



MULTI STAGE OPTIMIZATION PEMILIHAN METODE PENGIRIMAN DAN KAPAL ANGKUT UNTUK PEMASOKAN BATUBARA PLTU

MULTI STAGE OPTIMIZATION OF THE SELECTION OF SHIPPING AND TRANSPORT METHODS FOR COAL SUPPLY OF PLTU (STEAM POWER PLANT)

Hariono¹, W. R. Awaliah²

¹ Program Studi Ekonomi Pembangunan Universitas Sembilanbelas November Kolaka; Jl. Pemuda No.339 Kab. Kolaka 93517, Telp. 0405-2321132 Fax. 0405-2324028

² Jurusan Teknik Pertambangan, Universitas Halu Oleo; Kampus Hijau Bumi Tridharma Anduonou Kendari 93132, Telp. 0401-3190105 Fax: 0401-3194108

e-mail: *hariono@usn.ac.id , *wdkiki.awaliah@uho.ac.id

ABSTRAK

Angka pertumbuhan, sektor industri pengolahan mengalami pertumbuhan paling tinggi yakni 9,13% pada tahun 2019 atau sebesar 7,6% rata-rata tahun 2015-2019 lebih tinggi dari rata-rata pertumbuhan PDRB Sulawesi Tenggara (SULTRA). Investasi PMA di Sulawesi Tenggara didominasi oleh proyek peleburan logam (smelter) yang membutuhkan pasokan energi listrik yang tinggi. PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2019-2028 telah memasukkan rencana pembangunan Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara yang akan dibangun di Sulawesi Tenggara dengan total kapasitas sebesar 540 MW. Permasalahan klasik yang terjadi adalah bagaimana menjamin rantai pasokan batubara yang aman dan murah bagi PLTU baik yang telah beroperasi maupun yang akan dibangun tersebut. Tujuan penelitian ini adalah untuk memilih pemasok, kapal angkut, sekaligus metode pengiriman terbaik yang menghasilkan biaya total terendah dan selanjutnya dibuat jadwal pengiriman untuk memastikan jaminan pasokan batubara bagi PLTU di Provinsi Sulawesi Tenggara. Metode yang digunakan dalam proses optimasi adalah Metode Pemrograman Linear yang dilakukan secara bertahap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan memasukkan variabel metode pengiriman ke dalam model maka terdapat pilihan solusi yang lebih banyak yang dapat menghasilkan fungsi tujuan yang optimum, penggunaan metode optimasi bertahap dapat mengurangi kerumitan dalam penyelesaian masalah dan iterasi dalam proses optimasi. Hasil optimasi menunjukkan bahwa metode pengiriman *Milk Runs* memberikan total biaya minimum dengan kapal angkut K3, serta pemasok yang terpilih adalah CS21.

Kata kunci: Multi Stage Optimization, Metode Pengiriman Batubara, Kapal Angkut Batubara

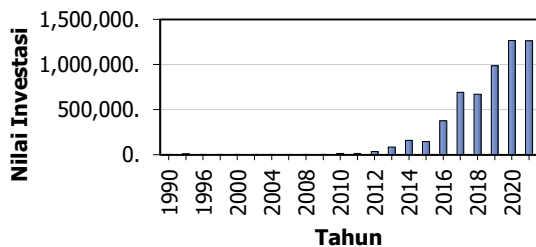
ABSTRACT

The highest growth rate in the processing industry was in 2019 with 9.13% or 7.6% on average in 2015-2019 higher than the average growth of South East Sulawesi's Gross Domestic Product. Foreign investment in South East Sulawesi is dominated by metal smelting projects that requires a high supply of electrical energy. PT. Perusahaan Listrik Negara in the General Plan of Electricity Supply in 2019-2028 has plan to build a coal-fired Steam Power Plant in Southeast Sulawesi with a total capacity 540MW. A common problem that occurs is how to guarantee a safe and cheap coal supply chain for both existing and future coal-fired Steam Power Plant. Purpose of this study is to choosing the best suppliers, shipping and transport method that produces the lowest total cost and then created a delivery schedule to ensure guaranteed coal supply for power plants in Southeast Sulawesi. The method used in the optimization process is the Linear Programming Method that is done gradually. The results showed that by inserting the delivery method variable into the model, there are more solution options that can produce optimum goal functions, the use of gradual optimization methods and reduce complexity in problem solving and iteration in the optimization process. The optimization results show that Milk Runs delivery method provides minimum total cost with K3 transport and the selected supplier is CS2.

Keywords : Multi Stage Optimization, Coal Delivery Method, Coal Haulage

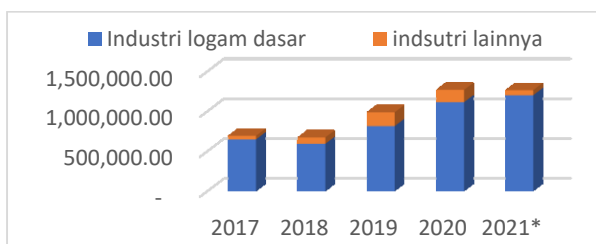
PENDAHULUAN

Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) Provinsi Sulawesi Tenggara (SULTRA) tahun 2015-2019 mengalami pertumbuhan dari tahun ke tahun dengan rata-rata pertumbuhan sebesar 6,16% pertahun. Secara nominal, sektor yang berbasis ekstraksi sumberdaya alam masih menempati posisi teratas. Namun jika dilihat dari angka pertumbuhan, sektor industri pengolahan mengalami pertumbuhan paling tinggi yakni 9,13% pada tahun 2019 atau sebesar 7,6% rata-rata tahun 2015-2019 lebih tinggi dari rata-rata pertumbuhan PDRB Sulawesi Tenggara. Perekonomian Provinsi Sulawesi Tenggara dapat dikatakan cukup baik dalam *recovery* setelah wabah Covid19, yakni pada tahun 2021 telah berhasil tumbuh positif sebesar 4,26% pada triwulan II YoY dan 3,97% pada triwulan III YoY setelah sebelumnya pada tahun 2020 berada pada angka negatif 0,65% YoY.



Gambar 1. Total investasi Provinsi Sulawesi Tenggara tahun 1990 – 2021 (dalam ribu usd)

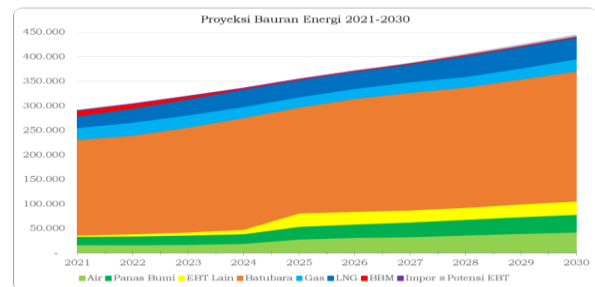
Dari sisi investasi, Sulawesi Tenggara masih menjadi salah satu tujuan investasi. Hal ini dapat dilihat dari data investasi yang dipublikasikan oleh Badan Koordinasi Penanaman Modal (BKPM) sepanjang tahun 2020 telah terjadi investasi sebesar 1.268,57 juta USD dan sepanjang Triwulan I sampai dengan Triwulan II tahun 2021 tercatat investasi sebesar 1.264,84 juta USD.



Gambar 2. Nilai investasi industri logam dasar dan industri lainnya Provinsi Sulawesi Tenggara tahun 2017 – 2021 (dalam ribu USD)

Investasi di Sulawesi Tenggara masih didominasi oleh proyek industri logam dasar yang membutuhkan pasokan energi listrik yang tinggi. Total investasi pada industri logam dasar tahun 2020 mencapai 1.114,52 juta USD atau setara dengan 87,86% dari total investasi tahun 2020. Sedangkan untuk tahun 2021 sebesar 1.201,16 juta USD atau setara dengan 94,97% dari total investasi tahun 2021.

Menurut Stern dan Cleveland dalam Hariono (2017), Ketersediaan energi yang digabungkan dengan *output* dan penggunaan energi memegang peran kunci dalam mendukung pertumbuhan ekonomi [1]. Sejalan dengan itu, PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) dalam Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2021-2030 masih mengandalkan Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara sebagai sumber energi listrik dengan total kapasitas eksisting sebesar 144 MW dari kapasitas sebelumnya sebesar 540 MW dalam RUPTL 2017-2026 yang terdiri atas lima PLTU Rencana dan tiga PLTU dalam status konstruksi. Kebutuhan batubara PLTU di SULTRA untuk 210 MW diperkirakan mencapai 1,03 Juta Ton per tahun [2].



Gambar 3. Komposisi bauran energi listrik berdasarkan jenis bahan bakar (gwh) skenario *low carbon* dalam RUPTL 2021-2030

Salah satu tantangan yang menarik untuk dikaji dalam upaya memenuhi pasokan batubara ke PLTU adalah bagaimana memilih pemasok, alat angkut, dan metode pengangkutan secara sekaligus dalam satu model sehingga diperoleh keputusan yang optimum atau total biaya minimum. Pemilihan pemasok terbaik sebagai fungsi tujuan (objektif) merupakan masalah klasik dalam program linear, penambahan satu objektif baru ke dalam satu model yang terintegrasi menjadikan permasalahan ini sebagai masalah “*multiple objective decision making*”. Sebagian besar masalah pengambilan keputusan pada *multiple objective decision making* tidak dapat dioptimalkan secara bersamaan karena ketidak-terbandingan dan konflik yang melekat antara tujuan yang ada. Di antara pilihan penyelesaian masalah *multiple objective decision*

making adalah dengan menggunakan pendekatan *multi stage optimization*. Beberapa penelitian terdahulu yang menunjukkan hal ini di antaranya adalah Huang, Idayani & Subchan [3]; Zandi, Labadie & Prins[4]; Bhattacharya, Arshinder & Amit[5]; Bortolini, Accorsi, dkk[6]; Sarwani, Zoqi dkk[7] dan Bahrapour, Safari & Tarahdari [8].

Penelitian ini merupakan lanjutan dari penelitian sebelumnya yang telah dipublikasikan dalam Wibowo dan Hariono [2]. Jika pada penelitian sebelumnya menyelesaikan masalah pilihan pemasok dan pemilihan kapal angkut terbaik, maka pada penelitian ini optimasi dilakukan untuk memilih pemasok, kapal, sekaligus untuk memilih metode pengiriman terbaik. Penambahan variabel metode pengangkutan diharapkan mampu memberikan tambahan opsi solusi yang bisa lebih efisien dari pada pilihan yang diberikan dalam Wibowo dan Hariono [2].

METODE PENELITIAN

Metode optimasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah pemrograman linear. Data yang digunakan untuk model berupa data sekunder yang diperoleh dari literatur. PLTU tujuan yang dimasukkan dalam model terdiri dari 6 PLTU baik PLTU eksisting maupun PLTU rencana di Provinsi Sulawesi Tenggara berdasarkan RUPTL 2017-2026. Sedangkan untuk batubara, terdapat 34 kandidat pemasok yang berasal dari 13 pelabuhan di Kalimantan Selatan dan Kalimantan Timur.

Kapasitas pembangkit untuk setiap PLTU yang digunakan dalam penelitian ini adalah bersumber dari RUPTL tahun 2017-2016 yang diterbitkan oleh PLN. Kandidat pemasok batubara yang selanjutnya disebut Calon Supplier (CS) bersumber dari Indonesia Coal Book tahun 2015. Jarak tempuh (JT) dalam *nautical mile* (NM) dihitung secara manual mengikuti peta rute pelayaran dari pelabuhan asal menuju pelabuhan tujuan. Pengumpulan data dan penelitian dilaksanakan pada tahun 2017 dengan beberapa penyesuaian pada tahun 2021.

Sebelum melakukan optimasi dengan memasukkan pilihan metode pengiriman selain metode pengiriman *direct shipment*, perlu dilakukan perhitungan kebutuhan batubara PLTU dalam satuan kalori dan selanjutnya dikonversi kesatuan berat (ton). Persamaan yang digunakan untuk perhitungan tersebut secara berturut-turut adalah sebagai berikut:

$$Energi_{PLTU} (kkal / th) = \frac{P \times CF \times OT \times C}{BE} \tag{1}$$

$$Tonase\ Batubara_{PLTU} (Ton / th) = \frac{Energi_{PLTU} (kkal / th)}{CV (kkal / kg) \times 10^3 (kg / Ton)} \tag{2}$$

- dimana:
 P = Kapasitas Pembangkit (MW)
 CF = Faktor kapasitas pembangkit (%)
 OT = Lama Pengoperasian (8760 jam/th)
 C = Angka Konversi 239 kkal/MWs atau 860,421 kkal/kWh.
 BE = Efisiensi pembakaran (%)
 CV = Nilai Kalori batubara (kkal/kg)

Harga Patokan Batubara (HPB) dihitung mengikuti PERMEN ESDM Nomor 7 Tahun 2017 sebagaimana telah beberapa kali diubah terakhir dengan PERMEN ESDM Nomor 11 Tahun 2020 tentang tata cara Penetapan Harga Patokan Penjualan Mineral Logam dan Batubara dan Peraturan Direktur Jenderal Mineral Dan Batubara No. 515.K/32/DJB/2011 Tentang Formula Penetapan Harga Patokan Batubara. Sedangkan biaya angkut menggunakan kapal tongkang (*Bardge*) dihitung menggunakan persamaan dalam Wibowo dan Hariono [2], dan biaya angkut menggunakan *vessel* dihitung dengan persamaan yang disampaikan oleh Anjani [9]. Persamaan-persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

$$BB_{Jt < 270} = 0,221JT + 3,7406 \tag{3}$$

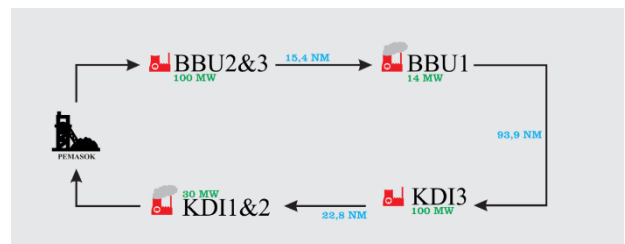
$$BB_{270-330} = 0,0184JT + 3,1172 \tag{4}$$

$$BB_{Jt > 330} = 0,00154JT + 2,6022 \tag{5}$$

$$BV = 0,00495JT + 4,02315 \tag{6}$$

- dimana:
 BB = Biaya Barge/Tongkang (USD/ton)
 JT = Jarak Tempuh (NM)
 BV = Biaya *Vessel* (USD/ton)

Model Program Linier untuk Metode Pengiriman Milk Runs



Gambar 4. Rute pengiriman *Milk Runs*

PLTU-PLTU tujuan pada metode pengiriman *Milk Runs* adalah BBU1, BBU2&3, KDI1&2, KDI3. Rute

pengiriman dipilih mulai dari PLTU terdekat dengan sumber batubara menuju ke PLTU selanjutnya, sedemikian sehingga semua PLTU dapat dilalui dan total jarak minimum. Rute pengiriman dan jarak antar PLTU disajikan pada gambar 4. Pada skenario ini, pemodelan pemrograman linier (LP) pemilihan pemasok terbaik dilakukan pada titik BBU2&3 untuk seluruh PLTU sehingga fungsi tujuan model LP akan menjadi persamaan (7) dan selanjutnya biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU akan mengikuti persamaan (8). Persamaan fungsi tujuan tersebut adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Z_{MR_k@BBU1\&2} &= \sum_{i=1}^{34} c_{k_i} x_i \\
 &= c_{k_1} x_1 + c_{k_1} x_1 + \dots \\
 &= (c_{CS1} x_{CS1} + c_{CS2} x_{CS2} + \dots + c_{CS34})
 \end{aligned} \tag{7}$$

Sedangkan biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU dengan metode pengiriman Milk Runs pada skenario 1 adalah:

$$\begin{aligned}
 Z_{MR_k} &= Z_{MR_k@BBU2\&3} + F_{k(15,4NM)} x_{BBU1} + \\
 &F_{k(93,9NM)} x_{KDI3} + F_{k(22,8NM)} x_{KDI1\&2}
 \end{aligned} \tag{8}$$

dimana k adalah kode kapal, MR = Milk Runs, F adalah freight atau biaya angkut batubara. Fungsi kendala permintaan metode pengiriman Milk Runs untuk skenario 1 adalah sebagaimana disajikan pada pertidaksamaan 9, fungsi kendala penawaran disajikan pada sistem pertidaksamaan 10 dan 11 sebagai berikut:

$$\begin{cases} ch_{CS1} x_{CS1} + ch_{CS2} x_{CS2} + \dots \\ ch_{CS34} x_{CS34} \geq 4.203 \text{ terakal/th} \end{cases} \tag{9}$$

$$\left. \begin{aligned} x_{CS1} &\leq 30,0 \text{ juta ton per tahun} \\ x_{CS2} &\leq 1,35 \text{ juta ton per tahun} \\ &\vdots \\ x_{CS34} &\leq 0,27 \text{ juta ton per tahun} \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

$$\left. \begin{aligned} 30x_{CS1} &\leq 668 \text{ juta ton} \\ 30x_{CS2} &\leq 30 \text{ juta ton} \\ &\vdots \\ 30x_{CS34} &\leq 8 \text{ juta ton} \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

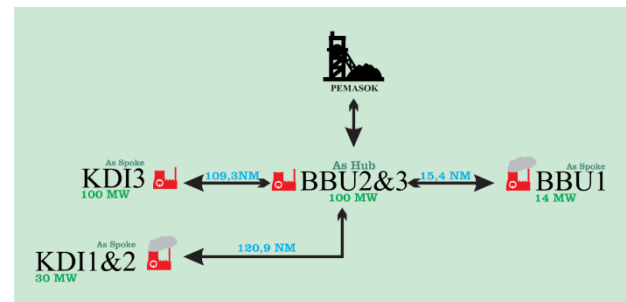
Model Program Linier untuk Metode Pengiriman Hub and Spoke

PLTU-PLTU tujuan pada metode pengiriman Hub and Spoke adalah BBU1, BBU2&3, KDI1&2, KDI3. Tahap

pertama yang dilakukan adalah menentukan Hub, pertimbangan pemilihan PLTU yang akan menjadi Hub adalah kapasitas PLTU dan Jarak PLTU dengan sumber batubara. PLTU dengan daya yang besar dianggap dapat dijadikan sebagai Hub karena fasilitas pelabuhan dan bongkar muatnya diasumsikan memiliki kapasitas yang besar. Akan tetapi, PLTU Hub tidak boleh melayani PLTU Spoke yang jaraknya lebih dekat ke sumber batubara. Dengan demikian, terdapat dua kemungkinan pada metode pengiriman Hub and Spoke ini yaitu:

a. Hub and Spoke dengan 1 Hub

Pemodelan pemrograman linier (LP) pemilihan pemasok terbaik dilakukan pada titik BBU2&3 untuk seluruh PLTU sehingga fungsi tujuan model LP akan menjadi persamaan (12) dan selanjutnya biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU akan mengikuti persamaan (13). Sebagai ilustrasi, rute pengiriman dan jarak antar PLTU disajikan pada gambar 5:



Gambar 5. Rute pengiriman Hub and Spoke (1 Hub)

Persamaan fungsi tujuan metode pengiriman Hub and Spoke (1 Hub) adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Z_{HS1_k@BBU1\&2} &= \sum_{i=1}^{34} c_{k_i} x_i \\
 &= c_{k_1} x_1 + c_{k_1} x_1 + \dots \\
 &= (c_{CS1} x_{CS1} + c_{CS2} x_{CS2} + \dots + c_{CS34})
 \end{aligned} \tag{12}$$

Sedangkan biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU dengan metode pengiriman Hub and Spoke pada (1 Hub) adalah:

$$\begin{aligned}
 Z_{HS1_k} &= Z_{HS1_k@BBU2\&3} + TIF_{k(15,4NM)} x_{BBU1} + \\
 &TIF_{k(109,3NM)} x_{KDI3} + TIF_{k(120,9NM)} x_{KDI1\&2}
 \end{aligned} \tag{13}$$

dimana k adalah kode kapal, HS = Hub and Spoke, TIF adalah transshipment, insurance, dan freight.

Fungsi kendala permintaan metode pengiriman *Hub and Spoke* untuk (1 Hub) adalah sebagaimana disajikan pada pertidaksamaan (14), fungsi kendala penawaran disajikan pada sistem pertidaksamaan (15) dan (16) sebagai berikut:

$$\left(\begin{array}{l} ch_{CS1}x_{CS1} + ch_{CS2}x_{CS2} + \dots \\ ch_{CS34}x_{CS34} \geq 4.203 \text{ tera kal/th} \end{array} \right) \quad (14)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{CS1} \leq 30,0 \text{ juta ton per tahun} \\ x_{CS2} \leq 1,35 \text{ juta ton per tahun} \\ \vdots \\ x_{CS34} \leq 0,27 \text{ juta ton per tahun} \end{array} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{array}{l} 30x_{CS1} \leq 668 \text{ juta ton} \\ 30x_{CS2} \leq 30 \text{ juta ton} \\ \vdots \\ 30x_{CS34} \leq 8 \text{ juta ton} \end{array} \right\} \quad (16)$$

b. Hub and Spoke dengan 2 Hub

Pada skenario ini, pemodelan pemrograman linier (LP) pemilihan pemasok terbaik dilakukan pada titik BBU2&3 yang memuat PLTU BBU1. Sedangkan PLTU KDI1&2 akan digabung dengan PLTU KDI3. sehingga fungsi tujuan model LP akan menjadi persamaan (17) dan selanjutnya biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU akan mengikuti persamaan (18). Rute pengiriman dan jarak antar PLTU disajikan pada gambar 6.

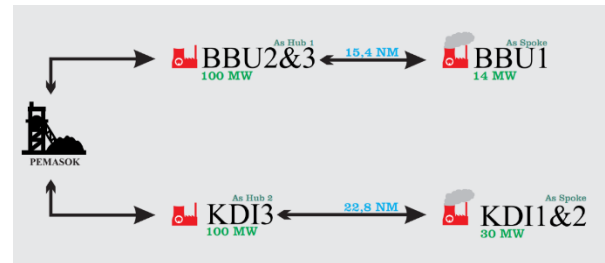
Persamaan fungsi tujuan model LP dengan metode pengiriman *Hub and Spoke* (2 Hub) adalah:

$$\begin{aligned} Z_{HS2_k @ Hub1 \& Hub2} &= \sum_{i=1}^{34} \sum_{j=1}^2 C_{k_{ij}} x_{ij} \\ &= C_{k_{11}} x_{11} + C_{k_{12}} x_{12} + \dots + C_{k_{342}} x_{342} \\ &= \left(\begin{array}{l} C_{CS1Hub1@BBU2\&3} x_{CS1Hub1@BBU2\&3} + \\ C_{CS1Hub2@KDI3} x_{CS1Hub2@KDI3} + \\ C_{CS2Hub1@BBU2\&3} x_{CS2Hub1@BBU2\&3} + \\ C_{CS2Hub2@KDI3} x_{CS2Hub2@KDI3} + \\ \vdots \\ C_{CS34Hub1@BBU2\&3} x_{CS34Hub1@BBU2\&3} + \\ C_{CS34Hub2@KDI3} x_{CS34Hub2@KDI3} \end{array} \right) \quad (17) \end{aligned}$$

Sedangkan biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU dengan metode pengiriman *Hub and Spoke* pada (2 Hub) adalah

$$\begin{aligned} Z_{HS2_k} &= Z_{HS2_k @ BBU2\&3} + TIF_{k(15,4NM)} x_{BBU1} + \\ &Z_{HS2_k @ KDI3} + TIF_{k(22,8NM)} x_{KDI1\&2} \end{aligned} \quad (18)$$

dimana *k* adalah kode kapal, *HS* = *Hub and Spoke*, *TIF* adalah *transshipment, insurance, dan freight*. Fungsi kendala permintaan metode pengiriman *Hub and Spoke* untuk (2 Hub) adalah sebagaimana disajikan pada sistem pertidaksamaan (19), fungsi kendala penawaran disajikan pada sistem pertidaksamaan (20) dan (21).



Gambar 6. Rute pengiriman *Hub and Spoke* (2 Hub)

$$\left(\begin{array}{l} ch_{CS1}x_{CS1Hub1} + ch_{CS2}x_{CS2Hub1} + \dots \\ ch_{CS34}x_{CS34Hub1} \geq 1.964 \text{ tera kal/th} \end{array} \right) \quad (19)$$

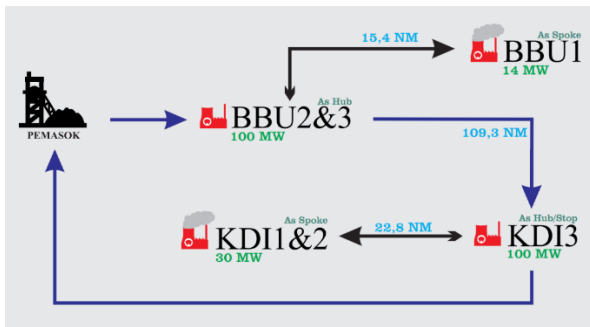
$$\left(\begin{array}{l} ch_{CS1}x_{CS1Hub2} + ch_{CS2}x_{CS2Hub2} + \dots \\ ch_{CS34}x_{CS34Hub2} \geq 2.239 \text{ tera kal/th} \end{array} \right)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{1Hub1} + x_{1Hub2} \leq 30,0 \text{ juta ton per tahun} \\ x_{1Hub1} + x_{1Hub2} \leq 1,35 \text{ juta ton per tahun} \\ \vdots \\ x_{1Hub1} + x_{1Hub2} \leq 0,27 \text{ juta ton per tahun} \end{array} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{array}{l} 30(x_{1Hub1} + x_{1Hub2}) \leq 668 \text{ juta ton} \\ 30(x_{1Hub1} + x_{1Hub2}) \leq 30 \text{ juta ton} \\ \vdots \\ 30(x_{1Hub1} + x_{1Hub2}) \leq 8 \text{ juta ton} \end{array} \right\} \quad (21)$$

Model Program Linier untuk Metode Pengiriman Milk Run with Hub and Spoke

PLTU-PLTU tujuan pada metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* adalah BBU1, BBU2&3, KDI1&2, KDI3. Pemodelan pemrograman linier (LP) pemilihan pemasok terbaik dilakukan pada titik BBU2&3 untuk seluruh PLTU sehingga fungsi tujuan model LP akan menjadi persamaan (22) dan selanjutnya biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU akan mengikuti persamaan (23). Sebagai ilustrasi, rute pengiriman dan jarak antar PLTU disajikan pada gambar berikut:



Gambar 7. Rute pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* (2 Hub)

Persamaan fungsi tujuan metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Z_{MRwHS_k@BBU1&2} &= \sum_{i=1}^{34} c_{k_i} x_i \\
 &= c_{k_1} x_1 + c_{k_2} x_2 + \dots + c_{k_{34}} x_{34} \\
 &= (c_{CS1} x_{CS1} + c_{CS2} x_{CS2} + \dots + c_{CS34} x_{CS34})
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Sedangkan biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU dengan metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* adalah:

$$\begin{aligned}
 Z_{MRwHS_k} &= Z_{MRwHS_k@BBU2&3} + \\
 &TIF_{k(15,4NM)} x_{BBU1} + \\
 &F_{k(109,3NM)} x_{KDI3} + \\
 &TIF_{k(22,8NM)} x_{KDI1&2}
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

dimana k adalah kode kapal, $MRwHS$ = *Milk Run with Hub and Spoke*, TIF adalah *transshipment, insurance, dan freight*. Fungsi kendala permintaan metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* untuk skenario 1 adalah sebagaimana disajikan pada pertidaksamaan (24), fungsi kendala penawaran disajikan pada sistem pertidaksamaan (25) dan (26).

$$ch_{CS1} x_{CS1} + ch_{CS2} x_{CS2} + \dots
 \tag{24}$$

$$\left. \begin{aligned}
 ch_{CS34} x_{CS34} &\geq 4.203 \text{ tera kal/th} \\
 x_{CS1} &\leq 30,0 \text{ juta ton per tahun} \\
 x_{CS2} &\leq 1,35 \text{ juta ton per tahun} \\
 &\vdots \\
 x_{CS34} &\leq 0,27 \text{ juta ton per tahun}
 \end{aligned} \right\}
 \tag{25}$$

$$\left. \begin{aligned}
 30x_{CS1} &\leq 668 \text{ juta ton} \\
 30x_{CS2} &\leq 30 \text{ juta ton} \\
 &\vdots \\
 30x_{CS34} &\leq 8 \text{ juta ton}
 \end{aligned} \right\}
 \tag{26}$$

Selanjutnya, proses optimasi untuk menentukan hasil optimum untuk setiap model di atas digunakan metode simpleks dan dijalankan melalui bantuan alat hitung “*open solver*” yang diintegrasikan dengan aplikasi pengolah angka “*Microsoft Excel*”.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Optimasi Metode Pengiriman *Milk Run*

Metode pengiriman *Milk Runs* merangkai PLTU-PLTU tujuan ke dalam satu rute pelayaran kapal angkut dengan empat persinggahan. Sebagaimana telah disajikan pada Gambar 1, rute pengiriman batubara akan menjadikan PLTU BBU2&3 sebagai persinggahan pertama sehingga proses optimasi dengan model LP dilakukan pada titik BBU2&3 (PLTU BBU2 dan PLTU BBU3 disatukan karena pada peta lokasi PLTU dalam RUPTL 2017-2026 menunjuk pada satu lokasi). Hasil optimasi LP pada titik BBU2&3 disajikan pada tabel 1:

Tabel 1. Hasil Optimasi dan Pemberhentian Pertama Metode Pengiriman *Milk Run*

Hasil Optimasi	K1	K2	K3	K4	
Kandidat Pemasok	CS17	CS21	CS21	CS32 & CS34	
Kalori Terpilih		5.000	4.000	4.000	4.555
Tonase (Ton/Tahun)		840.731	1.050.913	1.050.913	922.874
FOB (USD/Ton)		44,86	33,40	33,93	47,04
CIF @ 1st Stop (USD/Ton)		63,27	49,22	47,86	57,68
Lama Penumpukan (hari)		1,74	2,78	3,82	19,78
Biaya (USD)	53.497.605	52.003.459	50.582.937	53.576.163	

Berdasarkan tabel 1, diketahui bahwa dari empat pilihan kapal angkut yang memberikan biaya total terendah adalah menggunakan kapal angkut K3 dengan kandidat pemasok terpilih adalah CS21. CIF batubara pada pemberhentian pertama (BBU2&3) ini adalah sebesar 47,86 USD/Ton. Sedangkan lama penumpukan adalah 3,82 hari. Biaya optimum diperoleh setelah seluruh rute telah selesai dilalui oleh kapal angkut yaitu pada titik KDI1&2 (lihat gambar 4).

Untuk memperoleh biaya total optimum sebenarnya, maka harus dijumlahkan dengan biaya tambahan menuju setiap pemberhentian dalam rute pengiriman *Milk Runs*. Dalam perhitungan, biaya tambahan dari satu titik pemberhentian ke titik pemberhentian berikutnya hanya memperhitungkan biaya variabel, sehingga jarak adalah faktor utama penentu penambahan biaya tersebut. Perubahan biaya CIF, serta biaya total pengadaan batubara untuk setiap PLTU dan untuk seluruh PLTU disajikan pada tabel 2:

Tabel 2. Hasil Optimum dan Rincian Biaya Total Pengadaan Batubara dengan Metode Pengiriman *Milk Run*

Komponen Optimasi	PLTU			
	BBU2&3	BBU1	KDI3	KDI 1&2
Jarak dari Prev. Stop (NM)	0	15,4	93,9	22,8
Kebutuhan batubara (Ton/tahun)	430.702	60.298	430.702	129.211
Kebutuhan batubara (Ton/hari)	1.196	167	1.196	359
Drop batubara (Ton/Trip)	4.571	640	4.571	1.371
Kapal Terpilih	K3	K3	K3	K3
CIF @ Stop (USD/Ton)	47,86	48,10	49,54	49,90
Waktu Tempuh (jam)		1,93	11,74	2,85
Lama Penumpukan (hari)	3,82	3,82	3,82	3,82
Biaya (USD/Tahun)	20.730.712	2.900.231	21.338.755	6.446.995
Biaya Total Baru (USD/tahun)	51.416.693			

Informasi yang paling utama untuk diperhatikan dalam tabel 2 selain biaya total yang diperoleh adalah lama penumpukan. Lama penumpukan yang diperoleh adalah 3,82 hari. Hal ini sangat penting untuk diperhatikan dalam penjadwalan pengiriman. Penjadwalan dalam penelitian ini hanya memperhitungkan waktu tempuh dan jumlah kapal yang dibutuhkan untuk memenuhi permintaan.

Hasil Optimasi Metode Pengiriman *Hub and Spoke*
Sebagaimana telah disebutkan pada bagian B.2 bahwa pada metode pengiriman *Hub and Spoke* dibuat dua kemungkinan yaitu *Hub and Spoke* dengan 1 Hub dan *Hub and Spoke* dengan 2 Hub. Hasil optimasi pada *Hub and Spoke* dengan 1 Hub yang dihitung dititik BBU2&3 adalah seperti pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Optimasi Awal pada *Hub* Metode Pengiriman *Hub and Spoke* dengan 1 Hub

Hub and Spoke (1 hub)				
Total Daya (MW)	244			
Hasil Optimasi	K1	K2	K3	K4
Kandidat Pemasok	CS17	CS21	CS21	CS32 & CS3
Kalori Terpilih	5.000	4.000	4.000	4.555
Tonase (Ton/Tahun)	840.731	1.050.913	1.050.913	922.874
FOB Tongkang (USD/Ton)	44,86	33,40	33,93	47,04
CIF @ Hub (USD/Ton)	63,27	49,22	47,86	57,68
Lama Penumpukan (hari)	1,74	2,78	3,82	19,78
Biaya (USD/Tahun)	53.497.605	52.003.459	50.582.937	53.576.163

Hasil optimasi awal metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 1 Hub menunjukkan hasil yang sama dengan hasil optimasi awal pada titik yang sama dengan metode pengiriman *Milk Runs* yakni kandidat pemasok terpilih adalah CS21 dengan kapal angkut K3. Akan tetapi hasil optimum akhir yang diperoleh berbeda karena struktur biaya totalnya berbeda. Hasil optimum sebenarnya merupakan akumulasi dari seluruh biaya distribusi batubara hingga sampai ke setiap PLTU.

Untuk metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan dua (2) *hub*, hasil optimasi awal yang diperoleh merupakan

hasil perhitungan di titik BBU2&3 sebagai *hub* pertama dan titik KDI3 sebagai *hub* yang kedua. BBU2&3 akan melayani PLTU BBU1 sebagai PLTU *spoke*, sedangkan KDI3 akan melayani KDI1&2 sebagai PLTU *Spoke*. Hasil optimasi awal metode pengiriman *hub and spoke* dengan dua (2) *hub* disajikan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Optimasi Awal pada *Hub* Metode Pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 *Hub*

Hub and Spoke (2 hub)				
Hub1 : BBU 2&3				
Total Daya (MW)	114			
Hasil Optimasi	K1	K2	K3	K4
Sumber Terpilih	CS17	CS21	CS21	CS32 & CS3
Kalori Terpilih	5.000	4.000	4.000	4.549
Tonase (Ton/Tahun)	392.800	491.000	491.000	431.769
FOB (USD/Ton)	44,86	33,40	33,93	47,02
CIF @ Hub (USD/Ton)	63,27	49,22	47,86	57,65
Lama Penumpukan (hari)	3,72	5,95	8,18	42,27
Biaya (USD/tahun)	24.994.783	24.296.698	23.633.011	25.054.212
Hub2 : KDI 3				
Total Daya (MW)	130			
Hasil Optimasi	K1	K2	K3	K4
Sumber Terpilih	CS17	CS17	CS21	CS32
Kalori Terpilih	5.000	5.000	4.000	4.560
Tonase (Ton/Tahun)	447.930	447.930	559.913	491.105
FOB (USD/Ton)	44,86	45,55	33,93	47,06
CIF @ Hub (USD/Ton)	65,69	63,60	49,54	58,22
Lama Penumpukan (hari)	3,26	6,52	7,17	37,16
Biaya (USD/Tahun)	29.584.811	28.653.698	27.892.382	28.778.066
Biaya Total (USD/tahun)	54.579.594	52.950.396	51.525.393	53.832.277

Hasil optimasi awal pada metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 *hub* menunjukkan bahwa kandidat pemasok terpilih dari calon kandidat pemasok yang ada adalah CS21 baik untuk *hub* pertama maupun untuk *hub* yang kedua, dengan kapal angkut terbaik tetap pada kapal angkut K3. Pada titik BBU2&3 diperoleh CIF sebesar 27,86 USD/Ton sedangkan pada titik KDI3 nilai CIF adalah 49,54 USD/Ton. Biaya total awal adalah sebesar 51.525.393 USD/tahun.

Selanjutnya dilakukan perhitungan biaya total untuk metode pengiriman *Hub and Spoke* baik yang menggunakan 1 *hub* maupun yang menggunakan 2 *hub*. Hasil perhitungan tersebut disajikan berturut-turut pada tabel 5 dan tabel 6. Pada metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 1 *hub*, pengangkutan batubara dari PLTU Hub ke PLTU *Spoke* akan digunakan kapal angkut K1 karena DWT kapal angkut K1 sesuai atau tidak jauh berbeda dengan kuantitas kebutuhan batubara yang akan diangkut per trip. Hasil perhitungan biaya total untuk metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 1 *hub* disajikan pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. Hasil Optimum Metode Pengiriman *Hub and Spoke* dengan 1 *Hub*

Komponen Optimasi	PLTU			
	BBU2&3	BBU1	KDI 1&2	KDI 3
Jarak dari Hub (NM)	0	15,4	120,9	109,3
Kebutuhan batubara (Ton/tahun)	430.702,17	60.298,30	129.210,65	430.702,17
Kebutuhan batubara (Ton/hari)	1.196	167	359	1.196
Drop batubara (Ton/Trip)	4.571	640	1.371	4.571
Kapal Terpilih	K3	K1	K1	K1
CIF @ Spoke (USD/Ton)	47,86	56,19	58,52	58,27
Waktu Tempuh (jam)	0	1,93	15,11	13,66
Lama Penumpukan	3,82	3,82	3,82	3,82
Biaya (USD/Tahun)	20.778.699	3.415.378	7.622.339	25.296.497
Biaya Total Baru (USD/Tahun)	57.112.913			

Hasil optimum metode pengiriman *hub and spoke* dengan 1 *hub* sebagaimana disajikan pada tabel 5 menunjukkan peningkatan biaya total yang signifikan. Peningkatan tersebut selain disebabkan oleh tingginya biaya angkut kapal K1 yang meliputi biaya tetap dan biaya variabel juga karena adanya biaya *transshipment*, *insurance* dan biaya survei yang harus dibayarkan kembali akibat adanya aktivitas pemuatan kembali ke kapal yang baru (K1). Total biaya optimum yang dapat dicapai pada metode pengiriman *hub and spoke* dengan 1 *hub* adalah sebesar 57.112.913 USD/Tahun.

Tabel 6. Hasil Optimum Metode Pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 *Hub*

Komponen Optimasi	PLTU (Hub1)		PLTU (Hub 2)	
	BBU2&3	BBU1	KDI3	KDI 1&2
Jarak dari Hub (NM)	0	15,4	0	22,8
Kebutuhan batubara (Ton/tahun)	430.702,17	60.298,30	430702,1691	129210,651
Kebutuhan batubara (Ton/hari)	1.196	167	1.196	359
Drop batubara (Ton/Trip)	9.783	1.370	9.783	2.935
Kapal Terpilih	K3	K1	K3	K1
CIF @ Spoke (USD/Ton)	47,86	56,19	49,54	58,04
Waktu Tempuh (jam)		1,925	0	2,85
Lama Penumpukan	8,18	8,18	8,18	8,18
Biaya (USD/Tahun)	20.778.699	3.415.378	21.509.465	7.559.197
Biaya Total Baru (USD)	53.262.740			

Pada metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 *hub*, pengangkutan batubara dari PLTU Hub ke PLTU Spoke juga digunakan kapal angkut K1 karena DWT kapal angkut K1 sesuai atau tidak jauh berbeda dengan kebutuhan dan kuantitas batubara yang akan diangkut per trip. Hasil perhitungan biaya total untuk metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 *hub* disajikan pada tabel 6. Berdasarkan tabel 6, diketahui bahwa biaya total pengadaan dan pengangkutan batubara untuk metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 *hub* lebih rendah daripada metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 1 *hub*. Hal ini karena menggunakan kapal angkut K1 yang berkurang 1 trip yakni untuk PLTU KDI3, penambahan hub (PLTU KDI3) juga menyebabkan penghematan yang terlihat dari nilai CIF pada KDI3 sebesar 49,54 USD/Ton dari sebelumnya 58,52 USD/Ton pada metode pengiriman yang sama

dengan 1 *hub*. Demikian juga nilai CIF pada PLTU KDI1&2 yang bernilai 58,04 USD/ton, nilai ini lebih rendah dari nilai CIF pada metode pengiriman yang sama dengan menggunakan 1 *hub*.

Hasil Optimasi Metode Pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke*

Sebagaimana namanya, metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* merupakan kombinasi dari metode pengiriman *Milk Run* dan metode pengiriman *Hub and Spoke*. Pada bagian ini, optimasi awal akan dihitung pada pada titik BBU2&3 sebagai titik pemberhentian pertama dan sekaligus sebagai *hub* pertama yang akan melayani PLTU BBU1. Sedangkan PLTU KDI3 akan berperan sebagai titik pemberhentian kedua kapal angkut utama dan sekaligus sebagai titik *hub* kedua yang akan melayani PLTU KDI1&2. Hasil optimasi awal tersebut disajikan pada tabel 7.

Kandidat pemasok yang memberikan biaya pengadaan batubara terendah pada titik perhitungan optimasi awal adalah CS21 dengan menggunakan kapal angkut K3. Biaya pengadaan batubara tersebut adalah sebesar 50.582.937 USD/Tahun dengan CIF pada titik BB2&3 sebesar 47,86 USD/Ton.

Tabel 7. Hasil Optimasi Awal Metode Pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke*

Hasil Optimasi	K1	K2	K3	K4
Sumber Terpilih	CS17	CS21	CS21	CS32 & CS34
Kalori Terpilih	5.000	4.000	4.000	4.555
Tonase (Ton/Tahun)	840.731	1.050.913	1.050.913	922.874
FOB (USD/Ton)	44,86	33,40	33,93	47,04
CIF @ 1st Stop (USD/Ton)	63,27	49,22	47,86	57,68
Lama Penumpukan (hari)	1,74	2,78	3,82	19,78
Biaya (USD/Tahun)	53.497.605	52.003.459	50.582.937	53.576.163

Sebagaimana terlihat pada tabel 7, dengan menggunakan kapal angkut K1, kandidat pemasok yang terpilih adalah CS17 dengan kalori 5.000 Kkal/kg demikian juga pada kapal angkut K4 kandidat pemasok terpilih adalah CS32 dan CS34 dengan kalori campuran (*blending*) sebesar 4.555 Kkal/kg. Kapal angkut K1 dan K4 memiliki biaya angkut per unit yang besar sehingga untuk menekan biaya total pengadaan batubara maka sistem akan memilih kalori yang tinggi sehingga dapat menekan kuantitas (tonase) batubara yang harus diangkut.

Sedangkan pada kapal angkut K2 dan kapal angkut K3, sistem cenderung memilih calon kandidat pemasok dengan kalori batubara yang lebih rendah karena peningkatan jumlah tonase akibat penurunan kalori tersebut masih dapat diredam oleh murahnya biaya

angkut per unit yang dimilikinya sehingga total biaya pengadaan batubara untuk PLTU dapat diminimalkan. Hasil perhitungan biaya total untuk metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* disajikan pada tabel 8.

pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* efektif menurunkan biaya total pengadaan batubara untuk seluruh PLTU yaitu menjadi 53.044.043 USD/Tahun (metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke*) dari yang sebelumnya (metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 hub) sebesar 53.262.740 USD/tahun.

Tabel 8. Hasil Optimum Metode Pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke*

Komponen Optimasi	PLTU			
	BBU2&3	BBU1	KDI3	KDI 1&2
Jarak dari Hub (NM)	0	15,4	109,3	22,8
Kebutuhan batubara (Ton/tahun)	430.702	60.298	430.702	129.211
Kebutuhan batubara (Ton/hari)	1.196	167	1.196	359
Drop batubara (Ton/Trip)	4.571	640	4.571	1.371
Kapal Terpilih	K3	K1	K3	K1
CIF @ Stop (USD/Ton)	47,86	56,19	49,54	58,04
Waktu Tempuh (jam)		1,93	13,66	2,85
Biaya (USD/Tahun)	20.730.712	3.415.378	21.338.755	7.559.197
Biaya Total (USD/tahun)	53.044.043			

Jika melihat dari harga CIF yang tercapai pada PLTU KDI3 dan PLTU KDI1&2 yang masing masing bernilai 49,54 USD/Ton dan 58,04 USD/Ton pada metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* yang memiliki nilai yang sama dengan metode pengiriman *Hub and Spoke* dengan 2 hub, maka penghematan tidak terlihat. Karena sumber penghematan pada metode pengiriman *Milk Run with Hub and Spoke* berasal dari biaya asuransi (*insurance*) yang tidak perlu dibayarkan untuk PLTU KDI3 karena telah termasuk dalam *insurance* untuk pengangkutan dengan kapal utama.

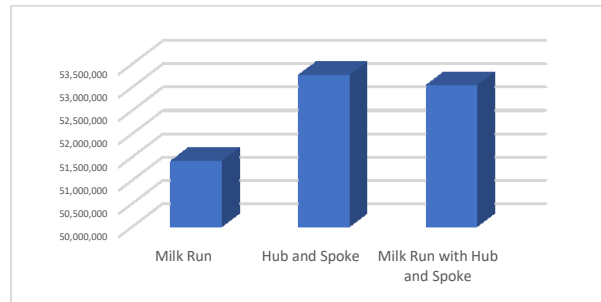
Model Terbaik dan Penjadwalan Pengiriman Batubara ke PLTU

Dari hasil-hasil perhitungan optimasi, reoptimasi dan perhitungan biaya total optimum untuk setiap metode pengiriman yang ada, diketahui bahwa biaya total terendah dari seluruh pilihan metode pengiriman adalah sebesar 51.416.693 USD/Tahun yang dicapai dengan menggunakan metode pengiriman *Milk Runs*, menggunakan kapal angkut K3, dan dari pemasok CS21.

Dengan demikian maka model terbaik (optimum) rantai pasokan batubara untuk PLTU di Sulawesi Tenggara dicapai dengan menggunakan metode pengiriman *Milk Runs*, menggunakan kapal angkut K3, dan dari pemasok CS21.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Optimum Berdasarkan Metode Pengiriman

Metode Pengiriman	Biaya Optimum (USD/Tahun)
Milk Run	51.416.693
Hub and Spoke	53.262.740
Milk Run with Hub and Spoke	53.044.043

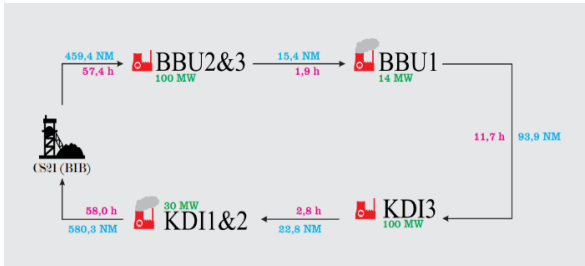


Gambar 5. Perbandingan Biaya Total Setiap Metode Pengiriman (USD/Tahun)

Tahap selanjutnya adalah menentukan jadwal pengiriman dan jumlah kapal angkut yang harus terlibat dalam distribusi batubara dari jetty pemasok ke PLTU-PLTU di Sulawesi Tenggara. Untuk itu perlu diketahui waktu edar (*cycle time*) dalam satu rute pengiriman. Berdasarkan data-data jarak, kapasitas PLTU dan kecepatan kapal dapat dibuat ilustrasi sederhana tentang rute, jarak dan waktu tempuh dari model terbaik yang telah diperoleh disajikan pada gambar 6. Pelayaran dari *jetty* pemasok (BIB) menuju PLTU BBU2&3 membutuhkan waktu tempuh 57,4 jam dan waktu bongkar muatan (*unloading*) diasumsikan akan berlangsung selama 16 jam. Dari BBU2&3, kapal akan menuju BBU1 dengan waktu tempuh selama 1,9 jam dan waktu *unloading* sekitar 3 jam. Dari BBU1 ke KDI3 diperkirakan akan menghabiskan waktu selama 28 jam hingga kapal dinyatakan siap berangkat ke KDI1&2.

Pelayaran dari KDI3 ke KDI1&2 membutuhkan waktu selama 2,9 jam yang selanjutnya akan melakukan kegiatan *unloading* dengan perkiraan waktu selama 6 jam. Dari KDI1&2, kapal akan kembali ke BIB untuk melakukan pemuatan (*loading*) batubara dari pemasok. Kecepatan kapal saat kembali adalah 10 knots (kecepatan saat *ballast*), waktu tempuh dari KDI1&2 ke BIB adalah selama 58,03 jam. Di *jetty* pemasok, diasumsikan akan membutuhkan waktu lebih lama (135 jam) sebelum kapal dinyatakan siap berangkat karena selain melakukan aktifitas *loading* batubara, juga akan dilakukan pemeriksaan fisik kapal. Dalam waktu 135 jam tersebut telah diperhitungkan

kemungkinan terjadinya antrian saat *loading* atau disebut sebagai *dwelling time* yang diasumsikan sama dengan target *dwelling time* minimum nasional yaitu 4 hari. Total waktu edar optimum yang dicapai adalah 307,9 jam.



Gambar 6. Rute Optimum Pasokan Batubara untuk PLTU-PLTU di Sultra

Simulasi jadwal keberangkatan selama 1 tahun dengan menggunakan 4 kapal angkut dan insensitas keberangkatan setiap 92 jam menunjukkan bahwa tidak pernah terjadi penumpukan atau antrian kapal angkut. Dalam simulasi tersebut kapal selalu datang tepat waktu karena belum memasukkan variabel-variabel kendala yang dapat menghambat pelayaran. Variabel penghambat pelayaran dapat disimulasikan dengan memasukkan *uncertainty factor* akan tetapi belum dilakukan dalam penelitian ini, namun telah dilakukan pada penelitian lain salah satunya dalam Choi, Govindan dan Li [10].

Tabel 10. Cycle Time Model Optimum

Jetty Asal	Jetty Tujuan	Jarak ke tujuan	Waktu Tempuh (jam)	Waktu Tempuh (Hari)	Lama singgah (Jam)	Total (jam)
BIB	BBU2&3	459,4	57,425	2,39	16	73,7
BBU2&3	BBU1	15,4	1,925	0,08	3	5,1
BBU1	KDI3	93,9	11,7375	0,49	16	28,0
KDI3	KDI1&2	22,8	2,85	0,12	6	8,4
KDI1&2	BIB	580,3	58,03	2,42	135	192,7
Total Waktu Edar						307,9

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa total biaya minimum pemasokan batubara untuk PLTU di Sulawesi Tenggara dicapai dengan menggunakan metode pengiriman *Milk Runs*, menggunakan kapal angkut K3, dan dari pemasok CS21. Biaya minimum yang dicapai adalah 53.044.043 USD serta total waktu edar optimum yang dicapai adalah 307,9 jam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hariono. (2017). *Coal Chain Modelling untuk PLTU di Pulau-Pulau Kecil Indonesia: Studi Kasus Provinsi Sulawesi*. Tesis, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan : Institut Teknologi Bandung.
- [2] Wibowo, A. P. dan Hariono. (2017). The Influence of Types of Ships and Changes of Coal Reference Prices on Selection of Coal Suppliers for Steam Coal Power Plant in Small Islands in Southeast Sulawesi: A Form of Direct Shipment Supply Chain Modeling. *Prosiding Temu Profesi Tahunan (TPT) ke-XXVI Tahun 2017*, Balikpapan: Perhimpunan Ahli Pertambangan indonesia Keberpihakan Pemangku.
- [3] Idayani, D., dan Subchan, S., (2020), Optimal Control of Multi-Supplier Inventory Management with Lead Time, *International Journal of Computing Science and Applied Mathematics*, 6(1), 23-32.
- [4] Atashbar, N.Z., Labadie. L., and Prins, C., (2018). Modelling and optimisation of biomass supply chains: a review, *Int. J. Prod. Res.*, 56(10), 3482–3506.
- [5] Bhattacharya, R., Kaur, A., and Amit, R.K., (2018). Price optimization of multi-stage remanufacturing in a closed loop supply chain. *J. Clean. Prod.*, 186, 943–962.
- [6] Bortolini, M., Accorsi, R., Gamberi, M., and Pilati, F., (2019), A model to enhance the penetration of the renewables to power multistage food supply chains, *Sustainable Food Supply Chain*. Department of Industrial Engineering University of Bologna, Italia.
- [7] Sarwani, M.Z., Rahmi, A., dan Mahmudy, W.F., (2017), An adaptive genetic algorithm for cost optimization of multi-stage supply chain, *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, 9(2-7), 155–160.
- [8] Bahrapour. P, Safari. M, Taraghdari. M. B., (2016), Modeling Multi-Product Multi-Stage Supply Chain Network Design. *Procedia Economic and Finance.*, 36, 70-80.
- [9] P. L. Anjani, (2016), *Model Optimasi Pemenuhan Kebutuhan Pasokan dan Penentuan Spesifikasi Batubara untuk Rencana Pembangunan PLTU di Indonesia*, Tesis, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan : Institut Teknologi Bandung.
- [10] Choi, T.M., Govindan, K., Li, X., Li, Y., (2017), Innovative supply chain optimization models with multiple uncertainty factors. *Annals Operations Research Journal.*, 257, 1-14.