

BAB IV

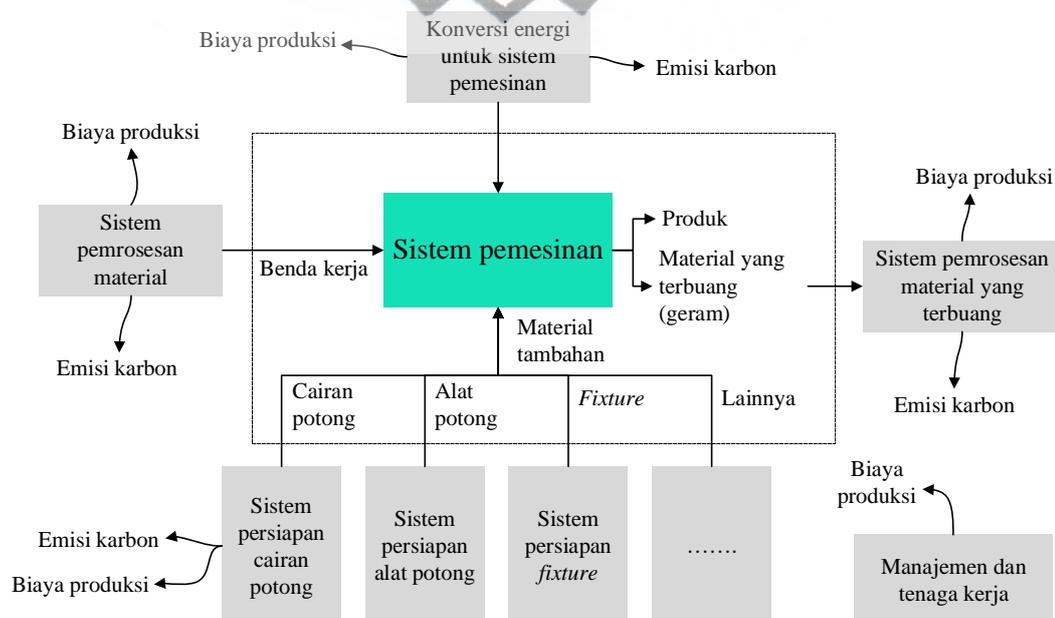
PENGEMBANGAN MODEL

Bab ini membahas proses dan langkah-langkah pengembangan model sebagai hasil dari penelitian serta pembahasan dan analisis dari hasil penelitian.

4.1. Deskripsi Sistem

Sistem yang dimodelkan dalam penelitian ini adalah proses pemesinan *multi-pass* pada *CNC turning* dengan mempertimbangkan beberapa aspek terkait *sustainable manufacturing* dan efisiensi proses pemesinan. Aspek-aspek *sustainable manufacturing* yang dipertimbangkan meliputi konsumsi energi, emisi karbon, dan biaya produksi. Kemudian, aspek efisiensi proses pemesinan yang digunakan adalah waktu pemesinan.

Sistem pemesinan berbasis *CNC turning* dalam produksi sering kali melibatkan satu atau beberapa mesin CNC. *Input* dari sistem ini adalah energi listrik dan bahan baku. Selama proses pemesinan, setiap mesin dilengkapi dengan alat pemesinan, *fixtures*, alat potong, benda kerja, dan lain-lain sehingga menghasilkan *output* berupa produk jadi dan geram. Sistem pemesinan berbasis *CNC turning* ditunjukkan pada Gambar 4.1.



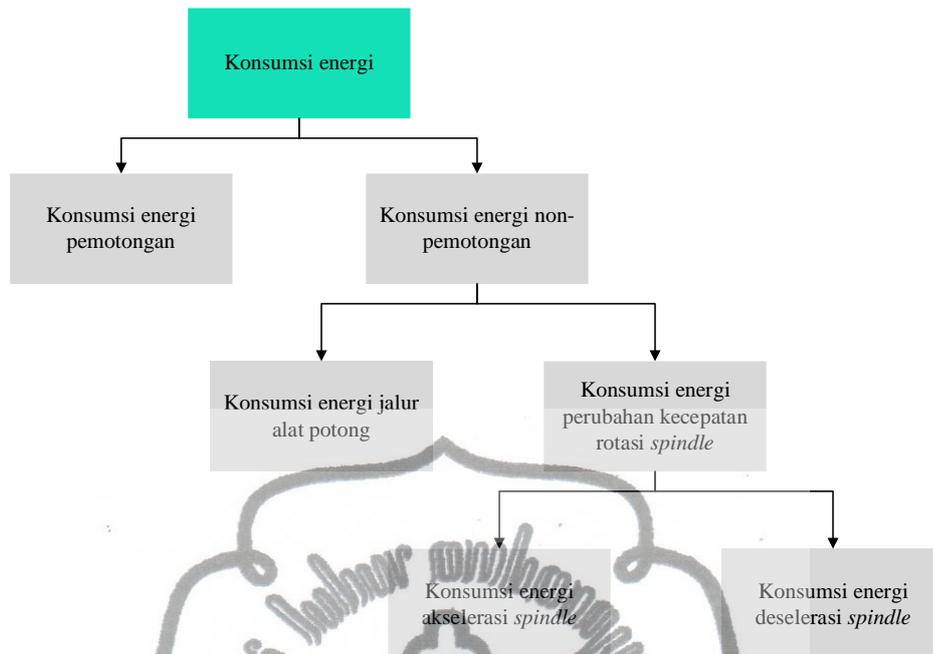
Gambar 4.1. Sistem Pemesinan Berbasis *CNC Turning*

Sumber: Yi, dkk. (2015) dengan modifikasi

Pengurangan emisi karbon dan biaya produksi dalam proses pemesinan merupakan salah dua komponen pendukung dalam *sustainable manufacturing*. Berdasarkan Gambar 4.1, emisi karbon dan biaya produksi dalam sistem pemesinan CNC *turning* secara tidak langsung dihasilkan dari bahan baku material, alat potong, cairan potong, konsumsi energi, dan geram. Namun, parameter pemotongan selama proses pemesinan hanya berdampak kecil terhadap emisi karbon dan biaya produksi dari bahan baku material dan geram sehingga kedua sumber tersebut akan diabaikan dalam model. Selain itu, biaya produksi juga mencakup biaya manajemen dan tenaga kerja yang terlibat dalam sistem pemesinan CNC *turning* karena biaya ini dihitung berdasarkan waktu proses pemesinan yang bergantung pada parameter pemotongan.

Mesin CNC *turning* tidak terlepas dari kebutuhan akan konsumsi energi selama berlangsungnya proses pemesinan. Konsumsi energi (MEC) dapat dipisahkan menjadi dua jenis, yaitu energi pemotongan (CEC) dan energi non-pemotongan (NCEC) (Hu, dkk., 2019). Konsumsi energi yang dibutuhkan untuk memotong benda kerja dengan alat potong disebut dengan CEC. Kemudian, NCEC merupakan energi yang dibutuhkan selama operasi non-pemotongan yang meliputi jalur alat potong dan perubahan kecepatan rotasi *spindle*, selanjutnya disebut dengan konsumsi energi jalur alat potong (TPE) dan konsumsi energi perubahan kecepatan rotasi *spindle* (SRCE). TPE didefinisikan sebagai konsumsi energi yang dibutuhkan oleh mesin untuk memindahkan alat potong ke posisi yang tepat sebelum pemotongan dimulai sedangkan SRCE didefinisikan sebagai energi yang dikonsumsi oleh mesin ketika *spindle* mengalami akselerasi (SAE) atau deselerasi (SDE). Hierarki dari konsumsi energi pemesinan ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Dalam skenario manufaktur yang nyata, waktu pemesinan juga menjadi aspek yang penting selain ketiga aspek yang telah dijelaskan sebelumnya. Hal ini akan menjadi tidak masuk akal bila mengoptimalkan konsumsi energi, emisi karbon, dan biaya produksi dengan mengorbankan waktu pemesinan. Masalah keterlambatan produksi akan muncul akibat kejadian tersebut. Waktu pemesinan dihitung berdasarkan durasi penggunaan daya selama proses pemotongan dan proses non-pemotongan.



Gambar 4.2. Hierarki Konsumsi Energi Pemesinan

4.2. Komponen Model

Komponen suatu model terdiri atas fungsi tujuan, variabel keputusan, dan parameter. Komponen tersebut ditampilkan dalam bentuk notasi. Notasi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Fungsi tujuan

CE_{total} : total emisi karbon (kg)

E_{total} : total konsumsi energi (J)

PC_{total} : total biaya produksi (Rp)

T_{total} : total waktu pemesinan (detik)

2. Variabel keputusan

$d_{r,i}$: kedalaman pemakanan untuk *roughing pass* ke-*i* (mm)

d_s : kedalaman pemakanan untuk *finishing pass* (mm)

$f_{r,i}$: kecepatan pemakanan untuk *roughing pass* ke-*i* (mm/rev)

f_s : kecepatan pemakanan untuk *finishing pass* (mm/rev)

n : jumlah *rouhing pass*

$N_{r,i}$: kecepatan rotasi *spindle* untuk *roughing pass* ke-*i* (rpm)

N_s : kecepatan rotasi *spindle* untuk *finishing pass* (rpm)

3. Parameter

- A_{ZF} : koefisien kuadratik pada model daya pemakanan sumbu Z
 B_{SR} : koefisien monomial pada model daya rotasi *spindle*
 B_{ZF} : koefisien monomial pada model daya pemakanan sumbu Z
 C_0 : koefisien terkait persamaan *tool-life*
 C_{elec} : koefisien biaya listrik (Rp/J)
 C_{fluid} : koefisien biaya cairan potong (Rp/m³)
 C_m : koefisien biaya manajemen dan tenaga kerja (Rp/detik)
 C_{SR} : konstanta pada model daya rotasi *spindle*
 C_{ZF} : konstanta pada model daya pemakanan sumbu Z
 C_{tool} : koefisien biaya alat potong (Rp/kg)
 CE_{elec} : emisi karbon konsumsi energi listrik (kgCO₂)
 CE_{fluid} : emisi karbon cairan potong (kgCO₂)
 CE_{tool} : emisi karbon alat potong (kgCO₂)
 CEF_{elec} : faktor emisi karbon konsumsi energi listrik (kgCO₂/J)
 CEF_{tool} : faktor emisi karbon alat potong (kgCO₂/kg)
 CEF_{oil} : faktor emisi karbon minyak terlarut (kgCO₂/m³)
 CEF_{wc} : faktor emisi karbon limbah cairan potong (kgCO₂/m³)
 d_{rL} : batas bawah kedalaman pemakanan pada *roughing pass* (mm)
 d_{rU} : batas atas kedalaman pemakanan pada *roughing pass* (mm)
 d_{sL} : batas bawah kedalaman pemakanan pada *finishing pass* (mm)
 d_{sU} : batas atas kedalaman pemakanan pada *finishing pass* (mm)
 d_t : total kedalaman material yang dibuang (mm)
 D : diameter benda kerja (mm)
 D_i : diameter permukaan menunggu proses *roughing pass* ke-*i* (mm)
 D_{n+1} : diameter permukaan menunggu proses *finishing pass* (mm)
 E_0 : konsumsi energi *standby* (J)
 E_{cut} : konsumsi energi pemotongan pada operasi *turning* (J)
 E_{CS} : konsumsi energi semprotan pendingin (J)
 E_{MC} : konsumsi energi pembuangan material (J)
 E_{non} : konsumsi energi non-pemotongan (J)
 E_{sra} : konsumsi energi mesin untuk akselerasi dari 0 rpm ke $N_{r,1}$ rpm (J)

- E_{srm} : konsumsi energi mesin untuk akselerasi atau deselerasi dari $N_{r,i}$ rpm ke $N_{r,i+1}$ rpm dan $N_{r,n}$ rpm ke N_s rpm (J)
- E_{srd} : konsumsi energi mesin untuk deselerasi dari N_s rpm ke 0 rpm (J)
- E_{SRC} : konsumsi energi untuk perubahan rotasi *spindle* (J)
- E_{TP} : konsumsi energi jalur alat potong (J)
- E_{TP}^2 : konsumsi energi jalur alat potong pada aktivitas pemakanan ke-dua (J)
- E_{TP}^3 : konsumsi energi jalur alat potong pada aktivitas pemakanan ke-tiga (J)
- E_{ZF} : konsumsi energi pemakanan sumbu Z (J)
- f_{rL} : batas bawah kecepatan pemakanan pada *roughing pass* (mm/rev)
- f_{rU} : batas atas kecepatan pemakanan pada *roughing pass* (mm/rev)
- f_{sL} : batas bawah kecepatan pemakanan pada *finishing pass* (mm/rev)
- f_{sU} : batas atas kecepatan pemakanan pada *finishing pass* (mm/rev)
- $F_{r,i}$: gaya potong pada *roughing pass* ke- i (kgf)
- F_s : gaya potong pada *finishing pass* (kgf)
- F_U : gaya potong maksimum (kgf)
- k_1 : konstanta hubungan parameter *roughing* dan *finishing* untuk kecepatan potong
- k_2 : konstanta hubungan parameter *roughing* dan *finishing* untuk kecepatan pemakanan
- k_3 : konstanta hubungan parameter *roughing* dan *finishing* untuk kedalaman pemakanan
- k_f : koefisien kombinasi alat potong-benda kerja
- k_q : koefisien terkait persamaan suhu permukaan geram
- L : panjang benda kerja (mm)
- M_{tool} : massa alat potong (kg)
- n_L : batas bawah jumlah *roughing pass*
- n_U : batas atas jumlah *roughing pass*
- N_{max} : kecepatan rotasi *spindle* maksimum (rpm)
- p, q, r : konstanta terkait persamaan *tool-life*

- P_0 : daya mesin dalam keadaan *standby* (W)
 P_{CS} : daya semprotan pendingin pada operasi *turning* (W)
 $P_{mr,i}$: daya pembuangan material pada *roughing pass* ke- i (W)
 P_{ms} : daya pembuangan material pada *finishing pass* (W)
 $P_{r,i}$: daya pada *roughing pass* ke- i (W)
 P_s : daya pada *finishing pass* (W)
 P_{sra} : daya akselerasi *spindle* dari 0 rpm ke $N_{r,1}$ rpm (W)
 $P_{srr,i}$: daya akselerasi/deselerasi *spindle* dari $N_{r,i}$ rpm ke $N_{r,i+1}$ rpm (W)
 P_{srs} : daya akselerasi/deselerasi *spindle* dari $N_{r,n}$ rpm ke N_s rpm (W)
 P_U : daya maksimum yang tersedia pada mesin (W)
 P_{XR} : daya pemakanan cepat sumbu X (W)
 $P_{zr,i}$: daya pemakanan sumbu Z pada *roughing pass* ke- i (W)
 P_{zs} : daya pemakanan sumbu Z pada *finishing pass* (W)
 PC_{elec} : biaya listrik (Rp)
 PC_{fluid} : biaya cairan potong (Rp)
 PC_m : biaya manajemen dan tenaga kerja (Rp)
 PC_{tool} : biaya alat potong (Rp)
 $Q_{r,i}$: suhu selama pemakanan *roughing* ke- i ($^{\circ}C$)
 Q_s : suhu selama pemakanan *finishing* ($^{\circ}C$)
 Q_U : suhu maksimum ($^{\circ}C$)
 R : jumlah pengasahan alat potong
 R_a : kekasaran permukaan maksimum (mm)
 R_n : *nose radius* pada alat potong (mm)
 Sc : batas area stabil pemotongan
 $S_{r,i}$: area stabil pemotongan pada *roughing pass* ke- i
 S_s : area stabil pemotongan pada *finishing pass*
 t_2 : waktu pemesinan untuk aktivitas pemakanan kedua (detik)
 $t_{2r,i}$: waktu pemesinan untuk aktivitas pemakanan kedua pada *roughing pass* ke- i (detik)
 t_{2s} : waktu pemesinan untuk aktivitas pemakanan kedua pada *finishing pass* (detik)

- t_3 : waktu pemesinan untuk aktivitas pemakanan ketiga (detik)
 $t_{3r,i}$: waktu pemesinan untuk aktivitas pemakanan ketiga pada *roughing pass* ke- i (detik)
 t_{3s} : waktu pemesinan untuk aktivitas pemakanan ketiga pada *finishing pass* (detik)
 t_{sra} : waktu akselerasi *spindle* dari 0 rpm ke $N_{r,1}$ rpm (detik)
 t_{srm} : waktu akselerasi/deselerasi *spindle* dari $N_{r,i}$ rpm ke $N_{r,i+1}$ rpm dan dari $N_{r,n}$ rpm ke N_s rpm (detik)
 $t_{srr,i}$: waktu akselerasi/deselerasi *spindle* dari $N_{r,i}$ rpm ke $N_{r,i+1}$ rpm (detik)
 t_{srs} : waktu akselerasi/deselerasi *spindle* dari $N_{r,n}$ rpm ke N_s rpm (detik)
 t_{srd} : waktu deselerasi *spindle* dari N_s rpm ke 0 rpm (detik)
 t_{mr} : waktu pemotongan pada *roughing pass* ke- i (detik)
 t_{ms} : waktu pemotongan pada *finishing pass* (detik)
 T_A : torsi akselerasi *spindle* (N.m)
 T_{cut} : waktu pemotongan pada operasi *turning* (detik)
 T_{fluid} : siklus penggantian cairan potong (bulan)
 T_L : batas bawah *tool life* (detik)
 T_p : *tool-life* yang mempertimbangkan *roughing* dan *finishing pass* (detik)
 T_r : *tool-life* untuk *roughing pass* (detik)
 T_s : *tool-life* untuk *finishing pass* (detik)
 T_U : batas atas *tool life* (detik)
 v_{XR} : kecepatan pemakanan cepat pada sumbu X (m/menit)
 V_{ad} : volume minyak terlarut tambahan (m^3)
 V_{in} : volume minyak terlarut mula-mula (m^3)
 $V_{r,i}$: kecepatan potong pada *roughing pass* ke- i (m/menit)
 V_{rL} : batas bawah kecepatan potong *roughing pass* (m/menit)
 V_{rU} : batas atas kecepatan potong *roughing pass* (m/menit)
 V_s : kecepatan potong pada *finishing pass* (m/menit)
 V_{sL} : batas bawah kecepatan potong *finishing pass* (m/menit)

- V_{SU} : batas atas kecepatan potong *finishing pass* (m/menit)
 α_A : akselerasi sudut *spindle* (rad/s²)
 α_D : deselerasi sudut *spindle* (rad/s²)
 θ : koefisien berbobot *tool life* untuk *roughing* dan *finishing pass*
 δ, τ, φ : konstanta terkait persamaan suhu permukaan geram
 μ, ϑ : konstanta terkait persamaan gaya dan daya potong
 λ, ν : konstanta terkait persamaan area stabil pemotongan
 η : efisiensi daya
 δ_f : konsentrasi cairan potong
 Δd_x : jarak penarikan alat potong pada sumbu X (mm)
 Δd_z : jarak *air-cutting* sebelum memotong material (mm)

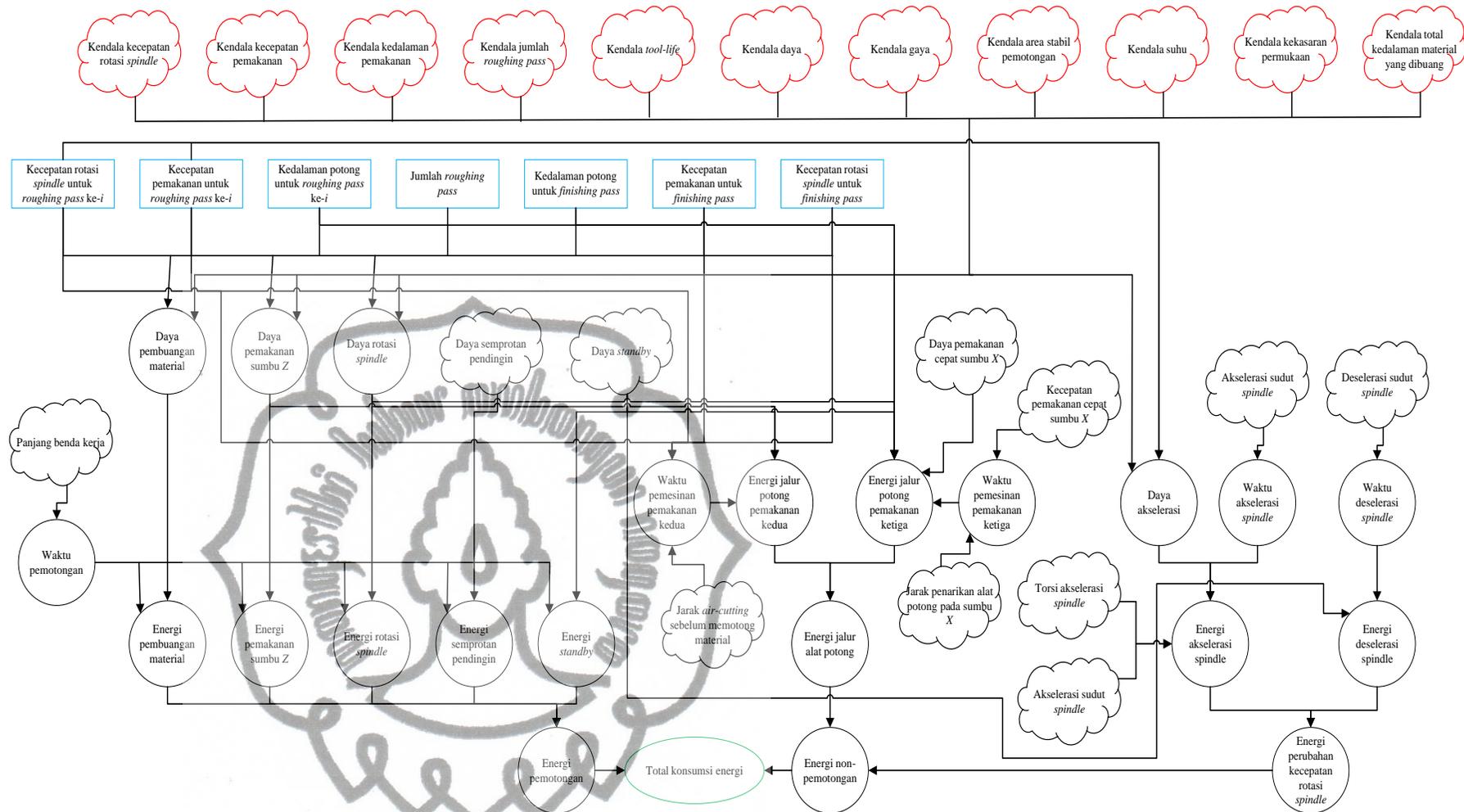
Hubungan struktural dan kausal dari komponen-komponen di atas digambarkan melalui *influence diagram*. *Influence diagram* ini dibagi menjadi empat berdasarkan fungsi tujuannya, yaitu total konsumsi energi, total emisi karbon, total biaya produksi, dan total waktu pemesinan yang ditampilkan pada Gambar 4.3 – 4.6.

4.3. Formulasi Model

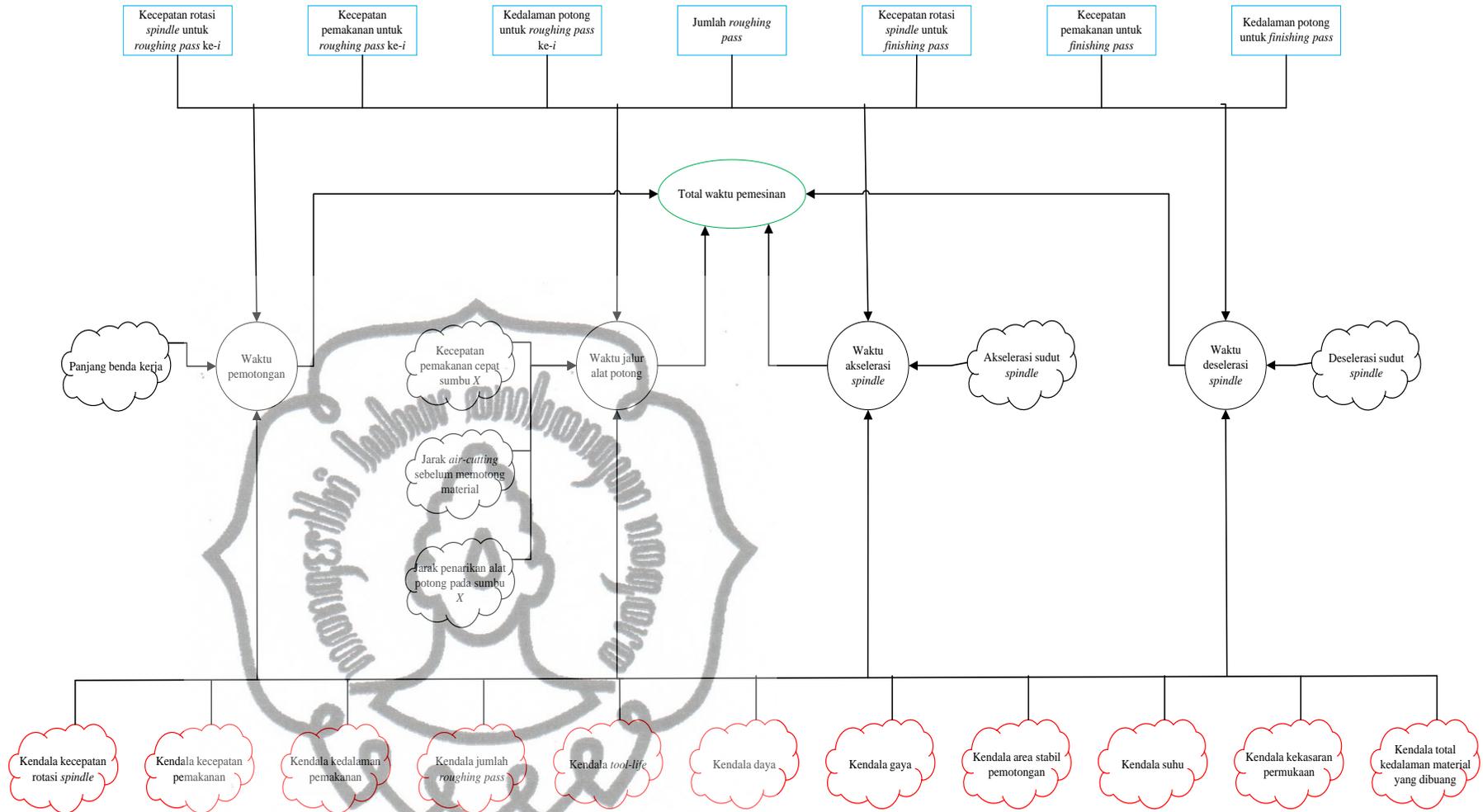
Formulasi model yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah model optimasi multi-objektif proses *multi-pass turning* pada mesin CNC. Model ini mempertimbangkan: (1) konsumsi energi yang mengacu pada model Hu, dkk. (2019) dan Lu, dkk. (2016); (2) emisi karbon yang mengacu pada model Yi, dkk. (2015); (3) biaya produksi yang mengacu pada model Tian, dkk. (2019), dan (4) waktu pemesinan yang mengacu pada model Hu, dkk. (2019) dan Lu, dkk. (2016).

4.3.1. Fungsi Tujuan

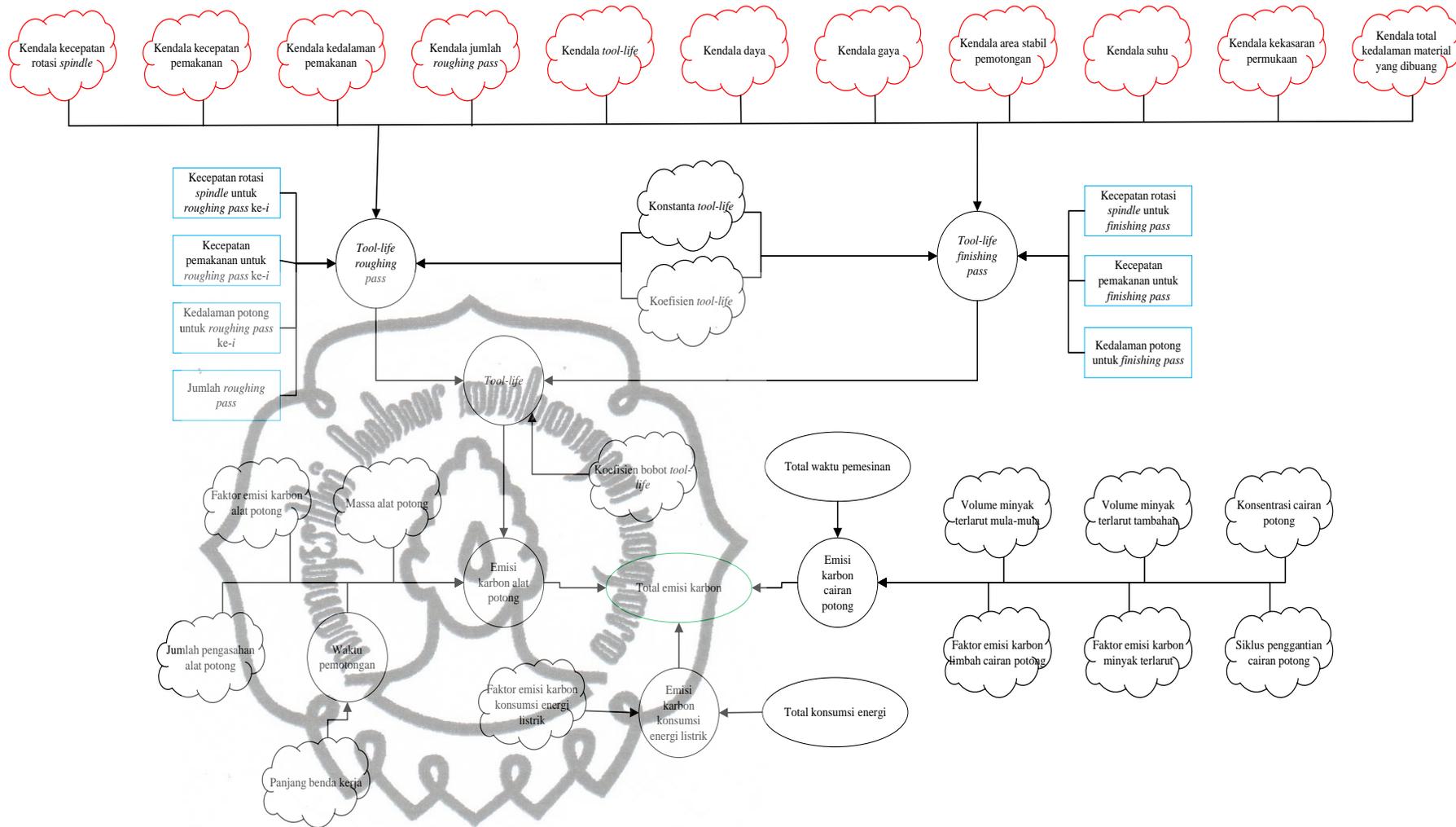
Model optimasi ini bertujuan untuk mencapai konsumsi energi, emisi karbon, biaya produksi, dan waktu pemesinan yang minimal pada proses *multi-pass turning*. Variabel keputusan yang ditentukan adalah kecepatan rotasi *spindle*, kecepatan pemakanan, dan kedalaman pemakanan pada proses *roughing* dan *finishing* serta jumlah pemakanan proses *roughing*. Fungsi tujuan dalam model ini ditunjukkan pada Persamaan (4.1) dan model matematis untuk setiap fungsi tujuan dirangkum pada Tabel 4.1.



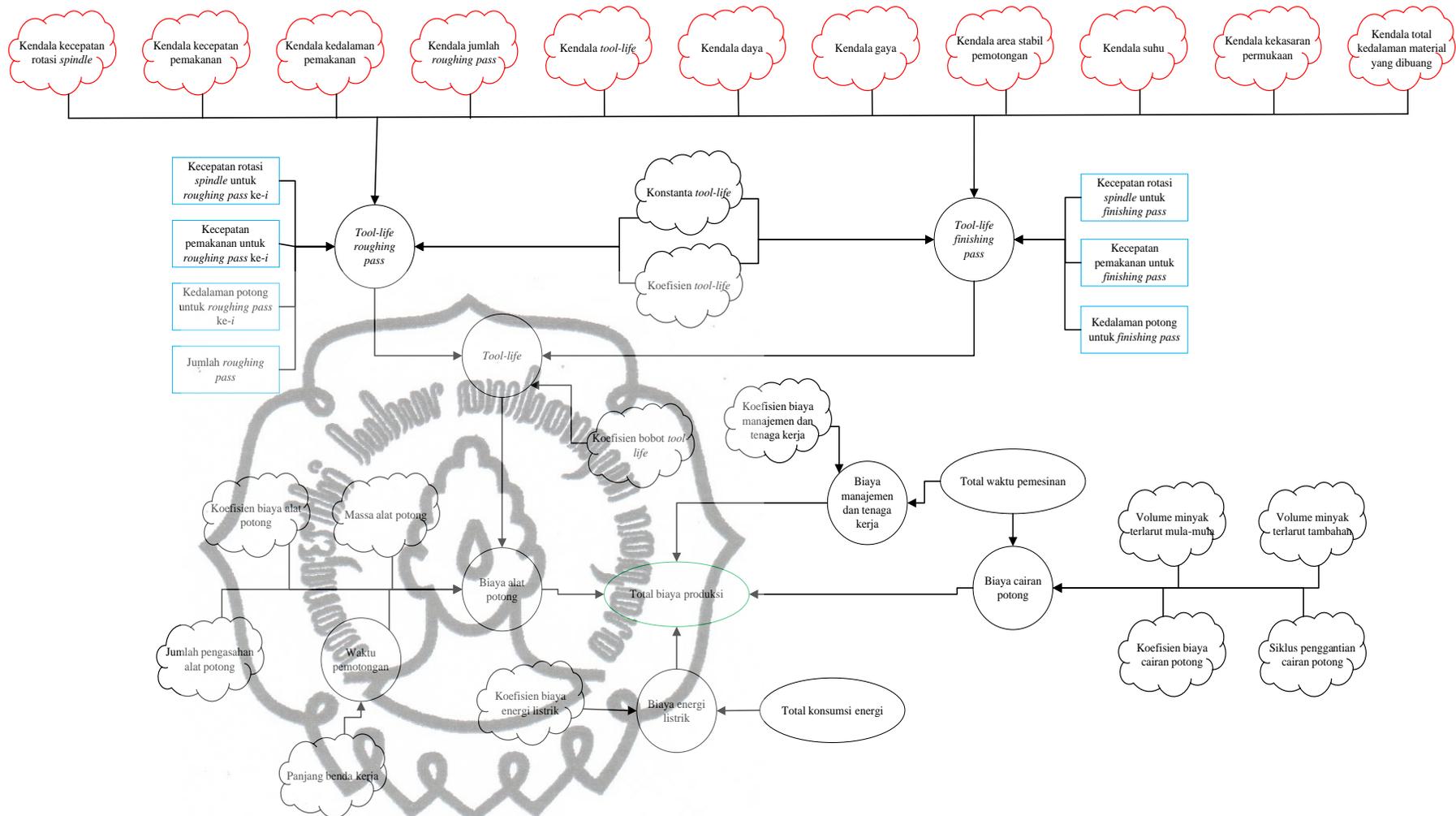
Gambar 4.3. Influence Diagram untuk Model Total Konsumsi Energi



Gambar 4.4. Influence Diagram untuk Model Total Waktu Pemesinan



Gambar 4.5. Influence Diagram untuk Model Total Emisi Karbon



Gambar 4.6. Influence Diagram untuk Model Total Biaya Produksi

$$\text{Minimasi: } F(N_{r,i}, N_s, f_{r,i}, f_s, d_{r,i}, d_s, n) = (\min E_{total}, \min CE_{total}, \min PC_{total}, \min T_{total}) \quad (4.1)$$

Setiap fungsi tujuan sebenarnya dapat saling dikonversikan tanpa perlu memodelkan empat fungsi tujuan yang berbeda. Misalnya, waktu pemesinan dapat dikonversikan menjadi biaya produksi dengan satuan uang per waktu. Meskipun begitu, waktu pemesinan yang minimum belum tentu menghasilkan biaya produksi yang minimum dan begitu juga sebaliknya. Masing-masing fungsi tujuan tersebut memiliki kepentingan tersendiri yang tidak dapat diperoleh dengan mengonversikan satu fungsi tujuan ke fungsi tujuan lainnya sehingga setiap fungsi tujuan perlu berdiri sendiri.

(1) Fungsi konsumsi energi (E_{total})

Konsumsi energi total pada proses *multi-pass turning* diperoleh dari konsumsi energi pemotongan E_{cut} dan konsumsi energi non-pemotongan E_{non} (Hu, dkk., 2019). E_{total} dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{total} = E_{cut} + E_{non} \quad (4.2)$$

a. Konsumsi energi pemotongan (E_{cut})

Konsumsi energi pemotongan meliputi konsumsi energi pembuangan material, konsumsi energi pemakanan sumbu Z, konsumsi energi rotasi *spindle*, konsumsi energi semprotan pendingin, dan konsumsi energi *standby* (Hu, dkk., 2019). E_{cut} dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$E_{cut} = E_{MC} + E_{ZF} + E_{SR} + E_{CS} + E_0 \quad (4.3)$$

Selama proses pemotongan, konsumsi energi pemotongan pada proses *multi-pass turning* dihasilkan dari daya pemotongan temporal yang diasumsikan tetap. Profil daya pemotongan pada proses *multi-pass turning* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.

Pada Persamaan (4.3), E_{MC} dikembangkan berdasarkan model konsumsi energi pemesinan pada Lu, dkk. (2016). Model konsumsi energi ini akan terbagi menjadi proses *roughing* dan proses *finishing*. Konsumsi energi pembuangan material dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{MC} = P_{mr,i} \times t_{mr} + P_{ms} \times t_{ms} \quad (4.4)$$

Daya pada proses *roughing* $P_{mr,i}$ dan proses *finishing* P_{ms} (Chauhan, dkk., 2014) dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$P_{mr,i} = \frac{1000k_f f_{r,i}^\mu d_{r,i}^9 V_{r,i}}{6120\eta} \quad (4.5)$$

$$P_{ms} = \frac{1000k_f f_s^\mu d_s^9 V_s}{6120\eta} \quad (4.6)$$

Pada Persamaan (4.5) dan (4.6), kecepatan potong pada proses *roughing* $V_{r,i}$ dan proses *finishing* V_s dapat dihitung dengan:

$$V_{r,i} = \frac{\pi(D_i - d_{r,i})N_{r,i}}{1000} \quad (4.7)$$

$$V_s = \frac{\pi(D_{n+1} - d_s)N_s}{1000} \quad (4.8)$$

di mana, D_i menunjukkan diameter permukaan benda kerja selama proses menunggu pada *roughing pass* ke- i . $D_1 = D$; $D_i = D_{i-1} - 2d_{r,i-1}$, $i = \{2, \dots, n\}$, di mana $d_{r,i}$ adalah kedalaman pemakanan pada *roughing pass* ke- i . D_{n+1} menunjukkan diameter permukaan benda kerja pada *final pass* selama proses menunggu di mana $D_{n+1} = D_n - 2d_{r,n}$.

Konsumsi energi selama pemakanan sumbu Z E_{ZF} dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{ZF} = P_{zr,i} \times t_{mr} + P_{zs} \times t_{ms} \quad (4.9)$$

Daya pemakanan sumbu Z pada proses *roughing* $P_{zr,i}$ dan proses *finishing* P_{zs} dimodelkan dengan model kuadrat seperti Jia (2014) di mana memiliki tingkat akurasi tertinggi, sebagai berikut:

$$P_{zr,i} = A_{ZF}(N_{r,i}f_{r,i})^2 + B_{ZF}(N_{r,i}f_{r,i}) + C_{ZF} \quad (4.10)$$

$$P_{zs} = A_{ZF}(N_s f_s)^2 + B_{ZF}(N_s f_s) + C_{ZF} \quad (4.11)$$

di mana, A_{ZF} , B_{ZF} , dan C_{ZF} adalah koefisien kuadrat, koefisien monomial, dan konstanta yang didapatkan dari regresi kuadrat berdasarkan data eksperimen.

Konsumsi energi untuk rotasi *spindle* E_{SR} dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{SR} = P_{sr,i} \times t_{mr} + P_{ss} \times t_{ms} \quad (4.12)$$

Daya rotasi *spindle* pada proses *roughing* $P_{sr,i}$ dan proses *finishing* P_{ss} menggunakan persamaan linear pada Lv, Tang & Jia (2014), yaitu:

$$P_{sr,i} = B_{SR}N_{r,i} + C_{SR} \quad (4.13)$$

$$P_{ss} = B_{SR}N_s + C_{SR} \quad (4.14)$$

di mana, B_{SR} dan C_{SR} adalah koefisien monomial dan konstanta yang didapatkan dari regresi linear berdasarkan data eksperimen.

Konsumsi energi untuk semprotan pendingin E_{CS} dan konsumsi energi *standby* E_0 dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{CS} = P_{CS} \times T_{cut} \quad (4.15)$$

$$E_0 = P_0 \times T_{cut} \quad (4.16)$$

di mana, P_{CS} dan P_0 adalah daya semprotan pendingin dan daya tetap alat pemesinan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. yang diperoleh dari pengukuran aktual (Hu, dkk. 2019).

Pada Persamaan (4.15) dan (4.16), waktu pemotongan T_{cut} (Lu, dkk., 2016) dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$T_{cut} = t_{mr} + t_{ms} \quad (4.17)$$

$$t_{mr} = \sum_{i=1}^n \frac{60\pi D_i L}{1000 V_{r,i} f_{r,i}} \quad (4.18)$$

$$t_{ms} = \frac{60\pi D_{n+1} L}{1000 V_s f_s} \quad (4.19)$$

di mana, t_{mr} adalah waktu pada *roughing pass* dan t_{ms} adalah waktu pada *finishing pass*.

di mana, L adalah panjang benda kerja yang dipotong.

b. Konsumsi energi non-pemotongan (E_{non})

Konsumsi energi non-pemotongan pada proses *multi-pass turning* dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu konsumsi energi jalur alat potong, konsumsi energi penggantian alat potong, dan konsumsi energi perubahan kecepatan rotasi *spindle* (Hu, Liu, Peng, Tang & Tiwari, 2018). Namun, pada penelitian ini diasumsikan tidak ada penggantian jenis alat potong sehingga konsumsi energi tersebut ditiadakan. E_{non} dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$E_{non} = E_{TP} + E_{SRC} \quad (4.20)$$

Pemakanan pada *multi-pass turning* terdapat lima aktivitas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Aktivitas pemakanan pertama dan ke-lima tidak harus dimodelkan karena aktivitas tersebut sangatlah cepat. Kemudian, aktivitas pemakanan ke-empat berkaitan dengan perubahan kecepatan rotasi *spindle*. Oleh sebab itu, konsumsi energi jalur alat potong E_{TP} dapat dituliskan sebagai berikut:

$$E_{TP} = E_{TP}^2 + E_{TP}^3 \quad (4.21)$$

di mana, E_{TP}^2 dan E_{TP}^3 adalah konsumsi energi pada aktivitas pemakanan ke-dua dan ke-tiga.

Aktivitas pemakanan ke-dua menggunakan kecepatan rotasi *spindle* dan arah pemakanannya adalah Z-aksial. Konsumsi energi *tool path* pada aktivitas pemakanan ke-dua dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{TP}^2 = P_0(t_2) + (P_{sr,i} + P_{zr,i})t_{2r,i} + (P_{ss} + P_{zs})t_{2s} \quad (4.22)$$

$$t_2 = t_{2r,i} + t_{2s} \quad (4.23)$$

$$t_{2r,i} = \sum_{i=1}^n \frac{60\Delta d_z}{N_{r,i}f_{r,i}} \quad (4.24)$$

$$t_{2s} = \frac{60\Delta d_z}{N_s f_s} \quad (4.25)$$

di mana, $t_{2r,i}$ dan t_{2s} adalah waktu aktivitas pemakanan ke-dua pada *roughing pass* dan *finishing pass* serta Δd_z adalah jarak *air-cutting* sebelum memotong material.

Aktivitas pemakanan ke-tiga berlangsung cepat dan arah pemakanannya adalah X-aksial. Konsumsi energi *tool path* pada aktivitas pemakanan ke-tiga dimodelkan sebagai berikut:

$$E_{TP}^3 = (P_0 + P_{XR})t_3 + P_{sr,i}(t_{3r,i}) + P_{ss}(t_{3s}) \quad (4.26)$$

$$t_3 = t_{3r,i} + t_{3s} \quad (4.27)$$

$$t_{3r,i} = \sum_{i=1}^n \frac{60(\Delta d_x + d_{r,i})}{1000v_{XR}} \quad (4.28)$$

$$t_{3s} = \frac{60(\Delta d_x + d_s)}{1000v_{XR}} \quad (4.29)$$

di mana, $t_{3r,i}$ dan t_{3s} adalah waktu aktivitas pemakanan ke-tiga pada *roughing pass* dan *finishing pass*; Δd_x adalah jarak penarikan alat potong pada sumbu X; dan v_{XR} adalah kecepatan pemakanan cepat pada sumbu X.

Pada *multi-pass turning*, kecepatan rotasi *spindle* mengalami: (1) akselerasi dari 0 rpm ke $N_{r,1}$ rpm; (2) akselerasi atau deselerasi dari $N_{r,i}$ rpm ke $N_{r,i+1}$ rpm dan $N_{r,n}$ rpm ke N_s rpm; (3) deselerasi dari N_s rpm ke 0 rpm. Oleh sebab itu, konsumsi energi perubahan kecepatan rotasi *spindle* E_{SRC} didapatkan dirumuskan sebagai berikut:

$$E_{SRC} = E_{sra} + E_{srm} + E_{srd} \quad (4.30)$$

Konsumsi energi untuk akselerasi dari 0 rpm ke $N_{r,1}$ rpm dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_{sra} = \int_0^{t_{sra}} (P_0 + P_{sra}) dt \quad (4.31)$$

$$P_{sra} = B_{SR} \times \left(\frac{30\alpha A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times (\alpha A t) \quad (4.32)$$

$$t_{sra} = \frac{2\pi N_{r,1}}{60\alpha_A} \quad (4.33)$$

di mana P_{sra} dan t_{sra} adalah daya dan waktu yang dibutuhkan untuk akselerasi dari 0 rpm ke $N_{r,1}$ rpm; α_A adalah akselerasi sudut *spindle*; dan T_A adalah torsi akselerasi *spindle*.

Konsumsi energi untuk akselerasi/deselerasi dari $N_{r,i}$ rpm ke $N_{r,i+1}$ rpm dan $N_{r,n}$ rpm ke N_s rpm (Hu, dkk., 2017) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_{srm} = \int_0^{t_{srm}} (P_0) dt + \int_0^{t_{srr,i}} (P_{srr,i}) dt + \int_0^{t_{srs}} (P_{srs}) dt \quad (4.34)$$

$$P_{srr,i} = \begin{cases} B_{SR} \times \left(N_{r,i-1} + \frac{30\alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times \left(\frac{\pi N_{r,i-1}}{30} + \alpha_A t \right), & \text{bila } N_{r,i} > N_{r,i-1} \\ 0, & \text{bila } N_{r,i} < N_{r,i-1} \end{cases} \quad (4.35)$$

$$P_{srs} = \begin{cases} B_{SR} \times \left(N_{r,n} + \frac{30\alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times \left(\frac{\pi N_{r,n}}{30} + \alpha_A t \right), & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ 0, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases} \quad (4.36)$$

$$t_{srm} = t_{srr,i} + t_{srs} \quad (4.37)$$

$$t_{srr,i} = \sum_{i=2}^n \begin{cases} \frac{2\pi(N_{r,i}-N_{r,i-1})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_{r,i} > N_{r,i-1} \\ \frac{2\pi(N_{r,i}-N_{r,i-1})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_{r,i} < N_{r,i-1} \end{cases} \quad (4.38)$$

$$t_{srs} = \begin{cases} \frac{2\pi(N_s-N_{r,n})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ \frac{2\pi(N_s-N_{r,n})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases} \quad (4.39)$$

di mana, $i = \{2, \dots, n\}$; $P_{srr,i}$ dan $t_{srr,i}$ adalah daya dan waktu yang dibutuhkan untuk akselerasi dari $N_{r,i}$ rpm ke $N_{r,i+1}$ rpm; P_{srs} dan t_{srs} adalah daya dan waktu yang dibutuhkan untuk akselerasi dari $N_{r,n}$ rpm ke N_s ; dan α_D adalah deselerasi sudut *spindle*.

Konsumsi energi untuk deselerasi dari N_s rpm ke 0 rpm dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$E_{srd} = P_0 \times t_{srd} \quad (4.40)$$

$$t_{srd} = \frac{-2\pi N_s}{60\alpha_D} \quad (4.41)$$

di mana, t_{srd} adalah waktu yang dibutuhkan untuk deselerasi dari N_s rpm ke 0 rpm.

(2) Fungsi waktu pemesinan (T_{total})

Sama halnya dengan konsumsi energi, waktu pemesinan diperoleh dari waktu pemesinan pemotongan dan non-pemotongan (Hu, dkk., 2019). Berdasarkan

Persamaan (4.18), (4.19), (4.24), (4.25), (4.28), (4.29), (4.33), (4.38) dan (4.39), waktu pemesinan untuk *multi-pass turning* dapat dihitung dengan Persamaan (4.42).

$$\begin{aligned}
 T_{total} &= t_{mr} + t_{ms} + t_{2r,i} + t_{2s} + t_{3r,i} + t_{3s} + t_{sra} + t_{srr,i} + t_{srs} + t_{srd} \\
 &= \sum_{i=1}^n \frac{60\pi D_i L}{1000 V_{r,i} f_{r,i}} + \frac{60\pi D_{n+1} L}{1000 V_s f_s} + \sum_{i=1}^n \frac{60\Delta d_z}{N_{r,i} f_{r,i}} + \frac{60\Delta d_z}{N_s f_s} + \sum_{i=1}^n \frac{60(\Delta d_x + d_{r,i})}{1000 v_{XR}} + \\
 &\frac{60(\Delta d_x + d_s)}{1000 v_{XR}} + \frac{2\pi N_{r,1}}{60\alpha_A} + \sum_{i=2}^n \begin{cases} \frac{2\pi(N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_{r,i} > N_{r,i-1} \\ \frac{2\pi(N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_{r,i} < N_{r,i-1} \end{cases} + \\
 &\begin{cases} \frac{2\pi(N_s - N_{r,n})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ \frac{2\pi(N_s - N_{r,n})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases} + \frac{-2\pi N_s}{60\alpha_D} \quad (4.42)
 \end{aligned}$$

Pada Persamaan (4.42), $t_{srr,i}$ dan t_{srs} terdapat suatu kondisi di mana *spindle* dapat mengalami akselerasi atau deselerasi. Jika kecepatan rotasi *spindle* saat ini lebih tinggi daripada yang sebelumnya, maka perhitungan waktu perubahan kecepatan rotasi *spindle* menggunakan akselerasi sudut *spindle* (α_A). Jika kecepatan rotasi *spindle* saat ini lebih rendah daripada yang sebelumnya, maka perhitungan waktu perubahan kecepatan rotasi *spindle* menggunakan deselerasi sudut *spindle* (α_D).

(3) Fungsi emisi karbon (CE_{total})

Emisi karbon yang terlibat dalam sistem pemesinaan CNC *turning* dan dipengaruhi oleh parameter pemotongan adalah emisi karbon yang berasal dari konsumsi energi, alat potong, dan cairan potong (Yi, dkk., 2015). Emisi karbon untuk *multi-pass turning* CE_{total} dapat dihitung dengan Persamaan (4.43).

$$CE_{total} = CE_{elec} + CE_{tool} + CE_{fluid} \quad (4.43)$$

$$CE_{elec} = CEF_{elec} \times E_{total} \quad (4.44)$$

$$CE_{tool} = \frac{T_{cut}}{(R+1)T_p} \times CEF_{tool} \times M_{tool} \quad (4.45)$$

di mana,

$$T_p = \theta T_r + (1 - \theta) T_s \quad (4.46)$$

$$T_r = \sum_{i=1}^n \frac{60C_o}{V_{r,i}^p f_{r,i}^q d_{r,i}^r} \quad (4.47)$$

$$T_s = \frac{60C_o}{V_s^p f_s^q d_s^r} \quad (4.48)$$

$$CE_{fluid} = \frac{T_{total}}{2.592.000T_{fluid}} \times \left[CEF_{oil} \times (V_{in} + V_{ad}) + CEF_{wc} \times \frac{(V_{in} + V_{ad})}{\delta_f} \right] \quad (4.49)$$

Catatan: T_{fluid} adalah siklus penggantian cairan potong dengan satuan bulan sehingga perlu dikonversi ke satuan detik dengan mengalikan 2.592.000.

Pada Persamaan (4.44), CE_{elec} merupakan bentuk hubungan linear dari faktor emisi karbon listrik CEF_{elec} dengan total konsumsi energi selama proses pemesinan E_{total} . Nilai CEF_{elec} akan berbeda-beda di tiap daerah karena adanya perbedaan struktur jaringan listrik. Dalam penelitian ini, nilai CEF_{elec} diadaptasi dari studi faktor emisi *baseline* yang dilakukan oleh National Development & Reform Commission of China, yaitu sebesar $2,25 \times 10^{-7}$ kgCO₂/J (NDRC, 2013). Kemudian, E_{total} dapat diperoleh dari Persamaan (4.2).

Pada Persamaan (4.45), CE_{tool} dapat diperoleh dari perkalian dari perbandingan waktu pemotongan T_{cut} terhadap masa hidup alat potong dengan total emisi karbon alat potong selama siklus hidupnya. CEF_{tool} merupakan faktor emisi karbon alat potong. Dalam penelitian ini, nilai CEF_{tool} yang digunakan sebesar 31,5 kgCO₂/J. M_{tool} adalah massa alat potong. Dalam siklus hidupnya, sebuah alat potong sering dilakukan pengasahan ulang sebanyak R kali untuk mempertajam alat tersebut. Oleh sebab itu, masa hidup dari sebuah alat potong sama dengan $(R + 1)T_p$. T_p adalah *tool-life* yang mempertimbangkan *roughing* dan *finishing pass*. *Tool-life* dapat diestimasi dari persamaan *tool life* Taylor (Bagaber & Yusoff, 2019). Persamaan tersebut dapat diekstensikan dengan memasukkan parameter pemotongan pada proses *multi-pass turning*.

Pada Persamaan (4.49), CE_{fluid} dapat diperoleh perkalian dari perbandingan total waktu pemesinan T_{total} terhadap siklus penggantian cairan potong T_{fluid} dengan total emisi karbon cairan potong selama siklus hidupnya. Umumnya, cairan potong dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu cairan potong berbasis air dan cairan potong berbasis minyak. Dalam penelitian ini, cairan potong yang digunakan adalah cairan potong berbasis air di mana minyak larut dicampur dengan air secara bersamaan. CEF_{oil} dan CEF_{wc} ada faktor emisi karbon minyak larut dan limbah cair. Dalam penelitian ini, nilai CEF_{oil} dan CEF_{wc} yang digunakan berturut-turut sebesar 500 kgCO₂/m³ dan 200 kgCO₂/m³. V_{in} dan V_{ad} adalah volume mula-mula dan volume tambahan minyak larut serta δ_f adalah konsentrasi cairan potong.

(4) Fungsi biaya produksi (PC_{total})

Biaya produksi dalam sistem pemesinan CNC *turning* meliputi biaya konsumsi energi listrik, biaya alat potong, biaya cairan pemotongan, dan biaya manajemen serta biaya tenaga kerja (Tian, dkk., 2019). Biaya produksi PC_{total} dapat dihitung dengan Persamaan (4.50).

$$PC_{total} = PC_{elec} + PC_{tool} + PC_{fluid} + PC_m \quad (4.50)$$

$$PC_{elec} = E_{total} \times C_{elec} \quad (4.51)$$

$$PC_{tool} = \frac{T_{cut}}{(R+1)T_p} \times C_{tool} \times M_{tool} \quad (4.52)$$

$$PC_{fluid} = \frac{T_{total}}{2.592.000T_{fluid}} \times (V_{in} + V_{ad}) \times C_{fluid} \quad (4.53)$$

$$PC_m = T_{total} \times C_m \quad (4.54)$$

di mana, C_{elec} , C_{tool} , C_{fluid} , dan C_m secara berturut-turut merupakan koefisien dari biaya listrik, biaya alat potong, biaya cairan potong, serta biaya manajemen dan tenaga kerja.

4.3.2. Fungsi Kendala

Parameter pemotongan yang optimal harus memenuhi beberapa kendala dalam model. Jika mesin dioperasikan di luar batas kemampuannya, maka mesin akan mengalami malfungsi. Empat fungsi tujuan yang telah dijelaskan akan dibatasi oleh beberapa kendala sebagai berikut:

- (1) Kendala parameter pemotongan: Rentang kecepatan rotasi *spindle*, kecepatan pemakanan, dan kedalaman pemakanan yang tersedia dinyatakan dalam batas bawah dan bawah atas. Rentang tersebut bergantung pada tipe alat potong, tipe mesin, dan tipe material benda kerja;
- (2) Kendala *tool-life*: Rentang *tool-life* harus dipenuhi untuk mencapai produksi yang ekonomis dan kualitas komponen yang diproses. Nilai minimum *tool-life* tidak boleh kurang dari lamanya waktu pemotongan agar alat dapat digunakan untuk memotong satu benda kerja. Begitu pula, nilai maksimum *tool-life* tidak boleh lebih dari lamanya waktu pemotongan agar alat dapat digunakan untuk memotong satu benda kerja. Jika rentang tersebut tidak terpenuhi, maka alat potong tidak akan sepenuhnya digunakan;

Tabel 4.1. Rekapitulasi Fungsi Tujuan

Fungsi Tujuan	Model Matematika
<p>Konsumsi energi</p>	$E_{total} = \left[\frac{k_f f_{r,i}^{\mu} d_{r,i}^{\theta} \pi (D_i - d_{r,i}) N_{r,i}}{6120 \eta} + A_{ZF} (N_{r,i} f_{r,i})^2 + B_{ZF} (N_{r,i} f_{r,i}) + C_{ZF} + B_{SR} N_{r,i} + C_{SR} + B_{SR} N_{r,i} + C_{SR} \right] \times$ $\sum_{i=1}^n \frac{60 \pi D_i L}{1000 v_{r,i} f_{r,i}} + \left[\frac{k_f f_s^{\mu} d_s^{\theta} \pi (D_{n+1} - d_s) N_s}{6120 \eta} + A_{ZF} (N_s f_s)^2 + B_{ZF} (N_s f_s) + C_{ZF} + B_{SR} N_s + C_{SR} \right] \times \frac{60 \pi D_{n+1} L}{1000 v_s f_s} + (P_{CS} +$ $P_0) \times \left(\sum_{i=1}^n \frac{60 \pi D_i L}{1000 v_{r,i} f_{r,i}} + \frac{60 \pi D_{n+1} L}{1000 v_s f_s} \right) + P_0 \times \left(\sum_{i=1}^n \frac{60 \Delta d_z}{N_{r,i} f_{r,i}} + \frac{60 \Delta d_z}{N_s f_s} \right) + [B_{SR} N_{r,i} + C_{SR} + A_{ZF} (N_{r,i} f_{r,i})^2 +$ $B_{ZF} (N_{r,i} f_{r,i}) + C_{ZF}] \times \sum_{i=1}^n \frac{60 \Delta d_z}{N_{r,i} f_{r,i}} + [B_{SR} N_s + C_{SR} + A_{ZF} (N_s f_s)^2 + B_{ZF} (N_s f_s) + C_{ZF}] \times \frac{60 \Delta d_z}{N_s f_s} + (P_0 + P_{XR}) \times$ $\left(\sum_{i=1}^n \frac{60 (\Delta d_x + d_{r,i})}{1000 v_{XR}} + \frac{60 (\Delta d_x + d_s)}{1000 v_{XR}} \right) + (B_{SR} N_{r,i} + C_{SR}) \times \sum_{i=1}^n \frac{60 (\Delta d_x + d_{r,i})}{1000 v_{XR}} + (B_{SR} N_s + C_{SR}) \times \frac{60 (\Delta d_x + d_s)}{1000 v_{XR}} +$ $\int_0^{\frac{2 \pi N_{r,1}}{60 \alpha_A}} \left[P_0 + B_{SR} \times \left(\frac{30 \alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times (\alpha_A t) \right] dt +$ $\sum_{i=2}^n \begin{cases} \frac{2 \pi (N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60 \alpha_A}, & \text{bila } N_{r,i} > N_{r,i-1} \\ \frac{2 \pi (N_s - N_{r,n})}{60 \alpha_A}, & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ \frac{2 \pi (N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60 \alpha_D}, & \text{bila } N_{r,i} < N_{r,i-1} \\ \frac{2 \pi (N_s - N_{r,n})}{60 \alpha_D}, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases} [P_0] dt +$ $\int_0^{\frac{2 \pi (N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60 \alpha_A}, \text{ bila } N_{r,i} > N_{r,i-1}} \left\{ B_{SR} \times \left(N_{r,i-1} + \frac{30 \alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times \left(\frac{\pi N_{r,i-1}}{30} + \alpha_A t \right), \text{ bila } N_{r,i} > N_{r,i-1} \right\} dt +$ $\int_0^{\frac{2 \pi (N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60 \alpha_D}, \text{ bila } N_{r,i} < N_{r,i-1}} \left\{ 0, \text{ bila } N_{r,i} < N_{r,i-1} \right\} dt +$ <p>...</p>

	$\dots + \int_0^{\begin{cases} \frac{2\pi(N_s - N_{r,n})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ \frac{2\pi(N_s - N_{r,n})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases}} \left[\begin{cases} B_{SR} \times \left(N_{r,n} + \frac{30\alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times \left(\frac{\pi N_{r,n}}{30} + \alpha_A t \right), & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ 0, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases} \right] dt + P_0 \times \frac{-2\pi N_s}{60\alpha_D}$
Waktu pemesinan	$T_{total} = \sum_{i=1}^n \frac{60\pi D_i L}{1000 V_{r,i} f_{r,i}} + \frac{60\pi D_{n+1} L}{1000 V_s f_s} + \sum_{i=1}^n \frac{60\Delta d_z}{N_{r,i} f_{r,i}} + \frac{60\Delta d_z}{N_s f_s} + \sum_{i=1}^n \frac{60(\Delta d_x + d_{r,i})}{1000 v_{XR}} + \frac{60(\Delta d_x + d_s)}{1000 v_{XR}} + \frac{2\pi N_{r,1}}{60\alpha_A} +$ $\sum_{i=2}^n \begin{cases} \frac{2\pi(N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_{r,i} > N_{r,i-1} \\ \frac{2\pi(N_{r,i} - N_{r,i-1})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_{r,i} < N_{r,i-1} \end{cases} + \begin{cases} \frac{2\pi(N_s - N_{r,n})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ \frac{2\pi(N_s - N_{r,n})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases} + \frac{-2\pi N_s}{60\alpha_D}$
Emisi karbon	$CE_{total} = CEF_{elec} \times E_{total} + \frac{T_{cut}}{(R+1) \times \left[\theta \left(\sum_{i=1}^n \frac{60C_O}{V_{r,i}^p f_{r,i}^q d_{r,i}^r} \right) + (1-\theta) \left(\frac{60C_O}{V_s^p f_s^q d_s^r} \right) \right]} \times CEF_{tool} \times M_{tool} + \frac{T_{total}}{2.592.000 T_{fluid}} \times$ $\left[CEF_{oil} \times (V_{in} + V_{ad}) + CEF_{wc} \times \frac{(V_{in} + V_{ad})}{\delta_f} \right]$
Biaya produksi	$PC_{total} = E_{total} \times C_{elec} + \frac{T_{cut}}{(R+1) \times \left[\theta \left(\sum_{i=1}^n \frac{60C_O}{V_{r,i}^p f_{r,i}^q d_{r,i}^r} \right) + (1-\theta) \left(\frac{60C_O}{V_s^p f_s^q d_s^r} \right) \right]} \times C_{tool} \times M_{tool} + \frac{T_{total}}{2.592.000 T_{fluid}} \times (V_{in} +$ $V_{ad}) \times C_{fluid} + T_{total} \times C_m$

- (3) Kendala gaya potong: Gaya potong harus dibatasi untuk menghindari defleksi yang berlebihan pada benda kerja dan alat potong serta kerusakan pada alat potong yang dapat mengakibatkan kesalahan dimensi;
- (4) Kendala daya: Daya yang dibutuhkan selama operasi pemotongan sebaiknya tidak melebihi daya mesin yang tersedia;
- (5) Kendala suhu permukaan geram: *Tool-life* sangat dipengaruhi sekali oleh suhu permukaan geram. Seiring menurunnya ketajaman dan kekerasan, alat potong tidak dapat digunakan lagi untuk memotong jika suhu yang dihasilkan melebihi batas;
- (6) Kendala area stabil pemotongan: Kendala ini direkomendasikan oleh peneliti-peneliti sebelumnya untuk mencegah getaran pemesinan, adhesi, dan pembentukan *built-up edge*. Area stabil pemotongan sebaiknya lebih besar daripada wilayah tertentu;
- (7) Kendala kekasaran permukaan: Kekasaran permukaan menunjukkan kualitas dari benda kerja dan umumnya dipengaruhi oleh kecepatan pemakanan dan *nose radius* alat potong. Kendala kekasaran permukaan sebaiknya kurang dari nilai yang ditentukan;
- (8) Kendala relasi parameter: Kedalaman pemakanan dan kecepatan pemakanan pada proses *roughing* biasanya lebih besar daripada kedalaman pemakanan dan kecepatan pemakanan pada proses *finishing*. Namun, kecepatan potong pada proses *roughing* biasanya lebih kecil daripada kecepatan potong pada proses *finishing*. Selain itu, kedalaman material yang dibuang harus sama dengan jumlah kedalaman pemakanan, yaitu jumlah n kedalaman pemakanan pada *roughing pass* dan satu kedalaman pemakanan pada *finishing pass*. Nilai n adalah kuantitas bilangan bulat.

Persamaan matematis dari kendala-kendala model optimasi *multi-pass turning* adalah sebagai berikut:

(1) Proses *roughing*

- Kedalaman pemakanan *roughing* $d_{rL} \leq d_{r,i} \leq d_{rU}$ (4.55)

- Kecepatan pemakanan *roughing* $f_{rL} \leq f_{r,i} \leq f_{rU}$ (4.56)

- Kecepatan rotasi *spindle roughing* $\frac{1000V_{rL}}{\pi(D_i - d_{r,i})} \leq N_{r,i} \leq N_{max}$ (4.57)

- Kendala *tool-life* $T_L \leq T_r \leq T_U$ (4.58)

- Kendala gaya pemotongan $F_{r,i} = k_f f_{r,i}^\mu d_{r,i}^\vartheta \leq F_U$ (4.59)
- Kendala daya $P_{r,i} = P_{mr,i} + P_{zr,i} + P_{sr,i} + P_{CS} + P_0 \leq P_U$ (4.60)
- Kendala area stabil pemotongan $S_{r,i} = V_{r,i}^\lambda f_{r,i} d_{r,i}^v \geq Sc$ (4.61)
- Kendala suhu permukaan geram $Q_{r,i} = k_q V_{r,i}^\tau f_{r,i}^\phi d_{r,i}^\delta \leq Q_U$ (4.62)

(2) Proses *finishing*

- Kedalaman pemakanan *finishing* $d_{sL} \leq d_s \leq d_{sU}$ (4.63)
- Kecepatan pemakanan *finishing* $f_{sL} \leq f_s \leq f_{sU}$ (4.64)
- Kecepatan rotasi *spindle finishing* $\frac{1000V_{sL}}{\pi(D_{n+1}-d_s)} \leq N_s \leq N_{max}$ (4.65)
- Kendala *tool-life* $T_L \leq T_s \leq T_U$ (4.66)
- Kendala gaya pemotongan $F_s = k_f f_s^\mu d_s^\vartheta \leq F_U$ (4.67)
- Kendala daya $P_s = P_{ms} + P_{zs} + P_{ss} + P_{CS} + P_0 \leq P_U$ (4.68)
- Kendala area stabil pemotongan $S_s = V_s^\lambda f_s d_s^v \geq Sc$ (4.69)
- Kendala suhu permukaan geram $Q_s = k_q V_s^\tau f_s^\phi d_s^\delta \leq Q_U$ (4.70)
- Kendala kekasaran permukaan $\frac{f_s^2}{8R_n} \leq R_a$ (4.71)

(3) Relasi parameter

- Kecepatan potong $V_s > k_1 V_{r,i}$ (4.72)
- Kecepatan pemakanan $f_{r,i} > k_2 f_s$ (4.73)
- Kedalaman pemakanan $d_{r,i} > k_3 d_s$ (4.74)
- Total kedalaman pemakanan $d_t = d_s + \sum_{i=1}^n d_{r,i}$ (4.75)
- Jumlah *roughing pass* $n_L \leq n \leq n_U$, dan integer (4.76)

4.4. Validasi

Validasi adalah tahapan untuk mengetahui validitas formulasi model yang telah dikembangkan melalui pemeriksaan satuan. Model akan dianggap valid jika satuan pada sisi kiri persamaan sama dengan sisi kanan persamaan secara dimensional. Hasil validasi model dari Persamaan (4.2) – (4.54) adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2. Validasi Model

Pers.	Pemeriksaan Satuan	Status
4.2	$E_{total} = E_{cut} + E_{non}$ <i>Joule = Joule + Joule</i> <i>Joule = Joule</i>	Valid
4.3	$E_{cut} = E_{MC} + E_{ZF} + E_{SR} + E_{CS} + E_0$ <i>Joule = Joule + Joule + Joule + Joule + Joule</i> <i>Joule = Joule</i>	Valid
4.4	$E_{MC} = P_{mr,i} \times t_{mr} + P_{ms} \times t_{ms}$ <i>Joule = Watt.detik + Watt.detik</i> <i>Joule = Joule</i>	Valid
4.5	$P_{mr,i} = \frac{1000k_f f_{r,i}^\mu d_{r,i}^9 V_{r,i}}{6120\eta}$ <i>Watt = 1000. $\frac{Watt}{kiloWatt}$. kiloWatt</i> <i>Watt = Watt</i>	Valid
4.6	$P_{ms} = \frac{1000k_f f_s^\mu d_s^9 v_s}{6120\eta}$ <i>Watt = 1000. $\frac{Watt}{kiloWatt}$. kiloWatt</i> <i>Watt = Watt</i>	Valid
4.7	$V_{r,i} = \frac{\pi(D_i - d_{r,i})N_{r,i}}{1000}$ $\frac{m}{menit} = \frac{(mm - mm) \cdot \frac{rev}{menit}}{1000 \cdot \frac{mm}{m}}$ $\frac{m}{menit} = \frac{m}{menit}$	Valid
4.8	$V_s = \frac{\pi(D_{n+1} - d_s)N_s}{1000}$ $\frac{m}{menit} = \frac{(mm - mm) \cdot \frac{rev}{menit}}{1000 \cdot \frac{mm}{m}}$ $\frac{m}{menit} = \frac{m}{menit}$	Valid
4.9	$E_{ZF} = P_{Zr,i} \times t_{mr} + P_{Zs} \times t_{ms}$ <i>Joule = Watt.detik + Watt.detik</i> <i>Joule = Joule</i>	Valid
4.10	$P_{Zr,i} = A_{ZF}(N_{r,i}f_{r,i})^2 + B_{ZF}(N_{r,i}f_{r,i}) + C_{ZF}$ <i>Watt = Watt</i>	Valid

4.11	$P_{ZS} = A_{ZF}(N_s f_s)^2 + B_{ZF}(N_s f_s) + C_{ZF}$ $\text{Watt} = \text{Watt}$	Valid
4.12	$E_{SR} = P_{sr,i} \times t_{mr} + P_{ss} \times t_{ms}$ $\text{Joule} = \text{Watt} \cdot \text{detik} + \text{Watt} \cdot \text{detik}$ $\text{Joule} = \text{Joule}$	Valid
4.13	$P_{sr,i} = B_{SR} N_{r,i} + C_{SR}$ $\text{Watt} = \text{Watt}$	Valid
4.14	$P_{ss} = B_{SR} N_s + C_{SR}$ $\text{Watt} = \text{Watt}$	Valid
4.15	$E_{CS} = P_{CS} \times T_{cut}$ $\text{Joule} = \text{Watt} \cdot \text{detik}$ $\text{Joule} = \text{Joule}$	Valid
4.16	$E_0 = P_0 \times T_{cut}$ $\text{Joule} = \text{Watt} \cdot \text{detik}$ $\text{Joule} = \text{Joule}$	Valid
4.17	$T_{cut} = t_{mr} + t_{ms}$ $\text{detik} = \text{detik} + \text{detik}$ $\text{detik} = \text{detik}$	Valid
4.18	$t_{mr} = \sum_{i=1}^n \frac{60\pi D_i L}{1000 V_{r,i} f_{r,i}}$ $\text{detik} = \frac{60 \frac{\text{detik}}{\text{menit}} \cdot \text{mm} \cdot \text{mm}}{1000 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{menit}} \cdot \text{rev}}$ $\text{detik} = \text{detik}$	Valid
4.19	$t_{ms} = \frac{60\pi D_{n+1} L}{1000 V_s f_s}$ $\text{detik} = \frac{60 \frac{\text{detik}}{\text{menit}} \cdot \text{mm} \cdot \text{mm}}{1000 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{menit}} \cdot \text{rev}}$ $\text{detik} = \text{detik}$	Valid
4.20	$E_{non} = E_{TP} + E_{SRC}$ $\text{Joule} = \text{Joule} + \text{Joule}$ $\text{Joule} = \text{Joule}$	Valid
4.21	$E_{TP} = E_{TP}^2 + E_{TP}^3$ $\text{Joule} = \text{Joule} + \text{Joule}$ $\text{Joule} = \text{Joule}$	Valid

4.22	$E_{TP}^2 = P_0(t_2) + (P_{sr,i} + P_{zr,i})t_{2r,i} + (P_{ss} + P_{zs})t_{2s}$ <p style="text-align: center;"><i>Joule = Watt.detik + (Watt + Watt).detik</i></p> <p style="text-align: center;"><i>+ (Watt + Watt).detik</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Joule = Joule</i></p>	Valid
4.23	$t_2 = t_{2r,i} + t_{2s}$ <p style="text-align: center;"><i>detik = detik + detik</i></p> <p style="text-align: center;"><i>detik = detik</i></p>	Valid
4.24	$t_{2r,i} = \sum_{i=1}^n \frac{60\Delta d_z}{N_{r,i}f_{r,i}}$ <p style="text-align: center;"><i>detik = $\frac{60 \cdot \frac{\text{detik}}{\text{menit}} \cdot \text{mm}}{\frac{\text{rev}}{\text{menit}} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{menit}}}$</i></p> <p style="text-align: center;"><i>detik = detik</i></p>	Valid
4.25	$t_{2s} = \frac{60\Delta d_z}{N_s f_s}$ <p style="text-align: center;"><i>detik = $\frac{60 \cdot \frac{\text{detik}}{\text{menit}} \cdot \text{mm}}{\frac{\text{rev}}{\text{menit}} \cdot \frac{\text{mm}}{\text{menit}}}$</i></p> <p style="text-align: center;"><i>detik = detik</i></p>	Valid
4.26	$E_{TP}^3 = (P_0 + P_{XR})t_3 + P_{sr,i}(t_{3r,i}) + P_{ss}(t_{3s})$ <p style="text-align: center;"><i>Joule = (Watt + Watt).detik + Watt.detik + Watt.detik</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Joule = Joule</i></p>	Valid
4.27	$t_3 = t_{3r,i} + t_{3s}$ <p style="text-align: center;"><i>detik = detik + detik</i></p> <p style="text-align: center;"><i>detik = detik</i></p>	Valid
4.28	$t_{3r,i} = \sum_{i=1}^n \frac{60(\Delta d_x + d_{r,i})}{1000v_{XR}}$ <p style="text-align: center;"><i>detik = $\frac{60 \cdot \frac{\text{detik}}{\text{menit}} \cdot (\text{mm} + \text{mm})}{1000 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{menit}}}$</i></p> <p style="text-align: center;"><i>detik = detik</i></p>	Valid
4.29	$t_{3s} = \frac{60(\Delta d_x + d_s)}{1000v_{XR}}$ <p style="text-align: center;"><i>detik = $\frac{60 \cdot \frac{\text{detik}}{\text{menit}} \cdot (\text{mm} + \text{mm})}{1000 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{menit}}}$</i></p> <p style="text-align: center;"><i>detik = detik</i></p>	Valid
4.30	$E_{SRC} = E_{sra} + E_{srm} + E_{srd}$ <p style="text-align: center;"><i>Joule = Joule + Joule + Joule</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Joule = Joule</i></p>	Valid

4.31	$E_{sra} = \int_0^{t_{sra}} (P_0 + P_{sra}) dt$ <p><i>Joule = (Watt + Watt). detik</i></p> <p><i>Joule = Joule</i></p>	Valid
4.32	$P_{sra} = B_{SR} \times \left(\frac{30\alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times (\alpha_A t)$ <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{rad}{detik^2} \cdot detik \right)$</i></p> <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{rad}{detik} \right)$</i></p> <p><i>Watt = Watt + Watt</i></p> <p><i>Watt = Watt</i></p>	Valid
4.33	$t_{sra} = \frac{2\pi N_{r,1}}{60\alpha_A}$ <p><i>detik = $\frac{2\pi \cdot \frac{rev}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \cdot \frac{rad}{detik^2}}$</i></p> <p><i>detik = $\frac{2\pi \cdot \frac{2\pi rad}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \cdot \frac{rad}{detik^2}}$</i></p> <p><i>detik = detik</i></p>	Valid
4.34	$E_{srm} = \int_0^{t_{srm}} (P_0) dt + \int_0^{t_{srr,i}} (P_{srr,i}) dt + \int_0^{t_{srs}} (P_{srs}) dt$ <p><i>Joule = Watt. detik + Watt. detik + Watt. detik</i></p> <p><i>Joule = Joule</i></p>	Valid
4.35	$P_{srr,i} = B_{SR} \times \left(N_{r,i-1} + \frac{30\alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times \left(\frac{\pi N_{r,i-1}}{30} + \alpha_A t \right)$ <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{2\pi \cdot \frac{rev}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit}} + \frac{rad}{detik^2} \cdot detik \right)$</i></p> <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{2\pi \cdot \frac{2\pi rad}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit}} + \frac{rad}{detik^2} \cdot detik \right)$</i></p> <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{rad}{detik} \right)$</i></p> <p><i>Watt = Watt + Watt</i></p> <p><i>Watt = Watt</i></p>	Valid
4.36	$P_{srs} = B_{SR} \times \left(N_{r,n} + \frac{30\alpha_A t}{\pi} \right) + C_{SR} + T_A \times \left(\frac{\pi N_{r,n}}{30} + \alpha_A t \right)$ <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{2\pi \cdot \frac{rev}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit}} + \frac{rad}{detik^2} \cdot detik \right)$</i></p> <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{2\pi \cdot \frac{2\pi rad}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit}} + \frac{rad}{detik^2} \cdot detik \right)$</i></p> <p><i>Watt = Watt + N. m. $\left(\frac{rad}{detik} \right)$</i></p>	Valid

	$Watt = Watt + Watt$	
	$Watt = Watt$	
4.37	$t_{srm} = t_{srr,i} + t_{srs}$ <i>detik = detik + detik</i> <i>detik = detik</i>	Valid
4.38	$t_{srr,i} = \sum_{i=2}^n \begin{cases} \frac{2\pi(N_{r,i}-N_{r,i-1})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_{r,i} > N_{r,i-1} \\ \frac{2\pi(N_{r,i}-N_{r,i-1})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_{r,i} < N_{r,i-1} \end{cases}$ $detik = \frac{2\pi \cdot \left(\frac{rev}{menit} \frac{rev}{menit}\right)}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \frac{rad}{detik^2}}$ $detik = \frac{2\pi \cdot \left(\frac{2\pi \cdot rad}{menit} \frac{2\pi \cdot rad}{menit}\right)}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \frac{rad}{detik^2}}$ <i>detik = detik</i>	Valid
4.39	$t_{srs} = \begin{cases} \frac{2\pi(N_s-N_{r,n})}{60\alpha_A}, & \text{bila } N_s > N_{r,n} \\ \frac{2\pi(N_s-N_{r,n})}{60\alpha_D}, & \text{bila } N_s < N_{r,n} \end{cases}$ $detik = \frac{2\pi \cdot \left(\frac{rev}{menit} \frac{rev}{menit}\right)}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \frac{rad}{detik^2}}$ $detik = \frac{2\pi \cdot \left(\frac{2\pi \cdot rad}{menit} \frac{2\pi \cdot rad}{menit}\right)}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \frac{rad}{detik^2}}$ <i>detik = detik</i>	Valid
4.40	$E_{srd} = P_0 \times t_{srd}$ <i>Joule = Watt.detik</i> <i>Joule = Joule</i>	Valid
4.41	$t_{srd} = \frac{-2\pi N_s}{60\alpha_D}$ $detik = \frac{2\pi \cdot \frac{rev}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \frac{rad}{detik^2}}$ $detik = \frac{2\pi \cdot \frac{2\pi \cdot rad}{menit}}{60 \cdot \frac{detik}{menit} \frac{rad}{detik^2}}$ <i>detik = detik</i>	Valid
4.42	$T_{total} = t_{mr} + t_{ms} + t_{2r,i} + t_{2s} + t_{3r,i} + t_{3s} + t_{sra} + t_{srr,i} + t_{srs}$ $\quad \quad \quad + t_{srd}$ <i>detik = detik + detik + detik + detik + detik + detik +</i> <i>detik + detik + detik + detik</i>	Valid

	$detik = detik$	
4.43	$CE_{total} = CE_{elec} + CE_{tool} + CE_{fluid}$ $kgCO_2 = kgCO_2 + kgCO_2 + kgCO_2$ $kgCO_2 = kgCO_2$	Valid
4.44	$CE_{elec} = CEF_{elec} \times E_{total}$ $kgCO_2 = \frac{kgCO_2}{Joule} \cdot Joule$ $kgCO_2 = kgCO_2$	Valid
4.45	$CE_{tool} = \frac{T_{cut}}{(R+1)T_p} \times CEF_{tool} \times M_{tool}$ $kgCO_2 = \frac{sekon}{sekon} \cdot \frac{kgCO_2}{kg} \cdot kg$ $kgCO_2 = kgCO_2$	Valid
4.46	$T_p = \theta T_r + (1 - \theta) T_s$ $detik = detik + detik$ $detik = detik$	Valid
4.47	$T_r = \sum_{i=1}^n \frac{60C_o}{V_{r,i}^p f_{r,i}^q d_{r,i}}$ $detik = 60 \cdot \frac{detik}{menit} \cdot menit$ $detik = detik$	Valid
4.48	$T_s = \frac{60C_o}{V_s^p f_s^q d_s^q}$ $detik = 60 \cdot \frac{detik}{menit} \cdot menit$ $detik = detik$	Valid
4.49	$CE_{fluid} = \frac{T_{total}}{2.592.000 T_{fluid}} \times \left[CEF_{oil} \times (V_{in} + V_{ad}) + CEF_{wc} \times \right.$ $\left. \frac{(V_{in} + V_{ad})}{\delta_f} \right]$ $kgCO_2 = \frac{detik}{2592000 \cdot \frac{detik}{bulan} \cdot bulan} \cdot \left[\frac{kgCO_2}{m^3} \cdot (m^3 + m^3) + \frac{kgCO_2}{m^3} \cdot (m^3 + \right.$ $\left. m^3) \right]$ $kgCO_2 = kgCO_2 + kgCO_2$ $kgCO_2 = kgCO_2$	Valid
4.50	$PC_{total} = PC_{elec} + PC_{tool} + PC_{fluid} + PC_m$ $Rp = Rp + Rp + Rp + Rp$ $Rp = Rp$	Valid

4.51	$PC_{elec} = E_{total} \times C_{elec}$ $Rp = \text{Joule} \cdot \frac{Rp}{\text{Joule}}$ $Rp = Rp$	Valid
4.52	$PC_{tool} = \frac{T_{cut}}{(R+1)T_p} \times C_{tool} \times M_{tool}$ $Rp = \frac{\text{detik}}{\text{detik}} \cdot \frac{Rp}{kg} \cdot kg$ $Rp = Rp$	Valid
4.53	$PC_{fluid} = \frac{T_{total}}{2.592.000T_{fluid}} \times (V_{in} + V_{ad}) \times C_{fluid}$ $Rp = \frac{\text{detik}}{2592000 \cdot \frac{\text{detik}}{\text{bulan}} \cdot \text{bulan}} \cdot (m^3 + m^3) \frac{Rp}{m^3}$ $Rp = Rp$	Valid
4.54	$PC_m = T_{total} \times C_m$ $Rp = \text{detik} \cdot \frac{Rp}{\text{detik}}$ $Rp = Rp$	Valid

Berdasarkan Tabel 4.2, semua satuan pada sisi kiri persamaan sama dengan sisi kanan persamaan telah sama. Hal ini menunjukkan bahwa model matematika untuk proses *multi-pass turning* pada mesin CNC yang dikembangkan sudah valid.

4.5. Contoh Numerik

Model yang telah valid dilakukan pengujian dengan contoh numerik. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran aplikatif dari penggunaan model.

4.5.1. Parameter Model

Benda kerja yang dipotong adalah C45 *carbon steel* dengan diameter D dan panjang L sebesar 80 mm dan 200 mm secara berturut-turut. Benda kerja diproses dengan kecepatan potong dari 50 m/menit hingga 500 m/menit. Spesifikasi alat potong yang digunakan selama proses pemotongan ditunjukkan pada Tabel 4.3. Selama siklus hidupnya, alat potong dipertajam R sebanyak 10 kali.

Proses pemesinan yang digunakan adalah *wet cutting* dan semprotan pendingin dalam keadaan menyala sehingga daya $P_{CS} = 369,5$ W. Proses ini menggunakan cairan potong berbasis air dengan konsentrasi δ_f sebesar 0,05. Volume mula-mula cairan potong V_{in} yang digunakan sebesar $8,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ dan

volume tambahan cairan potong V_{ad} sebesar $4,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Siklus penggantian cairan potong T_{fluid} adalah 2 bulan.

Tabel 4.3. Spesifikasi Alat Potong

Parameter	Notasi (Satuan)	Nilai
Kekerasan	(HRC)	69-81
<i>Tool lead angle</i>	(°)	45
<i>Rake angle</i>	(°)	20
<i>Inclination angle</i>	(°)	5
<i>Nose radius</i>	R_n (mm)	1,2
Massa	M_{tool} (kg)	0,015

Sumber: Lu, dkk. (2016); Yi, dkk. (2015)

Parameter konsumsi energi, emisi karbon, dan biaya produksi ditunjukkan pada Tabel 4.4, Tabel 4.6, dan Tabel 4.7. Koefisien dan konstanta terkait kondisi pemesinan ditunjukkan pada Tabel 4.5. Terakhir, batas-batas kendala model ditampilkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.4. Parameter Konsumsi Energi

Parameter	Notasi (Satuan)	Nilai
Daya mesin dalam keadaan <i>standby</i>	P_0 (W)	332,1
Daya semprotan pendingin (ON/OFF)	P_{CS} (W)	369,5; 0
Akselerasi sudut <i>spindle</i>	α_A (rad/s ²)	39,78
Deselerasi sudut <i>spindle</i>	α_D (rad/s ²)	-38,79
Torsi akselerasi <i>spindle</i>	T_A (Nm)	28,42
Kecepatan pemakanan cepat pada sumbu X	v_{XR} (m/menit)	4
Daya pemakanan cepat pada sumbu X	P_{XR} (W)	135
Efisiensi daya	η	0,85
Jarak penarikan alat potong pada sumbu X	Δd_x (mm)	2,1
Jarak <i>air-cutting</i> sebelum memotong material	Δd_z (mm)	5

Sumber: Hu, dkk. (2019); Lu, dkk. (2016)

Tabel 4.5. Koefisien dan Konstanta Terkait Kondisi Pemesinan

Parameter	Notasi (Satuan)	Nilai
Koefisien monomial daya rotasi <i>spindle</i>	B_{SR}	1,09
Konstanta daya rotasi <i>spindle</i>	C_{SR}	41,12
Koefisien kuadratik daya pemakanan sumbu Z	A_{ZF}	$2,32 \times 10^{-6}$
Koefisien monomial daya pemakanan sumbu Z	B_{ZF}	0,03
Konstanta daya pemakanan sumbu Z	C_{ZF}	0,49
Koefisien kombinasi alat potong-benda kerja	k_f	108
Koefisien berbobot <i>tool-life</i>	θ	0,5
Koefisien terkait persamaan <i>tool-life</i>	C_o	6×10^{11}
Konstanta terkait persamaan <i>tool-life</i>	p	5
Konstanta terkait persamaan <i>tool-life</i>	q	1,75
Konstanta terkait persamaan <i>tool-life</i>	r	0,75
Konstanta terkait persamaan gaya dan daya potong	μ	0,75
Konstanta terkait persamaan gaya dan daya potong	ϑ	0,95
Konstanta terkait persamaan area stabil pemotongan	λ	2
Konstanta terkait persamaan area stabil pemotongan	ν	-1
Koefisien terkait persamaan suhu permukaan geram	k_q	132
Konstanta terkait persamaan suhu permukaan geram	δ	0,105
Konstanta terkait persamaan suhu permukaan geram	τ	0,4
Konstanta terkait persamaan suhu permukaan geram	φ	0,2
Konstanta hubungan <i>roughing</i> dan <i>finishing pass</i>	k_1	1
Konstanta hubungan <i>roughing</i> dan <i>finishing pass</i>	k_2	2,5
Konstanta hubungan <i>roughing</i> dan <i>finishing pass</i>	k_3	1

Sumber: Hu, dkk. (2019); Lu, dkk. (2016)

Tabel 4.6. Parameter Emisi Karbon

Parameter	Notasi (Satuan)	Nilai
Faktor emisi karbon konsumsi energi listrik	CEF_{elec} (kgCO ₂ /J)	$2,25 \times 10^{-7}$
Faktor emisi karbon alat potong	CEF_{tool} (kgCO ₂ /kg)	31,5
Faktor emisi karbon minyak terlarut	CEF_{oil} (kgCO ₂ /m ³)	500
Faktor emisi karbon limbah cairan potong	CEF_{wc} (kgCO ₂ /m ³)	200

Sumber: Yi, dkk. (2015)

Tabel 4.7. Parameter Biaya Produksi

Parameter	Notasi (Satuan)	Nilai
Koefisien biaya listrik	C_{elec} (Rp/J)	$5,28 \times 10^{-4}$
Koefisien biaya alat potong	C_{tool} (Rp/kg)	11.000
Koefisien biaya cairan potong	C_{fluid} (Rp/m ³)	$2,9 \times 10^8$
Koefisien biaya manajemen dan tenaga kerja	C_m (Rp/s)	23,61

Sumber: Bagaber & Yusoff (2019); Tian, dkk. (2019)

Tabel 4.8. Kendala

Parameter	Notasi (Satuan)	Nilai
Batas bawah kedalaman pemakanan pada <i>roughing pass</i>	d_{rL} (mm)	1
Batas atas kedalaman pemakanan pada <i>roughing pass</i>	d_{rU} (mm)	3
Batas bawah kedalaman pemakanan pada <i>finishing pass</i>	d_{sL} (mm)	1
Batas atas kedalaman pemakanan pada <i>finishing pass</i>	d_{sU} (mm)	3
Total kedalaman material yang dibuang	d_t (mm)	10
Batas bawah kecepatan pemakanan pada <i>roughing pass</i>	f_{rL} (mm/rev)	0,1
Batas atas kecepatan pemakanan pada <i>roughing pass</i>	f_{rU} (mm/rev)	0,9
Batas bawah kecepatan pemakanan pada <i>finishing pass</i>	f_{sL} (mm/rev)	0,1
Batas atas kecepatan pemakanan pada <i>finishing pass</i>	f_{sU} (mm/rev)	0,9
Gaya potong maksimum	F_U (kgf)	4.903,325
Batas bawah jumlah <i>roughing pass</i>	n_L	1
Batas atas jumlah <i>roughing pass</i>	n_U	7
Kecepatan rotasi <i>spindle</i> maksimum	N_{max} (rpm)	2.000
Daya maksimum yang tersedia pada mesin	P_U (W)	7.500
Suhu maksimum	Q_U (°C)	1.000
Kekasaran permukaan maksimum	R_a (mm)	6,3
Batas area stabil pemotongan	Sc	140
Batas bawah <i>tool-life</i>	T_L (detik)	1.500
Batas atas <i>tool-life</i>	T_U (detik)	2.700
Batas bawah kecepatan potong <i>roughing pass</i>	V_{rL} (m/menit)	50
Batas atas kecepatan potong <i>roughing pass</i>	V_{rU} (m/menit)	500
Batas bawah kecepatan potong <i>finishing pass</i>	V_{sL} (m/menit)	50
Batas atas kecepatan potong <i>finishing pass</i>	V_{sU} (m/menit)	500

Sumber: Hu, dkk. (2019); Lu, dkk. (2016)

4.5.2. Pencarian Solusi Optimal

Pencarian solusi optimal yang dilakukan pada proses *muti-pass turning* terdapat beberapa langkah, yaitu:

- (1) Penentuan nilai minimum dan maksimum fungsi tujuan

Model diselesaikan dengan melakukan enumerasi pada setiap *n roughing pass* menggunakan OptQuest pada perangkat lunak Oracle Crystal Ball. Perangkat lunak ini menggunakan fitur optimasi lanjutan dengan beberapa metodologi pencarian, termasuk *advanced tabu search* dan *scatter search* (Rosyidi, dkk., 2020). Jumlah iterasi pada tiap enumerasi sebanyak 10.000 kali untuk mendapatkan solusi optimal. Solusi minimum dan maksimum yang *feasible* diperoleh ketika *n* bernilai 3 dan 7. Nilai minimum dan maksimum pada setiap fungsi tujuan ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9. Hasil Optimasi Satu Objektif

Fungsi Tujuan	Nilai Minimum	Maksimum
E_{total} (J)	2.923.482,00	8.767.189,88
T_{total} (detik)	619,26	1.204,55
CE_{total} (kgCO ₂)	0,67	1,98
PC_{total} (Rp)	17.515,39	33.921,29

- (2) Normalisasi

Model optimasi dalam penelitian ini memiliki dimensi dengan empat satuan yang berbeda, yaitu satuan energi, satuan waktu, satuan emisi karbon, dan satuan biaya. Oleh karena itu, perlu dilakukan pembentukan fungsi transformasi (normalisasi) untuk memberikan keadilan antara setiap fungsi tujuan. Normalisasi ini akan menghasilkan nilai fungsi tujuan yang tidak berdimensi. Persamaan fungsi transformasi untuk setiap fungsi tujuan adalah sebagai berikut:

$$F_{E_{total}}^{trans} = \frac{E_{total} - 2.923.482,00}{8.767.189,88 - 2.923.482,00} = \frac{E_{total} - 2.923.482,00}{5.843.707,88} \quad (4.77)$$

$$F_{T_{total}}^{trans} = \frac{T_{total} - 619,26}{1.204,55 - 619,26} = \frac{T_{total} - 619,26}{585,29} \quad (4.78)$$

$$F_{CE_{total}}^{trans} = \frac{CE_{total} - 0,67}{1,98 - 0,67} = \frac{CE_{total} - 0,67}{1,31} \quad (4.79)$$

$$F_{PC_{total}}^{trans} = \frac{PC_{total} - 17.515,39}{33.921,29 - 17.515,39} = \frac{PC_{total} - 17.515,39}{16.405,91} \quad (4.80)$$

(3) Pembobotan

Metode pembobotan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *weighted sum*. Nilai bobot pada tiap fungsi tujuan bergantung pada preferensi pengambil keputusan yang berkepentingan. Pada penelitian ini, bobot untuk setiap fungsi tujuan bernilai sama. Oleh sebab itu, fungsi tujuan optimasi multi-objektif pada model ini adalah sebagai berikut:

$$U = 0,25 \times (F_{E_{total}}^{trans} + F_{T_{total}}^{trans} + F_{CE_{total}}^{trans} + F_{PC_{total}}^{trans}) \quad (4.81)$$

(4) Optimasi multi-objektif

Optimasi diselesaikan dengan menggunakan OptQuest pada perangkat lunak Oracle Crystal Ball. Jumlah iterasi yang digunakan sebanyak 10.000 kali untuk mendapatkan solusi minimum. Solusi minimum didapatkan ketika n bernilai 3 sehingga ada 12 variabel keputusan yang dicari nilai optimalnya.

Tabel 4.10. Hasil Optimasi Multi-objektif

Variabel Keputusan	Nilai Fungsi Tujuan	U
$N_{r,1} = 276,23$ rpm	$E_{total} = 3.143.778,23$ J	0,09
$N_{r,2} = 311,86$ rpm		
$N_{r,3} = 345,81$ rpm		
$f_{r,1} = 0,28$ mm/rev	$T_{total} = 729,14$ detik	
$f_{r,2} = 0,28$ mm/rev		
$f_{r,3} = 0,25$ mm/rev		
$d_{r,1} = 2,50$ mm	$CE_{total} = 0,72$ kgCO ₂	
$d_{r,2} = 2,50$ mm		
$d_{r,3} = 2,50$ mm		
$N_s = 469,59$ rpm	$PC_{total} = \text{Rp } 19.405,45$	
$f_s = 0,10$ mm/rev		
$d_s = 2,50$ mm		

Hasil optimasi multi-objektif ditunjukkan pada Tabel 4.10. Berdasarkan hasil optimasi, didapatkan nilai fungsi tujuan multi-objektif sebesar 0,09 di mana total konsumsi energi sebesar 3.143.778,23 Joule, total waktu pemesinan sebesar 729,14 detik, total emisi karbon sebesar 0,72 kgCO₂, dan total biaya produksi sebesar Rp 19.405,45. Hasil optimasi multi-objektif ini telah mempertimbangkan beberapa metrik utama dalam *sustainable manufacturing*, yaitu dampak lingkungan, konsumsi energi, dan biaya manufaktur. Oleh sebab itu, model yang telah

dikembangkan ini dapat digunakan industri manufaktur untuk meningkatkan efisiensi proses manufakturnya dan menghasilkan produk yang mendukung *sustainable manufacturing*.

