

Penentuan Rute Pengangkut Limbah Medis Optimal Menggunakan *Vehicle Routing Problem with Time Window* pada Kasus Multi Depot

Determining Optimum Medical Waste Transportation Routes Using Vehicle Routing Problem with Time Window in Multi Depot Case

Erika Fatma*

Program Studi Manajemen Logistik Industri Elektronika, Politeknik APP Jakarta, Jln. Timbul, No 34, Jakarta
E-mail: rika-fatma@kemenperin.go.id

Winanda Kartika

Program Studi Manajemen Logistik Industri Elektronika, Politeknik APP Jakarta, Jln. Timbul, No 34, Jakarta
E-mail: winandakartika.poltekapp@gmail.com

Aniza Nur Madyanti

Program Studi Manajemen Logistik Industri Elektronika, Politeknik APP Jakarta, Jln. Timbul, No 34, Jakarta
E-mail: anizanm@gmail.com

ABSTRACT

The current COVID-19 pandemic has created new environmental problems. The increase of medical waste due to increased activity in public health facilities is a new threat to environmental health. Unfortunately, not all health facilities have the capacity to manage their own waste. This causes the medical waste need to be taken to a waste treatment center for proper treatment that meets environmental health standards. Reverse logistics is one of the activities that can help the process of transporting medical waste. This study uses a vehicle routing problem with a time window (VRPTW) for multi depot cases. The limitations used in this study are the operational time of each Puskesmas, vehicle capacity and operational working hours of waste transport officers. In this case, the optimization of the cost calculation for the transportation of waste from 42 health centers in the DKI Jakarta area is carried out to be taken to three central locations for waste treatment. The purpose of the model used is to minimize transportation costs, namely fixed costs and variable costs of the vehicle used. The routes generated from this research are six transportation routes with a total distance of 412,31 km, with a total cost of Rp 5.928.498,75.

Keywords: Medical waste, reverse logistics, VRPTW.

ABSTRAK

Pandemi COVID-19 yang sedang dihadapi saat ini, telah menimbulkan permasalahan lingkungan akibat peningkatan limbah dari aktivitas di fasilitas kesehatan masyarakat. Tidak semua fasilitas kesehatan memiliki kemampuan untuk mengelola limbah sendiri, sehingga perlu diangkut ke pusat pengolahan limbah untuk pengolahan sesuai standar kesehatan lingkungan. Reverse logistics merupakan salah satu aktivitas yang membantu mengelola pengangkutan limbah medis. Penelitian dilakukan dengan mengamati limbah yang dihasilkan oleh Puskesmas di DKI Jakarta. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari Kementerian Kesehatan RI. Penelitian ini menggunakan model penentuan rute kendaraan dengan jendela waktu (VRPTW) untuk kasus multi depot. Batasan yang digunakan dalam penelitian adalah waktu operasional Puskesmas, kapasitas kendaraan dan jam kerja operasional petugas pengangkut limbah. Dalam kasus ini, dilakukan optimasi perhitungan biaya untuk pengangkutan limbah dari 42 titik Puskesmas di wilayah DKI Jakarta untuk dibawa ke tiga lokasi pusat pengolahan limbah. Tujuan dari model yang digunakan adalah untuk meminimasi biaya pengangkutan, yaitu biaya tetap dan biaya variabel dari kendaraan yang digunakan. Rute yang dihasilkan dari penelitian ini adalah enam rute pengangkutan dengan total jarak sebesar 412,31 km, dengan total biaya sebesar Rp 5.928.498,75.

Kata Kunci: Limbah medis, Reverse logistics, VRPTW.

**Corresponding author*

PENDAHULUAN

Pandemi COVID-19 telah meningkatkan volume limbah medis di berbagai fasilitas kesehatan masyarakat. Peningkatan volume limbah medis ini, tentunya menimbulkan tantangan lingkungan baru. Tentu saja, hal ini akan meningkatkan tuntutan atas pengembangan sistem pengelolaan limbah yang tepat. Limbah tersebut harus dikelola dengan tepat mulai dari aktivitas pengumpulan, pengangkutan, pembuangan, pengolahan dan pemusnahan. Pengembangan sistem untuk pengumpulan, pengangkutan, dan pembuangan yang handal tentunya dapat membantu layanan penanganan limbah tepat waktu dan mengendalikan potensi penularan penyakit.

Salah satu masalah yang dihadapi oleh fasilitas pelayanan kesehatan adalah penanganan limbah medis padat, yaitu limbah yang berasal dari sisa hasil kegiatan medis yang tidak digunakan kembali dan berpotensi terkontaminasi oleh zat yang bersifat infeksius atau kontak dengan pasien atau petugas yang menangani pasien, seperti: masker, sarung tangan bekas, perban, sisa kemasan minuman makanan, alat suntik bekas, set infus bekas, alat pelindung diri, dan limbah lain (Nurali, 2020). Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mencatat, jumlah timbunan limbah medis Covid-19 telah mencapai 21.500 ton per September 2021 (KLKH, 2021).

Proses pemilahan dan pengepakan limbah medis padat di fasilitas pelayanan kesehatan (Fasyankes) diawali dengan memilah sampah medis padat ke dalam wadah atau tempat sampah yang dilapisi kantong khusus berlambang *biohazard* dan memastikan kantong tersebut terikat erat. Pengangkutan limbah medis padat dilakukan menggunakan troli khusus dengan tutup rapat berlambang *biohazard*. Sebagai tambahan troli tersebut diberi tulisan “limbah infeksius”. Setelah dikumpulkan, selanjutnya dilakukan penanganan limbah. Penanganan limbah medis padat harus dilakukan menggunakan *incinerator*. Suhu minimum yang dipersyaratkan untuk pemusnahan limbah medis, adalah 800°C pada burner primer dan 1000°C untuk burner sekunder (Wardani & Azizah, 2020). Sayangnya, tidak semua Fasyankes, khususnya Puskesmas di wilayah DKI Jakarta, telah memiliki *incinerator*. Hal ini menyebabkan limbah medis tersebut harus dikumpulkan dan diangkut ke pusat pengolahan limbah untuk penanganan akhir yang tepat. Limbah medis harus diangkut ke pusat pengolahan limbah yang telah mendapatkan izin dari Pemerintah untuk pengolahan selanjutnya. Sistem pengelolaan sampah yang baik tidak hanya tergantung pada proses pengolahannya saja, tetapi juga pada cara pengumpulan limbah medis dari Fasyankes yang tersebar di beberapa titik ke lokasi pengolahan limbah yang saat ini jumlahnya terbatas.

Pengumpulan dan pengangkutan limbah medis dari pengguna akhir (Puskesmas) ke pusat pengolahan limbah merupakan salah satu masalah operasional kritis yang harus diselesaikan. Proses pengangkutan limbah dari sejumlah titik Puskesmas yang tersebar di suatu wilayah menuju beberapa pusat pengelola limbah, memerlukan pengelolaan yang baik, agar keterbatasan sumber daya yang dimiliki, tetap dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan seluruh Puskesmas secara efektif dan efisien. Beberapa referensi (He & Liu, 2015; Kargar, Paydar, *et al.*, 2020; Kargar, Pourmehdi, *et al.*, 2020; Shi *et al.*, 2009) merekomendasikan *reverse logistics* sebagai salah satu solusi untuk mengelola permasalahan limbah medis.

Aktivitas logistik umumnya berkaitan dengan proses perpindahan material dari produsen ke konsumen, proses sebaliknya, yaitu aliran barang dari konsumen kembali kepada produsen disebut *reverse*. *Reverse logistics* dalam pengelolaan limbah merupakan rangkaian kegiatan terkait pengumpulan produk rusak atau tidak terpakai dari titik konsumsi kembali ke produsen atau fasilitas pengolahan limbah (Espitia *et al.*, 2020). Proses *reverse logistics* melibatkan perencanaan, pelaksanaan, pemantauan aliran bahan, baik bahan baku, bahan setengah jadi, maupun bahan jadi, dan arus informasi dari titik konsumsi secara efektif dan efisien kembali ke titik awal untuk pengolahan atau pembuangan yang sesuai (Abdulrahman *et al.*, 2014). Studi literatur yang dilakukan mengungkapkan minat di bidang *reverse logistics* semakin meningkat dengan meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap pelestarian lingkungan (Fatma, 2018). *Reverse logistics* bertujuan untuk mengembalikan nilai produk yang tidak lagi digunakan, sebagai bentuk tanggung jawab atas dampak dari produk yang dihasilkan terhadap lingkungan.

Dalam kasus reverse logistik limbah, perlu ditentukan penentuan rute yang optimal dalam proses pengangkutan dari titik konsumsi ke titik pengolahan limbah. Salah satu masalah optimasi yang sering ditemui dalam pengangkutan barang, adalah VRP (*Vehicle Routing Problem*). VRP bertujuan untuk meminimalkan biaya operasi transportasi oleh armada kendaraan yang beroperasi di luar pangkalan yang disebut depot ke beberapa titik tujuan (Erdoğan, 2017). Dalam literatur, terdapat beberapa penggunaan penentuan rute kendaraan dalam pengumpulan dan pengangkutan limbah (Mancera-Galván *et al.*, 2017; Ouertani *et al.*, 2020; Wichapa & Khokhajaikiat, 2018). Selama pandemi terdapat peningkatan kebutuhan akan sistem pengelolaan dan pengangkutan limbah medis dengan volume yang besar namun lebih efisien dari sebelumnya. Pengangkutan limbah yang tepat dapat membantu sistem pengolahan limbah untuk memperoleh efektivitas waktu dan biaya (Babae & Aydin, 2021).

Permasalahan pengangkutan limbah ini, dapat diselesaikan menggunakan model *Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)*. VRPTW merupakan pengembangan dari VRP, dimana aktivitas penerimaan/pengiriman hanya dapat dilakukan pada rentang waktu tertentu. Model ini dipilih karena pusat pengolahan limbah dan Puskesmas, tidak beroperasi penuh 24 jam, namun memiliki waktu operasional terbatas. Model VRPTW dapat memberikan batasan, terhadap waktu operasional kendaraan, kapasitas kendaraan penuh, dimana setiap kendaraan melakukan beberapa perjalanan pembuangan per hari (Kim *et al.*, 2006).

Artikel ini bertujuan untuk merancang jaringan pengangkutan limbah medis di wilayah DKI Jakarta, yang dapat memberikan biaya angkut optimal. Artikel ini menyajikan penerapan VRPTW dalam konteks pengangkutan dan pembuangan limbah medis. Makalah disusun dengan urutan berikut: Pertama, latar belakang; kedua, model matematika dari masalah yang diangkat; ketiga, aplikasi numerik berdasarkan studi kasus yang dilakukan; keempat, hasil dan visualisasi rute kendaraan; terakhir, kesimpulan dan saran. Diharapkan solusi yang dihasilkan dapat membantu pihak berwenang dalam menjalankan pengelolaan sistem pengolahan limbah medis.

METODE PENELITIAN

Penentuan rute kendaraan merupakan aspek vital dari transportasi dan manajemen logistik, dengan berbagai aplikasi seperti transportasi umum, rantai limbah padat, penjadwalan kendaraan, distribusi gas, dan layanan kurir. *Vehicle Routing Problem (VRP)* dapat dinyatakan sebagai kasus, dimana sekumpulan pelanggan yang tersebar secara geografis dengan permintaan yang diketahui harus dilayani oleh armada kendaraan yang homogen dengan kapasitas terbatas. Seruh pelanggan harus diservis tepat satu kali, setiap kendaraan diasumsikan mulai dan berakhir tepat di satu depot. Tujuan utamanya adalah untuk meminimalkan total jarak yang ditempuh semua kendaraan dan meminimasi biaya. Terdapat beberapa pengembangan untuk menyesuaikan VRP dengan kondisi permasalahan yang dihadapi. *Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)* merupakan salah satu pengembangan VRP; terdapat jendela waktu pelayanan yang dimiliki setiap pelanggan. Artinya, selain batasan kapasitas kendaraan, setiap pelanggan menyediakan jendela waktu di mana layanan operasional dan jam bongkar muat kendaraan. Tujuan dari VRPTW adalah untuk meminimalkan jumlah kendaraan dan total jarak yang ditempuh untuk melayani pelanggan tanpa melanggar batasan kapasitas dan jendela waktu (Runka *et al.*, 2009).

Usulan masalah penelitian ini didasarkan pada VRPTW menggunakan beberapa depot, dengan mempertimbangkan keterbatasan waktu layanan di titik pelanggan dan tiga unit depot yang memiliki waktu operasional yang berbeda. VRPTW merupakan pengembangan VRP dengan tambahan *constraints* berupa *time window*. *Time window* dapat diartikan sebagai batasan waktu kendaraan dapat mengunjungi customer. Jaringan pengangkutan digambarkan sebagai titik-titik yang saling terhubung dimana setiap titik memiliki sejumlah limbah yang perlu diangkat menuju fasilitas pengolahan limbah (depot). Kendaraan pengangkut memulai perjalanan dari depot lalu mendatangi beberapa titik dalam kelompok tertentu. Setiap titik hanya melayani pengangkutan limbah pada interval waktu tertentu, sesuai waktu operasional layanan di setiap fasilitas tersebut. Kendaraan berangkat dari depot untuk mengambil limbah medis di beberapa titik, lalu mengakhiri perjalanan untuk kembali ke lokasi depot awal.

Dalam kasus VRPTW, pemodelan dilakukan untuk menentukan rute pengangkutan limbah yang dapat melayani semua pelanggan, dengan menetapkan lokasi kelompok pelanggan yang akan dilayani lalu menentukan urutan rute perjalanan untuk tiap kendaraan. Tujuannya adalah untuk memperoleh jarak pengangkutan minimum, yang akan menghasilkan biaya transportasi minimum. Dalam memecahkan permasalahan, terdapat beberapa asumsi yang digunakan, yaitu:

- Depot pengolahan limbah memiliki kapasitas pengolahan limbah tidak terbatas
- Kendaraan yang dibutuhkan untuk melayani semua pelanggan selalu tersedia
- Setiap pelanggan dilayani oleh satu kendaraan pengangkut limbah
- Setiap kendaraan berangkat dari satu depo, melayani beberapa pelanggan dan kembali ke depo yang sama
- Spesifikasi dan kapasitas kendaraan untuk seluruh operasi seragam
- Produk yang diangkut tunggal, dan homogen
- Biaya yang dihitung berdasarkan biaya tetap dan biaya variabel kendaraan
- Biaya transportasi variabel kendaraan berbanding lurus dengan jarak tempuh
- Jarak tempuh dihitung berdasarkan jarak berkendara terpendek
- Kecepatan tiap kendaraan adalah konstan
- Waktu pelayanan setiap kendaraan adalah tetap
- Jumlah barang yang diangkut dari Fasyankes diketahui dan tetap.

Untuk memudahkan pembahasan penyelesaian masalah menggunakan model matematis, notasi, parameter dan variabel yang digunakan dalam artikel ini, dapat dijelaskan sebagai berikut:

Indeks:

- i, j indeks lokasi (depot dan Fasyankes)
 k indeks kendaraan, $k=1,2,..K$

Parameter:

- $d_{i,j}$ jarak antara titik i dengan titik j (km)
 v_k kecepatan kendaraan k (km/jam)
 α_k biaya tetap kendaraan k (Rp)
 β_k biaya variabel kendaraan k (Rp/km)
 $w_{i,j,k}$ waktu perjalanan dari i ke j dengan kendaraan k
 s_i waktu pelayanan di titik i (jam)
 a_i waktu buka pelayanan di titik i
 b_i waktu tutup pelayanan di titik i

Variabel:

- T_{ik} : waktu layanan kendaraan k pada titik i
 π_k : waktu berangkat kendaraan k
 τ_i : waktu pelayanan titik i
 C_{ijk} : biaya perjalanan kendaraan k dari i ke j
 X_{ijk} : biner, kunjungan dari i ke j dengan kendaraan k .
 Y_{ik} : biner untuk kunjungan ke i dengan kendaraan k
 z_k : nilai biner untuk penggunaan kendaraan
 A : jumlah kendaraan yang ditugaskan pada rute

Indeks diatas dapat membantu memahami penyusunan model matematis sebagai berikut. Model matematis yang digunakan didasarkan pada formulasi klasik VRPTW yang telah digunakan secara luas (Kallehauge, 2008), dengan formulasi matematis sebagai berikut:

Fungsi Tujuan:

$$Min Z = \sum_{k \in K} \alpha_k z_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_{ij} \beta_k X_{ijk} \quad (1)$$

Pembatas:

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1 \quad \forall i \in V_M, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k \leq 1 \quad \forall i \in V_C \setminus V_M, \quad (3)$$

$$\sum_{p \in S, q \in V \setminus S} x_{pq}^k \geq y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K, S \subset V : o^k \in S, i \in V \setminus S, \quad (4)$$

$$\sum_{p \in S, q \in V \setminus S} x_{pq}^k \geq \Omega y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K, S \subset V : i \in S, r^k \in V \setminus S, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in V_C} x_{o^k, j}^k \leq 1 \quad \forall k \in K, \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} w_{ij}^k - \sum_{j \in V \setminus \{i\}} w_{ji}^k = q_i y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V_C} w_{i, r^k}^k = \sum_{j \in V_C} q_j y_j^k \quad \forall k \in K, \quad (8)$$

$$t_i^k + (\hat{d}_{ij} + s_i) x_{ij}^k - W^k (1 - x_{ij}^k) \leq t_j^k \quad \forall (i, j) \in A : j \in V_C, k \in K, \quad (9)$$

$$a_i \leq t_i^k \leq b_i - s_i + v_i \quad \forall i \in V_C, k \in K, \quad (10)$$

$$v_i \leq M \cdot \Theta \quad \forall i \in V_C, \quad (11)$$

$$t_i^k + (s_i + \hat{d}_{ij}) x_{i, r^k}^k \leq b_{r^k} + v_{r^k} + M(1 - \Omega) \quad \forall (i, j) \in A : i \in V_C, k \in K, \quad (12)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, \quad (13)$$

$$y_i^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V_C, k \in K, \quad (14)$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i \in V_C, \quad (15)$$

$$w_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, \quad (16)$$

$$z_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K. \quad (17)$$

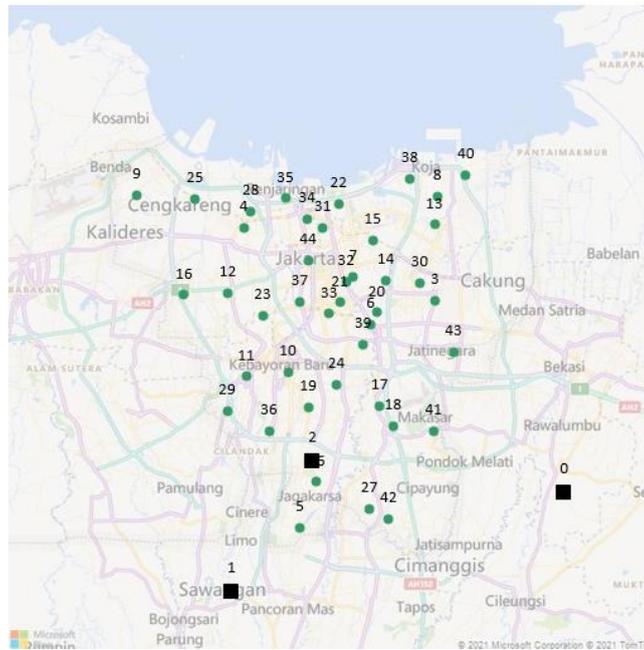
Fungsi tujuan (1) berfungsi untuk meminimalkan jumlah kendaraan, biaya tetap dan biaya variable kendaraan. Batasan (2) memastikan setiap pelanggan dikunjungi paling banyak satu kali, dan kendala (3) memastikan seluruh pelanggan harus dikunjungi. Batasan (4) memastikan kaitan antara depot asal kendaraan k dan pelanggan yang dikunjungi kendaraan, batasan (5) memastikan kendaraan kembali ke depot awal. Batasan (6) memastikan tiap kendaraan dapat digunakan paling banyak satu kali. Batasan selanjutnya menyajikan batasan yang mengatur kebutuhan pelanggan. Batasan aliran pengambilan limbah diberikan oleh kendala (7) dan (8). Batasan (7) adalah bentuk lemah dari kendala konservasi aliran yang membutuhkan aliran masuk jika ada aliran keluar, dan mengakomodasi varian VRP di mana kendaraan tidak harus langsung kembali ke depot awalnya. Kendala (8) menyediakan keterkaitan antara depo asal kendaraan k dan pelanggan yang dikunjungi oleh kendaraan tersebut. Batasan (9) menyediakan kerangka kerja untuk jendela waktu. Batasan (10) memastikan agar kendaraan k tidak bisa datang di pelanggan i sebelum waktu operasional yang ditentukan. Batasan (11) memastikan kendaraan hanya bisa berada di pelanggan i pada batasan waktu layanan yang ditentukan. Batasan (12) mengatur awal waktu kendaraan k dan memastikan kendaraan kembali ke depot sebelum jendela waktu depot berakhir. Terakhir, batasan (13) – (17) adalah batasan non-negatif. Persamaan diselesaikan dengan varian *Adaptive Large Neighborhood Search* dari Pisinger dan Ropke (2007) menggunakan *VRP Spreadsheet Solver* yang dikembangkan oleh Erdogan (2013).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengembangan Model Matematis

Permasalahan yang diangkat dalam artikel ini adalah studi kasus mengenai pengangkutan limbah medis dari beberapa fasilitas layanan kesehatan masyarakat (Puskesmas) di wilayah DKI Jakarta ke beberapa pusat pengolahan limbah, untuk pengolahan lebih lanjut. Saat ini fasilitas pengolahan limbah yang memiliki izin operasional dari pemerintah jumlahnya masih sangat terbatas. Dalam penelitian ini ditentukan tiga lokasi pengolahan limbah yang telah memiliki izin operasional dari pemerintah daerah. Sebaran titik geografis lokasi Puskesmas dan lokasi pusat pengolahan limbah dapat dilihat pada Gambar 1.

Titik yang dijadikan titik awal pengumpulan limbah adalah lokasi Puskesmas pada tingkat kecamatan yang datanya diambil dari Data Dasar Puskesmas 2020 (Pusdatin Kementerian Kesehatan, 2021). Data titik lokasi pusat pengolahan limbah dan Puskesmas di wilayah DKI Jakarta, disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.



Gambar 1. Sebaran lokasi fasilitas pengolahan limbah dan fasilitas kesehatan masyarakat.

Tabel 1. Lokasi Pengolah Limbah di Jabodetabek

Kode Lokasi	Titik Lokasi	Lat	Long
0	Pengolah Limbah 1	-6,3282	106,9927
1	Pengolah Limbah 2	-6,3950	106,7680
2	Pengolah Limbah 3	-6,3068	106,8227

Sumber: KemenLHK (2019)

Tabel 2. Lokasi Puskesmas tingkat Kecamatan di Jakarta

Kode Lokasi	Titik Lokasi	Lat	Long	Kode Lokasi	Titik Lokasi	Lat	Long
3	Puskesmas Cakung	-6,20	106,91	24	Puskesmas Kramat Jati	-6,27	106,87
4	Puskesmas Cempaka Putih	-6,18	106,87	25	Puskesmas Mampang Prapatan	-6,27	106,82
5	Puskesmas Cengkareng	-6,13	106,74	26	Puskesmas Makasar	-6,28	106,88
6	Puskesmas Cilandak	-6,29	106,79	27	Puskesmas Matraman	-6,21	106,87
7	Puskesmas Cilincing	-6,11	106,93	28	Puskesmas Menteng	-6,20	106,84

Kode Lokasi	Titik Lokasi	Lat	Long	Kode Lokasi	Titik Lokasi	Lat	Long
8	Puskesmas Cipayung	-6,29	106,90	29	Puskesmas Pademangan	-6,13	106,84
9	Puskesmas Ciracas	-6,35	106,87	30	Puskesmas Palmerah	-6,21	106,79
10	Puskesmas Duren Sawit	-6,23	106,92	31	Puskesmas Pancoran	-6,25	106,84
11	Puskesmas Grogol Petamburan	-6,15	106,78	32	Puskesmas Pasar Minggu	-6,32	106,83
12	Puskesmas Gambir	-6,17	106,82	33	Puskesmas Pasar Rebo	-6,34	106,86
13	Puskesmas Jagakarsa	-6,35	106,81	34	Puskesmas Penjarangan	-6,14	106,78
14	Puskesmas Jatinegara	-6,21	106,86	35	Puskesmas Pesanggrahan	-6,27	106,77
15	Puskesmas Johar Baru	-6,18	106,85	36	Puskesmas Pulo Gadung	-6,19	106,90
16	Puskesmas Koja	-6,13	106,91	37	Puskesmas Sawah Besar	-6,15	106,83
17	Puskesmas Kalideres	-6,13	106,70	38	Puskesmas Senen	-6,19	106,85
18	Puskesmas Kebayoran Baru	-6,25	106,81	39	Puskesmas Setia Budi	-6,21	106,83
19	Puskesmas Kebayoran Lama	-6,25	106,78	40	Puskesmas Taman Sari	-6,14	106,82
20	Puskesmas Kebon Jeruk	-6,19	106,77	41	Puskesmas Tambora	-6,13	106,80
21	Puskesmas Kelapa Gading	-6,15	106,91	42	Puskesmas Tanah Abang	-6,20	106,81
22	Puskesmas Kemayoran	-6,16	106,86	43	Puskesmas Tjg Priok	-6,12	106,89
23	Puskesmas Kembangan	-6,19	106,74	44	Puskesmas Tebet	-6,23	106,86

Sumber: Data Dasar Puskesmas 2020 Kemenkes (2022)

Penyelesaian permasalahan VRPTW ini diselesaikan menggunakan varian *Adaptive Large Neighborhood Search* (ANS). Algoritma ini banyak digunakan dalam pemecahan permasalahan penentuan rute kendaraan (Pisinger & Ropke, 2007). Algoritma ini melakukan pengulangan pencarian secara acak dengan menghapus pelanggan dari solusi, jika ditemukan lokasi lain yang memberikan nilai lebih optimal, lalu mengintensifkan pencarian melalui penyisipan kembali melalui pelanggan dan pencarian lokal. Proses pencarian dilakukan melalui *greedy insertion* dan *max regret*. Hasil optimalisasi didasarkan pada pemilihan pelanggan, di mana perbedaan antara biaya penyisipan termurah dan keputusan penyisipan termurah kedua yang terbesar. Penyelesaian algoritma ini dilakukan menggunakan *Visual Basic* yang dibuat pada makro pada spreadsheet yang dikembangkan oleh (Erdoğan, 2017). Algoritma dikembangkan dalam bentuk *VRP Spreadsheet Solver* yang memiliki kemampuan untuk mengolah data lokasi (lintang, bujur) dan menghitung jarak tempuh (*driving distance*) yang diperoleh dari aplikasi peta *online*. Penentuan rute ditampilkan dalam bentuk visualisasi titik lokasi.

Berdasarkan data lokasi pusat pengolahan limbah pada Tabel 1 dan data lokasi Puskesmas pada Tabel 2, dapat diperoleh data jarak antar titik dan waktu tempuh antar titik menggunakan aplikasi *Bing maps*. Data jarak yang diperoleh merupakan jarak tempuh terpendek dalam kilo meter. Waktu tempuh kendaraan diperoleh dengan menghitung jarak tempuh berdasarkan jarak dan kecepatan kendaraan. Kecepatan kendaraan, sebesar 35 km/jam, sesuai rata-rata kecepatan kendaraan di Jakarta (BPTJ, 2019).

Tabel 3 menyajikan jam operasional setiap fasilitas, waktu operasional di tiap Puskesmas, diasumsikan sama. Data waktu operasional pada setiap lokasi, membatasi bahwa fasilitas hanya melayani pengambilan/pengangkutan limbah pada jam operasional. Waktu layanan, merupakan perkiraan waktu yang dibutuhkan oleh petugas di suatu titik untuk menyelesaikan pengangkutan limbah (bongkar muat dan administrasi), sebelum meninggalkan suatu fasilitas untuk berangkat ke titik berikutnya. Tabel 4 menyajikan data kendaraan yang dimiliki setiap depot. Setiap depot memiliki dua unit kendaraan yang dialokasikan untuk pengangkutan limbah. Kendaraan yang

digunakan adalah truk kecil dengan kapasitas pengangkutan limbah 9 CBM. Node ID, merupakan nomor titik lokasi fasilitas pada peta. *Duration multiplier* merupakan parameter yang digunakan untuk menyesuaikan kecepatan yang diperoleh dari peta. Waktu tempuh yang diperoleh dari peta, mengasumsikan penggunaan mobil pribadi, sehingga perlu disesuaikan. *Duration multiplier* ditentukan berdasarkan nilai ekuivalensi kendaraan (NEP). Truk kecil memiliki nilai NEP 1,20, artinya waktu tempuh kendaraan 120 persen lebih lama dibandingkan waktu dari peta (mobil pribadi). Parameter lain yang ditetapkan adalah batasan waktu kerja petugas. Waktu kerja petugas, dibatasi total sembilan jam kerja, dimana tujuh jam untuk batas mengendarai kendaraan, dan satu jam kerja untuk penyelesaian administrasi di depot dan satu jam untuk beristirahat.

Data berikutnya yang dibutuhkan adalah data kendaraan pengangkut limbah. Perhitungan biaya setiap kendaraan didasarkan pada perhitungan biaya operasional kendaraan (BOK) yang dilakukan untuk mobil box, dengan biaya tetap sebesar Rp 215.000,- per hari dan biaya variabel sebesar Rp 11.250,-/km. Biaya tetap dihitung berdasarkan biaya penyusutan, perijinan, pajak dan asuransi, suku cadang, dan perawatan. Sedangkan biaya variabel dihitung berdasarkan biaya bahan bakar, penyusutan ban, upah awak kendaraan, dan biaya operasional lainnya. Total biaya yang akan diminimasi adalah biaya total kendaraan (biaya tetap ditambah biaya variabel).

Tabel 3. Waktu operasional Pusat Pengolah Limbah dan Puskesmas

No	Titik Lokasi	Mulai	Selesai	Waktu Layanan
0	Pengolah Limbah 1	06.00	17.00	50 menit
1	Pengolah Limbah 2	07.30	18.00	50 menit
2	Pengolah Limbah 3	08.00	21.00	50 menit
3-44	Puskesmas (semua)	07.30	16.30	20 menit

Tabel 4. Data Operasional Kendaraan pengangkut limbah

Depo	Node ID	Vehicle ID	Duration multiplier	Driving time limit (hour)	Working time limit (hour)	Fixed cost per trip (Rp)	Var. Cost per km (Rp)
Pengolah Limbah 1	0	V1	1,20	7,00	8,00	215.000	11.250
Pengolah Limbah 1	0	V2	1,20	7,00	8,00	215.000	11.250
Pengolah Limbah 2	1	V3	1,20	7,00	8,00	215.000	11.250
Pengolah Limbah 2	1	V4	1,20	7,00	8,00	215.000	11.250
Pengolah Limbah 3	2	V5	1,20	7,00	8,00	215.000	11.250
Pengolah Limbah 3	2	V6	1,20	7,00	8,00	215.000	11.250

Hasil Pemodelan Matematis

Penyelesaian permasalahan pengangkutan limbah medis diselesaikan berdasarkan kasus VRPTW multi depot. Depot (pusat pengolahan limbah) yang dipilih merupakan pusat pengolahan limbah yang telah memiliki ijin pengolahan limbah medis dari pemerintah. Ketiga depot yang dijadikan studi kasus pada artikel ini, berlokasi di wilayah Bekasi, Sawangan, dan Ragunan. Umumnya pusat pengolah limbah berada di pinggir wilayah DKI Jakarta, sehingga proses pengangkutan limbah harus menempuh jarak yang lebih panjang. Berdasarkan hasil penentuan rute, wilayah pengangkutan terbagi menjadi tiga wilayah, yaitu wilayah timur, tengah dan barat. Pembagian wilayah pengangkutan ini didasarkan pada hasil optimasi jarak terpendek dari tiap titik Puskesmas dan Pusat pengolahan limbah.

Berdasarkan hasil perhitungan, diketahui bahwa jumlah kendaraan yang dialokasikan untuk pengangkutan sebanyak enam armada. Masing-masing kendaraan dapat melayani empat sampai delapan Puskesmas. Penentuan rute ini, telah memenuhi batasan-batasan yang ditetapkan yaitu, waktu operasional, kapasitas kendaraan dan batasan operasional lainnya. Jarak (km) yang tertera pada tabel menunjukkan akumulasi jarak yang ditempuh kendaraan dari titik awal (depot) menuju ke titik pemberhentian selanjutnya, sampai kendaraan kembali ke depot. Tabel 5 menunjukkan hasil optimasi rute untuk kendaraan yang berasal dari Depot 0 (Bekasi) yang melayani pengangkutan limbah dari 16 puskesmas. Tabel 6 menunjukkan hasil optimasi rute kendaraan yang berasal dari Depot 1 (Sawangan) yang melayani pengangkutan limbah dari 13 puskesmas.

Tabel 7, menunjukkan hasil optimasi rute kendaraan yang berasal dari Depot 2 (Ragunan) yang melayani pengangkutan limbah dari 15 puskesmas.

Tabel 5. Rute Kendaraan V1 dan V2 dari Depot 0

Vehicle: V1			
<i>Stop count</i>	Nama Lokasi	ID Lokasi	Akumulasi Jarak (km)
0	Depot A	0	0,00
1	Kec. Cipayung	8	14,19
2	Kec. Makasar	25	18,50
3	Kec. Kramat Jati	24	21,40
4	Kec. Jatinegara	14	28,15
5	Kec. Matraman	27	30,20
6	Kec. Cempaka Putih	4	33,75
7	Kec. Cakung	3	38,80
8	Kec. Duren Sawit	10	45,06
9	Depot A	0	67,15

Vehicle: V2			
<i>Stop count</i>	Nama Lokasi	ID Lokasi	Akumulasi Jarak (km)
0	Depot A	0	0,00
1	Kec. Cilincing	7	29,68
2	Kec. K O J A	16	33,71
3	Kec. Tanjung Priok	43	38,11
4	Kec. Pademangan	29	44,94
5	Kec. Tambora	41	49,69
6	Kec. Kemayoran	22	60,23
7	Kec. Kelapa Gading	21	67,36
8	Kec. Pulo Gadung	36	73,12
9	Depot A	0	99,63

Tabel 6. Rute Kendaraan V3 dan V4 dari Depot 1

Vehicle: V3			
<i>Stop count</i>	Nama Lokasi	ID Lokasi	Akumulasi Jarak (km)
0	Depot B	1	0,00
1	Kec. Pasar Minggu	32	14,38
2	Kec. Ciracas	9	26,64
3	Kec. Pasar Rebo	33	28,71
4	Kec. Jagakarsa	13	39,71
5	Depot B	1	50,80

Vehicle: V4			
<i>Stop count</i>	Nama Lokasi	ID Lokasi	Akumulasi Jarak (km)
0	Depot B	1	0,00
1	Kec. Cilandak	6	16,45
2	Kec. Pesanggrahan	35	20,74
3	Kec. Kebayoran Lama	19	24,86
4	Kec. Kembangan	23	35,30
5	Kec. Kebon Jeruk	20	40,12
6	Kec. Palmerah	30	45,87
7	Kec. Kebayoran Baru	18	54,82
8	Depot B	1	74,76

Tabel 7. Rute Kendaraan V5 dan V6 dari Depot 2

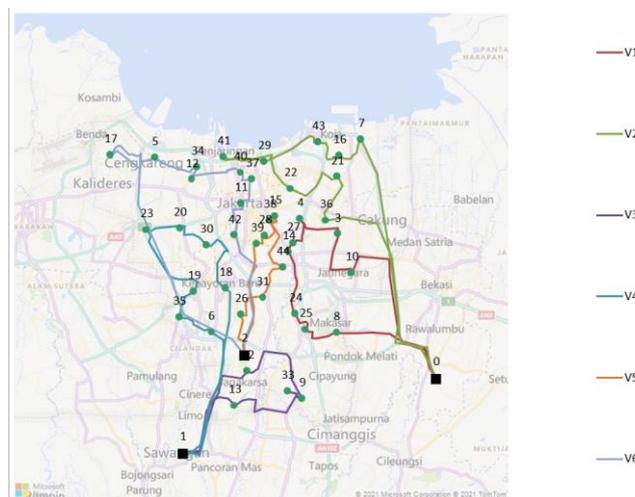
Vehicle:		V6	
Stop count	Nama Lokasi	ID Lokasi	Akumulasi Jarak (km)
0	Depot C	2	0,00
1	Kec. Tanah Abang	42	14,02
2	Kec. Gambir	11	18,79
3	Kec. Sawah Besar	37	22,96
4	Kec. Taman Sari	40	25,18
5	Kec. Grogol Petamburan	12	31,12
6	Kec. Penjaringan	34	33,73
7	Kec. Cengkareng	5	38,51
8	Kec. Kalideres	17	45,33
9	Depot C	2	77,87

Vehicle:		V5	
Stop count	Nama Lokasi	ID Lokasi	Akumulasi Jarak (km)
0	Depot C	2	0,00
1	Kec. Setia Budi	39	13,33
2	Kec. Menteng	28	15,56
3	Kec. Senen	38	18,85
4	Kec. Johar Baru	15	20,40
5	Kec. Tebet	44	27,97
6	Kec. Pancoran	31	32,68
7	Kec. Mampang Prapatan	26	37,12
8	Depot C	2	42,10

Tabel 8 menunjukkan perhitungan biaya untuk hasil penentuan rute pengangkutan limbah. Minimasi total jarak yang diperoleh sebesar 412,31 km, dengan total biaya sebesar Rp 5.928.498,75. Hasil penentuan rute optimal ini, dapat menurunkan jarak tempuh total sebesar 97,86 km, dengan penghematan biaya angkut mencapai 15 persen dari rute pengangkutan saat ini.

Tabel 8. Rekapitulasi biaya pengangkutan limbah

Depo ID	Vehicle ID	Total Distance	Fixed Cost	Variable Cost	Total Cost
0	1	67,15	215.000,00	755.403,75	970.403,75
0	2	99,63	215.000,00	1.120.871,25	1.335.871,25
1	3	50,8	215.000,00	571.488,75	786.488,75
1	4	74,76	215.000,00	841.072,50	1.056.072,50
2	5	77,87	215.000,00	876.037,50	1091.037,50
2	6	42,1	215.000,00	473.625,00	688.625,00
Jumlah		412,31	1.290.000,00	4.638.498,75	5.928.498,75



Gambar 2. Penentuan rute pengangkutan limbah optimal dari puskesmas ke pusat pengolahan limbah

Gambar 2 memberikan visualisasi rute kendaraan pada peta. Pergerakan kendaraan berawal dari pusat pengolahan limbah menuju beberapa puskesmas, untuk mengangkut limbah medis, kemudian kendaraan kembali ke depot awal. Rute untuk tiap kendaraan diberi warna berbeda. Kendaraan dari Depot 0 melakukan pengangkutan dengan kendaraan V1 dan V2, Kendaraan dari Depot 1 melakukan pengangkutan menggunakan kendaraan V3 dan V4, Depot 2 melakukan pengangkutan menggunakan kendaraan V5 dan V6. Visualisasi ini akan membantu pelaku transportasi dalam penentuan rute kendaraan yang dapat meminimasi biaya transportasi.

KESIMPULAN

Model VRPTW multi depot untuk penentuan rute pengangkutan limbah medis memberikan suatu alternatif pemecahan masalah untuk kasus pengangkutan kembali (*reverse*). Studi kasus yang digunakan dalam penelitian adalah pengangkutan limbah dari sejumlah puskesmas ke pusat pengolahan limbah. Dalam kasus ini, limbah medis diangkut menuju tiga pusat pengolahan limbah yang berada di daerah Bekasi, Sawangan dan Ragunan. Pengangkutan dilakukan dari 42 Puskesmas di wilayah DKI Jakarta. Penentuan pengelompokan area pengangkutan ditentukan berdasarkan kedekatan antar titik dengan pusat pengolahan limbah. Perhitungan mengelompokan titik-titik terdekat yang dapat memberikan jarak terpendek, setelah itu setiap kelompok akan diurutkan penjadwalan kedatangannya, sehingga diperoleh urutan kedatangan kendaraan yang memenuhi waktu operasional pelayanan dan memberikan biaya terendah.

Solusi yang diperoleh dari penelitian ini, telah menurunkan jarak tempuh total sebesar 97,86 km, dengan total penghematan biaya sebesar 15 persen. Solusi yang diberikan telah memenuhi seluruh batasan kapasitas kendaraan, jam pelayanan pelanggan. Pemodelan rute yang dilakukan belum sepenuhnya dapat menggambarkan kondisi sesungguhnya akibat keterbatasan model yang dikembangkan bersifat deterministik, dan beberapa parameter dalam pemodelan sistem masih menggunakan asumsi, yang belum sepenuhnya sesuai dengan kondisi sesungguhnya.

Berdasarkan berbagai keterbatasan dalam penelitian ini, beberapa pengembangan yang dapat dilakukan adalah menggunakan produksi limbah *real-time* dari masing-masing puskesmas, minimasi personal yang terlibat dalam pengangkutan limbah, mempertimbangkan biaya-biaya lain seperti biaya muat, biaya handling serta mempertimbangkan resiko kesehatan petugas yang terpapar secara langsung dengan limbah medis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulrahman, M. D., Gunasekaran, A., & Subramanian, N. (2014). Critical barriers in implementing reverse logistics in the Chinese manufacturing sectors. *International Journal of Production Economics*, 147(PART B). doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.08.003>.
- Babae, T. E., & Aydin, N. S. (2021). A sustainable medical waste collection and transportation model for pandemics. *Waste Management & Research*, 0734242X211000437.
- Erdoğan, G. (2017). An open source Spreadsheet Solver for Vehicle Routing Problems. *Computers and Operations Research*, 84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.02.022>.
- Espitia, C., Andres, C., Rodriguez, G., & Jorge, L. (2020). *CVRPTW in medical waste management*. Colomboia: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Fatma, E. (2018). Reverse logistic location problem for electrical and electronics equipment waste treatment facility. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 3, 24–29.
- He, Z. G., & Liu, S. (2015). The Research on Recovery Network Optimization of Medical Waste. *Applied Mechanics and Materials*, 768. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.768.671>.
- Kallehauge, B. (2008). Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Computers and Operations Research*, 35(7). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.11.006>.

- Kargar, S., Paydar, M. M., & Safaei, A. S. (2020). A reverse supply chain for medical waste: A case study in Babol healthcare sector. *Waste Management*, 113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.052>.
- Kargar, S., Pourmehdi, M., & Paydar, M. M. (2020). Reverse logistics network design for medical waste management in the epidemic outbreak of the novel coronavirus (COVID-19). *Science of the Total Environment*, 746. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141183>.
- Kim, B. I., Kim, S., & Sahoo, S. (2006). Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers and Operations Research*, 33(12). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.02.045>.
- Mancera-Galván, E. A., Garro, B. A., & Rodríguez-Vázquez, K. (2017). Optimization of Solid Waste Collection: Two ACO Approaches. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, 43-44. doi: <https://doi.org/10.1145/3067695.3082043>.
- Nurali, A. I. (2020). Pedoman Pengelolaan Limbah Rumah Sakit Rujukan. *Rumah Sakit Darurat Dan Puskesmas Yang Menangani Pasien Covid-19, Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.[Terhubung Berkala]*.
- Ouertani, N., Ben-Romdhane, H., Nouaouri, I., Allaoui, H., & Krichen, S. (2020). On solving the hazardous health-care waste transportation problem: A real case study. *Proceedings of 2020 International Multi-Conference on: Organization of Knowledge and Advanced Technologies, OCTA 2020*. doi: <https://doi.org/10.1109/OCTA49274.2020.9151781>.
- Pisinger, D., & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers and Operations Research*, 34(8). doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.09.012>.
- Runka, A., Ombuki-Berman, B., & Ventresca, M. (2009). A search space analysis for the waste collection vehicle routing problem with time windows. *Proceedings of the 11th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-2009*. doi: <https://doi.org/10.1145/1569901.1570175>.
- Shi, L., Fan, H., Gao, P., & Zhang, H. (2009). Network model and optimization of medical waste reverse logistics by improved genetic algorithm. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5821 LNCS. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-04843-2_6.
- Wardani, R. A., & Azizah, R. (2020). Management of Solid Medical Waste on One of the Covid19 Referral Hospitals in Surabaya, East Java. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 12(1si), 38–44.
- Wichapa, N., & Khokhajaikiat, P. (2018). Solving a multi-objective location routing problem for infectious waste disposal using hybrid goal programming and hybrid genetic algorithm. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(1). doi: <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.4.003>.