

PENGEMBANGAN MODEL MATEMATIKA JARINGAN *SUPPLY CHAIN* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN EMISI PADA INDUSTRI DAUR ULANG KERTAS

Asgar Ali dan Nur Aini Masruroh

Program Studi Teknik Industri Fakultas Teknik

Universitas Gadjah Mada

Email: asgar456ali@gmail.com

ABSTRACT

Recycling is part of the green supply chain management which is developed base on the concept of environmentally friendly industry to respond the various issues regarding the environmental problems of the world. Distribution of recycled products starts from consumers and ends to manufacturing. The objective is to limit the waste in order to save energy and prevent the dumping of hazardous materials into the environment. However there are complexities in the supply chain because of some uncertainties such as the return of recycled product and the environmental impact resulting from the operation of supply chain. In this research, linear programming optimization method is proposed to overcome that problem with maximizing profit is set as the objective function. Emissions resulting from the recycling process are considered in the model. These results indicate that the mathematical model provides profit of Rp. 37.909.659, with 1.137.760 grams of CO₂ emissions from the production process, 38.473,4 grams of CO and 5.884,9 grams HC + NO_x of transport. While the proposed strategy is use the right vehicles and select the most efficient route according to the paper collected from consumers and sold to manufacturing. For the production process, it is required to add 3 pressing machines and 1 chopped machine, so the capacity of the working hours of 384 hours per month can be increased to 960 hours per month.

Keyword: *Environment; Linear Programming; Recycle; Uncertainty.*

ABSTRAK

Daur ulang merupakan bagian dari *green supply chain management* yang dikembangkan berdasarkan pada konsep industri berwawasan lingkungan dalam menjawab berbagai isu mengenai permasalahan lingkungan dunia. Distribusi produk daur ulang dimulai dari konsumen dan akhirnya sampai pada manufaktur. Tujuannya adalah agar dapat membatasi *waste* guna menghemat energi dan mencegah pembuangan bahan berbahaya ke lingkungan. Namun terdapat kompleksitas dalam *supply chain* daur ulang karena ketidakpastian seperti *return product* serta dampak lingkungan yang dihasilkan dari operasi *supply chain*. Pada penelitian ini, metode optimasi *linear programming* digunakan untuk mengatasi masalah memaksimalkan profit di dalam fungsi tujuan. Sedangkan emisi dari proses daur ulang berdasarkan hasil dari model. Hasil penelitian menunjukkan model matematika menghasilkan profit sebesar Rp. 37.909.659, dengan emisi 1.137.760 gram CO₂ dari proses produksi, 38.473,4 gram CO dan 5.884,9 gram HC + NO_x dari transportasi. Sedangkan strategi yang diusulkan yaitu penggunaan kendaraan dengan rute yang efisien dengan mempertimbangkan kertas bekas yang dikumpulkan dari konsumen maupun yang dijual ke manufaktur. Untuk proses produksi, diperlukan penambahan 3 mesin *press* dan 1 mesin rajang, sehingga kapasitas jam kerja dari 384 jam per bulan dapat meningkat menjadi 960 jam per bulan.

Kata Kunci: *Daur Ulang; Ketidakpastian; Linear Programming; Lingkungan.*

PENGANTAR

Isu mengenai permasalahan lingkungan dunia telah menjadi perhatian dari berbagai pihak, terutama beberapa sektor yang terus tumbuh dan menjadi penyumbang turunnya kualitas lingkungan dunia. Beberapa sektor tersebut adalah proses industri, transportasi, limbah, produk pertanian, *power stations*, penggunaan lahan dan *biomass burning*, *fossil fuel*, perumahan, dan lain-lain. Tumbuhnya sektor tersebut disebabkan karena adanya peningkatan aktivitas sosial ekonomi manusia untuk dapat memenuhi kebutuhan sehari-hari manusia. Namun, limbah yang dihasilkan dari sektor-sektor tersebut berdampak negatif terhadap lingkungan, sehingga dapat mengancam keberlangsungan hidup manusia.

Daur ulang adalah bagian dari konsep *green supply chain management* untuk mengikuti perkembangan konsep industri berwawasan lingkungan dalam menjawab isu mengenai permasalahan lingkungan dunia. Daur ulang merupakan salah satu cara untuk mengubah efek limbah yang negatif menjadi bahan baku untuk beberapa produk yang memiliki nilai fungsional yang positif dan menjadi sesuatu yang berguna bagi masyarakat (Srivastava, 2007; Ninlawan dkk, 2010). Hal ini dikarenakan daur ulang dapat memperpanjang penggunaan produk yang telah habis digunakan oleh konsumen sehingga dapat mengurangi limbah yang dibuang dan dapat meminimalkan penggunaan bahan baku yang baru untuk membuat produk baru.

Alur *supply chain* dari proses daur ulang produk bekas dilakukan secara terbalik (*reverse supply chain*), yaitu dimulai dari konsumen dan pada akhirnya sampai pada manufaktur untuk diproduksi menjadi produk baru atau produk yang sama dan dapat digunakan kembali (Hickford & Cherrett, 2007). Tujuannya adalah agar dapat membatasi *waste* guna menghemat energi dan mencegah pembuangan bahan berbahaya ke lingkungan.

Beberapa tahun terakhir, *reverse supply chain* menjadi salah satu topik penelitian yang menarik, khususnya dengan menambahkan gas emisi yang dihasilkan dari rantai pasok tersebut. Seperti yang dapat ditemukan dalam beberapa literatur antara lain Sheu (2008),

Chaabane, dkk (2012), serta Tsai dan Hung (2009). Akan tetapi, operasi *reverse supply chain* tersebut mempunyai tantangan yang menyebabkan terjadinya kompleksitas yaitu ketidakpastian *return product* menjadi lebih sulit karena tidak ada data (distribusi) yang pasti mengenai produk karena kecepatan pengembalian produk yang sulit diukur (Hickford & Cherrett, 2007). Untuk itu, mengelola kompleksitas *supply chain* dapat menghasilkan kinerja rantai pasok yang lebih baik (Serdarasan, 2013).

Untuk itulah, penelitian ini bertujuan untuk membuat model matematika *supply chain* daur ulang kertas bekas yang optimal dan menghitung emisi yang dihasilkan dengan mempertimbangkan ketidakpastian *return product*, serta mengevaluasi setiap strategi yang dapat digunakan untuk menghadapi ketidakpastian tersebut.

Metode yang digunakan yaitu metode optimasi *linear programming* untuk model yang pertama. Metode optimasi ini dipilih karena karakteristiknya sesuai dengan permasalahan jaringan *supply chain* daur ulang kertas yang dihadapi. *Linear programming* menggunakan model matematika untuk menggambarkan suatu masalah yang meliputi perencanaan aktivitas untuk mendapatkan hasil yang terbaik (optimal) di antara semua kemungkinan alternatif yang mungkin terjadi (Hillier & Lieberman, 2005). Sedangkan untuk model yang kedua akan dihitung berdasarkan *output* dari model yang pertama.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambaran Sistem

Pada penelitian ini, yang menjadi objek utama dalam jaringan *supply chain* daur ulang kertas adalah UD. Sregep. Kertas bekas yang dikumpulkan perusahaan tersebut berasal dari berbagai konsumen yang ada di wilayah Yogyakarta. Dimana terdapat jenis-jenis kertas bekas yang dikumpulkan yaitu HVS, Koran, Arsip, *Art Paper*, Ivory, Marga, dan *Mix/As*.

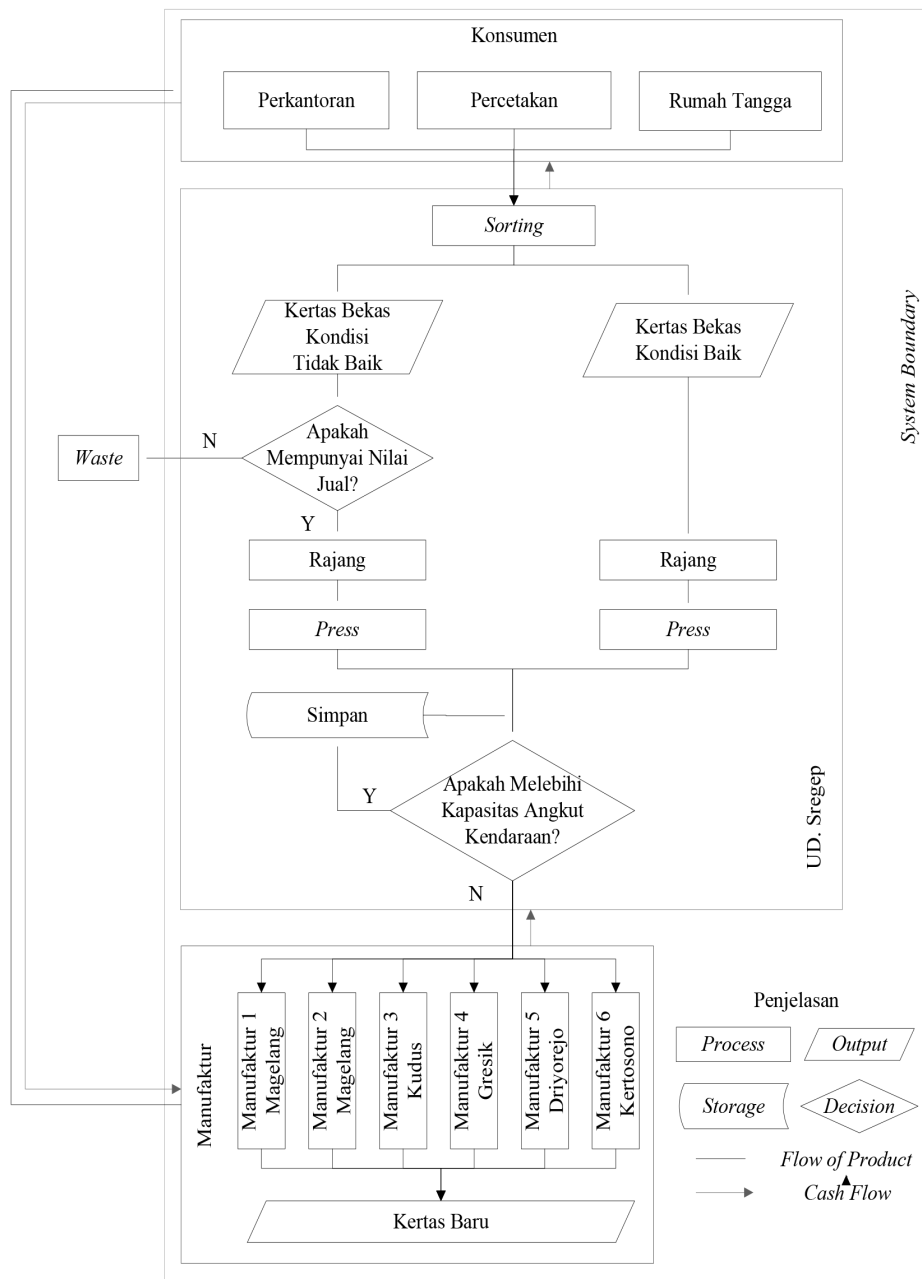
Kertas-kertas bekas tersebut kemudian akan melalui proses produksi yaitu proses *sorting*, rajang, serta *press*. Proses *sorting* dilakukan untuk memisahkan kertas berdasar-

kan kondisinya yaitu kondisi kertas bekas yang baik dan tidak baik. Kertas dengan kondisi yang tidak baik juga dipisahkan antara yang masih dapat dijual dengan yang tidak mempunyai nilai jual, maka harus dibuang.

Pada proses rajang, kertas bekas akan dipotong-potong menjadi kertas dalam ukuran-ukuran yang kecil dengan menggunakan mesin rajang. Kemudian berlanjut pada proses *press* kertas bekas menjadi bentuk-

bentuk persegi dengan berat yang sama yaitu 1 kilogram. Kertas bekas yang telah diproses tersebut, kemudian dijual atau dikirimkan ke manufaktur yang memproduksi produk kertas baru. Diketahui pula bahwa berapapun jumlah kertas bekas yang diproses oleh UD. Sregep akan terserap oleh manufaktur.

Secara jelas, gambaran tentang jaringan *supply chain* daur ulang kertas UD. Sregep dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1.
Jaringan *Supply Chain* Daur Ulang Kertas UD. Sregep

Formulasi Model

Notasi dari indeks, parameter dan variabel yang digunakan dalam membuat model matematika *Linear Programming* jaringan *supply chain* daur ulang kertas sebagai berikut:

Indeks Model

- i Jenis kertas bekas ($i=1, 2, 3, \dots, o$)
- j Konsumen ($j= 1, 2, 3, \dots, z$)
- k Manufaktur ($k= 1, 2, 3, \dots, v$)
- l Kondisi kertas bekas (l =baik, tidak baik)
- m Jenis kendaraan (m = truk ringan, truk sedang, truk berat)
- n Jenis emisi gas buang (n =CO, CO₂, HC + NO_x)
- w Jenis periode waktu ($w=1, 2, 3, \dots, u$)

Parameter Model

- P_i Biaya proses produksi kertas bekas i (Rp/kg)
- f Biaya tenaga kerja (Rp/bulan/tenaga kerja)
- b_{jm}^{trans} Biaya transportasi pengumpulan kertas bekas dari konsumen j dengan kendaraan m (Rp/kg)
- b_{km}^{trans} Biaya transportasi pengiriman kertas bekas ke manufaktur k dengan kendaraan m (Rp/kg)
- h Biaya *handling* per kertas bekas di gudang (Rp/kg)
- h^{maks} Biaya *handling* maksimal yang telah ditetapkan (Rp)
- b_{ij}^{beli} Harga beli kertas bekas dari konsumen (Rp/kg)
- b_{il}^{jual} Harga jual kertas bekas i dalam kondisi yang telah diproduksi (Rp/kg)
- g Jumlah tenaga kerja (orang)
- c^{prod} Kapasitas waktu produksi kertas bekas yang tersedia (jam)
- c_m^{kndr} Kapasitas angkut kendaraan m (kg)
- c^{ivoty} Kapasitas gudang penyimpanan (kg)
- t_i^{prod} Waktu proses *sorting*, rajang, dan *press* kertas bekas i (jam/kg)
- d_{ij}^{Prsh} Permintaan kertas bekas i oleh perusahaan dari konsumen j (kg)
- d_{ikl}^{mfkr} Permintaan kertas bekas i dalam kondisi oleh manufaktur k (kg)

- s_{iw} Sisa kertas bekas i yang belum diproduksi pada periode ke w (kg)
- λ_j Jarak antara perusahaan dengan konsumen j (km)
- μ_k Jarak antara perusahaan dengan manufaktur k (km)
- e_n^{prod} Nilai ambang batas maksimal emisi gas buang n yang dihasilkan dari proses produksi kertas bekas (gram/bulan)
- e_{mnw} Nilai ambang batas maksimal emisi gas buang n yang dihasilkan oleh kendaraan m setiap periode w (gram/bulan)

Variabel

- X_{ilw} Jumlah produk bekas i dalam kondisi l yang diproduksi pada periode w (kg)
- δ_{ijw} Jumlah produk bekas i yang dibeli dari konsumen j pada periode w (kg)
- θ_{ikl} Jumlah produk bekas i yang sudah diproduksi dalam kondisi l dijual ke manufaktur k (kg)

Variabel Dependent

- e_{iln}^{prod} Emisi gas n buang yang dihasilkan dari proses produksi kertas bekas i dalam kondisi l (gram/kg)
- e_{mn}^1 Emisi gas buang n yang dihasilkan oleh kendaraan m untuk mengumpulkan kertas bekas dari konsumen (gram/km)
- e_{mn}^2 Emisi gas buang yang dihasilkan oleh kendaraan m untuk mengirimkan kertas bekas ke manufaktur (gram/km)

Model Pertama: Memaksimumkan Total Profit

Formulasi matematika pada persamaan (1) merupakan fungsi tujuan yang berkaitan dengan proses yang terjadi pada jaringan *supply chain* daur ulang kertas untuk mencapai keuntungan yang semaksimal mungkin. Profit yang diterima setiap periodenya didapat dari selisih antara pendapatan dengan total biaya produksi dan transportasi kertas bekas.

$$\begin{aligned}
 \text{Max Total Profit per Periode} = & \\
 \sum_i \sum_k \sum_l b_{il}^{jual} \theta_{ikl} - \sum_i \sum_l p_i \chi_{ilw} - \sum_i \sum_j b_{ij}^{beli} \delta_{ijw} & \\
 - \sum_i \sum_k \sum_l h(s_{iw} + (\chi_{ilw} + \chi_{ilw-1} - \theta_{ikl})) - f & \\
 - \sum_i \sum_l b_{jm}^{trans} \delta_{ijw} - \sum_i \sum_k \sum_l b_{km}^{trans} \theta_{ikl} & \quad (1)
 \end{aligned}$$

Persamaan (2) merupakan batasan model yang berkaitan dengan total biaya *handling* seluruh kertas bekas yang disimpan di gudang penyimpanan. Persamaan (3) merupakan waktu proses produksi yang terdiri dari proses *sorting*, rajang dan *press*. Persamaan (4) dan persamaan (5) berkaitan dengan kapasitas angkut kendaraan yang digunakan untuk mengumpulkan atau membeli kertas bekas dari kosumen dan untuk mengirimkan kertas bekas yang telah melalui proses *sorting*, rajang, dan *press* ke manufaktur. Persamaan (6) berkaitan dengan kapasitas maksimal kertas bekas yang dapat ditangani di gudang penyimpanan. Persamaan (7) berkaitan dengan jumlah masing-masing kertas bekas yang melalui proses produksi. Sedangkan persamaan (8) menunjukkan jumlah masing-masing kertas bekas yang dijual ke manufaktur.

$$\sum_i \sum_k \sum_l h(s_{iw} + (\chi_{ilw} + \chi_{ilw-1} - \theta_{ikl})) \leq h^{maks} \quad (2)$$

$$\sum_i t_i^{prod} \leq c^{Prod} \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j \delta_{ijw} \leq c_m^{kndr} \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_k \sum_l \theta_{ikl} \leq c_m^{kndr} \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_k \sum_l (s_{iw} + (\chi_{ilw} + \chi_{ilw-1} - \theta_{ikl})) \leq c^{ivty} \quad (6)$$

$$\sum_l \chi_{ilw} \leq \sum_j (\delta_{ijw} + s_{iw-1}) \quad \forall i \quad (7)$$

$$\sum_k \sum_l \theta_{ikl} \leq \sum_l (\chi_{ilw} + \chi_{ilw-1}) \quad \forall i \quad (8)$$

Batasan yang terkait dengan permintaan kertas bekas dapat dilihat pada persamaan (9) yang berarti berapapun kertas bekas yang ada di masing-masing konsumen akan terserap oleh perusahaan. Selain itu, terdapat juga persamaan (10) berarti berapapun produk bekas yang sudah diproduksi oleh perusahaan akan terserap oleh manufaktur.

$$\sum_i \delta_{ijw} \geq \sum_i d_{ij}^{prsh} \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_i \theta_{ikl} \geq \sum_i d_{ikl}^{mfkr} \quad \forall k, l \quad (10)$$

Model Kedua: Total Emisi Gas Buang

Model kedua yaitu menghitung emisi gas buang yang merupakan efek samping dari proses yang terjadi pada jaringan *supply chain* daur ulang kertas. Secara lengkap formulasi matematika dari fungsi tujuan tersebut dapat dilihat pada persamaan (11).

$$\begin{aligned}
 \text{Emisi Gas Buang} = & \\
 \sum_i \sum_l \sum_n \chi_{ilw} e_{iln}^{prod} + \sum_j \sum_k \sum_m \sum_n (e_{mn}^1 \lambda_j + e_{mn}^2 \mu_k) & \quad (11)
 \end{aligned}$$

Model tersebut tersebut mempunyai batasan yang berkaitan dengan nilai ambang batas emisi gas buang yang diperbolehkan. Pada persamaan (12) yaitu batasan yang berkaitan dengan nilai ambang batas emisi gas buang dalam proses produksi kertas daur ulang. Sedangkan persamaan (13) berkaitan dengan nilai ambang batas emisi gas buang yang dihasilkan oleh kendaraan yang digunakan oleh jaringan *supply chain* daur ulang kertas.

$$\sum_i \sum_l \sum_n \chi_{ilw} e_{iln}^{prod} \leq e_l^{prod} \quad (12)$$

$$\sum_j \sum_k \sum_m \sum_n (e_{mn}^1 \lambda_j + e_{mn}^2 \mu_k) \leq e_{lmmw} \quad (13)$$

Solusi Model

Solusi optimal dari model didapatkan dengan menggunakan *solver* di dalam *software* Microsoft Excel.

Jaringan *supply chain* daur ulang kertas yang dimulai dari proses pengumpulan

kertas bekas yang ada di konsumen dengan menggunakan 5 kendaraan jenis truk kecil dengan kapasitas angkut per bulan yaitu 60.000 kg.

Tabel 1
Kertas Bekas yang Dikumpulkan dari Masing-Masing Konsumen

Jenis Kertas Bekas	Perkantoran (Kg)	Percetakan (Kg)	Rumah Tangga (Kg)
HVS	3295	0	0
Koran	0	3799	0
Arsip	20985	0	0
Art Paper	523	0	0
Ivory	1355	0	0
Marga	0	0	813
Mix/As	0	0	12512

Tabel 1 menunjukkan kertas bekas yang dikumpulkan dari konsumen, yang jumlah secara keseluruhannya adalah 43.282 kg, dengan biaya transportasi sebesar Rp1.298.460,00 serta biaya untuk membeli kertas bekas tersebut adalah sebesar Rp 103.749.700,00

Proses produksi kertas bekas yang terdiri dari proses *sorting*, rajang dan *press* mempunyai kapasitas waktu produksi adalah 384 jam per bulan. Dengan menggunakan seluruh waktu yang tersedia, jumlah kertas bekas yang

melalui proses produksi adalah 14.222 kg dari 43.282 kg kertas bekas yang tersedia. Untuk selengkapnya dapat dilihat pada tabel 2.

Sedangkan terdapat 17 kg kertas bekas dalam kondisi tidak baik yang memang tidak mempunyai nilai jual sehingga harus dibuang. Oleh karena itu, jumlah kertas bekas yang melalui proses produksi mengalami penyusutan menjadi 14.205 kg. Dengan biaya produksi sebesar Rp200,00 per kg, maka total biaya produksi yang dibutuhkan adalah sebesar Rp2.844.444,00

Tabel 2
Kertas Bekas yang Telah Melalui Proses Produksi

Jenis Kertas Bekas	Kondisi Baik (Kg)	Kondisi Tidak Baik (Kg)
HVS	3295	0
Koran	3799	0
Arsip	3302	3286
Art Paper	523	0
Ivory	0	0
Marga	0	0
Mix/As	0	0

Kertas bekas yang telah diproduksi, kemudian dikumpulkan bersama dengan kertas bekas yang telah melalui proses produksi pada periode sebelumnya dan dikirimkan ke manufaktur.

Melalui skenario pertama yaitu dengan menggunakan kapasitas angkut kendaraan 60.000 kg per bulan, hasilnya dapat dilihat pada tabel 3 dan tabel 4. Sedangkan untuk skenario kedua yaitu dengan menggunakan

kapasitas angkut kendaraan 90.000 kg per bulan, hasilnya dapat dilihat pada tabel 5 dan tabel 6. Perbedaan tersebut dikarenakan UD. Sregep pada kondisi aktual hanya menggunakan kapasitas angkut kendaraan 60.000 kg per bulan, namun pada nyatanya kapasitas kendaraan dapat mencapai 90.000 kg per bulan.

Tabel 3
Kertas Bekas Kondisi Baik yang Dikirimkan ke Manufaktur dengan Kapasitas Kendaraan 60.000 kg perbulan

Jenis Kertas Bekas	Manufaktur 1 (Kg)	Manufaktur 2 (Kg)	Manufaktur 3 (Kg)	Manufaktur 4 (Kg)	Manufaktur 5 (Kg)	Manufaktur 6 (Kg)
HVS	0	0	0	6952	343	0
Koran	0	6952	0	0	6610	237
Arsip	4635	0	6952	0	0	6715
Art Paper	1023	0	0	0	0	0
Ivory	300	0	0	0	0	0
Marga	994	0	0	0	0	0
Mix/As	0	0	0	0	0	0

Tabel 4
Kertas Bekas Kondisi Tidak Baik yang Dikirimkan ke Manufaktur dengan Kapasitas Kendaraan 60.000 kg perbulan

Jenis Kertas Bekas	Manufaktur 1 (Kg)	Manufaktur 2 (Kg)	Manufaktur 3 (Kg)	Manufaktur 4 (Kg)	Manufaktur 5 (Kg)	Manufaktur 6 (Kg)
HVS	0	0	0	0	0	0
Koran	0	0	0	0	0	0
Arsip	3048	3048	3048	3048	3048	3048
Art Paper	0	0	0	0	0	0
Ivory	0	0	0	0	0	0
Marga	0	0	0	0	0	0
Mix/As	0	0	0	0	0	0

Tabel 5
Kertas Bekas Kondisi Baik yang Dikirimkan ke Manufaktur dengan Kapasitas Kendaraan 90.000 kg perbulan

Jenis Kertas Bekas	Manufaktur 1 (Kg)	Manufaktur 2 (Kg)	Manufaktur 3 (Kg)	Manufaktur 4 (Kg)	Manufaktur 5 (Kg)	Manufaktur 6 (Kg)
HVS	0	0	0	1854	5441	0
Koran	0	9620	0	0	4179	0
Arsip	0	0	1940	7766	0	8597
Art Paper	0	0	0	0	0	1023
Ivory	0	0	300	0	0	0
Marga	2620	0	7380	0	0	0
Mix/As	7000	0	0	0	0	0

Tabel 6
Kertas Bekas Kondisi Tidak Baik yang Dikirimkan ke Manufaktur dengan Kapasitas Kendaraan 90.000 kg perbulan

Jenis Kertas Bekas	Manufaktur 1 (Kg)	Manufaktur 2 (Kg)	Manufaktur 3 (Kg)	Manufaktur 4 (Kg)	Manufaktur 5 (Kg)	Manufaktur 6 (Kg)
HVS	0	0	0	0	0	0
Koran	0	0	0	0	0	0
Arsip	3048	3048	3048	3048	3048	3048
Art Paper	0	0	0	0	0	0
Ivory	0	0	0	0	0	0
Marga	0	0	0	0	0	0
Mix/As	0	0	0	0	0	0

Untuk emisi gas buang yang dihasilkan dari operasi *supply chain* daur ulang kertas bekas, solusi optimalnya tergantung dari solusi optimal yang dihasilkan dari model yang pertama. Secara lengkap solusi optimal

yang dihasilkan dan dibandingkan dengan kondisi aktual (*real system*) dapat dilihat pada tabel 7. Tujuan perbandingan ini adalah untuk mengetahui bahwa model yang dihasilkan lebih baik atau tidak.

Tabel 7
Perbandingan Kondisi Aktual dengan Model

Deskripsi	Aktual	Skenario 1	Skenario 2
Waktu proses produksi	384 jam	384 jam	384 jam
Kapasitas angkut truk ringan	60.000 kg	60.000 kg	60.000 kg
Kertas bekas yang dikumpulkan dari konsumen	43.282 kg	43.282 kg	43.282 kg
Biaya beli kertas bekas	Rp. 103.749.700	Rp. 103.749.700	Rp. 103.749.700
Biaya transportasi pengumpulan kertas bekas	Rp. 1.305.000	Rp. 1.298.460	Rp. 1.298.460
Jumlah Kertas bekas yang diproduksi	14.222 kg	14.222 kg	14.222 kg
Biaya produksi	Rp. 2.844.444	Rp. 2.844.444	Rp. 2.844.444
Sisa kertas bekas yang belum diproduksi	29.060 kg	29.060 kg	29.060 kg
Kertas bekas yang telah diproduksi pada periode sebelumnya	61.800 kg	61.800 kg	61.800 kg
Kapasitas angkut truk berat	60.000 kg	60.000 kg	90.000 kg
Kertas bekas yang dijual	60.000 kg	60.000 kg	76.006 kg
Biaya transportasi pengiriman kertas bekas	Rp. 3.800.000	Rp. 3.800.000	Rp. 4.813.695
Pendapatan	Rp. 209.737.460	Rp. 209.737.460	Rp. 245.850.590
Kertas bekas yang disimpan di gudang	45.065 kg	45.065 kg	29.060 kg
Biaya <i>handling</i>	Rp. 135.196	Rp. 135.196	Rp. 87.179
Biaya tenaga kerja	Rp. 60.000.000	Rp. 60.000.000	Rp. 60.000.000
CO ₂ dari proses produksi	1.137.760 gram	1.137.760 gram	1.137.760 gram
CO dari transportasi	38.573,4 gram	38.473,4 gram	47.061,4 gram
HC + NO _x dari transportasi	5.914,9 gram	5.884,9 gram	6.883,7 gram
Profit	Rp. 37.903.120	Rp. 37.909.659	Rp. 73.057.112

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan dengan cara memasukan *range* nilai perubahan yang mungkin terjadi dari parameter model matematika menggunakan *solver table* pada *software* Microsoft Excel 2010, sehingga dapat diketahui nilai delta (Δ) atau nilai perubahan maksimal pada koefisien fungsi tujuan dan koefisien fungsi kendala agar solusi dari model tetap optimal.

Tabel 8

Perubahan Koefisien Biaya Transportasi untuk Mengumpulkan Kertas Bekas dari Konsumen

Dari Konsumen/Ke UD Sregep (Rp)	Perkantoran	Per-cetakan	Rumah Tangga
HVS	30 (+ 1)	30 (- 1)	30 (- 1)
Koran	30 (- 1)	30 (+ 1)	30 (- 1)
Arsip	30 (+ 1)	30 (- 1)	30 (- 1)
Art Paper	30 (+ 1)	30 (- 1)	30 (- 1)

Dari Konsumen/Ke UD Sregep (Rp)	Perkantoran	Per-cetakan	Rumah Tangga
Ivory	30 (+ 1)	30 (- 1)	30 (- 1)
Marga	30 (- 1)	30 (- 1)	30 (+ 1)
Mix/As	30 (- 1)	30 (- 1)	30 (+ 1)

Pada tabel 8, dapat dilihat bahwa keseluruhan biaya transportasi dari setiap kertas bekas akan mempengaruhi solusi optimal jika = Rp 1. Selain biaya transportasi, terdapat harga beli masing-masing jenis kertas bekas dan jumlah kertas bekas yang dibeli, yang akan langsung mempengaruhi solusi optimal jika terjadi perubahan.

Berkaitan dengan proses produksi untuk mengolah kertas bekas yang telah dikumpulkan dari konsumen, terdapat dua koefisien yang berpengaruh terhadap fungsi tujuan yaitu waktu produksi yang dapat dilihat pada tabel 9 dan biaya produksi kertas bekas pada tabel 10.

Tabel 9

Perubahan Koefisien Waktu Produksi Kertas Bekas

Jenis Kertas	HVS	Koran	Arsip	Art Paper	Ivory	Marga	Mix/As
Waktu Produksi Awal (Jam/Kg)	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027
Batas Perubahan () (jam)	+ 0,007	+ 0,004	\pm 0,001	+ 0,001	- 0,006	- 0,008	- 0,009

Tabel 10

Perubahan Koefisien Biaya Produksi Kertas Bekas

Jenis Kertas	HVS	Koran	Arsip	Art Paper	Ivory	Marga	Mix/As
Biaya Produksi Awal (Rp/Kg)	200	200	200	200	200	200	200
Batas Perubahan () (Rp)	+ 807	+ 507	+ 692	+ 207	-	-	-

Proses pengiriman kertas bekas yang telah diproduksi ke manufaktur, terdapat biaya transportasi dan harga jual masing-masing jenis kertas bekas yang mempengaruhi secara

langsung solusi optimal yang dihasilkan. Perubahan tersebut dapat dilihat pada tabel 11 dan tabel 12.

Tabel 11

Perubahan Koefisien Biaya Transportasi untuk Mengirimkan Kertas Bekas ke Manufaktur

Dari UD Sregep/Ke (Rp/Kg)	Plant 1	Plant 2	Plant 3	Plant 4	Plant 5	Plant 6
HVS	50 (- 1)	50 (- 1)	60 (- 1)	80 (\pm 1)	70 (\pm 1)	70 (- 1)
Koran	50 (- 1)	50 (\pm 1)	60 (- 1)	80 (- 1)	70 (\pm 1)	70 (- 1)
Arsip	50 (- 1)	50 (- 1)	60 (\pm 1)	80 (\pm 1)	70 (- 1)	70 (\pm 1)

Dari UD Sregep/Ke (Rp/Kg)	Plant 1	Plant 2	Plant 3	Plant 4	Plant 5	Plant 6
<i>Art Paper</i>	50 (- 1)	50 (- 1)	60 (- 1)	80 (- 1)	70 (- 1)	70 (\pm 1)
Ivory	50 (- 1)	50 (- 1)	60 (\pm 1)	80 (- 1)	70 (- 1)	70 (- 1)
Marga	50 (\pm 1)	50 (- 1)	60 (\pm 1)	80 (- 1)	70 (- 1)	70 (- 1)
<i>Mix/As</i>	50 (\pm 1)	50 (- 1)	60 (- 1)	80 (- 1)	70 (- 1)	70 (- 1)

Tabel 12
Perubahan Koefisien Harga Jual Kertas Bekas ke Manufaktur

Dari UD Sregep/Ke (Rp/Kg)	Kertas Bekas Kondisi Baik	Kertas Bekas Kondisi Tidak Baik
HVS	4000 (- 200)	-
Koran	3800 (\pm 300)	-
Arsip	3400 (- 100)	3200 (- 1300, + 400)
<i>Art Paper</i>	3500 (+ 200)	-
Ivory	2600 (- 100, + 600)	-
Marga	2300 (- 100, + 900)	-
<i>Mix/As</i>	2200 (- 2100, + 100)	2200 (- 2200,+ 3600)

Di sisi lainnya, fungsi tujuan untuk meminimalkan emisi juga mempunyai koefisien yang dapat mempengaruhi jumlah emisi secara keseluruhan. Koefisien pertama yaitu koefisien emisi yang dihasilkan oleh proses transportasi menggunakan kendaraan. Akan tetapi, koefisien tersebut sangatlah tergantung pada jumlah produk yang dikumpulkan dari konsumen dan yang dikirimkan ke manufaktur.

Koefisien yang kedua adalah koefisien emisi yang dihasilkan oleh proses produksi menggunakan mesin rajang dan *press*. Nilai koefisien awalnya adalah 80 gram/kg kertas bekas yang diproduksi. Perubahan nilai koefisien tersebut sebesar 1 gram/kg kertas bekas akan langsung mengubah nilai optimal.

Jumlah kertas bekas yang ada pada konsumen dapat berubah seiring berjalannya waktu. Sehingga jika terjadi peningkatan

atau penurunan jumlah kertas bekas yang diikumpulkan dari konsumen sebanyak 1 kg kertas bekas maka akan mengubah solusi optimal yang telah diketahui.

Berkaitan dengan kapasitas angkut kendaraan yang digunakan untuk mengangkut kertas bekas yang telah dibeli dari konsumen. Dengan jumlah kendaraan yang dimiliki adalah sebanyak lima kendaraan dan kapasitas masing-masing kendaraan yaitu 1500 kg, maka sejumlah kendaraan tersebut dapat digunakan sesuai dengan jumlah kertas bekas yang dapat dikumpulkan tersebut.

Untuk kapasitas waktu produksi yang tersedia sangat dipengaruhi oleh jumlah mesin yang digunakan. Oleh karena itu, jika terjadi perubahan jumlah mesin maka akan mempengaruhi kapasitas waktu produksi yang tersedia dan solusi optimal. Lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 13.

Tabel 13
Perubahan Jumlah mesin dan Kapasitas Waktu Produksi Terhadap Solusi Optimal

Jumlah mesin	Kapasitas Waktu Kerja	Jumlah kertas bekas Yang Diproduksi (Kg)						
		HVS	Koran	Arsip	<i>Art Paper</i>	Ivory	Marga	<i>Mix/As</i>
4 mesin rajang dan 1 mesin <i>press</i>	192	3295	3799	0	17	0	0	0
4 mesin rajang dan 2 mesin <i>press</i>	384	3295	3799	6605	523	0	0	0

Jumlah mesin	Kapasitas Waktu Kerja	Jumlah kertas bekas Yang Diproduksi (Kg)						
		HVS	Koran	Arsip	Art Paper	Ivory	Marga	Mix/As
4 mesin rajang dan 3 mesin <i>press</i>	576	3295	3799	13716	523	0	0	0
4 mesin rajang dan 4 mesin <i>press</i>	768	3295	3799	20827	523	0	0	0
5 mesin rajang dan 5 mesin <i>press</i>	960	3295	3799	20985	523	1355	0	0
6 mesin rajang dan 6 mesin <i>press</i>	1152	3295	3799	20985	523	1355	0	0

Kapasitas angkut kendaraan untuk mengirimkan kertas bekas yang telah melalui proses produksi ke manufaktur, dapat disesuaikan dengan jumlah kertas bekas yang dikumpulkan dan diproduksi tersebut. Kapasitas maksimal kertas bekas yang dapat ditangani di gudang penyimpanan, jika terjadi perubahan kapasitas gudang penyimpanan di bawah 29.060 kg, maka kondisi tersebut akan menjadi tidak *feasible*. Sedangkan total biaya *handling* seluruh kertas bekas yang disimpan di gudang akan menjadi tidak *feasible* jika batas biaya *handling* berada di bawah Rp87.179,00.

Perubahan nilai emisi maksimal yang dikeluarkan oleh kendaraan dalam waktu satu bulan, dapat mempengaruhi solusi optimal dari meminimalkan emisi, jika penggunaan kendaraan maksimal untuk mengirimkan kertas bekas ke manufaktur berkurang menjadi hanya dua kali dari tiga kali pengiriman dalam waktu satu bulan.

SIMPULAN

Simpulan yang diperoleh berdasarkan hasil dan pembahasan serta tujuan dari penelitian ini sebagai berikut: *Pertama*, Model matematika *linear programming* optimal yang dihasilkan melalui skenario pertama yaitu profit sebesar Rp37.909.659 dengan emisi 1.137.760 gram CO₂ dari proses produksi, 38.473,4 gram CO dan 5.884,9 gram HC + NO_x dari transportasi. Sedangkan untuk skenario yang kedua dengan peningkatan kapasitas angkut pengiriman kertas bekas ke manufaktur dari 60.000 kg per bulan menjadi 90.000 kg per bulan, juga meningkatkan profit sebesar Rp73.057.112 dengan emisi 1.137.760 gram

CO₂ dari proses produksi, 47.061,4 gram CO dan 6.883,7 gram HC + NO_x dari transportasi.

Kedua, Terdapat beberapa strategi yang dapat diterapkan oleh perusahaan agar mendapatkan profit yang maksimal yaitu penggunaan kendaraan yang disesuaikan dengan rute yang paling minimal dan jumlah kertas bekas yang dikumpulkan dari konsumen maupun jumlah kertas bekas yang dikirimkan dan dijual ke manufaktur. Selain itu, diperlukan penambahan jumlah mesin *press* sebanyak tiga mesin dan mesin rajang sebanyak satu mesin secara bertahap, sehingga kapasitas jam kerja menjadi maksimal dari 384 jam per bulan dapat meningkat menjadi 960 jam perbulan, sehingga akan berdampak pada peningkatan *profit* yang diterima oleh UD. Sregep.

DAFTAR PUSTAKA

- Chaabane, A., Ramudhin, A., and Paquet, M., 2012, "Design of Sustainable Supply Chains Under the Emission Trading Scheme", *Journal of Production Economics*, 135, 37-49.
- Hickford, A.J., and Cherrett, T.J., 2007, *Green Logistics: Developing Innovative and More Sustainable Approaches to Reverse Logistics and the Collection, Recycling and Disposal of Waste Products from Urban Centres*, Transportation Research Group, University of Southampton.
- Hillier and Lieberman, 2005, *Introduction Operations Research 8th Edition*, Andi, Yogyakarta.

- Ninlawan, C., Seksan, P., Tossapol, K., and Pilada, W., 2010, "The Implementation of Green Supply Chain Management Practices in Electronics Industry", *Proceeding of the International Multi Convergence of Engineers and Computer Scientists*, Vol 3.
- Sheu, J.B., 2008, "Green Supply Chain Management, Reverse Logistics and Nuclear Power Generation", *Journal of Transportation Research*, 44, 19-46.
- Srivastava, S.K., 2007, "Green Supply-Chain Management: A State-Of-The-Art Literature Review", *International Journal of Management Reviews*, 9, 53-80.
- Tsai, W.H., and Hung, S.J., 2009, "Treatment and Recycling System Optimisation With Activity-Based Costing in Weee Reverse Logistics Management: An Environmental Supply Chain Perspective", *International Journal of Production Research*, 47, 5391-5420.