



Artikel Penelitian

Penjadwalan dan Penentuan Rute Distribusi Komoditas ke Wilayah Timur Indonesia

Erika Fatma, Winanda Kartika

Prodi Manajemen Logistik Industri Elektronika, Politeknik APP Jakarta, Jakarta, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 28 Maret 2017

Revisi Akhir: 13 Mei 2017

Diterbitkan Online: 17 Mei 2017

KATA KUNCI

Distribusi
CVRP
Penentuan jadwal
Penentuan rute

KORESPONDENSI

Telepon: +62 (021) 7867382

E-mail: rika-fatma@kemenperin.go.id

A B S T R A C T

Indonesia's geographical conditions, particularly in the eastern region, which is archipelago has its own challenges in the distribution of commodities, such as rice. Most of the rice needed in eastern Indonesia, is still supplied from Java Island. The most suitable transportation mode for rice distribution in the eastern region of Indonesia, is by sea (ships). In this study, a ship routing and scheduling model for commodity distribution in the eastern region of Indonesia was developed, using capacitated vehicle routing problem (CVRP) method. The model was built by considering the number of demands on the destination, ship capacity, and ports service time. Modeling was developed to determine distribution route and schedule that can provide total minimum cost and meet all of the restrictions.

1. PENDAHULUAN

Aktivitas logistik di Indonesia, saat ini masih terkendala dengan masalah inefisiensi dan ketidakaturan dalam sistem logistik. Hal ini menyebabkan tingginya kesenjangan harga antara pusat produksi dengan daerah lain yang jauh dari produksi. Selain itu, peraturan di bidang logistik belum mengarah kepada efisiensi operasi dan daya saing produksi. Ketidakefisienan sistem logistik di Indonesia membuat harga produk menjadi tinggi. Di Indonesia, rata-rata biaya logistik berkontribusi sekitar 20-25% dari pembentukan harga jual, dan 70% dari total biaya logistik, berasal dari transportasi/aktivitas pengangkutan barang [1]

Kondisi geografis Indonesia, khususnya wilayah timur, yang merupakan wilayah kepulauan menyebabkan aktivitas distribusi/transportasi menjadi lebih menantang. Moda transportasi yang paling sesuai untuk pendistribusian komoditi adalah transportasi melalui laut. Sesuai data Direktorat Jenderal Perhubungan Laut, Kementerian Perhubungan ada empat (4) tipe kapal yang umum digunakan untuk pendistribusian komoditas, antara lain kapal *carrier*, *tanker*, *container* dan *general cargo*. Distribusi untuk komoditas ke wilayah timur, umumnya dilakukan melalui pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya.

Berdasarkan data Dirjen Perhubungan Laut, Kementerian Perhubungan, terdapat 16 pelabuhan aktif yang dilewati kapal untuk pendistribusian komoditas ke wilayah timur Indonesia, yang terdapat di enam propinsi yaitu NTB, NTT, Maluku, Maluku Utara, Papua dan Papua Barat. Pada pengangkutan komoditas, kapal yang digunakan dibedakan atas jenis komoditasnya. Komoditas beras, gula, tepung terigu, dan kedelai diangkut dengan kapal container yang mengangkut muatan dalam bentuk karung. Selain itu, masing-masing kapal juga memiliki kapasitas muatan yang berbeda-beda.

Disparitas harga komoditas disebabkan masalah transportasi dan ketidaktersediaan kapal untuk mengangkut komoditas menuju wilayah timur Indonesia. Transportasi kapal memiliki perbedaan dalam kapasitas, penentuan rute dan penugasan kapal itu sendiri. Perbedaan utama dibanding penentuan rute kendaraan standar, perbedaan karakteristik operasional yaitu kapasitas, kecepatan, struktur biaya dan penjadwalan kapal yang memiliki karakter ketidakpastian tinggi. Selain itu, tiap-tiap pelabuhan memiliki karakteristik berbeda sehingga tidak semua pelabuhan dapat dilalui oleh semua kapal dan juga tipe kapal yang digunakan pun akan bervariasi sesuai dengan karakteristik komoditi yang dikirim.

Untuk mengatasi disparitas harga yang tinggi, diperlukan perencanaan untuk membuat pelabuhan Tanjung Perak sebagai *distribution center* komoditas strategis menuju wilayah timur Indonesia, yang dipengaruhi jumlah permintaan tiap pelabuhan. Penelitian ini melakukan optimasi penjadwalan dan penentuan rute kapal yang dapat memenuhi seluruh permintaan di setiap wilayah pelabuhan tujuan dimana pengiriman dilakukan pada satu pelabuhan asal yaitu pelabuhan Tanjung Perak yang akan dijadikan *distribution center*.

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa batasan, antara lain: Komoditas yang diteliti adalah general cargo dengan komoditas utama beras; Wilayah yang diteliti dibatasi untuk pelabuhan di Maluku, Maluku Utara, Papua Barat, dan Papua. Asumsi yang digunakan antara lain; jumlah, jenis dan kapasitas kapal yang dibutuhkan sudah tersedia; kapasitas di *distribution center* tidak terbatas; kecepatan setiap kapal diasumsikan tetap. Penelitian bertujuan untuk membangun sistem penjadwalan dan penentuan rute kapal yang optimal untuk pendistribusian komoditas dari *distribution center* Surabaya ke beberapa pelabuhan di wilayah timur Indonesia dengan biaya minimum.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Logistik

Logistik pertama kali diperkenalkan pada awal tahun 1900-an, kasus awal logistik adalah ketika petani merasakan mahalnya biaya distribusi komoditas produk pertanian [2]. Kemudian, perhatian terhadap logistik ditujukan terhadap masalah utilisasi dan efisiensi kegiatan distribusi yang puncaknya terjadi pada Perang Dunia II. Pada awal tahun 1950-an mulai diperkenalkan konsep persediaan sebagai dasar untuk menjamin kelancaran distribusi. Jika kegiatan distribusi fokus di bidang penghantaran barang, maka persediaan menjamin ketersediaan barang yang dihantarkan tersebut. Sistem distribusi dan persediaan terus berkembang dan menjadi komponen utama sistem logistik.

Sistem logistik terdiri dari berbagai aktivitas yang direncanakan, diimplementasikan dan dikendalikan oleh manajemen logistik. Aktivitas logistik sendiri didefinisikan sebagai penggabungan antara aliran informasi, transportasi, penanganan material persediaan, dan pergudangan. Christopher [3] mendefinisikan logistik sebagai aktivitas untuk menyediakan beberapa fungsi, termasuk transportasi, penyimpanan, perakitan, pemeriksaan, pemberian label, pengepakan, dan dokumentasi, serta layanan penelitian dan pengembangan produk/pelanggan. Bowersox *et al.* [4], mengungkapkan logistik merupakan integrasi antara informasi, transportasi, persediaan, pergudangan, penanganan material, dan pengepakan, dimana semua bagian tersebut saling terkait, berintegrasi dan berstimulasi membentuk kesatuan manajemen logistik. Menurut Stock dan Lambert [2], logistik merupakan sistem yang merencanakan, dan mengontrol efisiensi serta efektifitas aliran dan penyimpanan barang, pelayanan, serta informasi dari titik asal hingga ke titik tujuan untuk memenuhi kebutuhan konsumen akhir. Misi sistem logistik adalah untuk mendistribusikan produk secara tepat (tempat, waktu, kondisi harga) dan optimalisasi nilai atau performansi yang diberikan seperti minimasi biaya operasi total atau maksimasi keuntungan, dengan memenuhi pembatas-pembatas yang ada [5].

Berdasarkan definisi sebelumnya dapat disimpulkan bahwa logistik adalah aliran barang, informasi dan uang dari titik asal (supplier) ke titik tujuan (konsumen). Sedangkan manajemen logistik adalah proses perencanaan, pengimplementasian dan pengendalian aliran barang, informasi dan uang dari supplier ke konsumen untuk memenuhi kebutuhan konsumen pada waktu, jumlah dan tempat yang tepat.

Menurut Cordeau *et al.* [6], perencanaan logistik mencakup pengambilan keputusan mengenai jumlah, lokasi, kapasitas, teknologi produksi dan gudang. Perencanaan logistik mencakup pemilihan pemasok, pemilihan lokasi, saluran distribusi, moda transportasi, aliran bahan mentah, setengah jadi, dan produk jadi. Berdasarkan jangka waktu perencanaan, terdapat tiga kategori perencanaan logistik yaitu tipe perencanaan strategis, taktis, dan operasional. Pemilihan rute dan penjadwalan kapal termasuk dalam perencanaan jangka menengah [2].

2.2. Transportasi

Aktivitas logistik yang berperan penting dalam distribusi produk, adalah transportasi. Keputusan transportasi yang perlu dianalisis dalam merancang dan mengoperasikan suatu rantai pasok menurut Rushton *et al.* [7]:

- a. Moda transportasi
Moda transportasi merupakan cara produk dipindahkan dari satu lokasi ke lokasi lain dalam rantai pasok. Setiap moda memiliki sifat yang berbeda-beda, seperti kecepatan, ukuran pengiriman, biaya pengiriman dan fleksibilitas perusahaan pada penggunaan moda yang diperlukan.
- b. Rute dan pemilihan jaringan
Rute merupakan jalur pengiriman produk sedangkan jaringan adalah sekumpulan lokasi dan jalur/rute pengiriman produk. Pengiriman produk dapat dilakukan sendiri atau melalui distributor.
- c. *Inhouse dan outsourcing*
Dalam aktivitas transportasi tradisional fungsi transportasi umumnya dilakukan sendiri, namun saat ini transportasi lebih banyak dilakukan menggunakan pihak ke tiga.

2.3. Transportasi dalam Logistik

Transportasi merupakan kegiatan logistik yang secara geografis memindahkan produk dari satu lokasi ke lokasi lain. Komponen utama dalam transportasi adalah pengelolaan pergerakan materi (bahan baku, komponen, barang setengah jadi, dan barang jadi) dari lokasi asal ke lokasi tujuan. Produk yang selesai diproduksi pada titik produksi, masih memiliki nilai rendah bagi konsumen, kecuali produk tersebut dapat dipindahkan atau disediakan pada titik dimana produk tersebut akan dikonsumsi. Terdapat tiga (3) kategori sistem pelayanan transportasi yang terdiri dari; Moda dasar (*primary modes*) yaitu alat transportasi untuk mengirim produk, seperti kereta api, truk, kapal laut, pesawat udara dan jaringan pipa; Agen transportasi, sebagai fasilitator dan juga koordinator pengiriman barang, seperti agen pengiriman, asosiasi pengiriman dan broker transportasi; *Carrier*, yang hanya menangani pengiriman barang dalam ukuran/volume kecil, seperti *federal express, united parcel services, parcel post* dan layanan pos [8].

2.4. Rute dan Penjadwalan

Terdapat tiga masalah penentuan rute dan penjadwalan kendaraan, yaitu masalah penentuan rute kendaraan (*vehicle routing problem*), penentuan rute dan penugasan kapal (*ships routing problem*) serta masalah penjadwalan kru angkutan (*crew scheduling problem*) [9]. Masalah penentuan rute kapal bertujuan untuk menentukan set rute yang dapat meminimasi jarak tempuh total untuk memenuhi seluruh permintaan pelanggan.

Sebuah rute atau trip mencakup urutan saat mengunjungi pelanggan dengan ketentuan, tiap kendaraan berangkat dan berakhir di suatu depot. Rute merupakan jalur yang ditunjukkan oleh satu kendaraan yang akan mengunjungi tiap pelanggan masing-masing satu kali. Lebih lanjut, karena keterbatasan kapasitas angkut kendaraan, maka masalah penentuan rute kendaraan standar sering memasukan kapasitas angkut sebagai batasan, yang disebut dengan *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)* [10].

Perbedaan antara penentuan penugasan kendaraan standar dengan penentuan rute dan penugasan kapal menurut Bausch [11], adalah:

- Tiap kapal memiliki karakteristik operasional berbeda diantaranya ukuran kapasitas, kecepatan dengan yang lain termasuk dalam struktur ongkosnya.
- Marine routing problem sering melibatkan beberapa produk yang harus dikirimkan dalam kompartemen terpisah dalam satu kapal. Berbeda dengan package products yang dapat disimpan secara bersamaan dalam kompartemen yang sama.
- Kapal memiliki ukuran bervariasi dengan ukuran kompartemen yang berbeda. Ketika pengiriman terdiri lebih dari satu produk yang harus dimuat dalam satu kapal, jumlah produk harus disesuaikan agar sesuai dengan kompartemen yang tersedia.
- Pelabuhan hanya mempunyai satu atau sedikit lokasi bongkar muat
- Kapal tidak perlu kembali ke pelabuhan asal
- Penjadwalan kapal melibatkan ketidakpastian yang tinggi dan waktu pengiriman biasanya lebih lama, namun dapat beroperasi sepanjang waktu.
- Lingkup penjadwalan kapal tergantung pada besarnya cakupan mode operasi kapal.

Membangun model matematika dari suatu sistem transportasi merupakan bagian dari riset operasional. Penelitian operasional merupakan ilmu terkait dengan penerapan metode pengambilan keputusan, khususnya pengalokasian sumber daya yang terbatas. Aktivitas primer dalam penelitian ini adalah formulasi model matematika dari sistem.

Sistem merupakan sekumpulan elemen keseluruhan yang terkait satu sama lain. Model merupakan bentuk sederhana yang dapat menggambarkan sistem. Model matematika menggambarkan perilaku sistem menggunakan persamaan dan hubungan logis. Fungsi dan hubungan logis sistem, menggambarkan perilaku sistem model matematika melibatkan beberapa komponen lain. Variabel keputusan merupakan variabel yang memiliki kendali dalam pengambilan keputusan. Parameter merupakan nilai yang tidak memiliki kendali dalam pengambilan keputusan. Konstrain adalah batasan pengambilan keputusan yang melibatkan satu atau

lebih variabel keputusan. Fungsi tujuan merupakan ukuran untuk optimasi tujuan (maksimasi atau minimasi). Dalam model matematika, variabel keputusan, parameter, batasan, dan tujuan digunakan dalam persamaan dan/atau hubungan logis.

2.5. Vehicle Routing Problem (VRP)

VRP merupakan salah satu bentuk masalah transportasi dalam distribusi barang kepada pelanggan menggunakan kendaraan dengan tujuan meminimasi beberapa tujuan distribusi. Hal ini dapat dilakukan dengan menentukan jumlah kendaraan optimal yang digunakan serta rute yang harus ditempuh untuk masing-masing kendaraan dalam memenuhi permintaan pelanggan [12]. Tujuan dari VRP dasar adalah untuk penentuan rute NV yang memberikan jarak total minimum dengan asumsi tiap kendaraan berangkat dari depot dan kembali lagi ke depot semula. Secara matematis, VRP dijelaskan sebagai berikut:

Diketahui sebuah jaringan $G=(N, L)$ dengan N menunjukkan sekumpulan node $N=(0, 1, \dots, n)$ dan $L=\{(i, j); i, j \in N, i \neq j\}$ menunjukkan himpunan arc (link).

Node 0 menunjukkan depot dengan sejumlah NV kendaraan. Matriks jarak D didefinisikan pada L . Jika $d_{ij} = d_{ji}$ untuk semua (i, j) maka permasalahan dapat dikatakan simetri dan *arc* merepresentasikan busur tidak berarah.

Permintaan pelanggan i dinyatakan dengan q_i dan jumlah permintaan pelanggan dalam satu rute tidak boleh melebihi kapasitas kendaraan Q_k .

Tujuan dari VRP dasar ini adalah penentuan rute NV yang memberikan jarak total minimum dengan setiap kendaraan berangkat dari depot dan kembali lagi ke depot. Formulasi model matematik untuk VRP dasar dinyatakan sebagai berikut:

Minimasi

$$\sum_i \sum_j \sum_k d_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Dengan pembatas:

$$\sum_i \sum_j x_{ijk} \quad (2)$$

$$\sum_i x_{ijk} - \sum_j x_{pjk} = 1 \text{ untuk semua } j \quad (3)$$

$$\sum_i q_i \left(\sum_j x_{ijk} \right) \leq Q_k \text{ untuk semua } k \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ojk} \leq 1 \text{ untuk semua } k \quad (5)$$

$$y_i - y_j + n \sum_{k=1}^{NV} x_{ijk} \leq n - 1 \quad (6)$$

3. METODOLOGI

Dalam penelitian ini, ada beberapa istilah yang digunakan yang berkaitan dengan penjadwalan dan penentuan rute kapal. Kapal didefinisikan sebagai kapal angkut *general cargo* yaitu kapal yang digunakan untuk mengangkut komoditas berbentuk curah seperti beras, gula, tepung, susu bubuk yang dikirimkan dalam bentuk karung. Rute kapal adalah jalur yang menghubungkan titik-titik pelabuhan yang dilalui oleh setiap kapal. Sementara itu, jadwal kapal adalah interval waktu kunjungan kapal ke setiap titik pelabuhan yang dilewati oleh rutenya.

Metode penelitian yang dilakukan terkait dengan permasalahan penjadwalan dan penentuan rute kapal. Model ini dikembangkan menggunakan model *liner shipping*. Pemodelan sistem dengan *liner shipping* ditujukan untuk mengoperasikan kapal kapal kargo umum berdasarkan buku panduan perjalanan yang telah dipublikasikan, dimana kapal beroperasi sesuai dengan jadwal dan rute yang ditetapkan. Sistem pendistribusian komoditas ke wilayah timur Indonesia mewakili sistem serupa dengan model *liner shipping*. Tujuan akhir sistem penjadwalan dan penentuan rute kapal ini adalah mencari satu himpunan rute dan penugasan kapal yang layak dan dapat memenuhi kondisi sebagai berikut:

- Tiap pelabuhan paling sedikit dilayani oleh satu rute
- Tiap rute hanya dilayani oleh satu kapal

Solusi terbaik adalah solusi yang dapat memberikan biaya total transportasi yang paling kecil. Pada penelitian ini, model acuan yang digunakan, menggunakan model pemecahan masalah yang diusulkan oleh Reinhard dkk, [13]. Model ini digunakan untuk penyelesaian permasalahan mengenai penentuan dan penugasan kapal barang berdasarkan permintaan di tiap pelabuhan.

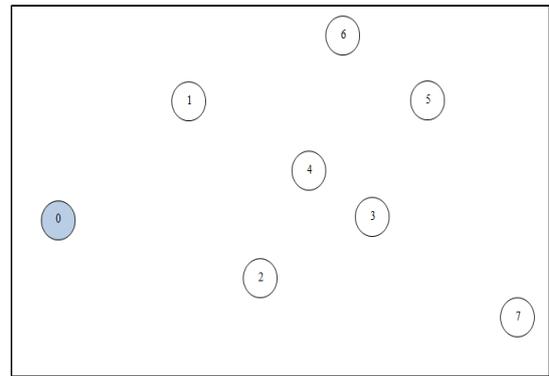
Penelitian yang dilakukan mempertimbangkan pemindahan barang (*transshipment cargo*) dalam penentuan rute dan jadwal kapal. Model acuan untuk penentuan rute dan penugasan kapal dengan mempertimbangkan rute kapal dan pemindahan kargo yang dikembangkan oleh [12] dan [14], dengan menambahkan batasan waktu pelayanan pelabuhan. Model dalam penelitian ini juga menjamin permintaan di pelabuhan dapat terpenuhi dengan biaya operasional yang minimum.

4. PENGEMBANGAN MODEL

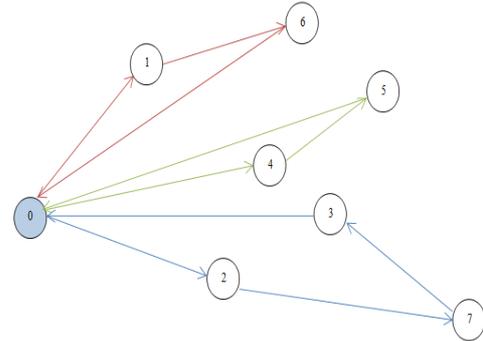
4.1. Definisi Model

Gambaran umum permasalahan penentuan rute dan penugasan kapal adalah sebagai berikut: Misal terdapat suatu himpunan pelabuhan N . Kapal berangkat dari pelabuhan asal i ke beberapa pelabuhan tujuan j . Jarak antar pelabuhan dinyatakan dengan D_{ij} (satuan mil), dan dianggap jarak d_{ij} sama dengan d_{ji} . Kemudian, terdapat himpunan kapal K yang tersedia yang jumlahnya tidak terbatas. Tiap kapal $k \in K$ memiliki spesifikasi kecepatan v_k (dalam satuan mil laut/jam).

Kriteria performansi yang digunakan untuk menentukan solusi terbaik adalah total biaya perjalanan kapal minimum. Untuk lebih jelasnya, ilustrasi dari permasalahan dan solusi untuk VRP yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Himpunan Pelabuhan



Gambar 2. Contoh solusi untuk VRP

Gambar 1, menunjukkan himpunan pelabuhan yang terdiri dari 1 pelabuhan asal dan 7 pelabuhan tujuan. Keterangan pelabuhan adalah sebagai berikut:

0	Surabaya	4	Tual
1	Ambon	5	Kaimana
2	Saumlaki	6	Fak-Fak
3	Dobo	7	Merauke

Selanjutnya, pada Gambar 1 terlihat contoh solusi dimana setiap pelabuhan dilayani satu rute kapal, tiap rute hanya dilayani oleh satu kapal, serta tiap kapal hanya melayani satu rute. Selain itu, setiap kapal melayani rute tetap dan berangkat dari pelabuhan asal dan kembali lagi pelabuhan asal tanpa melewati pelabuhan-pelabuhan yang telah dilewati sebelumnya.

Asumsi-asumsi yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Spesifikasi kapal yang digunakan heterogen dan mempunyai kapasitas yang berbeda.
- Komoditas yang dikaji pada model ini hanya beras (produk tunggal).
- Biaya tetap (*fixed cost*) kapal untuk mengangkut beras berbeda untuk setiap kapal tergantung dari kapasitas kapal.
- Permintaan di pelabuhan i merupakan total kebutuhan beras sesuai dengan coverage area pelabuhan i .
- Jarak antar pelabuhan adalah simetris
- Kecepatan tiap kapal adalah konstan.
- Jenis operasi kapal yang diterapkan adalah *liner operation*.
- Waktu berlabuh tiap kapal berbeda pada setiap pelabuhan.

Indeks yang akan digunakan dalam penelitian ini disajikan pada bagian nomenklatur, di bagian akhir artikel ini.

4.2. Formulasi Model

4.2.1. Fungsi Tujuan

Fungsi tujuan dari model ini adalah meminimumkan total biaya perjalanan kapal, yang dirumuskan sebagai berikut:

Minimasi total biaya perjalanan kapal

$Z =$ total biaya perjalanan kapal k pada rute \times bilangan biner yang menyatakan bahwa rute r yang dilayani oleh kapal k terdapat dalam solusi atau tidak.

$$C_{ijk} = d_{ij} \times \beta_k$$

$$Z = \sum_{k \in K} \alpha_k z_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk} X_{ijk}$$

4.2.2. Fungsi Pembatas

Pembatas Rute

Pembatas rute ini menjamin bahwa tiap rute hanya dilayani oleh satu kapal. Pembatas ini dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\sum_{k=1}^K Y_{ik} = 1, \quad i \neq 1$$

Pembatas Kapal

Pembatas ini menjamin jika kapal k melayani pelabuhan i , maka kapal yang sama harus masuk dan keluar node kecuali depot. Pembatas ini dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\sum_{j=1}^J X_{ijk} = Y_{ik}, \quad \forall i \in I; k \in K \text{ dimana } i \neq j$$

Pembatas Kapasitas

Pembatas kapasitas kapal ini merupakan pembatas-pembatas yang berfungsi untuk menjamin komoditas yang diangkut dari pemasok sesuai dengan kapasitas kapal. Pembatas ini dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\sum_{i=1}^I D_i \cdot Y_{ik} \leq Q_k \cdot z_k, \quad \forall k \in K$$

Pembatas Waktu Pelayanan

Pembatas waktu pelayanan ini merupakan pembatas-pembatas yang berfungsi untuk menjamin bahwa pelayanan harus diantara jam buka dan jam tutup pelabuhan. Pembatas ini menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$a_i \leq \tau_i \leq b_i, \quad \forall i \in I$$

Pembatas Time Window

Pembatas time window merupakan pembatas yang berfungsi

untuk menjamin waktu pengaturan pelayanan di pelabuhan. Pembatas ini dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$T_{ik} \geq \pi_k, \quad \forall k \in K$$

$$\tau_i \geq T_{ik}, \quad \forall k \in K; i \in I; i \neq 1$$

$$T_{jk} \geq \pi_k + w_{ijk} - M(1 - X_{ijk}) \quad \forall k \in K; j \neq 1$$

$$T_{jk} \geq \tau_i + s_i + w_{ijk} - M(1 - X_{ijk}), \quad \forall k \in K; j \neq 1$$

Pembatas Biner

Pembatas ini bersifat biner terhadap X_{ijk}, Y_{ik}, z_k , dimana akan bernilai 1 jika pelabuhan dilayani oleh kapal k terdapat dalam solusi dan X_{ijk}, Y_{ik}, z_k akan bernilai 0 jika terjadi kondisi sebaliknya, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, j \in J, k \in K$$

$$Y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, k \in K$$

$$z_k \in \{0, 1\}, \quad k \in K$$

4.2.3. Model Matematis

Berdasarkan fungsi tujuan dan fungsi pembatas yang sudah diuraikan, maka dapat dirumuskan dalam bentuk pemrograman linier bilangan bulat atau integer linear programming (ILP). Berikut ini adalah formulasi model akhir:

Fungsi Tujuan:

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

Fungsi Pembatas:

$$\sum_{k=1}^K Y_{ik} = 1, \quad i \neq 1$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijk} = Y_{ik}, \quad \forall i \in I; k \in K; i \neq j$$

$$\sum_{i=1}^I D_i \cdot Y_{ik} \leq Q_k \cdot z_k, \quad \forall k \in K$$

$$a_i \leq \tau_i \leq b_i, \quad \forall i \in I$$

$$T_{ik} \geq \pi_k, \quad \forall k \in K$$

$$\tau_i \geq T_{ik}, \quad \forall k \in K; i \in I; i \neq 1$$

$$T_{jk} \geq \pi_k + w_{ijk} - M(1 - X_{ijk}) \quad \forall k \in K; j \neq 1$$

$$T_{jk} \geq \tau_i + s_i + w_{ijk} - M(1 - X_{ijk}), \quad \forall k \in K; j \neq 1$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, j \in J, k \in K$$

$$Y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, k \in K$$

$$z_k \in \{0, 1\}, \quad k \in K$$

4.2.4. Verifikasi Model

Tahap verifikasi model bertujuan untuk memastikan bahwa model yang dirumuskan benar secara matematis dan konsisten secara logis. Verifikasi dilakukan dengan memeriksa dimensi setiap ekspresi matematis yang ada. Kedua ruas seluruh ekspresi matematis harus memiliki dimensi yang sama.

Fungsi Tujuan

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

$$\text{Rupiah} = \text{Rupiah} \times \text{tanpa satuan} + \text{mil} \times \frac{\text{Rupiah}}{\text{mil}} \times \text{tanpa satuan}$$

$$\text{Rupiah} = \text{Rupiah} + \text{Rupiah}$$

Dapat dilihat bahwa ekspresi matematis dalam fungsi tujuan memiliki dimensi yang sama untuk ruas kiri dan kanan sehingga model matematis untuk pembatas tujuan terverifikasi.

Pembatas Rute

$$\sum_{k=1}^K Y_{ik} = 1, \quad i \neq 1$$

$$\text{tanpa satuan} = \text{tanpa satuan}$$

Pembatas Kapal

$$\sum_{j=1}^J X_{ijk} = Y_{ik}, \quad \forall i \in I; k \in K \text{ dimana } i \neq j$$

$$\text{tanpa satuan} = \text{tanpa satuan}$$

Pembatas Kapasitas

$$\sum_{i=1}^I D_i \cdot Y_{ik} \leq Q_k \cdot z_k, \quad \forall k \in K$$

$$\text{ton} \times \text{tanpa satuan} \leq \text{ton} \times \text{tanpa satuan}$$

Pembatas Waktu Pelayanan

$$a_i \leq \tau_i \leq b_i, \quad \forall i \in I$$

$$\text{jam} \leq \text{jam} \leq \text{jam}$$

Pembatas Time Window

$$T_{ik} \geq \pi_k, \quad \forall k \in K$$

$$\text{jam} \geq \text{jam}$$

$$\tau_i \geq T_{ik}, \quad \forall k \in K; i \in I; i \neq 1$$

$$\text{jam} \geq \text{jam}$$

$$T_{jk} \geq \pi_k + w_{ijk} - M(1 - X_{ijk}) \quad \forall k \in K; j \neq 1$$

$$\text{jam} \geq \text{jam} + \text{jam} - \text{tanpa satuan}$$

$$\text{jam} \geq \text{jam}$$

$$T_{jk} \geq \tau_i + s_i + w_{ijk} - M(1 - X_{ijk}), \quad \forall k \in K; j \neq 1$$

$$\text{jam} \geq \text{jam} + \text{jam} + \text{jam} - \text{tanpa satuan}$$

$$\text{jam} \geq \text{jam}$$

Berdasarkan hasil pemeriksaan yang dilakukan, terlihat bahwa satuan matematis untuk seluruh pembatas memiliki dimensi yang sama kedua ruas sehingga model matematis pembatas ini sudah terverifikasi.

5. PENGOLAHAN DATA DAN HASIL

5.1. Pengumpulan Data

Data permintaan beras diperoleh dari data permintaan BPS pada Tahun 2014 yang diolah untuk mengetahui kebutuhan beras per kuartal. Data permintaan beras untuk tujuh daerah tingkat kabupaten/kota yang berada di Provinsi Maluku, Maluku Utara, Papua dan Papua Barat, yang menjadi objek penelitian ditampilkan pada Tabel 1.

Jumlah konsumsi beras pada wilayah yang diteliti, jauh lebih tinggi dibanding dengan produksi beras yang diproduksi oleh wilayah tersebut. Untuk menutupi kebutuhan beras, wilayah tersebut perlu mendatangkan beras dari wilayah lain. Sebagian besar beras yang diperjualbelikan di wilayah tersebut masih didatangkan dari Provinsi Jawa Timur tepatnya dikirimkan dari Pelabuhan Tanjung Perak, Surabaya.

Data komoditas dan pendistribusi beras yang berasal dari Jawa Timur, diperoleh dari data perdagangan dan distribusi beras BPS tahun 2015. Data distribusi komoditas, menyatakan bahwa 66.09% dari total beras yang beredar di Provinsi Papua, 65.96 % dari total beras yang diperdagangkan di Papua Barat, dan 50% dari total beras yang diperdagangkan di Provinsi Maluku, masih didistribusikan dari Pelabuhan Jawa Timur. Selebihnya, pasokan beras didatangkan dari daerah penghasil beras lain, yang berada di Sulawesi dan Nusa Tenggara, sebagian kecil dari kebutuhan beras dapat diproduksi oleh wilayah itu sendiri [13].

Data transportasi lain yang dibutuhkan adalah data jarak tempuh antar pelabuhan. Data jarak antar pelabuhan diperoleh dari aplikasi navigasi Netpas aplikasi ini memiliki database jarak untuk lebih dari 12.000 data jarak antar pelabuhan di seluruh dunia. Tabel 2 menampilkan informasi terkait jarak antar pelabuhan yang diteliti.

Gambar 3, memberikan gambaran lokasi pelabuhan yang diamati dalam penelitian ini. Pelabuhan terdiri dari satu (1) pelabuhan asal (depo) dan tujuh pelabuhan tujuan. Depo berada di Surabaya, berperan sebagai pusat distribusi, sebagai pusat pengiriman beras menuju tujuh pelabuhan tujuan yang berada di wilayah Maluku, Papua dan Papua Barat.

5.1.1. Validasi Model

Solusi yang dikembangkan diperoleh dengan pendekatan branch and bound menggunakan perangkat lunak Lingo dan diperoleh solusi bersifat global optimum.



Sumber: Google maps, diolah

Gambar 3. Lokasi Penelitian

Tabel 1. Data Konsumsi Beras wilayah tujuan (dalam Kg)

No.	Pelabuhan	Kabupaten	Konsumsi / Tahun	Beras asal Jawa Timur	Beras asal Timur (3 Bln)
1	Ambon	Kota Ambon	33,859,614	16,929,807	4,232.45
2	Saumlaki	Kab. Maluku Tenggara Barat	9,359,623	4,679,812	1,169.95
3	Dobo	Kab Kepulauan Aru	7,736,639	3,868,319	967.08
4	Kaimana	Kabupaten Kaimana	5,748,871	2,874,436	1,006.05
5	Fak-fak	Kabupaten Fak-Fak	4,238,411	2,119,206	741.72
6	Tual	Kota Tual	5,745,287	2,872,644	718.16
7	Merauke	Kabupaten Merauke	14,907,546	7,453,773	2,497.01

Sumber: Data BPS 2014, diolah

Tabel 2. Jarak antar pelabuhan (dalam Mil Laut)

No.	Pelabuhan	Surabaya	Ambon	Saumlaki	Dobo	Kaimana	Fak-fak	Tual	Merauke
1	Surabaya	0	1008	1191	1347	1376	1304	1303	1733
2	Ambon	1008	0	460	453	391	310	325	850
3	Saumlaki	1191	460	0	235	348	366	190	609
4	Dobo	1347	453	235	0	155	242	110	466
5	Kaimana	1376	391	348	155	0	112	144	557
6	Fak-fak	1304	310	366	247	223	0	199	703
7	Tual	1303	325	190	110	144	199	0	591
8	Merauke	1733	850	609	466	565	310	591	0

Sumber: Netpas database 2016

Gambar 3, memberikan gambaran lokasi pelabuhan yang diamati dalam penelitian ini. Pelabuhan terdiri dari satu (1) pelabuhan asal (depo) dan tujuh pelabuhan tujuan. Depo berada di Surabaya, berperan sebagai pusat distribusi dan pengiriman beras menuju tujuh pelabuhan tujuan yang berada di wilayah Maluku, Papua dan Papua Barat.

Secara garis besar biaya operasional yang diperhitungkan, terdiri dari biaya tetap dan biaya variabel. Biaya tetap besarnya tidak dipengaruhi jarak tempuh/rute kapal. Sedangkan biaya variabel, nilainya dipengaruhi aktivitas kapal dan jarak tempuh. Besarnya biaya untuk tiap kapal, diperoleh berdasarkan nilai biaya dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan oleh [12].

5.2. Pengolahan Data

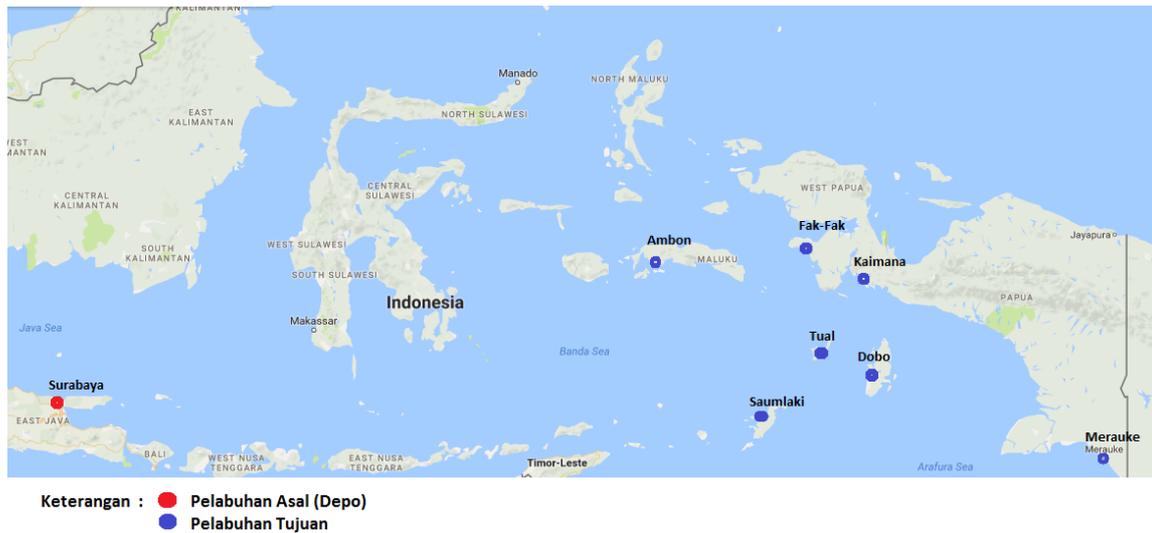
Pemodelan matematis yang dilakukan membutuhkan bantuan komputer untuk membantu mempercepat proses untuk mencari solusi permasalahan yang optimum. Pemodelan dalam penelitian ini merupakan permasalahan *Integer Linear Programming*. Salah satu metode eksak yang bisa digunakan dalam penyelesaian penentuan rute transportasi adalah dengan algoritma branch and bound. Namun, pemecahan model matematik branch and bound membutuhkan waktu komputasi yang lama. Sehingga perlu menggunakan bantuan piranti lunak optimasi. Metode branch and bound efektif dalam menyelesaikan masalah pemrograman bilangan bulat campuran baik yang linear maupun nonlinear [16].

Pemodelan sistem dilakukan menggunakan komputer dengan spesifikasi: Processor Intel-Core i3 2.30 GHz dan RAM 4 GB.

Kalkulasi komputer dengan Linggo dilakukan selama 12 detik, untuk mendapatkan nilai total biaya distribusi optimum.

5.3. Hasil Penelitian

Hasil pemodelan penentuan rute disajikan dalam bentuk tabel dan gambar untuk dapat memberikan gambaran dan solusi yang lebih mudah dipahami. Gambar 4 memperlihatkan seluruh kapal berangkat dari pelabuhan asal (depo) di Surabaya, menuju pelabuhan di wilayah tujuan. Dalam pelayaran liner setiap kapal hanya dapat melewati masing-masing pelabuhan sebanyak satu kali, dan setiap pelabuhan hanya dapat dilayani oleh satu kapal.



Sumber: Google maps, diolah

Gambar 4. Hasil Penentuan Rute

Tabel 3. Kesesuaian Kapasitas Kapal dan Permintaan Beras tiap Pelabuhan

Kapal	Pelabuhan Tujuan	Permintaan (Ton)	Kapasitas Kapal (Ton)
1	Ambon	4,232.45	6,500
	Kaimana	1,006.05	
	Saumlaki	1,169.95	
Total		6,408	
2	Dobo	967.08	3,500
	Merauke	2,497.01	
Total		3,464	
3	Fak-Fak	741.72	1,500
	Tual	718.16	
Total		1,460	

Kemudian, dalam penentuan rute kapal, faktor lain yang membatasi adalah adanya jendela waktu (*time window*) pelayanan. Jendela waktu dalam penelitian ini adalah, waktu pelayanan pelabuhan dilakukan pada waktu tertentu saja. Batasan ini membuat, penjadwalan dan penentuan rute kapal tidak saja hanya memperhatikan rute pelayanan pelabuhan mana saja, namun menentukan urutan pelabuhan mana yang harus dilayani terlebih dahulu.

Penjadwalan urutan rute ini dilakukan untuk meminimasi waktu tunggu yang dihabiskan kapal di pelabuhan tujuan. Sebagai

Selanjutnya, tiap kapal harus kembali ke Depo awal, setelah menuntaskan tugas mengunjungi beberapa pelabuhan.

Berdasarkan hasil perhitungan, diketahui Rute pelayaran yang dapat memenuhi fungsi tujuan dan seluruh batasan, adalah sebagai berikut: Kapal 1, melayani rute Surabaya – Ambon – Kaimana – Saumlaki – Surabaya. Kapal 2, melayani rute Surabaya – Dobo – Merauke – Surabaya. Kapal 3, melayani rute Surabaya – Fak-Fak – Tual – Surabaya. Rute kapal hasil penelitian ini, disajikan dalam Gambar 4.

contoh, jika kapal tiba di pelabuhan tujuan pada pukul 21.00, harus menunggu hingga keesokan hari ketika pelayanan pelabuhan sudah dibuka, untuk aktivitas bongkar-muat, setelah selesai, kapal menuju pelabuhan tujuan berikutnya. Gambar 3 memberikan gambaran hasil mengenai rute, dan urutan kesinggahan kapal yang dapat memberikan hasil optimal pada permasalahan distribusi beras ini.

Rute pengiriman beras yang telah terpilih dapat memberikan hasil jarak minimum, dan biaya operasional kapal minimum. Untuk fungsi biaya, hal yang mempengaruhinya, yaitu besarnya biaya tetap untuk jenis kapal. Semakin besar kapasitas kapal yang dipakai, maka biaya tetap kapal juga besar. Selain biaya sewa kapal, biaya bahan bakar juga sangat dominan pada perhitungan fungsi ini, semakin jauh jarak tempuhnya maka akan membutuhkan biaya bahan bakar yang semakin banyak pula. Namun, penambahan jarak akan membuat biaya per satuan jarak menjadi lebih rendah. Semakin banyak rute pelanggan yang dijalankan akan sebanding dengan jumlah kapal yang diperlukan maka fungsi biaya juga akan meningkat.

6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Model penentuan rute dan distribusi yang dikembangkan merupakan alat bantu dan alternatif yang dapat digunakan dalam pemecahan masalah distribusi komoditas secara umum. Model menggunakan kasus distribusi beras untuk memenuhi kebutuhan

konsumsi beras di wilayah timur Indonesia. Dalam kasus ini, distribusi beras dilakukan dari Pelabuhan Surabaya sebagai depo pemasok untuk didistribusikan menuju ke tujuh pelabuhan di Wilayah Timur Indonesia (Maluku, Maluku Utara, Papua dan Papua Barat). Distribusi dilakukan menggunakan 3 (tiga) jenis kapal dengan kapasitas angkut beragam.

Penentuan urutan rute kapal, didasarkan pada rute pengiriman, kebutuhan konsumsi beras di lokasi tujuan, ketersediaan kapal, kapasitas angkut masing-masing kapal, waktu buka dan tutup pelayanan di pelabuhan tujuan, waktu yang dibutuhkan untuk bongkar muat barang. Langkah selanjutnya adalah mencari solusi optimum yang dapat memberikan solusi yang memiliki biaya minimum yang memperhitungkan biaya operasional kapal dengan tetap memenuhi seluruh permintaan konsumsi beras di seluruh titik tujuan. Solusi yang diperoleh, tidak melanggar seluruh batasan kapasitas kapal, jam pelayanan pelanggan, dan mampu memenuhi kebutuhan di lokasi tujuan.

6.2. Keterbatasan

Pemodelan rute dan penjadwalan yang dilakukan belum sepenuhnya dapat menggambarkan kondisi sesungguhnya akibat keterbatasan model yang dikembangkan belum memasukan seluruh parameter, dan beberapa parameter yang digunakan dalam pemodelan sistem ini, masih menggunakan asumsi, yang belum sepenuhnya sesuai dengan kondisi sesungguhnya.

6.3. Penelitian Lanjutan

Berdasarkan keterbatasan penelitian ini, penelitian dapat mengembangkan algoritma heuristic untuk mencari rute kapal/distribusi dengan melibatkan lebih banyak titik tujuan distribusi, atau dengan memperhitungkan biaya bongkar muat dan mempertimbangkan adanya hub, sebagai penghubung antara pelabuhan besar dan pelabuhan kecil. Selain itu dapat dikembangkan *Graphical User Interface* (GUI) yang dapat digunakan sebagai sistem pendukung pengambilan keputusan yang interaktif dan lebih mudah untuk digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilaksanakan atas bantuan dana penelitian dari Politeknik APP Jakarta. Penulis mengucapkan terimakasih, kepada reviewer yang telah memberikan masukan dan saran perbaikan untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Asosiasi Rekanan Distribusi. Indonesia. *Profil Logistik Indonesia 2005*. Asosiasi Rekanan dan Distribusi Indonesia, Jakarta, 2005.
- [2] J.R. Stock dan D.M. Lambert. *Strategic logistics management* (Vol. 4). Boston, MA: McGraw-Hill/Irwin, 2001.
- [3] M. Christopher. *Logistics & supply chain management*. UK: Pearson, 2016.
- [4] D.J. Bowersox, D.J. Closs, dan M.B. Cooper. *Supply chain logistics management* (Vol. 2). New York, NY: McGraw-Hill, 2002.
- [5] G. Ghiani, F. Guerriero, G. Laporte, dan Musmanno. "Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and

parallel computing strategies." *European Journal of Operational Research*, vol. 151(1), pp. 1-11, 2003.

- [6] J.F. Cordeau, F. Pasin, dan M.M Solomon. "An integrated model for logistics network design." *Annals of operations research*, vol. 144(1), pp. 59-82, 2006.
- [7] A. Rushton, P. Croucher, dan P. Baker. *The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain*. Kogan Page Publishers, 2014.
- [8] I. Pertiwi. *Pemecahan Berbasis Set Covering Heuristic Untuk Pemecahan Masalah Penentuan Rute Penugasan Kapal*. Bandung, Indonesia: Institut Teknologi Bandung, 2005.
- [9] R. Yuniarti dan M. Astuti. "Metode Saving Matrix Dalam Penjadwalan Dan Penentuan Rute Distribusi Premium Di SPBU Kota Malang." *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 4(1), pp. 17-26, 2013.
- [10] L. Fitria, S. Susanty, dan S. Suprayogi. "Penentuan Rute Pengumpulan dan Pengangkutan Sampah Bandung." *Jurnal Teknik Industri*, vol. 11(1), pp-51, 2009.
- [11] D.O. Bausch, G.G. Brown, dan D. Ronen. "Scheduling short-term marine transport of bulk products." *Maritime Policy & Management*, vol. 25(4), pp. 335-48, 1998.
- [12] A. Arvianto, A.H. Setiawan, dan S. Saptadi. "Model Vehicle Routing Problem dengan Karakteristik Rute Majemuk, Multiple Time Windows, Multiple Products dan Heterogeneous Fleet untuk Depot Tunggal." *Jurnal Teknik Industri*, vol. 16(2), pp. 83-94, 2014.
- [13] Reinhardt et al. *Network design models for container shipping. Technical report, Centre for Traffic and Transport*, Technical University of Denmark. 2007.
- [14] K.H. Kjeldsen, J. Lysgaard, L.J. Larsen, dan K. Fagerholt. "Liner shipping network design, routing and scheduling." Ph.D. Dissertation, CORAL-ASB, 2009.
- [15] Subdirektorat Statistik Perdagangan Dalam Negeri. *Distribusi perdagangan komoditas beras Indonesia 2015*. Badan Pusat Statistik, 2016.
- [16] F. Hillier dan Lieberman. *Introduction to Operation Research*. New York: McGraw-Hill, 2008.

NOMENKLATUR

Indeks:

i, j	indeks pelabuhan
k	indeks kapal, $k=1,2,\dots,K$

Parameter:

$d_{i,j}$:	jarak antara pelabuhan i dengan pelabuhan j (mil)
v_k	:	kecepatan kapal k (knot atau mil laut/jam)
α_k	:	biaya tetap kendaraan k (Rp)
β_k	:	biaya bahan bakar kapal k (Rp/mil)
D_i	:	permintaan beras di pelabuhan i (ton)
$w_{i,j,k}$:	waktu perjalanan dari pelabuhan i ke pelabuhan j dengan kapal k (jam)
s_i	:	waktu pelayanan di pelabuhan i (jam)

- a_i : waktu buka pelabuhan i
 b_i : waktu tutup pelabuhan i
 Q_k : kapasitas maksimum kendaraan k (ton)

Variabel:

- T_{ik} waktu minimum kapal k untuk pelabuhan i
 π_k waktu berangkat kapal k
 τ_i waktu pelayanan pelabuhan i
 C_{ijk} biaya perjalanan kapal k dari i ke j
 X_{ijk} { bernilai 1, jika pelabuhan j dikunjungi setelah
 i oleh kapal k
 bernilai 0, untuk lainnya
 Y_{ik} { bernilai 1, jika pelabuhan i dilayani oleh k
 bernilai 0, untuk lainnya
 z_k { bernilai 1, jika kapal k digunakan
 bernilai 0, untuk lainnya
 A jumlah kapal yang ditugaskan pada rute