

PENERAPAN *INTEGER LINEAR PROGRAMMING* DALAM PENENTUAN RUTE PENGANGKUTAN SAMPAH DI KOTA KEFAMENANU

**Agustina Bani Lemos^{1*}, Fried Markus A. Blegur²,
Oktovianus R. Sikas³, Miko Purnomo⁴**

^{1*,2,3,4} Fakultas Pertanian, Sains dan Kesehatan/Matematika, Universitas Timor,
Rinalemos9@gmail.com, allung.friedblegur@gmail.com, oktosikas@unimor.ac.id,
mikopurnomo@umimor.ac.id

ABSTRACT

With population growth, waste management issues in Kefamenanu City, North Central Timor Regency, have become a challenge due to limited fleet and personnel. This has resulted in an uneven distribution of workload and waste buildup on some routes. This study aims to optimize garbage transport routes to minimize the total travel distance and ensure an equitable distribution of workload among teams. The method used is Integer Linear Programming (ILP). Primary and secondary data were collected through observation and interviews at the Environmental Agency of North Central Timor Regency (DLH TTU). A mathematical model was formulated to minimize travel distance while considering constraints such as waste volume at temporary disposal sites (TPS), truck capacity, and the requirement that each TPS is served once. The research results show that by applying ILP, the total travel distance was reduced to 106,733 meters from 111,105 meters, a saving of 4,372 meters. The workload distribution also became more balanced.

Keyword: Integer Linear Programming (ILP)1, Waste Collection Route2, Kefamenanu City3, Optimization4.

ABSTRAK

Seiring pertumbuhan populasi, masalah penanganan sampah di Kota Kefamenanu, Kabupaten Timor Tengah Utara, menjadi tantangan karena keterbatasan armada dan petugas. Hal ini menyebabkan ketidakmerataan beban kerja dan penumpukan sampah di beberapa rute. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan rute pengangkutan sampah guna meminimalkan total jarak tempuh dan memastikan pemerataan beban kerja antar tim. Metode yang digunakan adalah *Integer Linear Programming* (ILP). Data primer dan sekunder dikumpulkan melalui observasi dan wawancara di Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten TTU. Model matematis diformulasikan untuk meminimalkan jarak tempuh dengan mempertimbangkan kendala seperti volume sampah di TPS, kapasitas truk, dan kewajiban setiap TPS dilayani satu kali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penerapan ILP, total jarak tempuh berkurang menjadi 106.733 meter dari 111.105 meter, menghemat 4.372 meter. Distribusi beban kerja juga menjadi lebih merata.

Kata Kunci: *Integer Linear Programming* (ILP)1, Rute Pengangkutan Sampah2, Kota Kefamenanu3, Optimas4; dst ...

PENDAHULUAN

Perkembangan dunia modern dewasa ini membawa berbagai dampak, baik positif maupun negatif, terhadap manusia dan lingkungannya. Salah satu dampak negatif yang paling menonjol adalah meningkatnya produksi sampah dari aktivitas manusia, terutama di kawasan perkotaan. Timbulan sampah cenderung meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk dan semakin padatnya aktivitas masyarakat. Apabila tidak ditangani dengan baik, sampah dapat menjadi sumber berbagai masalah lingkungan, seperti pencemaran tanah, air, dan udara, menimbulkan bau tidak sedap, memicu banjir, menjadi sarang penyakit, serta menurunkan kualitas estetika dan kenyamanan lingkungan (Damanhuri & Padmi, 2010; Lestari, 2008).

Kota Kefamenanu, ibu kota Kabupaten Timor Tengah Utara (TTU), merupakan salah satu daerah yang mengalami permasalahan serupa. Kota ini memiliki luas wilayah 74 km^2 yang terdiri atas 9 kelurahan, dengan jumlah penduduk pada tahun 2021 mencapai 47.766 jiwa (BPS Kecamatan Kota Kefamenanu, 2022). Seiring pertambahan penduduk, volume sampah yang dihasilkan juga terus meningkat dan sering kali melampaui kapasitas pengelolaan yang tersedia. Berdasarkan laporan Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten TTU, timbulan sampah harian di Kota Kefamenanu pada tahun 2022 mencapai $90,305 \text{ m}^3$ per hari, yang sebagian besar berasal dari rumah tangga, pertokoan, pasar, dan perkantoran. Sampah medis dari rumah sakit dan limbah industri dikelola secara mandiri oleh masing-masing institusi (DLH Kabupaten TTU, 2022).

Untuk menampung sampah yang dihasilkan, DLH Kabupaten TTU telah membangun 37 Tempat Penampungan Sementara (TPS) yang tersebar di beberapa lokasi strategis. Beberapa TPS, seperti di Pasar Baru dan Pasar Lama, telah menerapkan sistem pemilahan sampah, meskipun sebagian besar TPS lain belum melaksanakannya, sehingga sampah langsung diangkut ke Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) di Km 13, Kecamatan Tublopo, tanpa proses pemilahan. DLH memiliki 81 petugas lapangan yang terbagi menjadi dua regu, yaitu regu pengumpul dan pengangkut sampah (20 orang) serta regu kebersihan lingkungan (61 orang). Regu pengangkut dibagi menjadi 4 tim sesuai jumlah armada yang tersedia. Setiap tim mengoperasikan satu truk dan bertugas mengangkut sampah dari TPS sesuai rute tetap yang telah ditetapkan, dengan jadwal pengangkutan setiap hari Senin–Sabtu (DLH Kabupaten TTU, 2024).

Namun, pola pengangkutan dengan rute tetap menyebabkan permasalahan baru. Hasil observasi menunjukkan bahwa tim 3 dan tim 4 memiliki volume sampah lebih besar dibandingkan tim lain sehingga sering tidak mampu menyelesaikan pengangkutan dalam satu kali ritasi. Hal ini menyebabkan penumpukan sampah di TPS yang dilayani oleh kedua tim tersebut, menimbulkan ketidakmerataan beban kerja antar tim, meningkatkan biaya operasional, serta menurunkan kinerja petugas akibat kelelahan (Sarker et al., 2022; Muhaimin et al., 2023).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan perubahan pengelolaan rute pengangkutan sampah yang lebih optimal. Permasalahan ini dapat dimodelkan secara matematis dengan menggunakan pendekatan optimasi. Salah satu model yang relevan adalah *Vehicle Routing Problem* (VRP), yaitu permasalahan penentuan rute kendaraan yang bertujuan meminimalkan biaya distribusi atau jarak tempuh (Fisher, 1995; Nasution, 2004). Model matematis yang efektif untuk menyelesaikan VRP adalah Integer Linear Programming (ILP), karena variabel keputusan yang digunakan berbentuk bilangan bulat atau biner (Winston, 2004; Irsyad et al., 2020; Kurnia et al., 2020). ILP telah digunakan secara luas untuk memecahkan masalah penjadwalan, alokasi sumber daya, dan penentuan rute yang optimal.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan ILP mampu menghasilkan rute pengangkutan sampah yang lebih tepat dan mengurangi biaya operasional secara signifikan. Harjiyanto (2014) membuktikan bahwa ILP efektif meminimalkan total jarak tempuh dan biaya transportasi. Hasil serupa ditunjukkan oleh Prasetyo et al. (2021) dan Wulandari (2023) yang mengonfirmasi bahwa ILP dapat menghasilkan rute yang lebih efisien dibandingkan metode manual. Namun, sebagian besar penelitian tersebut belum memperhatikan aspek pemerataan beban kerja antar armada.

Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk merancang rute pengangkutan sampah di Kota Kefamenanu dengan menggunakan model ILP, yang tidak hanya meminimalkan total jarak tempuh seluruh armada, tetapi juga memperhatikan pemerataan beban kerja antar tim sesuai kapasitas truk. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi praktis bagi DLH Kabupaten TTU untuk meningkatkan efisiensi pengangkutan sampah, mengurangi biaya operasional, dan mewujudkan lingkungan kota yang bersih, sehat, dan nyaman bagi masyarakat.

METODE

1. Waktu Dan Tempat Penelitian

penelitian ini dilaksanakan pada bulan Oktober 2024 di Dinas Lingkungan Hidup (DLH), dalam hal ini semua TPS yang ada di Kecamatan Kota Kefamenanu Kabupaten TTU.

2. Pengumpulan Data

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data primer dan sekunder yang didapatkan dengan melakukan observasi dan wawancara terhadap pihak DLH tentang proses pengangkutan

sampah di Kota Kefamenanu. . Berikut adalah data yang akan dikumpulkan berdasarkan teknik pengumpulannya:

1. Observasi
 - a. Pengukuran volume sampah yang diangkut dari masing-masing TPS ke TPA.
 - b. Pengamatan kapasitas muatan, dan pengangkutan pada setiap TPS hingga TPA
 - c. Jarak antara DLH kesetiap TPS, jarak antara TPS dan jarak setiap TPS ke TPA dengan menggunakan alat ukur GPS atau peta digital.
2. Wawancara
 - a. jadwal kerja dan rute yang ditempuh.
 - b. Pengalaman pekerja mengenai tantangan dalam pengangkutan, seperti masalah akses jalan, kelebihan muatan, atau waktu yang diperlukan untuk satu perjalanan.

3. Prosedur Kerja

Prosedur penelitian meliputi langkah-langkah operasional yang dilakukan peneliti mulai dari pengumpulan data, pengolahan data, analisis data, hingga penyajian data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Gambaran Umum Sistem Pengangkutan

Sub ini akan memaparkan secara ringkas mengenai sistem pengangkutan sampah di Kota Kefamenanu, yang mencakup tahapan proses pengangkutan, tujuan pengelolaan oleh Dinas Lingkungan Hidup (DLH). Uraian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman awal terhadap persoalan ketidakmerataan beban kerja dan penggunaan rute tetap yang kurang optimal, sekaligus menjadi pijakan dalam penerapan model *Integer Linear Programming* (ILP) guna merancang rute pengangkutan yang lebih efektif.

2. Proses Pengangkutan Sampah di Kota Kefamenanu

DLH Kabupaten Timor Tengah Utara melaksanakan kegiatan pengangkutan sampah dari berbagai Tempat Penampungan Sementara (TPS) yang tersebar di wilayah Kota Kefamenanu menuju Tempat Pembuangan Akhir (TPA) yang terletak di Km 13 Tublopo. Kegiatan ini dilakukan setiap hari kerja, mulai dari senin hingga sabtu, dengan menggunakan empat unit truk pengangkutan sampah.

DLH membagi tenaga oprasional pengangkutan ke dalam empat tim dimana masing-masing tim memiliki rute tetap yang telah ditentukan. Setiap tim terdiri dari lima petugas dan hanya melakukan satu kali perjalanan (rit) per hari, dengan durasi kerja 5 jam. Truk yang digunakan meliputi jenis *Dump truck* dan *Arm Roll Truk* yang mendukung dua sistem pengangkutan sampah, yaitu *Stationary Container System* (SCS) dan *Hauled Container System* (HCS).

Dalam pelaksanaannya, sistem rute tetap ini sering menimbulkan ketidakmerataan beban antar tim, terutama tim 3 dan tim 4 yang harus menangani TPS dengan volume sampah lebih tinggi. Hal ini menyebabkan tidak semua sampah dapat terangkut dalam satu hari, sehingga memicu penumpukan sampah di TPS tertentu. Kondisi tersebut menjadi alasan utama perlunya penerapan model ILP bertujuan untuk menghasilkan rute yang lebih adil, efisien, dan sesuai dengan kapasitas kendaraan maupun beban kerja tiap tim.

3. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan yaitu berkaitan dengan kebutuhan menentukan rute pengangkutan sampah yang optimal. Beberapa data diantaranya data lokasi dan sebaran TPS, volume sampah harian masing-masing TPS, data kapasitas truk pengangkut sampah, data jarak antar titik (DLH, TPS dan TPA), Serta jadwal dan beban kerja tiap tim pengangkut sampah.

Data Lokasi Dan Sebaran TPS

DLH telah menerapkan 37 TPS yang tersebar di Kota Kefamenanu. Tabel 1 merupakan data lokasi sebaran TPS.

Tabel 1. Data TPS Dan Volume Bak Sampah

No	Nama TPS	Volume Bak
1	DLH	0
2	SDN Peboko	5 m ³
3	Peboko	5 m ³
4	SMPK Putri	7,06 m ³
5	Kampung Baru	3 m ³
6	Belakang SMPK Putri	7,06 m ³
7	SD 1 Kefamenanu	7,06 m ³
8	SMK Katolik Kefamenanu	7,06 m ³
9	Jln Yos Sudarso	5 m ³
10	Taman Kota	12,64 m ³
11	Gereja Immanuel	12,64 m ³
12	Cabang Oemenu	12,64 m ³
13	Tanah Putih	5 m ³
14	Pasar Lama 1	7,06 m ³
15	Pasar Lama2	7,06 m ³
16	Jln Diponegoro	7,06 m ³
17	Kenari	12,64 m ³
18	Kakatua	12,64 m ³
19	SDK Maol	5 m ³
20	Naesleu	12,64 m ³
21	SMPK Aurora	5 m ³
22	SLB	3 m ³
23	Pasar B1	5 m ³
24	Pasar B2	3 m ³
25	Pasar B3	3 m ³
26	Pasar B4	3 m ³
27	Pasar B5	7,06 m ³
28	Pasar B6	3 m ³
29	Pasar Ikan	5 m ³
30	Terminal	5 m ³
31	Belakang Terminal	5 m ³
32	SD Oemanu	5 m ³
33	Jln Ertari Km6	12,64 m ³
34	Belakang SMA 2	12,64 m ³
35	Maubeli	12,64 m ³
36	BTN	7,06 m ³
37	TPA	0

Data Volume Sampah

Tabel 2 mendeskripsikan rata-rata volume sampah yang terdapat pada setiap TPS selama 7 hari.

Tabel 2. Volume Sampah Harian di Tiap TPS

N0	Nama Tps	Hari 1(m ³)	Hari 2(m ³)	Hari 3(m ³)	Hari 4(m ³)	Hari 5(m ³)	Hari 6(m ³)	Hari 7(m ³)	Rt/Hari (m ³)
1	DLH	0	0	0	0	0	0	0	0
2	SDN Peboko	0,3	0,75	0,375	0,075	0,2	0,075	0,125	0,25
3	Peboko	0,075	0,125	1,25	0,375	0,25	0,075	0,375	0,36
4	SMPK Putri	1,344	0,84	0,504	1,008	0,168	0,134	0,134	0,59
5	Kampung Baru	0,24	0,06	0,22	0,4	0,1	0,06	0,14	0,18
6	Belakang SMPK Putri	2,184	0,504	1,008	0,235	0,18	0,437	0,1008	0,66
7	SD 1 Kefamenanu	1,176	0,294	0,505	0,176	0,412	0,1764	0,134	0,32
8	SMK Katolik Kefamenanu	1,25	0,25	0,4	0,125	0,075	0,75	0,35	0,46
9	Jln Yos Sudarso	0,375	0,125	0,075	1,125	0,225	0,125	0,375	0,33
10	Taman Kota	3,160	0,843	0,351	0,281	0,211	0,702	1,405	0,99
11	Gereja Immanuel	1,404	0,702	0	1,053	0,281	0,492	0	0,56
12	Cabang Oemenu	2,458	0,702	1,896	0,351	0,211	1,053	0,843	1,07
13	Tanah Putih	1,125	0,5	0,125	0,225	0,125	0,75	0,5	0,49

14	Pasar Lama dalam	0,108	0,168	0,067	0,101	0,101	0,134	0,168	0,38
15	Pasar Lama luar	0,101	0,235	0,672	0,168	0,101	0,067	0,067	0,82
16	Jln Diponegoro	2,458	1,405	0,281	0,492	0,702	0,211	0,351	0,84
17	Kenari	3,160	1,405	1,053	0,35	1,194	0,702	1,966	1,38
18	Kakatua	4,213	1,405	3,160	0,351	0,053	0,913	0,772	1,55
19	SDK Maol	1,875	0,75	0,3	0,125	0,375	0,1	0,1	0,52
20	Naesleu	0,843	0,702	0,211	0,35	0,35	0,25	0,25	0,31
21	SMPK Aurora	1,145	0,75	0,1	0,175	0,225	0,5	0,75	0,35
22	SLB	3	0,06	0,015	0,03	0,09	0,12	0,21	0,45
23	Pasar B1	0,125	0,25	0,075	0,75	0,5	0,375	0,875	0,39
24	Pasar B2	0,15	0,3	0,09	0,18	0,06	0,12	0,36	0,24
25	Pasar B3	0,15	0,09	0,3	0,15	0,21	0,45	0,51	0,20
26	Pasar B4	0,9	0,26	0,08	0,14	0,22A	0,5	0,28	0,37
27	Pasar B5	7,06	1,764	2,352	0,882	0,996	1,176	0,764	2,142
28	Pasar B6	3	0,4	0,9	0,3	0,8	0(bkr)	0,9	0,9
29	Pasar Ikan	1,145	0,125	0,25	0,75	0,5	0,75	1,175	0,61
30	Terminal	0,25	0,375	0,5	0,5	0,5	0,25	1,125	0,41
31	Belakang Terminal	1,76	0,75	1,125	0,1	0,4	0,175	0,875	0,74
32	SD Oemanu	0,125	0,25	0,125	0,25	0,225	0,125	0,175	0,18
33	Jln Erltari Km6	0,35	0,25	0,25	0,25	0,125	0,75	0,701	0,16
34	Belakang SMA 2	0,701	0,212	1,194	0,701	0,125	0,75	0,25	0,43
35	Maubeli	1,875	1,145	0,125	0,75	0,14	0,25	1,053	0,82
36	BTN	7,06	0,84	0,008	0,101	0,622	0,202	0,336	1,45
37	TPA	0	0	0	0	0	0	0	0

Data Kapasitas Truk

Dalam proses pengangkutan sampah di Kota Kefamenanu, DLH menggunakan 4 unit truk dengan kapasitas angkut yang berbeda-beda. Kapasitas masing-masing truk sangat penting untuk perhitungan dalam penyusunan model Optimasi rute, agar beban sampah yang diangkut tidak melebihi daya tampung truk.

Tabel 3. Data kapasitas Truk

Nomor truk	Panjang bak(m)	Lebar bak(m)	Tinggi bak(m)	Volume(m)
Truk 1	3,5	2,0	1,43	10
Truk 2	3,3	1,8	1,52	9
Truk 3	3,2	1,8	1,56	8
Truk 4	3,0	1,7	1,57	8

Data Jarak

Data jarak diperoleh melalui pengukuran menggunakan Google Maps dengan mengikuti rute yang dapat dilalui oleh truk pengangkut sampah. Hasil pengukuran tersebut disusun dalam bentuk matriks simetris dan digunakan dalam model ILP untuk meminimalkan total jarak tempuh. Notasi $D(i, j)$ digunakan untuk menyatakan jarak antara titik i dan titik j , baik antar TPS, dari DLH ke TPS, maupun dari TPS ke TPA.

Data penjadwalan petugas pengangkutan sampah

DLH Kabupaten Timor Tengah Utara mengatur kegiatan pengangkutan sampah dilakukan setiap hari kerja, mulai dari hari Senin hingga Sabtu, dengan waktu operasional mulai pukul 06.00 hingga 11.00 WITA. Proses pengangkutan dilakukan secara manual oleh tim yang dibentuk berdasarkan jumlah truk yang tersedia.

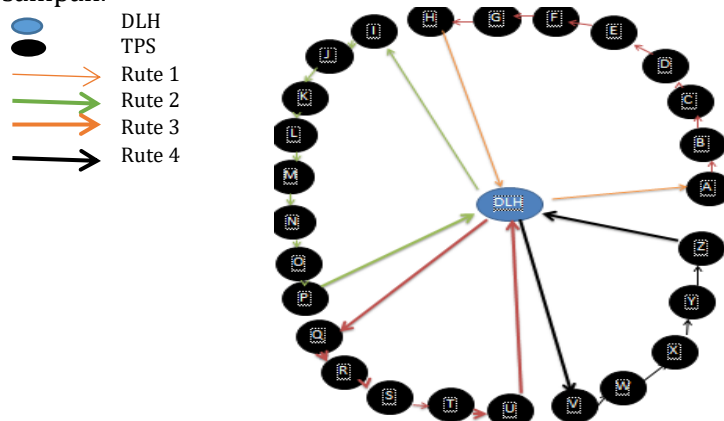
Tabel 4. Wilayah Kerja

Truk/Tim	Kordinator	Wilayah pelayanan
Tim 1	Agustinus Nabu, dkk	Seroja, Peboko, Kampung Baru, Oemenu, Kampung Family, Bansone, Kampung Sabu, Pasar Lama, Kantor Polisi, Tanah Putih, dan sekitarnya
Tim 2	Sefrianus Kapitan, dkk	Kakatua, Tunbakun, Jalan Dua Jalur, Fatuteke, Kodim, BGR, Komplek Terminal, dan sekitarnya
Tim 3	Yustinus Naot, dkk	Pertokoan, Kantor BPS, Kantor Daerah, Koko Benpasi, Pemancar, Pasar Baru, dan sekitarnya
Tim 4	Servasius Metan, dkk	Km 5, Km 6, Km 7, Km 8, Km 9, Yonif 744, dan sekitarnya

Sumber: DLH KAB.TTU(2024)

Model Struktrur Sistem Pengangkutan Sampah

Untuk melakukan optimasi rute dalam proses pengangkutan sampah, terlebih dahulu dibentuk model struktur sistem pengangkutan. Model ini dirancang dalam bentuk jaringan(*netwrok*), di mana setiap node (simpul) mempresentasikan lokasi TPS, depot dan TPA. Penyusunan model ini bertujuan sebagai gambaran awal terhadap sistem pengangkutan sampah yang sudah ada di lapangan dan menjadi dasar dalam membangun formulasi matematis menggunakan model ILP. Pada gambar 1 merupakan ilustrasi sistem pengangkutan sampah.



Gambar 1 Ilustrasi sistem pengangkutan sampah

Formulasi Model

Sebelum proes pengolahan data dilakukan dengan ILP, perlu terlebih dahulu disusun Formulasi Model Matematis. Langkah ini diawali dengan menentukan variabel keputusan, kemudia dilanjutkan dengan menyusun fungsi tujuan dan fungsi kendala. Dalam konteks penelitian ini, formulasi model bertujuan untuk menentukan rute pengangkutan sampah yang optimal, dengan sasaran utama yaitu meminimalkan total jarak pengangkutan sampah.

Notasi:

i = indeks sumber sampah

j = indeks sumber tujuan

K = Himpunan truk $k = 1, 2, 3, 4$.

Parameter

N : Node titik depot dan TPS, $n = 1, 2, \dots, 37$

$n = 1$, node depot

$n \neq 1$, node TPS

D_{ij} : Jarak antar TPS i dan TPS j

V_i : volume sampah yang ada di TPS

C_k : Kapasitas kendaraan k

Menentukan Variabel Keputusan

Variabel keputusan adalah variabel yang memiliki peran penting dalam proses pengambilan keputusan dan dapat dikontrol oleh pengambil keputusan. Dalam penelitian ini, variabel keputusan merepresentasikan aktivitas pengangkutan sampah yang dilambangkan dengan simbol x . Nilai dari variabel ini bersifat biner, yaitu bernilai 1 jika suatu lintasan dipilih (dilalui oleh truk) dan bernilai 0 jika lintasan tersebut tidak digunakan.

Menentukan Fungsi Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk meminimalkan jarak tempuh dalam pengangkutan sampah dari setiap TPS ke TPA. Jarak yang ditempuh oleh truk pengangkut sampah dihitung berdasarkan penjumlahan hasil perkalian antara jarak dari lokasi ke- i ke lokasi ke- j yang menunjukkan apakah rute pengangkutan tersebut digunakan atau tidak. Formulasi fungsi tujuan ditunjukkan pada persamaan 1

$$\text{Min } Z = \sum_i^{37} \sum_j^{37} \sum_k^4 d_{ij} \cdot x_{ijk} \quad (1)$$

Menentukan Fungsi Kendala

berikut ini akan menentukan fungsi kendala. Fungsi kendala digunakan sebagai batasan atas sumber daya yang ada dalam meminimalkan fungsi tujuan. Fungsi kendala dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. setiap TPS harus dilewati sebagai tujuan satu kali.

Setiap TPS hanya boleh dikunjungi satu kali oleh satu truk, yang berangkat dari titik awal(depot) dan menuju TPA. Artinya tidak boleh ada lebih dari satu truk yang melayani TPS yang sama, dan satu truk tidak boleh mengunjungi TPS yang sama lebih dari sekali. Formulasi kendala ini dilihat pada persamaan 2.

$$\sum_{\forall i}^{37} \sum_{\forall k}^{37} x_{ij,k} = 1, \text{ untuk } \forall j, i \neq j, j \neq i. \quad (2)$$

2. setiap TPS harus menjadi asal satu kali.

Setelah sebuah truk selesai mengangkut sampah dari satu TPS, Truk tersebut harus melanjutkan perjalanan ke TPS lain atau langsung menuju TPA. Artinya dari setiap TPS hanya boleh ada satu truk yang berangkat, dan hanya menuju satu tujuan. Formulasi kendala ini dapat dilihat pada persamaan 3.

$$\sum_{\forall j}^{37} \sum_{\forall k}^{37} x_{ij,k} = 1 \text{ untuk } \forall i, i \neq j, i \neq 1 \quad (3)$$

3. Setiap TPS hanya dilayani satu kendaraan atau kekontinuan rute.

Kendaraan yang menuju satu TPS dipastikan meninggalkan TPS tersebut. Hal ini menentukan bahwa setiap truk pengangkut sampah hanya dilayani oleh satu truk dari elemen k . Ketika suatu truk k berasal dari sumber i menuju tujuan Q maka sumber berikutnya adalah sumber q menuju tujuan j yang dilakukan oleh truk k . Hal ini juga yang membatasi kekontinuan rute agar rute tersebut terus kontinyu. Formulasi kendala ini dapat dilihat pada persamaan 4.

$$\sum_{\forall i} x_{iq,k} - \sum_{\forall j} x_{qj,k} = 0 \quad \forall k \quad (4)$$

4. Semua truk digunakan dan berangkat dari Depot.

Setiap truk berangkat dari depot dengan tujuan salah satu TPS. Sehingga untuk TPS yang lainnya tidak akan dituju oleh truk tersebut saat berangkat dari depot. Formulasi kendala ini dapat dilihat pada persamaan 5.

$$\sum_{\forall i} x_{1jk} = 1 \quad \forall k, j \neq 1 \quad (5)$$

5. Semua truk digunakan dan kembali ke depot.

Setiap truk yang telah menyelesaikan proses pengangkutan dari TPS terakhir harus mengakhiri rutanya di Depot. Formulasi kendala ini dapat dilihat pada persamaan 6.

$$\sum_{\forall i} x_{i1k} = 1 \quad \forall k, i \neq 1 \quad (6)$$

6. Kapasitas truk.

Dalam permasalahan pengangkutan sampah ini, kapasitas truk tidak boleh melebihi total volume sampah yang dikumpulkan dari setiap TPS yang dilayani oleh truk tersebut. Dalam permasalahan pengangkutan sampah ini, kapasitas truk tidak boleh melebihi total volume sampah yang dikumpulkan dari setiap TPS yang dilayani oleh truk tersebut. Formulasi kendala ini dapat dilihat pada persamaan 7.

$$\sum_{\forall i} \sum_{\forall j} V_i * x_{ijk} \leq C_k \quad \forall k, i \neq 1, j \neq 1 \quad (7)$$

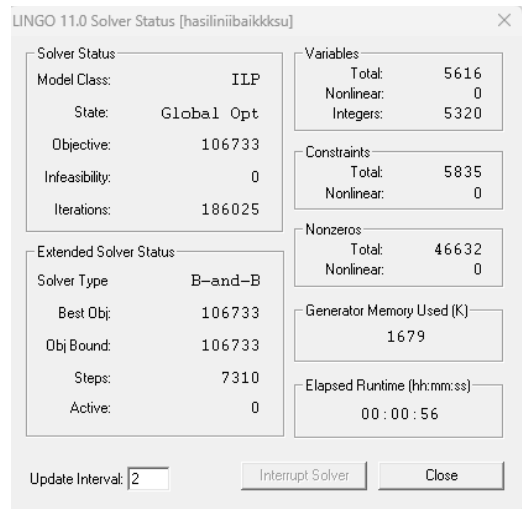
7. Variabel Biner

Variabel x_{ijk} merupakan variabel yang menunjukkan apakah suatu lintasan dilalui oleh truk atau tidak. Nilai dari variabel ini berupa biner, yaitu 1 jika lintasan tersebut digunakan, dan 0 jika tidak.

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j, \forall k, i \neq j \quad (8)$$

Penyelesaian Model Integer Linear Programming Dengan Software LINGO 11.0 Unlimited.

Penyelesaian masalah pengoptimalan rute pengangkutan sampah dilakukan dengan bantuan *software* LINGO 11.0 *Unlimited*. Semua data, fungsi tujuan dan fungsi kendala yang telah didefinisikan sebelumnya diubah menjadi sinteks program sesuai dengan bahasa dari LINGO 11.0 *Unlimited*. Berikut ini Sinteks program dan hasil komputasi penyelesaian model ILP dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 4.2 solver status software LINGO

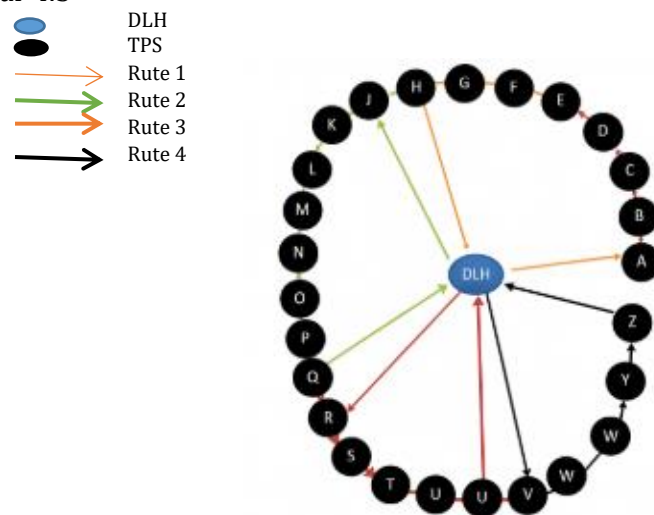
Gambar 2 Menampilkan hasil *solver status* dari perangkat lunak LINGO 11.0 *Unlimited*. Model yang dibangun berhasil menghasilkan solusi optimal (*Global Opt*) dengan nilai fungsi objektif sebesar 106.733, yang merepresentasikan total jarak tempuh (dalam satuan meter) untuk seluruh truk pengangkut sampah. Proses komputasi memerlukan waktu sekitar 56 detik, dengan jumlah iterasi sebanyak 186.025 kali dan 7.310 langkah (steps) hingga mencapai solusi optimal. Model ini dikategorikan sebagai ILP dan diselesaikan menggunakan metode *Branch and Bound*.

Model terdiri dari 5.616 variabel, dengan 5.320 variabel *integer* (yang umumnya adalah variabel biner X_{ijk}). Jumlah kendala yang digunakan dalam pemodelan mencapai 5.835 sedangkan jumlah elemen non-nol dalam model sebanyak 46.632 yang menunjukkan kompleksitas struktur model dalam mempresentasikan hubungan antar TPS, Kendaraan dan kapasitasnya. Variabel keputusan X_{ijk} menyatakan apakah truk k melewati rute dari titik i ke j . Jika nilai $X_{ijk} = 1$, maka rute tersebut digunakan oleh truk, dan jika bernilai 0, maka rute tidak dilalui. Himpunan nilai X_{ijk} yang bernilai 1 membentuk rute akhir dari masing-masing truk, dan hasil tersebut kemudian digunakan untuk menyusun tabel rute pengangkutan sampah yang optimal sesuai kapasitas kendaraan dan distribusi volume sampah di setiap TPS.

Tabel 5. Rute Truk model ILP

Truk	Kapasitas Truk(m ³)	Rute	Volume sampah(m ³)	Total jarak (m)
1	10	1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 11 → 12 → 13 → 16 → 17 → 22 → 23 → 24 → 25 → 37 → 1	9,76	4.400+500+450+190+220 +20+90+170+150+170+160+400+550+750 +1310+400+10+20+10830+11000 =31.790
2	9	1 → 14 → 15 → 18 → 19 → 20 → 21 → 32 → 33 → 36 → 37 → 1	5,72	2370+40+400+1270+1550+1130 +1330+2920+4530+3000+11000 =29.540
3	9	1 → 34 → 35 → 37 → 1	1,25	3680+90+7690+11000=22.460
4	8	1 → 26 → 27 → 28 → 29 → 30 → 31 → 37 → 1	5,172	800+40+3+350+220+100+10430=22.943
Total			Total =21,902	Total=106.733

Tabel 5 menyajikan rute yang dilalui oleh masing-masing truk berdasarkan hasil dari model ILP. Rute yang dihasilkan memiliki total jarak tempuh optimal sebesar 106.733 m. setiap truk mengangkut sampah tanpa melebihi kapasitas yang dimilikinya, sehingga model ini layak diterapkan dalam pengangkutan sampah nyata. Struktur jaringan yang menggambarkan rute optimal dari model ILP ditunjukkan pada Gambar 4.3



Gambar3. Model ilustrasi struktur rute optimal

Gambar 3 menunjukkan rute pengangkutan sampah yang telah dioptimalkan di Kota Kefamenanu. Truk 1 dengan kapasitas angkut 10 m³ ditugaskan untuk mengangkut sampah dari TPS 1(DLH) → TPS 2 → TPS 3 → TPS 4 → TPS 5 → TPS 6 → TPS 7 → TPS 8 → TPS 9 → TPS 10 → TPS 11 → TPS 12 → TPS 13 → TPS 16 → TPS 17 → TPS 22 → TPS 23 → TPS 24 → TPS 25 → TPS 37(TPA) → TPS 1(DLH). Setelah seluruh TPS tersebut dilayani, truk menuju ke lokasi TPA, kemudian ke titik awal di DLH. Total volume sampah yang diangkut oleh Truk 1 ini adalah 9,67 m³ dengan jarak tempuh keseluruhan mencapai 31.790 m. Truk 2 yang memiliki kapasitas angkut sebesar 9 m³ melayani TPS 1(DLH) → TPS 14 → TPS 15 → TPS 18 → TPS 19 → TPS 20 → TPS 21 → TPS 32 → TPS 33 → TPS 36 → TPS 37 (TPA) → TPS 1(DLH). Total volume sampah yang diangkut oleh truk 2 adalah 5,72 m³, dengan jarak tempuh sejauh 29,540 m. Truk 3 dengan kapasitas 9 m³ menangani pengangkutan sampah dari TPS 1(DLH) → TPS 34 → TPS 35 → TPS 37(TPA) → TPS 1(DLH). Volume sampah yang diangkut oleh truk 3 ini adalah 1,25 m³ dengan total jarak tempuh 22.460 m. sementara itu truk 4 dengan kapasitas 8 m³ mengangkut sampah dari TPS nomor 26 hingga 31 setelah pengangkutan selesai, truk ini menuju ke TPA dan kemudian kembali ke DLH. Volume sampah yang diangkut oleh truk 4 ini adalah 5,172 m³ dengan total jarak tempuh 22.943

m. total volume sampah yang diangkut oleh ke empat truk ini adalah 21,902 m³ dengan total jarak tempuh seluruh truk mencapai 106.733 m.

Perbandingan Rute Pengangkutan Sampah

Rute pengangkutan sampah Aktual dari DLH dan model ILP juga mengalami perbedaan. Tabel 4.8 membandingkan rute tetap dan rute ILP.

Tabel 6. Perbandingan Rute Tetap Dan ILP

Truk	Rute aktual	Total Jarak aktual (m)	Rute ILP	Total Jarak ILP (m)
1	DLH (1)- (2) - (3) - (4)- 5)- (6) - (7) - (8) - (9) - (10) - (11) - dan sekitarnya - TPA - DLH=21.345 m	32.345	1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 11 → 12 → 13 → 16 → 17 → 22 → 23 → 24 → 25 → 25 → 37 → 1	31.790
2	DLH - 12- 13- 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 19- dan sekitarnya - TPA - DLH=16.890 m	27.890	1 → 14 → 15 → 18 → 19 → 20 → 21 → 32 → 33 → 36 → 37 → 1	29.540
3	DLH - 21) - 22 - 23 - 24 - 25- 26(area pasr) - dan sekitarnya - TPA - DLH=16,423m	27.423	1 → 34 → 35 → 37 → 1	22.460
4	DLH - 27- 28 - 29 - 30- 31- 32 - dan sekitarnya - TPA- DLH=12,447m	23.447	1 → 26 → 27 → 28 → 29 → 30 → 31 → 37 → 1	22.943
Total jarak		111.105		106.733

Pemerataan Beban Kerja

Permasalahan utama dalam sistem pengangkutan sebelumnya adalah pemerataan beban kerja antar tim. Menurut DLH Kabupaten TTU, Tim 3 dan tim 4 seringkali menangani TPS dengan volume ampah yang lebih tinggi sehingga tidak dapat menyelesaikan pengangkutan dalam satu rit dan terjadi penumpukan sampah di TPS Tertentu. Dengan penerapan model ILP, beban kerja dapat didistribusikan lebih merata. Dapat dilihat dari pembagian volume sampah berikut:

1. Truk 1 mengangkut : 9,76 m³
2. Truk 2 mengangkut : 5,72 m³
3. Truk 3 mengangkut : 1,25 m³
4. Truk 4 mengangkut : 5,172 m³

Meskipun terlihat ada perbedaan angkut antar truk, hal ini disesuaikan dengan kapasitas truk dan panjang rute yang ditempuh. Truk dengan volume lebih kecil seperti truk 3 mendapatkan rute yang lebih pendek, sehingga beban kerja total tetap seimbang dengan tim lainnya. Sebaliknya, truk dengan volume sampah lebih besar seperti truk 1 diberikan rute yang lebih panjang, tetapi tidak sampai melebihi kapasitas angkutnya yaitu 10 m³.

Dengan demikian pemerataan setelah simulasi dapat dikatakan lebih adil karena tidak ada lagi tim yang secara konsisten menanggung volume sampah berlebihan seperti pada tim 3 dan 4 sebelumnya, setelah tim memperoleh beban kerja yang proporsional baik dari sisi volume sampah maupun jarak rute, model ILP mempertimbangkan kapasitas truk, distribusi volume TPS dan panjang rute, sehingga total beban kerja antar tim lebih seimbang dan realistis untuk diselesaikan dalam satu ritasi per hari.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai penggunaan Integer Linear Programming (ILP) dalam menentukan rute pengangkutan sampah di Kota Kefamenanu, dapat disimpulkan beberapa hal. Pertama, penerapan model Integer Linear Programming (ILP) terbukti mampu meningkatkan efisiensi

dalam penentuan rute pengangkutan sampah. Model ini memperhitungkan volume sampah di masing-masing Tempat Penampungan Sementara (TPS), kapasitas muatan setiap truk, serta memastikan setiap TPS hanya dilayani sekali dalam satu siklus pengangkutan. Dengan pendekatan ini, distribusi beban kerja menjadi lebih merata antar tim dan pemanfaatan kendaraan menjadi lebih optimal seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8.

Rute hasil optimasi ILP memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan rute aktual. Total jarak tempuh dari seluruh armada setelah dioptimasi mencapai 106.733 meter, lebih pendek sekitar 4.372 meter dibandingkan dengan rute aktual yang mencapai 111.105 meter. Penerapan ILP dalam perencanaan rute dan jadwal pengangkutan berkontribusi terhadap penurunan penggunaan bahan bakar, waktu operasional, beban kerja petugas, serta pengeluaran biaya. Beban masing-masing kendaraan dapat didistribusikan secara seimbang sesuai kapasitas, sehingga kinerja setiap tim menjadi lebih adil dan efisien. Sistem pengangkutan sampah yang terjadwal dan teroptimasi juga berdampak positif terhadap kenyamanan masyarakat. Sampah dapat diangkut lebih cepat, TPS tidak mudah penuh, dan kebersihan lingkungan kota dapat lebih terjaga.

Saran

Berikut saran untuk Dinas Lingkungan Hidup (DLH) agar secara berkala menerapkan model rute ILP dengan revisi minimal setiap enam bulan atau saat terjadi perubahan volume sampah dan armada, guna menjaga efisiensi pengelolaan sampah di Kota Kefamenanu. Pengumpulan dan pembaruan data volume sampah, posisi TPS, dan kondisi kendaraan harus rutin dilakukan agar optimasi ILP tetap akurat. Staf DLH perlu pelatihan penggunaan perangkat lunak seperti LINGO untuk menyusun rute dan mengevaluasi kinerja secara mandiri. Peran aktif masyarakat juga penting dalam menjaga kebersihan dengan membuang sampah di TPS dan mengikuti jadwal pengangkutan. Kolaborasi pemerintah dan masyarakat menjadi kunci keberhasilan pengelolaan sampah yang efektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis Menyatakan ucapan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam kegiatan penelitian yang dilakukan

REFERENCES

- BPS Kabupaten Timor Tengah Utara. (2021). *Kecamatan Kota Kefamenanu Dalam Angka 2021*. 24.
- Damanhuri, E., & Padmi, T. (2010). Diktat Kuliah Pengelolaan sampah. *Diktat Program Studi Teknik Lingkungan Institut Teknologi Bandung*, 30.
- Fisher, M. (1995). Chapter 1 Vehicle routing. *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 8(C), 1–33. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(05\)80105-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(05)80105-7).
- Kuka, F., Katili, M. R., & Payu, M. R. F. (2021). Pendekatan Goal Programming untuk Rute Pengangkutan Sampah. *MUST: Journal of Mathematics Education, Science and Technology*, 6(1), 43. <https://doi.org/10.30651/must.v6i1.6349>.
- Operations research. (1971). In *Mathematics in Science and Engineering* (Vol. 73, Issue C). [https://doi.org/10.1016/S0076-5392\(08\)62705-8](https://doi.org/10.1016/S0076-5392(08)62705-8).
- Supriyo, P. T., Aman, A., Bakhtiar, T., & Hanum, F. (2017). Model Optimasi Pengelolaan Sampah Perkotaan : Penentuan Lokasi Pembuangan Sampah. *Seminar Nasional Matematika*, 701–708.
- Widyastiti, M., & Kamila, I. (2020). Penentuan Rute Optimal pada Pengangkutan Sampah di Kota Bogor Menggunakan Vehicle Routing Problem. *Prosiding Seminar Nasional Matematika*, 2, 122–130. <https://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/prisma/>.