Jurnal SENOPATI

Sustainability, Ergonomics, Optimization, and Application of Industrial Engineering
Jurnal homepage : ejurnal.itats.ac.id/senopati

Pemodelan Optimasi Keberlanjutan pada Industri Plastik dengan Perspektif Closed-Loop Supply Chain Menggunakan Pendekatan Multi-Objective

Tasya Febrinda Ardika Putri[1], Suparno[2]
[1]Departemen Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih Kec Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia
[2] Departemen Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih Kec Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Halaman:
139 – 149

Tanggal penyerahan:
20 Januari 2026

Tanggal diterima:
18 Februari 2026

Tanggal terbit:
30 April 2026

EMAIL

[1]6010232002@student.its.ac.id
[2]Suparno@ie.its.ac.id

ABSTRACT

Industri plastik menjadi salah satu sektor yang mengalami pertumbuhan signifikan di Indonesia, namun juga menjadi penyumbang utama limbah dan emisi gas rumah kaca. PT Surya Indo Plastik (SIP), sebagai produsen kemasan plastik berbasis daur ulang, telah menerapkan sistem *closed loop to cup recycling* sebagai upaya keberlanjutan. Meskipun demikian, tantangan efisiensi biaya, emisi karbon dan rendahnya partisipasi masyarakat dalam pengembalian limbah plastik masih menjadi kendala utama. Penelitian ini bertujuan mengembangan model optimasi *closed loop supply chain* yang berkelanjutan di industri plastik dengan mempertimbangkan dua aspek utama: ekonomi dan lingkungan. Model ini dibangun menggunakan pendekatan *goal programming* untuk meminimalkan total biaya produksi, transportasi dan pembukaan fasilitas daur ulang serta emisi transportasi. Objek studi memiliki cakupan wilayah Jawa Timur, model mempertimbangkan data aktual perusahaan serta variabel spasial dan kapasitas fasilitas. Hasil penelitian diharapkan menjadi referensi strategis bagi perusahaan dalam merancang sistem CLSC yang efisien dan *sustainable.*

Keywords: *closed loop supply chain*, daur ulang, industri plastik, keberlanjutan, multi-objective, optimasi

ABSTRAK

The plastic industry is one of the sectors that has experienced significant growth in Indonesia, but it is also a major contributor to waste and greenhouse gas emissions. PT Surya Indo Plastik (SIP), as a producer of recycled plastic packaging, has implemented a closed loop to cup recycling system as a sustainable effort. However, the challenges of cost efficiency, carbon emissions and low community participation in returning plastic waste are still major obstacles. This study aims to develop a sustainable closed loop supply chain optimization model in the plastic industry by considering two main aspects: economic and environmental. This model is built using the goal programming to minimize the total cost of production, transportation and opening recycling facilities. The study object covers the areas of East Java, the model considers actual company data as well as spatial variables and facility capacity. The results of the study are expected to be a strategic reference for companies in designing efficient and sustainable

Kata kunci: closed loop supply chain, multi-objective, plastic industry, sustainable, recycling, optimization

PENDAHULUAN

Industri plastik merupakan salah satu sektor manufaktur yang memiliki peran penting dalam mendukung berbagai kebutuhan masyarakat, namun di sisi lain juga menjadi kontributor

utama terhadap permaslahan lingkungan akibat tingginya volume limbah plastik. Limbah plastik yang tidak terkelola dengan baik menyebabkan tercemarnya tanah, air dan ekosistem laut serta terkelola dengan baik berpotensi mencemari tanah, air dan ekosistem laut serta menimbulkan dampak jangka panjang terhadap kesehatan manusia dan lingkungan [1]. Kondisi ini mendorong perlunya penerapan konsep keberlanjutan dalam sistem rantai pasok industri plastik.

Sustainability dalam rantai pasok tidak hanya menekankan pada aspek ekonomi, tetapi juga mencakup aspek lingkungan dan sosial yang dikenal sebagai konsep *triple bottom line* [2]. Dalam inudustri plastik, aspek ekonomi berkaitan dengan pengurangan emisi dan limbah, sedangkan aspek sosial mencakup keterlibatan masyarakat serta penciptaan nilai sosial melalui aktivitas daur ulang [3]. Oleh karena itu, diperlukan suatu pengembangan secara integrasi yang mampu mengakomodasi ketiga aspek tersebut secara simultan.

Closed-loop supply chain (CLSC) merupakan pengembangan dari konsep rantai pasok konvensional yang mengintegrasikan aliran logistik maju (*forward logistics*) dan logistik balik (*reverse logistics*) [4]. Pada sistem CLSC, produk yang telah digunakan tidak langsung menjadi limbah, melainkan dikumpulkan kembali untuk diproses melalui kegiatan daur ulang, perbaikan atau remanufaktur sehingga dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku [5]. Penerapan CLSC pada industri plastik terbukti mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku utama serta menekan jumlah limbah plastik yang berakhir di lingkungan [6] .

Namun, implementasi CLSC menghadapi tantangan terutama terkait kompleksitas pengambilan keputusan yang melibatkan banyak entitas, biaya operasional yang tinggi serta trade-off antara tujuan ekonomi dan lingkungan [7]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pendekatan optimasi matematis banyak digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam perancangan dan pengelolaan CLSC [8].

Optimasi *multi-objective* merupakan pendekatan yang relevan dalam permasalahan CLSC karena sistem ini melibatkan lebih dari satu tujuan yang saling bertentangan, seperti minimasi biaya dan minimasi emisi karbon [9]. Pendekatan ini memungkinkan pengambil keputusan memperoleh solusi pareto optimal yang memberikan kesimbangan terbaik antar tujuan [10]. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan optimasi *multi-objective* pada CLSC mampu meningkatkan kinerja keberlanjutan secara signifikan dibandingankan pendekatan single-objective [11].

Tabel 1 *Literature Review*

No	Penulis	Tahun	Judul Penelitian	Metode	Objek Penelitian	Aspek Keberlanjutan	Kelemahan / Gap
1	A. Yadav et al.	2024	Challenges of blockchain adoption for manufacturing supply chain to achieve sustainability	Fuzzy DEMATEL	Industri karet	Ekonomi, Lingkungan	Tidak fokus pada aspek sosial secara eksplisit dan tidak pada industri plastik
2	Ming-Fu Hsu	2024	Decision-making framework for sustainability-related supply chain risk management	Network DEA	Manajemen risiko rantai pasok	Ekonomi, Lingkungan	Tidak mempertimbangkan aspek sosial secara mendalam
3	Moheb Mottaghi & Saeed Mansour	2025	Multi-objective robust optimization for sustainable CLSC for lithium-ion battery network design	Multi-Objective Robust Optimization	Industri baterai	Ekonomi, Lingkungan, Sosial	Tidak pada industri plastik, belum mengangkat aspek spasial
23	Misagh Rahbari et al.	2025	Sustainable CLSC for agri-food supply chain under uncertainty	Stochastic Programming	Industri makanan kaleng (agri-food)	Ekonomi, Lingkungan	Tidak mengkaji aspek sosial secara eksplisit, tidak relevan untuk industri plastik

Literature review pada Gambar 1. dapat disimpulkan bahwa berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan pendekatan analitis dan optimasi untuk mendukung implementasi sustainability dalam *closed-loop supply chain.* Yadav et al. Mengkaji adopsi blockchain pada rantai pasok manufaktur menggunakan metode *Fuzzy DEMATEL* dengan fokus pada aspek ekonomi dan

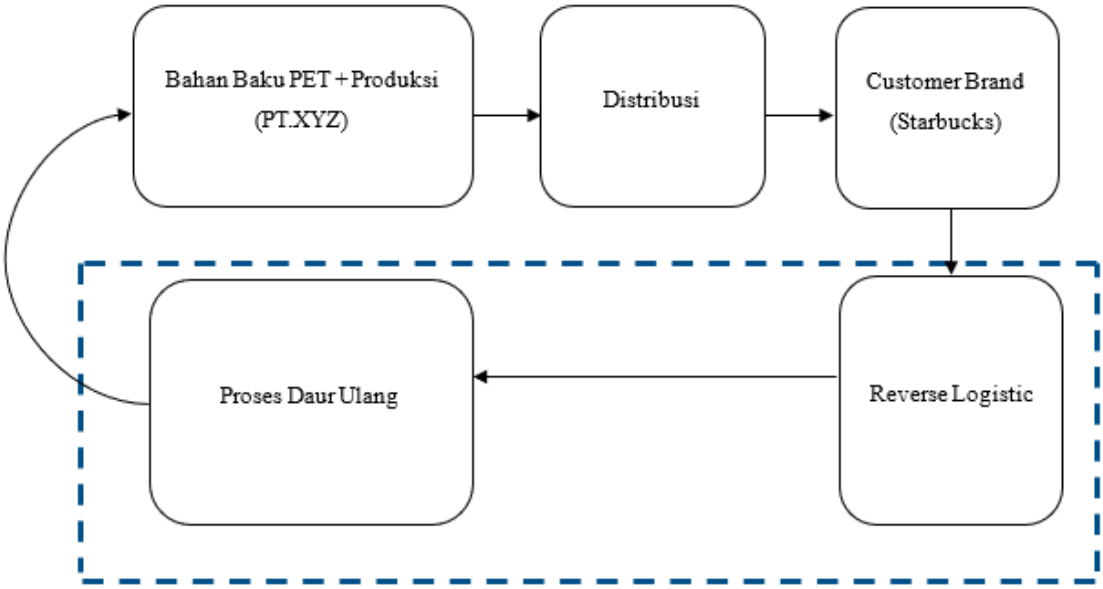
lingkungan, namun belum mangakomodasi aspek sosial secara eksplisit serta tidak secara spesifik membahas karakteristik industri plastik. Penelitian Hsu mengembangkan kerangka pengambilan keputusan berbasis network DEA untuk manajemen risiko rantai pasok berkelanjutan, tetapi masih memiliki keterbatasan dalam mengintegrasikan aspek sosial secara mendalam pada model evaluasi. Sementara itu, Motlagh dan Mansour mengusulkan model optimasi *multi-objective* pada CLSC industri baterai lithium-ion dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, lingkungan dan sosial namun model tersebut dikembangkan pada konteks industri non-plastik sehingga memiliki keterbatasan dalam generalisasi terhadap industri plastik yang memiliki karakteristik limbah dan proses daur ulang yang berbeda. Selain itu, Rahbari et.al. mengkaji CLSC pada industri *agro-food* dengan pendekatan *stochastic programming*, tetapi fokus pada ketidakpastian permintaan dan belum mengintegrasikan aspek sosial secara eksplisit serta kurang relevan untuk diaplikasikan pada industri plastik. Berdasarkan *critical review* tersebut dapat diidentifikasi adanya kesenjangan secara teoritis yaitu belum tersediannya model optimasi CLSC yang secara khusus dikembangkan untuk industri plastik dengan pendekatan *multi-objective* yang mengintegrasikan aspek ekonomi dan lingkungan secara simultan dalam satu kerangka optimasi yang aplikatif. Sebagian besar penelitian terdahulu masih bersifat parsial, dari sisi aspek keberlanjutan maupun industrinya. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengembangkan model optimasi *sustainability* pada *closed-loop supply chain* industri plastik menggunakan pendekatan *multi-objective* sehingga memberikan kontribusi kebaruan berupa terintegrasi aspek keberlanutan dalam konteks industri plastik yang relevan dengan kondisi operasional nyata dan dapat digunakan sebagai sistem pendukung keputusan strategis.

Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, dapat diidentifikasi adanya gap penelitian dalam penerapan *closed-loop supply chain* pada industri plastik. Secara teoritis sebagian besar penelitian mengenai CLSC masih memfokuskan optimasi pada satu aspek keberlanjutan secara terpisah yaitu hanya aspek ekonomi atau lingkungan, sehingga belum mampu merepresentasikan trade-off antar tujuan secara terintegrasi dengan pendekatan multi-objective. Sementara itu, secara praktis implementasi CLSC di industri plastik masih menghadapi keterbatasan dalam pengambilan keputusan strategis yang mempertimbangkan biaya operasional dan emisi karbon secara simultan berdasarkan kondisi operasional secara nyata. Kondisi tersebut menunjukkan urgensi dilakukannya penelitian yang mampu memberikan solusi dengan kebutuhan akademik dan praktik industri melalui pengembangan model optimasi yang aplikatif. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah menentukan lokasi fasilitas daur ulang yang dipilih dengan kriteria biaya produksi dan emisi karbon dan memberikan rekomendasi untuk perusahaan sebagai pemenuhan keputusan.

METODE

Metode penelitian diawali dengan observasi sistem CLSC pada perusahaan industri plastik untuk memahami alur logistik maju dan balik. Data yang dikumpulkan meliputi kapasitas fasilitas, biaya transportasi, biaya operasional, jumlah limbah plastik serta faktor emisi karbon. Selanjtnya disusun model matematis *multi-objective* yang terdiri dari fungsi tujuan ekonomi dan lingkungan dengan sejumlah kendala operasional. Model diselesaikan menggunakan perangkat lunak optimasi untuk memperoleh solusi optimal dan solusi antar tujuan. Diagram alir standar ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu diagram alir sederhana menggunakan visio diagram.

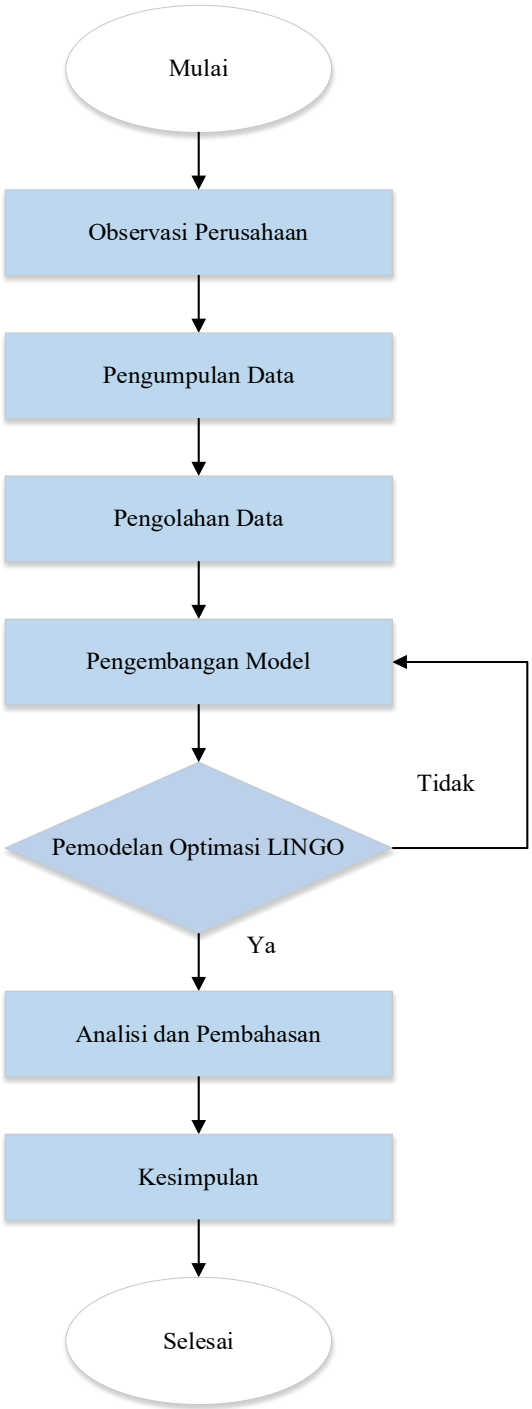
Objek penelitian ini di sebuah perusahaan manufaktur yang bergerak di bidang produksi kemasan plastik berbahan dasar PET. Penelitian dilakukan dengan mengambil data operasional dan data emisi karbon perusahaan selama kurang lebih enam bulan dari bulan april sampai september yang mencakup aktivitas produksi, pengumpulan limbah plastik, transportasi serta proses daur ulang internal perusahaan. Sistem yang digunakan dalam penelitian ini adalah closed-loop supply chain disebut juga cup to cup recycling di perusahaan di mana produk plastik pasca-konsumsi dikumpulkan kembali untuk diproses menjadi bahan baku daur ulang yang dapat digunakan kembali dalam proses produksi. Alur CLSC pada perusahaan industri plastik ini meliputi:



Gambar 1. Alur *Closed-Loop Supply Chain*

Model optimasi yang dikembangkan melibatkan sejumlah variabel keputusan yang merepresentasikan alokasi aliran material plastik, jumlah material yang didaur ulang, serta distribusi material antara fasilitas dalam sistem CLSC. Parameter model mencakup kapasitas fasilitas, biaya transportasi, biaya operasional, jumlah limbah plastik yang tersedia, faktor emisi karbon transportasi serta kebutuhan bahan baku produksi. Fungsi tujuan dalam penelitian ini disusun menggunakan pendekatan multi-objective yaitu meminiasi total biaya operasional dan meminimasi emisi karbon yang dihasilkan dari aktvitas transportasi dan proses dalam sistem CLSC. Hal ini mampu menangkap trade-off antara kepentingan ekonomi dan lingkungan secara simultan. Penyelesaian model dilakukan menggunakan pendekatan optimasi eksak berbasis pemograman matematis tanpa menggunakan metode heuristik atau metaheuristik. Pemilihan metode ini didasarkan pada karakteristik permasalahan dan ukuran model yang masih memungkinkan untuk diselesaikan secara eksak menggunakan perangkat lunak optimasi sehingga solusi yang diperoleh bersifat optimal secara matematis.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung, wawancara dengan pihak manajemen perusahaan serta pengumpulan data operasional terkait proses produksi, pengumpulan limbah dan transportasi. Sementara itu data sekunder diperoleh dari dokumen internal perusahaan, laporan operasional serta literatur dan publikasi ilmiah yang relevan dengan konsep *closed-loop supply chain* dan *sustainability.* Seluruh data tersebut digunakan sebagai input dalam penyelesaian model optimasi.



Gambar 2. *Flowchart* penelitian .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan Data I

Bagian ini membahas hasil penyelesaian model optimasi *sustainability* pada sistem *closed-loop supply chain* (CLSC) industri plastik menggunakan pendekatan *multi-objective*. Model yang dikembangkan mempertimbangkan dua tujuan utama, yaitu minimasi total biaya operasional dan minimasi emisi karbon dari aktivitas transportasi dengan tetap menjaga kelayakan produksi melalui pemanfaatan material plastik daur ulang.

Berikut merupakan model matematis untuk penelitian ini dengan menggunakan multi-objective :

Sets atau Indeks :

i : Sumber PET (Outlet Starbucks,Pengepul, Bank Sampah Umum)

j : {Pasuruan, Sidoarjo, Surabaya} : Lokasi Fasilitas Daur Ulang

k : Armada Pickup Medium

Parameter :

C_{ij} : Biaya transportasi dari i ke j (Rp/kg)

F_j : Biaya pembukaan fasilitas j

E_{ij} : Emisi CO_2 dari transportasi i ke j

S_i : Pasokan sampah PET dari pemasok i

CAP_j : Kapasitas fasilitas j

Fungsi Tujuan Multi-Objective :

Objektif 1: Minimasi Total Biaya (Ekonomi)

$$Min\ Z_1 = \sum_i \sum_j C_{ij}\ x\ x_{ij} + \sum_j F_j\ x\ y_j \quad (1.0)$$

Objektif 2: Minimasi Total Emisi Karbon (Lingkungan)

$$Min\ Z_2 = \sum_i \sum_j E_{ij}\ x\ x_{ij} \quad (1.1)$$

Fungsi Kendala (Constrains)

1. Pemasok sama dengan kuantitas demand di lokasi j

$$\sum_j x_{ij} = S_i \qquad \forall i \quad (1.2)$$

2. Kapasitas Pemasok tidak boleh melebihi kapasitas lokasi j

$$\sum_i X_{ij} \leq CAP_j\ .\ y_j \qquad \forall j \quad (1.3)$$

3. Kendala Pembukaan Faislitas

$$x_{ij} \leq M\ .\ y_j \qquad \forall i, j \quad (1.4)$$

4. Non-negativity & Biner:

$$x_{ij} \geq 0, \qquad y_j \in \{0,1\} \quad (1.5)$$

Tabel 2. Data Pemasok (i)

No	ID (i)	Alamat Pemasok	Kapasitas (Hari/Kg)	Armada Angkutan
1	Starbucks Royal Residence	Royal Square, Jl. Raya Menganti No 479	113	Pickup
2	Starbucks MERR	Super Indo MERR, Jl. Dr. Ir. H. Soekarno	188	Pickup
3	Starbucks Coffee BG Junction	BG Junction Lantai 1, Jl. Bubutan	150	Pickup
4	Starbucks Rest Area KM 753	Jl. Tol Surabaya - Gempol	300	Pickup
5	Starbucks Malang City Point	Jl. Terusan Dieng No. 31, Lt. Ground Floor, Pisang Candi, Malang	188	Pickup
45	Starbucks Transmart MX Mall Malang	Transmart MX Mall, Jl. Veteran No 8, Penanggungan, malang	188	Pickup

Tabel 3. Data Fasilitas Daur Ulang (i)

No.	Nama	Lokasi	Kapasitas/(kg/hari)
		Fasilitas Daur Ulang PT.XYZ	
1	Pabrik Sampah Plastik Daur Ulang Beji	Jl. Pantura, Kabupaten Pasuruan	6000
2	Pabrik Plastik Daur Ulang	Jl. Mayjend Bambang Yuwono, BalongBendo, Sidoarjo	6500
3	Pusat Daur Ulang Tubanan	Jl. Tandes, Surabaya	6500

Berdasarkan tabel 2 dan 3 merupakan data dari pemasok dan fasilitas daur ulang yang dimiliki oleh perusahaan produksi plastik di sidoarjo ini dengan kebutuhan fasilitas dan pemasok yang digunakan hanya disekitar jawa timur karena batasan yang diinginkan oleh perusahaan dan untuk pemasok brand diambil dari brand 1 minuman saja yaitu starbucks karena dilihat dari perusahaan yang memiliki permintaan tertinggi.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Total Biaya dan Emisi Karbon

Hasil Perhitungan Total Biaya Transportasi Pemasok ke FDU dan Emisi Karbon (Rp/Kg)								
No	**Pemasok**	**Total biaya transportasi FDU 1**	**Total biaya transportasi FDU 2**	**Total biaya transportasi FDU 3**	**Emisi Karbon FDU 1**	**Emisi Karbon FDU 2**	**Emisi Karbon FDU 3**	
1	Starbucks Royal Residence	Rp 50,900.80	Rp 50,580.51	Rp 50,140.12	Rp 844	Rp 806	Rp	938
2	Starbucks MERR	Rp 50,481.28	Rp 50,421.12	Rp 50,312.83	Rp 806	Rp 3,488	Rp	1,106
3	Starbucks Coffee BG Junction	Rp 50,754.00	Rp 50,603.20	Rp 50,180.96	Rp 1,331	Rp 975	Rp	2,606
4	Starbucks Rest Area KM 753	Rp 50,324.22	Rp 50,233.74	Rp 50,165.88	Rp 338	Rp 975	Rp	1,144
45	BSU Sahabat Asri	Rp 50,843.90	Rp 61,070.49	Rp 53,991.76	Rp 3,094	Rp 975	Rp	3,094

Berdasarkan tabel 2 hingga 4 maka data tersebut diinputkan kedalam proses lingo dengan memodelkan secara matematis dan bisa langsung di link kan dengan menggunakan excel (@OLE) jadi nanti lingo akan langsung membaca data yang dimiliki melalui excel hal ini dapat mempercepat proses input data karena tidak lagi menginputkan data secara satu-satu dapat dilakukan secara terintegrasi dengan data di excel.

```
SETS:
SUPPLIER/ S1..S45 /:SUPPLY;
FACILITY/ F1..F3 /:CAP,FCOST;
LINK(SUPPLIER,FACILITY): X, C, E;
total(FACILITY): Y;
ENDSETS

DATA:
SUPPLY = @OLE('C:\SIDANG\LINKDATA.xls','SUPPLIER!C4:C48');
CAP    = @OLE('C:\SIDANG\LINKDATA.xls','FACILITY!B3:B6');
FCOST  = @OLE('C:\SIDANG\LINKDATA.xls','FACILITY!C3:C6');
C      = @OLE('C:\SIDANG\LINKDATA.xls','COST_TRANS!C3:C137');
E      = @OLE('C:\SIDANG\LINKDATA.xls','EMISSION!C3:C137');
EMAX   = @OLE('C:\SIDANG\LINKDATA.xls','EPSILON!B3');

ENDDATA

!OBJECTIVE FUNCTION;
MIN =@SUM(LINK(i,j): C(i,j)*X(i,j))+ @SUM(total(j): FCOST(j)*Y(j));

!DECISION VARIABLES;
@FOR(LINK(i,j):X(i,j) >= 0);
@FOR(total(j):@BIN(Y(j)));

!CONSTRAINTS;
! Supply constraint;
@FOR(SUPPLIER:
  @SUM(FACILITY: X(i,j)) = SUPPLY(I));
! Facility capacity;
@FOR(FACILITY:
  @SUM(SUPPLIER: X(i,j)) <= CAP(j)*Y(j));
! Logical constraint;
@FOR(LINK(i,j):X(i,j) <= 100000*Y(j));
END
```

(a)

```
Global optimal solution found.
Objective value:                              0.1343518E+10
Infeasibilities:                              0.000000
Total solver iterations:                             25
Elapsed runtime seconds:                          0.48
```

(b)

```
Global optimal solution found.
Objective value:                              0.1043518E+10
Infeasibilities:                              0.000000
Total solver iterations:                             25
Elapsed runtime seconds:                          0.32
```

(c)

Gambar 3. *a. Inputan model Lingo 19.0, b. dan c. Hasil solver Biaya dan Emisi karbon .*

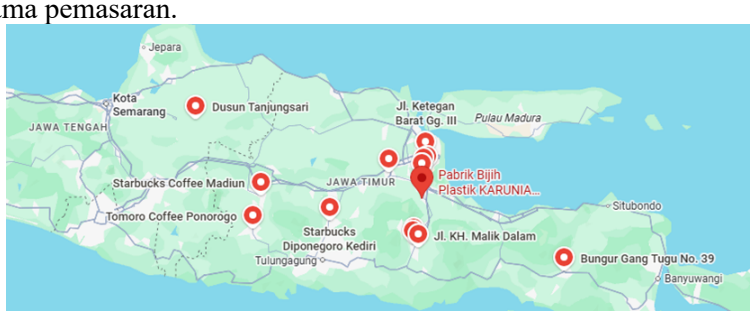
Tabel 4. Hasil Analisis hasil optimal

No	Row	Slack	Status	Dual Price	Analisis
1	1	0.134	Hampir Penuh	-1.0	Batasan tidak terlalu memengaruhi biaya, masih punya sisa sangat kecil
2	2-26	0.000	Penuh	-25.000 s.d -26.000	Batasan kendala penuh tanpa sisa kapasitas, jika Batasan di berikan nilai lebih tinggi maka biaya akan naik lebih besar.
3	27	4502.980	Tidak Penuh	0.00	Masih terdapat kapasitas yang bisa digunakan dan tidak memengaruhi biaya

4	28	5812.22	Tidak Penuh	0.00	Masih terdapat kapasitas yang bisa digunakan dan tidak memengaruhi biaya
5	29	5100.30	Tidak Penuh	0.00	Masih terdapat kapasitas yang bisa digunakan dan tidak memengaruhi biaya
6	30-104	0.000	Penuh	-1.449	Pengaruh batasan terhadap biaya dan emisi sangat kecil

Pembahasan Data II

Dalam penelitian ini hasil solver menunjukkan bahwa dari 3 lokasi fasilitas daur ulang yang terpilih adalah lokasi 2 dan 3 di sidoarjo dan surabaya yang dilihat dari hasil biaya dan emisi yang minimum. Berikut merupakan *set covering* pemetaan lokasi fasilitas daur ulang terpilih dengan kantor utama pemasaran.



(a)



(b)

Gambar 3 (a) dan (b) set covering untuk lokasi fasilitas daur ulang terpilih

Pada model optimasi yang telah dilakukan analisis sesitivitas menunjukkan *trade-off* secara alami antara efisiensi ekonomi dan dampak lingkungan. Meskipun model telah meminimasi kedua aspek, batasan lingkungan tetap menjadi faktor dominan yang mengarahkan struktur solusi, yaitu sebagai berikut:

1. Pelonggaran batas emisi akan membuat biaya turun tetapi emisi menjadi naik
2. Pengetatan batas emisi akan membuat biaya naik tetapi emisi menjadi turun
3. Peningkatan kapasitas akan memberikan alokasi material lebih stabil dengan utilitas biaya yang turun.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan model optimasi sustainbaility pada sistem *closed-loop supply chain* (CLSC) idustri plastik menggunakan pendekatan *multi-objective*. Model yang disusun mampu mengintegrasikan aliran logistik maju dan balik secara komprehensif mulai dari pengumpulan limbah plastik, proses transportasi, kegiatan daur ulang hingga pemanfaatan kembali material hasil daur ulang dalam proses produksi. Pendekatan ini memungkinkan sistem CLSC dianalisis secara lebih realistis sesuai dengan kondisi operasional industri plastik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan optimasi *multi-objective* mampu memberikan solusi kompromi yang optimal antara aspek ekonomi dan lingkungan. Dari sisi ekonomi, model mampu menurunkan total biaya operasional melalui efisiensi transportasi dan pengurangan penggunaan bahan baku utama, dari sisi lingkungan hasil optimasi menunjukkan potensi penurunan emisi karbon yang signifikan khususnya dari aktivitas transportasi, tanpa mengorbankan kelayakan produksi perusahaan. Pengembangan model optimasi CLSC berhasil dikembangkan untuk menentukan lokasi fasilitas daur ulang yang optimal di wilayah Jawa Timur dengan mempertimbangkan aspek keberlanjutan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa fasilitas daur ulang yang terpilih adalah di Sidoarjo dan Surabaya, karena keduanya memberikan hasil optimal dalam biaya distribusi, kapasitas serta efisiensi transportasi untuk daur ulang. Model ini terdiri dari fungsi tujuan secara ganda yaitu minimasi biaya dan minimasi emisi dengan hasil objektif dari GoalCost Rp. 1.343.518.000 dan Goal Emis 10.989 kg CO_2 atau setara dengan 10,9 ton CO_2 dengan nilai infeasibility sebesar 0,000 yang artinya seluruh kendala kapasitas, permintaan dan batas emisi terpenuhi secara optimal. Dari tiga alternatif lokasi (Pasuruan, Sidoarjo dan Surabaya), model menentukan bahwa Sidoarjo dan Surabaya (Fasilitas Daur Ulang ke 2 dan 3) adalah lokasi terbaik untuk dibuka sebagai fasilitas daur ulang baru.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan akademik dan fasilitas yang diberikan selama plekasanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan serta bimbingan selain itu penulis mengapreasiasi pihak perusahaan yang menjadi objek penelitian atas kesempatan, keterbukaan data dan kerja sama yang diberikan dalam mendukung proses pengumpulan data dan observasi lapangan. Dukungan dari berbagai pihak tersebut sangat berperan penting dalam keberhasilan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] G. R and Jambeck R, “Production, use, and fate of all plastics ever made.,” *Science (80-.).*, vol. 356, pp. 768–771, 2017.
[2] E. J, “The triple bottom line of 21st century business,” *Oxford Capstone Publ.*, 1997.
[3] M. Müller, “A literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management,” *J Clean Prod*, 2008.
[4] VDR Guide and LN Wassenhove Van, “An introduction to the feature issue,” *Prod Oper Manag*, 2006.
[5] G. K, S. H, and K. D, “Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future,” *Eur J Oper Res*, 2015.
[6] L. L and A. A, “Future scenarios of global plastic waste generation and disposal,” *Palgrave Commun*, 2019.
[7] M. Fleischmann, B.-R. JM, and Dekker R, “Quantitative models for reverse logistics: A review,” *Quant. Model. reverse Logist. A Rev.*, 1997.
[8] P. MS, T. SA, and Razmi J, “Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty,” *Comput Ind Eng*, 2012.
[9] D. K, “Multi-objective optimization using evolutionary algorithms,” 2001.
[10] Ehrgott M, “Multicriteria optimization,” *Springer*, 2005.
[11] G. K, J. A, and K. R, “Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time

windows for optimization of sustainable supply chain network," *J Clean Prod*, 2014.

[12] Jorge David Restrepo Diaz. And Salman Hassanzadeh Amin. (2025).'Journal of Cleaner Production'. A multi-objective optimization approach for sustainable management of computers E-Waste in a closed-loop supply chain network. 1-23

[13] Mottaghi, M. and Mansour, S. (2025) 'A multi-objective robust optimization model to sustainable closed-loop lithium-ion battery supply chain network design under uncertainties', *Computers & Chemical Engineering*, (Accessed: 12 July 2024). pp. 1-16.

[14] Jorge David Restrepo Diaz. And Salman Hassanzadeh Amin. (2025).'Journal of Cleaner Production'. A multi-objective optimization approach for sustainable management of computers E-Waste in a closed-loop supply chain network. 1-23

[15] Kayan, R.R., Jauhar, S.K., Kamble, S.S. and Belhadi, A. (2025) 'Optimizing bio hydrogen production from agri-waste: A digital twin approach for sustainable supply chain management and carbon neutrality', *Computers & Industrial Engineering*, (Accessed: 12 July 2024). pp. 2-19.