

SKRIPSI

**OPTIMASI BIAYA TRANSPORTASI BIJIH NIKEL LATERIT
MENGUNAKAN METODE *LEAST COST*
DAN *MODIFIED DISTRIBUTION***

Disusun dan diajukan oleh:

**ACHMAD RIFAI SUKMA
D111 18 1315**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**OPTIMASI BIAYA TRANSPORTASI BIJIH NIKEL LATERIT
MENGUNAKAN METODE *LEAST COST*
DAN *MODIFIED DISTRIBUTION***

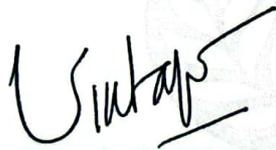
Disusun dan diajukan oleh

Achmad Rifai Sukma
D111181315

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 29 September 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



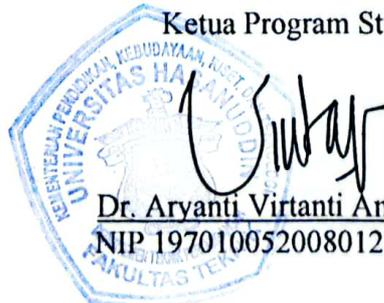
Dr. Aryanti Virtanti Anas S.T.,M.T
NIP 197010052008012026

Pembimbing Pendamping,



Rizki Amalia S.T.,M.T
NIDK 8889211019

Ketua Program Studi,



Dr. Aryanti Virtanti Anas S.T.,M.T
NIP 197010052008012026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama : Achmad Rifai Sukma
NIM : D111181315
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Optimasi Biaya Transportasi Bijih Nikel Laterit Menggunakan
Metode *Least Cost* dan *Modified Distribution*

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 29 September 2023

Yang Menyatakan



Achmad Rifai Sukma

ABSTRAK

ACHMAD RIFAI SUKMA. *OPTIMASI BIAYA TRANSPORTASI BIJIH NIKEL LATERIT MENGGUNAKAN METODE LEAST COST DAN MODIFIED DISTRIBUTION* (dibimbing oleh Aryanti Virtanti Anas dan Rizki Amalia)

PT XYZ merupakan perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan bijih nikel laterit yang memiliki IUP sebesar 6.785 hektar. Kemajuan aktivitas penambangan di tiap-tiap *pit* mengakibatkan jarak pengangkutan bijih nikel laterit dari *front* penambangan menuju ke *stockyard* semakin jauh sehingga menyebabkan waktu edar alat angkut semakin besarnya. Besarnya waktu edar alat angkut menyebabkan produktivitas alat angkut menurun, sehingga menyebabkan target produksi bijih nikel laterit tidak tercapai dan akan mengakibatkan biaya operasional meningkat. Oleh karena itu diperlukan upaya pendistribusian yang cepat dan biaya produksi yang rendah sebagai upaya efisiensi untuk meminimumkan biaya transportasi. Tujuan dari penelitian ini yakni menghitung total biaya optimal transportasi bijih nikel laterit menggunakan metode transportasi solusi awal dan metode solusi optimal sesuai jumlah distribusi masing-masing bijih nikel laterit ke lokasi tujuan. Setelah dilakukan optimasi biaya transportasi menggunakan metode *least cost* dan *modified distribution method* didapatkan total biaya transportasi sebesar Rp. 459.052.794 dari biaya transportasi awal sebesar Rp. 498.423.321, sehingga terjadi pengurangan biaya sebesar Rp.39.370.528. Biaya transportasi optimal diperoleh dengan mendistribusikan 7.330 ton produksi bijih nikel laterit *Pit A* ke *stockyard* Nikita, 3.712 ton produksi bijih nikel laterit *Pit B* ke *stockyard* Aqila, 1.670 ton produksi bijih nikel laterit *Pit C* ke *stockyard* Nikita, 5.288 ton ke *stockyard* Aqila dan 3.693 ton ke *stockyard* Jetty West.

Kata Kunci: Produktivitas, alat angkut, optimasi biaya transportasi, *least cost*, *modified distribution method*.

ABSTRACT

ACHMAD RIFAI SUKMA. OPTIMATION OF LATERITE NICKEL ORE TRANSPORTATION COST USING LEAST COST AND MODIFIED DISTRIBUTION (supervised by Aryanti Virtanti Anas and Rizki Amalia).

PT XYZ is a company engaged in laterite nickel ore mining that has an IUP of 6,785 hectares. The progress of mining activities in each pit results in the distance for transporting laterite nickel ore from the mining front to the stockyard becoming longer, causing the transport equipment's circulation time to increase. The large circulation time of transport equipment causes the productivity of transport equipment to decrease, causing the laterite nickel ore production target to not be achieved and will result in operational costs increasing. Therefore, fast distribution efforts and low production costs are needed as an efficiency effort to minimize transportation costs. The aim of this research is to calculate the total optimal cost of transporting laterite nickel ore using the initial solution transportation method and the optimal solution method according to the distribution amount of each laterite nickel ore to the destination location. After optimizing transportation costs using the least cost method and modified distribution method, the total transportation costs were obtained at Rp. 459,052,794 from the initial transportation costs of Rp. 498,423,321, resulting in a cost reduction of Rp. 39,370,528. Optimal transportation costs are obtained by distributing 7,330 metric tons of Pit A laterite nickel ore production to the Nikita stockyard, 3,712 metric tons of Pit B laterite nickel ore production to the Aqila stockyard, 1,670 metric tons of Pit C laterite nickel ore production to the Nikita stockyard, 5,288 metric tons to the Aqila stockyard, and 3,693 metric tons to the Jetty West stockyard.

Keywords: Productivity, transportation equipment, optimation transportation costs, least cost, modified distribution method

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	viii
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Alat Angkut.....	5
2.2 Metode Transportasi	18
2.3 Metode Transportasi Solusi Awal.....	21
2.4 Metode Transportasi Solusi Optimal	23
2.5 Masalah Transportasi	25
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Lokasi Penelitian.....	29
3.2 Teknik Pengumpulan Data.....	29
3.3 Teknik Analisis Data.....	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Volume <i>Stockyard</i>	34
4.2 Produktivitas Alat Angkut	34
4.3 Perhitungan Biaya Operasional.....	46
4.4 Analisis Biaya Transportasi.....	62
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	75
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA	76

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Pola pemuatan alat gali muat (Nichols, 2005).....	7
Gambar 2.	Pola pemuatan berdasarkan jumlah penempatan alat angkut (Caterpillar, 2015).....	8
Gambar 3.	<i>Bucket fill factor</i> (Caterpillar, 2001).....	11
Gambar 4.	Tabel transportasi (Simbolon, 2022).	26
Gambar 5.	Model transportasi (Simbolon, 2022).	27
Gambar 6.	Lokasi penelitian PT XYZ, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara (PT XYZ, 2022).....	29
Gambar 7.	Diagram alir penelitian.	33
Gambar 8.	Tampilan awal <i>software QM For Windows V5</i>	67
Gambar 9.	Tampilan pada <i>module tree</i>	67
Gambar 10.	Tampilan judul, jumlah sumber dan jumlah tujuan untuk tabel transportasi.....	68
Gambar 11.	Tampilan tabel metode transportasi.....	68
Gambar 12.	Tampilan tabel metode transportasi setelah nama sumber dan tujuan diubah.....	69
Gambar 13.	Pemilihan metode <i>least cost</i> sebagai solusi awal.....	69
Gambar 14.	Tampilan sel permintaan dan penawaran yang telah terisi	70
Gambar 15.	Tampilan sel yang terisi biaya dari masing-masing <i>pit</i> menuju <i>stockyard</i>	70
Gambar 16.	Tampilan <i>solve</i> pada <i>software QM For Windows V5</i>	71
Gambar 17.	Tampilan distribusi bijih nikel laterit menggunakan metode <i>least cost</i> dengan bantuan <i>software</i>	71
Gambar 18.	Tampilan optimasi biaya transportasi metode <i>least cost</i>	72
Gambar 19.	Tampilan hasil perhitungan biaya distribusi dari <i>pit</i> menuju <i>stockyard</i>	72
Gambar 20.	Model transportasi awal.....	73
Gambar 21.	Model transportasi optimal	73

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Nilai <i>swell factor</i>	10
Tabel 2. Volume <i>stockyard</i>	30
Tabel 3. Kapasitas <i>stockyard</i> PT XYZ	34
Tabel 4. Perhitungan efisiensi kerja alat/bulan.....	35
Tabel 5. Perhitungan efisiensi kerja alat/bulan.....	39
Tabel 6. Perhitungan efisiensi kerja alat angkut/bulan.....	42
Tabel 7. Biaya sewa alat angkut <i>Pit A</i>	47
Tabel 8. Biaya sewa alat gali muat <i>Pit A</i>	48
Tabel 9. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit A</i> ke Nikita.....	48
Tabel 10. Biaya penggunaan ban	49
Tabel 11. Gaji operator alat angkut.....	49
Tabel 12. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit A</i> ke Aqila	50
Tabel 13. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit A</i> ke Jetty West	51
Tabel 14. Biaya perbaikan alat gali muat dan angkut	52
Tabel 15. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit B</i> ke Nikita.	52
Tabel 16. Biaya penggunaan BBM alat gali muat	53
Tabel 17. Biaya penggantian ban	53
Tabel 18. Gaji operator alat angkut dan alat gali muat	53
Tabel 19. Tunjangan Makan	54
Tabel 20. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit B</i> ke Aqila	55
Tabel 21. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit B</i> ke Jetty West.....	56
Tabel 22. Biaya perbaikan alat gali muat dan angkut <i>Pit C</i>	57
Tabel 23. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit C</i> ke Nikita	57
Tabel 24. Biaya penggunaan BBM alat gali muat <i>Pit C</i>	58
Tabel 25. Biaya penggantian ban	58
Tabel 26. Gaji operator alat angkut dan alat gali muat	59
Tabel 27. Tunjangan Makan	59
Tabel 28. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit C</i> ke Aqila	60
Tabel 29. Biaya penggunaan BBM alat angkut <i>Pit C</i> ke Jetty West.....	61
Tabel 30. Biaya operasional.....	63
Tabel 31. Produksi bijih nikel laterit masing-masing <i>pit</i> ke <i>stockyard</i>	63
Tabel 32. Pencarian solusi awal menggunakan metode <i>least cost</i>	63
Tabel 33. Penambahan kolom U_i dan baris V_j pada solusi awal	65
Tabel 34. Solusi optimal <i>modified distribution method</i>	65

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
X_{ij}	Banyaknya unit produk/barang yang akan dikirim dari sumber ke-i menuju tujuan ke-j
C_{ij}	Harga transportasi barang per unit dari sumber i ke tujuan j
a_i	Jumlah barang yang ditawarkan atau kapasitas dari sumber i
b_j	Jumlah barang yang diminta atau dipesan oleh tujuan j
m	Banyaknya sumber
n	Banyaknya tujuan
\sum	Jumlah
LC	<i>Least cost</i>
MODI	<i>Modified Distribution.</i>
VAM	<i>Vogel's approximation method</i>
<	Kurang dari
>	Lebih dari
C	<i>Cost</i>
U_i	Biaya implisit (harga bayangan) sumber
V_j	Biaya implisit tujuan
Z	Minimize
Bcm	<i>Bank Cubic Meter</i>
Ccm	<i>Loose Cubic Meter</i>
cc	<i>Compact condition</i>
Sf	<i>Swell factor</i>
Bff	<i>Bucket fill factor</i>
V_a	Volume aktual
V_t	Volume teoritis
Ma	<i>Mechanical avability</i>
W	Jam kerja efektif
R	Waktu kerusakan dan perbaikan alat

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
PA	<i>Physical avability</i>
S	<i>Standby</i>
W+R+S	Jam kerja tersedia
UA	<i>Use of availability</i>
EU	<i>Effective utillzation</i>
CTH	Waktu edar alat angkut (menit)
T1	Waktu antri (menit)
T2	Waktu <i>manuver kosong</i> (menit)
T3	Waktu <i>loading</i> (menit)
T4	Waktu <i>hauling ore</i> (menit)
T5	Waktu manuver <i>dumping</i> (menit)
T6	Waktu <i>dumping</i> (menit)
T7	Waktu <i>running ke front</i> penambangan (menit).
QH	Produktivitas alat angkut (BCM/jam)
Kb	Kapasitas <i>bucket</i>
n	Jumlah pengisian <i>bucket</i>
BBM	Bahan bakar minyak
Ek	Efisiensi kerja alat
Q	Jumlah penggunaan pelumas (liter/jam)
hp	<i>Hour's power</i> (daya mesin)
f	Faktor operasi (%)
c	Kapasitas karter (liter)
t	Jumlah jam antara penggantian pelumas (jam)

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Ketersediaan alat angkut.....	82
Lampiran 2. <i>Cycle time</i> alat angkut.....	87
Lampiran 3. Peta jalur produksi bijih nikel laterit	93

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kita panjatkan atas kehadiran Allah *Subhana Wataala* atas berkat dan rahmat-Nya, sehingga penyusunan laporan Penelitian Tugas Akhir dapat diselesaikan. Shalawat serta salam senantiasa kita ucapkan kepada baginda Rasulullah *sallallahu alaihi wasallam* serta kepada para sahabat nabi dan seluruh ummat Rasulullah *sallallahu alaihi wasallam* hingga akhir zaman. Laporan ini merupakan salah satu bentuk pertanggung jawaban kegiatan Penelitian Tugas Akhir dan menjadi syarat kelulusan dalam mengenyam pendidikan sarjana di Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin

Ucapan terima kasih kepada pihak PT XYZ yang memberikan wadah terbaik untuk melakukan Penelitian Tugas Akhir. Terimakasih kepada seluruh Bapak Supervisor PT XYZ yang telah membantu dalam menyelesaikan Penelitian Tugas Akhir ini.

Ucapan terima kasih kepada Ibu Dr. Aryanti Virtanti Anas S.T., M.T. Kepala laboratorium *Mine Planning and Valuation Laboratory* dan selaku Pembimbing Utama. Terima kasih kepada Ibu Rizki Amalia S.T., M.T selaku Pembimbing Pendamping. Terima kasih kepada Ibu Dr. Eng. Rini Novrianti Sutardjo Tui. S.T., M.BA., M.T dan terimakasih kepada Bapak Asta Arjunoarwan Hatta S.T., M.T selaku dosen penguji.

Terimakasih kepada seluruh Bapak/Ibu dosen Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah memberikan pengetahuan selama berkuliah di Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, terima kasih kepada teman-teman mahasiswa Laboratorium Perencanaan dan Valuasi Tambang serta Keluarga besar Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin.

Ucapan terimakasih yang sangat mendalam kepada kedua orang tua tercinta, Bapak Drs. Sukawati dan Ibu Salma yang selalu memberikan dukungan dan doa selama melakukan kegiatan Penelitian Tugas Akhir.

Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat khususnya pengantar wawasan dan pengetahuan mengenai optimasi biaya transportasi bijih nikel laterit.

Makassar, 29 September 2023

Achmad Rifai Sukma

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT XYZ merupakan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang pertambangan bijih nikel laterit dan memiliki IUP sebesar 6.785 hektar. Perusahaan ini menggunakan alat angkut *dump truck* dengan kapasitas dua puluh ton untuk mengangkut tanah penutup dan digunakan untuk pengangkutan bijih nikel laterit dari *front* penambangan menuju *stockyard*. Jumlah alat angkut yang digunakan pada *Pit A* sebanyak 10 unit, alat angkut yang digunakan pada *Pit B* sebanyak 10 unit dan untuk jumlah alat angkut yang digunakan pada *Pit C* sebanyak 25 unit.

PT XYZ melakukan penambangan bijih nikel laterit menggunakan sistem tambang terbuka dengan menerapkan metode *open cast*. Setiap kegiatan yang dilakukan tidak terlepas dari penggunaan alat mekanis karena merupakan penunjang utama dalam melakukan penambangan. Penggunaan alat mekanis perlu diperhitungkan secara tepat agar efisien baik dalam segi produktivitas maupun dari segi biaya operasional.

Kemajuan aktivitas penambangan pada setiap *pit* mengakibatkan jarak pengangkutan bijih nikel laterit dari *front* penambangan menuju ke *stockyard* semakin jauh dan menyebabkan besarnya angka waktu edar alat angkut pada saat pengangkutan (Anas dan Sufiana, 2017). Besarnya waktu edar alat angkut menyebabkan produktivitas alat angkut menurun, sehingga menyebabkan target produksi bijih nikel laterit tidak tercapai dan akan mengakibatkan biaya operasional meningkat. Oleh karena itu diperlukan upaya pendistribusian yang cepat dan biaya produksi yang rendah sebagai upaya efisiensi untuk meminimumkan biaya transportasi (Lestari dkk., 2021).

Masalah distribusi dapat diselesaikan menggunakan metode transportasi. Metode transportasi merupakan metode yang berkaitan dengan model optimasi yang digunakan untuk meminimumkan biaya transportasi pada saat pendistribusian. Dalam proses pendistribusian barang, kapasitas, dan biaya transportasi harus diperhatikan untuk memperoleh distribusi yang efektif dan efisien (Lestari dkk., 2021).

Tujuan dari adanya optimasi biaya transportasi adalah untuk memaksimalkan keuntungan yang diperoleh perusahaan, menghemat waktu pengerjaan dan meminimalkan biaya pengeluaran untuk pengiriman barang. Pengalokasian suatu produk harus diatur dengan sebaik mungkin, karena dalam proses pengiriman akan timbul perbedaan biaya alokasi dari setiap sumber ke tujuan. Pendistribusian produk menuju berbagai tempat memerlukan biaya transportasi yang tidak murah, sehingga dibutuhkannya perencanaan yang matang (Herlawati, 2016).

Metode transportasi terdiri atas dua langkah utama, yaitu pencarian solusi awal dan pencarian solusi optimal. Solusi awal dapat diselesaikan dengan metode *northwest corner*, *least cost*, dan *vogel's approximation*, sedangkan metode *modified distribution* dan *stepping stone* digunakan untuk mengoptimalkan penyelesaian awal yang telah diperoleh sebelumnya.

Metode penyelesaian awal pada penelitian ini menggunakan metode *least cost* sebagai salah satu metode yang dapat mengoptimalkan biaya transportasi dan distribusi. Keunggulan dari metode *least cost* antara lain lebih mudah dipahami, karena penentuannya dilakukan menurut biaya terendah.

Metode *least cost* didasarkan pada pemikiran bahwa dalam mengambil keputusan, solusi terbaik adalah yang memberikan biaya paling rendah atau efisiensi paling tinggi. Metode ini mempertimbangkan faktor-faktor seperti biaya produksi, efisiensi operasional, dan peningkatan produktivitas untuk mencapai hasil yang paling menguntungkan (Singh, 2018). Biaya transportasi dihitung berdasarkan jarak, volume pengiriman, gaji pengemudi, upah makan, sewa alat, perbaikan dan perawatan alat. Setelah melakukan perhitungan solusi awal dilanjutkan dengan *modified distribution method* sebagai langkah memperoleh solusi optimal dari hasil yang diperoleh menggunakan metode solusi awal (Lestari dkk., 2021).

PT XYZ memiliki delapan *front* penambangan dan tujuh *stockyard*. Penelitian ini dilakukan pada *Pit A*, *Pit B* dan *Pit C* sebagai sumber bijih nikel laterit yang didistribusikan ke *stockyard* Nikita, *stockyard* Aqila, dan *stockyard* Jetty West. Jarak *Pit A* ke *stockyard* Nikita kurang lebih 0,87 km, *Pit B* ke *stockyard* Aqila memiliki jarak kurang lebih 8,28 km, dan *Pit C* ke *stockyard* Jetty West berjarak kurang lebih 10,60 km. *Stockyard* Jetty West merupakan *stockyard* yang

paling dekat dengan dermaga Babarina dengan jarak kurang lebih 200 m, *stockyard* Nikita berjarak kurang lebih 2,08 km serta *stockyard* Aqila kurang lebih 2,12 km.

Pendistribusian bijih nikel laterit yang diangkut ke tiga *stockyard* tersebut perlu diperhatikan karena kapasitas dari *stockyard* terbatas. Selain itu letak dari ketiga *stockyard* tersebut berada di dekat jalur pengapalan sehingga membatasi ruang gerak dari alat angkut. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk menghitung biaya transportasi minimum dengan menggunakan metode *least cost* dan *modified distribution method*.

1.2 Rumusan Masalah

PT XYZ melakukan pengangkutan bijih nikel laterit dari beberapa *front* penambangan ke beberapa *stockyard*. Produksi bijih nikel laterit *Pit* A, B dan C didistribusikan ke *stockyard* Nikita, Aqila dan Jetty West yang jaraknya cukup jauh, sehingga mempengaruhi biaya operasional. Pengangkutan bijih nikel laterit ke *stockyard* merupakan aspek yang harus diperhatikan karena berpengaruh terhadap biaya, sehingga dibutuhkan perhitungan biaya optimal untuk meminimalisir biaya operasional. Oleh karena itu, rumusan masalah pada penelitian ini yakni berapa total biaya transportasi bijih nikel laterit minimum sesuai dengan jumlah distribusi dari masing-masing sumber ke lokasi tujuan menggunakan metode transportasi solusi awal dan metode solusi optimal.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menghitung total biaya optimal transportasi bijih nikel laterit menggunakan metode transportasi solusi awal dan metode solusi optimal sesuai jumlah distribusi masing masing bijih nikel laterit ke lokasi tujuan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat bagi pengembangan wawasan dan pengetahuan mengenai optimasi biaya transportasi bijih nikel laterit terutama dalam pendistribusian bijih nikel laterit dari *pit* menuju penyimpanan sementara yang bertujuan meminimalkan biaya operasional.

1.5 Ruang Lingkup

Penelitian bertujuan untuk menghitung biaya transportasi pengangkutan bijih nikel laterit dari *front* penambangan menuju penyimpanan sementara (*stockyard*). Penelitian ini mencakup tiga *pit* dari total tujuh *pit* karena keterbatasan dalam pengambilan dan pengolahan data serta data biaya operasional karena data biaya operasional merupakan data perusahaan yang tidak dipublikasikan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Alat Angkut

Alat angkut adalah suatu alat yang digunakan untuk mengangkut material-material tambang baik itu material yang bernilai ekonomis ataupun tidak dari satu tempat ke tempat yang lain (tempat penimbunan atau pengolahan). Pemilihan suatu alat hendaknya tidak hanya mempertimbangkan besarnya produksi atau kapasitas produksi alat tersebut tetapi juga mempertimbangkan biaya termurah dari produksi per satuan volume atau per ton (Oemiati dkk., 2020).

Pengangkutan adalah kegiatan memindahkan material baik itu mineral atau batubara atau tanah penutup (*overburden*) dari daerah tambang atau tempat pengolahan dan pemurnian ataupun sampai ke *disposal* (Alan dkk., 2021).

2.1.1 Produktivitas alat angkut

Produktivitas alat angkut merupakan perbandingan antara hasil yang dicapai dengan seluruh sumberdaya yang dihasilkan. Produktivitas alat menunjukkan kemampuan suatu alat yang digunakan untuk berproduksi dalam waktu tertentu (Rostiyanti, 2008).

Produktivitas alat angkut perlu diketahui untuk menentukan jumlah produksi yang direncanakan sesuai dengan kemampuan alat-alat tersebut. Jumlah kombinasi alat muat dan alat angkut juga sangat memengaruhi tingkat produktivitas suatu pekerjaan pemindahan tanah mekanis. Ada dua cara untuk menghitung produktivitas kombinasi alat gali muat dan alat angkut. Pertama yaitu dengan menggunakan data pengukuran langsung di lapangan dan spesifikasi alat dari *handbook* sebagai dasar untuk menghitung masing-masing produktivitas jenis alat. Kedua adalah melalui data historis produksi harian, bulanan, atau tahunan, yaitu dengan membagi jumlah produksi alat per satuan waktu dan jam kerja efektif alat (jam kerja harian, bulanan atau tahunan).

Produktivitas per jam dari suatu alat yang diperlukan dalam merencanakan suatu proyek adalah produktivitas standar dari alat dalam kondisi ideal dikalikan dengan suatu faktor. Faktor tersebut dinamakan efisiensi kerja. Efisiensi kerja

adalah penilaian terhadap pelaksanaan suatu pekerjaan, atau perbandingan antara waktu yang dipakai untuk bekerja dengan waktu yang tersedia. Efisiensi kerja alat dapat diketahui berdasarkan ketersediaan mekanis, ketersediaan fisik, dan penggunaan ketersediaan. Tingkat penggunaan efektif alat yang telah diketahui dapat menunjukkan sejauh mana efisiensi alat yang telah beroperasi (Rochmanhadi, 2000).

Faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas alat gali muat dan alat angkut (Alan dkk., 2021):

1. Efisiensi kerja

Efisiensi kerja adalah salah satu faktor terpenting dalam hal produksi yang harus diperhitungkan dalam upaya mendapatkan harga produksi alat per satuan waktu yang akurat. Sebagian besar nilai efisiensi kerja diarahkan terhadap operator. Efisiensi kerja sangat berpengaruh terhadap tercapainya suatu produksi. Tinggi rendahnya efisiensi kerja sangat tergantung pada faktor motivasi dan disiplin kerja operator. Efisiensi kerja alat merupakan parameter yang digunakan dalam perhitungan produktivitas alat. Parameter yang dibutuhkan untuk menghitung efisiensi kerja alat yaitu jam kerja tersedia dan waktu yang hilang. Jam kerja efektif diperoleh menggunakan Persamaan 1 (Istiqamah dan Gusman, 2020).

$$\text{Jam kerja efektif} = \text{Jam kerja tersedia} - \text{waktu yang hilang} \quad (1)$$

Langkah selanjutnya yaitu menentukan efisiensi kerja alat (E) dengan Persamaan 2 (Istiqamah dan Gusman, 2020).

$$\text{Efisiensi kerja alat (E)} = \frac{\text{Jam kerja efektif}}{\text{Jam kerja tersedia}} \times 100 \% \quad (2)$$

2. Pola pemuatan

Pola pemuatan merupakan faktor yang memengaruhi waktu edar alat angkut dan alat muat. Alat muat melakukan penggalian dan apabila *bucket* terisi penuh maka material siap ditumpahkan. Setelah alat angkut (*dump truck*) terisi penuh maka harus segera keluar dan digantikan dengan alat angkut (*dump truck*) yang lainnya. Pola pemuatan diklasifikasikan menjadi (Nichols and Day, 2005):

- a. Pola pemuatan berdasarkan kedudukan alat gali muat terhadap alat angkut terdiri dari:

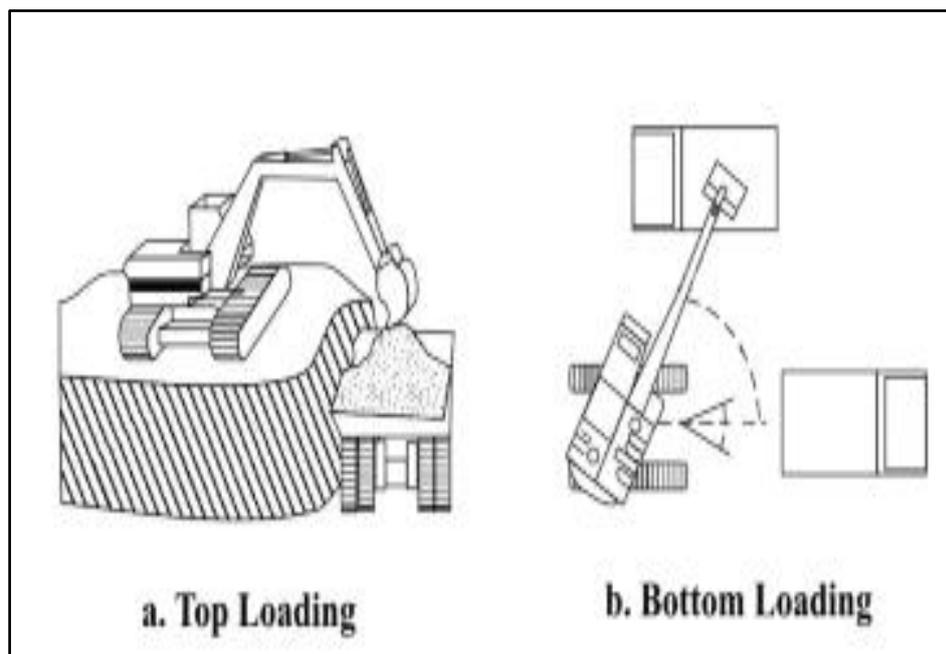
1) *Top loading*

Top loading merupakan posisi pemuatan yang mana kedudukan alat muat berada pada posisi yang lebih tinggi daripada bak *dump truck* (alat muat berada di bagian atas jenjang). Posisi ini memiliki kelebihan pada kondisi jenjang yang rendah dan waktu pemuatan akan memakan waktu yang lebih sedikit dibandingkan posisi *bottom loading*.

2) *Bottom loading*

Bottom loading merupakan posisi pemuatan yang mana kedudukan alat muat akan berada pada level yang sama dengan level alat angkut. Posisi ini memiliki kelebihan pada kondisi jenjang yang memiliki ketinggian cukup tinggi sehingga memiliki kemudahan untuk memilih material dan dapat menjangkau alat angkut lebih baik untuk melakukan pemuatan.

Pola pemuatan berdasarkan kedudukan alat gali muat terhadap alat angkut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pola pemuatan alat gali muat (Nichols and Day, 2005)

b. Pola pemuatan berdasarkan jumlah dan penempatan alat muat terhadap alat angkut, pola pemuatan terdiri dari:

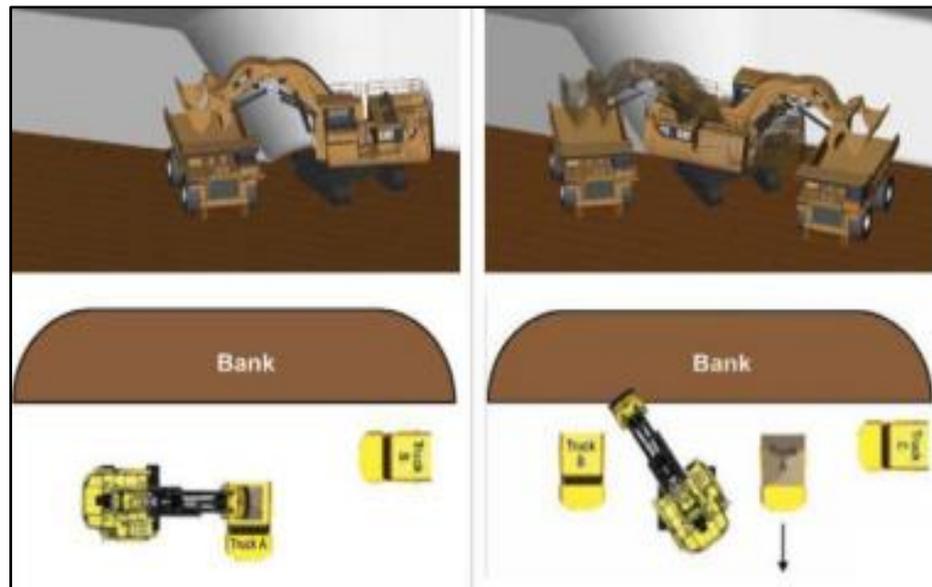
1) *Single side loading*

Pada pola pemuatan ini, *dump truck* hanya mengambil posisi pada salah satu sisi dari alat muat.

2) *Double side loading*

Pada pola ini, *dump truck* dapat mengambil posisi pemuatan dari dua sisi alat muat. Pada waktu salah satu *dump truck* sedang diisi, *dump truck* yang lainnya telah siap untuk dimuat.

Pola pemuatan berdasarkan jumlah penempatan alat angkut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola pemuatan berdasarkan jumlah penempatan alat angkut (Caterpillar, 2015)

3. Jalan angkut

Fungsi utama jalan angkut dalam kegiatan pertambangan sebagai penunjang kelancaran operasi tambang, terutama kegiatan pengangkutan. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dan dipenuhi agar tidak menimbulkan gangguan dan hambatan yang dapat menghambat kegiatan pengangkutan. Lebar jalan tambang/produksi mempertimbangkan alat angkut terbesar yang melintasi jalan tersebut paling kurang tiga setengah kali lebar alat angkut terbesar, untuk jalan tambang dua arah, dua kali lebar alat angkut terbesar, untuk jalan tambang satu arah dan lebar jalan pada jembatan sesuai ketentuan sebelumnya (Kepmen ESDM, 2018).

4. Kemiringan

Kemiringan atau *grade* jalan angkut merupakan salah satu faktor penting yang harus diamati secara detil dalam suatu kajian terhadap kondisi jalan tambang

karena akan mempengaruhi kinerja alat angkut yang melaluinya. Dalam hal kemiringan jalan tambang/produksi lebih dari 12% (dua belas persen) dilakukan kajian teknis yang paling kurang mencakup: kajian risiko, spesifikasi teknis alat, dan spesifikasi teknis jalan (Kepmen ESDM, 2018).

5. *Swell factor* (faktor muai)

Kemampuan alat mekanis untuk bekerja baik alat angkut maupun alat muat sangat dipengaruhi oleh sifat fisik material seperti faktor muai atau segi bobot isinya. Faktor muai perlu diperhatikan karena akan berpengaruh pada kapasitas alat muat dan alat angkut. Material yang terdapat di alam adalah dalam keadaan padat dan terkonsolidasi dengan baik sehingga hanya sebagian yang terisi udara di antara butir-butirnya, tetapi apabila material digali dari tempat aslinya atau dalam keadaan insitu, maka akan terjadi penambahan volume. Pengukuran volume atau bobot Isi material dibedakan atas (Oemiati dkk., 2020):

a. Keadaan asli (*bank condition*);

Keadaan material yang masih alami dan belum mengalami gangguan teknologi, butiran-butiran material yang dikandungnya masih terkonsolidasi dengan baik. Satuan volume material dalam keadaan asli disebut meter kubik dalam keadaan asli (*Bank Cubic Meter/BCM*).

b. Keadaan terberai (*loose condition*);

Material yang telah tergali dari tempat aslinya akan mengalami perubahan volume yaitu muai. Hal ini disebabkan adanya penambahan rongga udara di antara butiran-butiran material, dengan demikian volumenya menjadi lebih besar. Satuan volume material dalam keadaan terberai disebut meter kubik dalam keadaan terberai (*Loose Cubic Meter*).

c. Keadaan padat (*compact condition*);

Keadaan padat akan dialami oleh material yang mengalami proses pemadatan. Perubahan volume terjadi karena adanya penyusutan rongga udara di antara butiran-butiran material tersebut, dengan demikian volumenya akan berkurang tetapi beratnya tetap sama. Faktor muai material diperoleh menggunakan Persamaan 3 (Oemiati dkk., 2020):

$$Sf = \frac{\text{volume insitu}}{\text{volume loose}} \times 100 \% \quad (3)$$

dimana,

SF (*Swell Factor*) = faktor muai (%)

Volume *In situ* = volume material sebelum dibongkar

Volume *Loose* = volume material setelah dibongkar

Nilai *swell factor* yang digunakan yakni 85% dimana kondisi materialnya berupa tanah liat kering dapat dilihat pada Tabel 1 (Tenriajeng, 2003).

Tabel 1. Nilai *swell factor*

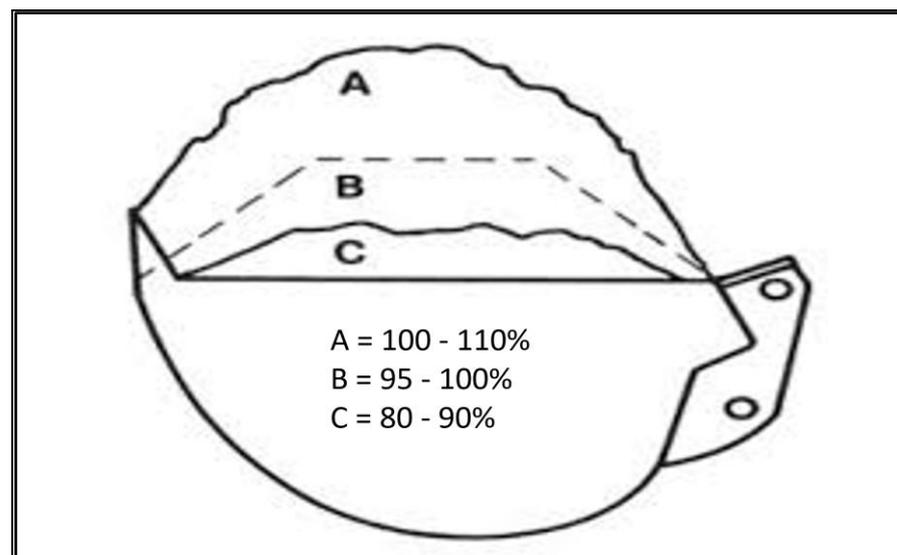
Macam Material	<i>Swell Factor</i> (%)
Bauksit	75
Tanah liat kering	85
Tanah liat basah	80 – 82
Antrasit	74
Batubara bituminous	74
Bijih tembaga	74
Tanah biasa kering	85
Tanah biasa basah	85
Tanah biasa bercampur	90
Pasir dan kerikil	
Kerikil kering	89
Kerikil basah	88
Granit pecah-pecah	56-67
Hematit pecah-pecah	45
Bijih besi pecah-pecah	45

Sumber: Tenriajeng (2003).

6. Faktor pengisian alat gali muat

Faktor pengisian alat gali muat merupakan perbandingan antara volume material dengan volume spesifikasi alat yang dinyatakan dalam persen. Semakin tinggi faktor pengisian maka semakin tinggi volume nyata dari alat tersebut dan berhubungan dengan jumlah pengisian terhadap alat angkut. Faktor pengisian merupakan perbandingan antara kapasitas nyata suatu alat dengan kapasitas teoritis alat tersebut. Indikator *bucket fill factor* yang digunakan yaitu penggalan sedang dengan nilai *fill factor* 1,0 - 1,1 (Caterpillar, 2001). Pengisian alat gali muat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu:

1. Ukuran material; semakin besar ukuran material, maka faktor pengisian akan semakin kecil.
2. Kelengketan material; material yang melengket, faktor pengisiannya pada saat pengisian dapat mencapai 100%, tetapi pada saat pengosongan, material yang terbuang akan lebih sedikit karena material tersebut banyak yang melengket dalam bak sehingga faktor pengisiannya tidak lagi mencapai 100 %.
3. Kandungan air
Semakin besar persentase kandungan air, maka faktor pengisiannya akan semakin kecil. Untuk menentukan besarnya nilai *fill factor* dihitung dengan dua cara yaitu:
 - a. Metode *caterpillar* yaitu dengan cara pengamatan dan perbandingan langsung pada saat pemuatan terlihat adanya variasi pengisian *bucket*.



Gambar 3. *Bucket fill factor* (Caterpillar, 2001).

- b. Metode perhitungan; metode perhitungan ini besarnya nilai *fill factor* diperoleh menggunakan Persamaan 4 (Hadi dan Kartini, 2020):

$$Bff = \frac{V_a}{V_t} \times 100 \% \quad (4)$$

dimana,

Bff = *bucket fill factor*

V_a = volume aktual

V_t = volume teoritis

7. Kondisi tempat kerja
Tempat kerja yang luas akan memperkecil waktu siklus alat karena ada cukup ruang gerak untuk berbagai pengambilan posisi. Alat tidak perlu maju mundur untuk mengambil posisi karena ruang gerak cukup luas.
8. Keadaan jalan angkut
Pemilihan alat mekanis untuk transportasi ditentukan oleh jarak yang dilalui. Fungsi jalan adalah untuk menunjang operasi tambang, apabila kondisi jalan baik maka waktu siklus menjadi kecil.
9. Kondisi alat
Kondisi alat mekanis baik untuk pemuatan maupun pengangkutan mempengaruhi waktu edarnya. Waktu edar alat muat yang baru akan lebih kecil dibandingkan dengan waktu edar alat muat yang telah lama digunakan.
10. Kemampuan operator
Kemampuan operator sangat berpengaruh terhadap waktu yang akan digunakan. Bagi operator yang sudah berpengalaman akan dapat memperkecil waktu yang diperlukan dalam penggunaan alat muat maupun alat angkut.
11. Pengaruh cuaca
Kondisi alam yang tidak bisa ditentukan oleh manusia, kondisi cuaca sangat berpengaruh pada lokasi penambangan. Pada kondisi cuaca hujan, maka hampir dipastikan seluruh aktivitas penambangan ditunda, karena akses jalan menjadi licin dan kurang memadai untuk dilalui oleh alat angkut.
12. Pemeliharaan alat
Peralatan mekanis harus dijaga agar selalu dalam keadaan baik. Hal-hal yang harus diperhatikan dalam pemeliharaan alat antara lain:
 - a. Penggantian pelumas secara teratur
 - b. Kondisi bagian-bagian alat (*bucket*, kuku *bucket*)
 - c. Persediaan suku cadang yang sering digunakan
13. Ketersediaan mekanis
Ketersediaan mekanis merupakan suatu cara untuk mengetahui kondisi mekanis yang sesungguhnya dari alat yang sedang dipergunakan. Ketersediaan mekanis diperoleh menggunakan Persamaan 5 (Rochmanhadi, 2000).

$$MA = \frac{W}{W+R} \times 100 \% \quad (5)$$

dimana,

W = jam kerja efektif alat (jam)

R = waktu kerusakan dan perbaikan alat (jam)

Data ketersediaan mekanis dari catatan waktu kerja dan waktu perbaikan alat akan didapatkan data yang terpercaya tentang kemampuan alat dalam menghadapi kondisi-kondisi tertentu dalam setiap operasi kerjanya. Data tersebut dapat menunjukkan daya guna alat dimasa yang akan datang juga dapat diperkirakan dengan ketepatan yang beralasan.

14. Ketersediaan fisik (*physical af availability*)

Ketersediaan fisik merupakan catatan mengenai keadaan fisik dari alat yang sedang digunakan atau ketersediaan operasional total yang memperhitungkan waktu yang hilang untuk berbagai alasan. Keadaan fisik alat diperoleh menggunakan Persamaan 6 (Rochmanhadi, 2000).

$$PA = \frac{W+S}{W+R+S} \times 100\% \quad (6)$$

dimana,

S = waktu *standby* (jam)

W+R+S = jam kerja tersedia (jam)

Waktu *standby* adalah jumlah jam kerja suatu alat yang tidak dipergunakan dan keadaan alat tersebut tidak rusak bahkan siap operasi. Jam kerja tersedia adalah jumlah jam kerja efektif, waktu *standby*, waktu kerusakan, dan perbaikan alat. Data tentang ketersediaan fisik juga merupakan suatu yang berguna untuk penaksiran secara umum dari daya guna mekanis alat dan juga sebagai indikator dari efisiensi program penjadwalan alat.

15. Penggunaan ketersediaan (*use of availability*)

Pemakaian ketersediaan alat menunjukkan persentase waktu yang digunakan oleh suatu alat untuk beroperasi pada saat alat tersebut dapat digunakan. *Use of availability* diperoleh menggunakan Persamaan 7 (Rochmanhadi, 2000).

$$UA = \frac{W}{W+S} \times 100\% \quad (7)$$

dimana,

UA = *use of availability*

W = jam kerja efektif

S = *standby*

Nilai persentase UA dapat memperlihatkan efektifitas pemanfaatan suatu alat yang tidak sedang rusak.

16. Penggunaan efektif (*effective utilization*)

Penggunaan efektif menunjukkan persentase dari seluruh waktu kerja yang tersedia dapat dimanfaatkan untuk kerja produktif. *Effective utilization* atau biasa juga disebut *operating ratio* (OR) diperoleh menggunakan Persamaan 8 (Rochmanhadi, 2000):

$$EU = \frac{W}{W+R+S} \times 100\% \quad (8)$$

dimana,

EU = *effective utilization*

W = jam kerja efektif

R = waktu kerusakan dan perbaikan alat

S = *standby*

Penggunaan efektif bertujuan untuk mengetahui seberapa efektif waktu kerja yang digunakan untuk berproduksi yang berpengaruh terhadap hasil produksi.

17. Waktu edar

Waktu edar merupakan waktu yang diperlukan suatu alat melakukan kegiatan tertentu dari awal sampai akhir dan siap untuk memulai kembali. Pada setiap kegiatan pemindahan tanah mekanis, alat-alat mekanis bekerja menurut pola tertentu yang pada prinsipnya terdiri dari beberapa komponen waktu siklus, gerakan dalam satu siklus waktu siklus (Ananda dan Anaperta, 2019).

- a. Waktu antri; waktu antri merupakan waktu yang digunakan alat angkut untuk bergantian mendekati posisi alat gali-muat.
- b. Waktu manuver kosong; waktu manuver kosong merupakan waktu yang digunakan alat angkut untuk mendekati posisi alat gali-muat.
- c. Waktu pengisian muatan; waktu pengisian muatan merupakan waktu yang dibutuhkan oleh alat angkut untuk menunggu pengisian muatan.
- d. Waktu angkut; waktu angkut atau waktu pengangkutan adalah waktu yang dibutuhkan oleh alat angkut untuk mengangkut material dari *front* penambangan hingga ke *stockyard* atau *disposal*.
- e. Waktu manuver isi; waktu isi merupakan waktu yang dibutuhkan alat angkut untuk pengambilan posisi *dumping* pada lokasi *stockyard*.

- f. Waktu *dumping*; waktu *dumping* merupakan waktu yang dibutuhkan *dump truck* untuk menumpahkan material di area *disposal* atau *stockyard*.
- g. Waktu kembali; waktu kembali merupakan waktu yang dibutuhkan oleh alat angkut untuk kembali menuju *front* penambangan.

Perhitungan waktu edar alat angkut diperoleh menggunakan Persamaan 9 (Ladianto dan Ernawati, 2019).

$$CTH = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 + T_7 \quad (9)$$

dimana,

CTH = waktu edar alat angkut (menit)

T₁ = waktu antri (menit)

T₂ = waktu manuver kosong (menit)

T₃ = waktu *loading* (menit)

T₄ = waktu *hauling ore* (menit)

T₅ = waktu manuver *dumping* (menit)

T₆ = waktu *dumping* (menit)

T₇ = waktu *running* ke *front* penambangan (menit).

18. Pola pemuatan

Posisi pemuatan ditentukan oleh kedudukan alat muat terhadap material dan alat angkut, apakah kedudukan alat muat tersebut berada lebih tinggi atau kedudukannya sejajar. Cara pemuatan dilihat dari alat muat terhadap *front* penggalian dan posisi alat angkut terhadap alat muat.

Perhitungan produktivitas alat bertujuan untuk mengetahui jumlah produksi alat pada satu satuan waktu. Kemampuan produktivitas alat gali muat dan alat angkut merupakan besarnya produktivitas yang terpenuhi secara real oleh alat gali muat dan alat angkut berdasarkan pada kondisi yang dapat dicapai (Yulia dan Murad, 2019). Perhitungan produktivitas alat angkut diperoleh menggunakan Persamaan 10 (Aritonang dkk., 2020):

$$QH = \frac{(Kb \times n) \times Ek \times Ff \times Sf \times 60 \text{ menit/jam}}{CTH} \quad (10)$$

dimana,

QH = produktivitas alat angkut (BCM/jam)

Kb = kapasitas *bucket* (m³)

n = jumlah pengisian *bucket*

Ff = *Fill factor*

Sf = *Swell factor*

E = efisiensi kerja alat (%)

CTH = waktu edar *hauler* (menit)

Produksi adalah jumlah produksi atau hasil kerja persatuan waktu (per *shift*/per hari/per bulan). Perhitungan produksi diperoleh menggunakan Persamaan 11 (Basuki dkk., 2020):

$$\text{Produksi} = \text{Jam kerja tersedia} \times \text{PA} \times \text{UA} \times \text{Produktivitas} \quad (11)$$

dimana,

Produksi = hasil kerja persatuan waktu (ton/*shift*)

Jam kerja tersedia = waktu kerja tersedia (jam)

PA = ketersediaan fisik alat

UA = ketersediaan penggunaan alat

Produktivitas = hasil kerja persatuan waktu (ton/jam)

2.1.2 Biaya operasional

Biaya operasional adalah biaya-biaya yang dikeluarkan untuk keperluan-keperluan pengoperasian alat berat. Biaya operasi hanya akan dikeluarkan ketika alat berat beroperasi. Biaya yang termasuk biaya pengeluaran alat berat adalah biaya penggunaan bahan bakar, minyak pelumas, gemuk (*grease*), ban, biaya perbaikan dan perawatan, dan upah operator (Komatsu, 2009).

Biaya operasional meliputi:

1. Bahan bakar

Kebutuhan bahan bakar per jam berbeda untuk setiap alat berat atau merk dari mesin. Penggunaan bahan bakar sangat tergantung dari daya mesin alat berat. Data ini biasanya dapat diperoleh dari pabrik produsen alat berat atau *dealer* alat berat yang bersangkutan atau dari data lapangan. Pemakaian bahan bakar dan pelumas per jam akan bertambah bila mesin bekerja berat dan berkurang bila bekerja ringan. Biaya bahan bakar dapat dihitung dengan mengalikan harga bahan bakar per liter dan konsumsi bahan bakar per jam (Peurifoy *et al.*, 2006). Konsumsi bahan bakar merupakan hal utama yang menjadi pertimbangan untuk pemilihan suatu alat, pada penggunaan bahan bakar perilaku operator sangat

menentukan meliputi, panjang lintasan, banyaknya waktu berhenti, muatan alat, dan kondisi jalan sangat mempengaruhi bahan bakar, secara umum konsumsi bahan bakar penyumbang biaya operasional yang paling besar (Yulia dan Murad, 2019).

2. Bahan pelumas, filter, dan gemuk

Biaya ataupun kebutuhan bahan pelumas, filter, dan gemuk seperti pada kebutuhan bahan bakar masing-masing alat berat dalam kebutuhan per jam berbeda sesuai dengan kegiatan perawatan perusahaan dan kondisi lokasi pekerjaan. Kondisi kerja di lapangan sangat berpengaruh pada lama waktu penggantian pelumas. Selang waktu penggantian pelumas menurut kondisi kerja lapangan terdiri dari (Peurifoy *et al.*, 2006):

- a. Lapangan kerja sangat berdebu selang 50 jam.
- b. Lapangan kerja sedang, kadang-kadang berdebu selang 200 jam.
- c. Lapangan kerja bersih, sedikit berdebu sampai 500 jam.

Bahan pelumas terdiri atas oli mesin, oli transmisi, oli hidrolik, dan gemuk. Perkiraan penggunaan bahan pelumas diperoleh menggunakan Persamaan 12 (Peurifoy *et al.*, 2006).

$$Q \text{ (liter/jam)} = \frac{hp \times f \times 0.003 \left(\frac{kg}{hp} \cdot jam\right)}{0.89 \left(\frac{kg}{liter}\right)} + \frac{c \text{ (liter)}}{t \text{ (jam)}} \quad (12)$$

dimana,

Q = jumlah penggunaan pelumas (liter/jam)

hp = daya mesin

f = faktor operasi (%)

c = kapasitas karter (liter)

t = jumlah jam antara penggantian pelumas (jam)

Selain itu, biaya bahan pelumas dapat dihitung dengan mengalikan konsumsi bahan pelumas perjam dan harga pelumas perliter.

3. Perbaikan

Biaya perbaikan dan perawatan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasinya. Semakin berat kondisi kerja alat makin besar pula biaya perbaikannya. Pemeliharaan alat dilakukan setelah habisnya masa pemakaian alat, sehingga perlu penggantian komponen alat tersebut (Yulia dan Murad, 2019).

4. Ban

Biaya untuk penggantian ban sangat berbeda-beda tergantung dari metode operasi dan keadaan lapangan, begitu pula dengan kualitas ban itu sendiri. Faktor utama yang memengaruhi keausan ban adalah cuaca, keadaan permukaan lapangan, dan keterampilan operator (Komatsu, 2009).

5. Upah operator

Besarnya upah kerja operator pada *excavator*, *bulldozer*, motor *grader*, *vibrator roler*, *dump truck* tergantung pada lokasi pekerjaan, perusahaan yang bersangkutan, peraturan yang berlaku di lokasi, dan kontrak kerja antara dua pihak tersebut. Pada dasarnya upah untuk pekerja dihitung dalam besarnya upah pokok dan yang dibayarkan per jam kerja.

2.2 Metode Transportasi

Model transportasi adalah model yang khusus digunakan untuk mengambil keputusan masalah yang berkorelasi dengan pengangkutan dan juga pendistribusian produk atau sumberdaya di berbagai sumber agar dapat menghitung dengan lebih efisien. Persoalan yang akan dipecahkan dengan model transportasi adalah penentuan pengiriman barang yang akan meminimumkan biaya total distribusi (Almahdi dkk., 2023).

Model transportasi berkaitan dengan suatu situasi dimana suatu komoditas yang ingin dikirim dari sejumlah sumber menuju ke sejumlah tujuan. Tujuan dari masalah tersebut adalah menentukan jumlah komoditas yang harus dikirim dari tiap-tiap sumber ke tiap-tiap tujuan sedemikian hingga biaya total pengiriman dapat diminimumkan, dan pada saat yang sama pembatas yang berupa keterbatasan pasokan dan kebutuhan permintaan tidak dilanggar. Model transportasi mengasumsikan bahwa biaya pengiriman pada rute tertentu adalah proporsional dengan banyaknya unit yang dikirimkan pada rute tersebut (Kertiasih, 2009).

Model transportasi adalah suatu gambaran yang dituangkan ke dalam bentuk model matematika dari sebuah kasus transportasi yang dapat membantu berpikir secara cepat dan sistematis mengenai kasus tersebut. Metode transportasi merupakan metode yang digunakan untuk mengelola pendistribusian barang dari sumber yang menyediakan produk menuju tempat tujuan secara optimal.

Ciri-ciri khusus persoalan transportasi (Anam dan Zuardi, 2018) adalah:

1. Terdapat sejumlah sumber dan sejumlah tujuan tertentu.
2. Jumlah barang yang didistribusikan dari setiap sumber dan yang diminta oleh setiap tujuan, besarnya tertentu.
3. Barang yang dikirim atau diangkut dari suatu sumber ke suatu tujuan, besarnya sesuai dengan permintaan dan atau kapasitas sumber.
4. Biaya pengangkutan dari suatu sumber ke suatu tujuan, besarnya tertentu.

Bentuk umum dari model transportasi dapat digambarkan dalam bentuk matriks transportasi. Sebuah matriks memiliki n baris dan m kolom. Pada matriks transportasi sumber-sumber terletak pada baris, sedangkan tujuan-tujuan terletak pada kolom. Notasi i digunakan untuk menandai baris ke- i , sedang notasi j digunakan untuk menandai kolom ke- j .

dimana,

X_{ij} = banyaknya unit produk/barang yang akan dikirim dari sumber ke- i menuju tujuan ke- j

C_{ij} = harga transport barang per unit dari sumber i ke tujuan j

a_i = jumlah barang yang ditawarkan atau kapasitas dari sumber i

b_j = jumlah barang yang diminta atau dipesan oleh tujuan j

m = banyaknya sumber

n = banyaknya tujuan

Suatu masalah transportasi dikatakan seimbang apabila jumlah penawaran pada sumber i sama dengan jumlah permintaan pada tujuan j yang dapat dituliskan dengan Persamaan 13 (Lasmana, 2021).

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (13)$$

Model transportasi pertama kali diselesaikan secara manual dengan menggunakan algoritma yang dikenal sebagai algoritma transportasi. Langkah-langkah untuk menyelesaikan model transportasi yaitu (Lestari dkk., 2021):

1. Diagnosis masalah dengan mengenali sumber, tujuan, parameter, dan variabel yang digunakan.
2. Bentuk matriks dari informasi yang diperoleh menjadi transportasi matriks, dalam hal ini:

- a. Jika seluruh kapasitas sumber lebih dari permintaan tujuan maka ditambahkan kolom (*dummy*) untuk menampung kelebihan kapasitas.
 - b. Sama halnya dengan permintaan, jika permintaan lebih banyak dibandingkan kapasitasnya, maka harus ditambahkan baris (*dummy*) untuk memenuhi kelebihan permintaan.
3. Langkah selanjutnya adalah memecahkan masalah transportasi yaitu dengan menyusun algoritma pada tabel awal. Model transportasi ini terdiri dari tiga metode diantaranya:
 - a. *Least cost method* atau metode biaya terkecil
 - b. *North west corner rule method* atau metode sudut barat laut
 - c. *Vogel's approximation method* atau VAM

Setiap metode memiliki fungsi yaitu menentukan pendistribusian awal berdasarkan kapasitas dan sumber ke semua tujuan.
 4. Jika tabel awal sudah selesai maka dilakukan langkah selanjutnya yaitu pengujian optimalisasi hasil untuk mengetahui distribusi yang dilakukan sudah optimal atau masih terdapat kemungkinan hasil paling minimum. Terdapat dua macam pengujian optimalitas algoritma transportasi.
 - a. Metode batu loncatan atau *stepping stone method*.
 - b. MODI atau *modified distribution*.
 5. Selanjutnya yaitu melakukan modifikasi tabel jika pada langkah sebelumnya masih terdapat kemungkinan hasil yang lebih minimal.

Permasalahan yang diselesaikan dari model transportasi adalah persoalan pendistribusian barang yang terdiri dari beberapa sumber ke beberapa tujuan dengan biaya minimum.

Persoalan model transportasi dapat diselesaikan menggunakan dua jenis metode, yaitu metode solusi awal dan metode solusi optimum. Terdapat delapan metode solusi awal dan dua metode solusi optimum yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persoalan model transportasi. Metode solusi awal meliputi *row minimum method*, *modified row minimum method*, *column minimum method*, *modified column minimum method*, *matrix minimum method*, *north west corner method*, *russel approximation method*, *vogel approximation method*. Metode solusi awal belum tentu memberikan hasil yang optimum, oleh karena itu perlu

dilanjutkan menggunakan metode solusi optimum yang meliputi *stepping stone method* dan *modified distribution method* (Taha, 2007).

Model transportasi mempunyai karakteristik dan syarat sebagai berikut:

1. Adanya pengalokasian barang yang dipindahkan dari sumber ke tempat tujuan berdasarkan permintaan.
2. Satu sumber dapat mendistribusikan ke beberapa/semua tujuan.
3. Satu tujuan dapat menerima distribusi dari beberapa sumber.
4. Masing-masing sumber dan tujuan mempunyai kapasitas, dimana sumber memiliki kapasitas pengiriman dan begitupun dengan tujuan.

Alokasi distribusi pada masing-masing sumber dan tujuan tidak boleh melebihi kapasitasnya.

2.3 Metode Transportasi Solusi Awal

Sebelum melakukan solusi optimal, terdapat tiga macam metode yang dikenal untuk solusi awal dan dapat dipilih salah satunya yaitu *north west corner*, *least cost*, dan *vogel approximation*. Masing-masing metode memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda. Pemecahan awal tidak menjamin untuk memperoleh pemecahan optimal, walaupun pada beberapa masalah tertentu, pemecahan awal menghasilkan pemecahan yang optimal (Silaen, 2018).

2.3.1 Metode West Corner

Alokasi awal nilai sel ditetapkan pada sel yang berada di ujung kiri atas tabel nilai sel awal tergantung pada kendala-kendala suplai dan *demand* untuk satu sel. Langkah-langkah menentukan solusi awal dari metode ini adalah (Tarliah dan Ahmad, 2006):

1. Mengecek apakah total *supply* dengan total *demand* sama, jika tidak sama maka tambahkan kolom “*dummy*”.
2. Alokasi nilai sebesar mungkin pada sel X_{11} dengan memperhatikan kendala *supply* dan *demand*, contoh: $X_{11} = \min\{S_1, d_1\}$
3. Alokasikan nilai sebesar mungkin pada sel yang bersebelahan dengan X_{11} , contoh: bila $S_1 > d_1$ maka $X_{11} + X_{12} = S_1$, $X_{12} = \dots$ bila $S_1 < d_1$ maka $X_{11} + X_{21} = d_1$, $X_{21} = \dots$

4. Ulangi langkah dua sampai semua nilai kendala terpenuhi.

2.3.2 Metode *Least Cost*

Metode *least cost* melakukan alokasi secara sistematis pada kotak-kotak berdasarkan biaya transportasi minimum. Metode *least cost* adalah salah satu metode transportasi yang paling cepat untuk dilakukan, tetapi hasilnya belum tentu optimal. Dalam metode ini diasumsikan tiap lokasi sumber dan lokasi tujuan diurutkan dari sisi kiri ke kanan dan dari atas ke bawah dalam peta data matriks. Penghitungan biaya transportasi dengan menggunakan metode *least cost* sesuai dengan namanya dimulai dari matriks permintaan biaya terendah (Kakiy dan Thomas, 2008).

Prinsip dasar penyelesaian awal dengan metode biaya terendah tidak jauh berbeda dengan metode barat laut. Hanya saja pengisian tidak dilakukan dari sisi barat laut, tetapi dari sel yang biaya pengirimannya terendah. Metode *least cost* selalu memulai penyelesaian dari biaya yang terkecil tanpa memperhitungkan efeknya terhadap keseluruhan proses (Siang dan Jong jek, 2014).

Metode *least cost* adalah sebuah metode untuk menyusun tabel awal dengan cara pengalokasian distribusi barang dari sumber ke tujuan mulai dari sel yang memiliki biaya distribusi kecil (Yusanti dkk., 2017).

1. Kelebihan: mencari dan memenuhi yang biayanya terkecil dulu. Metode *least cost* lebih efisien dibanding metode *north west corner* dan lebih mudah dipahami sehingga lebih disukai oleh orang awam.
2. Kelemahan: pada kasus tertentu, ada kemungkinan diperolehnya solusi dengan biaya yang ekstra mahal dan pada metode *least cost* terletak pada penentuan alokasi produk ke dalam sel atau kotak yang memiliki biaya terendah, dimana biaya tersebut mempunyai lebih dari satu sel atau kotak.

Langkah-langkah metode *least cost* yaitu (Gede, 2008):

- a. Mengecek apakah total *supply* dengan total *demand* sama, jika tidak sama maka tambahkan kolom “*dummy*”. Apabila total *demand* $>$ *supply* maka tambahkan *supply* semu dan sebaliknya, apabila *demand* $<$ *supply* maka tambahkan nilai *demand* semu.

- b. Pilih kotak dengan biaya transport (C_{ij}) terkecil kemudian alokasi penawaran atau permintaan sebanyak mungkin. Untuk C_{ij} terkecil $X_{ij} =$ minimum yang akan menghabiskan baris i atau kolom j . Baris i atau kolom j . Baris i atau kolom j yang telah dihabiskan akan dihilangkan.
- c. Dari sisa kotak yang ada (kotak yang akan dihilangkan), pilih lagi C_{ij} terkecil dan alokasikan sebanyak mungkin pada baris i atau kolom j .
- d. Proses ini akan terus berlanjut sampai penawaran dan permintaan terpenuhi.

2.3.3 Metode *Vogel's Approximation Methode* (VAM)

Dalam penentuan solusi awal, VAM menetapkan konsep denda (*penalty cost*). Denda dimaksudkan sebagai selisih antar dua biaya terkecil pada sel-sel yang sebaris/sekolom. Langkah-langkah metode VAM adalah (Ibnas dkk., 2016):

1. Tentukan denda untuk setiap baris dan kolom dengan mengurungkan dua biaya terkecil pada sel-sel yang sebaris atau sekolom (selisih antar dua biaya terkecil pada setiap baris atau kolom).
2. Pilih baris atau kolom dengan memuat denda tertinggi (atau memilih sel dengan biaya terkecil).
3. Alokasikan sebesar mungkin pada sel tersebut dengan biaya transportasi terkecil dalam baris atau kolom dengan denda terbesar.
4. Ulangi langkah 1, 2, dan 3 sampai tercapai suatu solusi biaya minimum.

2.4 Metode Transportasi Solusi Optimal

Apabila solusi awal sudah diperoleh, selanjutnya untuk menentukan apakah pemecahan ini sudah yang terbaik atau belum, jika belum maka dilakukan optimasi ulang untuk mendapatkan hasil yang optimal. Terdapat dua metode yang digunakan untuk melakukan uji optimal yaitu metode *stepping stone* dan *modified distribution method* sebagai metode optimal.

2.4.1 Metode *Stepping Stone*

Metode *stepping stone* dilakukan setelah melalui pencarian solusi awal. Langkah-langkah metode *stepping stone* yaitu (Aribowo, 2008):

1. Menentukan variabel masuk, yaitu sel yang berkecendrungan untuk dipertukarkan dengan sel yang lain.
2. Menentukan sel yang berseberangan lokasinya untuk proses pertukaran.
3. Pertukaran dilakukan, jika hasil lebih optimal maka proses dianggap berhasil. Uji lagi dengan variabel masuk pada sel yang lain

2.4.2 Modified Distribution Method

Modified distribution method (Modi) tidak lain dari algoritma batu loncatan dengan teknik yang sudah diperhalus untuk menghitung indeks yang akan ditingkatkan. Perbedaan metode ini terletak pada langkah-langkah yang digunakan untuk menyelesaikan persoalan yang mana terdapat jejak tertutup yang akan ditelusuri. Metode Modi merubah alokasi produk untuk mendapatkan alokasi yang optimal dengan menggunakan suatu indeks perbaikan yang berdasarkan pada nilai baris dan nilai kolom. Metode Modi memiliki syarat yang harus terpenuhi, yaitu banyaknya kotak terisi harus sama dengan banyaknya baris ditambah banyaknya kolom dikurang satu (Soplanit dkk., 2019).

Metode *modified distribution* merupakan variasi dari metode *stepping stone* yang didasarkan pada rumusan dual. Perbedaannya dengan metode *stepping stone* adalah metode ini tidak harus menentukan semua jalur tertutup variabel nonbasis, kecuali pada saat akan melakukan perpindahan pengisian tabel (Aminuddin, 2005).

Langkah-langkah dalam menyelesaikan pencarian solusi optimal menggunakan *modified distribution method* adalah (Herlawati, 2016):

1. Uji optimal dilakukan ketika metode awal memenuhi syarat $m + n - 1$ (m jumlah kolom dan n jumlah baris).
2. Menghitung nilai indeks baris dan kolom, dengan menggunakan rumus $U_i + V_j = C_{ij}$, dimana U_i merupakan nilai indeks pada baris i , V_j merupakan nilai indeks pada kolom j dan C_{ij} adalah biaya transportasi dari sumber i ke tujuan j . Pemberian nilai indeks ini harus berdasarkan pada sel yang telah terisi atau digunakan. Sebagai alat bantu untuk memulai pencarian nilai indeks, maka nilai baris pertama (U_1) ditetapkan sama dengan nol.
3. Nilai indeks seluruh baris dan kolom diperoleh menggunakan Persamaan 14.

$$U_i + K_j = C_{ij} \tag{14}$$

4. Mencari sel-sel yang kosong atau sel yang belum terisi.
5. Menghitung besarnya nilai pada sel-sel kosong tersebut menggunakan Persamaan 15.

$$S_{ij} = C_{ij} - U_i - V_j \quad (15)$$
6. Apabila nilai sel-sel kosong tersebut keseluruhannya bernilai positif berarti proses tersebut telah menghasilkan biaya transportasi minimum.
7. Apabila masih terdapat nilai negatif berarti masih terdapat penghematan biaya, maka dilakukan proses eksekusi terhadap sel yang memiliki angka negatif (pilih negatif terbesar apabila terdapat lebih dari satu nilai negatif).
8. Proses pengalokasian dilakukan menggunakan pendekatan yang serupa dengan metode batu loncatan (*stepping stone*).
9. Lakukan langkah dari awal (langkah 1) untuk memastikan semua nilai sel (S_{ij}) kosong tidak ada yang bernilai negatif.

Tujuan dari model transportasi adalah merencanakan pengiriman dari sumber-sumber ke tujuan sedemikian rupa untuk meminimumkan total biaya transportasi dengan kendala-kendala:

- a. Setiap permintaan tujuan terpenuhi
- b. Sumber tidak mungkin mengirim komoditas lebih besar dari kapasitasnya.

2.5 Masalah Transportasi

Persoalan transportasi merupakan permasalahan yang berkaitan dengan perencanaan untuk pendistribusian barang atau jasa dari beberapa sumber menuju kebeberapa tujuan. Tujuan umum metode transportasi adalah meminimalkan biaya pengiriman barang dari beberapa sumber ke beberapa tujuan (Aribowo, 2008).

Distribusi produk ke berbagai daerah tentunya membutuhkan biaya transportasi yang tidak sedikit. Untuk itu diperlukan suatu perencanaan yang matang agar biaya transportasi yang dikeluarkan seefisien mungkin untuk keberlanjutan operasional (Murugan dan Roohini, 2017).

Masalah transportasi timbul ketika kita mencoba menentukan cara pengiriman suatu jenis barang dari beberapa sumber ke beberapa tujuan yang dapat meminimumkan biaya. Biasanya jumlah barang yang dapat disalurkan dari setiap

lokasi penawaran adalah tetap atau terbatas, namun jumlah permintaan pada setiap lokasi permintaan adalah bervariasi (Agustini dan Rahmadi, 2004).

Masalah transportasi dapat ditempatkan dalam suatu tabel khusus yang dinamakan tabel transportasi. Sumber ditulis dalam baris dan tujuan dalam kolom. Dalam tabel transportasi terdapat $m \times n$ kotak. Biaya transportasi per unit barang C_{ij} dicatat pada kotak kecil di bagian kanan atas setiap kotak. Permintaan dari setiap tujuan terdapat pada baris paling bawah, sementara penawaran setiap sumber dicatat pada kolom paling kanan. Kotak pojok kiri bawah menunjukkan kenyataan bahwa penawaran atau *supply* sama dengan permintaan atau *demand* (Simbolon dkk., 2022). Bentuk umum dari tabel transportasi dapat dilihat pada Gambar 4.

Dari/Ke		Tujuan				Penawaran
		1	2	...	N	
Sumber	1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1n}	a_1
	2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2n}	a_2

	M	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mn}	a_m
Permintaan		b_1	b_2	...	b_n	

Gambar 4. Tabel transportasi (Simbolon dkk., 2022).

Langkah untuk menyelesaikan masalah transportasi adalah dengan menentukan solusi awal kemudian dilanjutkan dengan solusi optimal. Jika permintaan melebihi penawaran maka dibuat sumber *dummy* yang akan memenuhi kekurangan tersebut seperti Persamaan 16.

$$\sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i \quad (16)$$

Sebaliknya, jika penawaran (*supply*) melebihi permintaan (*demand*) maka dibuat sumber *dummy* yang akan menyerap kelebihan tersebut sebanyak Persamaan 17.

$$\sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j \quad (17)$$

Suatu masalah transportasi dapat dimodelkan secara matematis, yaitu dengan membentuk fungsi tujuan. Fungsi tujuan tersebut menunjukkan biaya transportasi dari sumber i ke tujuan j , maka model program linier untuk permasalahan transportasi dapat diformulasikan sebagai Persamaan 18.

Fungsi tujuan:

$$\text{Meminimumkan } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

dengan kendala:

$$\begin{aligned} &= \sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i; i = 1, 2, \dots, m \\ &= \sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j; j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (18)$$

dimana,

C_{ij} = biaya transportasi per unit barang dari sumber i ke tujuan j

X_{ij} = jumlah barang yang didistribusikan dari sumber i ke tujuan j

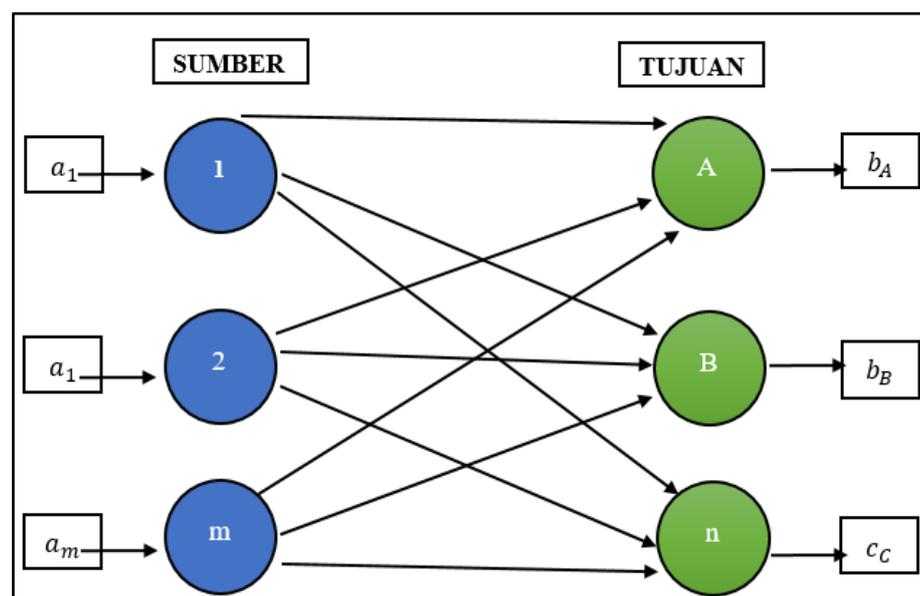
a_i = jumlah barang yang ditawarkan atau kapasitas dari sumber i

b_j = jumlah barang yang diminta atau dipesan oleh tujuan j

m = banyaknya sumber

n = banyaknya tujuan

Ilustrasi model transportasi dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Model transportasi (Simbolon dkk., 2022).

Gambar 5 menjelaskan bahwa terdapat tiga sumber dalam sebuah perusahaan, yaitu m_1 , m_2 dan m_3 . Ketiga sumber tersebut dapat dikirimkan ke tujuan n_1 , n_2 dan n_3 . Garis yang menghubungkan sebuah sumber dan sebuah tujuan mewakili rute pengiriman barang tersebut. Jumlah penawaran di sumber i adalah a_i , dan permintaan di tujuan j adalah b_j .

Formulasi program linier dari model transportasi (Gambar 5) adalah:

Minimumkan:

$$Z = C_{11}X_{11} + C_{12}X_{12} + C_{13}X_{13} + C_{21}X_{21} + C_{22}X_{22} + C_{23}X_{23} + C_{31}X_{31} + C_{32}X_{32} + C_{33}X_{33}$$