}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.18.

Tabel 5.18 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Asphalt Finisher* Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	15,450	38,6	596,370
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	12,240	38,6	472,464
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	12,240	38,6	472,464
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	22,470	38,6	867,342
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	20,790	38,6	802,494

Tabel 5.18 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Asphalt Finisher* Pada Perhitungan Konvensional (lanjutan)

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	13,940	38,6	538,084
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	13,940	38,6	538,084
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	13,940	38,6	538,084
Total				4.825,386

Estimasi *embodied energy* alat berat *tandem roller*:

$$V_t = 21,840 \text{ liter}$$

$$E_t = V_t \times CF_t$$

$$= 21,840 \text{ liter} \times 38,6 \text{ MJ/liter}$$

$$= 843,024 \text{ MJ}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan pada Tabel 5.19.

Tabel 5.19 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Tandem Roller* Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	21,840	38,6	843,024
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	17,560	38,6	677,816
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	17,560	38,6	677,816
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	31,750	38,6	1.225,550
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	29,400	38,6	1.134,840
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	19,700	38,6	760,420
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	19,700	38,6	760,420
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	19,700	38,6	760,420
Total				6.840,306

Estimasi *embodied energy* alat berat *pneumatic tire roller*:

$$V_t = 0,7 \text{ liter}$$

$$E_t = V_t \times CF_t$$

$$= 0,7 \text{ liter} \times 38,6 \text{ MJ/liter}$$

$$= 27,020 \text{ MJ}$$

Selanjutnya data diestimasi dengan bantuan *Microsoft Excel* yang diperlihatkan

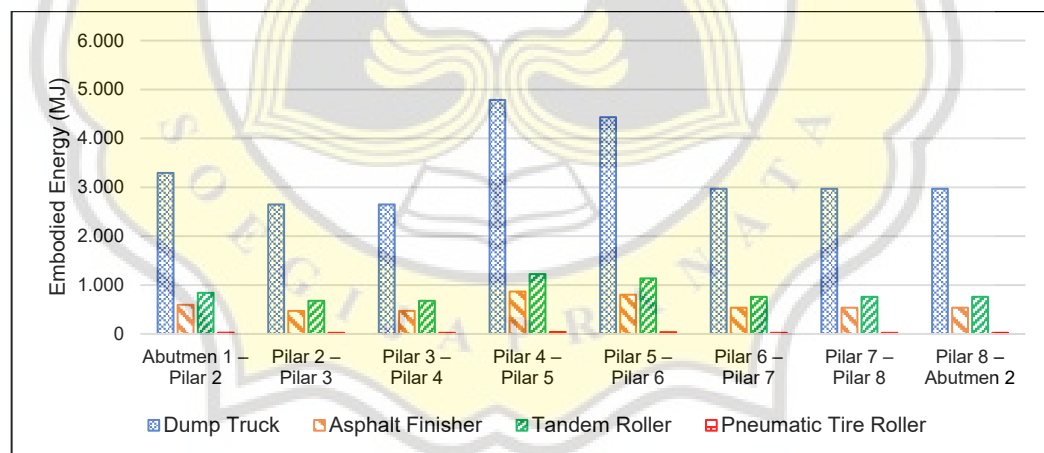


pada Tabel 5.20.

Tabel 5.20 Hasil Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Pneumatic Tire Roller* Pada Perhitungan Konvensional

Keterangan	Segmen (m)	Vt (liter)	CFt (MJ/liter)	<i>Embodied Energy</i> (MJ)
Abutmen 1 – Pilar 2	40,8	0,700	38,6	27,020
Pilar 2 – Pilar 3	32,8	0,560	38,6	21,616
Pilar 3 – Pilar 4	32,8	0,560	38,6	21,616
Pilar 4 – Pilar 5	59,31	1,020	38,6	39,372
Pilar 5 – Pilar 6	54,91	0,940	38,6	36,284
Pilar 6 – Pilar 7	36,8	0,630	38,6	24,318
Pilar 7 – Pilar 8	36,8	0,630	38,6	24,318
Pilar 8 – Abutmen 2	36,8	0,630	38,6	24,318
Total				218,862

Perbandingan hasil estimasi *embodied energy* alat berat *dump truck*, *asphalt finisher*, *tandem roller*, dan *pneumatic tire roller* menggunakan perhitungan konvensional pada tiap-tiap segmen struktur lantai jembatan diperlihatkan pada Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Estimasi *Embodied Energy* Alat Berat *Dump Truck*, *Asphalt Finisher*, *Tandem Roller*, dan *Pneumatic Tire Roller* Menggunakan Perhitungan Konvensional

5.3 Perbandingan Estimasi *Embodied Energy*

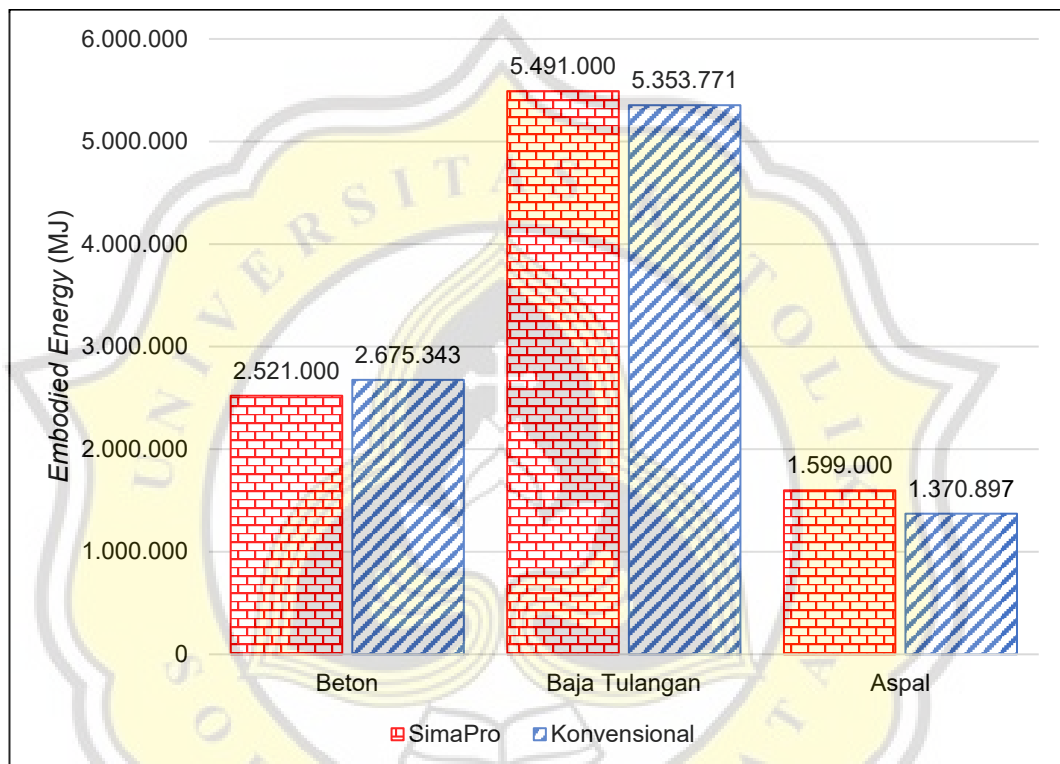
Estimasi *embodied energy* yang dilakukan pada penelitian ini meliputi tahap produksi dan tahap konstruksi pada komponen struktur lantai jembatan.



Berdasarkan analisis data estimasi *embodied energy* yang telah diolah pada Sub Bab 5.1 dan 5.2, perbandingan estimasi *embodied energy* diuraikan sebagai berikut:

a. Perbandingan estimasi *embodied energy* tahap produksi

Perbandingan estimasi *embodied energy* menggunakan *software* SimaPro dan perhitungan konvensional pada tahap produksi diperlihatkan pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Perbandingan Estimasi *Embodied Energy* Pada Tahap Produksi

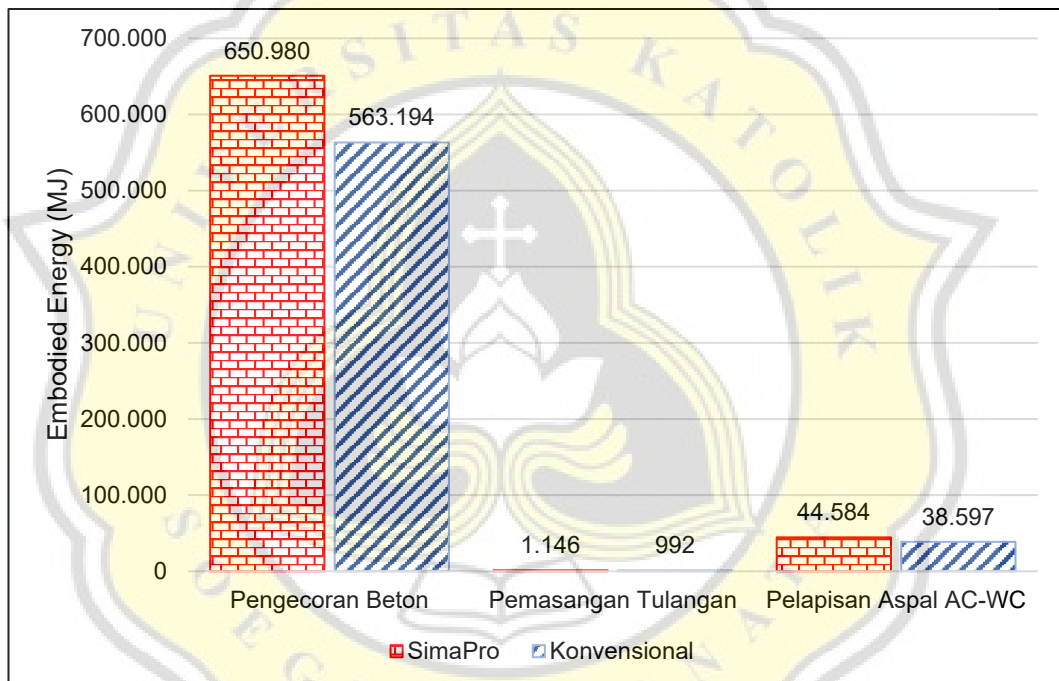
Berdasarkan Gambar 5.10, besar *embodied energy* pada material beton memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 154.342,846 MJ atau sebesar 2,97% lebih besar pada metode perhitungan konvensional. Besar *embodied energy* pada material baja tulangan memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 137.229,016 MJ atau sebesar 1,27% lebih besar pada metode *software* SimaPro. Sedangkan pada material aspal, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 228.102,517 MJ atau sebesar 7,68% lebih besar pada metode perhitungan menggunakan *software* SimaPro. Besar nilai satuan *embodied energy* yang digunakan pada *software* SimaPro dan perhitungan konvensional diperlihatkan pada Tabel 5.21.

Tabel 5.21 Nilai Satuan *Embodied Energy* Pada Material

Material	<i>Embodied Energy</i> (MJ/kg)	
	SimaPro	Konvensional
Beton	0,77	0,82
Baja Tulangan	23,87	22,3
Aspal	4,58	3,93

b. Perbandingan estimasi *embodied energy* tahap konstruksi

Perbandingan estimasi *embodied energy* menggunakan *software* SimaPro dan perhitungan konvensional pada tahap konstruksi diperlihatkan pada Gambar 5.11.

Gambar 5.11 Perbandingan Estimasi *Embodied Energy* Pada Tahap Konstruksi

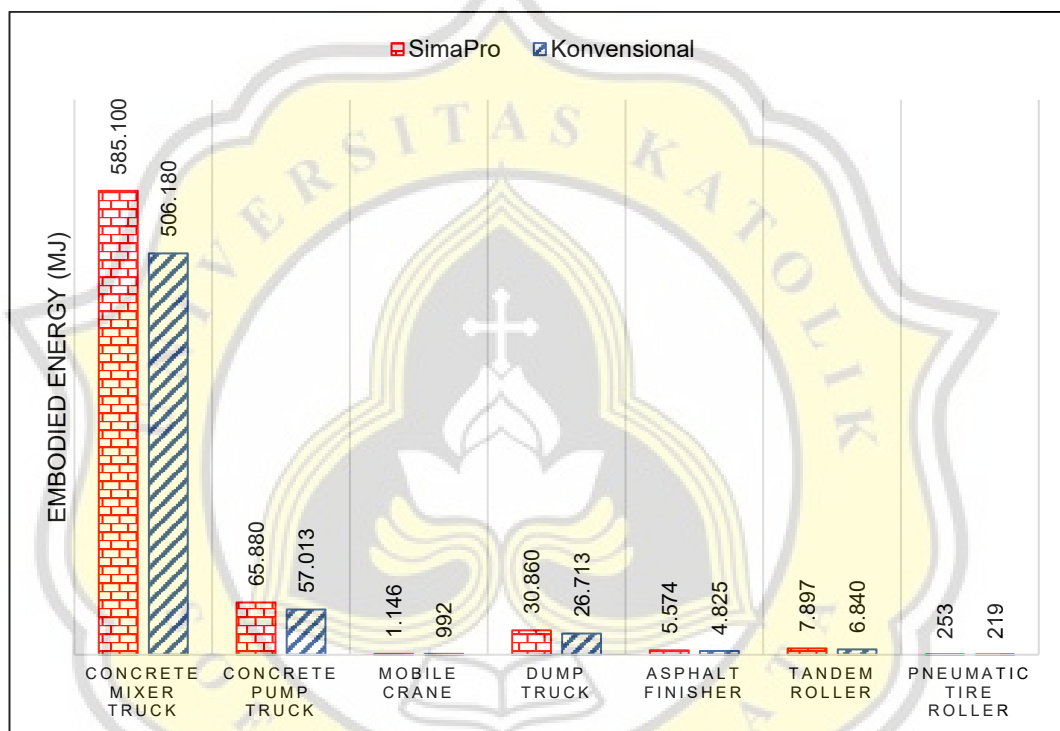
Berdasarkan Gambar 5.11, besar *embodied energy* pada pekerjaan pengecoran beton memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 87.786,332 MJ atau sebesar 7,23% lebih besar pada metode perhitungan menggunakan *software* SimaPro. Besar *embodied energy* pada pekerjaan pemasangan tulangan memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 154,266 MJ atau sebesar 7,22% lebih besar pada metode perhitungan menggunakan *software* SimaPro. Sedangkan pada pekerjaan lapisan aspal AC-WC, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 5.986,612 MJ atau



sebesar 7,20% lebih besar pada metode perhitungan menggunakan *software* Simapro.

c. Perbandingan estimasi *embodied energy* alat berat konstruksi

Perbandingan estimasi *embodied energy* menggunakan *software* SimaPro dan perhitungan konvensional untuk alat berat konstruksi yang digunakan diperlihatkan pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12 Perbandingan Estimasi *Embodied Energy* Pada Alat Berat Konstruksi

Berdasarkan Gambar 5.12, besar *embodied energy* pada alat berat *concrete mixer truck* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 78.919,747 MJ atau 7,23% lebih besar menggunakan *software* SimaPro. Untuk alat berat *concrete pump truck*, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 8.866,586 MJ atau 7,21% lebih besar menggunakan *software* SimaPro. Untuk alat berat *mobile crane*, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 154,266 MJ atau 7,22% lebih besar menggunakan *software* SimaPro. Untuk alat berat *dump truck*, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 4.147,266 MJ atau 7,20%



lebih besar menggunakan *software* SimaPro. Untuk alat berat *asphalt finisher*, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 748,614 MJ atau 7,20% lebih besar menggunakan *software* SimaPro. Untuk alat berat *tandem roller*, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 1.056,694 MJ atau 7,17% lebih besar menggunakan *software* SimaPro. Untuk alat berat *pneumatic tire roller*, besar *embodied energy* memiliki selisih perbedaan nilai sebesar 34,038 MJ atau 7,22% lebih besar menggunakan *software* SimaPro.

5.4 Pembahasan

Pembahasan pada penelitian ini dilakukan dengan mengaitkan hasil penelitian yang telah diperoleh dengan kajian pada bab-bab sebelumnya. Berdasarkan hasil estimasi menggunakan *software* SimaPro dan perhitungan konvensional, hal-hal yang terkait dengan proses estimasi diuraikan sebagai berikut:

- a. Hasil estimasi *embodied energy* pada material beton, baja dan aspal yang diperlihatkan pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.6 memperlihatkan bahwa panjang struktur lantai jembatan mulai dari pilar 4 sampai pilar 5 memiliki *embodied energy* yang paling besar diantara segmen lainnya. Hal tersebut disebabkan karena struktur lantai jembatan mulai dari pilar 4 sampai pilar 5 merupakan struktur yang terpanjang diantara yang lain dengan panjang 59,31 m dan memiliki volume material paling besar dengan total volume beton 240,206 m³, volume baja tulangan 62.150,450 kg serta volume aspal AC-WC 26,096 m³. Sehingga, semakin besar volume material pada suatu komponen struktur, semakin besar *embodied energy* yang dihasilkan.
- b. Metode estimasi dari *software* SimaPro dan perhitungan konvensional pada penelitian ini termasuk ke dalam metode *life cycle assessment* berbasis proses dimana metode ini sangat bergantung terhadap basis data yang digunakan pada proses estimasi. Nilai satuan *embodied energy* pada material yang terdapat pada basis data yang digunakan pada penelitian ini memiliki besar yang berbeda pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Perbandingan besar nilai satuan *embodied energy* material yang terdapat pada basis data EcoInvent diperlihatkan pada Tabel 5.22 dan Tabel 5.23.

Tabel 5.22 Perbedaan Estimasi Nilai *Embodied Energy* Pada Basis Data EcoInvent

Sumber	Lokasi Geografis	Estimasi Nilai <i>Embodied Energy</i> Material (MJ/kg)		
		Beton	Baja Tulangan	Aspal
Hasil Penelitian	<i>Average Global Production (R.o.W)</i>	0,77	23,87	4,58
Wang dan Pan (2018)	Hong Kong	1,09	17,54	14,71

Berdasarkan Tabel 5.22, besar *embodied energy* yang terdapat pada basis data EcoInvent dengan input proses material yang digunakan berasal dari rata-rata *global production* untuk material baja tulangan memiliki nilai lebih besar dari penelitian yang telah dilakukan oleh Wang dan Pan (2018) dengan input proses material yang digunakan disesuaikan dengan negara Hong Kong. Hal tersebut dikarenakan perbedaan lokasi geografis yang digunakan untuk analisis *embodied energy*.

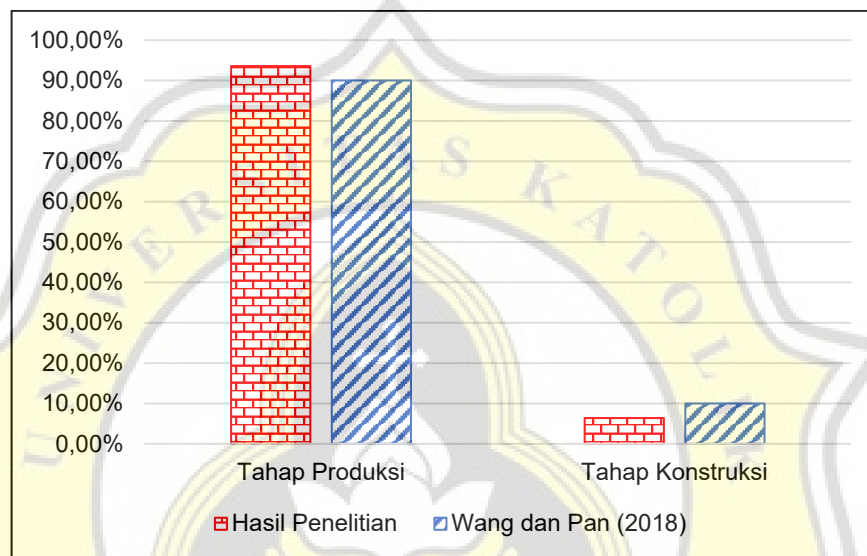
Tabel 5.23 Perbedaan Estimasi Nilai *Embodied Energy* Pada Basis Data *Inventory of Carbon and Energy*

Sumber	Versi Basis Data	Estimasi Nilai <i>Embodied Energy</i> Material (MJ/kg)		
		Beton	Baja Tulangan	Aspal
Hasil Penelitian	Versi 2.0	0,82	22,3	3,93
Uda, dkk., (2020)	Versi 1.6a	1,24	24,6	2,41

Berdasarkan Tabel 5.23, besar *embodied energy* menggunakan metode perhitungan konvensional baja tulangan dengan basis data yang digunakan *Inventory of Carbon and Energy* versi 2.0 tahun 2011 memiliki nilai lebih kecil dibandingkan dengan koefisien yang digunakan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Uda, dkk., (2020) dengan basis data yang digunakan ICE versi 1.6a tahun 2008. Hasil perbandingan dengan penelitian sebelumnya yang diperlihatkan pada Tabel 5.22 dan Tabel 5.33 membuktikan bahwa basis data yang digunakan mempengaruhi besar estimasi *embodied energy*. Hal tersebut didukung dengan hasil analisis pada penelitian yang telah dilakukan oleh Dixit, dkk., (2010) yaitu salah satu faktor yang dapat mempengaruhi *embodied energy* diantaranya lokasi wilayah dan usia dari sumber basis data yang digunakan.



- c. Hasil perbandingan estimasi *embodied energy* pada tahap produksi material dan tahap konstruksi menggunakan dua metode yang berbeda berdasarkan Gambar 5.10 dan Gambar 5.11 menunjukkan bahwa pada tahap produksi menghasilkan *embodied* lebih besar daripada tahap konstruksi. Hasil tersebut memiliki kesamaan dengan penelitian yang telah dilakukan Wang dan Pan (2018) dengan hasil perbandingan diperlihatkan pada Gambar 5.13.



Gambar 5.13 Hasil Perbandingan Estimasi *Embodied Energy* Tahap Produksi dan Tahap Konstruksi Dengan Penelitian Terdahulu

Berdasarkan Gambar 5.13, hasil estimasi *embodied energy* pada penelitian ini sekitar 93% dikonsumsi pada tahap produksi, sedangkan pada penelitian Wang dan Pan (2018) menunjukkan bahwa tahap produksi rata-rata mengkonsumsi *embodied energy* sebesar 90%. Hal tersebut disebabkan karena banyaknya proses pengolahan material mentah pada penyusunan material konstruksi yang membutuhkan energi seperti proses pemanasan dan proses mekanis dengan energi listrik. Sedangkan pada tahap konstruksi, penggunaan energi paling besar terdapat pada konsumsi bahan bakar pada alat-alat berat konstruksi yang digunakan selama proses konstruksi.

- d. Jenis material dalam melakukan estimasi *embodied energy* dapat berpengaruh terhadap hasil *embodied energy*. Berdasarkan Gambar 5.10, material konstruksi



yang mengkonsumsi *embodied energy* dengan metode *software* SimaPro maupun perhitungan konvensional yaitu material baja tulangan. Hasil tersebut memiliki kesamaan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Wang dan Pan (2018), Biswas, (2014), dan Gunawardana, dkk., (2014) yang diperlihatkan pada Tabel 2.24.

Tabel 2.24 Hasil Perbandingan Estimasi *Embodied Energy* Pada Material Beton dan Baja

Sumber	Tahun	Total <i>Embodied Energy</i> (%)		
		Beton	Baja tulangan	Baja Struktural
Hasil Penelitian	2022	27,35	57,04	-
Wang dan Pan	2018	11,04	14,19	18,77
Biswas	2014	31	10	-
Gunawerdana, dkk.	2014	27,9	-	41,8

Berdasarkan Tabel 2.24, total *embodied energy* yang terdapat pada proyek konstruksi pada penelitian ini serta penelitian terdahulu pada material baja (baja tulangan maupun baja struktural) lebih besar daripada material beton. Hal tersebut disebabkan karena intensitas energi yang digunakan saat proses pengolahan material baja lebih besar daripada produksi material beton dengan estimasi 10% lebih besar (Gunawardana, dkk., 2014).

- e. Jenis alat berat yang digunakan mengkonsumsi *embodied energy* yang berbeda-beda. Berdasarkan Gambar 5.12, alat berat *concrete truck mixer* dan *dump truck* merupakan alat yang paling besar mengkonsumsi *embodied energy*. Hal tersebut disebabkan karena alat *concrete mixer truck* dan *dump truck* merupakan alat yang melakukan perjalanan mulai dari lokasi pembuatan beton dan aspal menuju ke lokasi proyek. Selama perjalanan tersebut, diindikasikan bahwa energi yang dikonsumsi oleh alat berat *concrete mixer truck* dan *dump truck* memiliki jumlah yang besar.