ISSN 0853-2982

JURNAL TEKNIK SIPIL
Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Penerapan Konsep *Vehicle Routing Problem* dalam Kasus Pengangkutan Sampah di Perkotaan

Harun Al Rasyid Lubis
Magister Program of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering
Institut Teknologi Bandung, Jln. Ganesha No. 10 Bandung
Email : halubis@trans.si.itb.ac.id

Andrean Maulana
Magister Program of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering
Institut Teknologi Bandung, Jln. Ganesha No. 10 Bandung
Email : andrean.m92@gmail.com

Russ Bona Frazila
Magister Program of Civil Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering
Institut Teknologi Bandung, Jln. Ganesha No. 10 Bandung
Email : frazila@si.itb.ac.id

Abstrak

Kota-kota di negara berkembang masih mengoperasikan pengangkutan dan pengelolaan sampah secara tradisional di sisi jalan dan atau titik transfer di mana sampah dikumpulkan secara berkala oleh truk khusus, yang akhirnya akan dibawa ke tempat pembuangan akhir. Masalahnya semakin memburuk karena beberapa kota mengalami penurunan pelayanan angkutan sampah karena pengelolaan sistem yang tidak tepat, kapasitas fiskal untuk berinvestasi dalam armada kendaraan yang memadai dan juga karena tidak terkendali lokasi tempat pembuangan. Dalam makalah ini pengangkutan dan pengelolaan sampah dirumuskan berdasarkan Capacitated Vehicle Routing Problem Time Window Multiple Depo Intermediete Facility (CVRPTWMDIF). Setiap kendaraan ditugaskan untuk mengunjungi beberapa Tempat Pemrosesan Sementara (TPS), hingga truk penuh atau kapasitas angkut tercapai, kemudian sampah diangkut ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Akhirnya semua truk kembali ke depot menjelang akhir operasi setiap harinya. Awalnya solusi CVRPTWMDIF diperiksa pada permasalahan sederhana sebelum diperiksa ke dalam pengangkutan sampah yang nyata. Solusi yang ditemukan menggunakan CVRPTWMDIF dibandingkan dengan praktek angkutan sampah di Kota Bandung, ditemukan bahwa dengan jam operasi dan jumlah armada angkut yang sama CVRPTWMDIF dapat mengurangi volume sampah yang tak terangkut hampir setengahnya pada akhir operasi harian.

Kata–kata Kunci : *Pengangkutan dan penanganan sampah, optimisasi, fasilitas antara.*

Abstract

Cities in developing countries still operate a traditional waste transport and handling where rubbish were collected at regular intervals by specialized trucks from curb-side collection or transfer point prior to transport them to a final dump site. The problem are worsening as some cities experience exhausted waste collection services because the system is inadequately managed, fiscal capacity to invest in adequate vehicle fleets is lacking and also due to uncontrolled dumpsites location. In this paper problem of waste collection and handling is formulated based on Capacitated Vehicle Routing Problem Time Window Multiple Depo Intermediete Facility (CVRPTWMDIF). Each vehicle was assigned to visit several intermediate transfer points, until the truck loading or volume capacity reached then waste are transported to final landfill or dump site. Finally all trucks will return to a depot at the end of daily operation. Initially the solution of CVRPTWMDIF problem was tested on a simple hypothetical waste handling before being implemented into a real case problem. Solutions found using CVRPTWMDIF compared with the practice of waste transport and handling in the city of Bandung. Based on a common hours of operation and the same number of transport fleets, it was found that CVRPTWMDIF can reduce the volume of waste that is not transported by almost half by the end of the daily operations.

Keywords : *Waste transport and handling, optimisation, intermediate collection.*

1. Pendahuluan

Banyak penelitian yang membahas strategi untuk mengangkut sampah kota secara optimal. Variasi yang dikembangkan dengan menambahkan *Intermediete Facility* (IF) pada akhir rute, yang menyatakan Tempat Pembuangan Akhir (TPA), sebelum akhirnya kembali ke tempat parkir truk (depo) masing-masing (Fitria, dkk., 2009). Dengan menggunakan algoritma *sequential*

insertion, 4 (empat) skenario penentuan Tempat Pembuangan Sementara (TPS), yaitu berdasarkan waktu terdekat dari depo, waktu terjauh dari depo, waktu penyelesaian rute terkecil dan waktu penyelesaian rute terjauh. Kesimpulan yang didapat adalah kesamaan hasil jumlah kendaraan untuk setiap alternatif, kecuali skenario waktu penyelesaian rute terkecil.

Kajian efisiensi rute truk pengangkutan sampah di Kota Padang (Mardiani, dkk., 2013). Metode yang digunakan adalah Algoritma *Nearest Neighbour,* Penanganan yang dilakukan berupa pengubahan rute truk dan lokasi pengisian BBM angkutan sampah di *By Pass* ($\pm$ 200 m dari Depo Truk) dan penggantian truk yang memiliki kapasitas lebih besar. Hasilnya, terdapat pengurangan rute, biaya dan waktu tempuh secara berturut-turut sebesar 57.352 km/hari, Rp. 45.355.837 / tahun dan 2,33 jam/hari.

Masalah pengangkutan sampah terdiri atas perutean angkutan untuk mengambil sampah dalam jangka waktu tertentu dengan tujuan untuk meminimalkan biaya perjalanan (Buhrkal dan Larsen, 2012). Permasalahan ini dikenal dengan *Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows* (WCVRPTW), yang sedikit berbeda dengan VRPTW karena angkutan sampah harus melakukan *unloading* di tempat pembuangan akhir dan harus kembali ke depo dalam keadaan kosong. Perjalanan ganda (*multiple trips*) ke tempat pembuangan akhir juga diperbolehkan dalam model ini. Ilustrasi permasalahan ini dapat dilihat pada ganbar di bawah ini.

Penelitian tentang permasalahan VRP dengan batasan *inter-arrival time,* juga dilakukan dengan mengembangkan formulasi bi-level untuk memodelkan pengantaran VRP dengan berbagai tujuan perjalanan sehingga dapat meminimumkan jarak rute perjalanan (Lin dan Shan-Huen, 2015). Tahap pertama adalah melakukan optimasi untuk penentuan titik pengumpulan sampah yang dapat mencakup seluruh wilayah perumahan. Tahap kedua, dengan menggunakan metode heuristic untuk meminimumkan jumlah kendaraan yang digunakan dan jarak perjalanan dalam pengumpulan sampah.

Sebagai bentuk penerapan dari penelitian yang tentang VRP, maka dilakukan pengembangan model yang bertujuan untuk meminimumkan waktu perjalanan dalam pengangkutan sampah. Dengan demikian, makalah ini bertujuan untuk mencari rute minimum yang menghubungkan antar TPS agar ditemukan total waktu perjalanan minimum.

2. Mekanisme Angkutan Sampah dalam VRP

Pengangkutan sampah merupakan kegiatan operasi yang dimulai dari titik pengumpulan antara dari suatu siklus pengumpulan sampai ke tempat pengolahan/ pembuangan akhir pada pengumpulan dengan pola individual langsung atau dari tempat pemindahan, penampungan sementara atau tempat penampungan komunal sampai ke tempat pengolahan/pembuangan akhir. Ilustrasi metoda pengangkutan serta peralatan yang digunakan dalam sistem kontainer tetap (truk) secara manual, dapat dilihat pada **Gambar 1** berikut ini.

Pengangkutan dengan sistem kontainer tetap manual dapat dijelaskan sebagai berikut. :

1. Kendaraan dari depo menuju TPS pertama, sampah dimuat ke dalam truk kompaktor atau truk biasa.
2. Kendaraan menuju TPS berikutnya sampai truk penuh untuk kemudian menuju TPA.
3. Demikian seterusnya sampai rit terakhir.

Gambar 1. Pengangkutan dengan sistem kontainer tetap manual

Permasalahan pengangkutan sampah pada kasus seperti ini dapat digolongkan sebagai *Capacitated Vehicle Routing Problem Time Window Multiple Depo Intermediete Facility* (CVRPTWMDIF). Setiap kendaraan ditugaskan untuk mengunjungi berbagai tempat pengumpulan sampah sementara. Setelah angkutan sampah memenuhi kapasitas kendaraan, maka diangkut menuju TPA dan langsung dilakukan bongkar dimana sampah diturunkan/ditumpuk. Apabila waktu operasi sudah selesai, maka seluruh angkutan sampah akan kembali ke depo. Jika tidak, maka truk angkutan kembali mengangkut sampah di TPS dan membongkarnya di TPA, demikian seterusnya.

3. Formulasi Model Matematis

Untuk merumuskan formulasi matematis permasalahan angkutan sampah, dinyatakan sebagai suatu graf G = (V,A), dengan V={1….n} menunjukkan banyaknya *n* konsumen, dinyatakan dengan nomor 1 hingga *n*. Depo dinyatakan oleh nomor 1, TPA dinyatakan oleh nomor *n* dan A menunjukkan jalan penghubung (*link*) antar lokasi konsumen. Setiap link (i,j) $\in$ A, memiliki waktu perjalanan c_{ij}.

Berikut ini adalah rincian model matematis yang digunakan beserta penjelasan dari setiap notasi yang digunakan.

Fungsi tujuan :

Minimum

$$Z = \sum_{k \in K} \sum_{i,j \in V} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Variabel pemilihan keputusan:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{ jika kendaraan } k \text{ dari } i \text{ menuju } j \\ 0, \text{ jika kendaraan } k \text{ dari } i \text{ tidak menuju } j \end{cases} \quad (2)$$

Batasan :

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V \setminus \{n,0\}} x_{ijk} = 1 \quad ; \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V \setminus \{0\}} x_{ijk} = 1 \quad ; \quad \forall i \in V \setminus \{n,0\} \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in V \setminus \{j\}} x_{ijk} \leq K \quad ; \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} \leq K \quad ; \quad i = n; j = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{j\}} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ijk} (f_i + c_{ij}) \leq Tk \quad ; \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$U_i = Q \quad ; \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$U_i = 0 \quad ; \quad i = n \quad (9)$$

$$Di = Di - Ui \; ; \; \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (10)$$

Dimana :

c_{ij} = waktu perjalanan dari i ke j (antar TPS) (menit)

x_{ijk} = variabel pemilihan keputusan

V = node

Ui = timbulan angkutan sampah (m^3)

Di = timbulan sampah di TPS (m^3)

K = kendaraan (kendaraan)

T_{ik} = waktu operasi (menit)

f_i= waktu bongkar/muat (menit)

Penjelasan lebih lanjut terkait parameter yang telah disebutkan di atas dapat dilihat pada bagian di bawah ini :

1. Waktu perjalanan (c_{ij})

Waktu perjalanan (c_{ij}) menunjukan waktu perjalanan antar dua titik lokasi yaitu asal (i) dan tujuan (j), atau antar node atau TPS sampai ke TPA.

2. Varibel keputusan ($_{xijk}$)

Variabel ini menunjukkan pilihan yang akan dilakukan oleh angkutan sampah. Jika kendaraan k beroperasi dari node i (asal) ke j (tujuan), maka akan bernilai 1, dan jika tidak beroperasi maka akan bernilai 0.

3. Node (V)

Node akan ditunjukkan dengan i (asal) dan j (tujuan), yang merepresentasikan lokasi depo truk (0), pelanggan dan fasilitas antara (n). Kodefikasi akan dilakukan untuk memudahkan pemrograman, mulai dari angka 1 hingga n.

4. Timbulan sampah angkutan (U_i)

Timbulan sampah yang sudah diangkut dinyatakan dengan notasi (U_i), dengan i (asal) adalah lokasi asal kendaraan.

5. Timbulan sampah TPS (D_i)

Timbulan sampah yang berada di TPS setelah proses pengangkutan sampah selesai dilakukan.

6. Kendaraan (K)

Jumlah kendaraan (K) diasumsikan memiiki kapasitas kendaraan *Q* sama.

7. Waktu operasi (T_k)

Waktu operasi (T_k) adalah waktu operasi untuk mengolah sejumlah sampah yang ada setiap kendaraan *k*.

8. Waktu bongkar/muat (f_i)

Waktu bongkar/muat (fi) menunjukkan waktu yang dibutuhkan di lokasi i (asal). Adapun proses bongkar sampah hanya terjadi di TPA dan proses muat hanya terjadi di TPS, yang memiliki karakteristik berbeda-beda.

Fungsi tujuan pada (1) adalah mencari waktu perjalanan minimum. Adapaun jumlah truk sampah yang beroperasi dinyatakan dengan K={0,1,…k}, dan setiap kendaraan akan kembali ke depo setelah melayani konsumen. Variabel keputusan yang digunakan adalah x_{ijk}, nilai 1 menyatakan kendaraan k bergerak dari lokasi i ke j, sedangkan nilai 0 tidak. Setiap pasangan i dan j hanya memiliki satu jalur, yang terdiri atas satu atau beberapa ruas jalan.

Batasan permasalahan dinyatakan pada persamaan (3) hingga (8). Persamaan (3) dan (4) menyatakan hanya satu kendaraan yang pergi dari dan ke TPS. Persamaan (5) dan (6) menyatakan jumlah kendaraan yang beroperasi harus sama dengan jumlah kendaraan yang berangkat dari depo ke TPS dan TPA ke depo. Persamaan (7) menyatakan bahwa waktu operasi harus lebih besar dari waktu perjalanan, waktu bongkar dan muat sampah. Volume timbulan sampah yang diangkut harus sesuai dengan

kapasitas angkut truk (terisi penuh), dinyatakan pada persamaan (8). Persamaan (9) menunjukkan bahwa angkutan sampah yang melewati TPA tidak mengangkut sampah. Dengan adanya batasan persamaan (8) dan (9), truk yang sudah tidak bisa memuat sampah akibat keterbtasan kapasitas angkut truk atau waktu operasi, maka truk akan langsung menuju TPA tanpa pergi ke TPS lain. Persamaan (10) menunjukkan bahwa timbulan sampah di TPS akan habis atau berkurang sesuai dengan jumlah timbulan sampah yang diangkut truk. Dengan demikian, tidak semua timbulan sampah di TPS dapat dimuati dalam satu bak truk.

9. Penerapan model VRP

Nearest-neighbor heuristik adalah prosedur konstruksif sederhana yang membangun jalur Hamiltonian secara iterative dengan menghubungkan TPS yang disisipkan pada iterasi sebelumnya yang belum terhubung dan terdekat. Menurut (Mardiani, dkk., 2013) perutean yang digunakan dalam pengangkutan sampah, berdasarkan (Pop *et al*., 2011), dijelaskan sebagai berikut :

1. Angkutan sampah akan mencari rute terpendek selalu dari depo menuju TPS terdekat untuk mengambil timbulan sampah;
2. Setiap TPS hanya dikunjungi satu kali;
3. Dari TPS, angkutan sampah akan langsung pergi menuju TPA, dengan mencari rute terpendek;
4. Setelah sampai di TPA, angkutan sampah dapat kembali menuju TPS terdekat dengan catatan selama waktu operasi mencukupi. Apabila tidak mencukupi, maka angkutan sampah akan kembali ke depo kendaraan, dengan mencari rute terpendek;
5. Perjalanan dari depo hingga kembali ke depo disebut satu kali rute;
6. Rute akan selesai apabila seluruh TPS sudah selesai dikunjungi.

4. Pemrograman dan Algoritma

Algoritma diawali dengan permintaan input lokasi, waktu perjalanan, waktu operasi, waktu pelayanan (bongkar/muat) dan timbulan di setiap TPS. Pemberian nilai kapasitas truk juga dilakukan di tahap awal ini. Seluruh batasan yang telah didefinisikan pada bagian formulasi matematika, seperti kapasitas angkut angkutan sampah, kendala *time window* serta urutan rute yang harus melewati *intermediate facility,* harus bisa disesuaikan oleh program yang akan dibuat.

Jika seluruh data input sudah masuk, maka program akan melakukan inisiasi angkutan yang akan beroperasi dan lokasi awal pemberangkatan angkutan/truk. Kodefikasi dilakukan untuk memudahkan penyusunan rute. Tempat parkir truk diberi notasi 1. Seluruh TPS akan diberi notasi 2 hingga n. Dan TPA akan diberi notasi n+1. Berikut ini adalah contoh kodefikasi yang digunakan dalam penyusunan rute.

Tabel 1. Contoh kodefikasi

No	Nama	No Zona
1	Tempat Parkir Truk	1
2	TPS 1	2
3	TPS n	n
4	TPA	n+1

Identifikasi volume angkutan dilakukan dengan menjumlahkan seluruh volume timbulan sampah di setiap TPS yang dikunjungi. Jika belum pernah mengunjungi TPS, maka volume angkutan akan dinilai nol. Setelah itu akan dilakukan pengecekan terhadap kapasitas angkutan. Apabila volume angkutan lebih kecil dari kapasitas angkutan, maka program akan dilanjutkan. Jika tidak, maka program akan menuju ke pembentukan rute kendaraan berikutnya (k=k+1).

Identifikasi TPS yang sudah dikunjungi dilakukan pada tahap berikutnya. Jika seluruh TPS sudah dikunjungin dan timbulan sampah sudah diangkut, maka program akan berhenti. Jika tidak, akan dilakukan identifikasi lokasi TPS yang belum diangkut sampahnya. Lokasi terdekat akan dipilih untuk menjadi tujuan kunjungan selanjutnya. Ilustrasi rute awal dapat dilihat pada gambar berikut.

Gambar 2. Ilustrasi pembentukan rute (1)

Pembentukan rute baru akan dilakukan dengan memasukkan TPS yang menjadi tujuan kunjungan. Sebagai contoh, TPS yang terdekat akan dipilih untuk mengisi rute pada gambar di atas adalah TPS nomor 5. Ketika rute sudah terbentuk, maka akan dilakukan pengecekan terhadap waktu operasi. Apabila nilai total waktu (waktu perjalanan, waktu bongkar dan waktu muat) lebih kecil daripada waktu operasi angkutan, maka program akan kembali melakukan identifikasi volume angkutan dan TPS yang sudah dikunjungi. Setelah itu, rute akan dibentuk lagi dengan memasukan TPS terdekat sebagai tujuan kunjungan berikutnya.

Gambar 3. Ilustrasi pembentukan rute (2)

Apabila volume angkutan lebih besar dari kapasitas angkutan, maka kunjungan berikutnya adalah TPA. Ketika sudah mengunjungi TPA, maka volume angkutan akan bernilai nol. Rute baru akan dibentuk kembali jika nilai total waktu lebih kecil daripada waktu operasi angkutan. Tahapan akan mengulang identifikasi TPS yang sudah dikunjungi. Setelah itu, rute akan dibentuk lagi dengan memasukan TPS terdekat sebagai tujuan kunjungan berikutnya.

Gambar 4. Ilustrasi pembentukan rute (3)

Apabila total waktu lebih besar dari waktu operasi angkutan, maka akan dilakukan penyesuaian rute dengan menghilangkan kunjungan TPS terakhir. Selama waktu operasi masih ada, maka pembentukan rute baru akan terus berlangsung. Jika kapasitas atau waktu operasi sudah tidak mencukupi lagi, maka angkutan akan kembali ke depo.

Gambar 5. Ilustrasi pembentukan rute (4)

Pengulangan pembentukan rute, mulai dari inisiasi lokasi awal dan akhir hingga pembentukan rute TPS baru akan terus dilakukan, hingga seluruh TPS sudah dikunjungi. Apabila kapasitas angkutan sudah tidak mampu melayani timbulan sampah, maka angkutan akan menuju *intermediate facility*/fasilitas antara untuk melakukan *unloading* sampah.

Keluaran dari program ini adalah rute optimum angkutan sampah. Secara skema, algoritma dapat dilihat pada **Gambar 6**.

Berikut ini adalah prosedur perhitungan algoritma *Nearest-neighbor* heuristic.

1. Tahapan 0. Set K = {1,…..,k}, dimana k adalah jumlah kendaraan yang akan beroperasi.
2. Tahapan 1. Hitung nilai volume U_i, jika U_i> Kapasitas Qi, maka kembali ke Tahapan 0.
3. Tahapan 2. Set C={r} , dimana rV' adalah node yang terpilih secara acak, dan set i=r.
4. Tahapan 3. Identifikasi node j V'\C sehingga didapatkan nilai minimum.
5. Tahapan 4. Hitung total waktu (cij+), jika T< T_k, maka kembali ke Tahapan 0.
6. Tahapan 5. Jika |C|=|V'|, maka program berhenti. Jika tidak maka tetapkan j=r dan kembali ke Step 2.

5. Pemeriksaan

Pemeriksaan awal dilakukan dengan membuat kasus angkutan sampah hipotetik, yang nanti akan digunakan untuk menguji algoritma yang telah dibuat. Proses pengujian dilakukan dengan memeriksa kesesuaian antara logika pada bahasa pemrograman dengan logika algoritma. Mulai dari pemeriksaan kesesuaian fungsi tujuan, memeriksa kembali *source code* dalam *Matlab* yang digunakan dan memastikan bahwa seluruh batasan telah dimasukan. Lalu dilanjutkan dengan cara mempergunakan data *dummy* sederhana untuk melakukan pemeriksaan kesesuaian hasil output program dengan manual.

Dalam kasus ini bersifat homogen atau setiap angkutan memiliki kapasitas yang sama. Batasan *time window* menunjukkan total waktu harus lebih kecil atau sama dengan waktu operasi. Dalam kasus jaringan hipotetik, model memiliki batas waktu operasi 350 menit,

Gambar 6. Diagram alir optimasi menggunakan algoritma nearest neighbor

Gambar 7. Ilustrrasi kasus angkutan sampah hipotetik

sehingga seluruh truk memiliki total waktu di bawah 350 menit. Dalam model ini, terdapat dua depo, yaitu depo kendaraan dan TPA, sehingga termasuk ke dalam batasan *multi depo.* Dalam kasus ini, terjadi pemuatan sampah di TPS dan pembongkaran sampah di TPA.

5.1 Hasil kasus angkutan sampah hipotetik

Dari segi waktu komputasi, lihat **Gambar 8**, metode *nearest neighbor* dapat melakukan pemeriksaan jaringan hipotetik dengan cepat. Terdapat perubahan *running time* untuk setiap jumlah TPS yang diperiksa. Setiap hasil pemeriksaan, akan menghasilkan hasil

Gambar 8. Waktu komputasi jaringan hipotetik

Gambar 9. Uji kestabilan

yang sama, dengan perbedaan *running time* hanya sekitar 0.01 detik. Lalu untuk uji kestabilan, lihat **Gambar 9**, diambil satu contoh penentuan urutan rute. Untuk mencapai nilai konvergen, dilakukan beberapa kali iterasi. Model dianggap stabil dan digunakan untuk perhitungan selanjutnya.

5.2 Hasil angkutan sampah wilayah bandung timur

Wilayah Bandung Timur terdiri atas 38 TPS yang tersebar di kecamatan yang ada di Kota Bandung. Lokasi Depo Truk berada di Kecamatan Mandalajati. Persebaran TPS dan Depo Truk dapat dilihat pada **Gambar 10**. Untuk lokasi TPA untuk wilayah Bandung Timur berada di Kabupaten Bandung Barat, yaitu TPA Sarimukti.

Dalam permasalahan ini digunakan beberapa asumsi yang dibuat berdasarkan kondisi lapangan yang ada di wilayah operasi Bandung Timur saja, yaitu:

1. Seluruh timbulan sampah dianggap sudah siap diangkut ketika angkutan sampah tiba;
2. Pengangkutan sampah menggunakan angkutan dengan asumsi kapasitas yang sama;
3. Node adalah Depo Truk, TPS atau TPA;
4. Busur/*arc* adalah jalan atau sekumpulan jalan yang menghubungkan node;
5. Waktu tempuh antar node didapatkan dari data sekunder;
6. Metode pengangkutan sampah menggunakan pengangkutan SCS manual;

Pengambilan sampah dapat dilakukan angkutan sampah lebih dari satu ritase dalam 1 hari. Satu ritase dimulai dari TPS pertama, dilanjutkan ke TPS lain hingga kapasitas angkutan penuh, lalu pergi menuju TPA untuk melakukan bongkar muatan dan kembali ke TPS terdekat untuk mengangkut sampah.

Gambar 10. Lokasi TPS di wilayah Bandung Timur

Rincian input data yang digunakan adalah sebagai berikut :

Input karakteristik kendaraan

Telah dijelaskan pada bagian sebelumnya bahwa terdapat 3 jenis kendaraan yang beroperasi untuk mengangkut sampah, yaitu angkutan DT, Kompaktor dan LH, dengan volume 6 dan 10 m^3. Program yang dibuat hanya cocok untuk satu jenis kapasitas kendaraan sehingga perlu dilakukan penyederhanaan dengan mencari nilai rata-rata kapasitas. Berikut adalah rumus yang digunakan untuk mencari nilai kapasitas.

$$\text{Rata} - \text{Rata Kapasitas} = \frac{\sum \text{Kapasitas} \times \text{JumlahKendaraan}}{\text{JumlahKendaraan}}$$

Berikut adalah hasil perhitungan untuk setiap jenis kendaraan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Kapasitas kendaraan

No	Jenis Angkutan	Kapasitas (m^3)	Jumlah Kendaran	Kapasitas x Jumlah Kendaraan
1	DT	10	3	30
		6	5	30
2	Kompaktor	10	2	20
		6	1	6
3	LH	10	10	100
		6	3	18
	Total		24	204

Kapasitas angkutan yang didapatkan dengan perhitungan tersebut adalah 8,5 m^3.

Input data lokasi dan volume sampah

Data awal yang didapatkan adalah lokasi setiap TPS, TPA dan Depo Truk di Kota Bandung. TPS yang dimaksud adalah yang memiliki kontainer sehingga memudahkan proses pemuatan sampah ke dalam truk. TPA berlokasi di Desa Sarimukti, sedangkan Depo Truk berada di daerah Pasir Impun. Penamaan TPS dilakukan untuk memudahkan perhitungan pada program, dan dapat dilihat pada **Tabel 3**. Lokasi TPS dapat dilihat pada **Gambar 10**.

Data yang didapatkan dari PD Kebersihan berupa volume timbulan sampah (m^3) pada satu hari tahun 2014 di setiap TPS wilayah operasional Bandung Timur. Volume sampah terbesar berada di TPS Pasar Gedebage yaitu 38 m^3 per hari. Volume sampah terkecil berada di TPS Cijaura Girang, Cinambo Indah dan *Golf* yaitu 0.5 m^3. Rata-rata dari volume sampah di TPS yang berada di wilayah operasional Bandung Timur adalah 9.39 m^3. Gambar di bawah ini menunjukkan volume timbulan sampah di wilayah Bandung Timur.

Input data waktu perjalanan, bongkar/muat dan operasi

1. Waktu perjalanan

Waktu perjalanan adalah waktu yang dibutuhkan untuk pergi dari dan ke TPS/TPA/Depo Truk. Waktu yang digunakan bersifat actual, atau sesuai dengan kenyataan. Kriteria dalam memilih waktu perjalanan adalah rute yang melewati jalan nasional dan memiliki nilai terendah. Hasil pengolahan data dapat dilihat pada bagian lampiran. Waktu perjalanan antar TPS yang terlama adalah 36 menit, dari TPS Cicukang menuju

Tabel 3. Penomoran lokasi TPS

No Zona	Nama Lokasi	No Zona	Nama Lokasi
1	Depo Kendaraan	18	Pasar Ciwastra
2	Pacuan Kuda	19	Bandung Inten
3	Komplek Arcamanik	20	RW 10, 11
4	Cisaranten Jati	21	RW 13
5	Cingised	22	Cipagalo
6	Cicukang	23	Cijaura Girang
7	Jl. Bojong Awi	24	Cikadut
8	PU Binamarga	25	Bandung Hill Side
9	Gading Regensi	26	LP Sukamiskin
10	Subang	27	Suka Asih
11	Indramayu	28	Cijambe
12	Cibatu	29	Pasar Ujung Berung
13	Pratista	30	Cigending
14	Cipadung RW 08	31	Ujung Berung Indah
15	Legit	32	Cinambo Indah
16	Cempaka Arum	33	Golf
17	Derwati	34	Panyileukan
35	Pangaritan	37	Polda Jabar
36	Pasar Gedebage	38	TPA Sarimukti

TPS, sedangkan terpendek adalah 3.75 menit dari TPS Jl Bojong Awi menuju TPS LP Sukamiskin. Rata-rata waktu perjalanan antar TPS nya adalah 27 menit.

2. Waktu muat

Waktu muat adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan muat sampah di TPS. Proses muat dilakukan secara manual. Berdasarkan hasil wawancara, proses muat yang terjadi di setiap TPS rata-rata memerlukan waktu selama 30 menit.

3. Waktu operasi

Waktu operasi adalah batas waktu yang ditentukan untuk operasional angkutan/truk sampah. Berdasarkan hasil wawancara dengan petugas PD Kebersihan, waktu operasi biasanya selama 15 jam atau 800 menit.

4. Waktu bongkar

Waktu bongkar adalah waktu yang dibutuhkan untuk melakukan bongkar sampah di TPA. Proses bongkar yang terjadi terdiri atas antrian truk ketika masuk dan keluar TPA dan aktivitas bongkar sampah. Antrian yang terjadi akibat hujan deras yang turun hampir setiap hari di sekitar TPA Sarimukti sehingga jalan menjadi licin dan membahayakan bagi truk yang hendak masuk ke TPA. Selain itu, tidak semua zona di TPA bisa melayani bongkar sampah. Untuk aktivitas bongkar sampah, setiap truk dibantu oleh alat berat untuk mengeluarkan sampah, sehingga tidak memerlukan waktu yang banyak.

Berdasarkan hasil wawancara, untuk proses bongkar yang terjadi di TPA memerlukan waktu yang cukup lama bergantung kepada kondisi cuaca. Jika panas, maka rata-rata waktu bongkar yang diperlukan adalah 15 menit, sedangkan apabila hujan sekitar 2-3 jam. Dengan demikian, waktu bongkar yang digunakan adalah 2 jam atau 120 menit.

5. Analisis pengaruh optimasi rute

Optimasi rute adalah proses pemilihan rute terbaik

Gambar 10. Volume Timbulan Sampah di TPS

dengan menggunakan tolak ukur volume timbulan sampah yang terangkut. Jumlah kendaraan yang beroperasi adalah 24 truk. Berdasarkan data yang diperoleh dari PD. Kebersihan, sisa volume timbulan sampah yang tidak terangkut sebanyak 80,3 m^3, dari 36 TPS yang dikunjungi di wilayah Bandung Timur. Setelah dilakukan optimasi rute, terdapat peningkatan kinerja yang ditandai dengan penurunan sisa volume timbulan sampah, menjadi 43,8 m^3. Dari hasil optimasi rute, sisa volume sampah yang tidak diambil semua berada di TPS Legit, Pasar Ujung Berung, Cigending, Ujung Berung Indah dan Pangaritan, dengan volume sebagai berikut.

Tabel 4. Sisa volume timbulan sampah di TPS

No	Nama TPS	Sisa Volume TimbulanSampah (m^3)
1	Legit	7,91
2	Pasar Ujung Berung	1,42
3	Cigending	1,91
4	Ujung Berung Indah	13,68
5	Pangaritan	9,87

Untuk mengangkut seluruh timbulan sampah, setelah dilakukan optimasi urutan rute pada tahun 2014, dibutuhkan truk sebanyak 27 kendaraan. Proyeksi timbulan sampah dilakukan hingga tahun 2018, dapat diketahui kebutuhan truk sehingga seluruh timbulan sampah dapat terangkut di wilayah Bandung Timur. Hingga tahun 2018, dibutuhkan tambahan truk sebanyak 3 kendaraan untuk mengangkut seluruh timbulan sampah yang ada.

Gambar 11. Proyeksi kebutuhan truk tahun 2014 hingga 2018

6. Kesimpulan

1. Untuk mempercepat proses pengangkutan sampah dari sejumlah TPS yang tersebar dan akhirnya dikumpulkan di TPA, perlu dilakukan optimasi rute angkutan sampah terlebih dahulu untuk mendapatkan rangkaian kunjungan TPS dan rute tercepat yang akan diikuti oleh truk pengangkut dalam setiap operasi.

2. Formulasi permasalahan angkutan sampah telah dirumuskan, algoritma yang digunakan untuk mencari solusinya adalah nearest neighbor. Setelah dilakukan pemeriksaan dan verifikasi dalam jaringan hipotetik ditemukan bahwa kinerja algoritma cukup stabil dalam mencari solusi, sehingga dilakukan pemeriksaan lanjut pada angkutan sampah riil di Kota Bandung.

3. Penerapan VRP dalam angkutan sampah di Kota Bandung ditemukan bahwa optimasi pengangkutan sampah dapat meningkatkan volume angkutan sampah yang terangkut setiap harinya sehingga menyisakan timbulan sampah minimum di semua TPS..

4. Konsep peruteaan dalam makalah ini belum mencakup pembebanan pada ruas lalu lintas secara detil. Untuk angkutan sampah masalah ini bisa dikembangkan dengan menerapkan metoda *multi-user class assignment* dengan pemenuhan prinsip peruteaan tertentu, mengingat tidak semua ruas jalan kota boleh dilalui angkutan sampah.

5. Memgingat sisa volume timbulan sampah memiliki fluktuasi yang cukup tinggi setiap harinya, fenomenanya menjadi bersifat dinamis. Sehingga sisa timbulan akan berubah-ubah setiap waktunya. Melakukan optimasi VRP dalam kondisi dinamis menjadi tantangan dan kebaruan sendiri dalam penelitian, sehingga menarik untuk menjadi penelitian

Daftar Pustaka

Buhrkal, K., Larsen, A., 2012, The Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows in a City Logistics Context. *Social and Behavioral Sciences,* Vol. 39 Tahun 2012 *Pg 241-254,* Mallorca, Spanyol.

Fitria, L., Susanti, S., dan Suprayogi., 2009, *Pemecahan Masalah Penentuan Rute Truk Pengumpulan dan Pengangkutan Sampah di Kota Bandung,* Jurnal Industri Petra, Indonesia.

Lin, P., Shan-Huen H., 2015, *Vehicle Routing-Scheduling for Municipal Waste Collection System Under the "Keep Trash off the Ground" Policy*, Omega, Kaahsiung City, Taiwan.

Mardiani, Uci., Yossyafra., dan Gunawan, H., 2013, Efisiensi Rute Truk Pengangkut Sampah Sistem Stationary Container di Kota Padang dengan Menggunakan Algoritma Nearest Neghbour, *Jurnal Teknika*, Vol. 20 No. 2. Indonesia.

Pop, P.C., Sitar, C.P., Zelina, L., Lupase, V., and Chira, C., 2011, Heuristic Algorithms for Solving the Generalized Vehicle Routing Problem. Int. *Journal of Computers, Communication & Control*, Vol. VI No. 1 March 2011, pp.158-165. ISSN : 1841-9836, E-ISSN : 1841-9844, Romania.