

BAB IV

PENGEMBANGAN MODEL

Pada bab ini menjelaskan proses pengolahan data dan langkah-langkah pengembangan model. Data yang digunakan dalam penyelesaian masalah adalah data kuantitas material produk selama periode proyek tambang, spesifikasi truk dan *shovel*, serta waktu siklus truk dan *shovel*.

4.1 DESKRIPSI SISTEM

Pada penelitian ini, tahapan pertama model mengacu pada penelitian Sadjad M., Reza K., M. Ataei, dan Eshagh P. (2017) mengenai penentuan *cut-off grade* mineral tambang yang bertujuan memaksimalkan profit dan NPV. Jenis material yang ditambang dalam model Sadjad M., Reza K., M. Ataei, dan Eshagh P. (2017) adalah *single metal-multi product*, dimana produk akhir yang akan dijual adalah konsentrat, *pellet*, dan produk *sizing*. Dalam menghitung profit, biaya yang diperhitungkan adalah pendapatan penjualan tiga tipe produk, serta biaya produksi yang dikeluarkan selama periode proyek tambang.

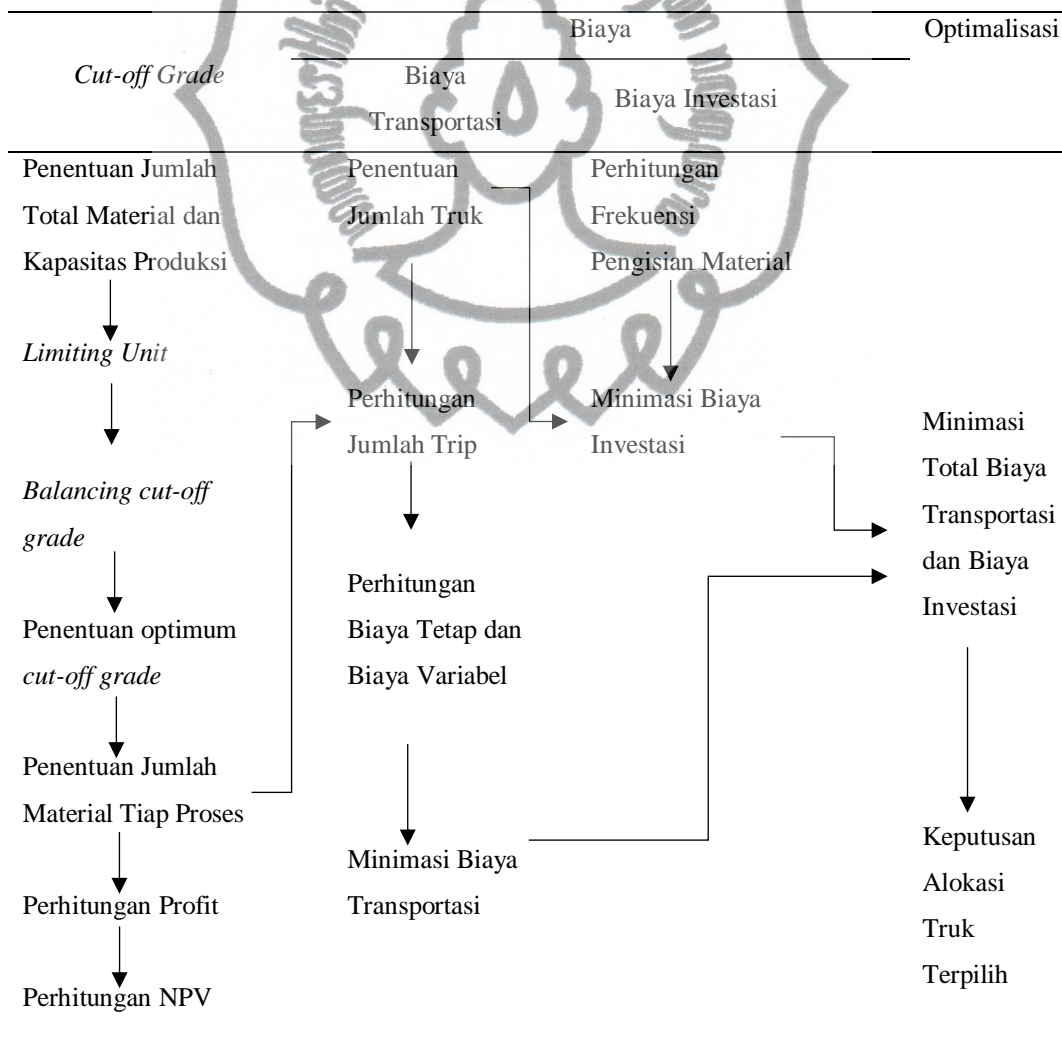
Pada penelitian ini mengembangkan model penentuan *cut-off grade* dengan menggunakan Algoritma Lane, yang nantinya akan digunakan sebagai input dalam perhitungan alokasi truk optimal. Perhitungan *cut-off grade* dalam model Lane mempertimbangkan nilai ekonomis logam dan kapasitas produksi material di berbagai proses untuk menghasilkan produk jadi. Dalam proses pengolahan hasil tambang, Lane mengkaitkan konsep *Net Present Value* untuk mengembangkan metode penentuan *cut-off grade* dengan memaksimalkan *Present Value* dari hasil tambang.

Setelah mendapatkan *cut-off grade*, kuantitas material dari masing-masing proses tambang akan menjadi input dalam model alokasi truk dalam menentukan tipe truk terpilih untuk mengangkut hasil proses tambang dengan mempertimbangkan biaya transportasi dan biaya investasi. Pengembangan model ini mengacu pada penelitian Felix T.S. Chan, Aditya Jha, dan Manoj K.T. (2015) mengenai penentuan tipe truk terpilih dalam distribusi rantai pasok dengan mempertimbangkan biaya produksi, biaya transportasi, biaya inventory, dan biaya risiko penalty. Selanjutnya model mengacu pada penelitian Chung H. Ta, Armann

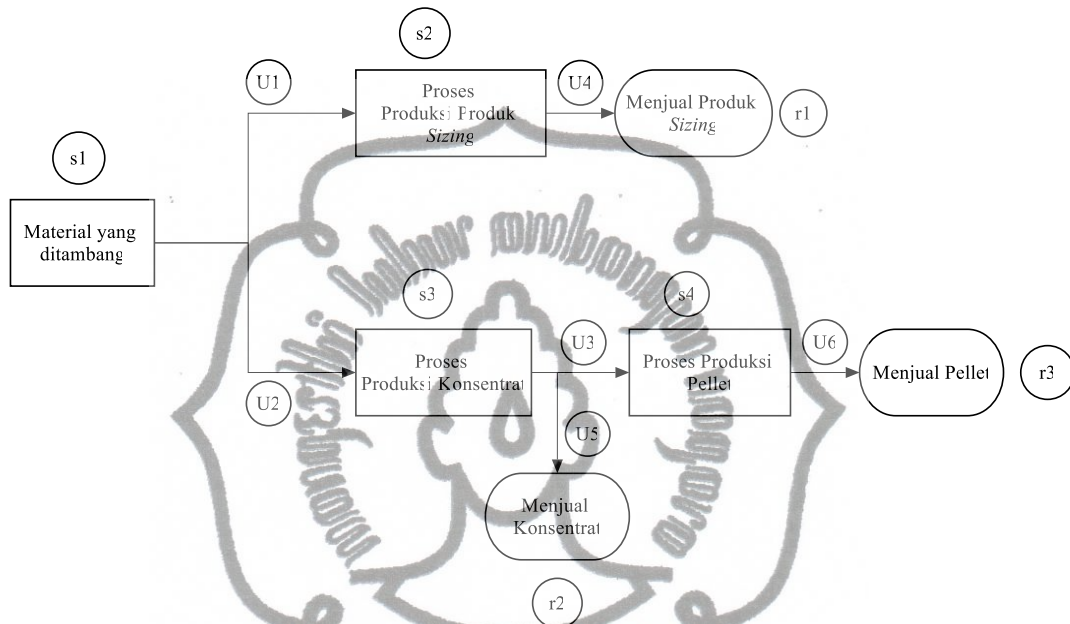
Ingolfsson, dan John Doucette (2013) tentang alokasi truk untuk meminimalkan jumlah truk di pertambangan dengan penggunaan *shovel* dan variasi tipe truk. Namun dalam model Chung H. Ta, Armann Ingolfsson, dan John Doucette (2013) tidak mempertimbangkan biaya transportasi, maupun biaya investasi. Selain itu, penelitian ini mengacu pada model Bajany D.M., Xia X., dan Zhang L. (2017) yang mengembangkan model pemilihan rute transportasi hasil tambang untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar truk maupun *shovel*. Model ini menjadi acuan dalam perhitungan biaya transportasi pada model usulan untuk menentukan besarnya konsumsi bahan bakar truk dan *shovel*.

Dalam pengembangan model optimasi ini, setiap langkah pengerjaan dan input dari suatu proses digambarkan pada kerangka kerja Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Kerangka Kerja Pengembangan Model



Pada penelitian ini dikembangkan model optimasi dua tahap yang dapat digunakan untuk menentukan *cut-off grade* dan alokasi truk optimal pada pertambangan terbuka dengan mempertimbangkan biaya investasi dan transportasi. Tujuan penelitian ini adalah untuk meminimalkan total biaya yang dikeluarkan perusahaan untuk pengangkutan hasil tambang selama periode proyek berlangsung. Diagram produksi dan rute transportasi dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Proses Operasi Pertambangan (Diadaptasi dari Sadjad et al. (2017))

Berdasarkan diagram produksi dan transportasi pada Gambar 4.1, material yang telah ditambang akan diproduksi dalam tiga tipe produk yaitu konsentrat, *pellet*, dan produk *sizing*. Material yang telah ditambang yang ditunjukkan oleh simbol (s_1) kemudian akan dikirim ke dua lokasi proses produksi, yaitu lokasi proses produksi konsentrat (s_3) dan lokasi proses produksi produk *sizing* (s_2). Bagian dari mineral bijih yang telah ditambang, sebanyak α persen akan dikirim ke lokasi proses produksi konsentrat, kemudian sebanyak $(1 - \alpha)$ persen akan dikirim ke lokasi proses produksi produk *sizing*. Kapasitas maksimum penghasil konsentrat adalah 12.000.000 ton, sedangkan kapasitas maksimum penghasil produk *sizing* adalah 1.000.000 ton. Hasil dari proses produksi produk *sizing* akan dijual dan dikirim ke lokasi permintaan produk *sizing* (r_1).

Di sisi lain, hasil dari proses produksi konsentrat sebagian konsentrat sebanyak β persen akan dikirim ke lokasi proses produksi *pellet* (s_4), kemudian sebanyak $(1 - \beta)$ persen akan dijual dan dikirim ke lokasi permintaan konsentrat (r_2).

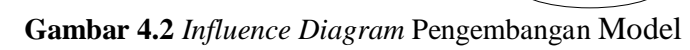
Kapasitas maksimum dari penghasil *pellet* adalah 4.200.000 ton, dan hasil dari proses produksi *pellet* akan dijual dan dikirim ke lokasi permintaan *pellet* (r_3).

Demikian, material yang telah ditambang maupun produk akhir dari setiap proses produksi akan ditransportasikan ke lokasi tujuan sesuai rute pada diagram produksi. Rute dalam alur transportasi ditunjukkan dengan simbol (U). Dimana (U_1) merupakan rute transportasi mineral bijih ke lokasi proses produksi produk *sizing*, (U_2) merupakan rute transportasi mineral bijih ke lokasi proses produksi konsentrat, (U_3) merupakan rute transportasi konsentrat ke lokasi proses produksi *pellet*, (U_4) merupakan rute transportasi produk *sizing* ke lokasi permintaan, (U_5) merupakan rute transportasi konsentrat ke lokasi permintaan, dan (U_6) merupakan rute transportasi *pellet* ke lokasi permintaan.

Produk hasil proses pertambangan akan diangkut menggunakan truk tipe tertentu, sehingga perusahaan mengeluarkan biaya transportasi. Besarnya biaya transportasi dipengaruhi oleh tipe truk dari masing-masing produsen sesuai dengan spesifikasi truk. Spesifikasi yang paling penting adalah ukuran muatan atau kapasitas dari masing-masing truk. Dalam memilih tipe truk yang akan digunakan oleh perusahaan dan jumlah masing-masing truk untuk mengangkut produk hasil tambang, perusahaan harus mengeluarkan biaya investasi truk yang dipilih untuk proyek pertambangan.

4.2 INFLUENCE DIAGRAM

Influence diagram menggambarkan hubungan struktural dari komponen model yang terdiri atas *influence diagram cut-off grade* dan *influence diagram* total biaya transportasi dan biaya investasi. *Influence diagram* ditampilkan pada Gambar 4.2.



4.3 KOMPONEN MODEL

Pada subbab ini dijabarkan komponen model dalam bentuk notasi yang terdiri dari variable keputusan, parameter, dan fungsi tujuan. Notasi-notasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

- s_1 : lokasi material yang ditambang
- s_2 : lokasi proses produksi produk *sizing*
- s_3 : lokasi proses produksi konsentrat
- s_4 : lokasi proses produksi *pellet*
- r_1 : lokasi permintaan produk *sizing*
- r_2 : lokasi permintaan konsentrat
- r_3 : lokasi permintaan *pellet*
- 1. Variabel Keputusan
 - $X_{j,k,l}^t$: tipe truk terpilih untuk transportasi
- 2. Fungsi Tujuan
 - BT_{total} : total biaya transportasi
 - BI_{total} : total biaya investasi
- 3. Parameter
 - a. *Cut-off Grade*
 - Q_m : material yang ditambang (ton)
 - Q_c : bijih yang telah diproses (ton)
 - Q_{con} : konsentrat yang telah diproduksi (ton)
 - Q_p : *pellet* yang telah diproduksi (ton)
 - Q_{gr} : produk *sizing* yang telah diproduksi (ton)
 - M : kapasitas penambangan (ton/tahun)
 - C : kapasitas produksi konsentrat (ton/tahun)
 - P : kapasitas produksi *pellet* (ton/tahun)
 - G : kapasitas produksi produk *sizing* (ton/tahun)
 - α : bagian dari bijih yang dikirim ke lokasi produksi konsentrat
 - β : bagian dari konsentrat yang dikirim ke lokasi produksi *pellet*
 - P_p : harga jual *pellet* (Rp/ton)
 - P_c : harga jual konsentrat (Rp/ton)
 - P_{gr} : harga jual produk *sizing* (Rp/ton)

- C_m : biaya proses tambang (Rp/ton)
 C_{con} : biaya proses produksi konsentrat (Rp/ton)
 C_p : biaya proses produksi *pellet* (Rp/ton)
 C_{gr} : biaya proses produksi produk *sizing* (Rp/ton)
 f : biaya tetap (Rp/tahun)
 P : biaya produksi (Rp)
 R : pendapatan penjualan (Rp)
 T : periode produksi (tahun)
 n : umur tambang (tahun)
 \bar{g} : *grade* rata-rata (%)
 y_c : proses pemulihan (%)
 d : tingkat diskonto (%)

b. Alokasi Truk

- Q : tipe produk yang terindex oleh $q \in Q$
 S : lokasi proses tambang yang terindex oleh $s \in S$
 R : lokasi permintaan yang terindex oleh $r \in R$
 J : tipe truk yang terindex oleh $j \in J$
 I : *shovel* yang terindex oleh $i \in I$
 T : periode waktu tambang yang terindex oleh $t \in T$
 E : fungsi relasi antara k dan l , $E = \{(s_1, s_2), (s_1, s_3), (s_2, r_1), (s_3, s_4), (s_3, r_2), (s_4, r_3)\}$
 $t_{k,l}^j$: waktu transportasi truk j dari k ke l , $\forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ dan $l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$ (jam)
 $t_{l,k}^j$: waktu transportasi truk j dari l ke k , $\forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ dan $l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$ (jam)
 $t_{k,i}^j$: waktu pemuatan oleh *shovel* i ke truk j di lokasi k , $\forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ (jam)
 t_l^j : waktu pembuangan oleh truk j di lokasi l , $l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$ (jam)
 CT_j : waktu siklus truk j (jam)
 CT_i : waktu siklus *shovel* i (jam)

- n : frekuensi pengisian dari *shovel* i ke truk j
 c_j : kapasitas muat truk j (ton)
 c_i : kapasitas muat *shovel* i (ton)
 $c_{i,h}$: kapasitas muat *shovel* i tiap jam (ton/jam)
 $v_{l,k}^j$: kecepatan transportasi truk bermuatan kosong (km/jam)
 $v_{k,l}^j$: kecepatan transportasi truk bermuatan (km/jam)
 y_j^t : jumlah perjalanan yang dilakukan oleh setiap truk j pada periode t
 f^j : konsumsi bahan bakar truk j (liter/jam)
 P^j : daya mesin truk j (kW)
 P^i : daya mesin *shovel* i (kW)
 LF : *load factor*
 $F_{k,l}^j$: konsumsi bahan bakar truk j dalam satu waktu siklus (liter)
 $f_{k,l}^j$: konsumsi bahan bakar truk j saat terisi muatan dari k ke l ,
 $\forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ dan $l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$ (liter/jam)
 $f_{l,k}^j$: konsumsi bahan bakar truk j saat bermuatan kosong dari l ke k ,
 $\forall l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$ dan $k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ (liter/jam)
 f_{idle}^j : konsumsi bahan bakar truk j saat mesin menganggur di lokasi k
dan $l \forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ dan $l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$ (liter/jam)
 f^i : konsumsi bahan bakar *shovel* i di lokasi s (liter/jam)
 F_j : total konsumsi bahan bakar truk j selama periode waktu t (liter)
 F_i : total konsumsi bahan bakar *shovel* i selama periode waktu t (liter)
 sh : jam kerja selama periode waktu t (jam)
 $m_s^{q,t}$: jumlah produk q yang diangkut dari lokasi s dalam periode t (ton)
 W_j : kapasitas input truk j (ton)
 b_j : harga beli truk j (Rp)
 $e_{k,l}$: jarak antara lokasi k dengan l , $\forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$ dan
 $l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$ (km)
 fc : biaya tetap proses transportasi (Rp)
 vc : biaya variable proses transportasi (Rp)
 u : upah operator (Rp/bulan)

t_u : frekuensi upah operator selama periode t
 pf : harga bahan bakar (Rp/liter)
 $n_{k,l}^t$: jumlah truk terpilih untuk transportasi antara lokasi k dan l di periode t , $\forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$, $l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}$, dan $n \in \{1, 2, \dots, n_{k,l}^t\}$

4.4 FORMULASI MODEL

Pada subbab formulasi model ini terdiri dari dua tahapan, yaitu tahap penentuan optimum *cut-off grade* dan tahap penentuan alokasi truk. Model penentuan *cut-off grade* mengacu pada penelitian Sadjad, dkk (2017). Sedangkan model penentuan alokasi truk mengacu pada penelitian Felix, dkk (2015), Chung, dkk (2013), dan Bajany, dkk (2017).

1.4.1 Optimum Cut-off Grade

Penentuan *optimum cut-off grade* dilakukan untuk mendapatkan kuantitas material dari setiap proses tambang, dan mendapatkan nilai keuntungan serta NPV yang maksimum. Produk akhir dari proses pertambangan *single metal-multi product* ini yaitu berupa konsentrat, *pellet*, dan produk *sizing*.

Dalam menentukan profit, komponen biaya yang diperlukan yaitu pendapatan penjualan dan biaya produksi dari masing-masing produk (Sadjad M., Reza K., M. Ataei, dan Eshagh P., 2017). Persamaan dalam menentukan komponen pendapatan untuk menghitung profit, dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$R_p = P_p Q_p \quad (4.1)$$

$$R_{gr} = P_{gr} (1 - \alpha) Q_c \quad (4.2)$$

$$R_{con} = P_c (1 - \beta) Q_{con} \quad (4.3)$$

Persamaan dalam menentukan biaya yang dikeluarkan dari masing-masing proses dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$B_m = C_m Q_m \quad (4.4)$$

$$B_{con} = C_{con} \alpha Q_c \quad (4.5)$$

$$B_p = C_p Q_p \quad (4.6)$$

$$B_{gr} = C_{gr} (1 - \alpha) Q_c \quad (4.7)$$

$$B_f = fT \quad (4.8)$$

Dari persamaan biaya proses produksi dan pendapatan, formulasi model keuntungan (profit) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P = (R_p + R_{gr} + R_{con}) - (B_m + B_{con} + B_p + B_{gr} + B_f) \quad (4.9)$$

$$P = [P_p Q_p + P_{gr} (1 - \alpha) Q_c + P_c (1 - \beta) Q_{con}] - [C_m Q_m + C_{con} \alpha Q_c + C_p Q_p + C_{gr} (1 - \alpha) Q_c + fT] \quad (4.10)$$

Kuantitas dari hasil masing-masing proses tambang didapatkan dari kapasitas input, proses pemulihan, dan *grade* rata-rata. Kuantitas produk dari masing-masing proses yang dihasilkan dapat dimodelkan dengan persamaan berikut:

$$Q_{con} = \bar{g} \alpha y_c Q_c \quad (4.11)$$

$$Q_p = \bar{g} \beta y_c Q_{con} \quad (4.12)$$

$$Q_{gr} = \bar{g} (1 - \alpha) y_c Q_c \quad (4.13)$$

Dari persamaan (4.11), formulasi keuntungan dapat disederhanakan menjadi persamaan (4.14) berikut:

$$P = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - C_m Q_m - fT \quad (4.14)$$

Seperti apa yang telah dijelaskan pada subbab deskripsi sistem, bagian dari mineral bijih yang telah ditambang sebanyak α persen akan dikirim ke lokasi proses produksi konsentrat, kemudian sebanyak $(1 - \alpha)$ persen akan dikirim ke lokasi proses produksi produk *sizing*. Sedangkan hasil dari proses produksi konsentrat sebagian konsentrat sebanyak β persen akan dikirim ke lokasi proses produksi *pellet*, kemudian sebanyak $(1 - \beta)$ persen akan dijual dan dikirim ke lokasi permintaan konsentrat. Maka persamaan untuk menentukan nilai α dan β yang dimodelkan oleh Sadjad M., Reza K., M. Ataei, dan Eshagh P. (2017) adalah sebagai berikut:

$$\alpha \begin{cases} \alpha = \frac{12.000.000}{Q_c}, \text{ jika } 0 < Q_c - 12.000.000 \leq 1.000.000 \\ \alpha = 1, \text{ jika sebaliknya} \end{cases} \quad (4.15)$$

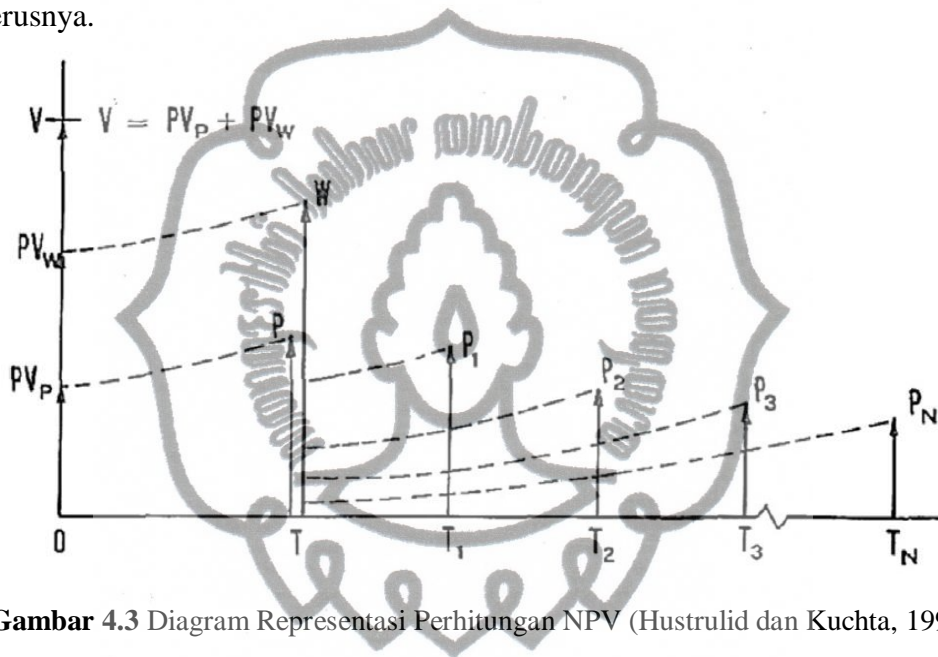
$$\beta \begin{cases} \beta = \frac{4.200.000}{Q_{con}}, \text{ jika } Q_{con} > 4.200.000 \\ \beta = 1, \text{ jika sebaliknya} \end{cases} \quad (4.16)$$

Telah ditetapkan dalam penelitian Sadjad, dkk (2017) bahwa *grade* rata-rata untuk menghitung kuantitas produk *sizing* yang dihasilkan adalah 57%.

Perhitungan untuk mendapatkan NPV meliputi profit, tingkat diskonto, dan umur tambang yang dapat dimodelkan pada persamaan berikut:

$$NPV = \frac{P_n((1+d)^n-1)}{d(1+d)^n} \quad (4.17)$$

Pada Gambar (4.4) di bawah menunjukkan representasi dari perhitungan NPV (Hustrulid dan Kuchta, 1995), dengan asumsi bahwa sebelum proses penambangan (dimulai saat $t=0$), *net present* dari profit adalah V yang terdiri dari dua bagian. Pertama yaitu PV_p yang merupakan profit P yang direalisasikan pada saat T . Kedua yaitu PV_w yang merupakan profit W yang direalisasikan pada waktu setelah T , profit tersebut diindikasikan sebagai P_1 yang terjadi saat T_1 , P_2 yang terjadi saat T_2 , dan seterusnya.



Gambar 4.3 Diagram Representasi Perhitungan NPV (Hustrulid dan Kuchta, 1995)

$$PV_p(t=0) = \frac{W}{(1+d)^T} \quad (4.18)$$

$$PV_w(t=0) = \frac{P}{(1+d)^T} \quad (4.19)$$

Sehingga nilai sekarang (*present value*) saat $t=0$ adalah,

$$V = \frac{W}{(1+d)^T} + \frac{P}{(1+d)^T} \quad (4.20)$$

Persamaan (4.20) dapat ditulis sebagai berikut,

$$W + P = V(1+d)^T \quad (4.21)$$

Dikarenakan nilai sekarang (*present value*) saat $t=T$ dari cadangan proses penambangan yang tersisa adalah W , maka perbedaan (v) antara nilai sekarang saat $t=T$ dan $t=0$ adalah,

$$v = V - W \quad (4.22)$$

Dengan menggunakan persamaan bilangan binomial untuk $(1+d)^T$ maka didapatkan,

$$(1 + d)^T = 1 + Td + \frac{T(T-1)d^2}{2!} + \frac{T(T-1)(T-2)d^3}{3!} + \dots \quad (4.23)$$

Sehingga $(1 + d)^T$ dapat disamakan dengan persamaan berikut,

$$(1 + d)^T \approx 1 + Td \quad (4.24)$$

Maka persamaan (4.21) dan (4.24) dapat disubstitusi menjadi persamaan (4.25) atau (4.26) berikut,

$$W + P = V + VTd \quad (4.25)$$

$$V - W = P - VTd \quad (4.26)$$

Substitusi persamaan (4.22) ke persamaan (4.26) menjadi,

$$v = P - VTd \quad (4.27)$$

Sehingga persamaan nilai sekarang (*present value*) untuk mendapatkan kapasitas proses sebagai batasan dalam mendapatkan nilai T adalah dengan mensubstitusi persamaan (4.27) dengan persamaan (4.14) sebagai berikut:

$$v = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - C_m Q_m - (f + Vd)T \quad (4.28)$$

Persamaan (4.28) terbagi menjadi tiga bentuk yaitu v_m , v_c , dan v_p . Formulasi tersebut digunakan untuk mencari kapasitas yang mengontrol lamanya proyek tambang dengan memilih nilai v minimum dari ketiga bentuk v_m , v_c , dan v_p . Formulasi untuk persamaan proses tambang (v_m) yaitu:

$$T_m = \frac{Q_m}{M} \quad (4.29)$$

$$v_m = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - (C_m + (\frac{f+Vd}{M})Q_m \quad (4.30)$$

Formulasi untuk persamaan proses konsentrat (v_c) yaitu:

$$T_c = \frac{Q_c}{C} \quad (4.31)$$

$$v_c = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con} - \frac{f+Vd}{C})]Q_c - C_m Q_m \quad (4.32)$$

Formulasi untuk persamaan proses pellet (v_p) yaitu:

$$T_p = \frac{Q_p}{P} \quad (4.33)$$

$$v_p = [(P_p - C_p) - \frac{f+Vd}{P}]Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - C_m Q_m \quad (4.34)$$

Dalam menentukan optimum *cut-off grade* untuk memaksimalkan NPV, maka persamaan v_m , v_c , dan v_p diturunkan terhadap nilai *grade* (g). Sehingga formulasi untuk mendapatkan optimum *cut-off grade* masing-masing limit kapasitas tiap proses yang berbeda adalah sebagai berikut:

Limit kapasitas proses tambang:

$$\frac{d Q_m}{d g} = 0 \quad (4.35)$$

$$g = \frac{(1-\alpha)(P_{gr}-C_{gr})+\alpha C_{con}}{\alpha(1-\beta)y_c P_c - \alpha\beta y_c (P_p - C_p)} \quad (4.36)$$

Limit kapasitas proses konsentrat:

$$\frac{d Q_c}{d g} = 0 \quad (4.37)$$

$$g = \frac{(1-\alpha)(P_{gr}-C_{gr})+\alpha C_{con}+\alpha \frac{f+Vd}{C}}{\alpha(1-\beta)y_c P_c - \alpha\beta y_c (P_p - C_p)} \quad (4.38)$$

Limit kapasitas proses *pellet*:

$$\frac{d Q_p}{d g} = 0 \quad (4.39)$$

$$g = \frac{(1-\alpha)(P_{gr}-C_{gr})+\alpha C_{con}}{\alpha(1-\beta)y_c P_c - \alpha\beta y_c [(P_p - C_p) - \frac{f+Vd}{P}]} \quad (4.40)$$

Setelah mendapatkan *cut-off grade* berdasarkan faktor kapasitas limit produksinya, hal dilakukan selanjutnya adalah mencari sebaran *grade* antara dua proses tambang yang terdiri dari pasangan tambang-konsentrat (g_{mcon}), tambang-*pellet* (g_{mp}), dan konsentrat-*pellet* (g_{conp}). Perhitungan *grade* pasangan ini ditentukan dengan menyesuaikan kapasitas dari setiap proses pasangannya. Sehingga untuk mendapatkan optimum *cut-off grade* dipilih berdasarkan aturan kelompok kandidat *grade* (Hustrulid dan Kuchta, 1995) yang diformulasikan sebagai berikut:

$$g_{mcon} = \begin{cases} g_m, & \text{jika } g_{mcon} \leq g_m \\ g_{con}, & \text{jika } g_{mcon} \geq g_{con} \\ g_{mcon}, & \text{jika bukan keduanya} \end{cases} \quad (4.41)$$

$$g_{conp} = \begin{cases} g_p, & \text{jika } g_{conp} \leq g_p \\ g_{con}, & \text{jika } g_{conp} \geq g_{con} \\ g_{conp}, & \text{jika bukan keduanya} \end{cases} \quad (4.42)$$

$$g_{mp} = \begin{cases} g_m, & \text{jika } g_{mp} \leq g_m \\ g_p, & \text{jika } g_{mp} \geq g_p \\ g_{mp}, & \text{jika bukan keduanya} \end{cases} \quad (4.43)$$

Dari ketiga kandidat *grade* optimum yang terpilih dari masing-masing grup, maka optimum *cut-off grade* yang terpilih merupakan nilai tengah dari ketiga kandidat. Dengan demikian, kuantitas material dari masing-masing proses dapat diketahui berdasarkan optimum *cut-off grade* terpilih.

4.4.2 Alokasi Truk

Penentuan alokasi truk berupa pemilihan tipe truk dan jumlah truk yang dibutuhkan dalam transportasi pengangkutan hasil proses produksi tambang. Dalam formulasi penentuan alokasi truk ini dikembangkan model optimasi untuk meminimalkan biaya transportasi dan biaya investasi. Model ini mengacu pada penelitian Felix T.S. Chan, Aditya Jha, dan Manoj K.T. (2015), Chung H. Ta, Armann Ingolfsson, dan John Doucette (2013), dan Bajany D.M., Xia X., dan Zhang L. (2017).

Variabel keputusan dalam pengembangan model ini yaitu tipe truk terpilih yang akan mengangkut hasil proses produksi tambang. Masing-masing rute transportasi hanya terpilih satu jenis tipe truk, dan antar rute bisa terpilih tipe truk yang berbeda. Rute dalam model ini ditetapkan sebagai berikut:

- U_1 : transportasi mineral bijih ke lokasi proses produksi produk *sizing*
- U_2 : transportasi mineral bijih ke lokasi proses produksi konsentrat
- U_3 : transportasi konsentrat ke lokasi proses produksi *pellet*
- U_4 : transportasi produk *sizing* ke lokasi permintaan
- U_5 : transportasi konsentrat ke lokasi permintaan
- U_6 : transportasi *pellet* ke lokasi permintaan

Variable keputusan dimodelkan pada persamaan (4.44) berikut:

$$X_{j,k,l}^t = \begin{cases} 1, & \text{jika truk tipe } j \text{ dipilih untuk transportasi antara} \\ & k \text{ dan } l \text{ di periode } t \\ 0, & \text{jikasebaliknya} \end{cases} \quad (4.44)$$

Berdasarkan fungsi tujuan yaitu biaya transportasi dan biaya investasi, formulasi dari setiap fungsi tujuan dapat dimodelkan sebagai berikut:

1. Biaya Transportasi (BT)

Biaya transportasi pengangkutan hasil tambang meliputi tipe truk terpilih, jumlah truk, biaya tetap, biaya variabel, dan jarak pengangkutan. Biaya transportasi (BT) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$BT = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t n_{k,l}^t (fc + (vc - e_{k,l})) , \forall q, j, s, r, t, k, l \quad (4.45)$$

Jumlah truk ditentukan dengan menggunakan faktor keserasian (*match factor*). Landasan penggunaan formulasi faktor keserasian dalam menghitung jumlah truk karena memperhatikan waktu siklus baik dari *shovel* maupun truk. Peneliti sebelumnya (Morgan & Peterson, 1968; Burt & Caccetta, 2007) menyatakan bahwa hubungan antara jumlah truk dan hasil produksi tambang diformulasikan oleh faktor keserasian yang digunakan oleh para insinyur pertambangan selama beberapa decade. Faktor-faktor dalam menghitung keserasian alat (Susanto dan Nurhakim, 2004) yaitu jumlah *shovel* dan alat angkut yang dipakai, waktu siklus *shovel*, jumlah muatan *shovel* ke truk, dan waktu siklus truk. Faktor keserasian digunakan untuk mengetahui jumlah truk yang diperlukan dalam melayani satu unit *shovel*, berikut merupakan formulasi faktor keserasian:

$$MF = \frac{n_{k,l}^t \times CT_i \times n}{N_i \times CT_j} \quad (4.46)$$

Dalam perhitungan untuk menentukan jumlah truk dengan persamaan di atas, terdapat beberapa asumsi yang digunakan yaitu jumlah *shovel* = 1 dan nilai *match factor* = 1, maka persamaan (4.46) dapat disederhanakan menjadi:

$$n_{k,l}^t = \frac{CT_j}{CT_i \times n} \quad (4.47)$$

Waktu siklus truk (CT_j) meliputi waktu ketika truk mengangkut material dari lokasi k ke lokasi l ($t_{k,l}^j$), lalu waktu untuk kembali dari lokasi l ke k ($t_{l,k}^j$), waktu ketika melakukan pembuangan di lokasi l (t_l^j) yang dalam hal ini diasumsikan, dan waktu ketika pemuatan di lokasi k ($t_{k,i}^j$) (Bajany D.M., Xia X., dan Zhang L., 2017). Waktu siklus shovel (CT_i) merupakan waktu ketika shovel melakukan pemuatan ke truk dalam satu waktu siklus. Frekuensi pengisian (n) merupakan jumlah shovel melakukan pengisian ke dalam truk yang ditentukan dengan persamaan (4.48).

$$n = \frac{c_j}{c_i} \quad (4.48)$$

Dalam menentukan waktu siklus truk dapat dihitung menggunakan persamaan (4.49)-(4.52) (Bajany D.M., Xia X., dan Zhang L., 2017) berikut:

$$CT_j = t_{l,k}^j + t_{k,l}^j + t_{k,i}^j + t_l^j \quad (4.49)$$

$$t_{l,k}^j = \frac{e_{k,l}}{v_{l,k}^j} \quad (4.50)$$

$$t_{k,l}^j = \frac{e_{k,l}}{v_{k,l}^j} \quad (4.51)$$

$$t_{k,i}^j = \frac{c_j}{c_{i,h}} \quad (4.52)$$

Setelah mendapatkan jumlah truk dari masing-masing tipe truk, maka perlu mengetahui berapa kali untuk setiap tipe truk melakukan transportasi dalam periode t . Jumlah trip dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$y_j^t = 1 + \text{int} \frac{m_s^{q,t}}{\frac{W_j}{n_{k,l}^t}} \quad (4.53)$$

Dimana ($m_s^{q,t}$) adalah kuantitas produk q yang akan diangkut dalam periode t , (W_j) adalah kapasitas input truk j , dan ($n_{k,l}^t$) adalah jumlah truk yang terpilih untuk melakukan transportasi.

Komponen biaya transportasi selanjutnya yaitu biaya tetap, dalam model ini biaya tetap meliputi upah operator truk terpilih dan *shovel* yang dimodelkan dalam persamaan (4.54) berikut:

$$fc = u * t_u \quad (4.54)$$

Kemudian terdapat komponen biaya variabel, dalam model ini biaya variabel meliputi biaya konsumsi bahan bakar truk dan bahan bakar *shovel*. Persamaan untuk menghitung biaya konsumsi bahan bakar mengacu pada penelitian (Bajany D.M., Xia X., dan Zhang L., 2017) yang dimodelkan dalam persamaan berikut:

$$vc = (F_j + F_i) * pf \quad (4.55)$$

dimana (F_j) adalah total konsumsi bahan bakar truk, (F_i) adalah total konsumsi bahan bakar *shovel*, dan (pf) adalah harga bahan bakar per liter. Total konsumsi bahan bakar truk (F_j) didapatkan dari jumlah trip yang dilakukan tiap truk selama periode t (y_j^t) dikalikan dengan konsumsi bahan bakar truk j dalam satu waktu siklus ($F_{k,l}^j$) yang didapatkan dari hasil perkalian masing-masing waktu aktivitas truk dengan konsumsi bahan bakar truk di kondisi yang berbeda. Model perhitungan dituliskan pada persamaan (4.56) dan (4.57) berikut:

$$F_j = \sum_{j=1}^J (y_j^t f_{l,k}^j t_{l,k}^j + y_j^t f_{k,l}^j t_{k,l}^j + y_j^t f_{idle}^j (t_{k,i}^j + t_l^j)) \quad (4.56)$$

$$F_{k,l}^j = f_{l,k}^j t_{l,k}^j + f_{k,l}^j t_{k,l}^j + f_{idle}^j (t_{k,i}^j + t_l^j) \quad (4.57)$$

Sedangkan total konsumsi bahan bakar *shovel* (F_i) didapatkan dari hasil perkalian konsumsi *shovel* (f^i), waktu siklus *shovel* (CT_i), dan jam kerja proses operasi tambang (sh).

$$F_i = \sum_{i=1}^I f^i CT_i sh \quad (4.58)$$

Dalam menentukan konsumsi bahan bakar truk maupun *shovel* dimodelkan pada persamaan (4.59) dan (4.60) berikut:

$$f^j = 0,3 * P^j * LF \quad (4.59)$$

$$f^i = 0,3 * P^i * LF \quad (4.60)$$

Setiap konsumsi bahan bakar truk dan *shovel* ditentukan oleh masing-masing *load factor* sesuai kondisi alat saat bekerja. Nilai *load factor* untuk truk dengan muatan, truk tanpa muatan, dan truk dengan mesin menganggur berturut-turut adalah 35%, 20%, dan 10% (Bajany D.M., Xia X., dan Zhang L., 2017). Sedangkan *load factor* untuk *shovel* dalam model ini diasumsikan 100% karena *shovel* tidak ada waktu menganggur.

2. Biaya Investasi (BI)

Biaya investasi dalam model ini merupakan biaya yang dikeluarkan oleh perusahaan untuk membeli truk di awal periode proyek tambang. Truk yang dibeli yaitu truk terpilih untuk transportasi di setiap rutenya sebanyak perhitungan jumlah truk masing-masing tipe. Biaya investasi (BI) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$BI = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t n_{k,l}^t b_j, \forall j, t, k, l \quad (4.61)$$

Dimana ($X_{j,k,l}^t$) merupakan bilangan biner hasil proses iterasi untuk memilih tipe truk, ($n_{k,l}^t$) merupakan jumlah truk yang terpilih untuk transportasi di setiap rutenya, dan (b_j) merupakan harga beli truk terpilih.

Sehingga fungsi tujuan dari model penelitian ini adalah minimasi total biaya transportasi dan biaya investasi.

$$\text{Minimasi Fungsi Tujuan} = BT + BI \quad (4.62)$$

$$\begin{aligned} \text{Minimasi Fungsi Tujuan} = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t n_{k,l}^t (fc + (vc - e_{k,l})) + \\ \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t n_{k,l}^t b_j, \forall q, j, s, r, t, k, l \end{aligned} \quad (4.63)$$

Dalam pengembangan model, batasan-batasan yang dibutuhkan untuk penyelesaian model penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$\sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t = 1, \forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}, t \quad (4.64)$$

$$\sum_{q=1}^Q \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t m_s^{q,t} \leq \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t W_j, \quad \forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}, t \quad (4.65)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J y_j^t (t_{l,k}^j + t_{k,l}^j + t_{k,i}^j + t_l^j) \leq sh \quad \forall k \in \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, l \in \{s_2, s_3, s_4, r_1, r_2, r_3\}, t \quad (4.66)$$

Pada batasan (4.64) memastikan bahwa dalam transportasi antara dua lokasi menggunakan satu tipe truk. Batasan (4.65) memastikan bahwa total produk yang akan diangkut oleh truk lebih kecil dari kapasitas input truk terpilih. Batasan (4.66) memastikan bahwa waktu siklus yang dibutuhkan setiap truk untuk melakukan trip antara dua lokasi lebih kecil dari jam kerja aktivitas pertambangan.

4.5 VALIDASI MODEL

Validasi model merupakan pembuktian untuk mengetahui apakah pengembangan model yang dilakukan valid atau tidak. Validasi model dilakukan dengan memeriksa satuan pada ruas sisi kiri sama dengan satuan pada ruas sisi kanan. Hasil dari validasi model ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut:

Tabel 4.2 Validasi Model

Persamaan	Pemeriksaan Satuan	Status
4.1 $R_p = P_p Q_p$ Rupiah = Rupiah/ton . ton Rupiah = Rupiah		Valid
4.2 $R_{gr} = P_{gr} (1 - \alpha) Q_c$ Rupiah = Rupiah/ton . ton Rupiah = Rupiah		Valid
4.3 $R_{con} = P_c (1 - \beta) Q_{con}$ Rupiah = Rupiah/ton . ton Rupiah = Rupiah		Valid

Tabel 4.3 Validasi Model (lanjutan)

Persamaan	Pemeriksaan Satuan	Status
4.4 $B_m = C_m Q_m$ Rupiah = Rupiah/ton . ton Rupiah = Rupiah		Valid
4.5 $B_{con} = C_{con} \alpha Q_c$ Rupiah = Rupiah/ton . ton Rupiah = Rupiah		Valid
4.6 $B_p = C_p Q_p$ Rupiah = Rupiah/ton . ton		Valid
4.7 $B_{gr} = C_{gr}(1 - \alpha) Q_c$ Rupiah = Rupiah/ton . ton Rupiah = Rupiah		Valid
4.8 $B_f = fT$ Rupiah = Rupiah/tahun . tahun Rupiah = Rupiah		Valid
4.9 $P = (R_p + R_{gr} + R_{con}) - (B_m + B_{con} + B_p + B_{gr} + B_f)$ Rupiah = (Rupiah + Rupiah + Rupiah) – (Rupiah + Rupiah + Rupiah + Rupiah + Rupiah) Rupiah = Rupiah		Valid
4.10 $P = [P_p Q_p + P_{gr} (1 - \alpha) Q_c + P_c (1 - \beta) Q_{con}] - [C_m Q_m + C_{con} \alpha Q_c + C_p Q_p + C_{gr}(1 - \alpha)Q_c + fT]$ Rupiah = [Rupiah + Rupiah + Rupiah] – [Rupiah + Rupiah + Rupiah + Rupiah + Rupiah] Rupiah = Rupiah		Valid
4.11 $Q_{con} = \bar{g}\alpha\gamma_c Q_c$ Ton = Ton		Valid
4.12 $Q_p = \bar{g}\beta\gamma_c Q_{con}$ Ton = Ton		Valid
4.13 $Q_{gr} = \bar{g}(1 - \alpha)\gamma_c Q_c$ Ton = Ton		Valid

Tabel 4.4 Validasi Model (lanjutan)

Persamaan	Pemeriksaan Satuan	Status
4.14	$P = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - C_m Q_m - fT$ <p>Rupiah = Rupiah + [(Rupiah + Rupiah – Rupiah)] – Rupiah – Rupiah</p> <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.17	$NPV = \frac{P_n((1+d)^n - 1)}{d(1+d)^n}$ <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.18	$PV_p(t=0) = \frac{W}{(1+d)^T}$ <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.19	$PV_w(t=0) = \frac{P}{(1+d)^T}$ <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.20	$V = \frac{W}{(1+d)^T} + \frac{P}{(1+d)^T}$ <p>Rupiah = Rupiah + Rupiah</p> <p>Rupiah</p>	Valid
4.21	$W + P = V(1+d)^T$ <p>Rupiah + Rupiah = Rupiah</p> <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.22	$v = V - W$ <p>Rupiah = Rupiah – Rupiah</p> <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.25	$W + P = V + VTd$ <p>Rupiah + Rupiah = Rupiah</p> <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.26	$V - W = P - VTd$ <p>Rupiah – Rupiah = Rupiah</p> <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid

Tabel 4.5 Validasi Model (lanjutan)

Persamaan	Pemeriksaan Satuan	Status
4.27 $v = P - VTd$ Rupiah = Rupiah – Rupiah Rupiah = Rupiah		Valid
4.28 $v = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - C_m Q_m - (f + Vd)T$ Rupiah = Rupiah + [(Rupiah + Rupiah – Rupiah)] – Rupiah – Rupiah Rupiah = Rupiah		Valid
4.29 $T_m = \frac{Q_m}{M}$ Tahun = $\frac{Ton}{Ton/tahun}$ Tahun = Tahun		Valid
4.30 $v_m = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - (C_m + \frac{f+Vd}{M})Q_m$ Rupiah = Rupiah + Rupiah + Rupiah – Rupiah – Rupiah Rupiah = Rupiah		Valid
4.31 $T_c = \frac{Q_c}{C}$ Tahun = $\frac{Ton}{Ton/tahun}$ Tahun = Tahun		Valid
4.32 $v_c = (P_p - C_p) Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con} - \frac{f+Vd}{C})]Q_c - C_m Q_m$ Rupiah = Rupiah + Rupiah + Rupiah – Rupiah – Rupiah Rupiah = Rupiah		Valid
4.33 $T_p = \frac{Q_p}{P}$ Tahun = $\frac{Ton}{Ton/tahun}$ Tahun = Tahun		Valid

Tabel 4.6 Validasi Model (lanjutan)

Persamaan	Pemeriksaan Satuan	Status
4.34	$v_p = [(P_p - C_p) - \frac{f+Vd}{p}]Q_p + [(P_{gr} - C_{gr})(1 - \alpha) + \alpha(P_c(1 - \beta)\bar{g}y_c - C_{con})]Q_c - C_m Q_m$ <p>Rupiah = Rupiah + Rupiah + Rupiah – Rupiah – Rupiah</p> <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.36	$g = \frac{(1-\alpha)(P_{gr}-C_{gr})+\alpha C_{con}}{\alpha(1-\beta)y_c P_c - \alpha\beta y_c (P_p - C_p)}$ $\% = \frac{\%rupiah + \%rupiah}{\%rupiah - \%rupiah}$ $\% = \%$	Valid
4.38	$g = \frac{(1-\alpha)(P_{gr}-C_{gr})+\alpha C_{con} + \alpha \frac{f+Vd}{C}}{\alpha(1-\beta)y_c P_c - \alpha\beta y_c (P_p - C_p)}$ $\% = \frac{\%rupiah + \%rupiah + \%rupiah}{\%rupiah - \%rupiah}$ $\% = \%$	Valid
4.40	$g = \frac{(1-\alpha)(P_{gr}-C_{gr})+\alpha C_{con}}{\alpha(1-\beta)y_c P_c - \alpha\beta y_c [(P_p - C_p) - \frac{f+Vd}{p}]}$ $\% = \frac{\%rupiah + \%rupiah}{\%rupiah - \%rupiah}$ $\% = \%$	Valid
4.45	$BT = \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t n_{k,l}^t (fc + (vc - e_{k,l}))$ <p>Rupiah = Rupiah + Rupiah</p> <p>Rupiah = Rupiah</p>	Valid
4.49	$CT_j = t_{l,k}^j + t_{k,l}^j + t_{k,i}^j + t_l^j$ <p>Jam = Jam + Jam + Jam + Jam</p> <p>Jam = Jam</p>	Valid
4.50	$t_{l,k}^j = \frac{e_{k,l}}{v_{l,k}^j}$ $Jam = \frac{Kilometer}{Kilometer/jam}$ <p>Jam = Jam</p>	Valid

Tabel 4.7 Validasi Model (lanjutan)

Persamaan	Pemeriksaan Satuan	Status
4.51 $t_{k,l}^j = \frac{e_{k,l}}{v_{k,l}^j}$ $\text{Jam} = \frac{\text{Kilometer}}{\text{Kilometer/jam}}$ $\text{Jam} = \text{Jam}$		Valid
4.52 $t_{k,i}^j = \frac{c_j}{c_{i,h}}$ $\text{Jam} = \frac{\text{Kilometer}}{\text{Kilometer/jam}}$ $\text{Jam} = \text{Jam}$		Valid
4.54 $f_c = u * t_u$ $\text{Rupiah} = \text{Rupiah/bulan} \cdot \text{bulan}$ $\text{Rupiah} = \text{Rupiah}$		Valid
4.55 $vc = (F_j + F_i) * pf$ $\text{Rupiah} = \text{Liter} \cdot \text{Rupiah/liter}$ $\text{Rupiah} = \text{Rupiah}$		Valid
4.56 $F_j = \sum_{j=1}^J (y_j^t f_{l,k}^j t_{l,k}^j + y_j^t f_{k,l}^j t_{k,l}^j + y_j^t f_{idle}^j (t_{k,i}^j + t_l^j))$ $\text{Liter} = (\text{Liter/jam} \cdot \text{jam}) + (\text{Liter/jam} \cdot \text{jam}) + (\text{Liter/jam} \cdot \text{jam})$ $\text{Liter} = \text{Liter}$		Valid
4.57 $F_{k,l}^j = f_{l,k}^j t_{l,k}^j + f_{k,l}^j t_{k,l}^j + f_{idle}^j (t_{k,i}^j + t_l^j)$ $\text{Liter} = (\text{Liter/jam} \cdot \text{jam}) + (\text{Liter/jam} \cdot \text{jam}) + (\text{Liter/jam} \cdot \text{jam})$ $\text{Liter} = \text{Liter}$		Valid
4.58 $F_i = \sum_{i=1}^I f^i CT_i \text{ sh}$ $\text{Liter} = \text{Liter/jam} \cdot \text{jam}$ $\text{Liter} = \text{Liter}$		Valid
4.59 $f^j = 0,3 * P^j * LF$ $\text{Liter/jam} = \text{Liter/kW/jam} \cdot \text{Kw}$ $\text{Liter/jam} = \text{Liter/jam}$		Valid
4.60 $f^i = 0,3 * P^i * LF$ $\text{Liter/jam} = \text{Liter/kW/jam} \cdot \text{Kw}$ $\text{Liter/jam} = \text{Liter/jam}$		Valid

Tabel 4.8 Validasi Model (lanjutan)

Persamaan	Pemeriksaan Satuan	Status
4.61 $BI = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J X_{j,k,l}^t n_{k,l}^t b_j$ Rupiah = Rupiah		Valid

Berdasarkan Tabel 4.2 – 4.8, satuan dari masing-masing persamaan pada ruas sisi kiri sama dengan ruas sisi kanan. Demikian hal ini menunjukkan bahwa model optimasi *cut-off grade* dan alokasi truk untuk meminimalkan total biaya telah valid.

4.6 CONTOH NUMERIK

Model yang telah melalui proses validasi dan dinyatakan valid, selanjutnya adalah pengujian model dengan contoh numerik yang meliputi parameter model dan pencarian solusi optimal.

4.6.1 Parameter Model

Dalam penentuan optimum *cut-off grade*, parameter yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 4.9 – 4.10. Kemudian hasil perhitungan *cut-off grade* optimum untuk menghasilkan kuantitas material yang diangkut tiap tahunnya ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Berdasarkan hasil perhitungan *cut-off grade*, didapatkan optimum *cut-off grade* untuk proyek tambang selama lima tahun. Tahun pertama memiliki *cut-off grade* sebesar 46%, tahun kedua sebesar 45%, tahun ketiga 43%, tahun keempat 40%, dan tahun kelima 36%.

Tabel 4.9 Parameter Operasional Proses Tambang

Parameter	Notasi (Satuan)	Nilai
Total bijih	ton	78.435.430
Total waste	ton	109.305.000
Total material	ton	187.740.430
Kapasitas tambang	M (ton/tahun)	40.000.000
Kapasitas proses produksi konsentrat	C (ton/tahun)	12.000.000
Kapasitas proses produksi produk <i>sizing</i>	G (ton/tahun)	1.000.000
Kapasitas proses produksi <i>pellet</i>	P (ton/tahun)	4.200.000

Tabel 4.10 Parameter Operasional Proses Tambang (lanjutan)

Parameter	Parameter	Parameter
Biaya proses tambang	C_m (Rp/ton)	5.120
Biaya proses konsentrat	C_{con} (Rp/ton)	33.920
Biaya proses <i>pellet</i>	C_p (Rp/ton)	64.000
Biaya proses <i>sizing</i>	C_{gr} (Rp/ton)	8.000
Biaya tetap	f (Rp/tahun)	64.000.000.000
Harga <i>pellet</i>	P_p (Rp/ton)	416.000
Harga konsentrat	P_c (Rp/ton)	139.840
Harga produk <i>sizing</i>	P_{gr} (Rp/ton)	412.000
Proses pemulihan	yc (%)	67
Tingkat diskonto	d (%)	21

Sumber: Sadjad M., Reza K., M. Ataei, dan Eshagh P. (2017)

Tabel 4.11 Kuantitas Material

Parameter	Satuan	Nilai				
Periode waktu	(tahun)	1	2	3	4	5
<i>Cut-off Grade</i>	(%)	46	45	43	40	36
Material yang ditambang	(ton)	39.944.772	39.944.772	39.944.772	39.944.772	27.961.341
Bijih dikirim ke proses <i>sizing</i>	(ton)	1.112.343	1.140.330	1.182.002	1.241.596	925.455
Bijih dikirim ke proses konsentrat	(ton)	13.348.122	13.683.960	14.184.024	14.899.157	11.105.462
Konsentrat dikirim ke proses <i>pellet</i>	(ton)	5.147.481	5.227.845	5.343.039	5.498.481	3.983.732
Menjual produk <i>sizing</i>	(ton)	424.804	435.492	451.407	474.166	353.431
Menjual konsentrat	(ton)	1.379.674	1.401.214	1.432.090	1.473.753	1.067.756
Menjual <i>pellet</i>	(ton)	2.517.089	2.532.578	2.552.151	2.573.078	1.812.061

Dalam penentuan alokasi truk, parameter model yang digunakan adalah spesifikasi truk yang ditunjukkan Tabel 4.12, spesifikasi *shovel* yang ditunjukkan Tabel 4.13.

Tabel 4.12 Spesifikasi Truk

Tipe Truk	Kapasitas	Daya Mesin	Kecepatan Muatan	
	Muat (ton)	(kW)	Kosong (km/h)	Isi (km/h)
J1	46	399	79,7	43,7
J2	38	353	68,2	34,6
J3	45	368,4	50	39
J4	41	358,9	70	43,4
J5	91	689,9	64,5	35,5
J6	91	867,1	65	32,6
J7	90	772,2	60	29,7
J8	98	824,4	63	31,8
J9	136	990,7	54,8	30
J10	141	1034,1	58	33,4
J11	136	1177,5	50	30
J12	140	853,1	57,5	36,7
J13	160	1057,6	55	32,3
J14	160	1013,5	64	38
J15	172	1253,2	54,5	30,2
J16	156	1285,6	54,7	29
J17	218	1718,8	54,3	29,2
J18	200	1691,6	43	28,7
J19	193	1378,3	55,7	29,5
J20	181	1323,8	51,5	27,8

Sumber: Cat.com, Hitachicm.com, Belaz.by, Home.Komatsu, Liebherr.com

Tabel 4.13 Spesifikasi *Shovel*

Tipe <i>Shovel</i>	Kapasitas Muat (ton)	Daya Mesin (kW)	Faktor Pengisian <i>Bucket</i> (%)	Efisiensi (%)
I1	14,6	556	95	62

Sumber: Cat.com

Selain data yang telah ditampilkan pada Tabel 4.9 - 4.13, parameter yang digunakan untuk contoh numerik dalam asumsi adalah upah operator yaitu sebesar Rp 3.000.000/bulan, dan jarak antar lokasi pengangkutan diasumsikan sama yaitu sebesar 2 kilometer.

4.6.2 Pencarian Solusi Optimal

Sebelum pencarian solusi optimal dilakukan, jumlah truk masing-masing tipe ditentukan dengan persamaan (4.47) dan ditunjukkan pada Tabel 4.14 – 4.15. Selanjutnya, optimasi model diselesaikan dengan menggunakan OptQuest pada *Software Oracle Crystal Ball*. Proses iterasi yang digunakan sebanyak 5.000 dan memakan waktu sebesar 900 menit. Hasil proses iterasi untuk variabel keputusan setiap tipe truk di masing-masing rute ditunjukkan pada Tabel 4.16 – 4.17. Sedangkan untuk hasil optimasi model keseluruhan ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Jumlah Truk

Tipe <i>Shovel</i>	Waktu Siklus <i>Shovel</i> (jam)	Tipe Truk	Waktu Siklus Truk (jam)	Jumlah Truk
I1	0,00533	J1	0,129	8
		J2	0,126	10
		J3	0,129	8
		J4	0,128	9
		J5	0,188	6
		J6	0,188	6
		J7	0,185	6
		J8	0,196	6
		J9	0,237	5
		J10	0,239	5
		J11	0,237	5

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Jumlah Truk (lanjutan)

Tipe <i>Shovel</i>	Waktu Siklus <i>Shovel</i> (jam)	Tipe Truk	Waktu Siklus Truk (jam)	Jumlah Truk
I1	0,00533	J12	0,238	5
		J13	0,291	5
		J14	0,291	5
		J15	0,294	5
		J16	0,286	6
		J17	0,338	5
		J18	0,334	5
		J19	0,326	5
		J20	0,324	5

Tabel 4.16 Hasil Variabel Keputusan Setiap Tipe Truk

Tipe Truk	Rute 1	Rute 2	Rute 3	Rute 4	Rute 5	Rute 6
J1	0	0	0	0	0	0
J2	0	0	0	0	0	0
J3	0	1	1	0	0	1
J4	0	0	0	0	0	0
J5	1	0	0	0	1	0
J6	0	0	0	0	0	0
J7	0	0	0	1	0	0
J8	0	0	0	0	0	0
J9	0	0	0	0	0	0
J10	0	0	0	0	0	0
J11	0	0	0	0	0	0
J12	0	0	0	0	0	0
J13	0	0	0	0	0	0
J14	0	0	0	0	0	0

Tabel 4.17 Hasil Variabel Keputusan Setiap Tipe Truk (lanjutan)

Tipe Truk	Rute 1	Rute 2	Rute 3	Rute 4	Rute 5	Rute 6
J15	0	0	0	0	0	0
J16	0	0	0	0	0	0
J17	0	0	0	0	0	0
J18	0	0	0	0	0	0
J19	0	0	0	0	0	0
J20	0	0	0	0	0	0

Tabel 4.18 Hasil Optimasi Model

Variabel Keputusan	Nilai Fungsi Tujuan
Rute 1 = Truk J5	Total Biaya = Rp 395.119.635.185,15
Rute 2 = Truk J3	
Rute 3 = Truk J3	
Rute 4 = Truk J7	
Rute 5 = Truk J5	
Rute 6 = Truk J3	

Berdasarkan hasil optimasi model pada Tabel 4.18, didapatkan hasil Truk J5 terpilih untuk transportasi di Rute 1 dan Rute 5, Truk J3 terpilih untuk transportasi di Rute 2, Rute 3, dan Rute 6, dan Truk J7 terpilih untuk transportasi di Rute 4. Total biaya yang dihasilkan dari proses optimasi adalah sebesar Rp 395.119.635.185,15.