
PEMODELAN ESTIMASI DAMPAK LINGKUNGAN PADA STRUKTUR BAWAH INFRASTRUKTUR JEMBATAN GIRDER BETON

Okty Diana Wulan Sari

Okty Diana Wulan Sari, Universitas Sains dan Teknologi Jayapura, email: oktydiana.ustj@gmail.com

ABSTRAK

Sustainability analysis (analisis keberlanjutan) digunakan untuk mengurangi emisi dari konstruksi jembatan. Sebagai parameternya digunakan tiga pilar dari analisis keberlanjutan untuk melakukan penilaian sistem infrastruktur transportasi. Salah satu cara yang populer yakni untuk mengevaluasi keberlanjutan suatu proyek adalah dengan menganalisis siklus hidup (*life cycle analysis*). Secara khusus, penilaian siklus hidup digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan selama umur suatu produk. Pada dasarnya kebanyakan alat yang digunakan sebagai penilaian siklus hidup untuk infrastruktur jembatan yakni menggunakan input yang terperinci guna menghitung dampak lingkungan pada suatu proyek. Hal tersebut masih dirasa tidak efektif bagi pihak perancang untuk mengevaluasi berbagai desain pada tahapan awal. Sehingga, tujuan dari penelitian ini yakni untuk mengembangkan model *Life Cycle Analysis* (LCA) untuk menilai infrastruktur jembatan. Model LCA ini berorientasi pada *Process Based Analysis* (PBA). Guna mendapatkan kevalidan data maka pada penelitian ini menggunakan analisis data berbasis itemisasi (*itemized based analysis*) yakni menggunakan data terperinci dari rencana anggaran biaya (RAB). Penelitian ini menggunakan jenis jembatan dengan spesifikasi teknik konstruksi bangunan atas dengan PC-Box Girder dengan metode Advancing Shoring Method (ASM). Hasil penelitian ini terbagi menjadi *Life Cycle Inventory* (LCI) dan *Life Cycle Assessment* (LCA). Daftar inventaris berupa data material dan peralatan yang digunakan pada saat pembangunan jembatan girder beton untuk menyelesaikan analisis LCA sekitar 55% dari data pada bagian bawah jembatan (*substructure*). Dalam hal persediaan data mengenai alat berat, data yang digunakan yakni 70% untuk *substructure*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi dari GWP pada saat pembangunan pondasi dan tiang jembatan terlihat lebih signifikan dibandingkan dengan emisi yang berasal dari ADPE dan smog. Hal ini terjadi karena jumlah material dari pondasi pada jembatan girder beton memiliki porsi yang besar dari *ready-mix concrete* dan *reinforcement cage* (jalanan penulangan) yang mempengaruhi total emisi GWP.

Kata kunci: *Sustainability, LCA Model, Jembatan Girder Beton, Analisis Berkelanjutan*

1. PENDAHULUAN

Peningkatan tingkat perubahan iklim menjadi topik yang populer karena menimbulkan dampak yang signifikan pada lingkungan dan manusia. Hal ini dibuktikan dengan adanya respon dari *International Political* di *Rio Earth Summit* pada tahun 1992. Dampak yang paling signifikan berasal dari efek gas rumah kaca atau *Greenhouse Gas Effect* (GHG) (Gillet et al., 2011). Pada tahun 2014, bidang konstruksi memberikan kontribusi efek gas rumah kaca sebesar 19,6% (*Statistical Pocket Book*, 2016) yang berasal dari penggunaan transportasi. Selain itu, penggunaan alat berat yang digunakan pada area proyek konstruksi menyumbang emisi yang berasal dari CO₂ (Hajji and Lewis, 2013). Emisi dari CO₂ juga ditemukan pada penggunaan material khususnya produk dari beton serta baja yang mana merupakan material utama dari infrastruktur jembatan (Gambatese, 2005; Du, 2012). Penggunaan analisis berkelanjutan (*sustainability analysis*) perlu digunakan untuk mengurangi emisi dari konstruksi pembangunan jembatan. Tiga pilar dari *sustainability* digunakan sebagai parameter yang mempunyai fungsi menilai infrastruktur pada sistem transportasi. Salah satunya yang populer untuk mengevaluasi suatu keberlanjutan proyek

adalah *life cycle analysis* (LCA). Secara khusus, LCA digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan sepanjang umur produk dari bahan baku hingga akhir masa pakai produk. Dalam dekade terakhir, terdapat beberapa sarana yang dirancang untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari infrastruktur transportasi seperti jalan, jembatan, terowongan, dan sebagainya. Sarana untuk menilai LCA yang paling populer saat ini sudah dirancang untuk menilai dampak lingkungan seperti *Infrastructure Sustainability* (IS), *Elinkaareltaan Tarkoituksenmukainen Silta* (ETSI), dan *The Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects* (PaLATE). Selanjutnya, beberapa penelitian sebelumnya telah mengemukakan perihal evaluasi kinerja lingkungan pada jembatan beton serta baja (Horvath and Hendrickson, 1998; Gervásio and Silva, 2008; Kendall 2004; Rental 2010; Zhang et al., 2012; Dequidt 2012). Dari penelitian sebelumnya memperlihatkan dampak lingkungan dengan membandingkan beberapa bahan material, komponen, serta tahapan siklus hidup. Dengan melihat hal ini, maka, penelitian ini berupaya untuk menganalisa dampak lingkungan pada jembatan girder beton dengan menggunakan *PC-box girder* serta penggunaan metode ASM yaitu *Advancing Shoring Method*. Khususnya pada struktur jembatan dibagian bawah (*substructure*) serta pada tahapan saat di area konstruksi. Pemilihan jenis metode pembangunan jembatan dipilih berdasarkan metode yang populer digunakan di Taiwan.

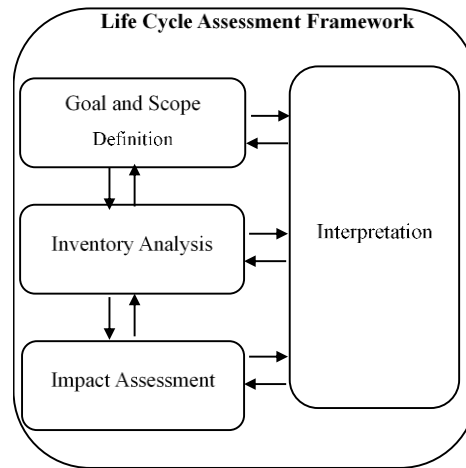
Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yakni mengevaluasi dampak lingkungan yang dilihat dari perhitungan menggunakan *Life Cycle Analysis* (LCA) dari jembatan girder beton. Penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan proyek konstruksi transportasi agar mendapatkan spesifikasi teknis berupa inventaris proyek dan informasi mengenai alat berat yang digunakan. Penilaian dampak lingkungan ini hanya berfokus pada struktur jembatan di bagian bawah serta pada saat tahap konstruksi. Data dari struktur jembatan bagian bawah tersebut kemudian dibagi menjadi subkomponen dan item pekerjaan yang akan dikaitkan dengan koefisien dari dampak lingkungan untuk mengumpulkan keseluruhan dampak lingkungan pada sistem jembatan bagian bawah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penilaian *Enironmental Life Cycle Assessment*

LCA merupakan satu dari beberapa teknik yang mengukur hasil dari aktivitas dilingkungan konstruksi yang memiliki potensi dampak lingkungan (Treloar et al., 2000; ISO 14040, 2006; ILCD Handbook, 2010). Pada gambar 1 menunjukkan kerangka dari LCA (ISO 14044, 2006) yakni sasaran serta definisi ruang lingkup (*goal and scope definition*), analisis inventaris (*inventory analysis*), penilaian dampak (*impact assessment*), dan interpretasi (*interpretation*). Tahap definisi ruang lingkup dinyatakan sebagai deskripsi dari sebuah sistem produk sehubungan dengan batasan dan satuan fungsional dari LCA. Satuan fungsional merupakan elemen yang penting yang membantu LCA diungkapkan dengan cara kuantitatif (Baumann and Tillman, 2004). Sedangkan inventaris siklus hidup atau *Life Cycle Inventory* (LCI) meliputi akumulasi data yang mengenai sasaran dari sebuah sistem yang digunakan. Penilaian dampak dapat digunakan sebagai alat untuk memproses data inventaris menjadi sebuah dampak lingkungan (ILCD Handbook, 2010). Penafsiran untuk langkah terakhir dari sebuah LCA yakni menunjukkan sebuah kesimpulan serta rekomendasi dari kelengkapan penilaian LCA.



Gambar 1. Kerangka Penilaian Siklus Hidup

Tiga tipe dari proses penilaian siklus hidup sudah banyak digunakan sebelumnya yakni *process LCA*, *Economic Input-Output (EIO) LCA*, dan *Hybrid LCA* (Hendrickson et al., 1997; Santero, 2010). *Process LCA* menggunakan pendekatan dari bawah ke atas yang bertujuan untuk mengukur sebuah data yang dimasukkan serta dampak dari produk khususnya dengan detail serta pendekatan searah. *Process LCA* tersebut menggunakan sebuah aplikasi yang disebut GaBi (*Ganzheitliche Bilanzierung-Integrated Assessment*) atau yang lebih dikenal dengan pendekatan SETAC-EPA yang mempunyai rekomendasi dari *Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)* dan *the United States Environmental Protection Agency (EPA)* (Fava et al., 1991; Santero, 2010). Sedangkan *EIO-LCA* menggunakan pendekatan dengan cara dari atas ke bawah dimana hal tersebut mencakup transaksi moneter sektoral yang dapat mendesain data yang dimasukkan secara langsung maupun tidak langsung dengan menghasilkan keluaran dari *LCA* (Lenzen, 2001). *Hybrid LCA* merupakan kombinasi dari dua tipe proses *LCA* yang telah dijelaskan sebelumnya dengan mempertimbangkan kekuatan dan kelemahan (Hendrickson et al., 2006; Santero, 2010).

Studi LCA Sebelumnya Dalam Infrastruktur Transportasi

Studi dari White et. al (2010) menunjukkan dampak dari global warming dari produksi sebuah material untuk bahan jalan serta pada saat proses konstruksi dari berbagai macam tipe perkerasan yakni *Hot Mix Asphalt (HMA)*, *asphalt rubber*, *jointed plain concrete*, dan *thin and ultrathin white thopping*. Hasil dari studi tersebut memperbolehkan pihak perencana maupun pihak dinas yang berhubungan dengan infrastruktur transportasi untuk melakukan urutannya guna mengevaluasi perubahan iklim dengan cara memodifikasi jenis bahan serta parameter lainnya.

Di sisi lain, penelitian sebelumnya telah dilakukan juga untuk mengevaluasi penilaian siklus hidup yang komprehensif pada berbagai macam tipe jembatan meskipun hal ini terbatas karena hanya beberapa studi yang fokus pada penilaian *LCA* untuk jembatan (Du and Karoumi, 2014). Peneliti lain yakni Horvath (2009) menyatakan bahwa sebuah penelitian mengenai jembatan mempunyai jumlah yang minimum apabila dilihat dari sudut pandang lingkungan. Sedangkan jembatan memiliki aktifitas konstruksi yang cukup padat serta rumit yang memungkinkan munculnya emisi selama masa konstruksi. Oleh karena itu, evaluasi untuk kinerja lingkungan pada jembatan menjadi perhatian di dalam studi sistem transportasi. Selain itu, Horvath and Hendrickson (1998) melakukan penilaian terhadap siklus hidup (*LCA*) secara komprehensif pada berbagai macam jembatan girder. Studi tersebut menyimpulkan bahwa meskipun pada akhirnya tahap hidup dari gelagar baja dapat digunakan kembali dan didaur ulang namun pada saat konstruksi awal gelagar yang terbuat dari beton bertulang mempunyai dampak lingkungan yang

lebih rendah jika dibanding dengan gelagar dari baja. Hammervold (2011) membandingkan tiga tipe desain jembatan dengan membandingkan hasil dampak lingkungannya. Studi tersebut menemukan bahwa jembatan dengan jenis gelagar yang berasal dari beton memiliki dampak lingkungan yang lebih tinggi dibandingkan dengan gelagar dari baja dan kayu. Sebaliknya, dampak yang tinggi dari konsumsi energi juga ditemukan pada saat memproduksi bahan gelagar dari baja tersebut. Selain itu, penelitian ini menyatakan bahwa GWP, ADP, dan AP memiliki dampak signifikan untuk menganalisis LCA dari jembatan.

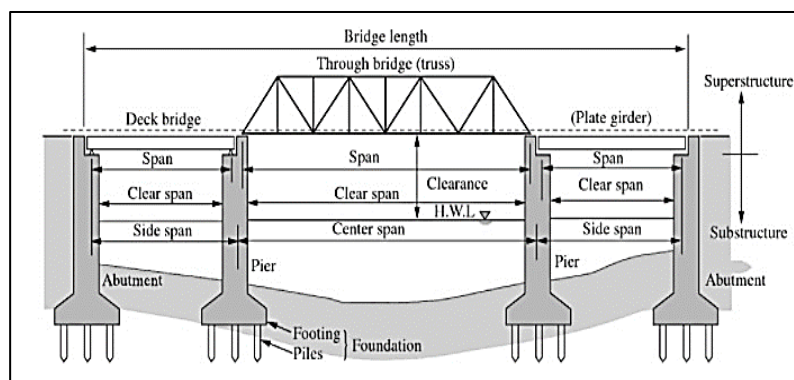
Instrumen LCA Saat Ini

Secara umum aplikasi untuk LCA dapat dikategorikan menjadi dua tipe yang aplikasi LCA yang digeneralisasi dan aplikasi LCA dengan spesifik produk. Sebagai contoh untuk alat LCA yang digeneralisasi yakni SimaPro dan GaBi (Goedkoop et al., 2008; Spataro et al., 2001) dengan cara mengevaluasi berbasis proses dari bahan baku sampai menjadi suatu produk. Pengguna dapat menggunakan proses yang telah ditentukan sebelumnya di dalam sistem tersebut atau dapat menentukan kerangka prosesnya sendiri. Sebaliknya, beberapa alat LCA juga dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir to menganalisis LCA dari infrastruktur yang lebih spesifik seperti perkerasan jalan, jembatan, infrastruktur transportasi lainnya. Alat – alat ini perlu menyediakan data masukan yang spesifik dari suatu proyek untuk menghitung dampak dari proyek tersebut. Instrumen lain yang saat ini populer yakni *The Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects (PaLATE)*, *Infrastructure Sustainability (IS) Material Calculator*, *Elinkaareltaan Tarkoitukseenmukainen Silta (ETSI) BridgeLCA* dan alat seperti GreenDOT berbasis spreadsheet yang diminta oleh *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*.

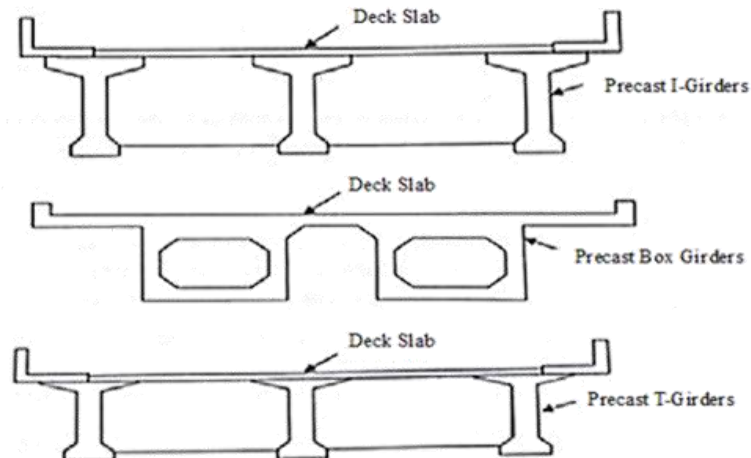
Jenis Jembatan dan Metode Konstruksi

Pre-stressed Concrete Box Girder

Gambar 2 menunjukkan bagian dari struktur jembatan yang terdiri dari bagian atas dan bawah. Oleh karena itu, ada umumnya bentuk dari jembatan pracetak segmental menurut jenis struktur bagian atasnya yakni jembatan gelagar (Kumar et al., 2011) yang dibagi menjadi beberapa bagian seperti yang terlihat pada gambar 3.



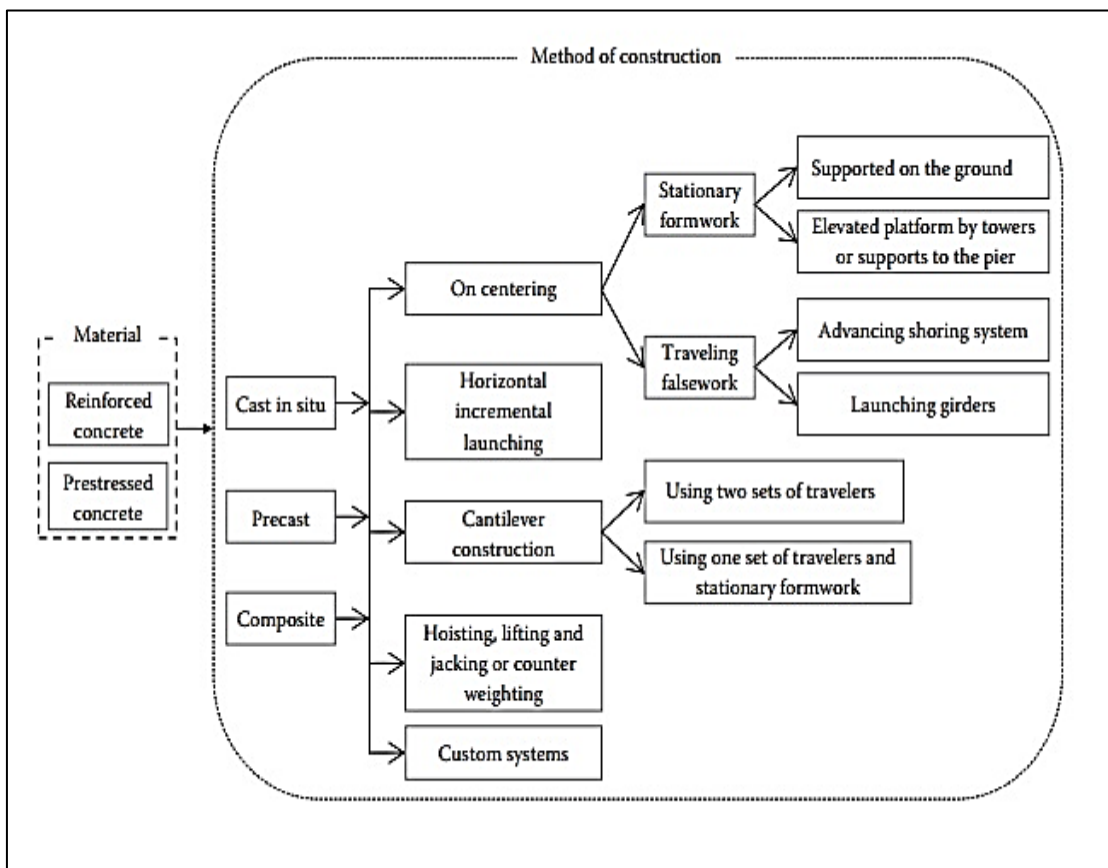
Gambar 2. Komponen Dari Jembatan Girder



Gambar 3. Berbagai Tipe Dari Girder Pratekan

Metode Konstruksi Jembatan

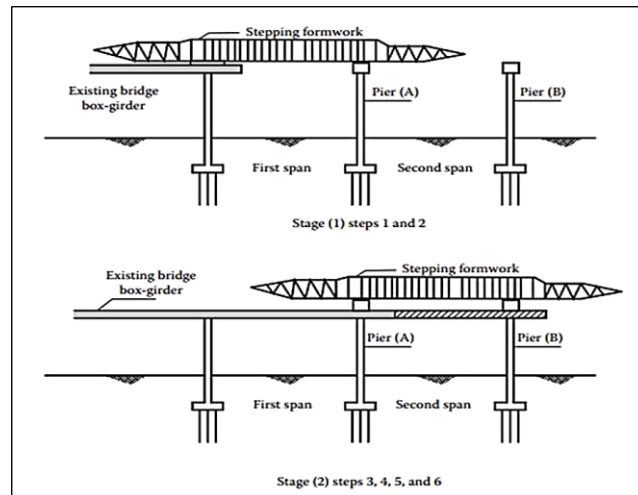
Pertimbangan paling besar untuk mengklasifikasikan metode konstruksi struktur atas pada jembatan beton awalnya didasarkan pada jenis bahan seperti beton bertulang atau beton pratekan (Youssef, 2005). Gambar 4 menunjukkan berbagai metode untuk membangun jembatan beton.



Gambar 4. Pengklasifikasian Metode Konstruksi untuk Jembatan Beton Pada Struktur Atas

Advanced Shoring Method

Gambar 5 menunjukkan spesialisasi dari teknik konstruksi jembatan beton pada bagian struktur atas dengan menggunakan *Advance Shoring Method* (ASM) yakni dengan pemanfaatan perancah berjalan. Sistem ini dikenal dengan *Moveable Scaffolding System* atau *Flying Shuttering* yang mana dapat dimanfaatkan untuk membantu pembangunan jembatan dengan bentang menengah atau pendek dikisaran 30 hingga 70 m (Nassar et al., 2011; Bakhoum, 2014; Rosignoli, 2013).

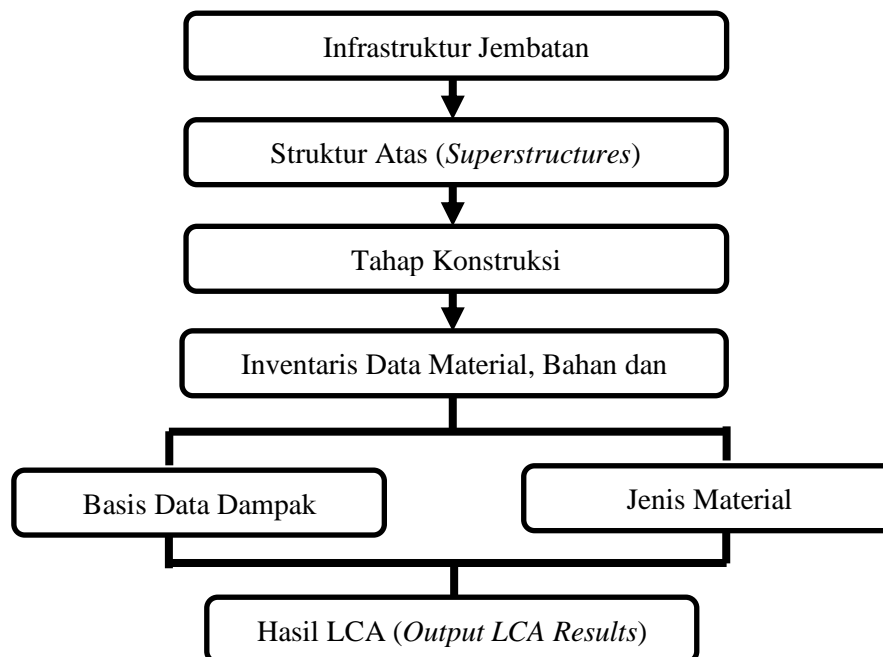


Gambar 5. Tahapan Konstruksi Menggunakan Teknik *Advance Balance Method* (ASM) (Bakhoum, 2014)

3. METODE PENELITIAN

Kerangka Penelitian

Penelitian ini mencoba untuk mengevaluasi jejak lingkungan selama umur jembatan beton dengan memanfaatkan analisis dari LCA berbasis proses. Gambar 6 menunjukkan kerangka kerja komputasi model LCA.



Gambar 6. Kerangka Kerja Komputasi Model LCA

Di dalam Model LCA pada penelitian ini, sistem jembatan hanya dihitung pada bagian struktur bawahnya saja pada tahapan konstruksi. Fase ini memiliki item yang berbeda yang mana yang mensimulasikan proses konstruksi yang unik. Selanjutnya, item dari konstruksi diuraikan lebih detail untuk mengetahui kuantitas penggunaan material dan peralatan serta informasi biaya mengenai instalasi serta pengangkutan. Item ini disertai informasi data inventoris yang lebih detail yang mana dapat mewakili berbagai level. Kemudian, jenis material dan basis data mengenai dampak lingkungan digunakan untuk menghubungkan jumlah total material yang digunakan dengan hasil akhir emisi yang dihasilkan.

Modul output menampilkan hasil emisi yang dihasilkan oleh *Global Warming Potential (GWP)*, *Abiotic Depletion Potential (ADPE)*, dan *smog* (kabut asap). Dalam studi ini data inventoris yang digunakan menggunakan data Rencana Anggaran Biaya dari perusahaan konstruksi di Taiwan (*Public Cost Estimate System – PCCES*) format dari laporan desain proyek pekerjaan pelebaran jalan di lokasi Wugu sampai Jalan Nasional Yangmei.

Proses LCA

Analisis berbasis proses digunakan untuk menghitung dampak lingkungan dari infrastruktur transportasi khususnya pada sistem jembatan pada tahap produksi hingga masa akhirnya (Heijungs and Suh, 2002). Struktur komputasi dari penilaian siklus hidup ini fokus pada aspek algoritmik yang dirumuskan ke dalam penjabaran persamaan matematika terutama pada operasi matriks. Untuk mencapai pendekatan LCA ini, spesifikasi dari material dan proses di setiap jenis jembatan diperlukan untuk menentukan matriks teknologi dan matriks lingkungan. Rumus penilaian siklus hidup dibagi menjadi beberapa langkah. Dua persamaan dasar untuk perhitungan LCA menjelaskan sebuah teknologi (diproduksi) dan lingkungan (sumber daya) dapat diekspresikan dengan persamaan berikut ini.

$$As = f \quad (1)$$

$$Bs = g \quad (2)$$

Pada dua persamaan tersebut, matriks A dan B menunjukkan korelasi dari intervensi matriks teknologi dan lingkungan. Hubungan dari matriks tersebut dapat dihasilkan dengan melibatkan data pendukung dengan unit fungsional khusus. Matriks A mewakili berbagai unit proses dari sebuah modul (P_1, P_2, \dots, P_n). Matriks B merupakan unit proses yang berasal dari dampak lingkungan. Unit fungsional dari setiap proses di kedua matriks tersebut tergantung pada fase siklus hidup yang terlibat. Misalnya dalam tahapan konstruksi, unit proses dari matriks A terkait dengan waktu penggunaan peralatannya, dan konsumsi bahan bakar per aktivitas yang terlibat selama aktivitas konstruksi. Sedangkan, proses unit matriks B yang terkait dengan dampak lingkungan berasal dari bahan bakar diesel (kg).

Sedangkan fungsi dari f menunjukkan produk akhir yang mana dapat mengacu pada berbagai implikasi seperti ukuran, berat, volume atau jumlah lain dengan spesifik unit fungsional. Kesimpulannya A, B, dan f menunjuk sebagai data inventaris untuk mendukung perhitungan LCA. Sedangkan, fungsi dari g adalah sebagai vektor dari inventaris data lingkungan yang mengindikasikan hasil keseluruhan dari dampak lingkungan untuk setiap produk. Dari hasil matriks, perbandingan dua teknologi yang berbeda tersebut dinyatakan sebagai pilihan rekomendasi. Selanjutnya, matriks s sebagai hasil dari perkalian dari waktu dan konsumsi bahan bakar dari unit prosesnya matriks inverse. Untuk lebih jelasnya persamaan dengan menyatakan operasi matriks dapat menggunakan rumus dibawah ini.

$$\text{Modul } n : \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{-1} \\ B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s \\ g \end{bmatrix} \quad (3)$$

Keterangan :

- Matriks A = Teknologi matriks
 Matriks A^{-1} = Matriks inverse dari matriks A
 Matriks B = Matriks intervensi
 Matriks f = Vektor permintaan akhir dari modul n
 Matriks s = Skala vektor
 Matriks g = Inventaris vektor

Batasan Masalah

Untuk mencapai LCA dari jembatan, model LCA yang diusulkan hanya melibatkan fase penilaian pada saat tahap konstruksi. Analisis LCA hanya menghitung bagian dari struktur bawah jembatan girder beton dengan melihat penggunaan bahan material, mesin dan alat transportasi yang digunakan.

a. Infrastruktur Jembatan

Jembatan girder beton pada penelitian ini menggunakan spesifik teknik yakni menggunakan teknik *Advancing Shoring Method* (ASM). Namun perhitungan dampak lingkungan hanya fokus pada struktur bagian bawah jembatan pada masa konstruksi. Batasan dari sistem jembatan girder beton ini hanya mencakup STA.31+820 to STA.32+021. Jembatan ini memiliki panjang total 201 m dengan 3 bentang yang masing – masing bentang memiliki panjang 50 m.

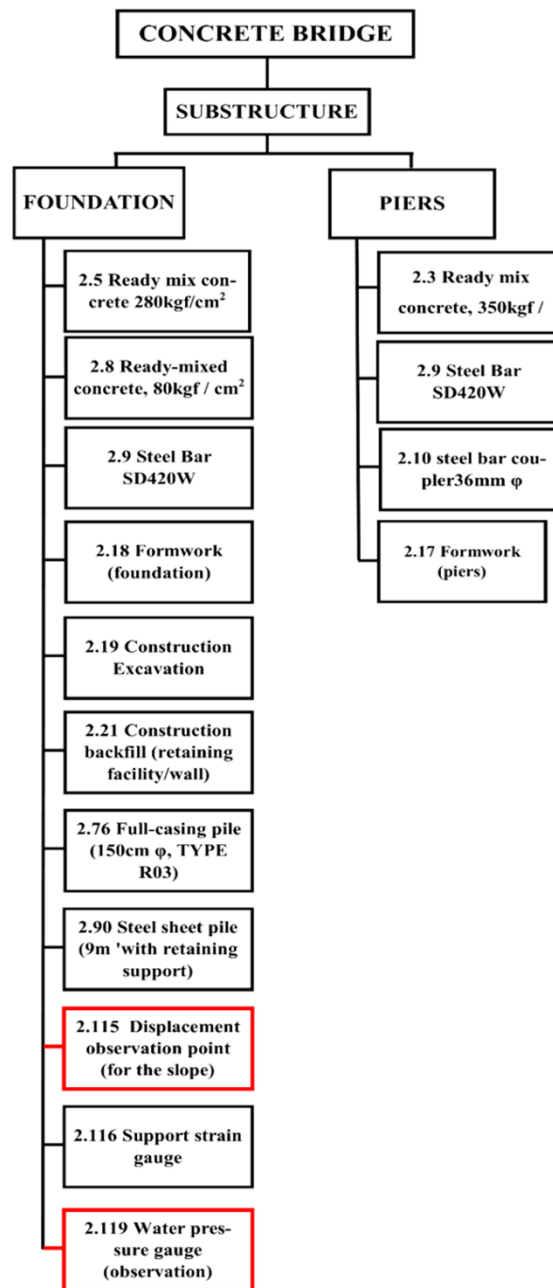
b. Tahapan Siklus Hidup (*Life Cycle Phase*)

Tahap Konstruksi

Pada tahap ini bertujuan untuk menghitung dampak lingkungan selama proses konstruksi di lapangan dengan memasukkan data bahan material yang digunakan beserta penggunaan alatnya. Bagian ini menunjukkan penggunaan dari peralatan konstruksi dan kendaraan berat yang berhubungan dengan konsumsi bahan bakarnya. Hal tersebut nantinya yang menjadi perhitungan sebagai dampak lingkungan dari jembatan. Tabel berikut ini menunjukkan penggunaan alat pada area konstruksi berdasarkan dari data Rencana Anggaran Biaya (RAB). Asumsi yang digunakan pada penelitian ini yakni penggunaan truk dengan kapasitas 40 T serta jarak tempuh pengiriman material ke area konstruksi yakni sejauh 50 m.

Tabel 1. Informasi Penggunaan Peralatan Berat

Jenis Alat Berat	Bahan Bakar (solar) (kg/hr)	Listrik (MJ/hr)
Earth Moving Equipment		
Excavators	21.30	-
Push-type compactor	0.58	-
Material Handling Equipment		
Crane	32.86	-
Final Material Placement		
Roller-3W	8.6	-
Roller-2W	5.46	-
Roller Rubber	12.42	-
Mechanical Device		
Vibrator	-	3.6
Concrete pump	26.67	-
Cleaning Equipment		
Sweepers	2.88	-



Gambar 7. Batasan Untuk Tahap Konstruksi Pada Struktur Bawah Jembatan Girder Beton (Warna Merah Tidak Termasuk Dalam Perhitungan)

Life Cycle Impact Assessment

Dampak lingkungan yang digunakan pada studi ini diklasifikasikan menjadi tiga level yang berfokus pada *Global Warming Potential (GWP)*, *Abiotic Depletion Potential (ADPE)*, dan smog. Dampak utama dari GWP yakni perubahan iklim yang diekspresikan melalui satuan *kg CO₂ equivalent*. Kemudian untuk ADPE dinyatakan dalam satuan *Megajoules (MJ)* dan smog dengan *kg O₃ equivalent* (Bare, 2012). Basis data yang digunakan untuk mendapatkan dampak lingkungan tersebut diambil dari *software LCA* seperti GaBi dan SimaPro dengan menggunakan spesifik metode yang dinamakan TRACI 2.1. Dikarenakan kurangnya informasi mengenai emisi yang dihasilkan dari beberapa material sebagai bentuk dampak lingkungan, maka studi ini juga mengambil basis data yang berasal dari Taiwan EPA, jurnal lokal Taiwan, jurnal internasional,

dan *Environmental Product Declaration* (EPD). Namun, empat sumber pendukung basis data ini tidak mempertimbangkan spesifik metode. Sebagai tambahan, karena kurangnya informasi studi ini juga mengaplikasikan basis data representatif untuk suatu produk dimana tidak memiliki informasi mengenai dampak GWP.

Tabel 2. Emisi Pada Jenis Material

Material	Unit	kg CO ₂ - eqv	MJ	kg O ₃ - eqv	Sumber	Representatif Data	Pengaplikasian Materian pada model LCA
<i>Ready Mix Concrete 14 MPa</i>	m ³	2.55E+0 2	-	-	Taiwan EPA	✓	<i>Ready-mixed concrete, 80kgf/cm²</i>
<i>Ready Mix Concrete 21 Mpa</i>		3.47E+0 2	-	-	Taiwan EPA	✓	-
<i>Ready Mix Concrete 24 Mpa</i>		3.70E+0 2	-	-	Taiwan EPA	✓	<i>Ready-mixed concrete, 245kgf/cm²</i>
<i>Ready Mix Concrete 28 Mpa</i>		3.93E+0 2	-	-	Taiwan EPA	✓	<i>Ready-mixed concrete, 280kgf/cm²</i>
<i>Ready Mix Concrete 34 MPa</i>		4.64E+0 2	-	-	Taiwan EPA	✓	<i>Ready-mixed concrete, 350kgf/cm²</i>
<i>Ready Mix Concrete 41 MPa</i>		5.33E+0 2	-	-	Taiwan EPA	✓	<i>Ready-mixed concrete, 420kgf/cm²</i>
<i>Plate Girder</i>	kg	2.84E+0 0	-	-	Local Research	✓	<i>Plate Girder</i>
<i>Full Cashing Pile</i>	kg	3.68E- 01	5.64E+00	-	EPD- Norway	<i>Cold-fomed tube products, steel sections and piles</i>	<i>Full Cashing Pile</i>
<i>Rebar</i>	Kg	6.60E- 01	-	-	Taiwan EPA	✓	<i>Steel rebar</i>
<i>Reinforcment Cage</i>	Kg	1.27E+0 0	6.76E-04	4.43E- 02	GaBi- Global	<i>Steel rebar worldsteel</i>	<i>Reinforcment Cage</i>
<i>Coupler</i>	Kg	7.51E+0 0	0.00E+00	4.41E- 01	GaBi- Germany	<i>Fixing material screws stainless steel (EN15804 A1-A3) PE</i>	<i>Coupler</i>
<i>Steel Plate</i>	kg	2.37E+0 0	1.39E-01	8.60E- 02	GaBi- Global	<i>Steel plate worldsteel</i>	<i>Steel Plate</i>
<i>Steel sheet pile</i>	kg	1.99E+0 0	0.00E+00	1.11E- 01	GaBi- Germany	<i>Steel sheet (EN 15804 A1-A3) PE</i>	<i>Steel Sheet Pile</i>
<i>Steel Wire mesh</i>	kg	3.31E- 01	5.19E+00	-	EPD- Norway	<i>Wire mesh reinforcement steel</i>	<i>Wire mesh</i>

<i>PC Strand</i>	kg	2.68E+00	2.79E+01	-	EPD-Norway	<i>Prestressed steel for reinforcement of concrete, PC Strand</i>	
<i>Galvanized steel</i>	kg	2.17E+00	6.40E-04	1.72E-01	GaBi-Namibia	<i>Steel hot dip galvanized worldsteel</i>	<i>Bolts and screw</i>
<i>Structural Steel</i>	Ton	1.77E+03	0.00E+00	6.19E+01	GaBi-Europe	<i>Structural Steel (sections and heavy plates)</i>	<i>Pot bearing</i>
<i>Steel Pipe</i>	kg	2.55E+00	1.59E-02	6.61E-02	GaBi-Europe	<i>Steel welded pipe worldsteel</i>	<i>Steel Pipe</i>
<i>Plywood</i>	m ³	2.97E+02	5.18E+03		EPD-Finland	<i>Metsä Wood phenol flm overlaid birch plywood</i>	<i>Plywood formwork</i>
<i>Steel Frame</i>	kg	2.57E+00	3.40E-03	7.96E-02	GaBi-Europe	<i>Steel hot dip galvanized worldsteel</i>	<i>Steel frame formwork</i>
<i>Staging Support (steel)</i>	kg	2.68E+00	1.58E-02	7.84E-02	GaBi-Europe	<i>Steel UO pipe worldsteel</i>	<i>Staging support pipe</i>
<i>Concrete Curing Agent</i>	kg	5.03E+00	1.06E+02	-	EPD-Belgium	<i>Reactive resins based on polyurethane</i>	<i>Concrete curing agent</i>
<i>Cement</i>	kg	1.07E+00	3.29E-01	4.14E-02	GaBi	✓	<i>Cement</i>
<i>PVC</i>	kg	3.52E+00	2.42E+01	-	EPD-Australia	<i>PVC Non-Pressure Pipes</i>	<i>PVC Pipe</i>
<i>Hot Dip Galvanized Cover</i>	Ton	1.79E+00	-	8.92E-02	EPD-North America	<i>Galvanized Steel Plate</i>	<i>Drainage Element</i>
<i>Sealant</i>	kg	3.82E+00	7.43E+01	-	EPD-Belgium	<i>Reactive resins based on polyurethane</i>	<i>Sealant</i>
<i>Sealing Glue</i>	kg	2.06E+00	4.54E+01	-	EPD-Belgium	<i>Reactive resins based on polyurethane</i>	<i>Sealing Glue</i>
<i>Nail Anchor</i>	piece	1.99E-01	2.20E-05	6.24E-03	GaBi-Germany	<i>Production nail anchors with steel nail</i>	<i>Anchor</i>
<i>Taiwan electricity</i>	MJ	5.78E-01	9.43E-02	1.58E-02	GaBi	✓	<i>Taiwan electricity</i>
<i>Diesel @ Refinery</i>	kg	4.43E-01	7.16E+00	5.19E-02	GaBi	✓	<i>Diesel @ Refinery</i>

<i>truck transportation - Truck 14 T</i>	tkm	7.97E-02	-1.55E-01	1.39E-02	GaBi-China	✓	<i>truck transportation - Truck 14 T</i>
<i>truck transportation - Truck 26 T</i>		6.22E-02	-1.21E-01	1.15E-02	GaBi-China	✓	<i>truck transportation - Truck 26 T</i>
<i>truck transportation - Truck 40 T</i>		5.32E-02	-1.04E-01	9.99E-03	GaBi-China	✓	<i>truck transportation - Truck 40 T</i>

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Life Cycle Inventory Untuk Material

Pertimbangan inventoris data yang digunakan untuk analisis LCA pada jembatan girder beton dapat dilihat pada tabel 3 yang dilihat dari sudut pandang penggunaan jenis itemnya. Pada jembatan girder beton ini item tersebut diidentifikasi memiliki persediaan material 55% pada struktur bagian bawahnya. Sisanya merupakan item yang tidak termasuk dalam perhitungan karena beragam alasan yaitu:

- Item hanya menunjukkan perihal pemantauan
- Item hanya menyajikan hal – hal yang terlalu kecil sehingga tidak memberikan deskripsi yang jelas
- Item memberikan rincian jumlah bahan baku yang tidak terkait dengan pertimbangan seperti dalam penelitian ini. Sebagai contoh, basis data untuk dampak lingkungan (emisi yang dihasilkan) untuk dihitung LCAnya pada tahap konstruksi secara langsung menggunakan data emisi yang dihasilkan dari ready-mix beton 350 kgf/cm² tanpa mempertimbangkan emisi yang dihasilkan dari bahan baku untuk memproduksi ready mix beton tersebut.
- Kurangnya informasi terkait data emisi yang dihasilkan dari jenis material tertentu yang jumlahnya sedikit.

Tabel 3. Material Dari Jembatan Girder Beton

Item	Struktur Bawah Jembatan	
	Item Yang Masuk Perhitungan	Item Yang Tidak Masuk Perhitungan
Pondasi	32	27
Tiang Jembatan (Piers)	21	17
Total	53	44
Persentase	55%	45%

Sumber: Pengolahan Data, 2017

Life Cycle Inventory (LCI) Untuk Peralatan

Pertimbangan untuk data inventoris peralatan untuk perhitungan LCA pada jembatan girder beton ditampilkan pada tabel 4. Pada jembatan tersebut, item yang digunakan untuk mengidentifikasi data peralatan yang terdapat pada daftar RAB memiliki 70% data yang berasal dari struktur bagian bawah dari seluruh item. Meskipun pada proyek yang dipakai dalam penelitian ini hanya menyediakan sedikit informasi mengenai data peralatan yang digunakan, namun penelitian ini mempertimbangkan sebagian besar data inventoris peralatan. Terdapat beberapa inventaris data peralatan yang tidak termasuk dalam perhitungan karena data tersebut hanya menyediakan informasi peralatan yang digunakan pada saat pemrosesan di pabrik. Hal ini tidak berkaitan dengan parameter yang digunakan untuk menghitung LCA pada tahap konstruksi. Hal tersebut

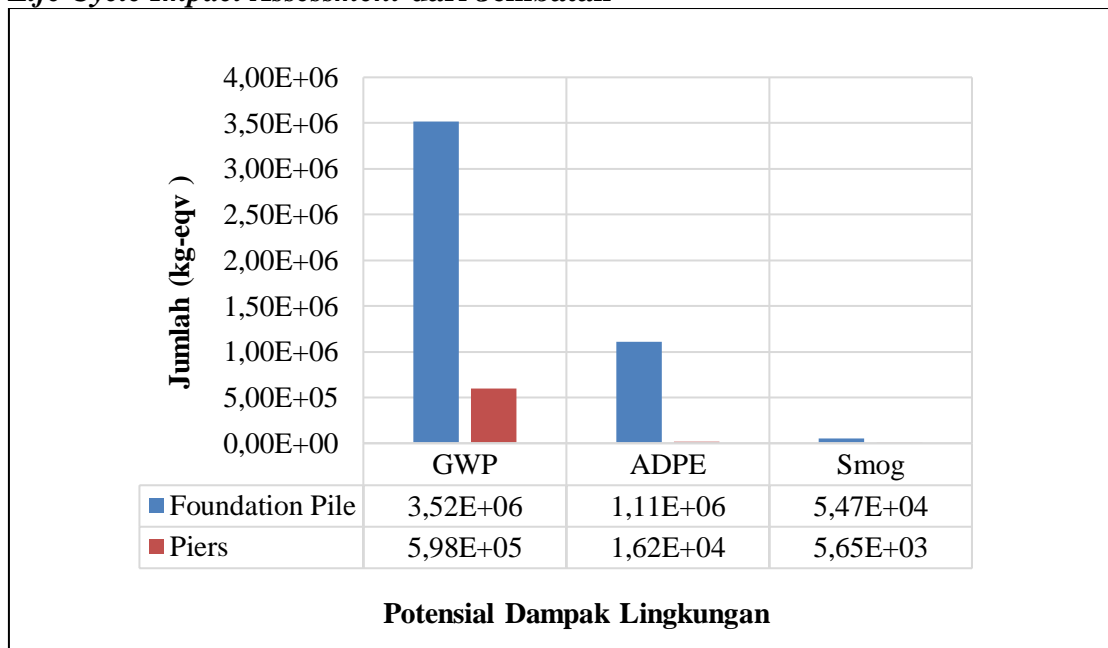
dikarenakan emisi yang dihasilkan pada tahap konstruksi ditunjukkan dengan keterlibatan peralatan yang digunakan.

Tabel 4. Peralatan Dari Jembatan Girder Beton

Item	Struktur Bawah Jembatan	
	Item Yang Masuk Perhitungan	Item Yang Tidak Masuk Perhitungan
Pondasi	5	0
Tiang Jembatan (Piers)	2	3
Total	7	3
Persentase	70%	30%

Sumber: Pengolahan Data, 2017

Life Cycle Impact Assessment dari Jembatan



Gambar 8. Emisi Struktur Bagian Bawah Jembatan Girder Beton Pada Tahap Konstruksi

Emisi yang dihasilkan selama tahap konstruksi pada pembangunan jembatan girder beton untuk bagian struktur bawah diilustrasikan pada gambar 8. Pada bagian struktur bawah ini dibagi menjadi dua bagian yaitu pondasi dan tiang jembatan. Pada gambar 8 terlihat pada saat masa konstruksi pembangunan pondasi menghasilkan emisi yang berasal dari GWP yang cukup tinggi apabila dibandingkan dengan nilai emisi saat membangun tiang jembatan yakni sebesar 3.52×10^6 kg CO₂ untuk pondasi dan 5.98×10^5 kg CO₂ untuk tiang jembatan. Dari perbandingan tiga emisi hasil terlihat yang paling signifikan berasal dari efek gas rumah kaca. Hal ini terjadi karena jumlah material dari pondasi pada jembatan girder beton memiliki porsi yang besar dari *ready-mix concrete* dan *reinforcement cage* (jalanan penulangan) yang mempengaruhi total emisi GWP.

5. PENUTUP

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak lingkungan selama siklus hidup jembatan girder beton. Untuk mencapai tujuan ini, model LCA akan dikalibrasi oleh proyek konstruksi yang nyata untuk memastikan akurasinya. Desain jembatan yang digunakan dalam penelitian ini

adalah jembatan girder beton dengan *PC-box girder* menggunakan metode *advancing shoring* (ASM). Model ini berbasis proses untuk menghitung dampak lingkungan (Heijungs dan Suh, 2002). Studi ini menemukan:

1. Data inventoris mengenai material dan peralatan untuk struktur jembatan girder beton yang digunakan untuk menyelesaikan perhitungan LCA menggunakan 55% item pada struktur bagian bawah dari total item yang terdapat pada daftar RAB. Dari data tersebut terbagi lagi untuk penggunaan data masukan sebagai jenis material yang digunakan yaitu 54% sedangkan peralatan 70%.
2. Pada tahap konstruksi emisi GWP pada jembatan girder beton memiliki jumlah yang besar apabila dilihat saat proses pembangunan pondasi maupun tiang jembatan jika dibandingkan dengan emisis yang dihasilkan dari ADPE maupun smog.

Saran

Untuk studi lebih lanjut, informasi berikut ini direkomendasikan untuk diselidiki:

1. Data informasi mengenai jenis peralatan, waktu penggunaan dan konsumsi bahan bakar.
2. Database dampak data dikumpulkan lebih detail untuk menyempurnakan hasil LCA yang lebih detail.
3. Perlu adanya analisis untuk mengurangi dampak tersebut.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Bakhoum, M. M. (2014). *Bridge Construction Methods. In Bridge Engineering Handbook, Second Edition: Construction and Maintenance* (pp. 567-628). CRC Press.
- Baumann, H., & Tillman, A. M. (2004). *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application. External organization*
- Dequidt, T. C. E. (2012). *Life cycle assessment of a Norwegian bridge (Master's thesis, Institutt for bygg, anlegg og transport)*.
- Du, G. (2012). *Towards sustainable construction: life cycle assessment of railway bridges (Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology)*.
- Du, G., Safi, M., Pettersson, L., & Karoumi, R. (2014). *Life cycle assessment as a decision support tool for bridge procurement: environmental impact comparison among five bridge designs. The International Journal of Life Cycle Assessment, 19(12), 1948-1964*.
- Fava, J., Denison, R., Jones, B., Curran, M., Vigon, B., Selke, S., & Barnum, J. A. (1991). *Technical Framework for Life-Cycle Assessment. Society of Environmental Toxicology and Chemistry & SETAC Foundation for Environmental Education. Inc. Washington, DC*.
- Gervasio, H., & da Silva, L. S. O. E. (2008). *Comparative life-cycle analysis of steelconcrete composite bridges. Structure and Infrastructure Engineering, 4(4), 251-269*
- Gillett, N. P., Arora, V. K., Zickfeld, K., Marshall, S. J., & Merryfield, W. J. (2011). *Ongoing climate change following a complete cessation of carbon dioxide emissions. Nature Geoscience, 4(2), 83-87*.
- Gillett, N. P., Arora, V. K., Zickfeld, K., Marshall, S. J., & Merryfield, W. J. (2011). *Ongoing climate change following a complete cessation of carbon dioxide emissions. Nature Geoscience, 4(2), 83-87*.
- Goedkoop, M., De Schryver, A., Oele, M., Durksz, S., & de Roest, D. (2008). *Introduction to LCA with SimaPro 7*. PRé Consultants, The Netherlands.
- Hajji, A. M., & Lewis, P. (2013). *Development of productivity-based estimating tool for energy and air emissions from earthwork construction activities. Smart and Sustainable Built Environment, 2(1), 84-100*.
- Hammervold, J., Reenaas, M., & Brattebø, H. (2011). *Environmental life cycle assessment of bridges. Journal of Bridge Engineering, 18(2), 153-161*.
- Heijungs, R., & Suh, S. (2002). *The computational structure of life cycle assessment* (Vol. 11). Springer Science & Business Media.

- Hendrickson, C. T., Horvath, A., Joshi, S., Klausner, M., Lave, L. B., & McMichael, F. C. (1997, May). *Comparing two life cycle assessment approaches: a process model vs. economic input-output-based assessment*. In *Electronics and the Environment, 1997. ISEE-1997., Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on* (pp. 176-181). IEEE.
- Hendrickson, C. T., Lave, L. B., & Matthews, H. S. (2006). *Environmental life cycle assessment of goods and services: an input-output approach*. *Resources for the Future*.
- Horvath, A. (2009, October). *Principles of using life-cycle assessment in bridge analysis*. In *Proceedings of US–Japan workshop on life cycle assessment of sustainable infrastructure materials* Sapporo, Japan.
- Horvath, A., & Hendrickson, C. (1998). *Steel versus steel-reinforced concrete bridges: Environmental assessment*. *Journal of Infrastructure Systems*, 4(3), 111-117.
- International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* (2010). *General Guide for Life Cycle Assessment-Detailed Guidance, First edition*. EUR 24708, JRC, European Commission
- ISO, E. (2006). 14040: 2006. *Environmental management-Life cycle assessment Principles and framework*. *European Committee for Standardization*.
- Kendall, A. (2004). *A Dynamic life cycle assessment tool for comparing bridge deck designs*. *Center for Sustainable Systems—University of Michigan*
- Kumar, P.C., Babu, S.V.V.K, Ram, D.A.S. (2016). *Analysis and Design of Prestressed Box Girder Bridge by IRC: 112-2011*. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)*. Volume 2, Issue 2, 2016, PP 1-10.
- Lenzen, M. (2000). *Errors in conventional and Input-Output—based Life—Cycle inventories*. *Journal of Industrial Ecology*, 4(4), 127-148. May).
- Nassar, K., El Masry, M., & Sherif, Y. (2011). *Multiobjective Optimization of Advanced Shoring Systems Used in Bridge Construction*. In *Computing in Civil Engineering* (2011) (pp. 94-101).
- Rantala, T. (2010). *Life cycle analysis of three finnish standard bridges*. Liikennevirasto, Helsinki.
- Rosignoli, M. (2013). *Bridge construction equipment*.
- Santero, N. (2010). *Life cycle assessment of pavements: a critical review of existing literature and research*. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- Spatari, S., Betz, M., Florin, H., Baitz, M., & Faltenbacher, M. (2001). *Using GaBi 3 to perform life cycle assessment and life cycle engineering*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 6(2), 81-84.
- Statistical Pocket Book*. (2016). Belgium.
- Treloar, G. J., Love, P. E. D., Faniran, O. O., & Iyer-Raniga, U. (2000). *A hybrid life cycle assessment method for construction*. *Construction Management & Economics*, 18(1), 5-9.
- White, P., Golden, J. S., Biligiri, K. P., & Kaloush, K. (2010). *Modeling climate change impacts of pavement production and construction*. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(11), 776-782.
- Youssef, M. A., Anumba, C. J., & Thorpe, T. (2005). *Intelligent selection of concrete bridge construction methods in Egypt*. In *Computing in Civil Engineering* (2005) (pp. 1-14).
- Zapata, P., & Gambatese, J. A. (2005). *Energy consumption of asphalt and reinforced concrete pavement materials and construction*. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(1), 9-20.
- Zhang, C., Lin, W. X., Abududdin, M., & Canning, L. (2012). *Environmental evaluation of FRP in UK highway bridge deck replacement applications based on a comparative LCA study*. In *Advanced Materials Research* (Vol. 374, pp. 43-48). *Trans Tech Publications*.