

Model Penentuan Jumlah Kapal dan Komposisinya untuk *Short Sea Shipping* Pulau Jawa

Ika Deefi Anna^{1*}, Fitri Agustina¹

Abstract: This research aims to determine the amount and mixture composition of vessels in short sea shipping (SSS) operation in Java. SSS in Java is proposed to mitigate the surface transportation problem and move freight off the overcrowded North-Coast highways and rail systems onto the waterways. A mathematical model based on non-linear integer programming was developed to calculate the amount and the composition mix of vessels required for the proposed system. The model was solved by Lingo software and the computational results reveal that the proposed system would require daily shipment using 1 unit of type B vessel and 1 unit of type C vessel. The calculation results also show that the SSS in Java would require 6 vessels to operate. Overall, the model and the obtained solutions in this paper provide an alternative to raise awareness of short sea shipping's potential with the government, logistic companies, and executive policymakers. Finally, this paper also contribute to research of maritime fleet size and mix problems.

Keywords: Short sea shipping, maritime fleet size problem, non linear integer programming.

Pendahuluan

Kegiatan perekonomian Indonesia yang meliputi kegiatan produksi, distribusi, maupun konsumsi terpusat di Pulau Jawa. Kegiatan distribusi barang di Pulau Jawa sebagian besar dilakukan melalui jalur darat dengan menggunakan moda truk yang mencapai 80–90% dalam Izi [1]. Distribusi barang melalui jalur darat menggunakan jalur Pantai Utara (Pantura) sebagai jalur utama. Akibatnya, jalur Pantura mengalami kelebihan beban (*overload*), kemacetan, polusi udara bahkan kecelakaan lalu lintas. Kepadatan jalur Pantura menyebabkan biaya transportasi darat mahal dan tidak efisien. Ongkos operasional truk di Indonesia yang tinggi menyebabkan biaya logistik mahal, yang pada akhirnya menghambat daya saing produk Indonesia di tingkat nasional maupun internasional. Salah satu cara mengatasi kepadatan jalur Pantura dengan cara mengalihkan sebagian muatan transportasi darat ke transportasi laut atau yang lebih dikenal dengan *short sea shipping* (SSS).

SSS adalah penggunaan kapal untuk memindahkan barang dan atau penumpang menuju dan dari suatu tujuan baik domestik maupun internasional. SSS tidak melewati samudra melainkan melewati garis pantai, sungai dan danau (Brooks *et al.* [2]). SSS telah diterapkan di negara-negara Uni Eropa, wilayah utara Benua Amerika dan negara-negara di Asia seperti Jepang, Cina dan Korea (Grosso *et al.* [3], APEC dan Inha University [4]).

Penerapan SSS memberikan manfaat dalam mengatasi masalah ekonomi, sosial dan lingkungan akibat pertumbuhan transportasi darat, kemacetan, kecelakaan serta polusi udara (APEC dan Inha University [4], Paixao dan Marlow [5], Douet dan Cappuccilli [6]).

Masalah penentuan jumlah kapal dalam sistem transportasi maritim termasuk dalam kajian *maritime fleet size and mix problem* (MFSMP). Penentuan jumlah kapal dan komposisinya merupakan perencanaan masalah strategis dalam transportasi maritim (Christiansen *et al.* [7]). MFSMP memiliki salah satu varian yang disebut dengan *maritime fleet size problem* (MFSP). MFSP berkaitan dengan penentuan jumlah kapal dengan armada kapal yang homogen. Kapal homogen merupakan kapal dengan karakteristik yang identik. Dantzig dan Fulkerson [8] merupakan pelopor dalam hal penentuan jumlah kapal yang optimal untuk masalah MFSP. Dantzig dan Fulkerson [8] melakukan penelitian yang meminimalkan jumlah kapal tanker untuk memenuhi jadwal yang tetap ini untuk menyelesaikan masalah pengangkutan 20 (dua puluh) kargo dengan pendekatan model transportasi.

Penelitian lain dengan menggunakan jenis kapal homogen adalah dilakukan oleh peneliti Jaikumara dan Solomon [9]. Model matematis yang dibangun memiliki tujuan untuk meminimalkan jumlah kapal tunda (tarik) yang mengabaikan waktu pelayanan di pelabuhan dan struktur geografi dari lokasi pelabuhan yang ada di sungai. Pelabuhan pertama dijadikan pelabuhan asal (*home port*). Model memiliki fungsi tujuan yang meminimalkan jumlah kapal tarik. Model yang dikembangkan diselesaikan dengan algoritma polinomial. Sambracos *et al.* [10]

¹ Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Industri, Universitas Trunojoyo Madura, PO. Box 2, Telang, Kamal Bangkalan 69162, Indonesia. Email: deefi_fian@yahoo.com, fitri.agoesti@yahoo.co.id.

* Penulis korespondensi

meneliti tentang jumlah armada yang dibutuhkan untuk pelayanan angkutan barang jarak pendek. Penelitian ini berkaitan dengan pengenalan penggunaan kapal kontainer berukuran kecil untuk pelayaran di Laut Aegean, Yunani. Dua aspek yang dipertimbangkan dalam penelitian ini yaitu pertama, model perencanaan strategis untuk menentukan jumlah kapal sejenis yang optimal di bawah batasan permintaan dan penawaran yang meminimalkan biaya konsumsi bahan bakar dan biaya pelabuhan. Aspek kedua merupakan perencanaan operasional dengan menggunakan formula perencanaan rute kendaraan untuk kebutuhan berkala pengangkutan barang dengan kontainer kecil. Solusi yang didapatkan adalah perencanaan ulang jaringan antar pulau dapat menghemat biaya sampai 5%.

Bendall dan Stent [11] membangun model penjadwalan untuk pelayanan kapal kontainer yang memiliki kecepatan tinggi yang diaplikasikan pada pelayaran pendek pada jaringan *hub* dan *spoke*. Singapura sebagai pelabuhan *hub* sedangkan pelabuhan *spoke* berjumlah enam di wilayah Asia Timur. Model matematis yang dibangun mempunyai fungsi tujuan memaksimalkan profit yang diperoleh dari pendapatan dikurangi total biaya. Pendapatan diperoleh dari membawa muatan dari *hub* ke *spoke* dan sebaliknya. Total biaya meliputi biaya tetap kapal (jumlah kapal dan awak kapal), biaya operasional kapal, dan biaya membawa muatan. Variabel keputusan meliputi jumlah perjalanan kapal, jumlah kapal, jumlah muatan yang dibawa serta frekuensi kunjungan ke pelabuhan. Solusi model diselesaikan dengan *software* standar untuk *integer programming*, kemudian dilanjutkan dengan metode heuristik untuk membuat jadwal tiap kapal.

Armada kendaraan yang dimiliki oleh suatu industri jarang yang bersifat homogen. Pemilik armada biasanya menginginkan kendaraan yang berbeda (heterogen) untuk memenuhi kendala operasional serta kemampuan yang serba bisa. Kendaraan yang heterogen lebih fleksibel dan efektif biaya dalam menghadapi permintaan yang bervariasi (Hoff *et al.* [12]). Kontribusi berkaitan dengan masalah penentuan jumlah kapal dan komposisinya diberikan oleh Fagerholt dan Linstad [13], dan Cho dan Perakis [14]. Fagerholt dan Linstad [13] mengembangkan algoritma untuk menentukan jumlah kapal yang berkaitan dengan jadwal mingguan. Langkah pertama menentukan jumlah jadwal yang *feasible* kemudian langkah kedua kapal yang digunakan dan jadwal mingguan ditentukan dengan memecahkan model *integer programming*.

Fagerholt *et al.* [15] memberikan kontribusi dalam permasalahan perencanaan strategis pada pelayaran industri dan tramp. Mereka membangun meto-

dologi pendukung keputusan dengan menggunakan kerangka simulasi Monte Carlo untuk memecahkan persoalan *routing* dan penjawalan kapal jangka pendek. Metode tersebut menyediakan sistem pendukung keputusan untuk operator kapal dalam menentukan jumlah kapal dan komposisinya dan untuk mengevaluasi kontrak pengangkutan. Perakis and Jaramillo [16] merekomendasikan model program linier untuk perencanaan armada kapal perusahaan *liner* Flota Mercante Gracolumbiana (FMG) yang menghasilkan solusi total biaya operasional 12,6% lebih rendah dibandingkan dengan kondisi nyata.

Sebagian besar kajian tentang MFSP dalam penentuan jumlah kapal menggunakan jumlah permintaan strategis dalam satu horizon perencanaan tertentu. Menurut Pantuso *et al.* [17], pada kondisi ini permintaan aktual tidak diketahui secara pasti sehingga pada saat perencanaan di tingkat taktis, pengambil keputusan melakukan koreksi kembali terhadap jumlah kapal yang telah dihasilkan. Ketika jumlah kapal yang dihasilkan kurang dari permintaan aktual maka pengambil kebijakan dapat menyewa kapal tambahan. Sebaliknya jika jumlah kapal melebihi jumlah permintaan aktual, pengambil kebijakan dapat menyewakan ke pihak lain atau menjadikan kapal sebagai *lay up ship* (Pantuso *et al.* [17]).

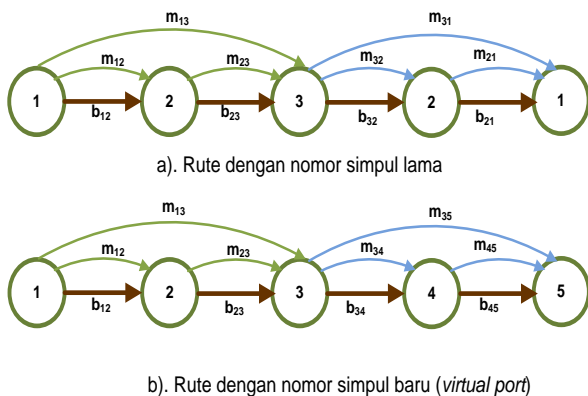
Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini akan dikembangkan model matematis untuk menentukan jumlah kapal dan komposisinya dengan menggunakan jumlah permintaan operasional berupa jumlah muatan per jam. Model matematis yang dikembangkan akan memberikan kontribusi baik secara aplikatif maupun secara teoritis. Model secara aplikasi akan bermanfaat bagi beberapa pihak seperti pemerintah, pengusaha dan penyedia jasa logistik (*carrier, shipping liners, operator pelabuhan*), pelaku utama logistik seperti pengirim (*shipper*), penerima (*consignee*) serta masyarakat umum. Model yang dikembangkan akan memberikan alternatif moda transportasi baru bagi pengangkutan barang di Pulau Jawa yang lebih efisien dan efektif. Secara teoritis, pengembangan model akan memberikan kontribusi pada permasalahan maritim khususnya MFSMP.

Metode Penelitian

Model matematis yang dibangun dalam penelitian ini secara sederhana akan menjawab pertanyaan berapa jumlah kapal harian dan komposisinya yang dibutuhkan untuk mengangkut sejumlah permintaan (muatan) harian. Model juga akan menghasilkan waktu (jadwal) rilis kapal. Kapal Ro-Ro akan

berlayar dengan rute tetap yaitu Tanjung Priok – Tanjung Emas – Tanjung Perak – Tanjung Emas – Tanjung Priok. Rute kapal dari Tanjung Priok – Tanjung Emas – Tanjung Perak dinamakan rute *outbound*, sedangkan rute sebaliknya dari Tanjung Perak – Tanjung Emas – Tanjung Priok dinamakan rute *inbound*. Tanjung Priok dalam model ini dijadikan pelabuhan asal (*origin port/home port*). Rute yang tetap menyebabkan SSS Pulau Jawa termasuk dalam kategori pelayaran *liner*. Kapal akan berlayar dari Tanjung Priok dengan membawa muatan berupa truk dengan tujuan Tanjung Emas dan Tanjung Perak. Sesampai di Tanjung Emas, kapal akan menurunkan truk tujuan Tanjung Emas dan menaikkan truk yang berasal dari Tanjung Emas dengan tujuan Tanjung Priok. Proses bongkar muat akan terjadi di semua pelabuhan yang dilewati kapal baik rute *outbound* maupun *inbound*. Struktur model MFSMP untuk SSS Pulau Jawa dilihat pada Gambar 1.

Pada Gambar 1a. dapat dilihat bahwa terdapat tiga simpul yaitu simpul 1, 2, 3 yang merepresentasikan pelabuhan Tanjung Priok, Tanjung Emas dan Tanjung Perak. Busur b_{ij} merepresentasikan rute kapal sedangkan busur m_{ij} merepresentasikan aliran muatan kapal dari pelabuhan i ke pelabuhan j . Busur b_{12} adalah busur rute kapal arah *outbound* dari Tanjung Perak ke Tanjung Emas. Busur m_{32} adalah busur muatan kapal dari Tanjung Perak ke Tanjung Emas rute *inbound*. Rute pada struktur model MFSMP untuk SSS yang terdapat pada Gambar 1 memiliki bentuk rute pendulum. Pada rute bentuk pendulum, pelabuhan yang berada diantara pelabuhan asal dan pelabuhan akhir akan dilewati dua kali oleh kapal. Untuk memudahkan pembuatan formulasi matematis dilakukan konversi bentuk rute dari rute pendulum ke dalam bentuk rute garis dengan pemberian nomor simpul baru. Pada Gambar 1b, rute diberikan dengan nomor pelabuhan baru dengan menambahkan *virtual port*.



Gambar 1. Struktur model MFSMP untuk SSS Pulau Jawa

Misalkan NO adalah himpunan pelabuhan rute *outbound* dan NI adalah himpunan pelabuhan rute *inbound*. NO akan memuat anggota himpunan simpul yang sebenarnya. Berdasarkan Gambar 1b, anggota himpunan NO adalah $\{1, 2, 3\}$ dan anggota himpunan NI adalah $\{3, 4, 5\}$.

Asumsi Model MFSMP SSS Pulau Jawa

Beberapa asumsi untuk menyederhanakan permasalahan dalam model MFSMP untuk SSS Pulau Jawa adalah sebagai berikut: (1) Jumlah muatan (permintaan) harian bersifat deterministik. (2) Jarak antar pelabuhan bersifat simetris. (3) Kapal yang digunakan bersifat heterogen namun dengan kecepatan yang sama. (4) Waktu berlabuh untuk proses bongkar muat dan waktu pandu kapal sama di tiap pelabuhan. (5) Pelabuhan beroperasi selama 7 hari dan 24 jam. (6) Tidak ada waktu mengantre kapal di pelabuhan.

Indeks yang digunakan dalam model ini adalah:

- i, j, k : indeks pelabuhan rute *outbound*
- a, b, c : indeks pelabuhan rute *inbound*
- v : indeks jenis kapal
- r : indeks keberangkatan (rilis) kapal

Notasi himpunan dalam penelitian ini adalah:

- NO : himpunan pelabuhan rute $NO = \{1, 2, \dots, w\}$ *outbound*,
- NI : himpunan pelabuhan rute $NI = \{a, a + 1, \dots, z\}$ *inbound*,
- V : himpunan jenis kapal, $V = \{1, \dots, V\}$
- R : himpunan kapal yang dirilis harian, $R = \{1, \dots, f\}$

Notasi parameter yang digunakan dalam model ini adalah:

- q_{vr} : kapasitas kapal v yang dirilis ke r (truk)
- do_{kj} : jumlah muatan per jam dari pelabuhan k ke pelabuhan j rute *outbound* (truk/jam)
- di_{cb} : jumlah muatan per jam dari pelabuhan c ke pelabuhan b rute *inbound* (truk/jam)
- $lo_{i(i+1)vr}$: waktu layar dari pelabuhan i ke pelabuhan $(i+1)$ kapal v yang dirilis ke r rute *outbound* (jam)
- $li_{a(a+1)vr}$: waktu layar dari pelabuhan a ke pelabuhan $(a+1)$ kapal v yang dirilis ke r rute *inbound* (jam)
- po : waktu pandu kapal keluar pelabuhan (jam)
- pi : waktu pandu kapal masuk pelabuhan (jam)
- cd_v : biaya depresiasi kapal v per unit per jam (rupiah/unit/jam)
- cl_v : biaya berlayar kapal v per unit (rupiah/unit)
- cp_v : biaya pelabuhan kapal v per unit (rupiah/unit)

u : waktu bongkar muat kapal (jam)
 f : batas maksimum kapal yang dirilis harian (unit)
 M : bilangan positif yang nilainya sangat besar.

Notasi variabel yang digunakan dalam model ini adalah:

GO_{vri} : waktu kedatangan kapal v yang dirilis ke r di pelabuhan i rute *outbound*
 GI_{vra} : waktu kedatangan kapal v yang dirilis ke r di pelabuhan a rute *inbound*
 WS_{vr} : waktu siklus kapal v yang dirilis ke r .

Notasi variabel yang digunakan dalam model ini adalah:

SO_{vri} : waktu keberangkatan kapal v yang dirilis ke r di pelabuhan i rute *outbound*
 SI_{vra} : waktu keberangkatan kapal v yang dirilis ke r di pelabuhan a rute *inbound*
 Y_{vr} : $\begin{cases} 1, \text{jika kapal } v \text{ yang dirilis ke } r \text{ terpilih} \\ 0, \text{jika lainnya} \end{cases}$
 XO_{k_jvr} : jumlah muatan dari pelabuhan k ke pelabuhan j yang diangkut oleh kapal v yang dirilis ke r rute *outbound*
 XI_{cbvr} : jumlah muatan dari pelabuhan c ke pelabuhan b yang diangkut oleh kapal v dirilis ke r rute *inbound*

Formulasi Model

Model MFSMP dibangun dengan mengoptimalkan waktu keberangkatan kapal. Pengoptimalan waktu keberangkatan akan menentukan kapan kapal dirilis sedemikian hingga meminimalkan jumlah kapal yang dibutuhkan. Jika waktu rilis kapal saling berdekatan maka jumlah muatan yang dibawa oleh kapal yang kedua akan sedikit sehingga tidak memenuhi kapasitas kapal. Jika SO_{vri} adalah waktu keberangkatan kapal v yang dirilis r di pelabuhan i rute *outbound*, maka dari pelabuhan k ke pelabuhan j yang diangkut oleh kapal v yang dirilis pertama ($r = 1$) rute *outbound* (XO_{k_jv1}) dirumuskan sebagai berikut:

$$XO_{k_jv1} = (24 - SO_{vfk} + SO_{v1k})do_{kj}, \forall i \in NO, k \leq i, j > i, \forall v \in V \quad (1)$$

Rumus ini juga berlaku untuk menentukan jumlah muatan yang tersedia untuk diangkut oleh kapal yang dirilis pertama ketika melayari rute *inbound* yaitu:

$$XI_{cbv1} = (24 - SI_{vfc} + SI_{v1c})di_{cb}, \forall a \in NI, c \leq a, b > a, \forall v \in V \quad (2)$$

Jumlah muatan yang tersedia untuk diangkut oleh kapal yang dirilis kedua, ketiga dan seterusnya mengikuti rumus (3) untuk rute *outbound* dan rumus (4) untuk rute *inbound*;

$$XO_{k_jvr} = (SO_{vrk} - SO_{v(r-1)k})do_{kj}, \forall r \in R\{1\}, \forall i \in NO, k \leq i, j > i, \forall v \in V \quad (3)$$

$$XI_{cbvr} = (SI_{vrc} - SI_{v(r-1)c})di_{cb}, \forall r \in R\{1\}, \forall a \in NI, c \leq a, b > a, \forall v \in V. \quad (4)$$

Waktu keberangkatan kapal di tiap pelabuhan harus berurutan. Kapal kedua akan berangkat setelah kapal pertama. Begitu pula kapal ketiga akan berangkat setelah kapal kedua dirilis. Pembatas urutan waktu keberangkatan kapal rute *outbound* terdapat pada persamaan (5) sedangkan pembatas urutan waktu keberangkatan kapal rute *inbound* terdapat pada persamaan (6);

$$SO_{v(r+1)i} - SO_{vri} \geq 0, \forall v \in V, \forall i \in NO \setminus \{w\}, \forall r \in R \quad (5)$$

$$SI_{v(r+1)a} - SO_{vra} \geq 0, \forall v \in V, \forall a \in NI \setminus \{z\}, \forall r \in R \quad (6)$$

Muatan yang dibawa oleh kapal tidak boleh melebihi kapasitas kapal baik untuk rute *outbound* (persamaan 7) maupun *inbound* (persamaan 8);

$$\sum_{k \leq i} \sum_{j > i} XO_{k_jvr} \leq q_{vr}, \forall r \in R, \forall i \in NO \setminus \{w\}, \forall v \in V \quad (7)$$

$$\sum_{c \leq a} \sum_{b > a} XI_{cbvr} \leq q_{vr}, \forall r \in R, \forall a \in NI \setminus \{z\}, \forall v \in V \quad (8)$$

Semua muatan harian yang ada di tiap pelabuhan akan dibawa oleh semua kapal yang dirilis di pelabuhan tersebut. Persamaan (9) akan menjamin bahwa jumlah muatan yang dibawa oleh semua kapal yang dirilis harian sama dengan jumlah permintaan harian rute *outbound*. Pembatas (10) akan menjamin bahwa jumlah muatan yang dibawa oleh semua kapal yang dirilis harian sama dengan jumlah permintaan harian rute *inbound*.

$$\sum_{r \in R} XO_{k_jvr} = 24do_{kj}, \forall i \in NO \setminus \{w\}, k \leq i, j > i, \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{r \in R} XI_{cbvr} = 24di_{cb}, \forall a \in NI \setminus \{z\}, c \leq a, b > a, \forall v \in V. \quad (10)$$

Waktu keberangkatan kapal di tiap pelabuhan merupakan waktu kedatangan kapal ditambah dengan waktu bongkar muat kapal. Persamaan (11) merupakan waktu keberangkatan kapal rute *outbound* sedangkan persamaan (12) adalah waktu keberangkatan kapal rute *inbound*;

$$SO_{vri} = GO_{vri} + u_{vr}, \forall i \in NO \setminus \{w\}, \forall v \in V, \forall r \in R \quad (11)$$

$$SI_{vra} = GI_{vra} + u_{vr}, \forall a \in NI \setminus \{z\}, \forall v \in V, \forall r \in R. \quad (12)$$

Kapal berangkat dari pelabuhan i akan berlayar menuju pelabuhan j dimana $j = i + 1$. Kapal akan menerima jasa pandu keluar (po) pelabuhan i dan akan menerima jasa pandu masuk (pi) pelabuhan j . Waktu kedatangan kapal di pelabuhan $i + 1$ adalah penjumlahan dari waktu keberangkatan kapal dengan waktu berlayar kapal, waktu pandu keluar i dan waktu pandu masuk $i + 1$. Untuk rute *out-*

bound, waktu kedatangan kapal dirumuskan pada persamaan (13) sedangkan waktu kedatangan kapal rute *inbound* dirumuskan pada persamaan (14).

$$GO_{vr(i+1)} = SO_{vri} + po + lo_{i(i+1)vr} + pi, \quad \forall v \in V, \forall r \in R, \forall i \in NO \setminus \{w\} \quad (13)$$

$$GI_{vr(a+1)} = SI_{vra} + po + li_{a(a+1)vr} + pi, \quad \forall v \in V, \forall r \in R, \forall a \in NI \setminus \{z\}. \quad (14)$$

Jumlah kapal yang dirilis harian memiliki nilai maksimum *f* yang dipengaruhi oleh waktu bongkar muat kapal (*u*) dan waktu pandu kapal, sehingga *f* dirumuskan sebagai berikut:

$$f = \frac{24}{u+po+pi} \quad (15)$$

Adanya batasan jumlah permintaan harian dan kapasitas kapal menyebabkan jumlah kapal yang dirilis harian tidak sampai pada batas maksimum. Penentuan kapal *v* yang dirilis ke *r* dipilih dengan menggunakan bilangan positif *M*. Jika suatu kapal yang dirilis bermuatan (tidak nol) maka secara otomatis kapal tersebut akan dipilih ($Y_{vr} = 1$), sebaliknya jika suatu kapal tidak bermuatan maka kapal tersebut tidak terpilih ($Y_{vr} = 0$). Penentuan kapal yang terpilih untuk dirilis mengikuti persamaan (16).

$$\sum_{(k \leq i) \in NO} \sum_{(j > i) \in NO} XO_{kivr} + \sum_{(c \leq a) \in NI} \sum_{(b > a) \in NI} XI_{cbvr} \leq MY_{vr}, \quad \forall v \in V, \forall r \in R. \quad (16)$$

Kapal yang dirilis ke-*r* yang terpilih harus berurutan. Kapal *v* yang dirilis kedua akan berangkat setelah kapal *v* pertama berangkat.

$$Y_{vr} \geq Y_{v(r+1)}, \quad \forall v \in V, \forall r \in R \setminus \{f\} \quad (17)$$

Model matematis yang dibangun bertujuan untuk menentukan kapal dan komposisinya. Kapal yang dipilih tentu saja kapal yang memiliki biaya operasional yang rendah. Oleh karena itu, fungsi tujuan dari model ini adalah meminimalkan biaya operasional kapal per siklus waktu. Waktu siklus adalah waktu yang dibutuhkan kapal dari pelabuhan asal kembali ke pelabuhan asal. Biaya operasional kapal terdiri dari biaya depresiasi kapal ($cd_v WS_{vr}$), biaya berlayar kapal (cb_v) dan biaya pelabuhan (cp_v) yang diformulasikan seperti pada persamaan (18).

$$Min TC = \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} (cd_v WS_{vr} + cb_v + cp_v) Y_{vr} \quad (18)$$

dimana WS_{vr} adalah waktu siklus kapal *v* yang dirilis ke-*r* yang dirumuskan pada persamaan (19).

$$WS_{vr} = \sum_{v \in V} (GI_{vra} - GO_{vri}) Y_{vr}, \quad \forall a = w, \forall i = 1, r = 1 \quad (19)$$

Secara lengkap model MFSMP untuk SSS Pulau Jawa adalah sebagai berikut:

$$Min TC = \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} (cd_v WS_{vr} + cb_v + cp_v) Y_{vr}$$

dengan pembatas:
persamaan (1) – (14), (16), (17)

$$XO_{kivr} \geq 0 \text{ dan integer, } \forall v \in V, i \in NO, k \leq i, > i \quad (20)$$

$$XI_{cbvr} \geq 0 \text{ dan integer, } \forall v \in V, a \in NI, b \leq a, c > a \quad (21)$$

$$SO_{vri} \geq 0 \text{ dan integer, } \forall v \in V, i \neq w \quad (22)$$

$$SI_{vra} \geq 0 \text{ dan integer, } \forall v \in V, a \neq z \quad (23)$$

Hasil dan Pembahasan

Uji coba model dilakukan terhadap tiga jenis kapal Ro-Ro yaitu kapal Ro-Ro A, B dan C. Data jumlah permintaan operasional berupa data jumlah muatan kapal/ jam. Data tersebut diperoleh dari data jumlah muatan transportasi darat di ketiga kota besar di Pulau Jawa yang awalnya dalam satuan ton dikonversi kedalam satuan truk. Data muatan transportasi darat dalam satuan truk diramalkan dan untuk tahun 2016 diperoleh data seperti pada Tabel 1. Data pada Tabel 1 merupakan data parameter jumlah muatan per jam dari pelabuhan asal ke pelabuhan tujuan baik untuk arah *outbound* (do_{kj}) maupun *inbound* (di_{cb}).

Data parameter kapal yang lain meliputi waktu bongkar muat kapal (u) = 4 jam, jumlah maksimum kapal yang dirilis harian (f) = 4 unit, waktu pandu masuk pelabuhan (pi) = 1 jam, waktu pandu keluar pelabuhan (po) = 1 jam, waktu berlayar kapal dari Tanjung Priok – Tanjung Emas atau sebaliknya = 16 jam, dan waktu berlayar kapal dari Tanjung Emas – Tanjung Perak atau sebaliknya = 10 jam. Data parameter diatas berlaku untuk ketiga jenis kapal Ro-Ro. Data parameter lain yang spesifik untuk kapal A, B dan C terdapat pada Tabel 2.

Biaya berlayar dan biaya pelabuhan yang terdapat pada Tabel 2 merupakan biaya yang dihitung per satu siklus layar. Kapal berlayar dari titik asal (Tanjung Priok) kembali ke titik asal (Tanjung Priok) dinamakan satu siklus layar. Hasil uji coba model MFSMP untuk operasional SSS Pulau Jawa dengan perangkat lunak *Lingo 12.0* versi *extended* didapatkan bahwa model matematis berbentuk *integer nonlinear programming* (INLP).

Tabel 1. Data jumlah muatan/jam SSS Pulau Jawa tahun 2016 (truk)

Pelabuhan	Tanjung Priok	Tanjung Emas	Tanjung Perak
Tanjung Priok	-	4	4
Tanjung Emas	3	-	2
Tanjung Perak	3	2	-

Tabel 2. Data parameter kapal (biaya dalam ribuan)

	Satuan	Kapal A	Kapal B	Kapal C
Kapasitas kapal	Truk	98	101	116
Biaya depresiasi kapal per unit per jam	Rupiah	1.043	1.207	1.259
Biaya berlayar kapal per unit	Rupiah	517.463	440.948	473.970
Biaya pelabuhan kapal per unit	Rupiah	11.930	12.350	11.745

Kapal yang terpilih untuk operasional harian SSS Pulau Jawa adalah kapal B dan kapal C. Kapal B akan diberangkatkan (dirilis) pertama sedangkan kapal C akan dirilis kedua. Total biaya operasional per siklus untuk kedua kapal adalah Rp 1.106.701.000,00. *Output* model Lingo juga menghasilkan jadwal waktu kedatangan dan keberangkatan kapal yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Validasi Model

Untuk membuktikan bahwa model yang dibangun valid, diambil contoh hasil pada Tabel 3 di Tanjung Priok (1). Kapal akan dirilis sebanyak 2 yaitu kapal B pada pukul 00:00 dan berangkat pukul 04:00 dan kapal C pada pukul 12:00 serta berangkat pukul 16:00. Hal ini berarti truk yang datang antara pukul 16:00–04:00 akan diangkut oleh kapal B. Truk yang datang antara pukul 04:00–16:00 akan diangkut oleh kapal C. Truk yang bertujuan ke Tanjung Emas akan datang dengan kecepatan 4 truk/jam (jumlah muatan/jam) dan truk yang bertujuan ke Tanjung Perak akan datang juga dengan kecepatan 4 truk/jam. Selama 12 jam (16:00–04:00), jumlah truk yang datang ke Tanjung Priok dengan tujuan ke Tanjung Priok adalah $4 \times 12 = 48$ truk dan jumlah truk yang bertujuan ke Tanjung Perak adalah $4 \times 12 = 48$ truk. Jumlah truk yang diangkut oleh kapal B adalah $48 + 48 = 96$ truk. Jumlah truk yang diangkut masih dibawah kapasitas kapal B sebesar 101 truk. Hal ini juga berlaku untuk kapal C. Jumlah truk yang akan diangkut oleh kapal C selama 12 jam (04:00–16:00) adalah 48 truk tujuan Tanjung Emas (4 truk/jam x12 jam) dan 48 truk tujuan Tanjung Perak (4 truk/jam x12 jam). Total 96 truk yang akan dibawa oleh kapal C dimana jumlah ini masih dibawah kapasitas kapal C (116 truk).

Tabel 3 menunjukkan bahwa variabel keputusan untuk kapal yang dirilis harian (Y_{vr}) adalah kapal B sedangkan kapal yang dirilis kedua adalah kapal C. Hal ini berarti bahwa untuk memenuhi permintaan harian cukup dipenuhi dengan dua unit kapal. Variabel keputusan berupa waktu keberangkatan kapal rute *outbound* (SO_{vri}) dan waktu keberangkatan kapal rute *inbound* (SI_{vra}) dalam Tabel 3 ditunjukkan oleh waktu berangkat. Variabel ke-

putusan berupa jumlah muatan yang diangkut dari pelabuhan asal ke pelabuhan tujuan rute *outbound* (XO_{kivr}) dan jumlah muatan yang diangkut dari pelabuhan asal ke pelabuhan tujuan rute *inbound* (XI_{cbvr}) pada Tabel 3 ditunjukkan oleh jumlah muatan kapal.

Kapal B akan dirilis di Pelabuhan Tanjung Priok pada hari pertama pukul 00:00. Kapal B akan mengangkut muatan sebanyak 96 truk yang terdiri dari 48 truk tujuan Tanjung Emas dan 48 truk tujuan Tanjung Priok. Pengangkutan muatan sebesar 96 truk menggunakan utilitas kapasitas kapal B sebesar 95%. Jika ada peningkatan muatan di Pelabuhan Tanjung Priok melebihi 5% maka kapasitas kapal B sudah tidak memadai lagi. Setelah melakukan proses bongkar muat selama 4 jam maka pada pukul 04:00 kapal B akan diberangkatkan menuju Tanjung Emas. Kapal B akan sampai di Tanjung Emas pada pukul 20:00. Kapal B akan menurunkan muatan truk dengan tujuan Tanjung Emas sebanyak 48 truk. Kemudian kapal B menaikkan 24 truk yang berasal dari Tanjung Emas dengan tujuan Tanjung Perak. Kapal B membawa muatan 72 truk ketika berlayar menuju Tanjung Perak. Utilitas kapasitas kapal B pada saat berlayar ke Tanjung Perak sebesar 71%. Hal ini disebabkan jumlah permintaan dari pelabuhan Tanjung Emas ke Tanjung Perak lebih kecil.

Kapal B tiba di Tanjung Perak pada hari ke-2 pukul 10:00. Kapal B akan menurunkan semua muatan di pelabuhan ini baik muatan yang berasal dari Tanjung Priok maupun yang berasal dari Tanjung Emas. Kapal B telah melakukan pelayaran rute *outbound* Tanjung Priok – Tanjung Emas – Tanjung Perak. Kapal B kemudian berbalik arah menuju Tanjung Emas dan dilanjutkan ke Tanjung Priok (rute *inbound*). Kapal B akan membawa muatan dari Tanjung Perak sebanyak 60 truk yang terdiri 24 truk tujuan Tanjung Emas dan 36 truk tujuan Tanjung Priok. Kapal B berlayar menuju Tanjung Emas dan sampai pada pukul 00:00 hari ke-3.

Setelah melakukan proses bongkar muat di Tanjung Emas, kapal B meneruskan pelayaran menuju Tanjung Priok. Kapal B akan datang kembali ke Tanjung Priok pada hari ke-3 pukul 20:00.

Kapal C akan dirilis di Pelabuhan Tanjung Priok pada hari pertama pukul 12:00. Kapal C akan mengangkut muatan sebanyak 96 truk yang terdiri dari 48 truk tujuan Tanjung Emas dan 48 truk tujuan Tanjung Priok. Setelah melakukan proses pengangkutan muatan selama 4 jam, kapal C akan diberangkatkan menuju Tanjung Emas pada pukul 16:00. Kapal C sampai di Tanjung Emas pada hari ke-2 pukul 08:00. Kapal C akan menurunkan 48

Tabel 3. Hasil uji coba model

Tanjung Priok (1)										
Rilis kapal	Jenis kapal	Waktu kedatangan kapal			Waktu keberangkatan kapal			Jumlah muatan kapal (truk)		Kapasitas kapal (truk)
		Waktu datang	Hari	Waktu aktual	Waktu berangkat	Hari	Waktu aktual	(1)-(2)	(1)-(3)	
1	Kapal B	0	1	00:00	4	1	04:00	48	48	96 ≤ 101
2	Kapal C	12	1	12:00	16	1	16:00	48	48	96 ≤ 116
Jumlah muatan harian								96	96	
Tanjung Emas (2)										
Rilis kapal	Jenis kapal	Waktu kedatangan kapal			Waktu keberangkatan kapal			Jumlah muatan kapal (truk)		Kapasitas kapal (truk)
		Waktu datang	Hari	Waktu aktual	Waktu berangkat	Hari	Waktu aktual	(1)-(3)	(2)-(3)	
1	Kapal B	20:00	1	20:00	24:00	2	00:00	48	24	72 ≤ 101
2	Kapal C	32:00	2	08:00	36:00	2	12:00	48	24	72 ≤ 116
Jumlah muatan harian								96	48	
Tanjung Perak (3)										
Rilis kapal	Jenis kapal	Waktu kedatangan kapal			Waktu keberangkatan kapal			Jumlah muatan kapal (truk)		Kapasitas kapal (truk)
		Waktu datang	Hari	Waktu aktual	Waktu berangkat	Hari	Waktu aktual	(3)-(4)	(3)-(5)	
1	Kapal B	34:00	2	10:00	38:00	2	14:00	24	36	60 ≤ 101
2	Kapal C	46:00	2	22:00	50:00	3	02:00	24	36	60 ≤ 116
Jumlah muatan harian								48	72	
Tanjung Emas (4)										
Rilis kapal	Jenis kapal	Waktu kedatangan kapal			Waktu keberangkatan kapal			Jumlah muatan kapal (truk)		Kapasitas kapal (truk)
		Waktu datang	Hari	Waktu aktual	Waktu berangkat	Hari	Waktu aktual	(3)-(5)	(4)-(5)	
1	Kapal B	48:00	3	00:00	52:00	3	04:00	36	36	72 ≤ 101
2	Kapal C	60:00	3	12:00	64:00	3	16:00	36	36	72 ≤ 116
Jumlah muatan harian								72	72	
Tanjung Priok (5)										
Rilis kapal	Jenis kapal	Waktu kedatangan kapal			Waktu keberangkatan kapal			Jumlah muatan kapal (truk)	Kapasitas kapal (truk)	
		Waktu datang	Hari	Waktu aktual	Waktu berangkat	Hari	Waktu aktual			
1	Kapal B	68:00	3	20:00						
2	Kapal C	80:00	4	08:00						

truk tujuan Tanjung Emas dan akan menaikkan 24 truk tujuan Tanjung Perak. Kapal C akan berangkat berlayar menuju Tanjung Perak pada pukul 12:00 hari ke-2. Kapal C akan mengangkut sebanyak 72 truk menuju Tanjung Perak.

Kapal C akan sampai di Tanjung Perak pada hari ke-2 pukul 22:00. Kapal C akan menurunkan semua muatan baik dari Tanjung Priok maupun yang berasal dari Tanjung Emas. Kemudian kapal C akan melakukan pelayaran kembali menuju Tanjung Emas dan dilanjutkan ke Tanjung Priok. Setelah melakukan proses bongkar muat di Tanjung Emas, kapal C meneruskan pelayaran menuju Tanjung Priok. Kapal C akan datang kembali ke Tanjung Priok pada hari ke-4 pukul 08:00. Kapal B dan kapal C yang dirilis pada hari pertama di Tanjung Priok akan datang kembali di Tanjung

Priok pada hari ketiga dan keempat. Sehingga pada hari ke-2 dan ke-3 di Tanjung Priok perlu dirilis 2 unit kapal baru (B dan C) untuk melakukan proses SSS. Untuk hari ke-4, kapal B dan C yang dirilis hari pertama dapat digunakan kembali pada hari ke-4 proses SSS dan begitu seterusnya. Sehingga total kapal yang dibutuhkan untuk melakukan proses SSS Pulau Jawa sebanyak 6 unit (3 unit kapal B dan 3 unit kapal C).

Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas berkaitan dengan perubahan nilai parameter untuk melihat seberapa besar perubahan dapat ditoleransi sebelum solusi optimum kehilangan titik optimalnya. Hasil analisis sensitivitas parameter jumlah muatan kapal/jam tertera pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil analisis sensitivitas parameter jumlah muatan kapal/jam

Perubahan jumlah muatan kapal/jam (%)	Kapal harian/ KH (unit)	Jumlah kapal //JK (unit)	Total biaya operasional per siklus /TC (Rupiah)
-50	1 (Kapal B)	3	535.374.000,00
0	2 (1 kapal B, 1 kapal C)	6	1.106.701.000,00
+50	3 (2 kapal B, 1 kapal C)	9	1.642.075.000,00
+100	4 (2 kapal B, 2 kapal A)	12	2.213.402.000,00

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas pada Tabel 4, ketika jumlah muatan kapal/jam turun sebesar 50% (sebagai contoh jumlah muatan kapal/jam dari Tanjung Priok ke Tanjung Emas awalnya 4 truk/jam menjadi 2 truk/jam), jumlah kapal harian yang dibutuhkan hanya 1 unit kapal yaitu kapal B yang terpilih. Kapal B terpilih karena memberikan nilai TC minimum sebesar Rp 535.374.000,00. Jumlah kapal keseluruhan untuk proses SSS sebanyak 3 unit kapal B. Ketika jumlah muatan kapal per jam mengalami kenaikan sebesar 50% maka jumlah kapal harian yang dibutuhkan sebanyak 3 unit (2 unit kapal B dan 1 unit kapal C). Total kapal keseluruhan yang dibutuhkan adalah 9 unit. Sedangkan jika jumlah muatan kapal per jam mengalami kenaikan sebesar 100% maka jumlah kapal harian yang dibutuhkan sebanyak 4 kapal (2 unit kapal B dan 2 unit kapal C) dan total kapal keseluruhan untuk proses SSS sebanyak 12 unit. Perubahan nilai parameter jumlah muatan kapal per jam menyebabkan solusi optimum berubah sehingga dapat dikatakan bahwa parameter jumlah muatan kapal per jam dikatakan sensitif.

Jika nilai parameter biaya depresiasi kapal, biaya berlayar kapal dan biaya pelabuhan mengalami kenaikan atau penurunan secara proporsional maka nilai parameter biaya-biaya tersebut pada semua kapal akan berubah secara proporsional juga. Sebagai contoh jika biaya berlayar kapal naik 50% maka kenaikan akan berlaku untuk ketiga kapal. Perubahan nilai parameter biaya depresiasi, berlayar dan pelabuhan yang diuji coba pada model matematis menghasilkan solusi optimum yang tidak berubah. Perubahan nilai parameter pada biaya operasional tidak akan menyebabkan solusi optimum berubah sehingga dapat dikatakan bahwa parameter biaya depresiasi kapal, biaya berlayar kapal dan biaya pelabuhan dikatakan tidak sensitif.

Simpulan

Model MFMSPP untuk operasional SSS pulau Jawa yang dikembangkan berhasil digunakan untuk menentukan jumlah kapal dan komposisinya. Model matematis yang dikembangkan berupa *integer non linear programming* (INLP). Berdasarkan data permintaan (jumlah muatan) didapatkan bahwa jumlah kapal operasional yang dibutuhkan

untuk proses SSS Pulau Jawa sebanyak 6 unit kapal yang terdiri dari 3 unit kapal B dan 3 unit kapal C. Jumlah dan komposisi kapal ini mampu meminimalkan biaya operasional kapal sebesar Rp 1.106.701.000,00. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa parameter jumlah muatan kapal per jam merupakan parameter yang sensitif sedangkan parameter biaya depresiasi, biaya berlayar dan biaya pelabuhan merupakan parameter yang tidak sensitif. Saran-saran yang dapat diberikan untuk pengembangan model penelitian selanjutnya adalah dengan merubah salah satu atau beberapa asumsi model penelitian seperti data jumlah muatan (permintaan) menjadi probabilistik, dan memperhitungkan biaya perawatan kapal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi atas dukungan biaya penelitian yang diberikan melalui skema Penelitian Hibah Bersaing (PHB) tahun 2015.

Daftar Pustaka

- Izi, M., *Kajian Pungutan Liar Angkutan Barang Jalan Lintas Semarang–Palembang*, Jakarta: Badan Litbang Perhubungan. <http://isjd.pdii.lipi.go.id/admin/jurnal/21209236252.pdf>, 2009, diakses pada 13 Maret 2012.
- Brooks, M.R., and Hodgson, J.R., *Short Sea Shipping on the East Coast of North America, and Analysis of Opportunities and Issues*, Canada, Transportation Planning/Modal Integration Initiative Project ACG-TPMI-AH08, 2006.
- Grosso, M., Ana-Rita, L., Anne, S., and George, K.V., Short Sea Shipping, Intermodality and Parameters Influencing Pricing Policies: The Mediteranian Case, *Netnomics*, 11(1), 2010, pp. 47–67.
- APEC Transportation Working Group, and Inha University, *Short Sea Shipping Study, A Report on Successful SSS Models that Can Improve Ports'Efficiency and Security while Reducing Congestion, Fuel Costs, and Pollution*, 2007.
- Paixao, A.C., and Marlow, P.B., Strengths and Weakness of Short Sea Shipping, UK, *Marine Policy*, 26, 2002, pp. 167–178.

6. Douet, M., and Cappucili, J.F., A Review of Short Sea Shipping Policy in the European Union, *Journal of Transport Geography* 19, 2011, pp. 968–976.
7. Christiansen, M., Fagerholt, K., and Ronen, D., Ship Routing and Scheduling, Status and Perspectives, *Transportation Science*, 38(1), 2004, pp. 1–18.
8. Dantzig, G.B., Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule, *Naval Research Logistics Quarterly*, 1, 1954, pp. 217–222.
9. Jaikumar, R., and Solomon, M.M., The Tug Fleet Size Problem for Barges Line Operations, A polynomial Algorithm, *Transportation Science* 21(4), 1987, pp. 264–272.
10. Sambracos, E., Paravantis, J.A., Tarantilis, C.D., and Kiranoudis, C.T., Dispatching of Small Containers Via Coastal Freight Liners, The Case of The Aegean Sea, *European Journal of Operational Research*, 152, 2004, pp. 365–381.
11. Bendall, H.B., and Stent, A.F., A Scheduling Model for a High Speed Containership Service, A Hub and Spoke Short Sea Application, Australia, *International Journal of Maritime Economics*, 3, 2001, pp. 262–277.
12. Hoff, A., Andersson, H., Christiansen, M., Hasle, G., and Lokketangen, A., Industrial Aspects and Literature Survey: Fleet Composition and Routing, *Computers & Operations Research* 37, 2010, pp. 2041–2061.
13. Fagerholt, K., and Lindstad, H., Optimal Policies for Maintaining a Supply Service in the Norwegian Sea, *Omega*, 28(3), 2000, pp. 269–275.
14. Cho, S.C., and Perakis A.N., Optimal Liner Fleet Routing Strategies, *Maritime Policy & Management*, 23(3), 1996, pp. 249–59.
15. Fagerholt, K., Christiansen, M., Hvattum, L.M., Johnsen, T.A.V., and Vabø, T.J., A Decision Support Methodology for Strategic Planning in Maritime Transportation, *Omega*, 38, 2010, pp. 465–474.
16. Perakis, A.N., and Jaramillo, D.I., Fleet Deployment Optimization for Liner Shipping, Background, Problem Formulation and Solution Approach, Part 1, *Maritime Policy and Management*, 18(3), 1991, pp. 183–200.
17. Pantuso, G., Fagerholt, K., and Hvattum, L.M., A Survey on Maritime Fleet Size and Mix Problems. *European Journal of Operational Research*, 235 (2), 2013, pp. 341–349.