

Aplikasi Model Optimasi untuk Meningkatkan Efisiensi Pengangkutan Sampah di Kota Cilegon

An Application of Optimization Model to Improve the Efficiency of Waste Collection Service in Cilegon City

Danang Triwibowo^{a,*}, Alin Halimatussadiah^b

^aMagister Perencanaan dan Kebijakan Publik, Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Indonesia

^bDepartemen Ilmu Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Indonesia

[diterima: 18 Maret 2016 — disetujui: 18 Juli 2016 — terbit daring: 31 Oktober 2016]

Abstract

Most cities in developing countries face inefficiency problem of waste collection service run by government. The purpose of this study is to estimate the efficiency of waste collection service and the capital cost requirement in 2019 to cover 100% waste collection service in Cilegon City. The efficiency is calculated by comparing the current costs with the optimization costs by the model of vehicle routing problem. The result shows that the obtained inefficiency reaches 37,48% which largely comes from the labor component. To cover all of resident in Cilegon City, the city needs to increase their budget allocation as much as IDR 33,884 billion in 2019.

Keywords: Inefficiency; Optimization; Waste Collection; Vehicle Routing Problem

Abstrak

Sebagian besar kota di negara berkembang menghadapi permasalahan inefisiensi pengangkutan sampah yang dikelola pemerintah. Tujuan penelitian ini adalah mengestimasi inefisiensi pengangkutan sampah di Kota Cilegon. Inefisiensi dihitung dengan membandingkan biaya saat ini dengan biaya hasil optimasi rute dengan model *vehicle routing problem*. Penelitian ini juga mengestimasi kebutuhan biaya modal jika rasio pengangkutan sampah mencapai 100% pada tahun 2019. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inefisiensi sebesar 37,48%, yaitu porsi komponen tenaga kerja sebesar 94,48 dari total inefisiensi. Terkait kebutuhan modal, diperlukan kenaikan anggaran Rp33,884 miliar untuk meningkatkan rasio pengangkutan sampah menjadi 100% pada tahun 2019.

Kata kunci: Inefisiensi; Optimasi; Pengangkutan Sampah; *Vehicle Routing Problem*

Kode Klasifikasi JEL: C61; H41; Q53

Pendahuluan

Sampah merupakan salah satu permasalahan utama di perkotaan. Hal ini mendorong dilakukannya banyak penelitian tentang pengelolaan sampah di perkotaan, baik yang terkait dengan teknis pengelolaan sampah maupun dari sisi efisiensi pembiayaannya. Cointreau-Levine (1994) menyatakan bahwa manajemen pengelolaan sampah, secara prinsip, merupakan tanggung jawab pemerintah daerah.

Namun, Chakrabarti *et al.* (2009) di dalam penelitiannya mengemukakan adanya kecenderungan terjadinya inefisiensi di dalam pengangkutan sampah yang dilakukan oleh sektor publik (pemerintah daerah) di India. Inefisiensi ini umumnya bersumber dari inefisiensi penggunaan tenaga kerja di dalam proses pengumpulan dan pengangkutan sampah di negara berkembang (Cointreau-Levine, 1994).

Sementara itu di Indonesia, sejak diberlakukannya otonomi daerah, persampahan (pengelolaan sampah) merupakan salah satu dari urusan pemerintahan konkuren¹, yaitu urusan pemerintah-

* Alamat Korespondensi: Badan Lingkungan Hidup Kota Cilegon. Jln. Jendral Sudirman No. 2 Cilegon, Banten. Telp. (+62254) 389320. E-mail: danangtree78@yahoo.com.

¹Istilah diambil dari UU No. 23 Tahun 2014 tentang Pemerin-

an yang dibagi antara pemerintah pusat, provinsi, dan kabupaten/kota. Menurut Undang-Undang (UU) Nomor 23 Tahun 2014 tentang Pemerintahan Daerah, kewenangan kabupaten/kota dalam sub-urusan persampahan adalah pengembangan sistem dan pengelolaan persampahan dalam daerah kabupaten/kota, yang meliputi pendaurulangan, pengangkutan, dan pemrosesan akhir sampah. Selain itu, pemerintah kabupaten/kota memiliki kewenangan untuk melakukan pembinaan dan pengawasan pengelolaan sampah yang diselenggarakan oleh pihak swasta. Secara lebih khusus, di dalam UU Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah Pasal 6 butir (d) menyatakan bahwa tugas pemerintah dan pemerintahan daerah (kabupaten/kota) adalah melaksanakan pengelolaan sampah dan memfasilitasi penyediaan prasarana dan sarana pengelolaan sampah. Salah satu kewenangan pemerintah kabupaten/kota dalam melaksanakan tugas tersebut adalah menyelenggarakan pengelolaan sampah skala kabupaten/kota sesuai dengan norma, standar, prosedur, dan kriteria yang ditetapkan oleh pemerintah pusat.

Kecenderungan terjadinya inefisiensi dalam pengangkutan sampah oleh pemerintah daerah, khususnya di negara berkembang (Cointreau-Levine, 1994; Chakrabarti *et al.*, 2009), menjadi topik menarik untuk diteliti dalam konteks di Indonesia. Kota Cilegon dipilih menjadi lokasi penelitian karena mewakili tipe kota industri yang memiliki kemiripan dengan lokasi penelitian yang dilakukan oleh Chakrabarti *et al.* (2009) di wilayah Baranagar Municipal (BM) di Kolkata, India. Chakrabarti *et al.* (2009) melakukan penelitian di wilayah BM, yaitu kota dengan pertumbuhan penduduk yang tinggi (2,5% per tahun) dan memiliki peningkatan sampah yang cukup besar karena merupakan kota yang meliputi wilayah pemukiman dan komersial dengan aktivitas industri dan perdagangan. Hal tersebut menyebabkan terjadinya urbanisasi dan ekspansi wilayah pemukiman.

Hal yang mirip terjadi pula di Kota Cilegon, yang merupakan salah satu kota di Provinsi Banten. Sebagaimana kota-kota yang lain, Kota Cilegon memiliki permasalahan di dalam pengelolaan sampah. Dengan tingkat pertumbuhan penduduk rata-rata tergolong sedang sebesar 1,59% tahun 2011–2014, Kota Cilegon memiliki nilai pertumbuhan ekonomi rata-rata mencapai 6,61% (Badan Pusat Statistik/BPS

Kota Cilegon, 2015). Hal tersebut berdampak pada peningkatan jumlah timbulan sampah di Kota Cilegon. Berdasarkan data yang ada di Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Cilegon, jumlah timbulan sampah di Kota Cilegon mengalami peningkatan rata-rata sebesar 8,72% setiap tahunnya. Dengan karakter daerah yang terdiri dari wilayah pemukiman, komersil, dan kawasan industri, Kota Cilegon memiliki visi "Masyarakat Cilegon Sejahtera Melalui Daya Dukung Industri, Perdagangan dan Jasa"².

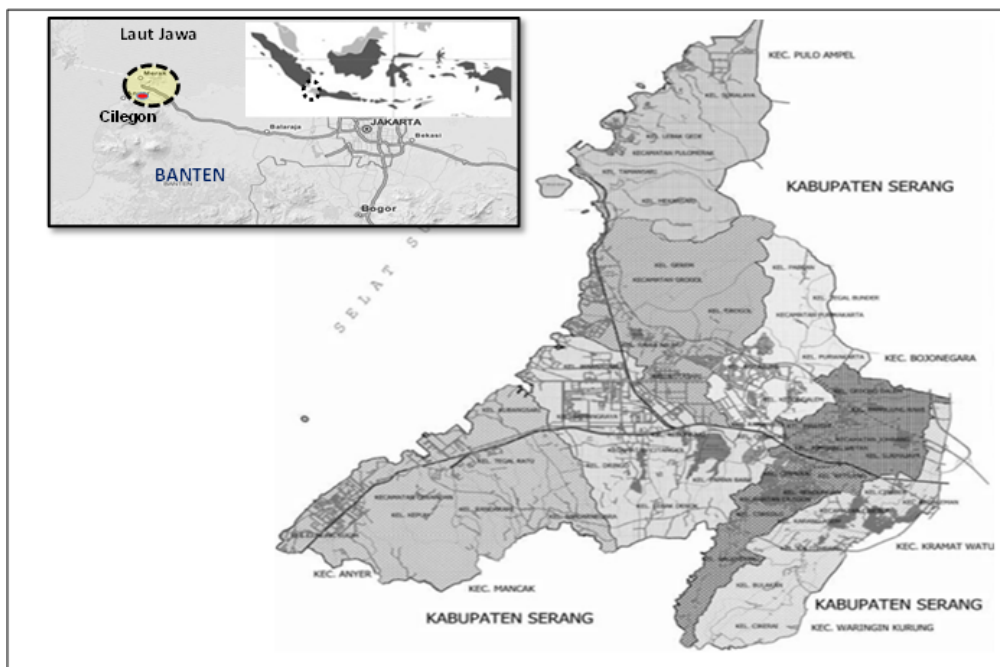
Kota Cilegon terdiri dari 8 kecamatan dengan luas daerah 175,51 km². Kecamatan Ciwandan adalah kecamatan yang memiliki luas paling besar, yaitu 51,81 km², sedangkan Kecamatan Cilegon luasnya paling kecil, yaitu 9,15 km². Berdasarkan data BPS Kota Cilegon, jumlah penduduk Kota Cilegon pada tahun 2014 adalah 405.303 jiwa, dengan *sex ratio* sebesar 104,39%. Kecamatan dengan penduduk terbanyak adalah Kecamatan Citangkil dengan 71.483 jiwa, sedangkan Kecamatan Purwakarta memiliki penduduk paling sedikit yaitu 39.682 jiwa. Kecamatan terpadat adalah Kecamatan Jombang, sedangkan kecamatan dengan kepadatan penduduk terendah adalah Kecamatan Ciwandan.

Jumlah timbulan sampah yang semakin meningkat karena peningkatan jumlah penduduk serta aktivitas perekonomian dan pembangunan menyebabkan beban Pemerintah Kota Cilegon dalam pengelolaan sampah juga semakin besar. UU Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah Pasal 6 butir (d) menyatakan bahwa tugas pemerintah adalah melaksanakan pengelolaan sampah. Di Kota Cilegon, pengelolaan sampah tersebut merupakan tugas dan kewenangan dari DKP Kota Cilegon.

Belum adanya pemisahan sampah organik dan anorganik pada sumber sampah juga menyebabkan jumlah sampah yang harus diangkut DKP Kota Cilegon ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) menjadi relatif masih besar, yang tentunya berdampak pada biaya yang dibutuhkan. Rasio anggaran yang dialokasikan untuk DKP relatif sangat kecil, yaitu 1,44% dari Anggaran Pendapatan dan Belanja Daerah (APBD) 2013 dan 1,73% dari APBD 2014. Rasio ini semakin kecil jika dilihat dari anggaran yang dialokasikan untuk bidang kebersihan yang bertanggung jawab dalam teknis pengelolaan sampah, yaitu sekitar 0,47%. Selain itu, realisasi penerimaan retribusi kebersihan pada tahun 2014 hanya Rp576

tahan Daerah.

²www.cilegon.go.id



Gambar 1: Peta Administrasi Kota Cilegon
 Sumber: BPS Kota Cilegon (2014)

juta, yang sangat kecil dibanding pengeluaran (belanja) pengelolaan sampah keseluruhan sebesar Rp5,43 miliar atau hanya sebesar 3,45%. Pada tahun 2014, rasio pengangkutan sampah oleh DKP Kota Cilegon baru mencapai 51,98%. Rasio pengangkutan sampah merupakan jumlah sampah yang terangkut ke TPA dibanding dengan jumlah sampah yang timbul pada tahun yang bersangkutan.

Proses pengangkutan sampah biayanya relatif lebih besar dibanding tahapan proses pengelolaan sampah lainnya. Biaya pengangkutan sampah bisa mencapai 60% dari total biaya pengelolaan sampah (Damanhuri dan Padmi, 2003) atau berkisar antara 50–70% dari total biaya pengelolaan sampah (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Jika terjadi inefisiensi dalam biaya pengangkutan sampah yang berjalan saat ini, maka akan berdampak besar pada inefisiensi pada keseluruhan proses pengelolaan sampah. Sehingga diperlukan upaya untuk mengurangi atau menghilangkan inefisiensi tersebut. Inefisiensi yang terjadi dalam pengangkutan sampah bisa muncul karena rute pengangkutan sampah yang tidak optimal. Hal ini menyebabkan tidak efisiennya pemakaian bahan bakar, kerja petugas lapangan karena *off route time* yang tinggi pada jam kerja, dan tingginya biaya operasional kendaraan pengangkut sampah.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengestimasi inefisiensi yang terjadi dalam proses pengangkutan sampah dengan kondisi saat ini di Kota Cilegon. Selain itu, penelitian ini juga bermaksud mengestimasi kebutuhan biaya modal dan biaya rutin pengangkutan sampah jika rasio pengangkutan sampah ditingkatkan sampai dengan 100% pada tahun 2019. Hal ini sesuai dengan amanat Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2015–2019, yaitu tercapainya 100% pelayanan sanitasi, yang meliputi air limbah domestik, sampah, dan drainase lingkungan.

Biaya minimum dari skenario optimasi diperoleh dengan melakukan optimasi rute pengangkutan sampah. Dari hasil optimasi rute didapatkan biaya optimal yang dilakukan dengan membandingkan biaya minimum dari skenario optimasi dengan biaya yang terjadi saat ini. Biaya pengangkutan sampah di Kota Cilegon meliputi biaya bahan bakar, biaya tenaga kerja, dan biaya operasional kendaraan (servis dan penggantian suku cadang). Biaya optimal ini merupakan biaya minimum pengangkutan sampah dengan model pengangkutan sampah saat ini (*bussines as usual*).

Fokus dari penelitian ini adalah pada tahap pengangkutan sampah dari Tempat Pembuangan Se-

mentara (TPS) ke TPA Bagendung, yang menjadi tanggung jawab dari DKP Kota Cilegon. Optimasi yang dilakukan adalah optimasi rute kendaraan sejenis *dump truck* yang mengangkut sampah dengan sistem kontainer tetap, dengan memperhatikan jumlah TPS beserta timbulan sampah masing-masing TPS dan jumlah alat transportasi beserta kapasitasnya, yang pada akhirnya menghasilkan biaya pengangkutan sampah yang minimal. Spesifikasi kendaraan pengangkut sampah dalam pengoptimalan rute ini diasumsikan sama.

Sedangkan inefisiensi yang ingin diestimasi melalui penelitian ini adalah inefisiensi biaya yang diketahui dari hasil optimasi rute pengangkutan, yaitu meliputi biaya bahan bakar, biaya operasional kendaraan (servis dan penggantian suku cadang), serta biaya tenaga kerja. Inefisiensi dihitung dari selisih perhitungan biaya pengangkutan sampah kondisi optimal dengan kondisi saat ini. Efisiensi penggunaan kendaraan dan tenaga kerja dilakukan dengan mengoptimalkan jumlah ritasi atau perjalanan (trip) dari kendaraan yang dioperasikan dengan tidak melebihi jam kerja.

Tinjauan Literatur

Sampah adalah segala sesuatu yang tidak dikehendaki oleh yang punya dan bersifat padat (Slamet, 1994). Atau bahan sisa berupa bahan-bahan yang sudah tidak digunakan lagi maupun bahan yang sudah diambil bagian utamanya (dari segi ekonomis), serta merupakan bahan buangan yang tidak berguna dan banyak menimbulkan masalah pencemaran kelestarian lingkungan (Hadiwiyoto, 1983). Sumber sampah berasal dari daerah permukiman, perdagangan, perkantoran atau pemerintahan, industri, lapangan terbuka/taman, pertanian, dan perkebunan (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Dan diklasifikasikan atas sampah domestik, sampah komersial, sampah industri, dan limbah (Murtadho dan Sa'id, 1997).

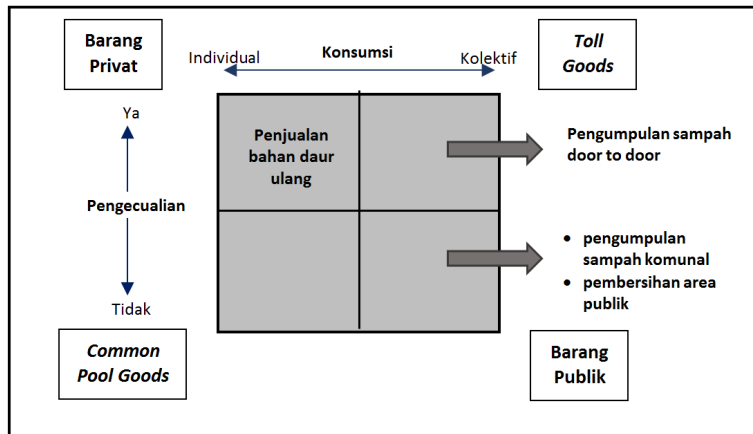
Manajemen pengelolaan sampah merupakan tanggung jawab pemerintah daerah (Cointreau-Levine, 1994), yang secara umum jenis pelayanannya bersifat *nonexclusive-nonrivalry*. Hal tersebut merupakan kriteria dari barang publik. Namun, setiap tahapan pengelolaan sampah memiliki karakteristik yang berbeda (Gambar 2). Pengumpulan sampah komunal, penyapuan jalan, dan pelayanan kebersihan pada fasilitas publik termasuk barang publik, sedangkan pengumpulan dan pengangkutan sampah langsung dari sumber, baik rumah tang-

ga atau perusahaan, sampai ke tempat pemrosesan akhir, masuk kriteria *toll good* yang bersifat *exclusive-nonrivalry*. Oleh karenanya, pengelolaan sampah bukan hanya tanggung jawab pemerintah. Sangat dimungkinkan pihak swasta bisa berperan dalam pengelolaan sampah, khususnya di perkotaan.

Pengangkutan sampah merupakan bagian pengelolaan sampah dengan biaya terbesar dari serangkaian tahapan pengelolaan sampah. Biaya pengangkutan sampah bisa mencapai 60% dari total biaya pengelolaan sampah (Damanhuri dan Padmi, 2003) atau berkisar antara 50–70% dari total biaya pengelolaan sampah (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Oleh karenanya, efisiensi pengelolaan sampah sangat dipengaruhi efisiensi pengangkutan sampah.

Biaya pengangkutan sampah dengan layanan pengelolaan oleh pemerintah atau swasta, khususnya untuk kota-kota kecil, tidak memiliki perbedaan yang signifikan, sebagaimana hasil penelitian Bel dan Mur (2009) di wilayah Aragon, Spanyol. Kerja sama yang dilakukan antara beberapa kota dalam pengelolaan sampah akan menurunkan biaya yang harus disediakan oleh masing-masing kota tersebut. Cointreau-Levine (1994) memberikan contoh pengalaman di Bangkok, yaitu pemerintah melakukan kontrak dengan swasta mengangkut sampah di tiga distrik (kabupaten). Biaya per ton dalam kontrak dengan swasta tersebut ternyata lebih rendah daripada biaya jika layanan pengangkutannya langsung oleh pemerintah, dengan tingkat kualitas layanan yang sama. Selain itu, penerapan sistem mekanisme pasar yang kompetitif di Amerika Serikat juga menunjukkan bahwa pola pengangkutan sampah oleh swasta mampu menekan biaya sebesar 20-40%, karena perusahaan swasta mampu mencapai *economy of scale* dalam investasi (*National Solid Waste Management Association* (NSWMA), 2011).

Chakrabarti *et al.* (2009) menyebutkan dalam studi kasusnya di India, bahwa munculnya inefisiensi di dalam pengangkutan sampah yang dilakukan oleh sektor publik (pemerintah daerah) disebabkan karena beban pengeluaran dan adanya pengaruh politik yang menyebabkan tren penurunan penyediaan layanan publik dalam pengelolaan sampah. Hal tersebut bisa diatasi dengan menyelaraskan tanggung jawab antara sektor publik, sektor swasta, dan masyarakat. Penyebabnya adalah layanan pengelolaan sampah merupakan layanan dasar, maka keuntungan tidak boleh menjadi motif utama dalam layanan pengelolaan sampah. Pemerintah harus tetap berperan aktif agar layanan tersebut tetap berdimensi publik. Namun, keberlanjutan



Gambar 2: Barang Publik dan Barang Privat dalam Sistem Pengelolaan Sampah Menurut Cointreau-Levine (1994)
 Sumber: Cointreau-Levine (1994)

sistem terpadu pengelolaan sampah tidak bisa dipastikan tanpa memberikan insentif kepada sektor swasta yang menyediakan jasa pengelolaan sampah (Chakrabarti *et al.*, 2009).

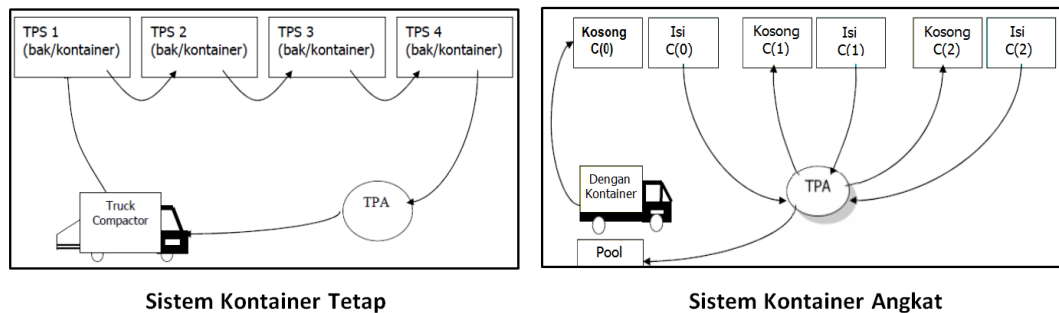
Tahap pengangkutan sampah yang menjadi tanggung jawab dari DKP Kota Cilegon adalah pengangkutan sampah dari TPS-TPS yang tersebar di berbagai lokasi di Kota Cilegon menuju ke TPA Bagendung. Pengangkutan sampah terbagi menjadi dua sistem, yaitu sistem kontainer tetap dan sistem kontainer angkat (Tchobanoglous *et al.*, 1993) sebagaimana pada Gambar 3. DKP Kota Cilegon menggunakan *dump truck* untuk pengangkutan sistem kontainer tetap dan *arm roll* untuk sistem kontainer angkat.

Di dalam optimasi pengangkutan dan pemindahan sampah menuju ke TPA, ada dua jenis model optimasi yang dapat dikembangkan, yaitu model untuk meminimalisasi waktu dan biaya. Kedua model tersebut memiliki tujuan yang sama, yaitu memperoleh rute optimum dalam mengangkut sampah menuju TPA. Model optimasi yang berdasarkan waktu lebih mudah dikembangkan dibandingkan dengan model optimasi biaya. Karena hanya dengan informasi berupa jarak antar-titik dan waktu tempuh, model tersebut dapat diselesaikan. Model optimasi waktu dapat digunakan pada sistem pengangkutan sampah yang tidak menggunakan transfer depo (Komilis, 2008).

Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mencari solusi optimal dari permasalahan yang sedang dibahas, yaitu optimasi rute pengangkutan sampah di Kota Cilegon. Data-data yang dibutuhkan meliputi jumlah TPS (berikut lokasi dan kapasitasnya), jumlah truk beserta kapasitasnya, waktu dan jarak tempuh truk, serta biaya yang dibutuhkan dalam pengangkutan sampah di Kota Cilegon. Optimasi pengangkutan sampah dalam penelitian ini dilakukan secara terpisah antara pengangkutan sampah sistem kontainer angkat dengan sistem kontainer tetap. Pada pengangkutan sampah sistem kontainer angkat menggunakan *arm roll*, optimasi dilakukan secara manual dengan memaksimalkan jumlah trip (ritasi) namun tidak melebihi jam kerja, sehingga didapatkan jumlah *arm roll* dan tenaga kerja yang efisien. Sementara itu, pada sistem kontainer tetap menggunakan *dump truck*, bahwa sebelum mengoptimalkan penggunaan *dump truck* dan tenaga kerja, terlebih dahulu dilakukan optimasi rute pengangkutannya.

Optimasi rute pada pengangkutan sampah sistem kontainer tetap menggunakan model *vehicle routing problem* (VRP) dan pengolahan datanya menggunakan perangkat lunak *Lingo 9.0*. Setelah didapatkan rute optimal, dapat dihitung kebutuhan biaya untuk bahan bakar, operasional kendaraan, dan tenaga kerja. Dari kedua sistem pengangkutan tersebut, dihitung total biaya pengangkutan rutin dari pengangkutan sampah kondisi optimal, yang meliputi biaya bahan bakar solar, biaya operasional



Gambar 3: Ilustrasi Sistem Pengangkutan Sampah
 Sumber: Balai Teknik Air Minum dan Sanitasi Wilayah 2, Wiyung, Surabaya (2010)

kendaraan (servis dan penggantian suku cadang), dan biaya tenaga kerja.

Sedangkan estimasi kebutuhan biaya modal dan biaya rutin pengangkutan sampah, jika rasio pengangkutan sampah ditingkatkan sampai dengan 100% pada tahun 2019, dilakukan dengan mempertimbangkan estimasi jumlah timbulan sampah, kebutuhan peralatan pengangkutan sampah, dan kebutuhan tenaga kerja. Hasil optimasi biaya terhadap pengangkutan sampah (kondisi saat ini) dan estimasi biaya modal dan biaya rutin pengangkutan sampah rasio pengangkutan 100% akan menjadi bahan dalam memberikan saran terhadap kebijakan pengelolaan sampah, khususnya pada tahap pengangkutan sampah di Kota Cilegon. Bagan tahapan penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 4.

Toth dan Vigo (2002) menjelaskan bahwa VRP bisa menjadi model untuk menentukan rute optimum dari sejumlah kendaraan yang melayani sejumlah pelanggan. Solusi dari VRP merupakan himpunan rute, yaitu masing-masing rute dijalankan oleh satu kendaraan yang memulai dan mengakhiri perjalanan di depot. Rute harus memenuhi semua permintaan pelanggan dan semua kendala, serta menghasilkan total biaya perjalanan yang minimum. Selain itu, setiap pelanggan harus dikunjungi tepat satu kali.

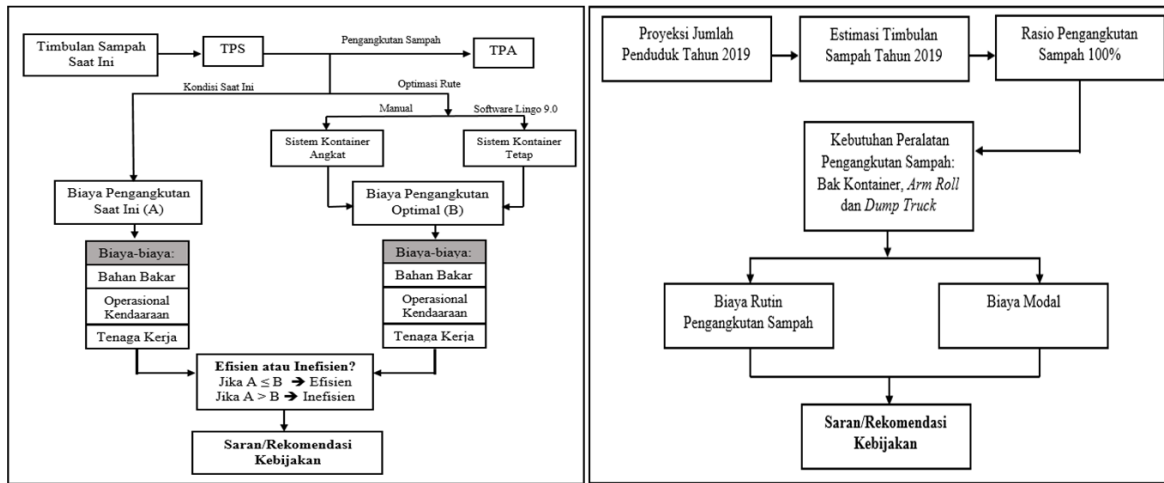
Model VRP dalam pengangkutan sampah dikenal dengan *waste collection vehicle routing problem* (WCVRP), yaitu setiap kendaraan harus mengunjungi TPA terlebih dahulu sebelum kembali ke depot. Tujuan dari WCVRP secara umum adalah mengangkut sampah dari semua pelanggan (TPS) dengan biaya minimum (Sahoo *et al.*, 2005). Saat ini, lokasi depot dan TPA di Kota Cilegon berada di tempat yang sama, yaitu di Bagendung, sehingga dalam optimasi, *node* (titik) untuk TPA dianggap sama de-

ngan *node* untuk depot. Model yang dikembangkan untuk optimasi dalam penelitian ini adalah model VRP dengan pembatasan kapasitas (*capacitated VRP/CVRP*) dengan tujuan untuk meminimalisasi rute pengangkutan sampah dari kendaraan jenis *dump truck* yang akan menghasilkan biaya pengangkutan sampah yang minimum pula.

Model yang disusun membutuhkan *input* data berupa matriks jarak antar-*node* dan jumlah timbulan sampah setiap *node* (TPS). Dari 35 *node* yang ada, hanya 34 *node* yang akan masuk dalam optimasi. Ada 1 *node* yang dikeluarkan dalam optimasi ini, yaitu *node* 14 (Pasar Kranggog), karena jumlah timbulan sampahnya (35 m^3) melebihi kapasitas kendaraan (8 m^3). Hal ini tidak memenuhi asumsi di dalam model CVRP, yaitu jumlah timbulan sampah tiap TPS tidak boleh melebihi kapasitas kendaraan. Model CVRP ini diadaptasi dari model *VRoute* yang ada di *Lingo User's Guide*. Pengolahan data menggunakan perangkat lunak *Lingo 9.0* untuk mendapatkan solusi optimal dari model yang disusun berikut ini.

Variabel dan Definisi Operasional

- $DIST$: Jarak antar-*node* (km), yaitu jarak antara TPA ke TPS maupun jarak antar-TPS;
 Q_i : Jumlah timbulan sampah di *node* i (m^3);
 U_i : Akumulasi jumlah sampah di *node* i (m^3), merupakan jumlah akumulasi sampah yang ada di *dump truck* ketika berada di suatu TPS i ;
 $VCAP$: kapasitas kendaraan (m^3), merupakan kapasitas maksimal setiap *dump truck* dalam mengangkut sampah dari TPS ke TPA;
 i, j, k : indeks *node*, merupakan indeks dari TPA dan TPS, dengan indeks TPA adalah 1 dan indeks TPS lebih besar dari 1;



Gambar 4: Bagan Tahapan Penelitian
 Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

x : aktivitas perjalanan dari TPA ke TPS atau antar-TPS.

Variabel Keputusan:

$$x = \begin{cases} 1, & \text{jika kendaraan dari } i \text{ langsung ke } j \\ 0, & \text{jika lainnya} \end{cases}$$

Fungsi Tujuan:

$$\text{Minimalisasi } Z = \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=1}^{34} \text{DIST}.x \quad (1)$$

Fungsi Kendala:

Untuk setiap $node\ k > 1$,

a. Tidak ada perjalanan ke $node$ itu sendiri:

$$x_{kk} = 0, \quad (2)$$

b. Setiap kendaraan harus masuk ke $node$ ini (k):

$$\sum_{\substack{i \neq k \\ i=1}}^{34} x_{ik} = 1, \text{ dengan } Q_i + Q_k \leq VCAP \quad (3)$$

c. Setiap kendaraan harus meninggalkan $node$ ini (k) setelah mengambil sampah:

$$\sum_{\substack{i \neq k \\ i=1}}^{34} x_{kj} = 1, \text{ dengan } Q_j + Q_k \leq VCAP \quad (4)$$

Untuk setiap $node\ i \neq k$ dan $i \neq 1$

d. U_k adalah jumlah minimal sampah di k , tapi tidak boleh melebihi kapasitas kendaraan ($VCAP$).

$$Q_k \leq U_k \leq VCAP \quad (5)$$

e. Jika dari i ke k , maka :

$$U_k \geq U_i + Q_k - VCAP + VCAP.(x_{ki} + x_{ik}) - (Q_k + Q_i).x_{ki} \quad (6)$$

f. Jika k adalah pemberhentian pertama, maka $U_k = Q_k$:

$$U_k \leq VCAP - (VCAP - Q_k).x_{1k} \quad (7)$$

g. Jika k bukan pemberhentian pertama:

$$U_k \geq Q_k + \sum_{i>1}^{34} Q_i.x_{ik} \quad (8)$$

h. Kendala Biner:

$$x = \{0, 1\} \quad (9)$$

i. Jumlah kendaraan minimum yang diperlukan:

$$VEHCLF = \sum_{i>1}^{34} \frac{Q_i}{VCAP} \quad (10)$$

Setelah didapatkan rute optimal, dapat dihitung kebutuhan biaya untuk bahan bakar, tenaga kerja, dan operasional kendaraan. Beberapa asumsi yang digunakan dalam perhitungan biaya ini terdapat

pada Tabel 1. Dari kedua sistem pengangkutan tersebut, diperoleh total biaya pengangkutan rutin dari pengangkutan sampah kondisi optimal, yang meliputi biaya bahan bakar solar, biaya tenaga kerja, dan biaya operasional kendaraan. Untuk mengetahui apakah di dalam pengangkutan sampah saat ini terdapat inefisiensi adalah dengan membandingkan biaya pengangkutan sampah saat ini dengan biaya pengangkutan sampah kondisi optimal:

- biaya pengangkutan saat ini \leq biaya pengangkutan optimal \rightarrow efisien
- biaya pengangkutan saat ini \geq biaya pengangkutan optimal \rightarrow inefisien

Estimasi kebutuhan biaya modal dan biaya rutin pengangkutan sampah dengan rasio pengangkutan sampah 100% pada tahun 2019, meliputi biaya modal (*capital cost*) dan biaya rutin pengangkutan sampah. Biaya modal adalah biaya untuk pembelian peralatan pengangkutan sampah yang terdiri dari *dump truck*, *arm roll*, dan kontainer. Sedangkan biaya rutin meliputi biaya bahan bakar, biaya tenaga kerja, dan biaya operasional.

Untuk melakukan estimasi tersebut, diperlukan beberapa langkah, yaitu mengestimasi timbulan sampah, jumlah peralatan, dan biaya yang diperlukan. Jumlah timbulan sampah diestimasi berdasarkan jumlah penduduk dan areanya. Proyeksi jumlah penduduk menggunakan data dari BPS, sedangkan jumlah timbulan sampah menggunakan asumsi 3 liter/orang/hari, sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) 19-3983-1995 tentang Spesifikasi Timbulan Sampah Kota Sedang dan Kota Kecil, bahwa standar angka timbulan sampah padat untuk kota sedang adalah 2,75–3,25 liter/orang/hari atau 0,7–0,8 kg/orang/hari.

Jumlah peralatan pengangkutan sampah diestimasi berdasarkan jumlah penduduk dan timbulan sampah pada tahun 2019. Estimasi kebutuhan peralatan pengangkutan menggunakan standar spesifikasi peralatan yang ada di SNI 3242-2008 tentang Pengelolaan Sampah di Permukiman. Kemudian, langkah ketiga adalah mengestimasi kebutuhan biaya untuk pengangkutan sampah pada tahun 2019, yang meliputi biaya rutin dan biaya modal pembelian peralatan pengangkutan. Dalam melakukan perhitungan, ada beberapa data yang menggunakan asumsi. Asumsi diambil dari beberapa sumber terkait dengan data yang diperlukan, sebagaimana tertera pada Tabel 1.

Hasil dan Analisis

Pengangkutan sampah saat ini dengan sistem kontainer angkat menggunakan *arm roll* sebanyak 9 unit, melayani sebanyak 39 titik TPS (data lokasi ada di Tabel 11). Setiap minggunya, 9 unit *arm roll* tersebut mengangkut sampah sebanyak 336 kontainer dengan kapasitas masing-masing 6 m³. Sehingga estimasi jumlah sampah yang terangkut *arm roll* setiap minggunya adalah 2.016 m³. Total jarak tempuh dari 9 unit *arm roll* tersebut adalah 1.747,2 km/minggu atau 7.478,4 km/bulan. Berdasarkan data operasional *arm roll*, setiap *arm roll* memiliki jarak tempuh 4,47 km setiap 1 liter bahan bakar solar, dengan harga solar Rp6.900/liter. Oleh karena itu, didapatkan besaran total biaya bahan bakar untuk 9 unit *arm roll* tersebut, yaitu Rp11.543.839/bulan.

Dari data kondisi pengangkutan sampah saat ini menggunakan *arm roll*, dilakukan analisis pergerakan *arm roll* berdasarkan jarak tempuh setiap *arm roll* saat ini. Dengan menggunakan asumsi kecepatan rata-rata perjalanan *arm roll* adalah 25 km/jam, maka bisa dihitung waktu perjalanan yang dibutuhkan setiap *arm roll* sesuai dengan jarak dan ritasi masing-masing *arm roll*. Dalam setiap pergerakan *arm roll* mengangkut kontainer sampah dari TPS ke TPA membutuhkan waktu operasi yang terdiri dari beberapa komponen waktu. Selain waktu perjalanan yang telah disebutkan, setiap *arm roll* membutuhkan waktu *loading/unloading* kontainer (1,1 jam/trip), waktu istirahat (1 jam/hari), dan waktu *off route* (waktu tidak efektif dalam jam kerja, 20 menit/hari). Pada Tabel 2, dapat diketahui bahwa, total waktu operasi dari 9 unit *arm roll* adalah 14.057 menit/minggu atau 234,29 jam/minggu. Ketika dihitung dalam 1 hari, maka setiap *arm roll* rata-rata beroperasi selama $\frac{234,29 \text{ jam}}{6 \text{ hari} \times 9 \text{ unit}}$, yaitu 4,339 jam. Jam kerja harian setiap *arm roll* adalah 8 jam, sehingga masih ada waktu kosong dan tidak efektif selama 3,661 jam/hari atau 11.862 menit/minggu.

Optimasi *arm roll* dilakukan dengan memaksimalkan penggunaan *arm roll* pada jam kerja, namun semua sampah saat ini tetap bisa terangkut semuanya. Simulasi perhitungan untuk optimasi *arm roll* ada di Tabel 3. Dari hasil optimasi *arm roll* diketahui bahwa kebutuhan *arm roll* yang efisien untuk mengangkut jumlah sampah dengan sistem kontainer angkat adalah 5 unit, sedangkan *arm roll* yang beroperasi saat ini adalah 9 unit. Hal ini menunjukkan telah terjadi inefisiensi penggunaan *arm roll*. Dampak dari inefisiensi penggunaan *arm roll*

Tabel 1: Asumsi yang Digunakan

Jenis Asumsi	Nilai Asumsi	Keterangan
Jarak Tempuh <i>Dump Truck</i>	4,4 km/liter	Rencana Induk Sistem Pengelolaan Sampah Terpadu di Cilegon, 2015
Jarak Tempuh <i>Arm Roll</i>	4,47 km/liter	
Upah Tenaga Kerja	Rp2.760.590/bulan	UMK Tahun 2015
Biaya Operasional/unit truk	Rp495.000/bulan	DKP, 2014
Harga Solar	Rp6.900	Harga pasar saat ini
Jumlah Timbulan Sampah per Kapita	3 liter/orang/hari	SNI 19-3983-1995
Harga Kontainer	Rp30 juta/unit	Rencana Induk Sistem Pengelolaan Sampah Terpadu di Cilegon, 2015
Harga <i>Dump Truck</i>	Rp330 juta/unit	
Harga <i>Arm Roll</i>	Rp371,91 juta/unit	

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

Tabel 2: Analisis Kondisi Pengangkutan Sampah Menggunakan *Arm Roll* Saat Ini

Kode Truk	Jumlah Trip/minggu (kali)	Jarak Tempuh/minggu (km)	Total Waktu perjalanan/minggu (menit)	Waktu loading-unloading/minggu (menit)	Waktu istirahat/minggu (menit)	Waktu <i>Off Route</i> /minggu (menit)	Total waktu operasi/minggu (menit)	Selisih dengan Jam Kerja Tersedia/minggu (menit)
A1	11	221,8	532,32	726	360	120	1.738,32	1.141,68
A2	10	176	422,40	660	360	120	1.562,40	1.317,60
A3	5	110,6	265,44	330	360	120	1.075,44	1.804,56
A4	6	233,6	560,64	396	360	120	1.436,64	1.443,36
A5	9	139,2	334,08	594	360	120	1.408,08	1.471,92
A6	15	401	962,40	990	360	120	2.432,40	447,60
A7	10	195,8	469,92	660	360	120	1.609,92	1.270,08
A8	5	109	261,60	330	360	120	1.071,60	1.808,40
A9	13	160,20	384,48	858	360	120	1.722,48	1.157,52
Jumlah	84	1.747,20	4.193,28	5.544	3.240	1.080	14.057,28	11.862,72

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

Tabel 3: Simulasi Perhitungan Optimasi *Arm Roll*

Uraian	Perhitungan
Jam kerja/truk/hari	8 jam = 480 menit
Jam kerja/truk/minggu (6 hari)	48 jam = 2.880 menit
Jumlah sampah terangkut dengan <i>arm roll</i>	2.016 m ³ /bulan = 504 m ³ /minggu
Total waktu operasi <i>arm roll</i> dalam 1 minggu (saat ini)	14.057 menit
Jumlah <i>arm roll</i> yang dibutuhkan	$\frac{\text{waktu operasi semua } arm\ roll/minggu}{\text{waktu kerja setiap } arm\ roll/minggu} = \frac{14.057\ \text{menit}}{2.880\ \text{menit}} = 4,88 \approx 5\ \text{unit}$
Biaya bahan bakar	Rp11.543.839,-/bulan
Jumlah tenaga kerja	$2 \frac{\text{orang}}{\text{unit } arm\ roll} \times 5\ \text{unit } arm\ roll = 10\ \text{orang}$
Biaya tenaga kerja	10 x Rp2.760.590,- = Rp27.605.900,-/bulan
Biaya operasional kendaraan	5 unit x Rp495.000/unit = Rp2.475.000,-/bulan

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

juga menyebabkan inefisiensi pada penggunaan tenaga kerja dan biaya operasional dari *arm roll*. Hasil estimasi perhitungan inefisiensi *arm roll* dan perbandingan dengan kondisi saat ini ada di Tabel 8.

Pengangkutan sampah saat ini dengan sistem kontainer tetap menggunakan *dump truck* sebanyak 11 unit dan ditambah dengan *arm roll* yang beroperasi seperti *dump truck* (yang selanjutnya dalam pembahasan artikel ini dianggap sebagai *dump truck*) sebanyak 6 unit, dengan lokasi layanan sebanyak 34 titik TPS (data lokasi ada di Tabel 12). Dari ke 34 titik TPS dan 1 titik depot/TPA, dibuat matriks jarak antara TPA ke TPS maupun jarak antar-TPS dengan menggunakan *Google Maps*, seperti yang ada di Gambar 11.

Kondisi pengangkutan saat ini menggunakan 17 unit *dump truck* yang dapat mengangkut sampah sebanyak 138 m³/hari atau 3.588 m³/bulan. Total jarak tempuh 17 unit *dump truck* tersebut adalah 461,3 km/hari atau 11.994 km/bulan. Berdasarkan data operasional *dump truck*, setiap *dump truck* memiliki jarak tempuh 4,4 km setiap 1 liter bahan bakar solar dengan harga solar Rp6.900./liter. Oleh karena itu, didapatkan besaran total biaya pengangkutan untuk 17 unit *dump truck* tersebut, yaitu Rp723.402,3/hari atau Rp18.808.459,-/bulan. Rekapitulasi kondisi pengangkutan saat ini menggunakan *dump truck* ada di Tabel 4.

Optimasi rute pengangkutan sampah sistem kontainer tetap ini akan menghasilkan efisiensi pada penggunaan bahan bakar, tenaga kerja, dan kendaraan. Optimasi rute dilakukan dengan model VRP dengan pembatasan kapasitas (*capacitated VRP/CVRP*) yang diolah menggunakan perangkat lunak *Lingo 9.0*, sedangkan optimasi penggunaan tenaga kerja dan kendaraan dilakukan dengan mengoptimalkan jumlah trip atau ritasi tanpa melebihi jam kerja dengan tetap memperhatikan kapasitas *dump truck*.

Dalam model optimasi rute *dump truck* untuk mengangkut sampah dari 34 titik TPS, *node 14* yaitu TPS Pasar Kranggan tidak dimasukkan ke dalam model karena memiliki timbulan sampah yang melebihi kapasitas kendaraan. Hal ini tidak memenuhi persyaratan asumsi dalam CVRP, yaitu jumlah timbulan sampah tidak boleh melebihi kapasitas kendaraan. Oleh karena itu, untuk TPS Pasar Kranggan akan dihitung secara terpisah setelah hasil optimasi didapatkan. Sehingga jumlah TPS yang masuk model hanya 33 titik.

Dari 33 TPS tersebut, dilakukan *running* menggu-

nakan perangkat lunak *Lingo 9.0* dengan mencoba 4 skenario. Skenario 1 dengan melakukan 1 kali *running* untuk 33 TPS, skenario 2 dengan pembagian TPS yang ada menjadi 2 kelompok (*cluster*), skenario 3 dengan pembagian menjadi 4 kelompok (*cluster*), dan skenario 4 dengan dibagi menjadi 4 kelompok (*cluster*). Dari hasil keluaran perangkat lunak *Lingo 9.0* didapatkan rute kendaraan beserta jarak tempuh untuk setiap skenario. Perbandingan jarak tempuh dan biaya bahan bakar *dump truck* antara kondisi saat ini dengan 4 skenario hasil keluaran *Lingo 9.0* dapat dilihat pada Tabel 5.

Efisiensi didapatkan melalui skenario 1 dan 2 (Tabel 5), karena jarak tempuh dan biaya bahan bakarnya lebih kecil dari kondisi pengangkutan saat ini. Skenario 2 ditetapkan sebagai pilihan rute optimum, karena memiliki jarak tempuh dan biaya yang lebih kecil dibanding skenario 1. Selain itu, *solver status* skenario 2 sudah optimum, sedangkan skenario 1 masih *feasible*. Hasil optimasi rute *dump truck* terdapat di Tabel 6.

Hasil dari optimasi rute digunakan untuk menghitung kebutuhan bahan bakar, tenaga kerja dan kendaraan yang efisien. Jumlah *dump truck* yang digunakan dalam kondisi optimal adalah 10 unit. Hal ini berdampak pada efisiensi penggunaan tenaga kerja. Simulasi perhitungan optimasi *dump truck* dapat dilihat pada Tabel 7.

Dari hasil optimasi diketahui bahwa telah terjadi inefisiensi penggunaan *dump truck* pada kondisi pengangkutan saat ini. Inefisiensi biaya bahan bakar sebesar Rp13.957/hari atau Rp362.877/bulan. Inefisiensi juga terjadi pada penggunaan kendaraan sebanyak 7 unit, sedangkan inefisiensi penggunaan tenaga kerja sebanyak 28 orang. Hasil estimasi perhitungan inefisiensi *dump truck* dan perbandingan dengan kondisi saat ini ada pada Tabel 8.

Perbandingan yang dilakukan terhadap kondisi pengangkutan saat ini dengan kondisi pengangkutan optimal pada beberapa komponen biaya, yang meliputi biaya bahan bakar, biaya tenaga kerja, dan biaya operasional kendaraan (servis dan penggantian suku cadang). Dengan membandingkan kondisi pengangkutan saat ini dan kondisi pengangkutan optimal, maka akan diketahui besarnya inefisiensi yang terjadi dalam pengangkutan saat ini. Hasil perhitungan biaya pengangkutan saat ini dan biaya optimal, baik sistem kontainer angkat dan tetap, dapat dilihat pada Tabel 8 dan Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan adanya inefisiensi karena besarnya biaya pada pengangkutan saat ini lebih besar dibanding pengangkutan pada kondisi

Tabel 4: Analisis Kondisi Pengangkutan Sampah Menggunakan *Dump Truck* Saat Ini

Kode Truk	Rute Saat ini *)/Hari	Total Jarak Tempuh/Bulan (km)	Sampah Terangkut/Bulan (m ³)	Biaya Bahan Bakar/Bulan (Rp)
D1	1-6-7-8-1	487,50	208	764.489
D2	1-10-11-1	452,40	182	709.445
D3	1-4-3-1	520,00	182	815.455
D4	1-2-5-1	520,00	182	815.455
D5	1-12-13-1	458,90	182	719.639
D6	1-14-1	538,20	182	843.995
D7	1-14-1	538,20	182	843.995
D8	1-14-1	538,20	182	843.995
D9	1-14-1	538,20	182	843.995
D10	1-14-1	538,20	182	843.995
D11	1-16-1-19-1	1.066,00	338	1.671.682
D12	1-20-21-22-1	670,80	208	1.051.936
D13	1-25-24-23-26-1	722,80	182	1.133.482
D14	1-27-18-15-1	910,00	208	1.427.045
D15	1-28-1	946,40	182	1.484.127
D16	1-30-29-1-32-31-1	2.126,80	416	3.335.209
D17	1-33-34-35-1	421,20	208	660.518
Jumlah		11.994	3.588	18,808,459

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

Keterangan: *) Rute berdasarkan *node* di Tabel 12

Tabel 5: Perbandingan Jarak Tempuh dan Biaya Bahan Bakar Hasil Optimasi *Dump Truck*

Uraian	Total Jarak Tempuh/hari (km)	Biaya Bahan Bakar/hari (Rp)	Keterangan Solver Status
Kondisi Saat Ini	461,30	723.402,30	
Skenario 1	454,00	711.954,50	Feasible
Skenario 2	452,40	709.445,40	Optimum
Skenario 3	466,25	731.164,80	Optimum
Skenario 4	465,10	729.361,40	Optimum

Sumber: Hasil Keluaran *Lingo 9.0*, diolah

Tabel 6: Hasil Optimasi Rute *Dump Truck*

Truk	Kondisi Saat Ini (per hari)			Kondisi Optimal (per hari)		
	Rute *)	Jarak (km)	Volume Sampah (m ³)	Rute*)	Jarak (km)	Volume Sampah (m ³)
1	1-6-7-8-1	18,75	8	1-2-5-1-4-3-1	40	14
2	1-10-11-1	17,4	7	1-6-34-35-1-8-10-7-1	31,95	16
3	1-4-3-1	20	7	1-13-11-1-15-12-33-1	35,1	16
4	1-2-5-1	20	7	1-16-1-27-18-17-9-1	52,05	14,5
5	1-12-13-1	17,65	7	1-19-1-30-29-1	64,4	14
6	1-14-1	20,7	7	1-21-22-20-1-32-31-1	61,2	14,5
7	1-14-1	20,7	7	1-25-24-23-26-1-28-1	64,2	14
8	1-14-1	20,7	7	1-14-1-14-1	41,4	14
9	1-14-1	20,7	7	1-14-1-14-1	41,4	14
10	1-14-1	20,7	7	1-14-1	20,7	7
11	1-16-1-19-1	41	13			
12	1-20-21-22-1	25,8	8			
13	1-25-24-23-26-1	27,8	7			
14	1-27-18-15-1	35	8			
15	1-28-1	36,4	7			
16	1-30-29-1-32-31-1	81,8	16			
17	1-33-34-35-1	16,2	8			
JUMLAH		461,3	138	JUMLAH	452,4	138

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis dan Keluaran *Lingo 9.0*

Keterangan: *) Rute berdasarkan *node* di Tabel 12

Tabel 7: Simulasi Perhitungan Optimasi *Dump Truck*

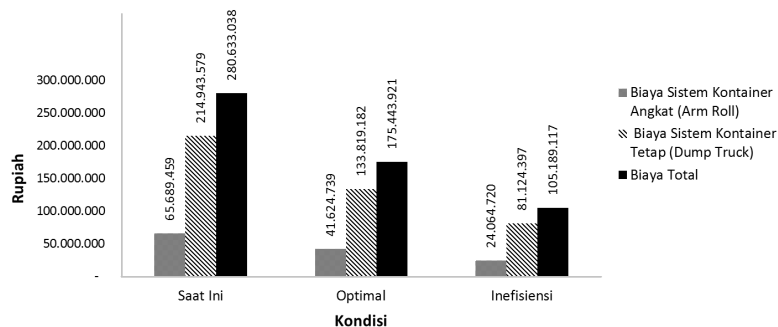
Uraian	Perhitungan
Jam kerja/truk/hari	8 jam = 480 menit
Jumlah sampah terangkut dengan <i>dump truck</i>	138 m ³ /hari
Jarak tempuh optimal	452,4 km/hari = 11.762 km/bulan
Biaya bahan bakar	Rp709.445,4/hari = Rp18.445.582/bulan
Biaya operasional kendaraan	10 unit x Rp495.000/unit = Rp4.950.000/bulan
Jumlah tenaga kerja	$4 \frac{\text{orang}}{\text{unit dump truck}} \times 10 \text{ unit dump truck} = 40 \text{ orang}$
Biaya tenaga kerja	40 x Rp2.760.590 = Rp110.423.600/bulan

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

Tabel 8: Perbandingan Biaya Pengangkutan pada Kondisi Saat Ini dan Optimal

	Kondisi Saat Ini	Kondisi Optimal	Inefisiensi
1. Sistem Kontainer Angkat (<i>Arm Roll</i>)			
Biaya Bahan Bakar	Rp11.543.839,-	Rp11.543.839,-	-
Biaya Operasional	Rp4.455.000,-	Rp2.475.000,-	Rp1.980.000,-
Biaya Tenaga Kerja	Rp49.690.620,-	Rp27.605.900,-	Rp22.084.720,-
2. Sistem Kontainer Tetap (<i>Dump Truck</i>)			
Biaya Bahan Bakar	Rp18.808.459,-	Rp18.445.582,-	Rp362.877,-
Biaya Operasional	Rp8.415.000,-	Rp4.950.000,-	Rp3.465.000,-
Biaya Tenaga Kerja	Rp187.720.120,-	Rp110.423.600,-	Rp77.296.520,-
JUMLAH	Rp280.633.038,-	Rp175.443.921,-	Rp105.189.117,-

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

**Gambar 5:** Perbandingan Biaya Pengangkutan Kondisi Saat Ini dengan Kondisi Optimal
Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

si optimal. Inefisiensi lebih besar terjadi pada pengangkutan sampah dengan sistem kontainer tetap. Hal ini terjadi karena di dalam sistem kontainer tetap, jarak tempuh, jumlah kendaraan, dan tenaga kerja yang terlibat lebih besar dibanding dengan sistem kontainer angkat, sehingga potensi terjadinya inefisiensi menjadi lebih besar. Besar kecilnya nilai inefisiensi bisa diartikan juga sebagai penghematan yang akan diperoleh jika ada perubahan operasional pengangkutan sampah dari kondisi saat ini ke kondisi optimal. Besar total inefisiensi adalah Rp105.189.117 atau senilai dengan 37,48% dibandingkan dengan besaran biaya pengangkutan saat ini. Atau dengan kata lain bahwa jika kondisi pengangkutan optimal diterapkan, maka akan diperoleh penghematan sebesar 37,48%.

Komponen biaya tenaga kerja merupakan komponen yang porsinya paling besar menyebabkan inefisiensi, yaitu 94,48% dari total inefisiensi sebesar Rp105.189.117/bulan, seperti terlihat pada Gambar 6. Sedangkan porsi inefisiensi yang disebabkan karena jarak tempuh rute (biaya bahan bakar) sangat kecil, hanya 0,34% dari keseluruhan inefisiensi. Biaya operasional merupakan fungsi dari jumlah kendaraan yang digunakan. Semakin banyak kendaraan yang beroperasi tidak efisien, maka akan memperbesar komponen ini. Sedangkan tenaga kerja yang tidak efisien akan dipengaruhi oleh tidak efisiennya penggunaan kendaraan. Artinya, ketika ada kendaraan yang beroperasi tidak efisien, maka tenaga kerja yang ada di dalam kendaraan tersebut menjadi tidak efisien. Porsi inefisiensi dari biaya tenaga kerja ini sangat besar, karena jumlahnya akan berlipat dibanding dengan jumlah kendaraan yang beroperasi secara tidak efisien, yaitu di dalam *arm roll* melibatkan 2 orang, sedangkan *dump truck* ada 4 orang tenaga kerja.

Inefisiensi terbesar yang bersumber dari penggunaan tenaga kerja ini sejalan dengan penelitian oleh Cointreau-Levine (1994), bahwa pengangkutan sampah oleh pemerintah di negara berkembang cenderung tidak efisien karena penggunaan tenaga kerja yang tinggi. Penggunaan tenaga kerja yang tinggi pada pengangkutan sampah di Kota Cilegon memang tidak bisa dihindarkan, karena hampir sebagian besar proses pengangkutan sampahnya dilakukan secara manual. Tingginya waktu *off route* juga menyebabkan besarnya inefisiensi pada komponen tenaga kerja ini. Sehingga salah satu cara untuk mengurangi inefisiensi yang terjadi adalah dengan mengurangi waktu *off route*, di antaranya dengan mengoptimalkan jumlah ritasi kendaraan

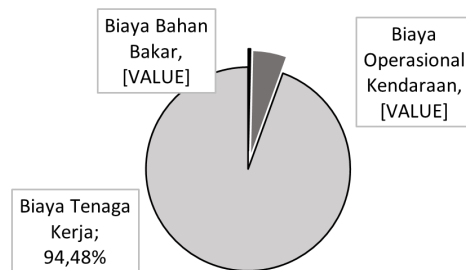
setiap harinya.

Estimasi biaya pengangkutan sampah pada tahun 2019 dengan rasio pengangkutan 100% meliputi estimasi biaya modal (*capital cost*) dan biaya rutin pada pengangkutan sampah, yang dilakukan dengan beberapa langkah, yaitu melakukan estimasi timbulan sampah, estimasi jumlah peralatan pengangkutan sampah, dan terakhir adalah mengestimasi biaya pengangkutan sampah. Estimasi timbulan sampah di tahun 2019 adalah 478.740 m³/tahun, yang dihitung berdasarkan proyeksi jumlah penduduk di tahun 2019 dengan asumsi jumlah timbulan sampah per kapita, yaitu 3 liter/orang/hari sesuai dengan SNI 19-3983-1995, seperti pada Gambar 7.

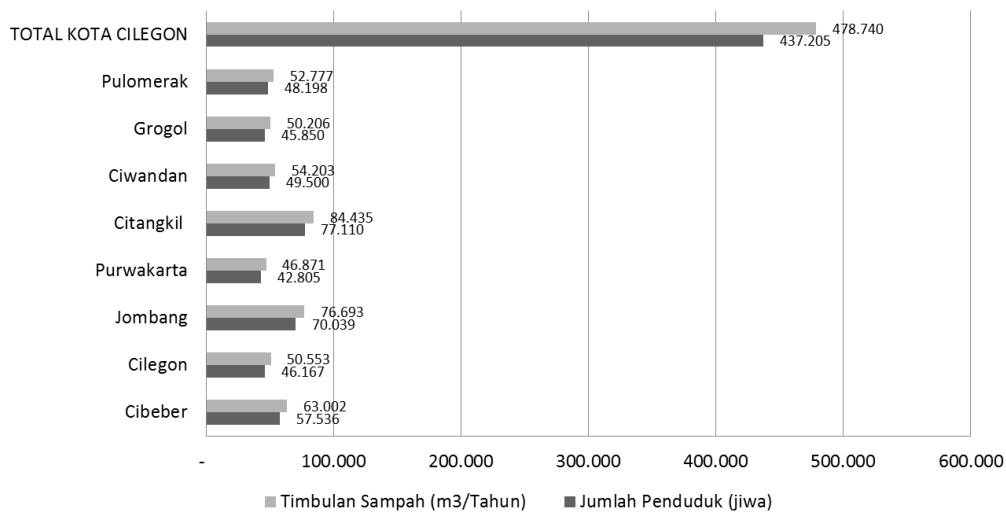
Estimasi jumlah peralatan pengangkutan sampah meliputi estimasi jumlah kontainer komunal kapasitas 8 m³ dan kendaraan pengangkut sampah (*dump truck* dan *arm roll*). Jumlah kontainer dihitung menggunakan asumsi pada SNI 3242:2008, yaitu wadah komunal sampai dengan 1 m³ bisa melayani sampai dengan 200 orang, maka untuk kontainer berkapasitas 8 m³ diperkirakan bisa melayani penduduk sejumlah 1.600 orang. Estimasi kebutuhan kendaraan pengangkut sampah dihitung berdasarkan jumlah timbulan sampah, kapasitas kendaraan, faktor kompaksi, dan asumsi rata-rata jumlah ritasi per harinya. Dengan mengambil asumsi pola pengangkutan sampah 40% menggunakan *dump truck* (sistem *door to door* dan kontainer komunal tetap) dan 60% menggunakan *arm roll* (sistem kontainer komunal angkat), didapatkan hasil estimasi kebutuhan peralatan pengangkutan sampah di tahun 2019 pada Tabel 9.

Hasil estimasi kebutuhan jumlah peralatan pengangkutan sampah digunakan untuk mengestimasi kebutuhan biaya rutin dan biaya modal untuk pengangkutan sampah tahun 2019. Biaya rutin meliputi biaya bahan bakar, tenaga kerja, dan operasional kendaraan. Kebutuhan biaya tersebut dipengaruhi oleh mobilitas kendaraan, baik *arm roll* maupun *dump truck*. Dengan 8 jam kerja per hari, data asumsi untuk *arm roll* meliputi waktu *off route* 20 menit/hari, waktu *loading/unloading* 1,1 jam/rit dan waktu istirahat 60 menit/hari. Sedangkan data asumsi untuk *dump truck* meliputi waktu *at site* 5 menit/rit, waktu *off route* 60 menit/hari, waktu *loading* 10 menit/m³ dan waktu istirahat 60 menit/hari.

Dengan jumlah ritasi *arm roll* minimal 3 rit/hari dan *dump truck* minimal 2 rit/hari, akan didapatkan waktu perjalanan, baik untuk *arm roll* maupun *dump truck*, yang dihitung dari jumlah waktu kerja per hari dikurangi dengan beberapa asumsi wak-



Gambar 6: Sumber Inefisiensi dan Porsinya dalam Pengangkutan Sampah di Kota Cilegon
Sumber: Hasil Pengolahan Penulis



Gambar 7: Estimasi Jumlah Timbulan Sampah Menurut Kecamatan Tahun 2019
Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

Tabel 9: Estimasi Kebutuhan Peralatan Pengangkutan Sampah Menurut Kecamatan Tahun 2019

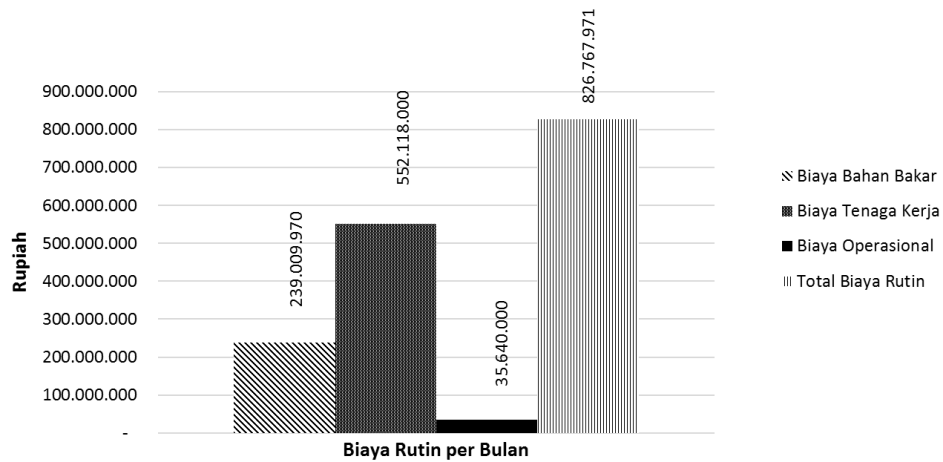
Kecamatan	Dump Truck	Arm Roll	Kontainer
Cibeber	4	5	36
Cilegon	4	5	29
Jombang	4	7	44
Purwakarta	3	4	27
Citangkil	5	7	49
Ciwandan	3	5	31
Grogol	3	5	29
Pulomerak	3	5	31
JUMLAH TOTAL	28	44	276

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

Tabel 10: Hasil Perhitungan Estimasi Biaya Rutin Pengangkutan Sampah Tahun 2019

Komponen Biaya	Volume	Harga Satuan (Rp/Bulan)	Jumlah (Rp/Bulan)
1. Biaya Bahan Bakar			
- <i>Dump Truck</i>	28 unit	3.227.841	90.379.545
- <i>Arm Roll</i>	44 unit	3.377.964	148.630.425
Total Biaya Bahan Bakar			239.009.970
2. Biaya Tenaga Kerja			
- <i>Dump Truck</i>	(28x4) orang	2.760.590	309.186.080
- <i>Arm Roll</i>	(44x2) orang	2.760.590	242.931.920
Total Biaya Tenaga Kerja			552.118.000
3. Biaya Operasional			
- <i>Dump Truck</i>	28 unit	495.000	13.860.000
- <i>Arm Roll</i>	44 unit	495.000	21.780.000
Total Biaya Operasional			35.640.000
JUMLAH TOTAL			826.767.970

Sumber: Hasil Pengolahan Penulis



Gambar 8: Estimasi Biaya Rutin per Bulan Pengangkutan Sampah Tahun 2019
 Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

tu yang sudah disebutkan sebelumnya. Dari hasil perhitungan didapatkan hasil bahwa waktu perjalanan rata-rata untuk *arm roll* adalah 3,37 jam/hari dan untuk *dump truck* adalah 3,17 jam/hari. Dengan asumsi kecepatan rata-rata kendaraan 25 km/jam dan beberapa asumsi yang ada di Tabel 1 (asumsi jarak tempuh dan harga solar tetap), maka didapatkan hasil perhitungan biaya rutin pengangkutan sampah pada tahun 2019 seperti pada Tabel 10 dan Gambar 8.

Selain biaya rutin, dibutuhkan biaya modal untuk pengadaan peralatan untuk pengangkutan sampah pada tahun 2019, yaitu *dump truck*, *arm roll*, dan kontainer. Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan asumsi data pada Tabel 1, didapatkan estimasi biaya modal untuk pengangkutan sampah di tahun 2019 seperti pada Gambar 9. Pada tahun 2014, APBD Kota Cilegon sebesar Rp1,457 triliun dengan rasio anggaran kebersihan (pengelolaan sampah) 0,47% dari total APBD atau Rp6,848 miliar. Dengan asumsi biaya pengangkutan sebesar 60% dari anggaran kebersihan, maka untuk kondisi saat ini, biaya rutin pengangkutan sampah besarnya 0,28% dari total APBD atau Rp4,109 miliar.

Pada tahun 2019, nilai APBD Kota Cilegon dapat diproyeksikan menggunakan grafik tren kenaikan APBD tahun 2011–2015, yaitu sebesar Rp2,32 triliun. Estimasi biaya rutin pengangkutan sampah di tahun 2019 adalah sebesar Rp826.767.970/bulan (Gambar 6) atau Rp9,921 miliar/tahun, yang setara dengan 0,43% dari proyeksi APBD tahun 2019. Anggaran kebersihan bisa diperkirakan dengan menggunakan asumsi bahwa anggaran pengangkutan sampah adalah 60% dari anggaran kebersihan, sehingga diperoleh porsi anggaran bidang kebersihan pada 2019 adalah 0,72% dari APBD atau Rp16,641 miliar. Perbandingan anggaran pengangkutan sampah pada tahun 2014 dan 2019 ada di Gambar 10.

Dari perbandingan anggaran pengangkutan sampah di tahun 2014 dan perkiraan pada tahun 2019 terhadap APBD seperti pada Gambar 10, pengeluaran biaya pengangkutan sampah pada tahun 2019 meningkat sebesar Rp5,876 miliar atau meningkat 143% dibanding biaya pengangkutan tahun 2014. Dengan melihat kecenderungan anggaran kebersihan beberapa tahun terakhir, untuk mewujudkan target rasio pengangkutan 100% dengan pembiayaan APBD, maka dibutuhkan kemauan dan tekad yang kuat dari para pengambil kebijakan untuk memberikan alokasi dana yang cukup untuk bidang kebersihan, lebih khusus lagi untuk pengangkutan sampah.

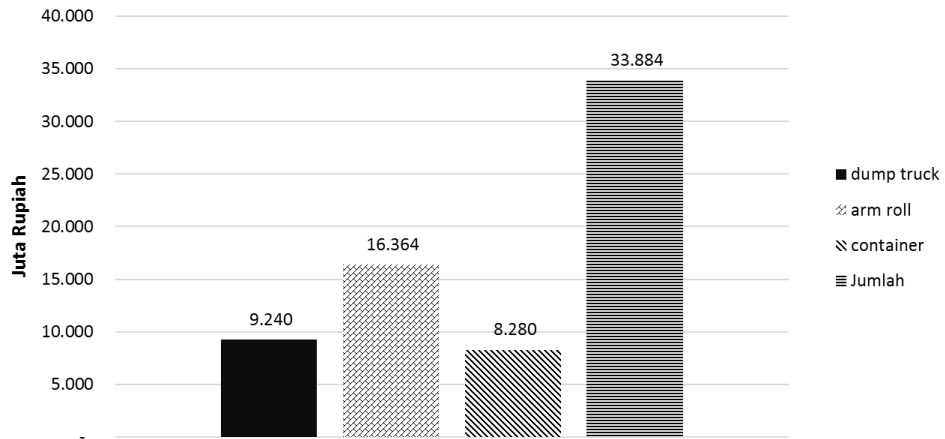
Beban anggaran yang juga besar adalah komponen biaya modal untuk penyediaan peralatan pengangkutan sampah sebesar Rp33,884 miliar atau senilai 1,46% terhadap proyeksi APBD tahun 2019. Biaya modal tersebut jika dijumlahkan dengan biaya rutin pengangkutan sampah tahun 2019 akan menjadi Rp43,869 miliar atau 1,89% dari APBD tahun 2019. Pemerintah Kota Cilegon perlu memberikan perhatian khusus terkait dengan penyediaan anggaran tersebut untuk mencapai target rasio pengangkutan sampah sebesar 100%. Pada tahun 2014, Pemerintah Kota Cilegon baru mengalokasikan anggaran kepada DKP Kota Cilegon sebesar 1,73% dari APBD, yaitu untuk bidang kebersihan sebesar 0,47% dari APBD.

Beberapa daerah lain di Indonesia, telah memberikan alokasi anggaran pengelolaan sampah yang lebih besar 2% dari APBD-nya. Misalnya, Dinas Kebersihan DKI Jakarta mendapatkan anggaran 3,3% dari APBD DKI Jakarta tahun 2011, Kota Bandung mengalokasikan 2,3% dari APBD-nya pada tahun 2010 untuk pengelolaan sampah, serta Kota Surabaya yang memiliki komitmen lebih besar dalam pengelolaan sampah dengan mengalokasikan 5,5% dari APBD-nya pada tahun 2012 (KELOPAK, 2013). Beberapa daerah tersebut bisa menjadi referensi bagi Pemerintah Kota Cilegon untuk meningkatkan alokasi anggaran pengelolaan sampah di Kota Cilegon.

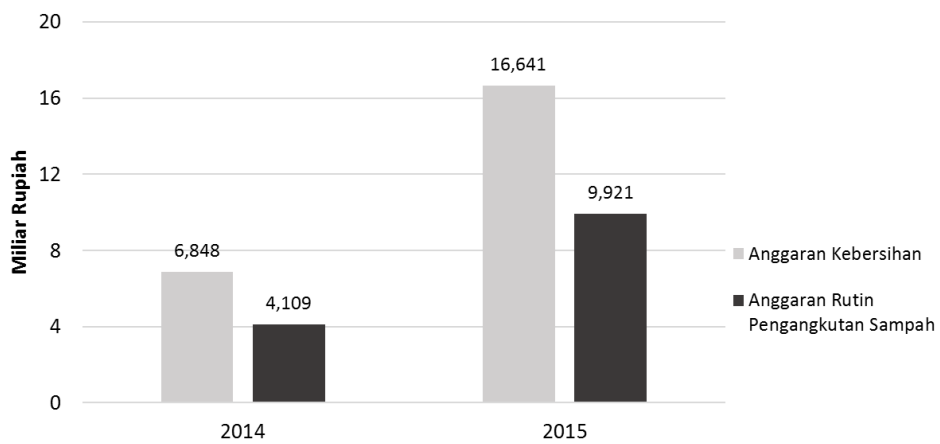
Kesimpulan

Beberapa masalah persampahan di Kota Cilegon, di antaranya adalah meningkatnya jumlah timbulan sampah sebesar 8,72% per tahun, tetapi rasio pengangkutan sampah masih rendah, yaitu 51,98% pada tahun 2014. Di sisi lain, hanya 0,47% saja dari total APBD Kota Cilegon yang dialokasikan untuk anggaran bidang kebersihan yang bertanggung jawab dalam teknis pengelolaan sampah di DKP Kota Cilegon. Selain itu, rasio penerimaan retribusi sampah dibanding dengan pengeluaran pemerintah untuk program kebersihan dan pertamanan masih sangat kecil, yaitu 3,45%. Oleh karena itu, efisiensi penggunaan anggaran dan sarana (sumber daya) yang ada perlu dilakukan.

Pengangkutan sampah adalah tahapan pengelolaan sampah dengan porsi anggaran terbesar. Potensi terjadinya inefisiensi dalam pengangkutan sampah, baik dari rute pengangkutan sampah yang tidak optimal serta tidak efisiennya tenaga kerja



Gambar 9: Estimasi Biaya Modal untuk Pengangkutan Sampah Tahun 2019
 Sumber: Hasil Pengolahan Penulis



Gambar 10: Perbandingan Anggaran Pengangkutan Sampah Tahun 2014 dan 2019
 Sumber: Hasil Pengolahan Penulis

dan operasional kendaraan, perlu diantisipasi agar pengangkutan sampah bisa berjalan efisien. Dari hasil optimasi diketahui bahwa telah terjadi inefisiensi dalam pengangkutan saat ini di Kota Cilegon, yaitu sebesar Rp105.189.117 atau 37,48% dari total biaya pengangkutan saat ini. Inefisiensi terbesar ada pada komponen biaya tenaga kerja, yaitu 94,48%. Sisanya, 5,18% berasal dari biaya operasional kendaraan dan 0,34% dari biaya bahan bakar. Dengan menerapkan pola pengangkutan sampah optimal, maka akan didapatkan penghematan sebesar 37,48%. DKP Kota Cilegon bisa meningkatkan rasio pengangkutan sampah tanpa menambahkan anggaran saat ini, yaitu dengan mengoptimalkan kendaraan pengangkut sampah yang tidak terpakai dari hasil optimasi.

Proyeksi biaya pengangkutan sampah tahun 2019 dengan target rasio pengangkutan 100% dimulai dengan mengestimasi jumlah timbulan sampah pada 2019. Dengan proyeksi jumlah penduduk 437.205 jiwa, maka diperkirakan jumlah timbulan sampah mencapai 478.739 m³/tahun pada tahun 2019. Untuk mengangkut timbulan sampah tersebut, diperlukan peralatan pengangkutan sampah berupa kontainer berkapasitas 8 m³ sejumlah 276 unit dan 72 kendaraan, yang terdiri dari 28 *dump truck* dan 44 *arm roll*, masing-masing dengan kapasitas 8 m³. Estimasi kebutuhan biaya meliputi biaya rutin pengangkutan sampah pada tahun 2019 sebesar Rp826 juta/bulan atau Rp9,921 miliar/tahun dan biaya modal untuk pembelian peralatan sebesar Rp33,884 miliar. Dengan kebutuhan anggaran tahun 2019 tersebut, Pemerintah Kota Cilegon perlu meningkatkan biaya rutin pengangkutan sampah sebesar 143% dibanding biaya pengangkutan sampah di tahun 2014.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran dan rekomendasi kebijakan. Untuk menanggulangi serta mencegah timbulnya inefisiensi dalam pengangkutan sampah, dimulai dengan membuat perencanaan yang baik. Alokasi sumber dana, sumber daya manusia, serta sarana yang ada, harus memperhatikan kebutuhan agar bisa menghasilkan kerja yang efisien. Jam kerja yang tersedia hendaknya bisa dioptimalkan sehingga waktu *off route* bagi tenaga kerja dan kendaraan bisa diminimalisir. Koordinator kebersihan di setiap Unit Pelaksana Teknis (UPT) memegang peranan penting dalam pengawasan kepada setiap petugas di lapangan. Mengingat inefisiensi kondisi pengangkutan saat ini banyak disebabkan dari komponen tenaga kerja, maka DKP Kota Cilegon dapat melakukan ekspansi wilayah atau area layanan pengangkutan sampah

dengan mengoptimalkan kendaraan pengangkut sampah yang tidak terpakai dari hasil optimasi. Dengan cara ini, dengan jumlah pengeluaran yang sama, DKP Kota Cilegon akan mampu menaikkan rasio pengangkutan sampahnya.

Terkait dengan pembiayaan pengelolaan sampah, analisis biaya dan manfaat bisa dilakukan untuk membandingkan pembiayaan: apakah pembiayaan hanya dengan APBD, menyerahkan kepada sektor swasta, atau kombinasi keduanya. Jika pembiayaan dengan APBD, apakah pengadaan peralatan pengangkutan sampah tersebut dalam bentuk pembelian barang modal atau dalam bentuk sewa. Pelibatan seluruh pengambil kebijakan dalam kegiatan pengelolaan sampah secara umum, akan memberikan kontribusi positif dalam keseluruhan tahapan pengelolaan sampah, termasuk di dalamnya adalah pengangkutan sampah. Semua pengambil kebijakan, mulai dari masyarakat (rumah tangga), pemerintah daerah, organisasi sosial kemasyarakatan, guru dan para akademisi, siswa, industri, politisi, serta perusahaan yang secara langsung bergerak dalam bidang pengelolaan sampah perlu disinergikan agar upaya menghasilkan sistem pengelolaan sampah yang terintegrasi (Joseph, 2006).

Beberapa hal yang menjadi keterbatasan dari penelitian ini bisa menjadi bahan perbaikan dalam penelitian selanjutnya. Beberapa data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan asumsi, yang tentunya tidak persis sama dengan kondisi sebenarnya. Beberapa data tersebut adalah data asumsi mengenai timbulan sampah per kapita, asumsi upah tenaga kerja, dan asumsi jarak tempuh kendaraan per kilometernya. Untuk penelitian selanjutnya, ada baiknya bisa melakukan penelitian lapangan terkait dengan timbulan sampah, karakteristiknya, perbedaan timbulan sampah berdasarkan kriteria wilayah, tingkat ekonomi dan musim, yang akan menambah kevalidan data mengenai timbulan sampah. Tenaga kerja yang terlibat dalam pengangkutan sampah ada yang sebagian berstatus PNS dan bukan PNS. Penelitian selanjutnya bisa memasukkan dua parameter upah atau gaji ini dalam analisisnya. Kemudian, data mengenai jarak tempuh kendaraan akan valid dengan observasi langsung kepada kendaraan yang beroperasi dengan memperhatikan umur dan kondisi kendaraan.

Model optimasi dalam penelitian ini baru terbatas pada model optimasi jarak rute perjalanan menggunakan model VRP dengan pembatasan kapasitas. Dengan model ini, TPS yang timbulan sampahnya melebihi kapasitas kendaraan tidak bisa

dimasukkan di dalam model sehingga tidak bisa dioptimasi. Penelitian selanjutnya bisa mencoba mengembangkan model VRP dengan *split delivery*, agar TPS yang memiliki timbulan sampah melebihi kapasitas kendaraan bisa langsung masuk dalam model optimasi. Penggunaan *split* ini akan bisa menurunkan biaya lebih rendah lagi dibanding tidak menggunakan *split* (Ho dan Haugland, 2004).

Terkait mengenai pelibatan sektor swasta dalam pengangkutan sampah di Kota Cilegon, bisa diteliti lebih lanjut dengan analisis biaya dan manfaat. Dengan adanya analisis yang lebih detail mengenai hal tersebut, pengambil kebijakan bisa menimbang lebih dalam mengenai kelebihan dan kekurangan keterlibatan sektor privat dalam aktivitas pengangkutan sampah di Kota Cilegon.

Daftar Pustaka

- [1] BPS Kota Cilegon. (2014). *Cilegon dalam Angka 2014*. Badan Pusat Statistik Kota Cilegon. Diakses dari https://cilegonkota.bps.go.id/websiteV2/pdf_publicasi/Cilegon-Dalam-Angka-2014.pdf. Tanggal akses 15 Agustus 2015.
- [2] BPS Kota Cilegon. (2015). *Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Menurut Lapangan Usaha Kota Cilegon Tahun 2010–2014*. Badan Pusat Statistik Kota Cilegon. Diakses dari https://cilegonkota.bps.go.id/websiteV2/pdf_publicasi/PDRB-Kota-Cilegon-Tahun-2014.pdf. Tanggal akses 15 Agustus 2015.
- [3] BSN. (1995). *Spesifikasi Timbulan Sampah untuk Kota Kecil dan Kota Sedang di Indonesia*. [SNI 19-3983-1995]. Badan Standarisasi Nasional.
- [4] BSN. (2002). *Tata Cara Teknik Operasional Pengelolaan Sampah Pekotaan*. [SNI 19-2454-2002]. Badan Standarisasi Nasional.
- [5] BSN. (2008). *Pengelolaan Sampah di Permukiman*. [SNI 3242-2008]. Badan Standarisasi Nasional.
- [6] Balai Teknik Air Minum dan Sanitasi Wilayah 2, Wiyung, Surabaya. (2010). *Materi Pelatihan Berbasis Kompetensi Bidang Persampahan*.
- [7] Bel, G., & Mur, M. (2009). Intermunicipal Cooperation, Privatization and Waste Management Costs: Evidence from Rural Municipalities. *Waste Management*, 29(10), 2772–2778.
- [8] Chakrabarti, S., Majumder, A., & Chakrabarti, S. (2009). Public-community Participation in Household Waste Management in India: An Operational Approach. *Habitat International*, 33(1), 125–130.
- [9] Cointreau-Levine, S. (1994). Private Sector Participation in Municipal Solid Waste Services in Developing Countries, Volume 1. The Formal Sector. *Urban Management and the Environment*, 13. Washington, D.C.: Urban Management Programme, UNDP/UNCHS/World Bank. Diakses dari <http://documents.worldbank.org/curated/en/325321468739287095/pdf/multi-page.pdf>. Tanggal akses 29 November 2015.
- [10] DKP. (2014). (Hasil olahan menggunakan *Google Maps* berdasarkan hasil wawancara dan file yang diberikan oleh Dinas Kebersihan dan Pertamanan).
- [11] Damanhuri, E., & Padmi, T. (2003). *Pengelolaan Sampah*. Bandung: Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung.
- [12] Hadiwiyoto, S. (1983). *Penanganan dan Pemanfaatan Sampah*. Jakarta: Yayasan Idayu.
- [13] Ho, S. C., & Haugland, D. (2004). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Split Deliveries. *Computers & Operations Research*, 31(12), 1947–1964.
- [14] Indonesia, R. (2008). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 2008 tentang Pengelolaan Sampah*.
- [15] Indonesia, R. (2012). *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 81 Tahun 2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga*.
- [16] Indonesia, R. (2014). *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 23 Tahun 2014 tentang Pemerintahan Daerah*.
- [17] Indonesia, R. (2015). *Lampiran Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2015 tentang Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional 2015–2019: Indonesia yang Berdaulat, Mandiri dan Berkepribadian Berlandaskan Gotong Royong, Buku II. Agenda Pembangunan Bidang*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/Badan Perencanaan Pembangunan Nasional.
- [18] Joseph, K. (2006). Stakeholder Participation for Sustainable Waste Management. *Habitat International*, 30(4), 863–871.
- [19] KELOPAK. (2013). *Mengukur Kemampuan Daerah Biayai Pengelolaan Sampah. KELOPAK: Sumber Informasi Kelola Sampah dengan Bijak, Edisi I*, 14–18.
- [20] Komilis, D. P. (2008). Conceptual Modeling to Optimize the Haul and Transfer of Municipal Solid Waste. *Waste management*, 28(11), 2355–2365.
- [21] Lindo Systems Inc. (2004). *Lingo User's Guide*. Diakses dari <http://www.lindo.com/>. Tanggal akses 27 Agustus 2015.
- [22] Murtadho, D., & Sa'id, E. G. (1988). *Penanganan dan Pemanfaatan Limbah Padat*. Jakarta: Mediyatama Sarana Perkasa.
- [23] NSWMA. (2011). *Privatization: Saving Money, Maximizing Efficiency & Achieving Other Benefits in Solid Waste Collection, Disposal, Recycling*. Washington, DC: National Solid Waste Management Association. Diakses dari <http://www.nswma.org/>. Tanggal akses 29 November 2015.
- [24] Pemerintah Kota Cilegon. (2010). *Visi dan Misi Kota Cilegon 2010–2015*. Diakses dari <http://cilegon.go.id/v2/index.php/pemerintahan/visi-dan-misi>. Tanggal akses 5 Desember 2015.
- [25] [Pemda Kota Cilegon]. (2015). *Rencana Induk dan Studi Kelayakan Sistem Pengelolaan Sampah Terpadu Kota Cilegon*. Slide presentasi Laporan Interim.
- [26] Sahoo, S., Kim, S., Kim, B. I., Kraas, B., & Popov Jr, A. (2005). Routing Optimization for Waste Management. *Interfaces*, 35(1), 24–36.
- [27] Slamet, J. S. (1994). *Kesehatan Lingkungan*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- [28] Tchobanoglous, G., Hilary, T., & Samuel, A. V. (1993). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. [International Edition]. New York: McGraw-Hill.
- [29] Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: Society of Industrial and Applied Mathematics.

Tabel 11: Data Lokasi TPS Kontainer Angkat

KODE LOKASI	LOKASI	KODE TRUK	JARAK DARI TPA (km)	KOORDINAT	
				LS	BT
	Depot / TPA		0		
K-01	Hotel Grand Mangku Putra	A1	9,9	-6.029.919	106.084.728
K-02	Terminal Seruni	A1	11,0	-6.021.982	106.083.695
K-03	Perumnas Cibeber	A8	7,7	-6.037.607	106.062.554
K-04	Lapas Cikera	A3	7,2	-6.056.869	106.055.869
K-05	Pagebangan	A5	7,0	-6.020.339	106.054.521
K-06	Pasar Blok F	A9	6,1	-6.024.423	106.050.101
K-07	Link. Samangraya	A3	10,6	-6.015.099	105.997.861
K-08	Link. Ramanuju (KWT)	A6	7,7	-6.010.549	106.036.566
K-09	Link. Ramanuju-Kubang Sepat	A5	7,3	-6.009.941	106.031.598
K-10	PT Multifab (KIEC)	A7	10,4	-6.010.206	106.009.745
K-11	PT Timah (KIEC)	A7	12,3	-5.998.809	106.018.284
K-12	PT Cabot (KIEC)	A8	13,2	-5.993.813	106.003.126
K-13	PT Rohm and Haas (KIEC)	A8	12,6	-6.003.230	106.013.908
K-14	Depan Kantor Korpri	A9	6,9	-6.016.582	106.041.972
K-15	Yayasan Hasyimiyah	A6	13,5	-6.021.467	105.972.099
K-16	Link. Penauan	A6	11,5	-6.011.361	105.986.673
K-17	Link. Pintu Air	A6	11,6	-6.011.127	105.989.490
K-18	PT Jawamanis Rafinasi	A6	12,3	-6.023.304	105.964.871
K-19	Link. Tegal Wangi (Rawa Arum)	A3	12,7	-5.977.382	106.013.449
K-20	Link. Tegal Wangi (MAN)	A1	12,1	-5.980.911	106.017.527
K-21	PT GTA	A8	13,3	-6.000.715	106.088.315
K-22	Perumahan Metro Cilegon	A1	9,5	-6.002.957	106.060.811
K-23	Yayasan Al-Ishlah	A2	8,4	-6.015.149	106.061.938
K-24	Link. Pecek	A2	10,4	-5.997.097	106.069.959
K-25	Rumah Dinas Walikota	A2	7,3	-6.017.320	106.053.548
K-26	Yayasan Darul Ishlah	A2	10,2	-6.007.933	106.077.685
K-27	Ramayana Cilegon	A5	8,9	-6.020.793	106.064.310
K-28	Bonakarta	A5	8,6	-6.010.763	106.051.867
K-29	Sucofindo Cilegon	A7	8,3	-6.020.698	106.061.637
K-30	RSUD Cilegon	A7	9,7	-6.001.750	106.067.594
K-32	PT. Vopak	A3	15,4	-6.018.492	106.068.174
K-33	Link. Kavling Merak	A4	21,0	-5.958.490	105.999.665
K-34	Terminal Terpadu Merak	A4	18,7	-5.922.450	106.004.934
K-35	Link. Cikuasa	A6	16,8	-5.934.767	106.000.259
K-36	Kantor Pemda	A2	8,5	-5.947.042	106.003.824
K-37	Kampus Untirta Cilegon	A3	9,4	-6.008.886	106.042.511
K-38	Mayofield Cilegon	A5	7,3	-5.996.275	106.032.278
K-39	Polres Cilegon	A7	8,6	-6.013.157	106.044.932

Sumber: DKP (2014), diolah

Tabel 12: Data Lokasi TPS Kontainer Tetap

NODE	LOKASI	TIMBULAN SAMPAH/HARI (m ³)	KOORDINAT	
			LS	BT
1	Depot / TPA	0	-6.063.383	106.024.061
2	Jalan Lingkar Selatan (Dari Bagendung ke PCI)	2	-6.041.243	106.077.800
3	Jalan Lingkar Selatan (Dari PCI ke Bagendung)	2	-6.048.943	106.060.191
4	Jl. A Yani Sucofindo-PCI (Utara)	5	-6.030.787	106.078.088
5	Jl. A Yani PCI-Sucofindo (Selatan)	5	-6.024.657	106.068.360
6	Jl. A. Yani Sucofindo-Pagebangan (selatan)	2	-6.019.503	106.057.529
7	Jl. SA Tirtayasa Pagebangan-Jgn Kali (Selatan)	2	-6.016.571	106.050.932
8	Jl. SA Tirtayasa Jgn Kali-Simpang (Selatan)	3	-6.012.943	106.045.434
9	Kelurahan Ramanuju	1	-6.011.084	106.043.650
10	Jl. SA Tirtayasa Simpang-Jbg kali (Utara)	3	-6.015.177	106.048.867
11	Jl. SA Tirtayasa Jgn Kali-Sucofindo (Utara)	4	-6.020.313	106.060.222
12	Jl. Ki Wasyid	3	-6.018.608	106.062.950
13	Dinas Sosial	4	-6.012.413	106.059.597
14	Pasar Kranggot	35	-6.018.453	106.068.175
15	Belakang Matahari Lama	3	-6.017.745	106.056.006
16	Semandaran (Kubang Laban)	7	-6.007.853	106.074.964
17	Sumampir	1,5	-6.007.856	106.043.491
18	Kel. Kotabumi	2	-5.991.198	106.048.227
19	Samangraya	6	-6.015.081	105.997.517
20	Ramanuju	1,5	-6.010.088	106.032.413
21	Krenceng	2	-6.009.401	106.024.050
22	Jl. R. Suprpto (s.d. Pasar Wisata Cigading)	3	-6.010.533	105.996.459
23	Jl. Katamso (s.d. JLS)	1,5	-6.018.568	105.969.722
24	Pelindo	2,5	-6.022.423,00	105.956.484
25	Jalan Lingkar Selatan (Dari Bagendung ke Jl. Anyer)	1,5	-6.029.980	105.964.737
26	Jalan Lingkar Selatan (Dari Jl. Anyer ke Bagendung)	1,5	-6.031.224	105.975.082
27	PT. Amoco	3	-5.975.620	106.003.658
28	Polsek Merak	7	-5.939.703	106.001.098
29	Kecamatan Pulomerak	4	-5.920.346	106.005.684
30	Belakang Pelabuhan Merak	4	-5.927.650	105.996.265
31	Pasar Baru Merak	6	-5.932.863	106.006.762
32	Jl. Puskesmas, Merak	2	-5.935.125	106.004.557
33	Seneja	2	-6.022.565	106.058.376
34	Pasar Pagebangan	4	-6.020.063	106.055.398
35	Stasiun Cilegon	2	-6.019.368	106.052.971
JUMLAH		138		

Sumber: DKP (2014) dan Wawancara, diolah

Node	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
1	0	24	12.6	10	11.5	8.2	8	7.2	8.7	5.8	8.1	8.7	8.1	10.4	7.7	8.6	8.2	10.6	10.6	8.7	8.1	11.6	14.3	13.2	11.8	11.4	14.5	16	11.5	10.7	10.3	10.8	8.1	7.2	7	
2	20.4	0	4.3	2.75	2.5	4.2	3	5.8	7.3	5.9	5.5	4.8	5.6	3	5.2	6.1	6.8	5.5	11.8	7.5	8.2	11.3	14.5	16.2	15.8	15.5	15.9	16.5	20.1	18.5	17.8	17.5	4.2	4.6	4.8	
3	8.1	2.5	0	3.25	3.4	5	4.7	5.4	6.8	6.5	5.1	5.4	5.4	7.5	4.8	7.2	6.5	8.5	10.4	7.1	8	11.1	12.7	13	11.5	11.3	11.5	16.1	15.7	17.5	17.4	16.5	4	3.6	4.2	
4	10.1	3.75	3.6	0	1.5	3.1	4	4.8	6.3	5.8	4.5	3.8	4.7	4.7	4.2	5.8	5.8	10.8	8.5	7.2	10.3	13.5	15.2	15.5	15.2	11.5	15.5	16.8	17.1	16.7	16.2	3.5	3.6	3.8		
5	8.7	5.8	5.6	3.1	0	1.2	1.1	2.9	4.3	4	2.5	1.6	2.8	3.5	2.9	4.6	4	5.4	8.5	4.4	5.3	8.4	11.6	13.3	14.1	14.1	10	13.6	17	15.2	14.8	14.3	1.5	1.7	2	
6	7.8	6.1	5.3	3.6	3.7	0	0.8	1.5	3	2.7	1.5	2.5	1.5	2.6	2.8	3.4	2.6	3	7.6	3	4	7.1	10.3	12	13	12.7	8.7	12.3	13.7	13.6	13.4	11.8	1.1	0.8	0.8	
7	7	6.2	6.8	3.6	3.7	1.8	0	0.75	1.2	1.9	1.7	1.2	2.6	1	3	1.8	4.2	6.8	2.2	3.2	6.2	9.5	11.2	12.4	12.1	7.5	11.5	14.8	15.1	13.8	13.3	2.1	1.5	1		
8	8.1	7.5	7.7	4.8	5	3.1	1.6	0	1.5	1.2	2.5	2.5	2.5	2.7	2.1	4.5	1.1	2.5	5	1.5	2.5	5.6	8.7	10.4	11.2	11	7.2	10.8	14.1	13.2	11.8	11.4	2.1	2.2	1.8	
9	7.5	7.1	7.2	4.8	4.6	2.7	1.5	2.4	0	0.75	2.1	2.6	2.1	2.5	1.7	3.6	2.8	3.4	5.8	1.4	2.5	5.4	8.6	10.2	11.1	10.8	7	10.6	14	13.2	11.8	11.3	2.7	1.9	1.6	
10	6.6	6.4	6.4	3.7	3.6	1.9	0.7	1.7	3.1	0	1.4	1.9	1.3	2.7	1	3.2	2.8	3.2	7.7	3.2	4.2	7.2	10.4	12.1	12.2	11.3	6.8	12.4	16	14.2	13.7	13.2	1.9	1.1	0.8	
11	7.6	5	5.5	2.5	2.4	0.25	1.3	2.1	3.5	3.2	0	1.1	1.9	2.7	1.5	2.5	2.1	2.6	8.1	3.6	4.5	7.6	10.8	12.5	12.5	12	9.2	12.8	16.2	14.4	14	13.5	0.8	0.9	1.1	
12	8.8	4.8	6.2	3.2	2.4	2	1.8	3.5	3.4	3.7	1.6	0	0.8	1.6	1	2.4	3.7	6.1	8.6	4.1	5	8.1	11.8	13	13.8	9.7	13.3	16.7	14.6	14.7	14.3	2	2.8	2.6		
13	8.1	6.4	6.9	3.1	3.2	1.8	2.7	1.8	2.5	3	1.4	0.8	0	1.7	0.8	1.8	2.8	2.9	7.9	3.2	4.3	7.4	10.6	12.2	13	12.8	9	12.6	16	14.2	14	13.5	2	2	1.8	
14	10.3	5	7.2	3.8	4	3.6	2.8	3.3	4.2	4.6	2.5	1.6	1.7	0	1.8	1.8	4.6	7	9.3	4.8	5.9	9	12.1	13.8	15	14.4	10.6	14.2	17.6	15.8	15.6	15.3	3	3.4	3.7	
15	8.3	5.6	6.2	3.8	3.1	1.1	1.9	2.2	3.6	3.4	0.6	1	0.8	1.8	0	2.6	3.3	5.7	8.2	3.7	4.7	7.8	10.9	12.6	13.4	13.2	9.3	13.8	16.5	14.5	14.3	13.8	1.2	1.5	1.8	
16	6.6	6.1	8.4	4.7	5	3.7	3.3	3.6	4.4	4.8	3.2	2.4	1.8	1.8	2.6	0	4.7	7.1	9.7	5.1	6.1	9.2	12.3	14.1	14.8	14.8	10.6	14.4	17.8	16	15.5	15.7	3.8	4.1	3.6	
17	7.9	7.5	7.6	4.8	4.9	3	1.8	2.8	3.9	3.1	2.5	3	2.5	3.9	2.1	4.3	0	2.4	6.3	1.7	2.7	5.8	9	10.7	11.4	11.2	7.4	11	14.4	12.6	12.1	11.8	3.1	2.2	2	
18	10.6	10.2	10.3	7.5	7.6	5.7	4.5	5.5	6.1	5.8	5.2	3.7	3.2	6.6	4.8	7	2.7	0	5	4.4	5.4	8.5	11.7	13.4	14.1	13.9	7.2	10.9	14.2	12.4	12	11.9	5.7	4.9	4.6	
19	10.9	11.5	11.3	10.7	10.8	8.9	7.7	8.7	9.3	8.5	8.4	6.9	6.3	9.7	7.9	10.1	9.9	8.5	0	4.3	5.6	13	17	14	13.2	8	9.8	13.5	13.8	13	14.8	14.3	8.9	7.6	7.3	
20	7.8	6.9	8.1	6.1	6.3	4.4	3.1	4.1	1.8	2.9	3.6	4.3	3.6	5.2	3.4	5.6	1.4	3.8	4.5	0	1	4.1	7.2	8.9	9.7	9.9	7.4	11	14.6	12.8	12.2	11.7	4.4	3.1	2.8	
21	8.1	6.8	8.9	7.1	7.2	5.3	4.1	5.1	2.7	3.4	4.8	5.3	4.8	6.2	4.4	6.6	2.9	4.8	3.6	1	0	3.1	6.8	8	8.8	8.5	8.4	12	12.4	13.6	12.1	12.8	3.3	4.5	4.2	
22	11.7	12.8	12	10.2	10.4	8.4	7.2	8.2	5.8	6.5	7.9	8.4	7.9	9.8	7.9	9.7	2.4	7.9	1.3	4.1	3.1	0	3.2	4.9	5.6	5.4	5.4	13.1	13.4	14.8	14.1	13.8	8.5	7.6	7.4	
23	14.3	15	13.6	13.4	13.5	11.6	10.4	11.4	9	9.7	11.1	11.6	11	12.4	10.6	12.8	8.6	11	9.7	7.2	6.3	5.2	0	1.7	2.5	2.3	12.5	16.1	16.5	17.7	17.3	16.8	11.6	10.8	10.5	
24	12.2	13.2	13.9	13.1	13.2	12.1	13.1	12.7	11.4	12.8	13.3	12.7	14.1	12.3	14.6	12.3	12.7	5.4	8.9	8	4.8	1.7	0	1.4	2.3	3.2	17.8	17.2	18.4	18	18.3	13.3	12.5	12.2	12.1	
25	11.8	13.6	13.8	13.4	13.3	13.6	12.4	12.7	11.9	11.7	12.6	13.6	13	14.4	12.7	14.8	12.6	13	5.7	9.2	8.3	5.2	2	1.4	0	1.2	14.2	18.1	18.5	19.7	19.3	18.8	13.8	13.2	12.7	12.5
26	10.6	12.7	12.3	14.2	14.6	12.5	11.2	11.5	11.4	12.3	12.7	13	13.4	14.8	12.5	14.2	11.9	13.4	4.5	5	8.1	5.6	4.5	3.5	2	0	14.4	18	18.4	19.6	19.1	18.6	11.6	11.5	11.5	
27	14.7	14.2	14.3	11.8	11.7	9.8	8.6	9.6	7.1	7.9	9.3	9.7	9.2	10.6	8.8	11	9.7	7.2	9.9	7.8	6.5	8.4	12.9	14.5	15.1	14.9	0	4.3	7.9	6.1	5.7	5.3	9.8	9	8.7	
28	12.4	17.9	16.5	15.2	15.4	13.5	12.3	13.3	12.8	11.8	13	13.4	13.9	14.3	12.5	14.7	12.4	10.9	13.6	11.2	12.2	13.1	16.2	17.9	18.8	18.5	4.7	0	3.4	1.6	1.1	0.9	13.5	12.7	12.4	
29	11.7	11.2	11.6	10.6	10.7	10.8	10.6	10.7	10.1	14.8	16.3	16.7	16.2	17.6	16.8	18	16.7	14.2	16.5	14.5	15.5	16.4	18.6	21.3	21.1	21.5	1.5	3.6	0	1.8	3.4	2.9	16.8	16	15.7	
30	13.9	19.4	18.8	18.8	18.9	1.5	13.8	14.8	12.9	13.1	14.5	14.9	14.4	15.8	14	16.2	11.9	12.4	15.1	12.7	13.7	14.6	17.8	19.5	20.3	20.1	6.1	1.8	1.8	0	1.8	1.3	15	14.2	13.6	
31	12.2	13.2	13.9	13.1	13.2	12.1	13.1	12.7	11.4	12.8	13.3	12.7	14.1	12.3	14.6	12.3	12.7	5.4	8.9	8	4.8	1.7	0	1.4	2.3	3.2	17.8	17.2	18.4	18	18.3	13.3	12.5	12.2	12.1	
32	10.8	12.8	13.8	13.8	13.8	13.8	12.4	12.7	11.9	11.7	12.6	13.6	13	14.4	12.7	14.8	12.6	13	5.7	9.2	8.3	5.2	2	1.4	0	1.2	14.2	18.1	18.5	19.7	19.3	18.8	13.8	13.2	12.7	12.5
33	7.3	6.1	6	2.6	2.6	0.8	1.5	2.2	3.7	3.4	2	1.4	1.3	2	1.6	3.8	3.3	5.7	8.3	3.7	4.7	7.8	11	11.7	12.6	12.5	9.4	12	14.4	14.5	14.1	13.8	0	0.8	1.1	
34	7.2	6.1	4.9	3.4	3.5	1.6	0.75	1.2	1.9	2.6	1.2	1.7	2	2.5	0.75	2.5	2.6	3	7.5	3	3.9	7	10.2	11.6	12.7	12.4	6.6	12.2	15.6	15.6	15.4	12.8	0.8	0	0.5	
35	7	6	5.2	3.5	3.4	1.5	0.45	1.2	1.9	2.8	1	1.5	1.7	2.4	0.6	3.2	2.9	4.7	7.2	2.7	3.6	6.6	9.9	11.6	12.3	12.2	8.5	11.9	15.3	15.3	15.1	11.8	1.1	0.9	0	

Gambar 11: Matriks Jarak Antar-TPS (Node) Sistem Kontainer Tetap (km)
 Sumber: Google Maps, diolah