PERANCANGAN FASILITAS PEMULIHAN KOMPONEN KENDARAAN DENGAN MENGGUNAKAN TEKNIK *GOAL PROGRAMMING*

Yudi Syahrullah
Program Studi Teknik Industri, Institut Teknologi Telkom Purwokerto
Email : yudi@ittelkom-pwt.ac.id

ABSTRAK

Masalah yang dihadapi oleh industri otomotif di Indonesia saat ini adalah belum tersedianya sebuah *framework* yang dapat dijadikan model dalam merancang jaringan pemulihan komponen kendaraan End-of-Life (EoL). Teknik *goal programming* sebagai *multiobjective programming* digunakan untuk mensimulasikan model dalam menyelesaikan masalah–masalah optimasi. Penelitian ini dapat membantu produsen otomotif untuk merancang strategi pemulihan komponen kendaraan EoL dengan objektif multi *goal*, diantaranya: memaksimalkan keuntungan (*net income*), mengurangi dampak lingkungan (emisi CO_2), jumlah komponen yang dipulihkan (*repair* dan *refurbish*) oleh produsen dan jumlah komponen yang didaur ulang (*recycle*) oleh *recycler*. Aplikasi model pada salah satu produsen Z dilakukan untuk mengetahui sensitivitas variabel dari perubahan parameter dan diperoleh bahwa biaya untuk pembukaan fasilitas dan biaya untuk masing–masing alternatif pemulihan mempengaruhi alternatif strategi pemulihan kendaraan yang dipilih. Penurunan target untuk minimalkan dampak lingkungan, dapat memberikan solusi strategi yang lebih optimal dan dapat meningkatkan *net income*.

kata kunci: pemulihan komponen, perbaikan, daur ulang, *refurbishing*, *goal programming*

ABSTRACT

The current problem faced by Indonesian automotive industry are unavailability of the framework as a model that can be used to designing network of EoL vehicle recovery for automotive components. A goal programming as multiobjective programming form is proposed to simulate the model for solving the optimazion problems. This research can be supported the automotive manufacturers to design End-of-Life (EoL) vehicle components recovery strategy with multi objective goal, that is: profitability, environmental impact, the number of components restored by the manufacturer and the number of components that are recycled by recycler. Application model of vehicle components recovery strategy at manufacturer (Z) was conducted to determine the sensitivity of a variable parameter changes, already found that costs for the opening of the facility and the cost for each vehicle components recovery strategy option affects the result of decision variabel that was determided. Reduction targets for minimizing the environmental impact, can provide more optimal solutions and strategies would be increase net income.

***Keywords** : disassembly , repair, recycling, refurbishing, goal programming*

PENDAHULUAN

Sejak tahun 1950-an industri daur ulang di Eropa masih menjadi industri yang menguntungkan sampai saat ini dengan estimasi jumlah kendaraan EoL yang telah didaur ulang mencapai delapan sampai dengan sembilan juta unit pertahun. Di Jepang, peraturan untuk mengendalikan pemulihan kendaraan EoL mulai ditetapkan secara ketat pada tahun 2005 dan Jepang setuju untuk melakukan daur ulang sebanyak lima juta unit kendaraan EoL pertahunnya. Korea mulai memberlakukan peraturan serupa di negaranya setelah 3 tahun berikutnya. Sementara Taiwan sudah lebih dahulu memulai industri daur ulang ini pada tahun 1994. Akan tetapi negara–negara berkembang khususnya kawasan ASEAN, saat ini masih lemah terhadap sistem manajemen pemulihan kendaraan.

Pemerintah Uni Eropa telah membuat regulasi dan kebijakan terkait penanganan produk EOL tersebut. Pada tahun 1990, Thomas lindhqvist menerbitkan prinsip EPR (*Extended Producer Responsibility*) untuk memperbaiki lingkungan dengan memperluas tanggung jawab produsen kedalam seluruh siklus hidup produk, khususnya untuk menarik kembali produk EOL dengan melakukan daur ulang dan mengelola pembuangan akhir dari produk (Gehin *et al* ,2008). Regulasi terkait EPR, salah satu diantaranya adalah pedoman ELV (*The European union's End of Life Vehicle*) yang dikeluarkan pada september 2010 dengan tujuan meningkatkan pemulihan produk EoL kendaraan agar dapat mengurangi limbah dan meningkatkan kinerja lingkungan.

Tahun 2010 *the World Resources Institute* (WRI) dan *the World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) melakukan pengukuruan gas rumah kaca terhadap produk dan proses rantai pasok produk-produk pada 20 lebih dari sektor industri dengan menggunakan *metode the Product Life Cycle Accounting* dan *the Scope 3 (Corporate Value Chain) Accounting*. Pengukuruan ini meliputi emisi yang dihasilkan selama siklus hidup produk termasuk *value chain* produk–produk tersebut. Proses akuisisi dan pengolahan bahan baku memberikan kontribusi gas rumah kaca terbesar dibandingkan siklus produk lainnya Perlu adanya suatu upaya untuk meminimalkan emisi yang ditimbulkan selama proses persiapan bahan baku dan sebelum proses produksi dilakukan. Salah satunya adalah dengan menggunakan kembali komponen–komponen dari produk–produk yang telah mencapai masa EoL, yaitu dengan mengunakan kembali komponen seperti fungsi awal dari komponen tersebut (*reuse*) atau mendaurulang menjadi bahan baku atau komponen dengan fungsi yang berbeda dari sebelumnya (*recycle*).

Menurut Gerrard (2007), *reuse* berada pada hirarki paling tinggi dalam strategi pemulihan produk, sementara penimbunan berada pada hirarki paling rendah. Hal tersebut juga menunjukkan bahwa dengan melakukan *reuse*, efisiensi material dan energi yang dihasilkan menjadi paling tinggi dibandingkan dengan strategi lainnya. Tahun 2015, persyaratan baru dalam pedoman kerangka kerja limbah ELV untuk melakukan *reuse* atau daur ulang kendaraan EoL ditingkatkan menjadi minimal 95% (Gradin, 2013). Dengan menggunakan metode LCA dan beberapa indikator penilaian diantaranya: *climate change* (CO_2) *metal depletion* (*FE* ton) dan *cumulative energi demand* (GJ), Gradin (2013) melakukan *assessment* untuk memilih skenario terbaik dalam menetapkan strategi pembongkaran, yaitu dengan skenario manual atau *shredder*.

Penelitian Terdahulu

Penelitian tentang strategi dalam menentukan metode pemulihan yang tepat dan optimal telah dilakukan oleh peneliti–peneliti sebelumnya. Pemulihan produk yang sudah berada pada tahap EoL bisa dilakukan dengan pelbagai teknik, diantaranya *remanufacture*, *recycle*, *repair* dan *refurbishment*. Dalam menentukan strategi pemulihan produk, perusahaan dapat mempertimbangkan manfaat yang dapat diperoleh dengan alternatif-alternatif strategi pemulihan yang tersedia.

Penelitian terkait *sustainability assessment* dengan menggunakan teknik pengambilan keputusan multi kriteria telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya Ziout (2013) dan Khalili (2013). Menurut Ziout (2013) dibutuhkan *assessment tools* yang bersifat *flexible* dimana bobot variabel mencerminkan keadaan khusus dari setiap kasus dan prioritas pengembangan tergantung dari wilayah. Dengan menggunakan teknik pengambilan keputusan multi kriteria, Ziout (2013) memilih skenario yang paling *sustainable* dalam memilih skenario *reuse* untuk sistem manufaktur yang akan digunakan dengan mempertimbangkan ketiga pilar *sustainability*. Saat ini perusahaan-perusahaan yang memproduksi kendaraan roda empat seperti Toyota, Suzuki dan lainnya belum mengaplikasikan strategi daur ulang dari kendaraan-kendaraan EoL yang merupakan produksi dari perusahaan-perusahaan tersebut. Perlu adanya strategi yang optimal dari masing–masing industri dengan mempertimbangkan ketiga dimensi *sustainability* yaitu dimensi ekonomi, lingkungan dan sosial. Untuk menyusun strategi tersebut diperlukan sebuah teknik pengambilan keputusan dengan pendekatan multi kriteria seperti yang dilakukan oleh Khalili (2013) dan Ziout (2013).

Ziout (2013) melakukan penelitian untuk memilih alternatif terbaik untuk sistem manufaktur *reuse* yang digunakan dalam keputusan untuk membeli *single screw extruder pelletizer.* Dengan membuat pengembangan struktur hirarki untuk pelaksanaan *sustainability assessment* sistem manufaktur berdasarkan aspek ekonomi, sosial dan lingkungan. Peneliti melakukan pembobotan umum untuk semua indikator dengan melakukan survey kepada para *expert* dibidang yang terkait dengan penelitian, kemudian membuat *metrics* kepentingan untuk tiap indikator dengan membandingkannya terhadap 2 alternatif yang dipilih. Selanjutnya dengan menggunakan metode AHP untuk memperoleh tingkat kepentingan berdasarkan indikator–indikator tersebut. Berdasarkan skor tersebut, maka diperoleh kesimpulan bahwa dengan menggunakan sistem manufaktur yang sudah digunakan merupakan alternatif terbaik dengan sistem manufaktur baru yang diajukan.

Harraz dan Galal (2011) menggunakan teknik pengambilan keputusan multi objektif dengan menggunakan *goal programming* dalam merancang jaringan pemulihan kendaraan EoL. Di Turki, *Egygptian Automotive Manufacturers Association* (EAMA) menyatakan bahwa dari tahun 2003 sampai dengan tahun 2007 pertumbuhan penjualan kendaraan meningkat hingga lebih dari 200%. Sementara peredaran mobil–mobil tua (berumur lebih dari 30 tahun) di Turki jumlahnya mencapai 26,4% dan 36,1% terletak di kota-kota besar, artinya kendaraan-kendaraan tua di Turki belum tentu dibuang (dijual ke pihak selanjutnya sebagai mobil bekas) dan penyebaran kendaraan di Turki belum merata.

Sementara pada penelitian lainnya terkait daur ulang kendaraan, Go (2011) melakukan studi literatur terhadap beberapa metode evaluasi untuk *disassembly* dan daur ulang kendaraan untuk mencapai *sustainability* lingkungan dengan beberapa tujuan, yaitu untuk meminimlkan dampak lingkungan, meminimalkan biaya terkait dan

memaksimalkan tingkat pengembalian. Beberapa formulasi untuk tujuan–tujuan tersebut dinotasikan sebagai berikut:

a. Meminimalkan dampak lingkungan

$$Max\left[\sum_{i=1}^{NP} Dampak\ lingkungan\ dari\ proses\ pemulihan\ komponen\ i + \sum_{j=NP+1}^{NT} Dampak\ Landfill\ dari\ komponen\ i\right]$$

b. Meminimalkan biaya proses *disassembly* dan pemulihan kendaraan

$$Max\left[\sum_{i=1}^{NP} (Pendapatan - Biaya\ Disassembly - Biaya\ Pemulihan)_i - \sum_{J=NP+1}^{NT} Biaya\ Landfill\right]$$

Manufaktur Berkelanjutan

Pembangunan berkelanjutan merupakan usaha untuk membangun masyarakat dengan mempertimbangkan faktor ekonomi, sosial dan ekologi secara seimbang (Gunasekaran dan Spalanzani, 2012). Konsep berkelanjutan dapat mendukung perusahaan dalam mengurangi resiko dan limbah yang dihasilkan, meningkatkan efisiensi penggunaan bahan baku termasuk konsumsi energi serta melakukan inovasi produk yang ramah lingkungan. Industri manufaktur berperan besar dalam mengkonsumsi sumberdaya dan menghasilkan limbah. Secara global konsumsi energi dari industri manufaktur tumbuh sebesar 61% dari tahun 1971 hingga tahun 2004.

Strategi Daur Ulang

Ziout *et al* (2014) mengelompokkan strategi pemulihan produk dengan mempertimbangkan faktor *engineering*, bisnis, lingkungan dan sosial menjadi 3 kategori, yaitu sebagai berikut:

a. Reuse

Ada beberapa teknik untuk melakukan *reuse* dimana teknik tersebut dibedakan berdasarkan proses pengolahannya. Dalam proses *reuse*, proses pengolahan meliputi proses *disassembly* atau pembongkaran, pemeriksaan, penggantian item yang *reject*, melakukan proses perbaikan, perakitan, pengujian dan pengemasan. Berikut beberapa pilihan untuk proses *reuse*, yaitu : *resale*, m*aintencance*, *repair*, *replacement* dan *downgrading* ,*refurbishing* dan *remanufacturing*

b. Daur ulang

Dalam strategi pemulihan produk dengan daur ulang, ada 2 macam strategi yang dapat dipilih, yaitu dengan teknik pembongkaran dan *shredding*. Daur ulang dengan teknik *shredding* membutuhkan biaya daur ulang lebih kecil dibanding dengan pembongkaran.

c. Insinerasi

Pada strategi ini tidak ada pemulihan energi yang dilakukan, sehingga produk EoL dibuang ke tempat pembuangan akhir dan diperlukan biaya untuk pembuangan tersebut.

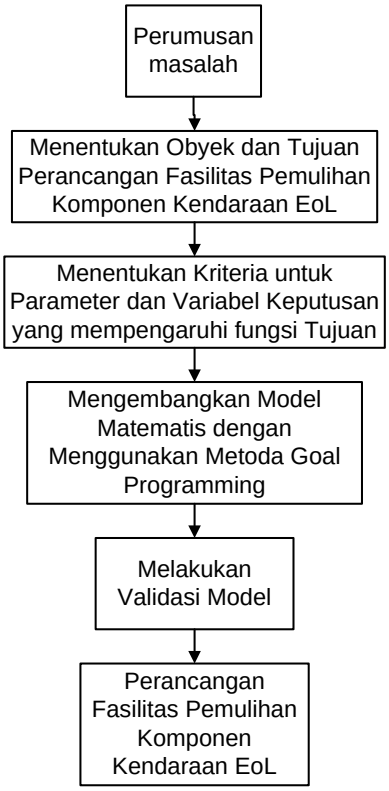
Model *Goal Programming*

Menurut Choudary dan Shankar (2014) *Goal Programming* (GP) yang diperkenalkan oleh Charness, Cooper dan Ferguson pada tahun 1955 merupakan pendekatan yang paling banyak digunakan dalam pengambilan keputusan multi kriteria dan pemrograman dengan banyak tujuan. Untuk pencarian sebuah solusi optimal dalam

sebuah keputusan yang bersifat majemuk, pemecahan aspirasi total menjadi sekumpulan sub-sasaran, *goal* dan objektif yang saling independen dapat dilakukan (Ciptomulyono, 2001). Selanjutnya Ciptomulyono (2001) melakukan *review* terhadap beberapa pendekatan penyelesaian dalam Optimasi *Multiobjective Programming* (MOP) dimana salah satunya adalah dengan menggunakan model *goal programming*.

MATERI DAN METODA

Penelitian yang dilakukan fokus kepada perancangan jaringan pemulihan komponen kendaraan. Selanjutnya faktor–faktor yang berpengaruh terhadap pengambilan keputusan ditunjukkan dengan arah panah dalam gambar. Secara rinci kerangka berfikir penelitian ini ditunjukkan dalam Gambar 1 pada berikut ini.



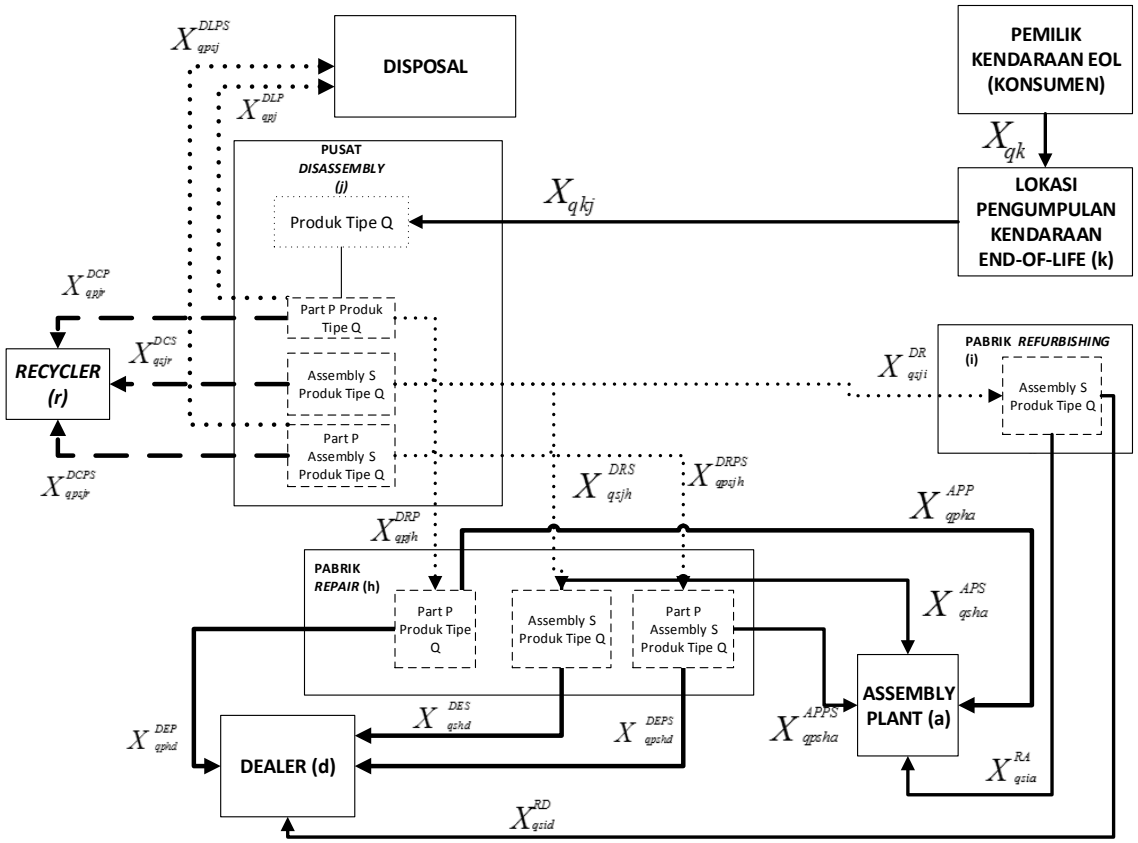
Gambar 1 Langkah-langkah Penelitian

Pemilihan komponen yang didaur ulang mempertimbangkan harga atau nilai dari komponen dan umur komponen

Model yang dirancang dapat dijadikan sebagai *framework* dasar dalam pengambilan keputusan dalam menetapkan strategi pemulihan produk. Alternatif strategi pemulihan produk diperoleh melalui observasi dan wawancara dengan *expert* dalam industri otomotif pada tempat penelitian yang dipilih. Model yang dirancang merupakan pengembangan dari model yang telah dikembangkan oleh Harraz dan Galal (2011) dan Syahrullah dan Ciptomulyono (2015). Objektif atau *goal* baru ditambahkan untuk memaksimalkan jumlah komponen yang dipulihkan (termasuk dengan *repair* dan *refurbishing*) oleh produsen dan meminimalkam dampak lingkungan. Selain itu, dalam

model yang dikembangkan ini, komponen kendaraan yang telah dipulihkan oleh pabrik pemulihan kendaraan dapat dikirimkan kembali ke *assembly* plant untuk dirakit dengan produk–produk baru berikutnya. Hal tersebut dapat dilakukan ketika permintaan komponen dari dealer telah terpenuhi.

Variabel–varibel Keputusan.
Variabel–variabel keputusan dijelaskan dalam Gambar 2 dibawah ini:



Gambar 2 Pengembangan Variabel Keputusan Penelitian

Parameter:

K_k^{PK} = Kapasitas pengumpulan kendaraan EOL lokasi k

K_h^{RP} = Kapasitas pusat *repair* lokasi h

K_I^{RF} = Kapasitas pabrik *refurbishing* kendaraan lokasi I

K_j^{DA} = Kapasitas pusat *disassembly* lokasi J

d_n^+ = deviasional positif variabel tujuan n

d_n^- = deviasional negatif variabel tujuan n

Y_k^{PK} = Variabel binier mengindikasikan pembukaan pusat pengumpulan kendaraan EOL lokasi k

Y_j^{DA} = Variabel binier mengindikasikan pembukaan pusat *disassembly* lokasi j

Y_i^{RF} = Variabel binier mengindikasikan pembukaan pusat *refurbishing* Komponen kendaraan lokasi i

Y_h^{RP} = Variabel binier mengindikasikan pembukaan pusat *repair* komponen kendaraan lokasi h

a_{qs} = jumlah *assembly* s termasuk per produk type q

b_{qp} = jumlah *part* p termasuk dalam produk type q

f_{ps} = jumlah *part* p termasuk dalam *assembly* s

P_{RL} = aspirasi level untuk *profit*

A_β = tingkat aspirasi jumlah yang dijual untuk daur ulang (dalam kg)

A_γ = tingkat aspirasi jumlah yang dipulihkan (dalam kg)

A_δ = tingkat aspirasi jumlah emisi CO_2 dari proses pemulihan (dalam CO_2 − kg)

W_{qs} = berat *assembly* s dari produk type q (dalam kg)

W_{qp} = berat *part* p dari produk type q (dalam kg)

W_{qps} = berat *part* p dari *assembly* s dari produk q (dalam kg)

B_q = berat produk tipe q (dalam kg)

EL_{qp}^{P} = emisi CO_2 akibat *landfill part* p produk q (dalam CO_2 − kg)

EL_{qps}^{PS} = emisi CO_2 akibat landfill *part* p *assembly* s produk q (dalam CO_2 − kg)

EP_{qs}^{P} = emisi CO_2proses *repair part* p produk q (dalam CO_2 − kg)

EP_{qs}^{S} = emisi CO_2proses *repair assembly* s produk q (dalam CO_2 − kg)

EP_{qps}^{PS} = emisi CO_2proses *repair part* p *assembly* s produk q (dalam CO_2 − kg)

EF_{qs} = emisi CO_2proses *refurbishing assembly* s produk q (dalam CO_2 − kg)

ER_{qp}^{P} = emisi CO_2proses *recycling part* p produk q (dalam CO_2 − kg)

ER_{qs}^{S} = emisi CO_2 proses *recycling assembly* s produk q (dalam CO_2 − kg)

ER_{qps}^{PS} = emisi CO_2 proses *recycling part* p *assembly* s produk q (dalam CO_2 − kg)

P_{qsd}^{DS} = Permintaan dealer − dealer d untuk *assembly* s produk tipe q

P_{qpd}^{DP} = Permintaan dealer − dealer d untuk *part* p produk tipe q

P_{qspd}^{DPS} = Permintaan dealer − dealer d untuk *part* p berasal dari *assembly* s produk tipe q

P_{qsa}^{APS} = Permintaan *assembly plant* AP untuk *assembly* s produk tipe q

P_{qpa}^{APP} = Permintaan *assembly plant* AP untuk *part* p produk tipe q

P_{qspa}^{APPS} = Permintaan *assembly plant* AP untuk *part* p berasal dari *assembly* s produk tipe q

P_r^R = Permintaan *recycler* r (dalam kg)

BT_r^R = Biaya tetap untuk pembukaan sebuah pabrik *pemulihan* kendaraan pada lokasi i

BT_j^{DA} = Biaya tetap untuk pembukaan sebuah pusat *diasssembly* pada lokasi j

BI_q = Biaya inspeksi untuk produk tipe q

BI_{qs}^{S} = Biaya inspeksi hasil $refurbishing - repair$ untuk $assembly$ s produk tipe q

BI_{qp}^{P} = Biaya inspeksi hasil $repair$ untuk $part$ p produk tipe q

BI_{qsp}^{PS} = Biaya inspeksi hasil $repair$ untuk $part$ p $assembly$ s produk tipe q

BR_{qs} = Biaya proses $refurbishing\ assembly$ s dari produk tipe q

BPD_{qs}^{s} = Biaya proses $disassembly$ dari $assembly$ s dari produk tipe q

BPD_{qp}^{p} = Biaya proses $disassembly$ dari $part$ p untuk produk tipe q

BPD_{qsp}^{ps} = Biaya proses $disassembly$ dari $part$ p dari $assembly$ s untuk produk tipe q

BR_{qs}^{S} = Biaya proses $repair$ dari $assembly$ s dari produk tipe q

BR_{qp}^{P} = Biaya proses $repair$ dari $part$ p untuk produk tipe q

BR_{qsp}^{PS} = Biaya proses $repair$ dari $part$ p dari $assembly$ s untuk produktipe q

BL_{qp}^{W} = biaya $disposal\ part$ p dari produk tipe q

BL_{qsp}^{W} = biaya $disposal\ part$ p dari produk tipe q

H_{qsd}^{DS} = harga jual unit $assembly$ s produk tipe q kepada dealer d atau $assy\ plant\ a$

H_{qpd}^{DP} = harga jual unit $part$ p produk tipe q kepada dealer d atau $assy\ plant\ a$

H_{qpsd}^{DPS} = harga jual unit $part$ p $assembly$ s produk tipe q kepada dealer d atau $assy\ plant\ a$

H_{qpr}^{RP} = harga jual unit $part$ p produk tipe q ke $recycler$

H_{qsr}^{RS} = harga jual unit $assembly$ s produk tipe q ke recycler

H_{qpsr}^{RPS} = harga jual unit $part$ p $assembly$ s produk tipe q ke $recycler$

PD = pemberian dana kepada pemilik produk (konsumen)

BTR_{qk} = biaya transportasi unit produk q ke lokasi pengumpulan kendaraan k

BTR_{qsid} = biaya transportasi unit $assy$ s produk q

BTR_{qpid} = biaya transportasi unit $part$ p produk q

BTR_{qpsid} = biaya transportasi unit $part$ p dari assy s produk q

KM_{ji} = jarak antara pusat $disassemby$ j dan pabrik $refurbishing$ i

M_i^{RF} = jumlah maksimum fasilitas $refurbishing$ yang dibuka

M_i^{DA} = jumlah maksimum pusat $disassembly$ yang dibuka

M_i^{RP} = jumlah maksimum pusat $repair$ yang dibuka

M_k^{PK} = jumlah maksimum pusat pengumpulan kendaraan EOL yang dibuka

$MEOL_q$ = jumlah produk EOL maksimum yang tersedia tipe q

$\propto_{qs}$ = fraksi yang dinginkan dari $assembly$ s produk tipe q yang dapat di$refurbishing$

$\propto_{qsji}$ = fraksi yang dinginkan dari $assembly$ s produk tipe q yang dipindahkan dari pusat $disassembly$ kepusat $refurbishing$ yang dapat di$refurbishing$

γ_{qs} = fraksi yang dinginkan dari $assembly$ s produk tipe q yang dapatdi $repair$

γ_{qp} = fraksi yang dinginkan dari $part$ p produk tipe q yang dapat di $repair$

γ_{qps} = fraksi yang dinginkan dari *part* p *assembly* s produk tipe q yang dapat di *repair*

ε_{qs} = *Parameter binary, equal* 1 jika *assembly s* tersedia pada produk tipe q

ε_{qp} = *Parameter binary, equal* 1 jika *part p* tersedia pada produk tipe q

ε_{qps} = *Parameter binary, equal* 1 jika *part p* tersedia pada *assembly* s produk tipe q

Ø = persentase maksimum dari total berat yang dapat di *recycle*

Formulasi Model

Penyelesaian model *goal programming* dilakukan untuk mendapatkan solusi optimal dalam merancang strategi pemulihan kendaraan EoL mempertimbangkan 4 objektif atau *goal*, yaitu meningkatkan keuntungan (*net income*), meminimalkan dampak lingkungan (Emisi CO_2), meningkatkan jumlah komponen *part*, *assy part* atau *part* dari *assy part* yang dipulihkan oleh produsen dan meningkatkan jumlah yang didaur ulang atau *recycle* oleh perusahaan rekanan untuk daur ulang.

Vector pencapaian

Lexicograpis minimasi:

$$z = \{d_1^-,\ d_2^+, d_3^-, d_4^-\} \quad (1)$$

Fungsi tujuan dan penjelesan untuk keempat *goal* atau sasaran dijelaskan dalam persamaan berikutnya:

Net Income

Fungsi tujuan utama dalam perancangan strategi pemulihan kendaraan EoL yang ingin dilakukan adalah memaksimalkan keuntungan (*net income*), dinotasikan sebagai berikut:

$$\boldsymbol{Net\ income} + \boldsymbol{d_1^-} - \boldsymbol{d_1^+} = \boldsymbol{P_{RL}} \quad (2)$$

Net income secara rinci diperoleh dengan formula perhitungan dibawah:

Net Income = Total Pendapatan – Total Biaya

Pendapatan dari penjualan *part* dan *assembly part* kepada dealer dan *assembly plant* dinotasikan sebagai berikut:

$$= \sum_q \sum_s \sum_i \sum_d \left(H_{qsd}^{DS} * X_{qsid}^{RD}\right) + \sum_q \sum_s \sum_h \sum_d (H_{qsd}^{DS} * X_{qshd}^{DES}) + \sum_q \sum_p \sum_h \sum_d (H_{qpd}^{DP} * X_{qphd}^{DEP}) + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_h \sum_d (H_{qpsd}^{DPS} * X_{qpshd}^{DEPS}) + \sum_q \sum_s \sum_i \sum_a (H_{qsa}^{AS} * X_{qsia}^{RA}) + \sum_q \sum_s \sum_h \sum_a (H_{qsa}^{HAS} * X_{qsha}^{APS}) + \sum_q \sum_p \sum_h \sum_a (H_{qpa}^{HAP} * X_{qsha}^{APP}) + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_h \sum_a (H_{qpsha}^{HAPS} * X_{qpsha}^{APPS}) \quad (3)$$

Pendapatan dari penjualan material daur ulang kepada *recycler* ditentukan oleh jumlah berat dalam satuan kilogram (kg) , dinotasikan sebagai berikut:

$$= \sum_q \sum_s \sum_j \sum_r \left(H_{qsr}^{RS} W_{qs} X_{qsjr}^{DCS}\right) + \sum_q \sum_p \sum_j \sum_r (H_{qpr}^{RP} W_{qp} X_{qpjr}^{DCP}) + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_j \sum_r (H_{qspr}^{RPS} W_{qsp} X_{qpsjr}^{DCPS}) \quad (4)$$

Biaya untuk pembiayaan merupakan biaya yang diberikan kepada konsumen sebagai kompensasi dari pengembalian kendaraan EoL atau biaya yang harus produsen alokasikan untuk menarik kendaraan EoL dari konsumen, dinotasikan sebagai berikut (Harraz dan Galal, 2011):

$$= PD \sum_q \sum_k X_{qk} \quad (5)$$

Biaya untuk transportasi dinotasikan sebagai berikut:

$$= \sum_q \sum_j \sum_k BTR_{qk} d_{kj} X_{qk} + \sum_q \sum_s \sum_i \sum_d (BTR^{D}_{qsid} * D_{id} * X^{RD}_{qsia}) + \sum_q \sum_s \sum_h \sum_d (BTR^{DS}_{qshd} * D_{hd} * X^{DES}_{qshd}) + \sum_q \sum_p \sum_h \sum_d (BTR^{DP}_{qshd} * D_{hd} * X^{DEP}_{qshd}) + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_h \sum_d BTR^{DPS}_{qpshd} D_{hd} X^{DEPS}_{qpshd} + \sum_q \sum_s \sum_i \sum_a (BTR^{A}_{qsia} * D_{ia} * X^{RA}_{qsia}) + \sum_q \sum_s \sum_h \sum_a (BTR^{AS}_{qsha} * D_{ha} * X^{APS}_{qsha}) + \sum_q \sum_p \sum_h \sum_a (BTR^{AP}_{qpha} * D_{ha} * X^{APP}_{qpha}) + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_h \sum_a (BTR^{APS}_{qpsha} * D_{ha} * X^{APPS}_{qpsha}) \quad (6)$$

Biaya untuk inspkesi dinotasikan sebagai berikut:

$$= \sum_q \sum_j \sum_k BI_q X_{qjk} + \sum_q \sum_s \sum_j \sum_i BI^{S}_{qs} X^{DR}_{qsji} + \sum_q \sum_s \sum_j \sum_h BI^{S}_{qs} X^{DRS}_{qsjh} + \sum_q \sum_p \sum_j \sum_h BI^{P}_{qp} X^{DRP}_{qpjh} + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_j \sum_h BI^{PS}_{qps} X^{DRPS}_{qpsjh} \quad (7)$$

Biaya untuk *disassembly* dinotasikan sebagai berikut (Harraz dan Galal, 2011):

$$\sum_q \sum_s \sum_j \sum_k BPD^{S}_{qs} * X^{Q}_{qjk} * a_{qs} + \sum_q \sum_p \sum_j \sum_k BPD^{P}_{qp} * X^{Q}_{qjk} * b_{qp} + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_j BPD^{PS}_{qps} * X^{S}_{qsk} * f_{qps} \quad (8)$$

Biaya untuk *repair* dinotasikan sebagai berikut:

$$\sum_q \sum_s \sum_h \sum_d BR^{S}_{qs} X^{DES}_{qshd} + \sum_q \sum_s \sum_h \sum_a BR^{S}_{qs} X^{APS}_{qsha} + \sum_q \sum_p \sum_h \sum_d BR^{P}_{qp} X^{DEP}_{qphd} + \sum_q \sum_p \sum_h \sum_a BR^{P}_{qp} X^{APP}_{qpha} + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_h \sum_d BR^{PS}_{qps} X^{DEPS}_{qpshd} + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_h \sum_a BR^{PS}_{qps} X^{APPS}_{qpsha} \quad (9)$$

Biaya untuk *refurbish* dinotasikan sebagai berikut (Harraz dan Galal, 2011):

$$\sum_q \sum_s \sum_i \sum_d BR_{qs} X^{RD}_{qsid} + \sum_q \sum_s \sum_i \sum_a BR_{qs} X^{RA}_{qsia} \quad (10)$$

Biaya untuk *disposal* dinotasikan sebagai berikut (Harraz dan Galal, 2011):

$$\sum_q \sum_p \sum_j \sum_l BL^{P}_{qp} X^{DL}_{qpj} + \sum_q \sum_p \sum_s \sum_j \sum_l BL^{PS}_{qps} X^{DL}_{qpsj} \quad (11)$$

Biaya tetap merupakan biaya yang dikeluarkan produsen untuk membangun fasilitas pusat *disassembly*, pabrik *repair* dan pabrik *refurbish*, dinotasikan sebagai berikut:

$$\sum_h F_h Y^{RP}_h + \sum_i F_i Y^{RE}_i + \sum_j F_j Y^{DA}_j \quad (12)$$

1. **Meminimalkan Dampak Lingkungan Dari Alternatif Pemulihan**
   Fungsi tujuan yang kedua adalah meminimalkan dampak lingkungann dan dinotasikan sebagai berikut:

$$\boldsymbol{Emisi\ CO_2} + \boldsymbol{d_2^-} - \boldsymbol{d_2^+} = \boldsymbol{A_\delta}$$
$$\sum_p \sum_j ER^{P}_{qp} x^{DCP}_{qpjr} + \sum_s \sum_j \sum_i ER^{S}_{qs} x^{DCS}_{qsjr} + \sum_p \sum_s \sum_j ER^{PS}_{qps} x^{DCPS}_{qpsjr} +$$
$$+\sum_p \sum_j EL^{P}_{qp} x^{DLP}_{qpj} + \sum_p \sum_s \sum_j EL^{PS}_{qps} x^{DLPS}_{qpsj} + d_2^- - d_2^+ = A_\delta\ , \forall_q \in Q, \forall_r \in R, \forall_i \in I \quad (13)$$

2. **Maksimalkan Jumlah Komponen yang Dipulihkan oleh Produsen**
   Fungsi tujuan yang ketiga adalah untuk memaksimalkan jumlah yang dipulihkan oleh perusahaan sebagai produsen kendaraan yang dijual kepada konsumen, yaitu *repair* dan *refurbish*, dinotasikan sebagai berikut:
   Jumlah komponen (*part*/assy *part*) yang di pulihkan:

$$\textbf{Berat komponen yang dipulihkan} + d_3^- - d_3^+ = A_\gamma$$

$$\sum_p \sum_h w_{qp} x_{qpjh}^{DRP} + \sum_s \sum_j \sum_i w_{qs} x_{qsjh}^{DRS} + \sum_p \sum_s \sum_h w_{qps} x_{qpsjh}^{DRPS} + \sum_s \sum_j \sum_i w_{qps} x_{qsji}^{DR} +$$

$$d_3^- - d_3^+ = A_\gamma \ , \forall_q \in Q, \forall_h \in h, \forall_i \in I \qquad (14)$$

3. **Memaksimalkan Jumlah Komponen yang Didaur Ulang atau *Recycle* oleh Produsen**
   Fungsi tujuan keempat adalah memaksimalkan penjualan komponen hasil *disassembly* kepada *recycler*. Fungsi tujuan untuk memaksimalkan jumlah daur ulang dinotasikan sebagai berikut:

Jumlah komponen (*part*/ assy *part*) yang dijual kepada *recycler*:

$$\textbf{Berat part yang dijual untuk } recycler + d_4^- - d_4^+ = A_\beta$$

$$\sum_p \sum_j w_{qp} x_{qpjr}^{DCP} + \sum_s \sum_j \sum_i w_{qs} x_{qsjr}^{DCS} + \sum_p \sum_s \sum_j w_{qps} x_{qpsjr}^{DCPS} +$$

$$d_4^- - d_4^+ = A_\beta \ , \forall_q \in Q, \forall_r \in R \qquad (15)$$

Rigid Constraint

Rigid constraint terdiri atas beberapa kendala, diantaranya : kendala permintaan, endala keseimbangan input–output, kendala pembukaan fasilitas pengumpulan dan pemulihan kendaraan, kendala kapasitas, kendala kemampuan pemulihan dilakukan, kendala keterbatasan jumlah fasilitas, kendala Ketersediaan Produk EoL, Kendala Binier dan Kendala Non-Negativity

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemilihan Lokasi, Produk dan Komponen untuk Pemulihan

Dengan melakukan observasi pada beberapa media *online* tentang kawasan industri dan penjualan kendaraan produk Y, dipilih beberapa alternatif lokasi yang memiliki potensi sebagai lokasi pengumpulan kendaraan EoL, lokasi pusat *disassembly*, lokasi pabrik *repair* dan lokasi pabrik *refurbish*. Pemilihan lokasi tersebut berdasarkan observasi pada beberapa sumber yang menyatakan bahwa untuk kawasan Pulau Jawa, penjualan dikuasi oleh daerah-daerah perniagaan, diantaranya Sidoarjo dan Cirebon. Tangerang dipilih untuk mewakili kawasan Banten dan Surakarta untuk mewakili kawasan Jawa Tengah. Lokasi Majalengka, Mojokerto dan Demak dipilih karena lokasi tersebut merupakan kawasan industri yang saat ini sedang dikembangkan dan merupakan solusi yang potensial untuk investasi karena UMK yang masih cukup rendah dibandingkan kawasan lain.

Tabel 1 Lokasi Pengumpulan Kendaraan Dan Pemulihan Kendaraan

Lokasi Pengumpulan (k)	**Lokasi *Disassembly* (j), *Repair* (h) dan *Refurbish* (i)**
Tangerang Cirebon	Majalengka – Jawa Barat
Surakarta	Demak – Jawa Tengah
Sidoarjo – Jawa timur	Mojokerto – Jawa Timur

Tabel 2 Komponen Produk (Q) Untuk Komponen *Assembly* (S) Dan *Part* (P) Kendaraan EoL Yang Dipulihkan

Kategori Item	No Komp	Komponen Assy (s) & Part (p)	No Part	Part Name (p) dari komp assy (s)	QTY	Standar Weight (Kg)		
						Assy	Assy	Part/Assy
Part (p)	1	BATTERY	1	BATTERY ASSY	1	9.6	0	0
	2	SPEEDOMETER	1	SPEEDOMETER ASSY,COMB	1	0.7	0	0
Assembly Part (s)	1	MOTOR ASSY	1	MOTOR ASSY,STARTING	1	0	8.448	2.650
			2	SWITCH ASSY,IGNITION	1	0		0.217
			3	COVER ASSY,CLUTCH	1	0		3.771
			4	YOKE ASSY	1	0		0.460
			5	MOTOR & BRKT ASSY,WIPER	1	0		1.350

Sementara informasi untuk komponen–komponen yang akan dijadikan objek untuk aplikasi model dijelaskan dalam Tabel 2 di atas.

Uji Validasi dan Aplikasi Model

Aplikasi model dilakukan untuk menguji validitas model yang dirancang pada penelitian ini. Dalam aplikasi model dengan menggunakan *software lingo 11*, dilakukan beberapa percobaan dengan mengubah beberapa parameter yang ada untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada variabel lain. Hasil uji validasi untuk mengaplikasikan model kedalam studi kasus pada Produsen Mobil Z dengan menggunakan parameter yang telah ditetapkan. Model yang dirancang untuk menentukan strategi alternatif pemulihan komponen kendaraan EoL dengan mempertimbangkan empat *goal* atau objektif, yaitu memaksimalkan keuntungan, meminimalkan q dampak lingkungan, memaksimalkan jumlah pemulihan komponan oleh produsen dan memaksimalkan jumlah komponen yang dijual kepada *recycler* dinyatakan valid dengan menggunakan *Software Lingo* 11. Validasi tersebut dinyatakan dari hasil aplikasi model dengan menggunakan informasi data sebagai berikut:

Tingkat Aspirasi yang Diharapkan:
Target *Net Income* : IDR 1,200,000.-
Target Emisi : 9,000 Kg – CO_2
Target Pemulihan Komponen Kendaraan : 630 Kg
Target Penjualan / Daur Ulang oleh *Recycler*: 2,100 Kg
Lokasi pusat pengumpulan kendaraan EoL yang dibuka lokasi 4 (Sidoarjo)
Lokasi pusat *disassembly* yang dibuka lokasi 3 (Mojokerto)
Lokasi pabrik *repair* yang dibuka lokasi 3 (Mojokerto)
Lokasi pabrik *refurbishing* yang dibuka lokasi 2 (Demak)

Tabel 3. Jumlah Komponen Yang Dipulihkan Untuk Masing–Masing Alternatif Pemulihan Komponen Kendaraan EoL

Part / Assy Part	Variabel Keputusan	Proses Asal		Proses Tujuan		Qty
Battery	XDRP	Disassembly	3	Repair	3	60
	XDLP	Disassembly	3	Disposal	1	50
	XDCP	Disassembly	3	Recycle	1	40
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					150
	XDEP	Repair	3	Dealer	4	60
	Total Komponen yang Dipulihkan					60
Speedometer	XDRP	Disassembly	3	Repair	3	45
	XDLP	Disassembly	3	Disposal	1	1
	XDCP	Disassembly	3	Recycle	1	104
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					150
	XDEP	Repair	3	Dealer	1	1
	XDEP	Repair	3	Dealer	4	44
	Total Komponen yang Dipulihkan					45
Motor Assy	XDR	Disassembly	3	Refurbish	2	1
	XDRS	Disassembly	3	Repair	3	1
	XDCS	Disassembly	3	Recycle	1	143
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					145
	XRD	Refurbish	2	Dealer	3	1
	XDES	Repair	3	Dealer	4	1
	Total Komponen yang Dipulihkan					2
Motor - Part 1	XDLPS	Disassembly	1	Disposal	1	3
	XDCPS	Disassembly	1	Recycle	1	2
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					5
Motor - Part 2	XDLPS	Disassembly	1	Disposal	1	4
	XDCPS	Disassembly	1	Recycle	1	1
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					5
Motor - Part 3	XDRPS	Disassembly	1	Repair	3	1
	XDCPS	Disassembly	1	Recycle	1	4
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					5
	XDEPS	Repair	1	Dealer	3	1
	Total Komponen yang Dipulihkan					1
Motor - Part 4	XDRPS	Disassembly	1	Repair	3	1
	XDCPS	Disassembly	1	Recycle	1	4
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					5
	XDEPS	Repair	1	Dealer	3	1
	Total Komponen yang Dipulihkan					1
Motor - Part 5	XDRPS	Disassembly	1	Repair	3	1
	XDLPS	Disassembly	1	Disposal	1	4
	Total Komponen Kendaraan Di-disassembly					5
	XDEPS	Repair	1	Dealer	3	1
	Total Komponen yang Dipulihkan					1

Hasil *running* model yang diperoleh sesuai dengan *output* yang diinginkan dari penelitian ini. Parameter kendaraan yang dapat masuk ke lokasi pengumpulan kendaraan pada aplikasi model ini di*setting* maksimal 150 unit kendaraan dapat terkumpul. Dari 150 unit kendaraan yang masuk, seluruh komponen dapat dilakukan *disassembly* menjadi 3 komponen, yaitu *battery*, *motor assy* dan *speedometer*. Jumlah komponen yang keluar dari pusat *disassembly* dan masuk ke lokasi pabrik *repair*, pabrik *refurbish*, lokasi disposal maupun yang dijual ke *recycler* sudah sesuai dengan input yang masuk ke pusat *disassembly*.

Sesuai dengan model yang dirancang, komponen yang telah dipulihkan oleh produsen baik dengan menggunakan teknik *repair* maupun teknik *refurbish* diutamakan untuk memenuhi kebutuhan dealer. Dealer yang dimaksud dalam aplikasi model ini sama dengan tempat atau lokasi untuk pengumpulan kendaraan EoL. Pendapatan yang diperoleh dengan alternatif strategi pemulihan diatas mampu menghasilkan pendapatan bersih sebesar IDR.1,200,000.-, menghasilkan jumlah emisi sebesar 10,509 Kg-CO_2, memulihkan komponen seberat 630 kg dan menjual kepada *recycler* seberat 1,687 kg.

Kedua *goal* atau objektif untuk memaksimalkan *net income* dan jumlah komponen yang dipulihkan oleh produsen sudah tercapai sesuai tingkat aspirasi yang diharapkan, sementara untuk dampak lingkungan dan target penjualan kepada *recycler* belum tercapai. Objektif untuk meminimalkan dampak lingkungan masih dibawah target (*under achievement*) sebesar 1,509 Kg-CO dan Objektif memaksimalkan jumlah penjualan kepada *recycler* masih *under achievement* sebesar 313 Kg. Hal tersebut disebabkan karena kemampuan untuk recycle yang terbatas pada rasio 0.6, sehingga beberapa komponen harus mengalami disposal. Jumlah disposal ini juga menyebabkan pencapaian dibawah target meminimalkan dampak lingkungan, karena dampak lingkungan dari disposal merupakan yang paling tinggi.

KESIMPULAN

Dari uji validasi yang dilakukan dengan menggunakan *software lingo 11*, model yang dirancang dapat memberikan output sesuai dengan asumsi awal penelitian. Aplikasi model untuk merancang strategi pemulihan komponen kendaraan pada produsen Z untuk jenis Y sesuai dengan data–data yang digunakan pada tahap aplikasi model dan uji validasi. Pemulihan dengan teknik *repair* lebih direkomendasikan dibandingkan dengan teknik *refurbish* dikarenakan biaya proses *repair* dan jumlah emisi CO2 yang lebih rendah. Sementara penjualan kepada *recycler* paling direkomendasikan karena pengaruh rasio pemulihan komponen oleh produsen yang sangat terbatas. Tingkat prioritas fungsi objektif yang ingin dicapai oleh produsen berpengaruh terhadap strategik pemulihan komponen kendaraan yang direkomendasikan dengan memprioritaskan objektif pertama sebagai sasaran yang harus dicapai terlebih dahulu, setelah tercapai objektif kedua diprioritaskan sebagai sasaran selanjutnya sampai dengan objektif terakhir. Dengan memberikan tingkat prioritas, hasil *running* dari model yang dirancang akan memenuhi objektif pertama dan kedua untuk mencapai target, sementara objektif ketiga dan keempat pencapaian masih dibawah target (*under achievement*). Untuk menentukan strategi pemulihan komponen kendaraan lebih dari 1 jenis produk dimana karakter komponen produknya berbeda, dapat dikembangkan parameter – parameter baru, misal: biaya inspeksi untuk komponen X dari Produk Y sehingga membentuk suatu sub – model baru yang terkait dengan jenis

inspeksi yang dibutuhkan. Tingkat kualitas produk yang dikumpulkan pada pusat pengumpulan kendaraan EoL dapat diklasifikasikan untuk membedakan kompensasi yang diberikan kepada konsumen.

DAFTAR PUSTAKA

Choudary D. dan Shankar R., 2014, A goal programming model for joint decision making of inventory lot-size, supplier selection and carrier selection, *Computers & Industrial Engineering* 71: 1–9.

Ciptomulyono, U., 2001, *Pengembangan Model Multi Criteria Decision Making Model (MCDM) untuk Optimalisasi Pemilihan Pembangkit Energi Listrik di Sistem Jawa–Bali*, Hibah *Project Due Like-ITS.*

Envrionment Tools, 2010, *GHG Protocol Launches Scope 3 and Product Standard Road Testing*, dari http://www.environmenttools.co.uk/news/view/ article. diakses 10 Oktober 2014

Gehin A, Zwolinski P., Brissaud D., 2008, A tool to implement sustainable End-of-Life strategies in the product development phase, *Journal of Cleaner Production*, 16(5): 566-576.

Gerrard, J., Kandlikar, M., 2007, Is European End-of-Life vehicle legislation living upto expectations? Assessing the impact of the ELV Directive on 'green' innovation and vehicle recovery, *J. Cleaner Prod*, 15(1): 17-27.

Global Heat Treatment Network (2015), *2nd Central Eastern European Heat Treatment Forum & Expo*, dari http://global-heat-treatment-network.com/en/news. diakses 05 Mei 2015.

Go T.F, et al, 2011, Disassemblability of end-of-life vehicle: a critical review of evaluation methods, *Journal of Cleaner Production*, 19(13): 1536–1546.

Gradin K, Luttropp C, Björklund A., 2013, Investigating improved vehicle dismantling and fragmentation technology, *Journal of Cleaner Production*, 54: 23-29.

Gunasekaran A, Spalanzani A., 2012, Sustainability of manufacturing and services: Investigations for research and applications, *Int. J. Production Economics* (140): 35–47.

Harraz N, Galal N., 2011, Design of Sustainable *End-of-Life* Vehicle recovery network in Egypt, *Ain Shams Engineering Journal* 2(3-4): 211-219.

Jababeka, 2014. *Membangun 100 kota*, dari website http://www. jababeka.com/id. diakses 20 April 2015

Kementrian perindustrian, 2011, *Kawasan industri baru bakal dibangun di Jawa Barat senilai Rp 4 triliun*, dari website http://www.kemenperin.go.id/artikel/793 /Kawasan-Industri-Baru-Bakal-Dibangun-Di-Jawa-Barat-Senilai-Rp-4-Triliun. diakses 02 Januari 2015

Khalili N, Duecker S., 2013, Application of multi-criteria decision analysis in design of sustainable environmental management sistem framework, *Journal of Cleaner Production*, 47: 188-198.

Syahrullah, Y., Ciptomulyono U., 2015, Pengembangan Model Pemulihan Komponen Kendaraan End-of-Life Dengan Integrasi Tripple Bottom Line dan Teknik Pengambilan Keputusan Multi Objektif, *Prosiding Seminar Nasional Manajemen Teknologi* XXIII, A-63-1 – A-63-8.

Ziout A, et al., 2013, Multi-criteria decision support for sustainability assessment of manufacturing sistem reuse, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 6*(1): 59–69.

Ziout A, Azab A, Atwan M., 2014, A holistic approach for decision on selection of End-of-Life products recovery options, *Journal of Cleaner Production,* 65: 497-516.