

Modified Pickup And Delivery-Capacitated Heterogeneous Vehicle Routing Problem Untuk Perancangan Rute Dan Alokasi Kapal

Vitovern Joey Susila¹, Siana Halim²

Abstract: This articles discusses the problem of route design and demand allocation for each vessel at shipping company, it intends to determine the most efficient routes in terms of overall total distance and utility for each vessel. The proposed model is the modified Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem to address the pickup and delivery problem. The approach utilizes transition probability to consider the company's historical route generation experience. It also combines distance and demand between ports to handle the two objective functions. This model can create beter routes and vessel allocations with respect to total distance and average ship utility, as indicated by the comparative analysis. Implementing the model with demands at the homebases in Jakarta and Surabaya reduced the total distance by up to 1160 N.Miles and increased average utility by 20% from the previous routes. However, the model only proposes using ships according to the efficient number for operation and is currently limited to the process of only one homebase. The current model has been automated into a program that functions as a decision support system for the company to determine the best or near-optimal routes.

Keywords: heterogeneous fleet vehicle routing problem, pickup and delivery, transition probability, google or-tools, path cheapest arc, guided local search

Pendahuluan

PT. X adalah perusahaan pelayaran peti kemas yang didirikan pada tahun 1970 dan berbasis di Indonesia. Mereka memiliki 60 kapal kontainer dengan total kapasitas sekitar 55.000 *TEUs* dan 2 *port homebase* di Tanjung Perak, Surabaya, dan Tanjung Priok, Jakarta. Layanan bisnis terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu pengiriman antar pelabuhan dan pengiriman langsung. Optimalisasi rute pelayaran menjadi faktor penting dalam manajemen logistik perusahaan pelayaran. Transportasi yang efisien dapat membantu mengurangi biaya pengiriman serta memberikan keunggulan kompetitif. Namun, industri pelayaran memiliki tantangan berupa kompleksitas dalam menerapkan teknik optimasi rute selagi tetap memenuhi permintaan pelanggan. Salah satu tantangan sekaligus keputusan utama yang dihadapi perusahaan ini adalah dalam merancang alokasi dan rute kapal antar pelabuhan yang optimal untuk memenuhi permintaan pelanggan. Perusahaan mempunyai

dua *homebase*, yaitu Tanjung Perak di Surabaya (SUB) dan Tanjung Priok di Jakarta (JKT), tiga rute pendulum yang merupakan jaringan rute sepanjang Timur-Barat Indonesia (Maruf [1]) dan beberapa rute non-pendulum lainnya. Kapal akan mengunjungi beberapa pelabuhan tujuan untuk mengirimkan peti kemas. Setelah membongkar peti kemas di pelabuhan tujuan, kapal akan mengangkut peti kemas lain dari pelabuhan tersebut ke pelabuhan selanjutnya. Perjalanan kapal diakhiri di *homebase* yang sama dengan keberangkatan.

Penelitian sebelumnya, seperti *Vehicle Routing Problem* (VRP), telah dilakukan untuk mengatasi tantangan serupa dalam masalah distribusi. Metode VRP dapat membantu menentukan rute optimal dari *homebase* ke pelanggan dengan mempertimbangkan faktor biaya terendah (Asl dan Azadeh [2]). Beberapa variasi VRP telah dikembangkan dari model konvensional untuk menambahkan batasan dan kendala termasuk *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*, *Time Windows*, *Pickup and Delivery Problem*, dan *Multi-depot VRP* (Choy *et al.* [3]). Namun, saat implementasi rencana rute baru, sering kali terjadi modifikasi oleh

^{1,2} Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Industri, Universitas Kristen Petra. Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236. Email: C13190046@john.petra.ac.id, halim@petra.ac.id

pengguna atau pihak perusahaan. Hal ini dikarenakan, sebagian rute baru yang dihasilkan mungkin tidak bersifat *feasible* meskipun memiliki jarak tempuh minimum (Canoy dan Guns [4]). Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan metode efisiensi rute perjalanan kapal menggunakan HFVRP dengan turut mempertimbangkan faktor pengetahuan perusahaan yang diterapkan dalam mengelola rute di masa lalu. Dengan memperhatikan efisiensi rute kapal, perusahaan dapat memperoleh manfaat seperti penurunan biaya dan emisi karbon. Selebihnya, perusahaan dapat menunjukkan perannya terhadap keberlanjutan, yang dapat meningkatkan daya saing mereka di industri transportasi Indonesia

Metode Penelitian

Metodologi penelitian adalah proses runtut dalam memperoleh, mengolah, merancang, dan menganalisis hasil untuk keperluan penelitian agar dapat berjalan secara sistematis.

Identifikasi Masalah

Dari hasil diskusi dengan pihak perusahaan, didapati adanya potensi pengembangan dalam perancangan rute dan alokasi kapal untuk memenuhi permintaan pelanggan. Hipotesis perusahaan adalah total jarak dan utilitas kapal saat berlayar masih dapat ditingkatkan dari rute yang telah digunakan sebelumnya. Oleh karena itu, dibutuhkan algoritma yang dapat merancang rute baru dengan total jarak minimum dan peningkatan utilitas kapal.

Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperdalam wawasan yang berkaitan dengan metode penyelesaian masalah dalam penelitian ini. Metode tersebut adalah *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* pada *solver* Google OR-Tools dengan 2 (dua) fungsi tujuan yaitu jarak dan utilitas, serta modifikasi *pickup and delivery problem*. Referensi dapat berasal dari jurnal dan buku yang mampu dipertanggungjawabkan.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang relevan digunakan untuk menjawab permasalahan penelitian. Penulis menggunakan dua teknik, yakni wawancara dan dokumen. Data tersebut adalah historis rute dan muatan kapal dari bulan Januari 2018-2023, data deskripsi kapal, dan data jarak antar pelabuhan.

Pengolahan Data

Data akan diolah menggunakan metode *data mining* deskriptif untuk mendapatkan informasi awal yang menunjang perancangan model. Beberapa informasi tersebut adalah jarak dan jumlah pelayaran antar pelabuhan, penetapan *homebase* untuk setiap pelabuhan berdasarkan frekuensi, dan permintaan pelanggan yang dilayani oleh 1 (satu) *homebase*,

Perancangan Model HFVRP

Model HFVRP akan menggunakan *solver* Google OR-Tools pada Python karena efisien, cepat, dan dapat menangani biaya asimetris (Husnadi *et al* [5]). Proses perancangan model akan melibatkan fase *input*, yakni pengolahan dan *formatting* lanjutan dari hasil informasi data sebelumnya. Informasi tersebut meliputi alokasi *demand* yang dilayani oleh 1 *homebase*, perhitungan *demand* dari *homebase*, dan *transition probability* sebagai bobot antar pelabuhan, dengan model matematisnya pada Persamaan 1 dan 2 (Bucarey *et al.* [6]).

1. Notasi
 - i adalah *port* saat ini
 - j adalah *port* selanjutnya
 - u adalah seluruh *port*
 - $dist$ adalah jarak *port* (i,j)
 - f adalah frek. keberangkatan *port* (i,j)

2. Persamaan *Transition Probability*

- Probabilitas Jarak

$$P_{dist}(j|i) = \frac{e^{-d_{ij}}}{\sum_u e^{-d_{iu}}} \quad (1)$$

- Probabilitas Empiris

$$P_f(j|i) = \frac{f_{ij}}{\sum_u f_{iu}} \quad (2)$$

Perhitungan *transition probability* akan berperan sebagai bobot faktor pengetahuan perusahaan dalam mengelola rute di masa lalu yang akan dimasukkan ke dalam fungsi tujuan model. Persamaan 3 hingga 10 adalah formulasi matematis dari model HFVRP (Jha dan Shakala [7]) dengan penambahan bobot faktor *transition probability*.

1. Notasi
 - n adalah jumlah *port*
 - V adalah himpunan *port* termasuk depot $V = \{0,1, \dots, n\}$

- c_{ij} adalah bobot antar *port* (i, j)
- m adalah jumlah kapal
- K adalah kumpulan kapal
- T adalah himpunan kapal, $K = \{1,2,\dots,m\}$
- Q_k kapasitas kapal k
- y total muatan

2. Variabel Keputusan

- $x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{kapal } k \text{ berangkat dari } i \text{ ke } j \\ 0, & \text{kapal } k \text{ tidak berangkat dari } i \text{ ke } j \end{cases}$
- y_{ij} adalah jumlah muatan dari lokasi i ke j

3. Fungsi Tujuan

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} * x_{ij}^k \quad (3)$$

Biaya / bobot (c_{ij}) akan dimodifikasi dengan *transition probability*, dengan W sebagai faktor pengali sebagai berikut.

$$cT_{ij} = \frac{1}{(W * P_{dist}(j|i) + (1 - W) * P_f(j|i))} \quad (4)$$

4. Kendala

- Setiap titik dikunjungi 1 kali oleh 1 kapal.

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 1, \quad i, j \in V \quad (5)$$

- Kapal yang mengunjungi suatu lokasi pasti akan meninggalkan lokasi tersebut.

$$\sum_{i=0}^n x_{ij}^k - \sum_{l=0}^n x_{jl}^k = 0, \quad i, j, l \in V, k \in K \quad (6)$$

- Kendala muatan kapal.

$$\sum_{k=1}^m Q_k x_{0j}^k \geq y_{0j}, \quad \forall j \in V \quad (7)$$

- Kendala larangan pengiriman muatan.

$$M \sum_{k=1}^m x_{ij}^k \geq y_{ij}, \quad \forall i \neq j \in V \quad (8)$$

- Kendala total muatan non-negatif.

$$y_{ij} \geq 0, \quad \forall i \neq j \in V \quad (9)$$

- Kendala keputusan biner.

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall i \neq j \in V; k \in K \quad (10)$$

Pengoperasian Model HFVRP

Terdapat dua tahap, yaitu proses dan *output*. Pada tahap proses, akan dipilih algoritma penyelesaian yang digunakan dalam *solver*. *Path Cheapest Arc* akan dipilih sebagai algoritma untuk menentukan solusi awal. Algoritma ini bersifat *greedy* atau merancang rute dengan menentukan lokasi selanjutnya yang memiliki bobot (c_{ij}) terendah dari lokasi saat ini secara iteratif hingga *demand* dan muatan kapal habis (Mulyati dan Sanggala [8]). Selanjutnya, akan digunakan *Guided Local Search* sebagai *improvement algorithm* yang merupakan pengembangan dari algoritma metaheuristik *Local Search*. Prosesnya adalah memodifikasi solusi awal hingga mencapai solusi yang terbaik, dengan memberikan penalti saat solusi tersebut terjebak pada titik *Local Minima* (Tsang dan Voudouris [9]). *Local Minima* adalah solusi terbaik di antara semua tetangganya, tapi belum tentu mewakili solusi terbaik secara keseluruhan (Alhindi *et al.* [10]). Setelah ditetapkan algoritma penyelesaian, model akan menggunakan hasil dari pengolahan data sebagai *input* untuk merancang rute dan alokasi kapal dengan kendala yang telah ditetapkan. Terakhir, hasil rute akan *diformat* pada tahap *output* sehingga dapat menampilkan alur *pickup and delivery* antar pelabuhan, total jarak, dan utilitas muatan kapal.

Verifikasi, Evaluasi, Syarat Demand

Tahap verifikasi dilakukan untuk memeriksa apakah rute hasil model telah memenuhi kendala HFVRP yang ditetapkan. Setelahnya, akan dilakukan evaluasi pada hasil model dalam hal jarak dan utilitas kapal. Terakhir, dilakukan proses pemeriksaan syarat *demand*, bahwa semua *demand* harus dapat diantarkan.

Modifikasi Pickup and Delivery

Modifikasi dilakukan saat terdapat *demand* antar pelabuhan yang tidak terkirimkan (*unsent demand*) di rute hasil model HFVRP. Prosesnya dimulai dengan menambahkan pelabuhan tujuan letak *unsent demand* harus diantarkan, pada rute kapal yang melalui pelabuhan asal letak *unsent demand* berasal. Selanjutnya, model akan dijalankan secara terpisah untuk rute kapal yang telah ditambahkan pelabuhan baru dengan menggunakan bobot (cD_{ij}) yang dimodifikasi, yaitu bobot pendekatan *demand*. Hasilnya, adalah sebuah rute modifikasi yang dapat mengirimkan semua *demand* antar pelabuhan. Berikut adalah notasi dan model

matematis dari bobot pendekatan *demand* pada Persamaan 11.

1. Notasi

- *i* adalah lokasi saat ini
- *j* adalah lokasi selanjutnya
- *dmd* adalah normalisasi *demand* (i,j)
- *dist* adalah normalisasi jarak (i,j)

2. Model Matematis Pendekatan *Demand* cD_{ij}

$$cD_{ij} = W * \frac{1}{dmd(j|i)} + (1 - W) * dist(j|i) \quad (11)$$

Modifikasi dari bobot pendekatan *demand* akan menggunakan dua algoritma yang dijalankan secara bertahap. Modifikasi bobot ditujukan agar model dapat merancang rute yang dapat mengirimkan keseluruhan *demand* di kapal yang akan diperbaharui. Sebagai acuan modifikasi, hanya digunakan *demand* pelabuhan selain *homebase* mengingat kapal akan selalu berawal dan berakhir di *homebase*, dan oleh karenanya, *demand homebase* sudah pasti dapat terkirimkan. Untuk detailnya, berikut contoh *demand* sebuah kapal pada Tabel 1 sebagai acuan modifikasi dengan Algoritma 1 dan 2.

Tabel 1 Demand pada kapal

POL	POD
BLW	BDJ, PNK, BTN
BTN	PNK, KTJ

1. Algoritma 1, memberi nilai Big M untuk bobot pasangan pelabuhan (i, j) yang sebaiknya tidak dikunjungi secara langsung, sehingga pelabuhan yang tidak memiliki *demand* tidak dipasangkan terlebih dahulu sebelum berlabuh ke pelabuhan yang berkepentingan. Contohnya dapat melihat Tabel 2.

Tabel 2. Modifikasi algoritma 1 cD_{ij}

POL/POD	JKT	BLW	KTJ	BDJ	PNK	BTN
JKT	0	cDij	cDij	Big M	Big M	cDij
BLW	cDij	0	cDij	cDij	cDij	cDij
KTJ	cDij	cDij	0	Big M	Big M	cDij
BDJ	cDij	cDij	cDij	0	Big M	cDij
PNK	cDij	cDij	cDij	Big M	0	cDij
BTN	cDij	cDij	cDij	Big M	cDij	0

Sehingga, JKT tidak mengunjungi BDJ secara langsung, karena BDJ memiliki *demand* yang dari BLW, dan seterusnya.

2. Algoritma 2, memberi nilai minimum pada bobot pasangan pelabuhan (i,j) yang sebaiknya dikunjungi berurutan, sehingga

kapal dapat mengunjungi pelabuhan asal yang memiliki *demand* terlebih dahulu sebelum mengunjungi pelabuhan tujuan letak *demand* harus diantarkan. Contohnya dapat melihat Tabel 3.

Tabel 3. Modifikasi algoritma 2 cD_{ij}

POL/POD	JKT	BLW	KTJ	BDJ	PNK	BTN
JKT	0	cDij	cDij	Big M	Big M	cDij
BLW	cDij	0	cDij	cDij	cDij	Min
KTJ	cDij	cDij	0	Big M	Min	cDij
BDJ	cDij	cDij	cDij	0	Min	Min
PNK	cDij	cDij	Min	Min	0	Min
BTN	cDij	cDij	Min	Min	Min	0

Sehingga, setelah kapal berlayar menuju BLW, model akan merancang rute untuk menuju pelabuhan yang memiliki *demand* dari BLW, yakni BTN dan BDJ. Lalu, begitu pula PNK dan KTJ akan dikunjungi setelah BTN yang memiliki *demand* terhadapnya.

Setelah diperoleh rute hasil modifikasi, akan dilakukan tahap verifikasi, evaluasi, dan pemeriksaan syarat *demand* kembali untuk memastikan semua syarat terpenuhi.

Analisa Perbandingan Rute Lama dan Baru

Rute hasil akhir model akan dibandingkan dengan rute masa lalu. Jika evaluasi rute usulan lebih baik dari segi jarak dan utilitas kapal, maka dapat disimpulkan bahwa model berhasil merancang rute yang lebih efisien. Namun jika sebaliknya, perlu dipilih alternatif algoritma lain pada *solver* dan faktor pengali lain pada bobot.

Validasi Rute Usulan

Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa model yang dirancang sudah memenuhi kebutuhan yang diajukan perusahaan, sehingga hasilnya dapat digunakan secara efektif.

Hasil dan Pembahasan

Penetapan *Homebase* Tiap Pelabuhan

Model HFVRP yang dirancang masih terbatas dalam penggunaan 1 (satu) *homebase* / depot. Sedangkan, perusahaan mengoperasikan 2 (dua) pelabuhan *homebase* yaitu Jakarta (JKT) dan Surabaya (SUB). Sehingga, diperlukan asumsi penetapan *homebase* untuk setiap pelabuhan. Prosesnya adalah dengan mencari frekuensi pelabuhan *homebase* dalam melayani suatu pelabuhan di masa lalu, dan memilih yang

terbanyak sebagai *homebase* untuk pelabuhan tersebut. Contohnya dapat melihat Tabel 4.

Tabel 4. Penetapan *homebase*

Port	Homebase	Frekuensi
BUW	SUB	15
BUW	JKT	5
BKS	JKT	20
PDG	JKT	21

Dari Tabel 4, BUW ditetapkan untuk dilayani oleh *homebase* SUB karena memiliki frekuensi terbanyak. Sedangkan, BKS dan PDG ditetapkan dengan *homebase* JKT.

Alokasi Demand untuk Model

Data *demand* harus dialokasikan terlebih dahulu dengan cara mengelompokkannya berdasarkan penetapan *homebase* sebelum dapat dimasukkan ke dalam model. Contohnya dapat melihat Tabel 5 berikut, dengan acuan penetapan *homebase* pada Tabel 4, dan penjelasan per kelompoknya di bawah Tabel 5.

Tabel 5. Alokasi *demand* per *omebase*

Kelompok	POL	POD	Demand (TEUS)
1	JKT	BKS	140
1	BKS	PDG	100
2	SUB	BUW	130
3	JKT	BUW	100
3	SUB	PDG	100

1. Kelompok 1 mewakili seluruh *demand* dari pelabuhan yang dilayani *homebase* JKT.
2. Kelompok 2 mewakili seluruh *demand* dari pelabuhan yang dilayani *homebase* SUB.
3. Kelompok 3 mewakili seluruh *demand* dari pelabuhan yang dilayani oleh 2 *homebase* yaitu SUB dan JKT.

Setiap kelompok akan dijalankan secara terpisah, kecuali kelompok 3 yang tidak digunakan karena mengandung 2 *homebase*.

Perhitungan Bobot Transition Probability

Transition Probability akan berperan sebagai biaya / bobot (cT_{ij}) antar pelabuhan, yang nantinya akan dipakai dalam fungsi tujuan. Perhitungannya akan menggunakan Persamaan 1 ($P.dist$) dan 2 ($P.f$) terlebih dahulu untuk setiap populasi pelabuhan dalam kelompok, lalu akan digabungkan dengan faktor pengali 0.5 seperti pada Persamaan 4 (cT_{ij}). Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 6 dan 7 berikut (contoh potongan *demand* kelompok *homebase* JKT).

Tabel 6. Perhitungan $Pdist$ dan Pf

POL	POD	Dist.	Frek.	P.dist	P.f
JKT	BKS	423	24	1	0,09
JKT	PDG	573	243	7,2E-66	0,91
BKS	JKT	287	159	7,3E-33	0,74
BKS	PDG	213	55	1	0,26
PDG	JKT	574	56	1,7E-157	0,22
PDG	BKS	213	196	1	0,78

Tabel 7. Perhitungan $cTij$, Faktor Pengali 0.5

POL	POD	P.dist	P.f	cTij
JKT	BKS	1	0,09	0,55
JKT	PDG	7,2E-66	0,91	0,45
BKS	JKT	7,3E-33	0,74	0,37
BKS	PDG	1	0,26	0,63
PDG	JKT	1,7E-157	0,22	0,11
PDG	BKS	1	0,78	0,89

Perancangan dan Operasi Model HFVRP

Perancangan model HFVRP akan menggunakan *solver* Google OR-Tools dengan memilih *Path Cheapest Arc Algorithm* untuk solusi awal, dan *Guided Local Search* sebagai *improvement algorithm*. Batasan yang digunakan adalah kapasitas kapal dalam mengangkut *demand* antar pelabuhan. Berikut adalah contoh rute lama, dan hasil rute usulan untuk potongan kelompok *demand* Jakarta pada Tabel 8 dan 9.

Tabel 8. Rute lama kelompok *homebase* JKT

Ship	Rute (angka sebagai pelabuhan)	Jarak Nmiles	Mean Util%.
1	JKT-19-13-17-12-14-JKT	2288	13,8
2	JKT-19-13-12-14-JKT	2188	30
3	JKT-14-20-15-JKT	1512	61,5
4	JKT-16-20-JKT	1559	20,7
5	JKT-16-20-15-JKT	1621	23,1
6	JKT-14-24-JKT	1188	39,6
7	JKT-22-JKT	643	38,7
8	JKT-14-18-JKT	1131	52,3
9	JKT-22-JKT	643	35,6
10	JKT-23-JKT	820	40
11	JKT-22-21-JKT	905	28,4
12	JKT-23-JKT	820	40,2

Evaluasi total jarak sebesar 15.318 Nmiles, dan rata-rata utilitas muatan kapal 34,9%. Lalu, jika menggunakan model HFVRP, maka hasilnya akan seperti Tabel 9 berikut.

Tabel 9. Rute usulan kelompok *homebase* JKT

Ship	Rute (angka mewakili pelabuhan)	Jarak Nmiles	Mean Util%.
1	JKT-20-14-JKT	1453	58,7
2	JKT-23-JKT	820	35,1
3	JKT-19-JKT	1147	47,7
4	JKT-21-17-16-15-13-JKT	2858	65,8
5	JKT-22-18-12-JKT	2030	57

Hasil model harus diverifikasi terlebih dahulu sebelum dapat di evaluasi. Dapat dilihat pada Tabel 9, bahwa kendala dan batasan dari HFVRP telah terpenuhi, yaitu setiap rute berawal dan berakhir pada *homebase* (JKT), semua pelabuhan dikunjungi 1 (satu) kali oleh 1 (satu) kapal, dan total muatan yang diangkut tidak melebihi kapasitas kapal (utilitas tidak melebihi 100%). Setelah ter verifikasi, hasil model akan dievaluasi, yakni memiliki total jarak sebesar 8303 *Nmiles*, dan rata-rata utilitas muatan kapal adalah 52,87%. Terakhir, akan dilihat syarat pemenuhan *demand*, dan pada hasil rute ini, masih terdapat *demand* yang belum terkirimkan yaitu dari pelabuhan 12 ke 14. Sehingga, perlu melalui tahap modifikasi *pickup and delivery*.

Modifikasi *Pickup and Delivery*

Modifikasi dilakukan dengan menambahkan pelabuhan 14 pada rute kapal yang melalui pelabuhan 12 (kapal 5). Lalu, mencari bobot pendekatan *demand* (cD_{ij}) dengan Persamaan 11 untuk setiap populasi pelabuhan di kapal 5, dan melakukan modifikasi dengan algoritma 1 dan 2. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Hasil bobot cD_{ij} dan modifikasinya

POL	POD	<i>Dmd</i>	<i>Dist</i>	cD_{ij}	<i>Modified</i>
JKT	22	1,00	0,29	0,79	
JKT	18	0,00	0,41	100,12	
JKT	12	0,00	1,00	100,30	
JKT	14	0,96	0,54	0,89	
22	JKT	0,31	0,35	2,33	
22	18	0,00	0,06	100,02	
22	12	0,00	0,59	100,18	Big M
22	14	0,00	0,23	100,07	
18	JKT	0,25	0,35	2,87	
18	22	0,00	0,00	100,00	
18	12	0,00	0,81	100,24	Big M
18	14	0,00	0,19	100,06	
12	JKT	0,00	1,00	100,30	
12	22	0,00	0,59	100,18	
12	18	0,00	0,81	100,24	
12	14	0,66	0,38	1,17	
14	JKT	0,43	0,56	1,81	
14	22	0,00	0,23	100,07	
14	18	0,00	0,27	100,08	
14	12	0,00	0,37	100,11	

Tidak ada modifikasi algoritma 2 karena semua *demand* berasal dan berakhir di *homebase* sehingga pasti diantarkan secara berurutan. Setelah mencari dan memodifikasi bobot pendekatan *demand*, model akan dijalankan untuk kapal tersebut dengan bobot (cD_{ij}) sebagai fungsi tujuan yang harus diminimalkan. Hasil akhir rute dapat dilihat pada Tabel 11 berikut.

Tabel 11. Rute hasil modifikasi *pickup and delivery*

<i>Ship</i>	Rute (angka mewakili pelabuhan)	Jarak <i>Nmiles</i>	<i>Mean Util%</i>
1	JKT-20-14-JKT	1453	58,7
2	JKT-23-JKT	820	35,1
3	JKT-19-JKT	1147	47,7
4	JKT-21-17-16-15-13-JKT	2858	65,8
5	JKT-22-18-12-14-JKT	2027	65

Sama seperti sebelumnya, hasil rute modifikasi harus diverifikasi terlebih dahulu sebelum dapat dievaluasi. Namun, proses verifikasi memiliki perbedaan, yakni hanya dilakukan untuk kapal yang dimodifikasi (kapal 5) dan berdasarkan populasi pelabuhan di kapal tersebut. Dapat dilihat pada Tabel 11, bahwa setiap pelabuhan di kapal 5 sudah dikunjungi 1 (satu) kali oleh 1 (satu) kapal, lalu kapal berawal dan berakhir pada *homebase* JKT, dan tidak melebihi kapasitas kapal. Setelah ter verifikasi, hasil rute akan dievaluasi yakni memiliki total jarak 8305 *Nmiles* dan rata-rata utilitas muatan kapal sebesar 54,47%. Serta, semua *demand* telah terkirimkan oleh setiap kapal.

Analisa Perbandingan Rute Lama dan Baru

Setelah diperoleh rute usulan yang dapat mengantarkan semua *demand*, dibuat tabel perbandingan untuk mengevaluasi efisiensi dari model dalam merancang rute. Namun sebelum itu, terlihat pada Tabel 8 bahwa masih ada beberapa rute ganda di rute masa lalu (kapal 7 dan 9, 1 dan 2, dan lainnya). Maka, rute ganda tersebut harus dihapus untuk menjaga akurasi dari perbandingan. Berikut hasil perbandingan rute lama dan usulan pada Tabel 12.

Tabel 12. Tabel perbandingan Jarak dan Utilitas

<i>Jenis Rute</i>	Total Jarak (<i>Nmiles</i>)	Utilitas Muatan Kapal (%)
Lama	15.318	35,21
Lama (tanpa ganda)	9465	35,21
Usulan	8305	54,47

Dapat dilihat pada Tabel 12, bahwa evaluasi hasil rute usulan sudah memiliki nilai yang lebih baik daripada rute di masa lalu. Dicapai penurunan total jarak sebesar 1160 *Nmiles*, dengan peningkatan utilitas muatan kapal sebesar 19,26%, atau dapat disimpulkan bahwa model telah merancang rute yang lebih efisien. Serta, perlu diketahui bahwa evaluasi rata-rata utilitas kapal hanya untuk muatan kontainer penuh. Sehingga, dipastikan bahwa masih terdapat sisa untuk muatan kontainer kosong agar bisa diantarkan kembali ke *homebase*.

Rute Demand Kelompok Homebase SUB

Untuk memeriksa apakah model dapat bekerja pada kelompok data yang berbeda, akan dicoba potongan *demand* untuk kelompok *homebase* SUB. Berikut adalah rute lama dan hasil rute usulan tertera pada Tabel 13 dan 14.

Tabel 13. Rute lama kelompok *homebase* SUB

Ship	Rute (angka sebagai pelabuhan)	Jarak Nmiles	Mean Util%
1	SUB-10-5-SUB	1809	41,1
2	SUB-7-3-SUB	777	42,2
3	SUB-8- SUB	1007	43,1
4	SUB-2-SUB	1549	37,8
5	SUB-8-SUB	1007	63,4
6	SUB-4-9-11-SUB	3492	25,7
7	SUB-3-7-SUB	803	41,6
8	SUB-1-SUB	488	64,6
9	SUB-1-SUB	488	60,2
10	SUB-1-7-SUB	639	30,2
11	SUB-1-7-SUB	639	39,7
12	SUB-6-3-SUB	1337	46,6
13	SUB-10-SUB	1612	23,7

Evaluasi total jarak 15.647 Nmiles, dan rata-rata utilitas muatan kapal 43,07%. Lalu, jika menggunakan model HFVRP, maka hasilnya akan seperti Tabel 14 berikut.

Tabel 14. Rute usulan kelompok *homebase* SUB

Ship	Rute (angka mewakili pelabuhan)	Jarak Nmiles	Mean Util%
1	SUB-1-SUB	488	60,6
2	SUB-4-3-SUB	3528	44,7
3	SUB-8-2-SUB	1394	71
4	SUB-7-SUB	522	57,5
5	SUB-10-SUB	1612	59,1
6	SUB-11-9-6-5-SUB	3808	74,6

Dari Tabel 14, hasil model telah ter verifikasi berdasarkan fungsi HFVRP. Lalu dari evaluasi, total jarak yang ditempuh adalah sebesar 8303 Nmiles, dan rata-rata utilitas muatan kapal adalah 61,2%. Namun pada rute usulan, masih ada *demand* yang belum terkirim (pelabuhan 4 ke 9 dan 6 ke 8). Sehingga, perlu melalui tahap modifikasi *pickup and delivery*. Hasil rute modifikasi dapat dilihat pada Tabel 15 berikut.

Tabel 15. Rute hasil modifikasi *pickup and delivery*

Ship	Rute (angka mewakili pelabuhan)	Jarak Nmiles	Mean Util%
1	SUB-1-SUB	488	60,6
2	SUB-3-4-9-SUB	3682	60
3	SUB-8-2-SUB	1394	71
4	SUB-7-SUB	522	57,5
5	SUB-10-SUB	1612	59,1
6	SUB-6-8-5-11-9-SUB	3703	62

Hasil rute modifikasi akan diverifikasi dan diperiksa pemenuhan syarat *demandnya* kembali. Setelah itu, dapat dilakukan evaluasi yakni dengan total jarak 11.401 Nmiles dan rata-rata utilitas muatan kapal sebesar 61,6%. Jika nilai ini dibandingkan dengan rute lama, maka dapat diperoleh hasil perbandingan pada Tabel 16 berikut.

Tabel 16. Tabel perbandingan Jarak dan Utilitas

Jenis Rute	Total Jarak (Nmiles)	Utilitas Muatan Kapal (%)
Lama	15.647	41,54
Lama (tanpa ganda)	12.222	41,54
Usulan	11.401	61,6

Dari hasil perbandingan, dapat disimpulkan bahwa model telah menghasilkan rute usulan yang lebih efisien dari segi total jarak dan utilitas muatan kapal, selagi tetap mengantarkan keseluruhan *demand*. Terdapat penurunan total jarak sebesar 821 Nmiles, dan disertai dengan peningkatan utilitas sebesar 20,44% dari rute masa lalu.

Validasi Rute Usulan pada Perusahaan

Setelah didapatkan usulan rute optimal yang memenuhi syarat pemenuhan *demand*, maka langkah terakhir adalah memvalidasi usulan tersebut kepada perusahaan. Dalam proses ini, akan ada kemungkinan untuk memodifikasi usulan rute secara manual dikarenakan beberapa faktor yang tidak masuk dalam model seperti faktor penjadwalan kapal dan penggunaan rute *transshipment* atau samuatan dipindah ke kapal lain di tengah perjalanan.

Simpulan

Penelitian ini menggunakan Model *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem* untuk mengoptimalkan rute dan alokasi muatan kapal. Namun, model dasar hanya fokus pada pengiriman *demand* dari satu *homebase* ke pelabuhan lain. Oleh karena itu, model harus dimodifikasi untuk mengatasi masalah pengiriman *demand* antar pelabuhan (*pickup and delivery*) dengan memodifikasi bobot dan memformat *output* agar dapat menampilkan proses *pickup and delivery*.

Ada dua pendekatan yang digunakan untuk mempertimbangkan dua fungsi tujuan yaitu jarak dan utilitas kapal. Pendekatan pertama menggunakan *transition probability*, dan kedua dengan menggabungkan nilai jarak dan *demand*

antar pelabuhan. Kedua pendekatan ini berperan dalam menciptakan rute optimal dengan memperhatikan prioritas pengantaran *demand* dan preferensi perusahaan.

Dari hasil analisis perbandingan, dapat disimpulkan bahwa model telah mampu menghasilkan rute dan alokasi kapal yang lebih optimal dari segi total jarak dan rata-rata utilitas muatan kapal. Kelompok *homebase* Jakarta mengalami penurunan total jarak sebesar 7013 *N.Miles* dengan rute ganda atau 1160 *N.Miles* tanpa rute ganda, serta peningkatan rata-rata utilitas sebesar 19,26%. Sementara itu, *homebase* Surabaya mengalami penurunan total jarak sebesar 4246 *N.Miles* dengan rute ganda atau 821 *N.Miles* tanpa rute ganda, dan peningkatan rata-rata utilitas sebesar 20,44%.

Namun, perlu diingat bahwa tujuan model adalah mengalokasikan kapal seefisien mungkin. Sehingga, jika dalam periode tersebut terdapat 5 kapal yang tersedia, model mungkin hanya mengusulkan untuk menggunakan 3 kapal karena lebih efisien untuk dioperasikan tanpa rute berulang.

Selebihnya model dalam penelitian ini telah diotomasi menjadi program yang mencakup proses *input* dan *output*. Hal ini berfungsi sebagai sistem pendukung keputusan bagi perusahaan dalam menentukan rute yang mendekati optimal dalam pekerjaan sehari-hari. Namun, tetap diperlukan modifikasi manual dari pihak perusahaan untuk menentukan penjadwalan kapal dan rute *transshipment* yang tidak dapat dicantumkan dalam model.

Daftar Pustaka

1. Maruf, B. Inovasi Teknologi Untuk Mendukung Program Tol Laut dan Daya Saing Industri Kapal Nasional, *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan II*, 2014, pp. 1-19.
2. Asl, H. F. & Azadeh, A., The Close–open Mixed Multi Depot Vehicle Routing Problem considering Internal and External Fleet of Vehicles, *Journal of Transportation Letters*, 11(2), 2019, pp. 78-92.
3. Choy, K. L., Chung, S. H., Ho, G. T., Lam, H. Y., & Lin, C., Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends, *Journal of Expert Systems with Applications*, 41(4), 2014 pp. 1118-1138.
4. Canoy, R., & Guns, T, Vehicle Routing by Learning from Historical Solutions, *Proceedings of the International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 2019, pp. 54-70.
5. Husnadi, R., Kristina, S., & Sianturi, R. D., Penerapan Model Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP) Menggunakan Google OR-Tools untuk Penentuan Rute Pengantaran Obat pada Perusahaan Pedagang Besar Farmasi (PBF), *Jurnal Telematika*, 15(2), 2020, pp. 1858-2516.
6. Bucarey, V., Canoy, R., Guns, T. & Mandi, J., Data Driven VRP: A Neural Network Model to Learn Hidden Preferences for VRP, *Proceedings of the 27th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming*, 2021, pp. 1-17.
7. Jha, J. K & Sakhala, N. K., Developing Decision Support System For Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem Using Hybrid Heuristic, *International Journal of Logistics Systems and Management*, 26(2), 2017, pp.253.
8. Mulyati, E., & Sanggala, E., Penjadwalan Sopir Pengangkutan Sampah dalam Meminimalkan Ketidakmerataan Jam Kerja di Kota Cimahi dengan Greedy Algorithm, *Jurnal Manajemen dan Teknik Industri Produksi*, 21(2), 2021, pp. 139-148.
9. Tsang, E. & Voudouris, C., Guided Local Search and its Application to the Traveling Salesman Problem, *European Journal of Operational Research*, 113(2), 1999, pp. 469-499.
10. Alhindi, A., Alsheddy, A., Tsang, E. P. & Voudouris, C. Guided Local Search. In M. G. Resende, P. Panos & R. Marti, *Handbook of Heuristics* (pp. 1-37). Springer International Publishing AG 2016.