

**SKRIPSI**

**OPTIMASI BIAYA BAHAN BAKAR DAN PRODUKSI ALAT  
BERAT PADA KEGIATAN PENAMBANGAN BIJIH NIKEL  
LATERIT DENGAN METODE PEMROGRAMAN LINEAR**

**Disusun dan diajukan oleh:**

**REZKI SAFITRI  
D111 20 1009**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

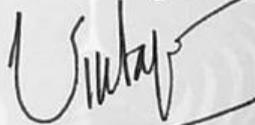
**OPTIMASI BIAYA BAHAN BAKAR DAN PRODUKSI ALAT  
BERAT PADA KEGIATAN PENAMBANGAN BIJIH NIKEL  
LATERIT DENGAN METODE PEMROGRAMAN LINEAR**

Disusun dan diajukan oleh

**REZKI SAFITRI  
D111 20 1009**

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 Juli 2024  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,  
Pembimbing Utama,



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

Ketua Program Studi,



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

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini;

Nama : Rezki Safitri  
NIM : D111 20 1009  
Program Studi : Teknik Pertambangan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

Optimasi Biaya Bahan Bakar dan Produksi Alat Berat pada Kegiatan  
Penambangan Bijih Nikel Laterit dengan Metode  
Pemrograman Linear

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 Juli 2024

Yang Menyatakan



Rezki Safitri

## ABSTRAK

**REZKI SAFITRI.** *Optimasi Biaya Bahan Bakar dan Produksi Alat Berat pada Kegiatan Penambangan Bijih Nikel Laterit dengan Metode Pemrograman Linear* (dibimbing oleh Aryanti Virtanti Anas)

PT Putra Mahalona merupakan salah satu sub kontraktor di Wilayah Izin Usaha Pertambangan PT Vale Indonesia Tbk dengan salah satu proyek yang dijalankan yaitu proses pengangkutan bijih nikel laterit ke *rompile* di *Pit Ferrary Pinang Balaba* (FPB). Produksi aktual mingguan di lokasi *small fleet* FPB selama bulan Januari-Februari 2024 hanya satu minggu dari delapan minggu produksi yang mencapai target produksi. Rata-rata produksi aktual mingguan sebesar 7.402,99 ton, sedangkan rata-rata target produksi dari rencana PT Vale Indonesia Tbk sebesar 9.057,38 ton. Alat berat pada proses produksi untuk memperoleh keuntungan dipengaruhi oleh aspek biaya, salah satunya biaya bahan bakar yang digunakan. Penggunaan bahan bakar yang tidak terencana dan tinggi dapat mengurangi laba yang diperoleh. Penelitian ini dilakukan untuk menghitung biaya penggunaan bahan bakar dan jumlah produksi optimal alat berat yang digunakan di *Pit Ferrary Pinang Balaba*. Biaya penggunaan bahan bakar dan jumlah produksi alat berat diperoleh dengan metode pemrograman linear menggunakan *software POM for Windows*. Rata-rata penggunaan bahan bakar aktual mingguan alat berat yang digunakan sebanyak 2.387 liter dengan biaya Rp51.320.500, sedangkan penggunaan bahan bakar hasil optimasi 1.393,07 liter dengan biaya Rp29.951.090 menunjukkan terjadi penurunan sebanyak 41,64%. Rata-rata produksi aktual mingguan sebesar 7.402,99 ton sedangkan jumlah produksi optimal mingguan sebesar 9.085,17 ton menunjukkan jumlah produksi mingguan dapat ditingkatkan sebesar 1.682,18 ton.

Kata Kunci: Alat Berat, *Pit Ferrary Pinang Balaba*, PT Putra Mahalona, Optimasi, Pemrograman Linear

## ABSTRACT

**REZKI SAFITRI.** *Optimization of Fuel Costs and Heavy Equipment Production in Laterite Nickel Ore Mining Activities with Pemrograman Linear Method* (Supervised by Aryanti Virtanti Anas)

PT Putra Mahalona is one of the subcontractors in the PT Vale Indonesia Tbk Mining Business License Area with one of the projects carried out, namely the process of transporting laterite nickel ore to the rompile in the Ferrary Pinang Balaba (FPB) Pit. The actual weekly production at the FPB small fleet location during January-February 2024 was only one week out of eight production weeks that reached the production target. The average weekly actual production was 7,402.99 tons, while the average production target from the PT Vale Indonesia Tbk plan was 9,057.38 tons. Heavy equipment in the production process to gain profits is influenced by cost aspects, one of which is the cost of fuel used. Unplanned and high fuel use can reduce profits earned. The research was conducted to calculate the cost of fuel use and the optimal production amount of heavy equipment used in the Ferrary Pinang Balaba Pit. The cost of fuel consumption and the amount of heavy equipment production were obtained by linear programming method using POM for Windows software. The average weekly actual fuel usage of heavy equipment used was 2,387 liters at a cost of Rp51,320,500 while the optimized fuel consumption was 1,393,07 liters at a cost of Rp29,951,090 showing a decrease of 41,64%. The average weekly actual production of 7,402.99 tons while the optimal weekly production amount of 9,085.17 tons shows the weekly production amount can be increased by 1,682.18 tons.

Keywords: Heavy Equipment, Pit Ferrary Pinang Balaba, PT Putra Mahalona, Optimization, Linear Programming

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
<i>ABSTRACT</i> .....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR LAMPIRAN.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Nikel Laterit.....	5
2.2 Pemindahan Bijih.....	7
2.3 Bahan Bakar.....	10
2.4 Produktivitas Alat.....	10
2.5 Pemrograman linear.....	16
BAB III METODE PENELITIAN.....	26
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	26
3.2 Teknik Pengumpulan Data.....	27
3.3 Teknik Analisis Data.....	30
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Produktivitas Alat Gali-Muat dan Alat Angkut.....	42
4.2 Optimasi.....	45
4.3 Analisis Hasil Optimasi.....	55
BAB V KESIMPULAN.....	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Profil nikel laterit .....	7
Gambar 2 Pola <i>top loading</i> .....	8
Gambar 3 Pola <i>bottom loading</i> .....	9
Gambar 4 (a) Pola muat <i>single up</i> dan (b) Pola muat <i>back up</i> .....	9
Gambar 5 Bagian-bagian <i>excavator</i> .....	14
Gambar 6 Diagram alir metode grafik .....	20
Gambar 7 Peta tunjuk lokasi penelitian .....	27
Gambar 8 Pengambilan data waktu edar.....	28
Gambar 9 Tampilan awal <i>software POM QM for Windows</i> .....	34
Gambar 10 Memilih <i>ok</i> .....	35
Gambar 11 Memilih metode <i>linear programming</i> .....	35
Gambar 12 Memilih <i>new</i> .....	35
Gambar 13 Mengatur <i>create data set for linear programming</i> .....	36
Gambar 14 Memilih fungsi tujuan dan mengatur nama baris.....	36
Gambar 15 Mengatur <i>column name</i> .....	37
Gambar 16 Mengisi koefisien fungsi tujuan .....	37
Gambar 17 Memasukkan tanda fungsi batasan.....	38
Gambar 18 Mengklik menu <i>solve</i> .....	38
Gambar 19 Tampilan hasil analisis <i>linear programming</i> .....	38
Gambar 20 Tampilan tabel iterasi .....	39
Gambar 21 Tampilan hasil <i>ranging</i> .....	39
Gambar 22 Diagram penelitian .....	40
Gambar 23 Kegiatan <i>loading</i> dan <i>hauling ore</i> PT Putra Mahalona.....	41
Gambar 24 Hasil analisis optimasi bahan bakar .....	50
Gambar 25 Biaya bahan bakar sebelum dan setelah optimasi .....	51
Gambar 26 Penggunaan bahan bakar sebelum dan setelah optimasi.....	52
Gambar 27 Hasil optimasi produksi.....	54
Gambar 28 Hasil <i>ranging</i> optimasi bahan bakar.....	56
Gambar 29 Hasil <i>ranging</i> optimasi produksi bijih nikel laterit .....	58

**DAFTAR TABEL**

Tabel 1 Efisiensi kerja alat .....	14
Tabel 2 Faktor <i>bucket</i> .....	15
Tabel 3 Pemodelan tabel simpleks awal .....	23
Tabel 4 Target produksi mingguan .....	30
Tabel 5 Produksi mingguan alat gali-muat .....	43
Tabel 6 Produksi mingguan alat angkut.....	44
Tabel 7 Koefisien kendala produksi aktual lapangan .....	46
Tabel 8 Koefisien kendala jam kerja.....	48
Tabel 9 Perbandingan penggunaan bahan bakar.....	51
Tabel 10 Perbandingan konsumsi bahan bakar sebelum dan setelah optimasi.....	52
Tabel 11 Perbandingan <i>fuel ratio</i> sebelum dan setelah optimasi.....	53
Tabel 12 Biaya bahan bakar per BCM.....	53
Tabel 13 Perbandingan produksi aktual, target produksi dan produksi optimal...	55
Tabel 14 Nilai <i>slack</i> atau <i>surplus</i> optimasi biaya bahan bakar .....	56
Tabel 15 Rentang perubahan nilai sisi kanan optimasi biaya bahan bakar.....	57
Tabel 16 Nilai <i>slack</i> atau <i>surplus</i> optimasi produksi .....	58
Tabel 17 Rentang nilai sisi kanan optimasi jumlah produksi .....	59

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Cycle Time</i> Alat Gali-Muat dan Alat Angkut.....	67
Lampiran 2 Spesifikasi Alat.....	76
Lampiran 3 Jam Kerja dan Efisiensi Kerja Alat .....	80
Lampiran 4 Konsumsi Bahan Bakar .....	83
Lampiran 5 Produktivitas Alat .....	86
Lampiran 6 Iterasi .....	99
Lampiran 7 Kartu Konsultasi .....	102

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Optimasi Biaya Bahan Bakar dan Produksi Alat Berat pada Kegiatan Penambangan Bijih Nikel Laterit dengan Metode Pemrograman Linear” yang disusun sebagai salah satu syarat lulus Mata Kuliah Skripsi Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Segala puji bagi-Nya yang telah memberikan penulis kesehatan serta kesempatan melakukan penelitian dan menyelesaikan skripsi. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Baginda Nabi Muhammad Shallallaahu 'Alaihi Wasallam sebagai suri tauladan bagi umat manusia.

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada berbagai pihak yang telah memberikan saran, masukan, serta dukungan baik secara moril dan materil sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Terima kasih yang sebesar-besarnya saya ucapkan kepada Bapak Ir. Umar Zulfiqra Al-Haddad, S.T. selaku pembimbing dan membantu penulis dalam proses pengambilan data dan penyusunan penelitian di PT Putra Mahalona. Penulis juga mengucapkan kepada seluruh karyawan PT Putra Mahalona yang telah menerima dan banyak membantu penulis selama melakukan penelitian.

Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada Ibu Dr. Ir. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin sekaligus sebagai Kepala Laboratorium Perencanaan dan Valuasi Tambang serta sebagai pembimbing penulis. Terima kasih kepada Ibu Rizki Amalia, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T. selaku dosen penguji beserta segenap dosen dan staf administrasi Departemen Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada teman-teman Teknik Pertambangan 2020 (*DRILLING 2020*), teman-teman anggota Laboratorium Perencanaan dan Valuasi Tambang serta sahabat-sahabat penulis yang telah mengisi masa perkuliahan dan menemani penulis dalam suka maupun duka. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada Bapak

Syafruddin dan Ibu Ruhani orang tua tercinta, saudara-saudari tersayang penulis Kak Sri dan Dek Ikhlas yang senantiasa memberikan doa, dukungan, nasehat dan semangat sehingga penulis dapat melewati dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan memberikan pengetahuan serta pengembangan wawasan khususnya mengenai optimasi biaya bahan bakar dan produksi alat berat dengan metode pemrograman linear.

Gowa, 29 Juli 2024

Penulis

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

PT Putra Mahalona merupakan perusahaan yang bergerak di bidang konstruksi pertambangan dan *supplier* yang didirikan pada tahun 2012. PT Putra Mahalona merupakan salah satu sub kontraktor di Wilayah Izin Usaha Pertambangan PT Vale Indonesia Tbk yang berlokasi di Desa Baruga, Kecamatan Towuti, Kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan. Sejak tahun 2016 hingga saat ini menangani proyek penambangan di PT Vale Indonesia, salah satunya adalah proyek *bottom ore* berupa pengangkutan bijih nikel laterit ke *rompile* di *Pit Ferrary Pinang Balaba (FPB)* yang dialokasikan sebanyak satu *fleet*.

Endapan nikel laterit terdapat di dekat permukaan dan umumnya ditambang dengan tambang terbuka. Tahapan penambangan bijih nikel berlangsung melalui tahapan pembersihan lokasi tambang (*land clearing*), pengupasan lapisan tanah penutup (*stripping*), penambangan bijih dengan kadar nikel sedang dan tinggi (*ore mining*), pengaturan ukuran bijih sesuai dengan ukuran yang diperlukan pabrik pengolahan (*screening*) dan kemudian penyimpanan di area penampungan (*stockpile*) (Kementrian ESDM, 2021). *Ore* (bijih) yakni batu hasil galian dari pertambangan berbahan mineral yang tinggi nilai ekonomisnya. Produksi bijih nikel berpengaruh pada keuntungan yang diperoleh perusahaan. Proses produksi yang dilakukan oleh suatu industri bertujuan untuk memenuhi target produksi secara akurat dan cepat. Hasil produksi yang tidak sesuai dapat mempengaruhi biaya yang dikeluarkan dan laba yang diterima oleh industri (Adriantantri and Indriani, 2021).

Rancangan anggaran biaya penambangan sangat penting untuk menjamin keberhasilan dan kelancaran kegiatan penambangan. Biaya operasional penambangan mencakup sejumlah aspek yang mempengaruhi keberhasilan perusahaan untuk mencapai tujuan laba usaha. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja operasional penambangan antara lain jumlah produksi, biaya peralatan, tenaga kerja, bahan bakar, pemeliharaan peralatan dan aspek lainnya. Perencanaan yang baik dapat membantu perusahaan dalam mengidentifikasi potensi risiko dan mengambil langkah yang tepat untuk mengurangnya (Wahyuni dan Saldy, 2023).

Proses produksi industri pertambangan menghadapi keterbatasan sumber daya, waktu produksi dan alat yang digunakan dalam proses produksi. Perusahaan dalam mengambil keputusan pada perencanaan produksi dengan adanya keterbatasan tersebut, sebaiknya berupaya untuk memaksimalkan keuntungan yang dihasilkan. Pada proses produksi diperlukan suatu acuan perencanaan produksi untuk memaksimalkan hasil yang diperoleh dan meminimalkan biaya produksi yang digunakan termasuk biaya konsumsi bahan bakar (Ramadhani dkk., 2022).

Produksi aktual mingguan di lokasi *small fleet* FPB selama bulan Januari-Februari 2024 hanya satu minggu dari delapan minggu produksi yang mencapai target produksi. Rata-rata produksi aktual mingguan sebesar 7.402,99 ton, sedangkan rata-rata target produksi dari rencana PT Vale Indonesia Tbk sebesar 9.057,38 ton. Peningkatan produksi dapat dilakukan dengan melakukan optimasi jumlah produksi dengan mengetahui target produksi yang dihasilkan alat berat dan jam kerja alat.

Proses operasional penambangan tidak hanya terkait target produksi tetapi juga terkait biaya yang dikeluarkan perusahaan. Penggunaan alat berat sebagai aspek utama dalam kegiatan operasional pertambangan dalam proses produksi dipengaruhi oleh penggunaan bahan bakar yang menjadi salah satu faktor penyumbang biaya operasional penambangan yang paling besar sehingga mengharuskan selalu mengevaluasi penggunaan bahan bakar yang digunakan (Rahmi dkk., 2022). PT Putra Mahalona belum melakukan perencanaan penggunaan bahan bakar yang dapat menyebabkan penggunaan bahan bakar tidak efisien sehingga dapat mengakibatkan terjadinya pembengkakan biaya bahan bakar. Penggunaan bahan bakar yang tidak terencana dan tinggi dapat mengurangi laba yang diperoleh. Biaya bahan bakar dapat diminimalisir dengan mengoptimalkan penggunaan bahan bakar yang digunakan alat berat.

Permasalahan tersebut dapat diselesaikan dengan menggunakan metode pemrograman linear. Pemrograman linear merupakan salah satu solusi permasalahan dalam menentukan solusi optimal. Masalah pemrograman linear pada dasarnya berkaitan dengan penentuan alokasi optimal sumber daya yang terbatas (*limited resources*) untuk memenuhi suatu tujuan (*objective*). Pemrograman linear terdiri atas dua metode yaitu metode grafik dan metode

simpleks. Metode simpleks menyelesaikan permasalahan lebih dari dua variabel yang dapat diterapkan dalam kehidupan sehari-hari dan dapat digunakan dalam perencanaan proses produksi, dengan salah satu tujuan akhirnya adalah tercapainya nilai optimal dengan kendala sumber daya yang terbatas (Firmansyah *et.al*, 2020).

Metode pemrograman linear dapat mengoptimalkan kapasitas produksi unit peralatan pada operasi pengangkutan bijih. Kendala yang terkait dengan optimasi proses mencakup jam kerja, target, dan produksi aktual. Jika produksi merupakan tujuan maksimum, maka biaya merupakan tujuan minimum. Optimasi dalam operasi pengangkutan bijih dapat mempertimbangkan batasan kendala unit produksi dan pencapaian target produksi. Proses pengangkutan muatan perlu diperhatikan ketersediaan alat pengangkut dalam jumlah yang sesuai dengan peralatan berdasarkan dengan kemampuan produksi peralatan tersebut agar mampu menunjang dalam mencapai operasi produksi yang optimal (Febriyani dkk., 2022).

## **1.2 Rumusan Masalah**

PT Putra Mahalona tidak mencapai target produksi yang ditetapkan oleh PT Vale Indonesia Tbk dan tidak menetapkan batas konsumsi bahan bakar yang digunakan alat berat dalam proses produksi bijih nikel laterit. Oleh sebab itu, permasalahan dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Berapa biaya bahan bakar optimal alat berat pada proses penambangan bijih nikel laterit.
2. Berapa jumlah produksi optimal alat berat pada proses penambangan bijih nikel laterit.
3. Bagaimana hasil analisis sensitivitas dari hasil optimasi terhadap perubahan-perubahan variabel.

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari dilakukannya penelitian adalah sebagai berikut:

1. Mengoptimasi biaya bahan bakar alat berat pada proses penambangan bijih nikel laterit.

2. Mengoptimasi jumlah produksi alat berat pada proses penambangan bijih nikel laterit.
3. Melakukan analisis sensitivitas dari hasil optimasi terhadap perubahan-perubahan koefisien atau variabel.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah dapat menghitung jumlah produksi optimal untuk memenuhi target produksi dalam proses penggalian dan pengangkutan bijih nikel laterit sehingga target produksi dapat tercapai dan meminimalkan biaya bahan bakar yang digunakan. Penelitian ini dapat dijadikan sebagai suatu masukan dan acuan bagi perusahaan dalam menetapkan penggunaan bahan bakar dan jumlah produksi optimal alat berat pada kegiatan penambangan bijih nikel laterit serta menjadi bahan bacaan atau referensi.

#### **1.5 Ruang Lingkup**

Penelitian ini dilakukan di PT Putra Mahalona di *site* PT Vale Indonesia Tbk pada bulan Januari-Februari 2024 khususnya di *Pit* Ferrary Pinang Balaba (FBP) yang dialokasikan dengan satu *fleet* yang terdiri atas satu alat gali-muat tipe *Hyundai* HX340 SL dan tiga alat angkut tipe Fuso FN 527 ML. Optimasi bahan bakar menggunakan faktor produksi aktual lapangan berdasarkan waktu edar alat dan konsumsi bahan bakar alat gali-muat dan alat angkut sedangkan untuk optimasi produksi bijih nikel laterit hanya menggunakan faktor jam kerja, jumlah produksi aktual perusahaan, produksi aktual lapangan dan target produksi.

## **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

### **2.1 Nikel Laterit**

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki endapan bijih nikel laterit dalam jumlah yang cukup besar. Endapan nikel laterit Indonesia tersebar di beberapa daerah seperti di Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, Maluku, dan Papua. Indonesia merupakan penghasil nikel terbesar kelima di dunia, sebesar 12% cadangan di dunia. Faktor yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit adalah morfologi, batuan asal dan tingkat pelapukan. Laterit merupakan hasil proses pelapukan batuan *mafic* atau *ultramafic* di daerah tropis sehingga komposisi kimia dan mineraloginya berbeda antara satu endapan dengan endapan lainnya. Nikel dalam bijih nikel laterit berasosiasi dengan besi oksida dan mineral silikat (Subagja dkk., 2016).

Laterit adalah tubuh batuan yang mempunyai kandungan Fe yang tinggi dan telah mengalami pelapukan, termasuk di dalamnya profil endapan material hasil transportasi yang masih tampak batuan asalnya. Proses pembentukan nikel laterit dimulai dengan adanya batuan beku ultrabasa sebagai batuan induk. Batuan induk ultrabasa tersusun atas mineral olivin dan piroksen yang mudah mengalami pelapukan kimia. Pelapukan tersebut membuat komposisi kimia dan mineralogi batuan berubah. Unsur nikel dalam batuan beku ultrabasa terletak pada kisi kristal olivin dan piroksen yang merupakan hasil substitusi atom Fe dan Mg (Harahap dan Novitasari, 2022).

Keberadaan endapan nikel laterit memiliki perbedaan karakteristik pada masing-masing daerah. Perbedaan tersebut dapat diketahui dari sifat fisik yang nampak di atas permukaan meliputi jenis laterit, litologi, vegetasi yang tumbuh, dan kondisi morfologi. Endapan nikel laterit terdapat di beberapa daerah di Sulawesi seperti di daerah Sorowako dan Konawe Utara. Daerah Sorowako batas antara zona lateritisasi terlihat sangat jelas dan tidak dijumpai adanya batugamping sebagai lapisan paling atas dari endapan nikel laterit. Bagian atas dijumpai adanya *top soil* yang terdiri dari humus dan pepohonan. Bagian bawah

*top soil* dijumpai adanya lapisan *overburden* dengan komposisi utama berupa Fe, Cr, Mn, dan Co. Bagian bawah *overburden* dijumpai adanya zona limonit dan zona saprolit dijumpai pada bagian bawah zona limonit sedangkan zona paling bawah berupa *bedrock* yang merupakan batuan segar yang belum mengalami proses pelapukan. Perbedaan karakteristik suatu daerah endapan nikel laterit berhubungan dengan adanya perbedaan komposisi mineralogi batuan asalnya dan zona lateritisasi (Lintjewas dkk., 2019).

Nikel laterit adalah produk laterisasi batuan kaya Mg dan ultramafik yang memiliki kandungan Ni primer 0,2-0,4%. Proses dan karakter laterit yang dihasilkan dikendalikan pada skala regional dan lokal oleh interaksi dinamis faktor-faktor seperti iklim, topografi, tektonik, jenis dan struktur batuan primer. Sebagian besar sumber daya nikel laterit terbentuk sekitar 22 derajat garis lintang di kedua sisi khatulistiwa dan dalam beberapa kasus kadar tertinggi, terkonsentrasi di zona tumbukan lempeng yang aktif secara tektonik (misalnya Indonesia, Filipina, dan Kaledonia Baru). Berdasarkan zonasinya, endapan nikel terdiri atas (Harahap dan Novitasai, 2022).

1. Zona *bedrock*

Lapisan ini merupakan lapisan paling bawah yang menunjukkan sebagai tahap awal pelapukan batuan dasar (*bedrock*). Lapisan ini mengandung 5% Fe, 34-45% MgO, 0,3% Ni, dan 0,01% Co.

2. Lapisan *saprolite*

Pelapukan terjadi pada kontak antara mineral dan pada batas rekahan dan terdapat banyak batuan segar dan sedikit produk alterasi. Lebih jauh ke atas profil, proporsi mineral primer yang bertahan berkurang, dan zona rekahan yang lebih kuat sepenuhnya diubah akhirnya meninggalkan batu-batu terpisah dari batuan dasar utuh dengan campuran mineral primer dan alterasi dimana struktur batuan primer dipertahankan. *Saprolite* dicirikan dengan warna horison kuning muda sampai kehijauan. Lapisan ini mengandung 10-25% Fe, 15-35% MgO, 1,5-3% Ni, dan 0,02-0,1% Co.

### 3. Lapisan *limonite*

Lapisan ini didominasi oleh goetit dan hematit dalam bentuk oksida laterit. Zona limonit dicirikan dengan warna merah coklat hingga kuning tua, tekstur agak lunak dan kandungan Fe tinggi.



Gambar 1 Profil nikel laterit (Harahap dan Novitasai, 2022)

## 2.2 Pemindahan Bijih

Salah satu kegiatan penambangan berupa adanya pemuatan dan pengangkutan yang bertujuan untuk pemindahan material hasil penggalian (*ore getting*) ke *stockpile* dengan menggunakan alat-alat mekanis. Alat-alat mekanis yang dimaksud seperti *backhoe* dan *dump truck*. *Backhoe* adalah salah satu jenis alat penggalian yang umumnya menggunakan tenaga mesin diesel dan sistem hidrolis sedangkan *dump truck* adalah sebuah alat pengangkut material dari jarak sedang hingga jauh yang materialnya dapat diisikan oleh *excavator*, *wheel loader* maupun *shovel* (Anwar dkk., 2019). Pemilihan kombinasi peralatan yang efektif khususnya untuk operasi penggalian dan pengangkutan memerlukan perkiraan produktivitas setiap kemungkinan kombinasi *excavator* atau truk (Hardila dkk., 2020).

Tahap *ore getting* dilakukan beberapa tahapan (Trihatmanto, 2019):

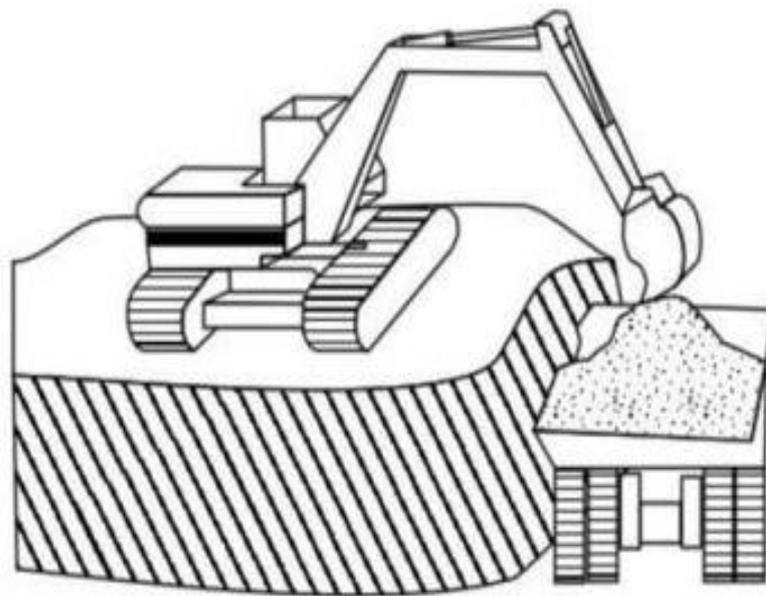
1. *Ore getting* adalah kegiatan penggalian *ore* dengan nilai ekonomis sesuai *cut off grade*.
2. Kegiatan *ore getting* dilakukan menggunakan *excavator backhoe*.
3. Pengawasan dilakukan pada kegiatan *ore getting*.

#### 4. *Composite ore getting.*

Proses dan pola pemuatan dalam pemindahan material mempengaruhi waktu edar yang digunakan alat berat dalam proses produksi. Pemuatan didasarkan pada posisi *dump truck* yang digunakan untuk memuat hasil galian *backhoe* yang dikenal sebagai pola galian muat yang terdiri atas (Winarno dkk., 2018):

##### 1. *Top loading*

*Backhoe* berada di atas posisi atau jenjang yang lebih tinggi daripada *dump truck* pada saat proses pemuatan. Cara ini hanya berlaku untuk alat muat *backhoe excavator*. Keuntungan dari pola pemuatan ini yaitu operator dapat melihat bak *dump truck* dan menempatkan material dengan lebih mudah. Pola pemuatan *top loading* dapat dilihat pada Gambar 2.

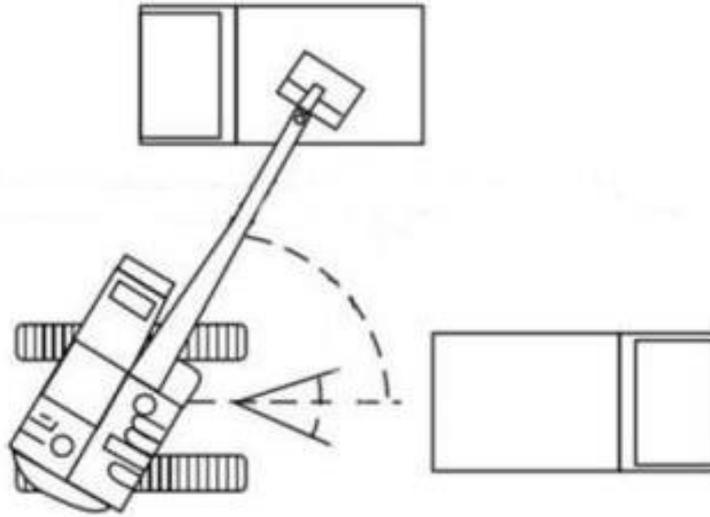


Gambar 2 Pola *top loading* (Winarno dkk., 2018)

##### 2. *Bottom loading*

Posisi truk dan *backhoe excavator* berada pada jenjang yang sama. *Bottom loading* merupakan pola pemuatan dengan posisi alat gali-muat dan alat angkut sejajar (posisi alat gali-muat dan alat angkut sama tingginya). Pola pemuatan ini posisi truk dan *backhoe* berada pada satu level (sama-sama di

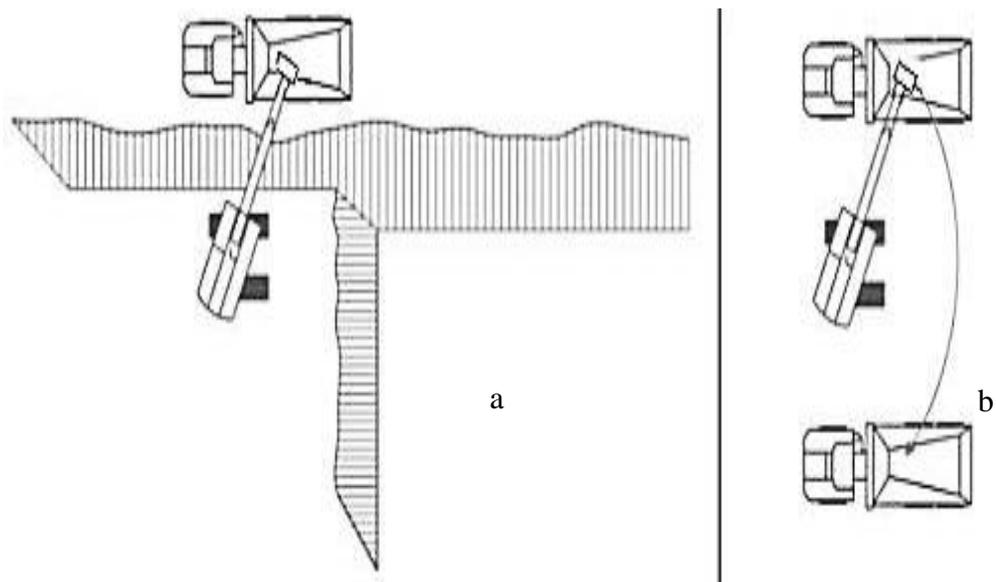
atas jenjang). Cara ini dipakai pada alat muat *power shovel*. Pola pemuatan *bottom loading* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Pola *bottom loading* (Winarno dkk., 2018)

Berdasarkan dari jumlah penempatan posisi *dump truck* untuk dimuati terhadap posisi *backhoe* yaitu (Winarno dkk., 2018):

1. *Single back up*, yaitu truk memposisikan diri untuk dimuati pada satu tempat. Pola *single back* dapat dilihat pada Gambar 4.
2. *Double back up*, yaitu truk memposisikan diri untuk dimuati pada dua tempat. Pola *double back up* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 (a) Pola muat *single up* dan (b) Pola muat *back up* (Winarno dkk., 2018)

### 2.3 Bahan Bakar

Penggunaan bahan bakar merupakan jumlah bahan bakar yang digunakan oleh *dump truck* dan *excavator* dalam melakukan aktivitas penambangan (Falih dkk., 2021).

#### 1. *Fuel consumption*

Jumlah konsumsi bahan bakar alat gali-muat maupun alat angkut dapat diketahui berdasarkan data banyaknya pengisian bahan bakar pada masing-masing alat dan data waktu kerja dari unit alat. *Fuel consumption* dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$Fuel\ consumption = \frac{Jumlah\ pemakaian\ solar\ (liter)}{Jam\ kerja\ (jam)} \quad (1)$$

#### 2. *Fuel ratio*

*Fuel ratio* adalah jumlah bahan bakar yang diperlukan dalam memproduksi satu BCM material. *Fuel ratio* diperoleh berdasarkan perbandingan *fuel consumption* perjam dan jumlah produksi alat. *Fuel ratio* (FR) dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.

$$FR\ (litr/BCM) = \frac{Fuel\ consumption\ (\frac{litr}{jam})}{Produktivitas\ (\frac{BCM}{jam})} \quad (2)$$

#### 3. *Fuel cost*

*Fuel cost* merupakan biaya bahan bakar yang digunakan untuk memproduksi satu BCM material. *Fuel cost* dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.

$$Fuel\ cost\ (Rp/BCM) = Fuel\ Ratio \times Harga\ solar \quad (3)$$

### 2.4 Produktivitas Alat

Produktivitas alat berat yang kurang optimal dapat merugikan suatu usaha. Produktivitas alat berat bergantung pada kapasitas *bucket*, koefisien *bucket*, waktu siklus dan faktor penyesuaian produksi. Optimasi produksi pada sektor pertambangan dapat dilakukan dengan berbagai cara, antara lain optimasi kapasitas produksi alat berat, efisiensi waktu kerja, dan lain-lain. Optimasi kapasitas produksi alat berat merupakan faktor terpenting karena sebagian besar biaya yang timbul dalam operasional penambangan dihasilkan oleh operasional

alat berat. Optimasi produksi pertambangan dapat meningkatkan produktivitas (Prasmono dan Hasibuan, 2018).

#### **2.4.1 Waktu Edar Alat (*Cycle time*)**

Alat berat dalam proses pemindahan material dilakukan per siklus. Siklus kerja merupakan proses berlangsungnya kegiatan dari suatu alat dimulai dari gerakan awal sampai kembali lagi pada gerakan tersebut. Waktu yang diperlukan alat melakukan pekerjaan dalam satu siklus kegiatan disebut dengan waktu edar atau *cycle time*. Siklus kerja alat dalam melakukan suatu kegiatan dilakukan secara berulang. Faktor yang mempengaruhi siklus kerja alat antara lain (Anisari, 2018).

1. Ukuran unit

Ukuran alat mempengaruhi waktu edar kerja alat, semakin besar alat maka semakin lama waktu edar yang dibutuhkan.

2. Jenis material

Jenis material yang basah, kering dan bongkahan dapat mempengaruhi waktu edar alat.

3. Keterampilan operator

Operator alat yang terampil dapat mempengaruhi waktu edar, semakin bagus keterampilannya semakin cepat pula waktu edarnya.

*Cycle time* merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi produksi kerja alat. Hal ini disebabkan karena waktu edar sebagai variabel dalam perhitungan jumlah *ritase* yang dapat dilakukan dalam satu jam kerja. *Cycle time* berbanding terbalik dengan hasil produksi alat yaitu semakin kecil waktu edar maka semakin besar jumlah produktivitas yang akan dihasilkan (Mahmuddin dkk., 2022). Waktu edar mempengaruhi produksi yang dihasilkan alat, semakin kecil waktu edarnya semakin tinggi produksi yang dihasilkan alat tersebut. Waktu edar terdiri atas dua yaitu (Firdaus, 2023):

1. Waktu tetap (*fixed time*)

*Fixed time* merupakan waktu yang dibutuhkan alat melakukan gerakan tetap, misalnya memuat dan menumpahkan.

## 2. Waktu tidak tetap (*variable time*)

*Variable time* ialah waktu yang berubah yang dipengaruhi variabel tertentu misalnya tergantung kondisi lapangan dan jarak.

Waktu edar alat gali-muat merupakan jumlah dari proses waktu penggalian material (*excavating*) yaitu waktu *excavator* memuat bahan galian, waktu *swing loaded* yaitu waktu yang digunakan *excavator* saat *bucket* berisi bahan galian ketika menggerakkan lengannya ke atas bak *dump truck*, waktu menumpahkan bahan galian ke bak *dump truck* (waktu *dumping*) dan waktu *swing* dalam keadaan kosong yaitu waktu yang digunakan *excavator* saat *bucket* dalam kondisi kosong lengannya digerakkan kembali ke arah bahan galian (Mahmuddin dkk., 2022).

Perhitungan waktu edar alat gali muat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4 (Mahmuddin dkk., 2022).

$$C_m = T_{ex} + T_{swl} + T_{du} + T_{swe} \quad (4)$$

Keterangan:

$C_m$  = *Cycle time* gali muat (detik)

$T_{ex}$  = Waktu *excavating* (detik)

$T_{swl}$  = Waktu *swing loaded* (detik)

$T_{du}$  = Waktu *dumping* (detik)

$T_{swe}$  = Waktu *swing empty* (detik)

Perhitungan waktu edar alat angkut dihitung menggunakan Persamaan 5.

$$C_{ta} = Ta_1 + Ta_2 + Ta_3 + Ta_4 + Ta_5 + Ta_6 \quad (5)$$

Keterangan:

$Ta_1$  = Waktu mengatur posisi untuk diisi muatan (menit)

$Ta_2$  = Waktu diisi muatan (menit)

$Ta_3$  = Waktu mengangkut muatan (menit)

$Ta_4$  = Waktu *manuver* alat angkut

$Ta_5$  = Waktu penumpahan muatan (menit)

$Ta_6$  = waktu kembali kosong (menit)

### 2.4.2 Efisiensi alat

Efisiensi kerja alat merupakan perbandingan antara waktu kerja produktif dan produktif waktu kerja yang tersedia dinyatakan dalam persentase (%). Efisiensi kerja ini akan mempengaruhi kemampuan produksi suatu alat. Tingkat

efisiensi kerja sangat dipengaruhi oleh kondisi alat, perawatan alat, keadaan cuaca, kondisi medan kerja dan operator sendiri. Waktu kerja efektif dan efisiensi kerja dihitung menggunakan Persamaan 6 dan Persamaan 7 (Sefrizni dan Kasim, 2019).

$$W_e = W_t - (W_{td} + W_{hd}) \quad (6)$$

$$E_k = \left( \frac{W_e}{W_t} \right) \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

$W_e$  = Waktu kerja efektif (menit)

$W_t$  = Waktu kerja tersedia (menit)

$W_{hd}$  = Waktu hambatan dapat dihindari (menit)

$W_{td}$  = Waktu hambatan tidak dapat dihindari (menit)

$E_k$  = Efisiensi kerja (%)

Waktu kerja efektif merupakan waktu jam kerja tersedia dikurangi dengan waktu hambatan-hambatan yang terjadi selama proses penambangan. Hambatan-hambatan yang terjadi selama proses produksi berupa (Wardana dkk, 2021):

1. Hambatan tidak tetap (hambatan yang dapat dihindari)

Hambatan tidak tetap merupakan hambatan yang terjadi karena adanya penyimpangan terhadap waktu kerja yang telah dijadwalkan, antara lain:

- a. Terlambat memulai kerja, disebabkan persiapan operasi sebelum kerja, terlambat datang kerja dan waktu istirahat terlalu lama.
- b. Berhenti kerja lebih awal, disebabkan karena aktivitas kerja dihentikan sebelum waktu kerja yang telah dijadwalkan.
- c. *Refueling* unit yang masih sering dilakukan pada saat jam operasi.
- d. Keterlambatan melakukan *pre start check* melewati jadwal yang ditetapkan sehingga menyebabkan terlambatnya waktu beroperasi.

2. Hambatan tetap (hambatan yang tidak dapat dihindari)

Hambatan tetap merupakan hambatan yang terjadi pada waktu kerja yang menyebabkan hilangnya waktu kerja, antara lain:

- a. Keperluan operator merupakan waktu yang digunakan operator untuk kegiatan pribadi, misalnya sholat, minum, buang air dan lain-lain.
- b. Kondisi kerja alat merupakan waktu yang hilang karena adanya gangguan tak terduga pada alat mekanis yang digunakan, misalnya ban kempes, *slip*, bocor, *low power engine* dan sebagainya.

- c. Hujan merupakan salah satu hambatan yang dapat menyebabkan terhentinya kegiatan penambangan baik pada saat turun hujan ataupun karena kondisi jalan licin.

Nilai efisiensi kerja berdasarkan kondisi alat dalam beroperasi dapat dilihat pada Tabel 1.

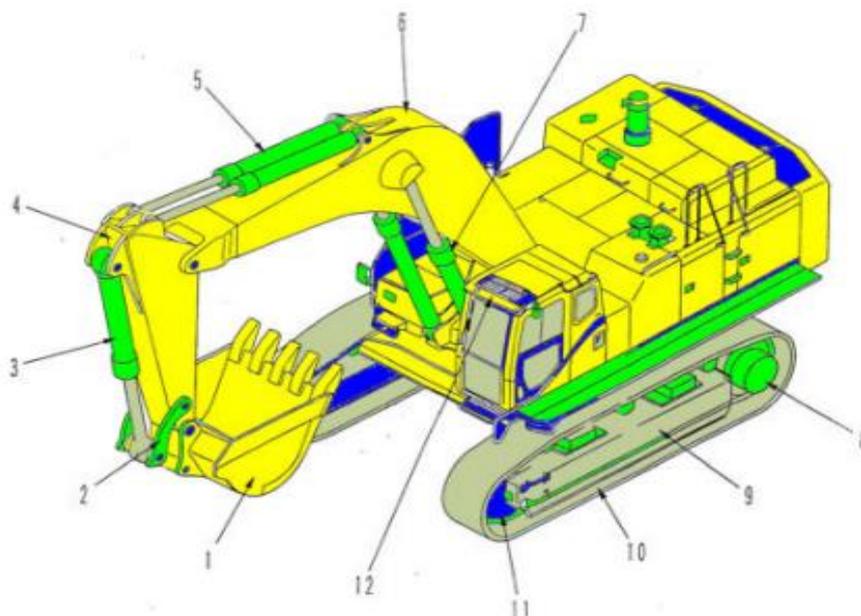
Tabel 1 Efisiensi kerja alat

Nilai Efisiensi Kerja (%)	Kondisi Operasi Alat
0,95	Sangat baik
0,85	Baik
0,75	Sedang
0,65	Cukup
0,55	Buruk

Sumber: Sarkhel *and* Dey (2015)

### 2.4.3 Alat Gali-Muat dan Alat Angkut

Informasi mengenai tujuan produksi dan *output* alat berat per unit akan menentukan jumlah alat yang dibutuhkan berdasarkan kapasitas, jenis bahan yang akan diproses, tingkat kenyamanan operasi dan pemeliharaan. Salah satu alat berat yaitu *excavator*. *Hydraulic excavator* merupakan alat yang dapat digunakan untuk menggali tanah, membuat parit, memuat material ke *dump truck* dan pemindahan tanah (Siswanto, 2008). Bagian-bagian *excavator* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Bagian-bagian *excavator* (Siswanto, 2008)

Keterangan Gambar 5:

- |                           |                                      |
|---------------------------|--------------------------------------|
| 1. <i>Bucket</i>          | 7. <i>Boom cylinder</i>              |
| 2. <i>Bucket link</i>     | 8. <i>Sprocket</i>                   |
| 3. <i>Bucket cylinder</i> | 9. <i>Track frame</i>                |
| 4. <i>Arm</i>             | 10. <i>Track shoes</i>               |
| 5. <i>Arm cylinder</i>    | 11. <i>Idler</i>                     |
| 6. <i>Boom</i>            | 12. <i>Operator Protection Guard</i> |

Kapasitas produksi *excavator* dihitung dengan menggunakan Persamaan 8 (Prasmono dan Hasibuan, 2018):

$$P = \frac{60}{C_{tm}} \times C_b \times F_f \times E_k \times S_f \quad (8)$$

Keterangan:

- P = Produksi alat muat (BCM/jam)  
 C<sub>tm</sub> = Waktu siklus alat muat (menit)  
 C<sub>b</sub> = Kapasitas *bucket* (m<sup>3</sup>)  
 F<sub>f</sub> = *Bucket fill factor* (%)  
 E<sub>k</sub> = Efisiensi kerja (%)  
 S<sub>f</sub> = *Swell factor*

*Excavator* adalah alat yang digunakan dalam pekerjaan penggalian dan penimbunan. *Excavator* dilengkapi dengan lengan hidrolik dan kabel pada lengan yang menggerakkan *bucket* sehingga material dapat diangkat, dikeruk, dan diletakkan. Produksi alat muat dipengaruhi jenis material yang dimuatnya. Faktor pengisian *bucket* dapat dilihat pada Tabel 2 (Cahyono dkk., 2022).

Tabel 2 Faktor *bucket*

Material	Faktor Pengisian
Pasir dan kerikil	0,9 – 1
Tanah biasa	0,8 – 0,9
Tanah liat keras	0,65 – 0,75
Tanah liat basah	0,50 – 0,60
Batu pecahan baik	0,60 – 0,75
Batu pecahan kurang baik	0,40 -0,50

Sumber: Cahyono dkk. (2022)

Material yang telah digali dan dimuat oleh *excavator* akan diangkut menggunakan *dump truck* (Siswanto, 2008). Kemampuan produksi *dump truck* dihitung dengan menggunakan Persamaan 9 (Prasmono dan Hasibuan, 2018):

$$P = \frac{60}{CT_{DT}} \times n \times Cb \times Fb \times N \times Ek \times Sf \quad (9)$$

Keterangan:

P	= Produksi <i>dump truck</i> (BCM/jam)
CT <sub>DT</sub>	= Waktu siklus <i>dump truck</i> (menit)
Cb	= Kapasitas <i>bucket</i> (m <sup>3</sup> )
n	= Banyaknya <i>passing</i>
Fb	= <i>Bucket fill factor</i> (%)
Ek	= Efisiensi kerja (%)
N	= Jumlah <i>dump truck</i> (unit)
Sf	= <i>Swell factor</i>

Rumus untuk menghitung *swell factor* (SF) antara lain (Prasmono dan Hasibuan, 2018):

1. Rumus *swell factor* berdasarkan volume:

$$SF = \frac{Bank\ Volume}{Loose\ Volume} \quad (10)$$

2. Rumus *swell factor* berdasarkan densitas:

$$SF = \frac{Loose\ Density}{Bank\ Density} \quad (11)$$

## 2.5 Pemrograman linear

Optimasi adalah proses meminimalkan biaya untuk mendapatkan keuntungan semaksimal mungkin dari suatu masalah. Optimasi produksi diperlukan oleh perusahaan untuk mengoptimalkan sumber daya yang digunakan agar suatu produksi dapat menghasilkan produk dalam jumlah dan kualitas yang diharapkan sehingga perusahaan dapat mencapai tujuannya. Optimasi tersebut diharapkan dapat membantu perusahaan memaksimalkan penjualan untuk mendapatkan keuntungan yang lebih baik. Optimasi dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu maksimalisasi dan minimalisasi. Maksimalisasi adalah optimasi produk dengan menggunakan atau mengalokasikan *input* tertentu untuk mendapatkan

keuntungan maksimal, sedangkan minimalisasi adalah optimasi produksi untuk menghasilkan tingkat *output* tertentu dengan menggunakan *input* atau biaya minimum. Salah satu pendekatan optimal yang dapat digunakan dalam memperoleh solusi optimal dan menyelesaikan suatu masalah adalah pemrograman linear (Nurhajizah *et.al*, 2022).

Pemrograman linear merupakan salah satu metode yang efektif dan banyak digunakan dalam kasus optimasi berupa teknik matematis dalam menentukan alokasi sumber daya yang terbaik dari sumber daya perusahaan yang terbatas untuk mencapai tujuan yang optimal yang mencakup faktor produksi mesin, tenaga kerja bahan baku dan modal teknologi yang tersedia. Masalah yang ingin diselesaikan akan diformulasikan ke dalam bentuk rumusan matematika. Selain itu, metode pemrograman linear merupakan teknik optimasi yang bertujuan mencapai efisiensi dalam perencanaan produksi (Adriantantri *and* Indriani, 2021). Pemrograman linear sebagai salah satu pendekatan matematika yang dapat digunakan dalam keputusan manajerial. Penggunaan metode pemrograman linear juga bertujuan dalam pengambilan keputusan optimal untuk mencapai keuntungan (maksimum) dan meminimalkan biaya. Selain itu, juga untuk mengalokasikan sumber daya untuk mencapai alternatif yang dapat diambil. Penerapan pemrograman linear harus memperhatikan kondisi-kondisi tertentu antara lain (Muslich, 2010):

1. Harus terdapat sumber daya yang terbatas (tenaga kerja, peralatan, keuangan dan bahan).
2. Terdapat fungsi tujuan (memaksimalkan laba atau meminimalkan biaya).
3. Harus terdapat linearitas, misalnya jika terdapat sebuah barang membutuhkan lima jam untuk produksinya maka dua barang membutuhkan waktu produksi selama sepuluh jam.
4. Harus terdapat keseragaman, misalnya barang-barang yang diproduksi oleh suatu mesin adalah identik atau jam kerjanya sama produktifnya.

Karakteristik-karakteristik yang biasa digunakan dalam persoalan pemrograman linear sebagai berikut (Adinda dan Yulhendra, 2020):

1. Persoalan pemrograman linear bertujuan untuk memaksimalkan atau meminimalkan kuantitas (pada umumnya berupa laba atau biaya). Karakteristik ini disebut sebagai fungsi tujuan (*objective function*) dari suatu persoalan pemrograman linear. Tujuan utama suatu perusahaan pada umumnya untuk memaksimalkan keuntungan jangka panjang.
2. Adanya batasan (*constraints*) atau kendala yang membatasi tingkat sampai dimana sasaran dicapai untuk memaksimalkan atau meminimalkan suatu kuantitas (fungsi tujuan) bergantung kepada sumber daya yang jumlahnya terbatas.
3. Harus ada beberapa alternatif tindakan yang dapat diambil. Sebagai contoh, jika suatu perusahaan menghasilkan tiga produk yang berbeda, manajemen dapat menggunakan pemrograman linear untuk memutuskan bagaimana cara mengalokasikan sumber dayanya yang terbatas (tenaga kerja, mesin dan lainnya).
4. Tujuan dan batasan dalam permasalahan pemrograman linear harus dinyatakan dalam hubungan dengan pertidaksamaan atau persamaan linear.

Pemrograman linear diperlukan nilai-nilai peubah atau variabel  $X_1, X_2, \dots, X_n$  yang memaksimumkan atau meminimumkan seperti pada formula-formula berikut (Nehring *et. al*, 2010):

$$Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n \quad (12)$$

dengan fungsi:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n (\leq, =, \geq) b_1 \quad (13)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n (\leq, =, \geq) b_2 \quad (14)$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n (\leq, =, \geq) b_m \quad (15)$$

disertai dengan fungsi kendala *non-negatif*:  $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$

Berdasarkan Persamaan 12, 13, 14 dan 15, Z sebagai nilai fungsi tujuan yang dapat berupa maksimalisasi keuntungan ataupun minimalisasi biaya,  $x_n$  adalah variabel keputusan yang nilainya ditentukan oleh model, sedangkan  $a_{mn}$  dan  $c_n$  merupakan konstanta yang nilainya ditentukan oleh sifat masalah dan  $b_m$  adalah nilai konstanta ruas kanan (Nehring *et. al*, 2010). Ada beberapa metode

untuk menyelesaikan permasalahan pemrograman linear diantaranya adalah metode grafik dan metode simpleks (Nurhajizah *et.al*, 2022).

### 2.5.1 Metode grafik

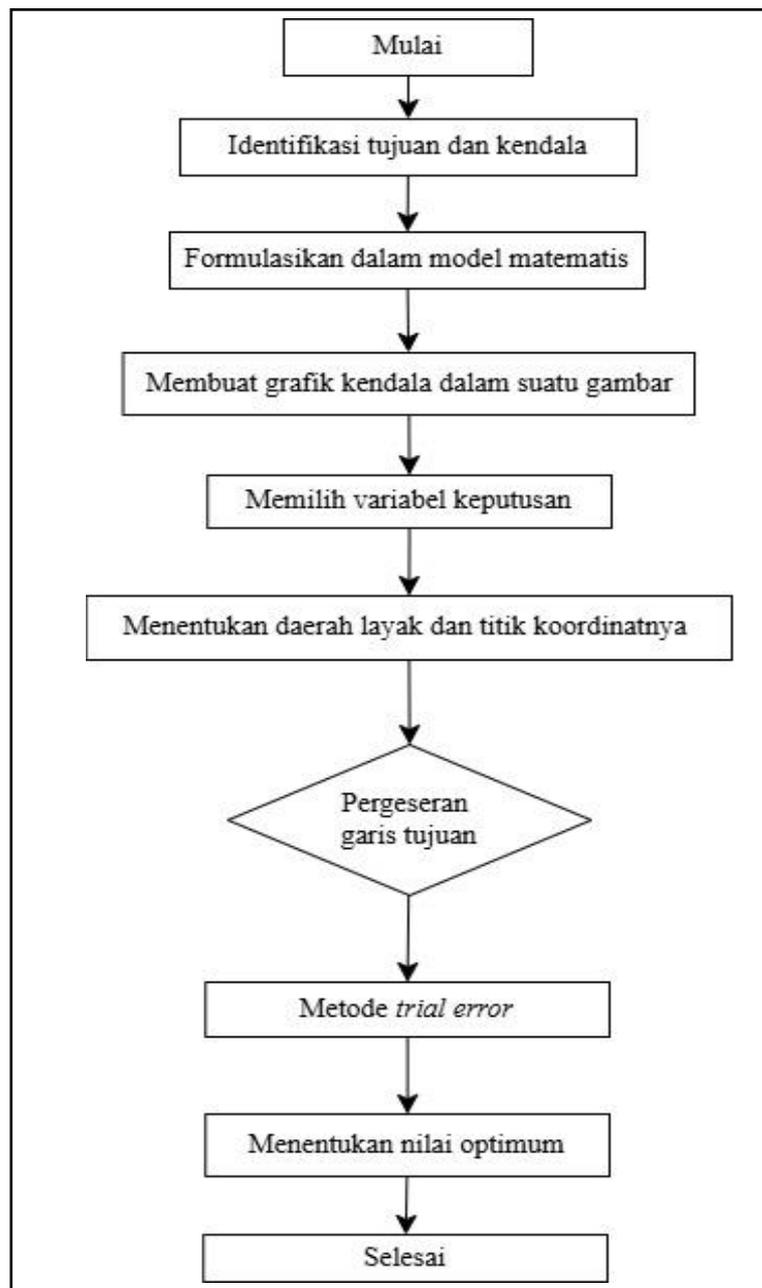
Metode grafik merupakan metode yang hanya dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang variabel keputusannya sama dengan dua. Permasalahan linier tidak selalu sederhana karena melibatkan banyak batasan dan banyak variabel, sehingga tidak mungkin diselesaikan dengan metode grafik (Nurhajizah *et.al*, 2022). Penggunaan metode grafik yang terbatas yaitu hanya untuk dua variabel keputusan, jika terdapat lebih dari dua variabel keputusan maka metode grafik tidak dapat digunakan tetapi dapat diselesaikan dengan metode simpleks. Metode grafik sesuai dengan namanya yaitu menggunakan grafik untuk penentuan keputusan. Seluruh fungsi kendala digambarkan dalam bentuk grafik kemudian keputusan diambil melalui perhitungan dari fungsi yang digambarkan dalam grafik tersebut (Maswarni dkk., 2019).

Terdapat tujuh langkah dalam penggunaan pemrograman linear dengan metode grafik, antara lain (Maswarni dkk., 2019):

1. Identifikasi variabel keputusan dan nyatakan dalam persamaan matematika.
2. Identifikasi tujuan yang ingin dicapai dan batasan yang digunakan.
3. Menyusun fungsi tujuan dan kendala dalam fungsi model matematika. Buat diagram untuk kendala-kendala di suatu bagian. Pembuatan grafik berupa pertidaksamaan ( $\leq$  dan  $\geq$ ), diubah ke bentuk persamaan ( $=$ ).
4. Tentukan daerah layak (*feasible area*) pada grafik tersebut. Wilayah layak dilihat dari fungsi kendala, apabila kendalanya berbentuk  $\leq$  maka daerah yang diarsir atau layak terdapat di sebelah kiri/bawah/kiri bawah. Jika pertidaksamaannya  $\geq$  maka daerah yang diarsir terdapat di sebelah kanan/atas/kanan atas, sedangkan apabila bentuk persamaannya sama dengan ( $=$ ) maka daerah layaknya berada di sepanjang grafik atau garis.
5. Identifikasi titik-titik variabel keputusan pada area tersebut.
6. Pilih variabel keputusan dari titik ini. Pemilihan variabel keputusan dapat menggunakan dua metode sebagai berikut:
  - a. Memindahkan garis tujuan, yang meliputi pembuatan nilai sasaran apapun ( $Z$ ) dan membuat garis tujuan dari nilai tersebut, kemudian

menggesernya. Permasalahan maksimasi pergeseran dilakukan dengan memilih titik terjauh dari titik asal, sedangkan untuk permasalahan minimisasi dipilih titik terdekat dari titik asal.

- b. Metode *trial error*, yaitu menghitung seluruh titik variabel keputusan pada wilayah layak atau diarsir, kemudian memilih hasil yang optimal (untuk memaksimalkan pilih hasil tertinggi, sedangkan untuk meminimalkan pilih hasil terendah). Proses metode grafik dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Diagram alir metode grafik (Maswarni dkk., 2019)

## 2.5.2 Metode simpleks

Metode simpleks dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang terdapat dua atau lebih variabel keputusan. Metode simpleks merupakan suatu teknik penyelesaian pemrograman linear yang bersifat iteratif. Metode simpleks menggunakan iterasi dimana langkah perhitungan yang sama diulangi hingga diperoleh solusi optimal. Setiap tahapan penyelesaian menghasilkan nilai fungsi tujuan yang selalu lebih optimal atau sama dengan tahapan penyelesaian sebelumnya. Metode simpleks sangat efisien dan sistematis, dilengkapi dengan kriteria pengujian yang dapat mengetahui kapan perhitungan harus dilanjutkan atau dihentikan hingga diperoleh solusi optimum. Penggunaan metode simpleks, permasalahan pemrograman linear selalu diubah menjadi permasalahan pemrograman linear standar, dimana setiap pertidaksamaan pembatas dinyatakan dalam bentuk persamaan pembatas dengan menjumlahkan variabel *slack* atau surplus (Nurhajizah *et.al*, 2022).

Pemrograman linear digunakan untuk mencari keuntungan maksimum atau biaya minimum. Tujuan utamanya yaitu untuk membuat pemodelan matematika untuk memaksimalkan keuntungan proyek dengan anggaran terbatas dengan menggunakan metode simpleks. Pemrograman linear ini dapat membantu untuk mendapatkan informasi sejauh mana pekerjaan dapat diselesaikan sesuai anggaran yang tersedia. Artinya, dapat digunakan dalam mengatur apa yang sebenarnya diinginkan dan juga dapat membantu rencana tentang apa yang harus dilakukan selanjutnya. Beberapa elemen dari pemrograman linear antara lain (Aadharshana *and* Mol, 2020):

1. Variabel
2. Fungsi tujuan
3. Fungsi kendala (*constraint*)

Terdapat ketentuan-ketentuan dalam pemecahan masalah dengan menggunakan pemrograman linear dengan metode simpleks, antara lain (Nurhajizah *et.al*, 2022):

1. Semua batasan pertidaksamaan harus dinyatakan sebagai persamaan.
2. Sisi kanan (*the right side*) dari sebuah batasan harus positif, apabila ada yang negatif harus dikalikan satu.

3. Nilai kanan (NK/RHS/*the right side*) fungsi tujuan harus bernilai 0 (nol).
4. Semua variabel yang digunakan harus dibatasi dengan kendala nilai *non-negatif*.

Langkah-langkah perhitungan dalam metode simpleks terdiri dari (Aadharshana dan Mol, 2020):

1. Menentukan solusi awal (*initial basic feasible solution*) yang sesuai dengan bentuk baku dan selanjutnya membuat tabel simpleks (*the initial iteration* tabel).
2. Menentukan variabel yang masuk (*entering variabel*) yang merupakan variabel *non-dasar* yang mempunyai nilai  $C_j - Z_j$  paling besar (maksimum) dan paling negatif (minimum) yang akan menjadi kolom kunci atau kolom pivot.
3. Menentukan variabel yang keluar (*leaving variabel*) atau disebut juga dengan baris pivot atau baris kunci dengan cara menghitung rasio antara kolom solusi dengan kolom variabel masuk (kolom kunci) dengan memilih rasio paling kecil yang akan dijadikan sebagai variabel keluar atau baris kunci. Nilai yang terdapat pada perpotongan antara baris kunci dan kolom kunci disebut elemen pivot atau angka kunci.
4. Menentukan nilai baru setiap baris.
  - a. Untuk baris pivot ditentukan dengan Persamaan 16:

$$\text{Nilai pivot baru} = \frac{\text{Nilai pivot lama}}{\text{Elemen pivot}} \quad (16)$$

- b. Untuk baris lainnya ditentukan dengan Persamaan 17:

$$\text{Nilai baru} = \text{Nilai lama} - (\text{nilai kolom pivot yang sesuai baris} \times \text{Nilai baris pivot baru}) \quad (17)$$

5. Melakukan iterasi hingga mencapai optimal, dimana semua nilai  $C_j - Z_j$  bernilai positif atau nol untuk meminimumkan dan bernilai negatif atau semuanya bernilai negatif atau nol untuk memaksimumkan.

Selain langkah-langkah pemecahan masalah dengan pemrograman linear metode simpleks di atas, berikut ini perhitungan metode simpleks yang lebih rinci sebagai berikut (Maswarni dkk., 2019):

1. Mengidentifikasi fungsi tujuan, fungsi kendala dan variabel keputusan.

2. Memformulasikan dan membentuk model matematis dari fungsi kendala dan fungsi tujuan pemrograman linear.
3. Membuat tabel simpleks awal seperti pada Tabel 3.

Tabel 3 Pemodelan tabel simpleks awal

Variabel Dasar	Tujuan	C <sub>j</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	...	C <sub>n</sub>	0	0	...	0
		X <sub>j</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	...	X <sub>n</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	...	S <sub>m</sub>
S <sub>1</sub>	0	b <sub>i</sub>	a <sub>11</sub>	a <sub>12</sub>	...	a <sub>1n</sub>	1	0	...	0
S <sub>2</sub>	0	b <sub>2</sub>	a <sub>21</sub>	a <sub>22</sub>	...	a <sub>2n</sub>	0	1	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
S <sub>m</sub>	0	b <sub>m</sub>	a <sub>m1</sub>	a <sub>m2</sub>	...	a <sub>mn</sub>	0	0	...	1
	Z <sub>i</sub>	0	0	0	...	0	0	0	...	0
		C <sub>i</sub> - Z <sub>i</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	...	C <sub>n</sub>	0	0	...	0

4. Menentukan kolom kunci atau kolom pivot di antara variabel kolom yang ada dengan cara mengambil kolom yang memiliki nilai  $(C_j - Z_j) \geq 0$  terbesar untuk fungsi tujuan maksimasi dan atau memiliki nilai  $(C_j - Z_j) \leq$  terkecil untuk fungsi tujuan minimasi.
5. Menentukan baris kunci atau baris pivot di antara baris yang ada dengan cara mengambil nilai baris yang memiliki rasio kuantitas dengan kolom kunci yang nilainya positif terkecil.

$$\text{Rasio kuantitas ke-}i = \frac{b_i}{\text{Unsur kolom kunci positif}} \quad (18)$$

6. Menentukan angka kunci yang merupakan angka perpotongan antara baris kunci dan kolom kunci. Selanjutnya, membuat tabel berikutnya dengan cara mengganti variabel basis dengan variabel masuk (*entering variabel*) dan mengeluarkan variabel *non*-basis (*leaving variabel*) dari kolom tersebut, serta melakukan penggantian baris-baris variabel dengan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Baris kunci baru} = \frac{\text{Semua nilai baris kunci lama}}{\text{Angka kunci}} \quad (19)$$

$$\text{Baris baru baris lainnya} = \text{Baris lama} - (\text{rasio kunci} \times \text{baris kunci lama}) \quad (20)$$

$$\text{Rasio kunci} = \frac{\text{Unsur kolom kunci}}{\text{Angka kunci}} \quad (21)$$

7. Iterasi dihentikan jika proses perhitungan mencapai optimal yang ditandai dengan semua koefisien pada baris ( $C_j - Z_j$ ) sudah tidak ada lagi yang bernilai positif untuk kasus maksimasi dan atau tidak ada yang bernilai negatif untuk kasus minimasi. Jika belum mencapai optimal maka iterasi akan dilanjutkan dan mengulangi proses perhitungan pada tahap ke-3 sampai iterasi mencapai syarat optimal tersebut.

### 2.5.3 Program *POM for windows*

Program *POM for Windows* adalah program komputer yang digunakan untuk menyelesaikan masalah produksi dan operasi yang bersifat kuantitatif. Tampilan grafis yang menarik dan kemudahan penggunaan menjadikan *POM for Windows* sebagai salah satu alternatif aplikasi pengambilan solusi optimal. Langkah-langkah menggunakan aplikasi *POM for Windows* adalah sebagai berikut (Hardi dan Octovia, 2020):

1. Siapkan rumus masalahnya, misalnya jika ingin menyelesaikan masalah pemrograman linear, langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:
  - a. Tentukan apakah masalahnya merupakan kasus maksimum atau minimum.
  - b. Berapa banyak variabel yang ada.
  - c. Berapa banyak batasan yang ada.
2. Masukkan permasalahan ke dalam program.
3. Periksa masalah jika terjadi kesalahan *input*.
4. Lakukan perhitungan dan lihat hasilnya dengan klik *SOLVE*.
5. Hasil-hasil perhitungan ditampilkan dan simpan hasilnya.

### 2.5.4 Analisis sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan setelah solusi optimal dari suatu model pemrograman linear telah didapatkan. Tujuan melakukan analisis sensitivitas adalah untuk menentukan bagaimana perubahan model mempengaruhi solusi optimal. Data yang digunakan adalah data yang ada pada saat pembuatan model dan dapat berubah karena pemrograman linear membantu merencanakan suatu

kegiatan yang telah dibuat. Artinya data yang digunakan dapat mengalami perubahan (Maddeppungeng dkk., 2017).

Analisis sensitivitas diperlukan untuk menganalisis dampak dari perubahan nilai parameter yang meliputi nilai variabel dan kendala pada linear programming. Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui seberapa peka solusi optimal terhadap perubahan pada variabel basis. Hasil pengolahan data menggunakan bantuan *software POM for Windows* terdapat batas-batas perubahan koefisien nilai sisi kanan (RHS) pada masing-masing kendala yang tidak mempengaruhi solusi optimal (Liutari, 2022).