

Optimasi Biaya Operasional Kapal Menggunakan Metode Pemrograman Dinamis

Dian Mulazamatul Fitria, Suhud Wahyudi, dan Daryono Budi Utomo
Departemen Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS)
e-mail: suhud@matematika.its.ac.id

Abstrak—Transportasi laut merupakan jalur pendistribusian terpenting dalam perekonomian di Indonesia. Sebab, lingkungan geografis Indonesia terdiri dari pulau-pulau yang dipisahkan oleh lautan. Namun saat ini Indonesia terancam kelangkaan persediaan bahan bakar yang menjadi sumber energi transportasi laut. Produksi bahan bakar menurun pada 2013 hingga 2018. Sedangkan konsumsi bahan bakar mengalami peningkatan. Selain itu, hampir setengah dari seluruh biaya operasional kapal yaitu untuk biaya konsumsi bahan bakar. Meski demikian, terdapat solusi untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar yaitu dengan pengaturan mesin dan kecepatan kapal selama berlayar. Sehingga, pada tugas akhir ini untuk mendapatkan biaya operasional kapal yang optimal yaitu dengan cara memutuskan kecepatan kapal yang tepat. Optimasi biaya operasional kapal diterapkan dengan menggunakan metode Pemrograman Dinamis. Penerapan metode Pemrograman Dinamis menunjukkan bahwa secara keseluruhan diperoleh biaya operasional kapal yang lebih optimal (terlihat dari jumlah konsumsi bahan bakar). Secara aktual KM.Labobar Voyage 03.2021 menghabiskan 647 KL bahan bakar. Sedangkan perolehan hasil optimasi KM.Labobar menghabiskan 610 KL bahan bakar.

Kata Kunci—Biaya Operasional, Kecepatan, Pemrograman Dinamis.

I. PENDAHULUAN

TRANSPORTASI merupakan suatu unsur yang sangat penting dalam menjalankan roda kehidupan. Kegiatan-kegiatan di bidang perekonomian, sosial, dan kemasyarakatan sangat erat kaitannya dengan kebutuhan dan perkembangan teknologi transportasi. Melihat dari kebutuhan dari sektor transportasi yang semakin meningkat sejalan dengan perkembangan zaman, maka pemerintah perlu untuk memperhatikan sektor transportasi, terutama transportasi laut. Perlu diingat bahwa Indonesia merupakan negara yang terdiri dari pulau-pulau dan dipisahkan oleh lautan. Sehingga dengan kondisi geografis Indonesia, transportasi laut memberikan kontribusi yang sangat besar bagi perekonomian nasional dan daerah.

Perusahaan transportasi laut atau perusahaan pelayaran harus mempertimbangkan biaya operasional kapal yang mereka keluarkan. Hampir setengah dari seluruh biaya operasionalnya yaitu untuk biaya bahan bakar. Oleh karena itu, perusahaan pelayaran berusaha untuk memikirkan bagaimana caranya meminimumkan biaya bahan bakar yang mereka keluarkan secara optimal. Ada berbagai macam cara yang bisa digunakan untuk meminimumkan konsumsi bahan bakar, yaitu dengan mengatur mesin secara efisien ataupun dengan mengatur kecepatan selama kapal berlayar.

Untuk mengatur mesin secara efisien tidak hanya mempertimbangkan pengaturan mesin selama berlayar saja, namun selama kapal sandar juga harus diperhatikan. Hal tersebut terjadi karena kapal tetap menggunakan mesin bantu

untuk pengoperasian kapal seperti untuk penerangan, pengaturan suhu, dan sebagainya. Penggunaan mesin bantu tersebut juga akan menambah konsumsi bahan bakar pada kapal. Oleh karena itu, waktu sandar juga diperhatikan dalam menghitung biaya konsumsi bahan bakar yang dikeluarkan oleh kapal.

Ketika berlayar, selain penggunaan mesin induk dan mesin bantu yang efisien, pengaturan kecepatan kapal selama berlayar juga harus dipertimbangkan agar bisa mendapatkan biaya konsumsi bahan bakar seminimum mungkin. Namun, pengaturan kecepatan pada setiap pelayaran kapal akan mempengaruhi waktu kedatangan kapal di pelabuhan tujuan. Jika kapal melaju dengan cepat maka besar kemungkinan kapal akan sampai di pelabuhan tujuan lebih cepat dari jadwal yang sudah ditentukan oleh perusahaan pelayaran. Sehingga, hal ini akan menyebabkan masalah yang baru karena kapal harus mengantri sangat lama untuk melakukan bongkar muat. Kapal yang harus mengantri juga akan mempengaruhi biaya operasional kapal yang dikeluarkan yaitu berupa biaya tarif layanan pelabuhan. Oleh karena itu, perlu untuk memutuskan kecepatan yang tepat agar kapal bisa masuk ke pelabuhan dengan waktu yang pas sesuai dengan jadwal yang sudah ditentukan sebelumnya.

N. Aydin, dkk. melakukan optimasi kecepatan kapal dan pemilihan lokasi pengisian bahan bakar menggunakan program dinamis. Penelitian ini bertujuan untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar total dengan tetap menjaga ketepatan jadwal [1]. Kemudian Farin Valentito, dkk. mempelajari masalah *fuel management* untuk pelayaran tramper. Dengan studi kasus kapal MV. MAMIRI yang melayani rute pelabuhan Tj. Priok – Tj. Perak – Gorontalo – Bitung – Tj. Priok. Dalam permasalahan ini akan mempertimbangkan 3 hal yaitu : pemilihan pelabuhan bunker, jumlah bahan bakar yang dibeli, dan pengaturan kecepatan. Karena ketiga hal ini memiliki hubungan, maka dapat digunakan untuk pertimbangan membuat strategi *fuel management*. Pembuatan model yang tepat untuk mewakili hubungan antara konsumsi bahan bakar dan kecepatan kapal adalah hal yang penting pada strategi *fuel management*. Kemudian dari permodelan tadi akan dikembangkan agar mendapatkan skenario bunkering yang optimal pada keadaan muatan kapal yang berbeda yaitu muatan kapal normal, muatan kapal rendah dan muatan kapal tinggi. Didalamnya termasuk pelabuhan pengisian bahan bakar, jumlah bahan bakar, dan kecepatan kapal. Berdasarkan permodelan yang telah dibuat, akan membahas efek *time windows* terhadap kapal, harga bahan bakar, kapasitas tangki kapal dan kemungkinan kehilangan muatan selama pelayaran [2].

Berdasarkan pada penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini ditentukan keputusan kecepatan yang sesuai untuk pengoptimalan biaya operasional kapal berupa biaya konsumsi bahan bakar dan biaya tarif layanan pelabuhan (jasa

labuh dan jasa tambat) dengan mempertimbangkan jadwal pelabuhan yang sudah ditentukan oleh perusahaan pelayaran yaitu PT PELNI. Keputusan kecepatan yang digunakan pada simulasi ini diasumsikan konstan dan tidak ada pengaruh cuaca serta muatan. Lalu disini akan mengambil satu studi kasus pada KM.Labobar voyage 3.2021 dengan rute Surabaya – Balikpapan – Pantoloan – Bitung – Ternate – Sorong – Manokwari – Serui – Jayapura – Serui – Manokwari – Sorong – Ternate – Bitung – Pantoloan – Balikpapan – Surabaya.

A. Pemrograman Dinamis

Bentuk yang tepat pada persamaan rekursif dapat berbeda antara pemrograman dinamis satu dengan pemrograman dinamis yang lainnya. Akan tetapi, notasi yang digunakan sama, dapat dilihat dalam notasi-notasi di bawah ini [3].

- N : jumlah tahap
 n : label dari keadaan yang terjadi ($n = 1, 2, \dots, N$)
 S_n : keadaan yang terjadi pada tahap n
 x_n : variabel keputusan pada tahap n
 x_n^* : nilai optimum dari x_n (diberikan S_n)
 $f_n(S_n, x_n)$: kontribusi dari tahap $n, n+1, \dots, N$ pada fungsi objektif jika sistem dimulai pada keadaan S_n tahap n, x_n tujuan keputusan yang mendekati dan keputusan optimal dibentuk setelahnya.

$$f_n^*(S_n) = f_n(S_n, x_n^*) \quad (1)$$

Maka, persamaan rekursif yang dapat dibentuk sebagai berikut.

$$f_n^*(S_n) = \max_{x_n} \{S_n, x_n, f_{n+1}^*(S_{n+1})\} \quad (2)$$

Atau

$$f_n^*(S_n) = \min_{x_n} \{S_n, x_n, f_{n+1}^*(S_{n+1})\} \quad (3)$$

Terdapat 2 macam prosedur rekursif, yaitu *forward* dan *backward*. Penyelesaian program dinamis dari depan ke belakang (*forward recursive*), yaitu dengan melakukan perhitungan tahap untuk keputusan optimal dimulai dari keadaan masalah yang pertama ke masalah yang terakhir. Penyelesaian program dinamis dari belakang ke depan (*backward recursive*), yaitu dengan melakukan perhitungan tahap untuk keputusan optimal dimulai dari keadaan masalah yang terakhir ke masalah yang pertama [3].

II. URAIAN PENELITIAN

A. Identifikasi Permasalahan

Permasalahan pada penelitian ini adalah mengoptimasi biaya operasional kapal.

B. Studi Literatur

Pada tahap ini akan dilakukan identifikasi permasalahan yang diangkat pada penelitian ini dengan mempelajari langkah-langkah dalam melakukan optimasi biaya operasional kapal dengan menggunakan metode Pemrograman Dinamis.

C. Pengumpulan Data

Data yang akan digunakan adalah data kapal KM.Labobar voyage 03.2021 berupa jarak antar pelabuhan, waktu kapal mulai tambat di setiap pelabuhan, waktu kapal berangkat dari pelabuhan, biaya bahan bakar kapal per liter, tarif jasa labuh, tarif jasa tambat

D. Analisis Model Identifikasi Optimal

Melakukan analisis terhadap hasil optimal pada penelitian dengan menggunakan model Pemrograman Dinamis. Langkah-langkah yang dilakukan untuk analisis model sampai menghasilkan biaya operasional kapal yang optimal adalah sebagai berikut.

1) Mengidentifikasi Variabel Independen dan Variabel Dependen.

Variabel independen yang digunakan, yaitu biaya konsumsi bahan bakar ketika berlayar, biaya konsumsi bahan bakar ketika sandar, biaya labuh kapal dan biaya tambat kapal. Sedangkan variabel dependen yang digunakan, yaitu total biaya operasional kapal setiap pelabuhan dan waktu tiba kapal pada setiap pelabuhan.

2) Mengidentifikasi Variabel Keputusan Setiap Tahap

Keputusan yang akan diambil pada setiap tahap adalah kecepatan pada kapal dengan rentang kecepatan 17,5 knots sampai 19,5 knots.

3) Merumuskan Persamaan Fungsi Objektif

Menentukan fungsi tujuan yang akan digunakan berdasarkan variabel independen, variabel dependen, variabel keputusan setiap tahap pada sistem sehingga membentuk sebuah persamaan. Setiap tahap dalam sistem ini merupakan keputusan yang dilakukan di tiap rute pelayaran yang dilalui oleh kapal.

4) Penyelesaian Model Pemrograman Dinamis

Penyelesaian model berdasarkan keadaan dan variabel-variabel lainnya dengan menetapkan output yang dapat diperoleh dengan fungsi rekursif, yaitu mendapatkan biaya operasional kapal yang optimal.

5) Analisis Penyelesaian Masalah

Melakukan perhitungan hasil dari penerapan metode Pemrograman Dinamis dan dilakukan penentuan kecepatan kapal melalui fungsi objektif yang dibentuk.

E. Penarikan Kesimpulan dan Pembukuan Tugas Akhir

Pada tahap yang terakhir, akan di tarik kesimpulan dari penelitian yang dilakukan sebelumnya dan akan dilakukan pembukuan tugas akhir.

III. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan dan Pengumpulan Data Penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data kapal KM.Labobar yang diuraikan sebagai berikut.

1) Kecepatan Kapal

Batasan kecepatan kapal diambil dari ketentuan kecepatan maksimum yang telah ditentukan oleh Kementerian Perhubungan Direktorat Jenderal Perhubungan Laut. Variasi kecepatan kapal yang diambil merupakan kecepatan rata-rata

Tabel 1.
Variasi Kecepatan

Variasi	Kecepatan (knots)
1	17,5
2	18
3	18,5
4	19
5	19,5

Tabel 2.
Jarak Antar Pelabuhan

No.	Pelabuhan	Jarak (nmi)
1	Surabaya – Balikpapan	485
2	Balikpapan – Pantoloan	188
3	Pantoloan – Bitung	480
4	Bitung – Ternate	146
5	Ternate – Sorong	306
6	Sorong – Manokwari	220
7	Manokwari – Serui	156
8	Serui - Jayapura	310
9	Jayapura – Serui	310
10	Serui – Manokwari	156
11	Manokwari – Sorong	220
12	Sorong – Ternate	306
13	Ternate – Bitung	146
14	Bitung – Pantoloan	480
15	Pantoloan – Balikpapan	188
16	Balikpapan – Surabaya	485

kapal. Sehingga, variasi kecepatan kapal yang akan digunakan yaitu pada Tabel 1.

2) Rute dan Jarak Pelabuhan

Data jarak dan rute pelabuhan yang dilalui oleh KM.Labobar pada Voyage 03.2021 didapatkan dari PT Pelayaran Nasional Indonesia (PELNI) yang ditampilkan pada Tabel 2.

3) Jadwal Kapal Tambat (Bongkar Muat)

Pada tiap-tiap pelabuhan yang dilalui oleh KM Labobar pada Voyage 03.2021 sudah ditentukan jadwal ketika kapal melakukan bongkar muat (tambat). Pada kasus ini kapal akan langsung kembali memulai pelayaran ketika kapal sudah selesai melakukan bongkar muat. Jadwal kapal tambat ditampilkan pada Tabel 3.

B. Proses Pengolahan Data Penelitian

Setelah dilakukan pengumpulan data, data tersebut akan diolah sehingga diperoleh data yang sesuai untuk menghasilkan biaya operasional kapal yang optimal.

1) Deskripsi Sistem

Pada tiap-tiap pelabuhan yang dilalui sudah ditentukan jadwal ketika kapal melakukan bongkar muat (tambat). Pada kasus ini kapal akan langsung kembali memulai pelayaran ketika kapal sudah selesai melakukan bongkar muat. Jadwal yang sudah ditentukan harus dipatuhi karena akan mempengaruhi biaya jasa labuh kapal. Oleh karena itu, dalam pelayaran peraturan kecepatan kapal harus disesuaikan agar sesuai dengan jadwal yang sudah ditentukan.

2) Perhitungan Waktu Pelayaran

Untuk menghitung lama waktu kapal berlayar di tiap pelayaran menggunakan persamaan (4).

$$t = \frac{S}{v} \tag{4}$$

Dimana :

Tabel 3.
Jadwal KM.Labobar Voyage 03.2021

No	Pelabuhan	Mulai Tambat		Selesai Tambat		Lama tambat (jam)
		Tanggal	Jam	Tanggal	Jam	
0	Surabaya			27-01-21	20.00	-
1	Balikpapan	29-01-21	02.00	29-01-21	05.00	3
2	Pantoloan	29-01-21	17.00	29-01-21	19.00	2
3	Bitung	30-01-21	23.00	31-01-21	03.00	4
4	Ternate	31-01-21	12.00	31-01-21	14.00	2
5	Sorong	01-02-21	09.00	01-02-21	12.00	3
6	Manokwari	02-02-21	00.01	02-02-21	02.00	2
7	Serui	02-02-21	11.00	02-02-21	12.00	2
8	Jayapura	03-02-21	08.00	03-02-21	12.00	4
9	Serui	04-02-21	07.00	04-02-21	09.00	2
10	Manokwari	04-02-21	18.00	04-02-21	20.00	2
11	Sorong	05-02-21	08.00	05-02-21	11.00	3
12	Ternate	06-02-21	06.00	06-02-21	08.00	2
13	Bitung	06-02-21	16.00	06-02-21	19.00	3
14	Pantoloan	07-02-21	23.00	08-02-21	01.00	2
15	Balikpapan	08-02-21	13.00	08-02-21	15.00	2
16	Surabaya	09-02-21	19.00	09-02-21	21.00	2

Tabel 4.
Waktu Pelayaran Kapal (jam)

No	Pelabuhan	Kecepatan (knots)				
		17,5	18	18,5	19	19,5
1	Surabaya – Balikpapan	28	27	26	26	25
2	Balikpapan – Pantoloan	11	10	10	10	10
3	Pantoloan – Bitung	27	27	26	25	25
4	Bitung – Ternate	8	8	8	8	7
5	Ternate – Sorong	17	17	17	16	16
6	Sorong – Manokwari	13	12	12	12	11
7	Manokwari – Serui	9	9	8	8	8
8	Serui - Jayapura	18	17	17	16	16
9	Jayapura – Serui	18	17	17	16	16
10	Serui – Manokwari	9	9	8	8	8
11	Manokwari – Sorong	13	12	12	12	11
12	Sorong – Ternate	17	17	17	16	16
13	Ternate – Bitung	8	8	8	8	7
14	Bitung – Pantoloan	27	27	26	25	25
15	Pantoloan – Balikpapan	11	10	10	10	10
16	Balikpapan – Surabaya	28	27	26	26	25

t : waktu berlayar (jam)

S : jarak (nmi)

v : kecepatan (knots)

Sehingga dari persamaan (4) didapatkan waktu pelayaran kapal berdasarkan 5 variasi kecepatan dan jarak antar pelabuhan yang ditampilkan pada Tabel 4.

3) Waktu Kedatangan Kapal

Waktu pelayaran kapal yang bergantung pada kecepatan kapal akan mempengaruhi waktu kedatangan kapal pada pelabuhan tujuan. Sehingga, waktu kedatangan kapal pada setiap pelabuhan dengan 5 kemungkinan yang ditampilkan pada Tabel 5.

Dari Tabel 5 dengan memperhatikan Tabel 3, diketahui bahwa ada beberapa solusi kecepatan yang menyebabkan kapal terlambat untuk tiba di pelabuhan tujuan, seperti pada pelayaran ke-6 dan ke-11 dengan kecepatan 17,5 knots. Karena pada penelitian ini sangat memperhatikan ketepatan jadwal, maka kecepatan ini tidak bisa digunakan (tidak memenuhi) untuk pelayaran ke-6 dan ke-11 dalam perhitungan biaya operasional kapal ini.

Tabel 5.
Waktu Kedatangan Kapal

No	Pelabuhan	Kecepatan (knots)				
		17,5	18	18,5	19	19,5
1	Balikpapan	29-Jan 00.01	28-Jan 23.00	28-Jan 22.00	28-Jan 22.00	28-Jan 21.00
2	Pantoloan	29-Jan 16.00	29-Jan 15.00	29-Jan 15.00	29-Jan 15.00	29-Jan 15.00
3	Bitung	30-Jan 22.00	30-Jan 22.00	30-Jan 21.00	30-Jan 20.00	30-Jan 20.00
4	Ternate	31-Jan 11.00	31-Jan 11.00	31-Jan 11.00	31-Jan 11.00	31-Jan 10.00
5	Sorong	01-Feb 07.00	01-Feb 07.00	01-Feb 07.00	01-Feb 06.00	01-Feb 06.00
6	Manokwari	02-Feb 01.00	02-Feb 00.01	02-Feb 00.01	02-Feb 00.01	01-Feb 23.00
7	Serui	02-Feb 11.00	02-Feb 11.00	02-Feb 10.00	02-Feb 10.00	02-Feb 10.00
8	Jayapura	03-Feb 07.00	03-Feb 06.00	03-Feb 06.00	03-Feb 05.00	03-Feb 05.00
9	Serui	04-Feb 06.00	04-Feb 05.00	04-Feb 05.00	04-Feb 04.00	04-Feb 04.00
10	Manokwari	04-Feb 18.00	04-Feb 18.00	04-Feb 17.00	04-Feb 17.00	04-Feb 17.00
11	Sorong	05-Feb 09.00	05-Feb 08.00	05-Feb 08.00	05-Feb 08.00	05-Feb 07.00
12	Ternate	06-Feb 04.00	06-Feb 04.00	06-Feb 03.00	06-Feb 03.00	06-Feb 03.00
13	Bitung	06-Feb 16.00	06-Feb 16.00	06-Feb 16.00	06-Feb 16.00	06-Feb 15.00
14	Pantoloan	07-Feb 22.00	07-Feb 22.00	07-Feb 21.00	07-Feb 20.00	07-Feb 20.00
15	Balikpapan	08-Feb 12.00	08-Feb 11.00	08-Feb 11.00	08-Feb 11.00	08-Feb 11.00
16	Surabaya	09-Feb 19.00	09-Feb 18.00	09-Feb 17.00	09-Feb 17.00	09-Feb 16.00

Tabel 6.
Volume Bahan Bakar Kapal Ketika Berlayar (liter)

No	Pelabuhan	Kecepatan (knots)				
		17,5	18	18,5	19	19,5
1	Surabaya – Balikpapan	67.245	65.377		63.610	61.930
2	Balikpapan – Pantoloan	26.066	25.342	24.657	24.008	23.393
3	Pantoloan – Bitung	66.551	64.703	62.954	61.297	59.726
4	Bitung – Ternate	20.243	19.680	19.148	18.645	18.167
5	Ternate – Sorong	42.426	41.248	40.133	39.077	38.075
6	Sorong – Manokwari	30.503	29.655	28.854	28.095	27.374
7	Manokwari – Serui	21.629	21.028	20.460	19.922	19.411
8	Serui – Jayapura	42.981	41.787	40.658	39.588	38.573
9	Jayapura – Serui	42.981	41.787	40.658	39.588	38.573
10	Serui – Manokwari	21.629	21.028	20.460	19.922	19.411
11	Manokwari – Sorong	30.503	29.655	28.854	28.095	27.374
12	Sorong – Ternate	42.426	41.248	40.133	39.077	38.075
13	Ternate – Bitung	20.243	19.680	19.148	18.645	18.167
14	Bitung – Pantoloan	66.551	64.703	62.954	61.297	59.726
15	Pantoloan –					

Dimana :

- n : tahap
- g_{I_n} : volume bahan bakar kapal ketika berlayar (liter)
- KM_I : kapasitas mesin induk (kW)
- JM_I : jumlah mesin induk
- KM_B : kapasitas mesin bantu (kW)
- JM_B : jumlah mesin bantu
- S_n : jarak antar pelabuhan pada tahap n (nmi)
- v : kecepatan (knots)

Berdasarkan data yang diperoleh dari PT PELNI diketahui bahwa kapasitas mesin induk KM.Labobar adalah 11420HP = 8519,32kW dengan jumlah mesin 2 buah. Sedangkan kapasitas mesin bantu KM. Labobar adalah 1550HP = 1156,3kW dengan jumlah mesin 4 buah. Dengan menggunakan Persamaan (6) dapat disimpulkan volume bahan bakar kapal ketika berlayar yang ditampilkan melalui Tabel 6.

Sedangkan, ketika kapal sandar, kapal hanya akan menggunakan menggunakan mesin bantu. Pada simulasi ini, perhitungan konsumsi bahan bakar ketika kapal sandar dilakukan ketika kapal berada di pelabuhan tujuan. Sehingga, persamaan untuk menghitung konsumsi bahan bakar ketika kapal sandar adalah sebagai berikut.

$$g_{s_n} = 0,112 \times (KM_B \times JM_B) \times t_s$$

Dimana :

- g_{s_n} : volume bahan bakar kapal ketika sandar (liter)
- KM_B : kapasitas mesin bantu (kW)
- JM_B : jumlah mesin bantu
- t_s : waktu sandar kapal (jam)

Berdasarkan waktu kedatangan kapal pada Tabel 5 dan waktu selesai kapal tambat pada Tabel 3 maka dapat disimpulkan lama waktu kapal sandar di pelabuhan yang ditampilkan melalui Tabel 7.

Dari perhitungan lama waktu kapal sandar pada Tabel 7, akan dihitung volume bahan bakar kapal ketika sandar menggunakan Persamaan (7). Sehingga, dapat disimpulkan volume bahan bakar kapal ketika sandar yang ditampilkan melalui Tabel 8.

5) Perhitungan Biaya Labuh Kapal

Dalam melakukan kegiatan berlabuh, kapal bergantung dari penentuan kecepatan kapal. Kapal akan melakukan kegiatan berlabuh jika kapal sampai di pelabuhan lebih awal

4) Perhitungan Konsumsi Bahan Bakar

Secara umum untuk menghitung konsumsi bahan bakar perusahaan pelayaran Indonesia menggunakan persamaan berikut.

$$g = \sigma \times (KM \times JM) \times t \tag{5}$$

Dimana :

- g : volume bahan bakar kapal (liter)
- KM : kapasitas mesin (kW)
- JM : jumlah mesin
- t : waktu (jam)

Untuk semua kapal berbendera Indonesia dan berlayar di wilayah perairan Indonesia menggunakan $\sigma = 0,112$ dimana angka 0,112 diambil dari

$$0,112 = 0,16 \times 0,70$$

Dengan :

- 0,16 : konstanta (angka ketetapan)
- 0,70 : efisiensi pemakaian BBM bersubsidi

Angka efisiensi digunakan oleh perusahaan untuk mencapai kecepatan normal. Angka efisiensi merupakan angka kesepakatan dari PT PELNI, BPH Migas, dan PT Pertamina.

Sehingga Persamaan (5) dapat dituliskan menjadi formula dengan 2 kondisi yang berbeda yaitu ketika kapal berlayar dan ketika kapal sandar. Ketika kapal berlayar, kapal akan menggunakan dua mesin yaitu mesin bantu dan mesin induk. Sehingga, persamaan (6) untuk menghitung konsumsi bahan bakar kapal ketika kapal berlayar adalah sebagai berikut.

$$g_{I_n} = 0,112 \times (KM_I \times JM_I + KM_B \times JM_B) \times \frac{S_n}{v} \tag{6}$$

Tabel 7.
Waktu Sandar Kapal (jam)

No	Pelabuhan	Kecepatan (knots)				
		17,5	18	18,5	19	19,5
1	Balikpapan	5	6	7	7	8
2	Pantoloan	3	4	4	4	4
3	Bitung	5	5	6	7	7
4	Ternate	3	3	3	3	4
5	Sorong	5	5	5	6	6
6	Manokwari	-	2	2	2	3
7	Serui	2	2	3	3	3
8	Jayapura	5	6	6	7	7
9	Serui	3	4	4	5	5
10	Manokwari	2	2	3	3	3
11	Sorong	-	3	3	3	4
12	Ternate	4	4	4	5	5
13	Bitung	3	3	3	3	4
14	Pantoloan	3	3	4	5	5
15	Balikpapan	3	4	4	4	4
16	Surabaya	2	3	4	4	5

dari jadwal kapal melakukan tambat (bongkar muat). Dan jika, kapal sampai di pelabuhan melebihi jadwal tambat (bongkar muat), maka kecepatan kapal bisa digunakan (tidak memenuhi). Sehingga, berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 5 waktu kapal berlabuh pada setiap pelabuhan dengan 5 kemungkinan yang ditampilkan dalam Tabel 9.

Diketahui untuk menghitung tarif labuh kapal bagi perusahaan pelayaran adalah pada persamaan (8).

$$l_n = \text{tarif} \times GT \times t_l \tag{8}$$

Dimana:

l_n : biaya labuh kapal

GT : gross tonnage

t_l : masa labuh kapal

Pada pelabuhan Surabaya, perhitungan 1 masa labuh kapal terhitung setiap 15 hari dengan tarif Rp90,00/GT/masa labuh. Dalam penelitian ini, diasumsikan tarif labuh kapal sama pada semua pelabuhan. Jumlah tarif layanan jasa labuh kapal, dihitung berdasarkan ukuran kapal dalam *Gross Tonnage* (GT). Telah diketahui bahwa GT dari KM. Labobar adalah 15136 GT/m³.

Sehingga, berdasarkan Tabel 9 dapat dilihat bahwa pada beberapa pelabuhan ada kemungkinan kapal tidak melakukan kegiatan berlabuh sehingga kapal tidak mengeluarkan biaya jasa labuh. Untuk kapal yang melakukan kegiatan berlabuh pada setiap pelabuhan, biaya tarif terhitung 1 masa labuh karena kapal selalu berlabuh tidak lebih dari 15 hari. Sehingga, perhitungan tarif labuh kapal pada setiap pelabuhan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} l_n &= \text{tarif} \times GT \times t_l \\ l_n &= 90 \times 15136 \times 1 \\ l_n &= \text{Rp}1.362.240,00 \end{aligned}$$

6) Perhitungan Biaya Tambat Kapal

Diketahui untuk menghitung tarif tambat kapal bagi perusahaan pelayaran adalah pada persamaan (9).

$$b_n = \text{tarif} \times GT \times t_t \tag{9}$$

Dimana:

b_n : biaya tambat kapal

GT : gross tonnage

t_t : masa tambat kapal (etmal)

Tabel 8.
Volume Bahan Bakar Kapal Ketika Sandar (liter)

No	Pelabuhan	Kecepatan (knots)				
		17,5	18	18,5	19	19,5
1	Balikpapan	2.590	3.108	3.626	3.626	4.144
2	Pantoloan	1.554	2.072	2.072	2.072	2.072
3	Bitung	2.590	2.590	3.108	3.626	3.626
4	Ternate	1.554	1.554	1.554	1.554	2.072
5	Sorong	2.590	2.590	2.590	3.108	3.108
6	Manokwari	-	1.036	1.036	1.036	1.554
7	Serui	1.036	1.036	1.554	1.554	1.554
8	Jayapura	2.590	3.108	3.108	3.626	3.626
9	Serui	1.554	2.072	2.072	2.590	2.590
10	Manokwari	1.036	1.036	1.554	1.554	1.554
11	Sorong	-	1.554	1.554	1.554	2.072
12	Ternate	2.072	2.072	2.072	2.590	2.590
13	Bitung	1.554	1.554	1.554	1.554	2.072
14	Pantoloan	1.554	1.554	2.072	2.590	2.590
15	Balikpapan	1.554	2.072	2.072	2.072	2.072
16	Surabaya	1.036	1.554	2.072	2.072	2.590

Tabel 9.
Waktu Labuh Kapal (jam)

No	Pelabuhan	Kecepatan (knots)				
		17,5	18	18,5	19	19,5
1	Balikpapan	2	3	4	4	5
2	Pantoloan	1	2	2	2	2
3	Bitung	1	1	2	3	3
4	Ternate	1	1	1	1	2
5	Sorong	2	2	2	3	3
6	Manokwari	-	0	0	0	1
7	Serui	0	0	1	1	1
8	Jayapura	1	2	2	3	3
9	Serui	1	2	2	3	3
10	Manokwari	0	0	1	1	1
11	Sorong	-	0	0	0	1
12	Ternate	2	2	2	3	3
13	Bitung	0	0	0	0	1
14	Pantoloan	1	1	2	3	3
15	Balikpapan	1	2	2	2	2
16	Surabaya	0	1	2	2	3

Pada pelabuhan Surabaya, tarif untuk layanan tambat adalah Rp116,00/GT/etmal. Dalam penelitian ini, diasumsikan tarif tambat kapal sama disetiap pelabuhan. Sedangkan, untuk perhitungan masa tambat adalah sebagai berikut.

- masa tambat < 6 jam : 0,25 etmal
- 6 ≤ masa tambat < 12 jam : 0,5 etmal
- 12 ≤ masa tambat < 18 jam : 0,75 etmal
- 18 ≤ masa tambat < 24 jam : 1 etmal

Pada Tabel 3 diketahui bahwa kapal melakukan tambat (bongkar muat) selalu kurang dari 6 jam pada setiap pelabuhan. Sehingga, perhitungan biaya tambat pada setiap pelabuhan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} b_n &= \text{tarif} \times GT \times t_t \\ b_n &= 116 \times 15136 \times 0,25 \\ b_n &= \text{Rp}438.944,00 \end{aligned}$$

C. Pemecahan Masalah Menggunakan Metode Pemrograman Dinamis

Pemrograman dinamis merupakan suatu metode dalam matematika yang digunakan untuk pemecahan masalah dengan membagi permasalahan menjadi beberapa *stage* (tahap) sehingga diperoleh hasil yang optimal. Pada penelitian ini akan dilakukan optimasi biaya operasional kapal berupa konsumsi bahan bakar kapal (selama kapal berlayar dan selama kapal sandar) serta biaya tarif layanan pelabuhan (tarif labuh dan tarif tambat). Penelitian ini

dihitung secara manual dengan menggunakan *software Microsoft Excel*. Sehingga, model formulasi perhitungan optimasi biaya operasional kapal dengan menggunakan metode pemrograman dinamis adalah sebagai berikut.

Fungsi Tujuan :

$$f_n(s_n) = \min\{[r(g_{l_n} + g_{s_n}) + l_n + b_n] + f_{n-1}^*(s_{n-1})\} \quad (10)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, 16$$

Dimana :

- n : tahap
- r : biaya bahan bakar kapal
- g_{l_n} : volume bahan bakar kapal ketika berlayar pada tahap n dengan kecepatan i (liter)
- g_{s_n} : volume bahan bakar kapal ketika sandar pada tahap n dengan kecepatan i (liter)
- l_n : biaya labuh kapal pada tahap n dengan kecepatan i
- b_n : biaya tambat kapal pada tahap n dengan kecepatan i
- $f_n(s_n)$: biaya operasional kapal minimum pada tahap n
- $f_{n-1}^*(s_{n-1})$: biaya operasional kapal minimum pada tahap $n-1$

Pada penelitian ini, optimasi biaya operasional kapal dilakukan dengan memutuskan kecepatan kapal dari 5 variasi kecepatan kapal pada Tabel 1. Sehingga, fungsi tujuan pada pemrograman dinamis dengan 5 variasi kecepatan adalah sebagai berikut :

$$f_n(s_n) = \min_{i=1,2,3,4,5} \{[r(g_{l_n} + g_{s_n}) + l_n + b_n] + f_{n-1}^*(s_{n-1})\} \quad (11)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, 16$$

Dimana :

- n : tahap
- i : variasi kecepatan
- r : biaya bahan bakar kapal
- g_{l_n} : volume bahan bakar kapal ketika berlayar pada tahap n dengan kecepatan i (liter)
- g_{s_n} : volume bahan bakar kapal ketika sandar pada tahap n dengan kecepatan i (liter)
- l_n : biaya labuh kapal pada tahap n dengan kecepatan i
- b_n : biaya tambat kapal pada tahap n dengan kecepatan i
- $f_n(s_n)$: biaya operasional kapal minimum pada tahap n
- $f_{n-1}^*(s_{n-1})$: biaya operasional kapal minimum pada tahap $n-1$

Karena PT PELNI merupakan perusahaan penugasan dari pemerintah maka pemakaian bahan bakar untuk operasional kapal menggunakan bahan bakar dengan harga jual dari PT Pertamina menggunakan Bahan Bakar jenis B30 bersubsidi. Bahan Bakar B30 adalah campuran biodiesel berbasis kelapa sawit sebanyak 30% dalam minyak solar [4]. Sehingga biaya bahan bakar kapal yang digunakan adalah Rp 5.163,00/liter.

Dengan menggunakan data yang sudah dikumpulkan dan diolah sebelumnya, penyelesaian optimasi biaya operasional menggunakan metode pemrograman dinamis deterministik dengan rekursif maju (*forward recursive*) berdasarkan 5 variasi kecepatan, didapatkan hasil rekapitulasi perhitungan total biaya operasional kapal dapat dilihat pada Tabel 10.

Karena biaya operasional terbesar kapal yaitu untuk biaya bahan bakar maka yang diperhatikan dalam penelitian ini adalah banyaknya bahan bakar yang di konsumsi oleh kapal.

Tabel 10.

Rekapitulasi Total Biaya Operasional Kapal			
No.	Pelabuhan	Keputusan Kecepatan (knots)	Total Biaya Operasional Kapal
1	Surabaya – Balikpapan	19,5	Rp334.772.661,00
2	Balikpapan – Pantoloan	19,5	Rp133.274.877,00
3	Pantoloan – Bitung	19,5	Rp328.885.997,00
4	Bitung – Ternate	19	Rp106.086.824,00
5	Ternate – Sorong	19,5	Rp214.429.872,00
6	Sorong – Manokwari	19	Rp150.840.359,00
7	Manokwari – Serui	19,5	Rp110.042.797,00
8	Serui - Jayapura	19,5	Rp219.674.113,00
9	Jayapura – Serui	19,5	Rp214.325.014,00
10	Serui – Manokwari	19,5	Rp110.042.797,00
11	Manokwari – Sorong	19	Rp153.514.909,00
12	Sorong – Ternate	19,5	Rp211.755.323,00
13	Ternate – Bitung	19	Rp104.724.584,00
14	Bitung – Pantoloan	19,5	Rp323.536.898,00
15	Pantoloan – Balikpapan	19,5	Rp133.274.877,00
16	Balikpapan – Surabaya	19,5	Rp326.749.012,00
Total			Rp3.175.930.914,00

Tabel 11.

Rekapitulasi Total Konsumsi Bahan Bakar Kapal (liter)				
No.	Pelabuhan	Ketika Kapal Berlayar	Ketika Kapal Sandar	Total
1	Surabaya – Balikpapan	60348	4144	64492
2	Balikpapan – Pantoloan	123393	2072	25465
3	Pantoloan – Bitung	59726	3626	63352
4	Bitung – Ternate	18645	1554	20199
5	Ternate – Sorong	38075	3108	41183
6	Sorong – Manokwari	28095	1036	29131
7	Manokwari – Serui	19411	1554	20965
8	Serui - Jayapura	38573	3626	42199
9	Jayapura – Serui	38573	2590	41163
10	Serui – Manokwari	19411	1554	20965
11	Manokwari – Sorong	28095	1554	29649
12	Sorong – Ternate	38075	2590	40665
13	Ternate – Bitung	18645	1554	20199
14	Bitung – Pantoloan	59726	2590	62316
15	Pantoloan – Balikpapan	23393	2072	25465
16	Balikpapan – Surabaya	60348	2590	62938
Total		572527	37816	610343

Salah sat cara untuk meminimumkan konsumsi bahan bakar kapal yaitu dengan mengatur kecepatan. Namun, pengaturan kecepatan juga harus mempertimbangkan ketepatan jadwal yang sudah ditentukan oleh perusahaan pelayaran. Maka, pada Tabel 11 akan ditampilkan banyaknya konsumsi bahan bakar setelah mendapatkan variasi kecepatan yang paling efisien.

Penerapan model pemrograman dinamis pada perhitungan optimasi biaya operasional kapal dinilai cukup baik, karena bisa memutuskan kecepatan yang tepat dengan tetap mempertimbangkan ketepatan jadwal sehingga bisa mendapatkan biaya operasional kapal yang lebih optimal (jumlah konsumsi bahan bakar hasil optimasi lebih rendah daripada jumlah konsumsi bahan bakar aktualnya). Secara aktual KM.Labobar voyage 03.2021 menghabiskan 647 KL bahan bakar. Sedangkan perolehan hasil optimasi KM.Labobar menghabiskan 610 KL bahan bakar.

D. Validasi Simulasi

Pada bagian ini akan dilakukan simulasi ulang dengan menambahkan variabel pada fungsi tujuan berupa variabel biaya pinalti ketika kapal terlambat datang ke palabuhan. Diasumsikan biaya pinalti keterlambatan kapal adalah Rp2.674.550,00/jam. Pada simulasi ini, data yang digunakan

adalah data yang sama pada simulasi sebelumnya. Namun, rute yang digunakan hanya pada Tahap 11 yaitu Manokwari – Sorong.

Fungsi Tujuan :

$$f_n(s_n) = \min_{i=1,2,3,4,5} \{[r(g_{l_n} + g_{s_n}) + l_n + b_n + c_n] + f_{n-1}^*(s_{n-1})\} \quad (12)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, 16$$

Dimana :

n : tahap

i : variasi kecepatan

r : biaya bahan bakar kapal

g_{l_n} : volume bahan bakar kapal ketika berlayar pada tahap n dengan kecepatan i (liter)

g_{s_n} : volume bahan bakar kapal ketika sandar pada tahap n dengan kecepatan i (liter)

l_n : biaya labuh kapal pada tahap n dengan kecepatan i

b_n : biaya tambat kapal pada tahap n dengan kecepatan i

c_n : biaya pinalti kapal pada tahap n dengan kecepatan i

$f_n(s_n)$: biaya operasional kapal minimum pada tahap n

$f_{n-1}^*(s_{n-1})$: biaya operasional kapal minimum pada tahap $n-1$

Dari hasil perhitungan optimasi biaya operasional kapal pada tahap 11, didapatkan bahwa biaya operasional kapal akan optimal jika menggunakan kecepatan 19 knots dengan total biaya operasional sebesar Rp 2.075.890.220,00. Sehingga, disimpulkan bahwa keputusan kecepatan tetap 19 knots untuk pelayaran Manokwari-Sorong walaupun telah ditambahkan variabel biaya pinalti ketika kapal terlambat.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan pengolahan data dan pembahasan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan sebagai berikut:

(1)Penerapan model pemrograman dinamis pada perhitungan optimasi biaya operasional kapal dinilai cukup baik, karena bisa memutuskan kecepatan yang tepat dengan tetap mempertimbangkan ketepatan jadwal sehingga bisa mendapatkan biaya operasional kapal yang lebih optimal (jumlah konsumsi bahan bakar hasil optimasi lebih rendah daripada jumlah konsumsi bahan bakar aktualnya). Secara aktual KM.Labobar voyage 03.2021 menghabiskan 647 KL bahan bakar.Sedangkan perolehan hasil optimasi KM.Labobar menghabiskan 610 KL bahan bakar. (2)Dari hasil simulasi didapatkan bahwa variasi kecepatan KM. Labobar Voyage 03.2021 dengan rute Surabaya - Balikpapan - Pantoloan -Bitung - Ternate - Sorong - Manokwari - Serui - Jayapura- Serui - Manokwari - Sorong - Ternate - Bitung - Pantoloan- Balikpapan - Surabaya adalah 19,5 - 19,5 - 19,5 - 19 - 19,5 - 19 - 19,5 - 19,5 - 19,5 - 19,5 - 19 - 19,5 - 19 - 19,5 - 19,5 knots. Ketika kapal berlayar menggunakan variasi kecepatan tersebut maka total bahan bakar kapal yang dikonsumsi sebanyak 610.343 liter. dan total biaya operasional kapal yang dikeluarkan sebesar Rp3.175.930.914,00. Dan ketika dilakukan penambahan variabel biaya pinalti tidak merubah hasil keputusan kecepatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Aydin, H. Lee, and S. A. Mansouri, "Speed optimization and bunkering in liner shipping in the presence of uncertain service times and time windows at ports," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 259, pp. 143–154, 2016.
- [2] F. Valentino, R. O. S. Gurning, and A. A. . Dinariyana, "Optimasi skenario bunkering dan kecepatan kapal pada pelayaran tramper," *J. Tek. POMITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1–5, 2012.
- [3] F. S. Hillier, *Introduction To Operations Research Ninth Edition*. New York: McGraw-Hill, Inc, 2005.
- [4] Pusat Manajemen Informasi & Biro Hukum Kerja Sama dan Hubungan Masyarakat BPPT, "Bahan Bakar Nabati Biodiesel B30," 2020. Jakarta : Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). [Online] <https://www.bppt.go.id/inovasi-bppt/4027-bahan-bakar-nabati-biodiesel-b30>.