

2. TINJAUAN PUSTAKA

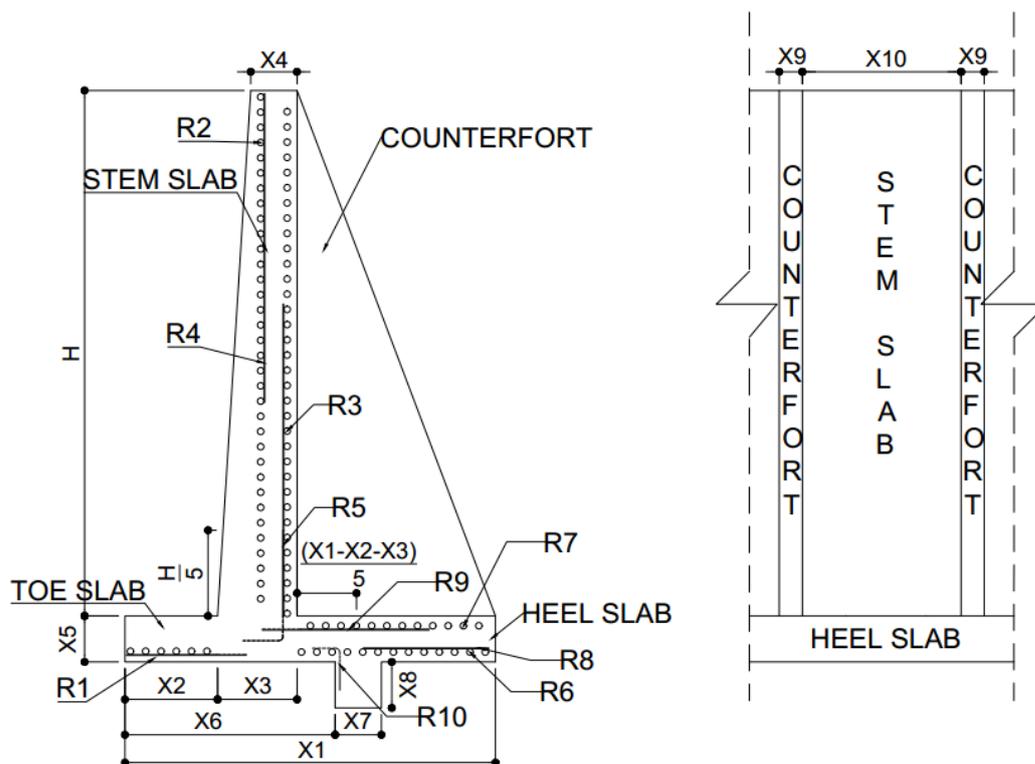
2.1. Formulasi Permasalahan Desain *Counterfort Retaining Wall* dengan *Shear Key*

Dinding penahan tanah jenis kantilever didesain untuk dapat menahan seluruh beban yang dikerjakan baik itu beban gravitasi dari berat sendiri dinding maupun dari beban lateral yang disumbang oleh tekanan tanah. Desain dari ditentukan oleh variabel-variabel geometri dan luasan tulangan yang telah dicek untuk memenuhi semua syarat keamanan baik itu secara geoteknik dan struktural. *Counterfort retaining wall* dengan *shear key* merupakan modifikasi dari jenis *cantilever retaining wall*. Penambahan *counterfort* ini bermanfaat saat dibutuhkan dinding penahan tanah yang sangat tinggi (10-12 m) karena dapat mengurangi tegangan akibat geser dan momen lentur di bagian *stem* (Clayton et al., 2013).

Proses optimasi desain *counterfort retaining wall* dengan *shear key* dalam penelitian ini akan dilakukan dengan metode metaheuristik. Penentuan model perhitungan desain yang didasarkan perhitungan akan dihubungkan dengan metode metaheuristik untuk didapatkan solusi optimasi yang diinginkan. Proses optimasi secara keseluruhan memerlukan informasi variabel, batasan (*constraints*), dan fungsi objektif. Hasil solusi akhir yang akan didapat adalah berupa variabel-variabel yang membentuk desain dinding penahan tanah yang paling ekonomis.

2.1.1. Variabel

Variabel-variabel yang digunakan dalam proses optimasi desain berhubungan dengan dimensi dari dinding penahan tipe kantilever dan luasan tulangan yang akan digunakan pada dinding penahan tipe kantilever. Variabel desain yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Potongan Penampang Tampak Memanjang

Gambar 2.1 Pemodelan *Counterfort Retaining Wall* dengan *Shear Key* dengan variabel-variabel penyusunnya

Di mana:

- X_1 = total lebar *base* [m]
- X_2 = proyeksi *toe* [m]
- X_3 = ketebalan *stem* di *bottom* [m]
- X_4 = ketebalan *stem* di *top* [m]
- X_5 = ketebalan *base slab* [m]
- X_6 = jarak dari bagian depan *toe slab* ke bagian depan *shear key* [m]
- X_7 = lebar *base shear key* [m]
- X_8 = ketinggian *base shear key* [m]
- X_9 = ketebalan *counterfort* [m]
- X_{10} = Jarak antar *counterfort* [m]
- R_1 = luas dari tulangan horizontal *toe* per unit panjang dinding [mm^2]
- R_2 = luas dari tulangan horizontal lapangan *stem* per unit panjang dinding [mm^2]
- R_3 = luas dari tulangan horizontal tumpuan *stem* per unit panjang dinding [mm^2]
- R_4 = luas dari tulangan vertikal lapangan *stem* per unit panjang dinding [mm^2]

- R_5 = luas dari tulangan vertikal tumpuan *stem* per unit panjang dinding [mm^2]
 R_6 = luas dari tulangan horizontal lapangan *heel* per unit panjang dinding [mm^2]
 R_7 = luas dari tulangan horizontal tumpuan *heel slab* per unit panjang dinding [mm^2]
 R_8 = luas dari tulangan vertikal lapangan *heel slab* per unit panjang dinding [mm^2]
 R_9 = luas dari tulangan vertikal tumpuan *heel slab* per unit panjang dinding [mm^2]
 R_{10} = luas dari tulangan *shear key* per unit panjang dinding [mm^2]

Sembilan variabel pertama merupakan variabel yang berhubungan dengan dimensi dari *counterfort retaining wall* dengan *shear key*, sedangkan sebelas variabel berikutnya berhubungan dengan luas tulangan yang digunakan dalam desain. Tinggi *stem* (H) merupakan parameter desain yang ditentukan sebelum proses optimasi dilakukan. Besar jarak antar *counterfort* tergantung dari tinggi *stem* yang nilainya diambil sebesar $0,3H$. Parameter desain lain yang digunakan adalah properti tanah, besar beban *surcharge load*, harga material, spesifikasi beton bertulang, dan kemiringan tanah urugan. Properti tanah yang menjadi parameter desain meliputi sudut geser tanah (φ), kohesi tanah (c), dan massa jenis tanah (γ_s).

Adanya *upper bound* dan *lower bound* bertujuan untuk membatasi pengacakan variabel desain yang ditentukan oleh algoritma. *Upper bound* atau batas atas adalah pembatasan nilai maksimum yang dimiliki oleh variabel desain yang akan diacak, sedangkan *lower bound* atau batas bawah merupakan nilai minimum yang dimiliki oleh variabel desain yang akan diacak. *Upper bound* dan *lower bound* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Upper Bound dan *Lower Bound* untuk Variabel Desain

Parameter	<i>Lower Bounds</i>	<i>Upper Bounds</i>
X_1 (m)	$0.4H$	$0.7H$
X_2 (m)	$0.4H/3$	$0.7H/3$
X_3 (m)	$\frac{H + 48X_4}{48}$	$0.1H$
X_4 (m)	0.3	$0.1H$
X_5 (m)	$H/12$	$H/10$
X_6 (m)	0	$X_1 - X_7$
X_7 (m)	0	0.5
X_8 (m)	0	0.5
X_9 (m)	0.2	0.2
X_{10} (m)	$0.3H$	$10H$

R_1 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_2 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_3 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_4 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_5 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_6 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_7 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_8 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_9 (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)
R_{10} (mm ²)	235.62 (3D10)	28,148.67 (35D32)

Di mana:

H = tinggi dari *stem*

Pemberian batasan ini memberi keleluasan pada pemilihan variabel acak untuk mendapatkan empat kemungkinan jenis dinding. Implikasi jenis dinding yang didapat pada hasil akhir dapat diambil berdasarkan nilai dari variabel-variabel geometri. Korelasi jenis dinding dengan nilai variabel dijelaskan sebagai berikut:

1. *Counterfort retaining wall* dengan *shear key*, jenis dinding ini kita dapat apabila:
 - a. Variabel X_7 dan X_8 menunjukkan nilai $> 0,001$ m.
 - b. Variabel X_{10} menghasilkan rasio antara jarak *counterfort* dibandingkan dengan tinggi dinding yang tidak melebihi batas atas asumsi pelat dua arah ($\frac{X_{10}}{H} \leq 3$).
2. *Counterfort retaining wall*, jenis dinding ini kita dapat apabila:
 - a. Variabel X_7 atau X_8 menunjukkan nilai $\leq 0,001$ m.
 - b. Variabel X_{10} menghasilkan rasio antara jarak *counterfort* dibandingkan dengan tinggi dinding yang tidak melebihi batas atas asumsi pelat dua arah ($\frac{X_{10}}{H} \leq 3$).
3. *Retaining wall* dengan *shear key*, jenis dinding ini kita dapat apabila:
 - a. Variabel X_7 dan X_8 menunjukkan nilai $> 0,001$ m.
 - b. Variabel X_{10} menghasilkan rasio antara jarak *counterfort* dibandingkan dengan tinggi dinding yang melebihi batas atas asumsi pelat dua arah ($\frac{X_{10}}{H} > 3$).
4. *Retaining wall*, jenis dinding ini kita dapat apabila:
 - a. Variabel X_7 atau X_8 menunjukkan nilai $\leq 0,001$ m.

- b. Variabel X_{10} menghasilkan rasio antara jarak *counterfort* dibandingkan dengan tinggi dinding yang melebihi batas atas asumsi pelat dua arah ($\frac{X_{10}}{H} > 3$).

2.1.2. Batasan

Proses optimasi desain *retaining wall* memerlukan suatu batasan (*constraint*) yang dapat memastikan bahwa variabel desain yang telah ditentukan akan memberikan suatu desain *counterfort retaining wall* dengan *shear key* yang optimum dan tidak menyebabkan suatu mekanisme kegagalan. Pembatasan yang ditetapkan untuk optimasi ini dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2
Batasan-batasan desain

Constraint	Keterangan	Persyaratan
$g_1(x)$	Keamanan terhadap guling	$\frac{SF_O design}{SF_O} \leq 1$
$g_2(x)$	Keamanan terhadap geser lateral	$\frac{SF_S design}{SF_S} \leq 1$
$g_3(x)$	Keamanan terhadap daya dukung	$\frac{SF_B design}{SF_B} \leq 1$
$g_4(x)$	Keamanan terhadap guling akibat gempa	$\frac{SF_{OE} design}{SF_{OE}} \leq 1$
$g_5(x)$	Keamanan terhadap geser lateral akibat gempa	$\frac{SF_{SE} design}{SF_{SE}} \leq 1$
$g_6(x)$	Keamanan terhadap daya dukung akibat gempa	$\frac{SF_{BE} design}{SF_{BE}} \leq 1$
$g_7(x)$	<i>Base slab</i> terangkat	$q_{min} \leq 1$
$g_8(x)$	Momen <i>toe</i>	$\frac{M_d}{M_n} \leq 1$
$g_{[9-12]}(x)$	Momen <i>stem</i>	$\frac{M_d}{M_n} \leq 1$
$g_{[13-16]}(x)$	Momen <i>Heel Slab</i>	$\frac{M_d}{M_n} \leq 1$
$g_{[13-16]}(x)$	Momen <i>Heel Slab</i>	$\frac{M_d}{M_n} \leq 1$
$g_{17}(x)$	Geser <i>toe</i>	$\frac{V_d}{V_n} \leq 1$

$g_{[18,19]}(x)$	Geser stem	$\frac{V_d}{V_n} \leq 1$
$g_{[19,20]}(x)$	Geser heel Slab	$\frac{V_d}{V_n} \leq 1$
$g_{[21]}(x)$	Geser heel Slab	$\frac{V_d}{V_n} \leq 1$
$g_{[21]}(x)$	Geser heel Slab	$\frac{V_d}{V_n} \leq 1$
$g_{[21-29]}(x)$	Tulangan minimum	$\frac{A_s \text{ min}}{A_s} \leq 1$
$g_{[30-38]}(x)$	Tulangan maksimum	$\frac{A_s \text{ max}}{A_s} \leq 1$
$g_{39}(x)$	Panjang penyaluran tulangan toe	$\frac{l_{db \text{ toe}}}{X_1 - X_2 - c_c} \leq 1$
$g_{40}(x)$	Panjang penyaluran tulangan tumpuan vertikal stem	$\frac{l_{dh \text{ shear key}}}{X_5 - c_c} \leq 1$
$g_{41}(x)$	Panjang penyaluran tulangan tumpuan vertikal heel	$\frac{l_{db \text{ v toe}}}{X_1 - X_2 - X_3 - c_c} \leq 1$
$g_{42}(x)$	Panjang penyaluran tulangan counterfort	$\frac{l_{dh \text{ shear key}}}{X_4 - c_c} \leq 1$
$g_{43}(x)$	Panjang penyaluran tulangan shear key	$\frac{l_{dh \text{ shear key}}}{X_5 - 2 \times c_c} \leq 1$

2.1.3. Fungsi Objektif

Fungsi objektif dalam suatu algoritma pada metode metaheuristik diartikan sebagai suatu fungsi yang akan menghasilkan *output* untuk diminimalkan atau dimaksimalkan melalui proses iterasi. Penelitian ini akan meminimalkan biaya dari *counterfort retaining wall* dengan *shear key* per unit panjang dinding, rumusan fungsi objektif dapat dilihat pada Persamaan 2.1 dan Persamaan 2.2.

$$f_{obj} = V_c C_c + w_s C_s \quad (2.1)$$

$$V_c = A_c \text{ stem} + A_c \text{ base slab} + A_c \text{ shear key} + \frac{A_c \text{ counterfort}}{X_{10}} \quad (2.2)$$

Di mana:

$A_c \text{ stem}$ = Area beton stem [mm²]

$A_c \text{ base slab}$ = Area beton base slab [mm²]

$A_c \text{ shear key}$ = Area beton shear key [mm²]

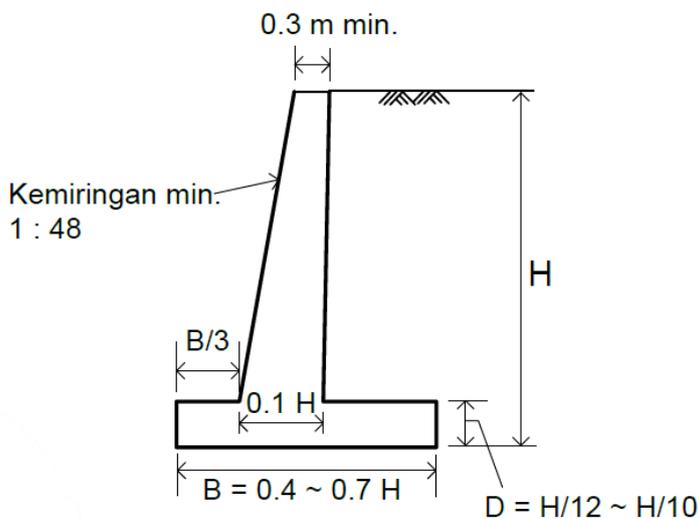
$A_c \text{ counterfort}$ = Area beton counterfort [mm²]

X_{10}	= Jarak antar <i>counterfort</i> [m]
V_c	= volume beton per unit panjang dinding [m^3]
C_c	= biaya material beton per unit volume [Rp/m^3]
w_s	= massa tulangan baja yang digunakan per unit panjang dinding [kg]
C_s	= biaya material baja per unit massa [Rp/kg]

2.2. Syarat-syarat Batasan atau *Constraint* yang Digunakan

2.2.1. SNI 8460:2017

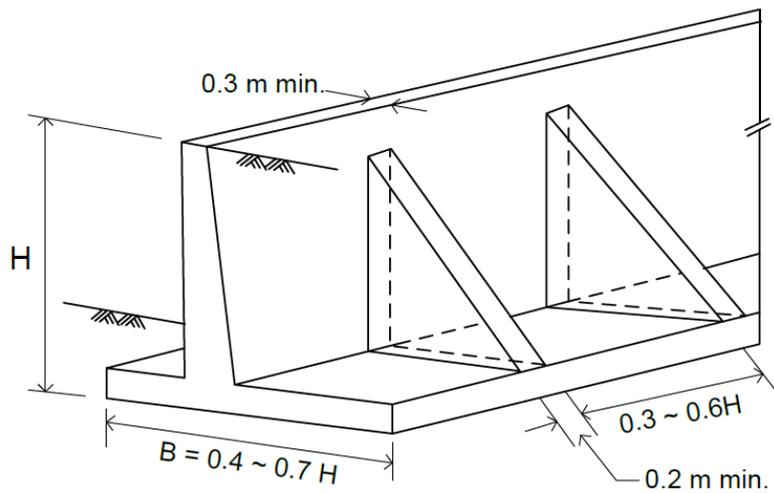
Geometri dinding penahan tanah akan dioptimasi dengan pemilihan variabel-variabel geometri yang berada dalam batasan-batasan geometri yang telah ditentukan di Pasal 10.2.5.1 dari SNI 8460:2017 yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan Gambar 2.3.



(b) Dinding Kantilever

Gambar 2.2 Batasan umum variabel desain dinding kantilever

Sumber: SNI, 8460:2017. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional, p. 193.



(c) Dinding Counterfort

Gambar 2.3 Batasan umum variabel desain dinding *counterfort*

Sumber: SNI, 8460:2017. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional, p. 193.

SNI 8460:2017 memberikan syarat keamanan terhadap guling, geser lateral, daya, dan gempa dukung seperti yang tercantum di Pasal 10.2.5.3. Batasan-batasan tersebut dapat dilihat pada Persamaan 2.3 sampai Persamaan 2.8.

$$SF_O = 2 \tag{2.3}$$

$$SF_S = 1,5 \tag{2.4}$$

$$SF_B = 3 \tag{2.5}$$

$$SF_{OE} = 1,1 \tag{2.6}$$

$$SF_{OS} = 1,1 \tag{2.7}$$

$$SF_{OB} = 1,1 \tag{2.8}$$

Di mana:

SF_O : Faktor keamanan terhadap guling

SF_S : Faktor keamanan terhadap geser lateral

SF_B : Faktor keamanan terhadap daya dukung

SF_{OE} : Faktor keamanan terhadap guling akibat gempa

SF_{OS} : Faktor keamanan terhadap geser lateral akibat gempa

SF_{OB} : Faktor keamanan terhadap daya dukung akibat gempa

2.2.2. SNI 2847:2019

Dalam model perhitungan struktur, setiap bagian kritis dari struktur dinding penahan tanah (*stem, toe, heel, counterfort*) harus dipastikan memenuhi semua syarat desain yang telah ditentukan dalam SNI 2847:2019.

2.2.2.1. Tulangan minimum

Berdasarkan SNI 2847:2019, Tabel 8.6.1.1, $A_{s\ min}$ dibatasi untuk pelat dua arah nonprategang berdasarkan Persamaan 2.9 atau Persamaan 2.10 tergantung dari nilai kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan, f_y .

$$\text{Untuk } f_y < 420 \text{ MPa, maka } A_{s\ min} = 0,0020A_g \quad (2.9)$$

$$\text{Untuk } f_y \geq 420 \text{ MPa, maka } A_{s\ min} = \frac{0,0018 \times 420}{f_y} A_g \geq 0,0014A_g \quad (2.10)$$

Di mana:

A_s = luas penampang beton

f_y = kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan

2.2.2.2. Tulangan maksimum

Rasio tulangan, ρ_b , yang menghasilkan kondisi regangan *balanced* akan menjadi batasan rasio tulangan maksimum ρ_{max} seperti yang dapat dilihat pada Persamaan 2.11 dan 2.12. ρ sendiri merupakan perbandingan antara luas tulangan, A_s , dibandingkan dengan luasan efektif penampang beton, (bd) yang dirumuskan seperti pada Persamaan 2.13. Berdasarkan definisi ρ maka $A_{s\ max}$ bisa didapat sesuai dengan Persamaan 2.14 dan 2.15.

$$\rho_b = \left(\frac{0,85\beta_1 f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{600}{600+f_y} \right) \quad (2.11)$$

$$\rho_{max} = \rho_b \quad (2.12)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (2.13)$$

$$A_{s\ max} = \rho_{max} bd \quad (2.14)$$

$$A_{s\ max} = \left(\frac{0,85\beta_1 f_c'}{f_y} \right) \left(\frac{600}{600+f_y} \right) bd \quad (2.15)$$

2.2.2.3. Spasi Maksimum

Berdasarkan SNI 2847:2019, Pasal 7.7.2 Pasal 8.7.2.2, spasi maksimum untuk tulangan ulir harus kurang dari $2h$ dan 450 mm untuk penampang kritis dan yang terkecil dari $3h$ dan

450 mm untuk penampang lainnya. Dalam model perhitungan diambil batasan $2h$ dan 450 mm untuk alasan praktis seperti pencegahan susut dan rangkai.

Di mana:

h = tebal pelat

2.2.2.4. Spasi Minimum

Berdasarkan SNI 2847:2019, pasal 25.2.1, spasi bersih tulangan dibatasi untuk tulangan nonprategang yang sejajar pada satu lapisan horizontal, spasi bersih tulangan harus tidak kurang dari nilai terbesar dari 25 mm, diameter tulangan (d_b), dan $\frac{4}{3}d_{agg}$. Dimana dalam hal ini batasan diambil berdasarkan 25 mm dan d_b .

2.2.2.5. Kombinasi Pembebanan

Perhitungan untuk pengecekan stabilitas geoteknik dapat menggunakan konsep *Allowable Stress Design* (ASD) dimana tidak digunakan faktor amplifikasi beban dan reduksi kekuatan melainkan digunakan satu faktor saja yaitu faktor keamanan. Pembebanan untuk stabilitas geoteknik dapat dilihat pada Persamaan 2.16.

$$U = D + L + H \quad (2.16)$$

Menurut SNI 2847-2019 Tabel 5.3.1 dan Pasal 5.3.8 untuk perhitungan struktur beton bertulang digunakan konsep *Load And Resistance Factor Design* (LRFD) dimana beban harus dikalikan faktor pembesaran untuk memberi desain yang lebih aman. Kombinasi beban ultimit yang digunakan untuk desain struktur dinding penahan tanah dapat dilihat pada Persamaan 2.17.

$$U = 1,2D + 1,6L + 1,6H \quad (2.17)$$

Dimana D dan L mengurangi H maka akan menjadi seperti Persamaan 2.18.

$$U = 0,9D + 1,6H \quad (2.18)$$

Di mana:

D = Beban Mati

L = Beban Hidup

H = Beban tekanan lateral tanah

2.2.2.6. Lentur

Syarat yang harus terpenuhi untuk desain dinding terhadap gaya lentur dapat mengacu pada Pasal 11.5.1.1 yang dapat dilihat pada Persamaan 2.19. Perhitungan kekuatan lentur nominal nominal, M_n , dapat dilihat pada Persamaan 2.20.

$$\Phi M_n \geq M_u \quad (2.19)$$

$$M_n = T \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2.20)$$

Nilai T adalah gaya tarik yang disumbangkan oleh tulangan dan dirumuskan pada Persamaan 2.21.

$$T = A_s f_y \quad (2.21)$$

Nilai C adalah gaya tekan yang disumbangkan oleh betondan dirumuskan pada Persamaan 2.22 dengan nilai a yang dapat dihitung dengan Persamaan 2.23.

$$C = 0,85 f_c' b a \quad (2.22)$$

$$a = \beta_1 c \quad (2.23)$$

Nilai a tidak bisa didapat hanya dari Persamaan 2.23 saja karena nilai c belum diketahui oleh karena itu perlu satu persamaan lagi yaitu persamaan *equilibrium* di Persamaan 2.24. Persamaan 2.24 kemudian bisa dijabarkan untuk mendapat Persamaan 2.25 dan kemudian nilai a dinyatakan dalam Persamaan 2.26.

$$C = T \quad (2.24)$$

$$0,85 f_c' b a = A_s f_y \quad (2.25)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f_c' b} \quad (2.26)$$

Di mana:

M_u = momen terfaktor pada penampang

Φ = faktor reduksi kekuatan, diambil 0.9 menurut Tabel 21.2.1

M_n = momen lentur nominal pada penampang

T = gaya dalam pada komponen tulangan tarik

C = gaya dalam pada material beton

f_c' = kekuatan tekan beton

β_1 = faktor yang menghubungkan tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen dengan tinggi sumbu netral, nilainya berdasarkan f_c' . Nilai β_1 diambil sebesar 0,85 untuk $17 MPa \leq f_c' \leq 28 MPa$, sebesar $\left[0,85 - \frac{0,05(f_c' - 28)}{7} \right]$ untuk $28 MPa \leq f_c' \leq 55 MPa$, dan sebesar 0,65 untuk $f_c' \geq 55 MPa$.

- c = jarak dari serat tekan terjauh ke sumbu netral
- b = lebar muka tekan komponen struktur (untuk perhitungan pelat ditinjau per 1 m)
- A_s = luas tulangan tarik longitudinal non-prategang
- f_y = kekuatan leleh tulangan yang disyaratkan

2.2.2.7. Geser

Syarat yang harus terpenuhi untuk desain dinding terhadap gaya geser dapat mengacu pada Pasal 11.5.1.1 yang dapat dilihat pada Persamaan 2.27. Perhitungan kekuatan geser nominal, V_n , dapat dilihat pada Persamaan 2.28. Dalam hal perhitungan desain dinding penahan tanah, V_n hanya mendapat kontribusi dari kekuatan geser nominal beton saja, V_c yang dirumuskan pada Persamaan 2.29 yang mengacu dari Pasal 22.5.5.1. Maka dari itu, ΦV_n dalam hal ini dapat dirumuskan menjadi Persamaan 2.30 dimana Φ diberikan sebagai faktor keamanan.

$$\Phi V_n \geq V_u \quad (2.27)$$

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.28)$$

$$V_c = 0,17\sqrt{f_c'}bd \quad (2.29)$$

$$\Phi V_n = \Phi 0,17\sqrt{f_c'}bd \quad (2.30)$$

Di mana:

- Φ = faktor reduksi kekuatan, diambil 0.75 menurut Tabel 21.2.1
- V_u = gaya geser terfaktor pada penampang yang ditinjau
- b = lebar muka tekan komponen struktur (untuk perhitungan pelat ditinjau per 1 m)
- d = jarak serat tekan terjauh ke pusat gaya semua tulangan yang tertarik
- f_c' = kekuatan tekan beton

2.2.2.8. Panjang Penyaluran

Panjang penyaluran harus mencukupi untuk timbul ikatan yang baik antara beton dan tulangan. Menurut SNI 2847:2019 Pasal 25.4.2, l_d diambil terbesar dari tiga nilai seperti yang terlihat pada Persamaan 2.31.

$$l_d = \text{MAX} \left[300 \text{ mm}, \left(\frac{f_y \psi_t \psi_e}{2,1 \lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b, \left(\frac{f_y \psi_t \psi_e}{1,7 \lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b \right] \quad (2.31)$$

Di mana:

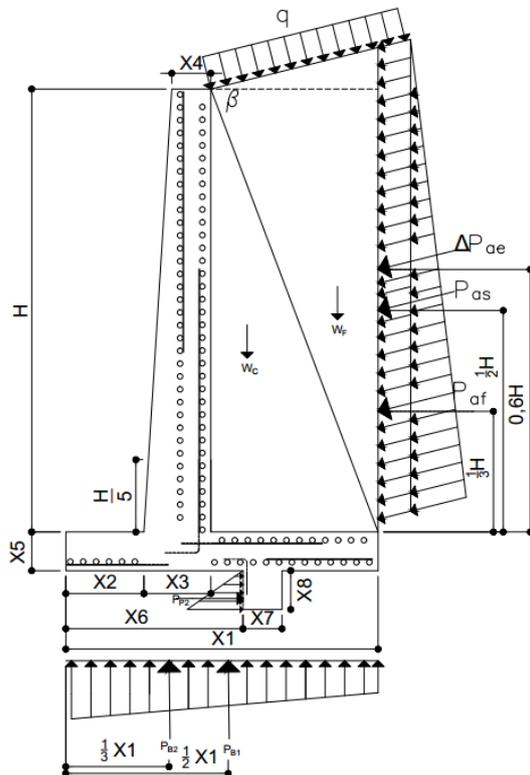
- ψ_t = Faktor modifikasi lokasi pengecoran, diambil 1 untuk model perhitungan
- ψ_e = Faktor modifikasi epoxy, diambil 1 untuk model perhitungan
- λ = Faktor modifikasi beton ringan, diambil 1 untuk model perhitungan

Panjang penyaluran kait standar dalam kondisi tarik, l_{dh} , dibatasi oleh SNI 2847-2019, Pasal 25.4.3.1. l_{dh} batang ulir yang diakhiri dengan suatu kait standar harus diambil terbesar dari tiga nilai seperti yang terlihat pada Persamaan 2.32.

$$l_{dh} = \text{MAX} \left[\left(\frac{0,24 f_y \psi_e \psi_c \psi_v}{\lambda \sqrt{f_c'}} \right) d_b, 8d_b, 150 \text{ mm} \right] \quad (2.32)$$

2.2.3. Teori Rankine

Teori Rankine adalah hasil dari penelitian oleh William Rankine (1820-1872) pada tahun 1857. Teori ini menyatakan bahwa resultan gaya akan membentuk sudut paralel dengan sudut kemiringan permukaan tanah seperti yang terlihat pada Gambar 2.4. Teori ini dapat digunakan dalam perhitungan tekanan tanah aktif dan pasif dimana dalam perhitungannya digunakan koefisien tekanan aktif, K_a , dan koefisien tekanan pasif, K_p , yang dirumuskan dengan Persamaan 2.33 dan Persamaan 2.34.



Gambar 2.4 Model pembebanan pada struktur yang memperlihatkan beban akibat tekanan tanah aktif akan sejajar dengan kemiringan tanah urugan

$$K_a = \text{Cos} \beta \frac{\text{Cos} \beta - \sqrt{\text{Cos}^2 \beta - \text{Cos}^2 \varphi}}{\text{Cos} \beta + \sqrt{\text{Cos}^2 \beta - \text{Cos}^2 \varphi}} \quad (2.33)$$

$$K_p = \text{Cos} \beta \frac{\text{Cos} \beta + \sqrt{\text{Cos}^2 \beta - \text{Cos}^2 \varphi}}{\text{Cos} \beta - \sqrt{\text{Cos}^2 \beta - \text{Cos}^2 \varphi}} \quad (2.34)$$

Di mana:

- β = kemiringan urugan
 φ = sudut gesekan tanah

Melalui koefisien tekanan aktif, K_a , perhitungan tekanan tanah aktif akibat tanah urugan dapat dilakukan berdasarkan Persamaan 2.35 dan untuk tekanan tanah aktif akibat *surcharge* dapat digunakan Persamaan 2.36. Dalam Persamaan 2.35 dan 2.36 tidak ada faktor $-2c\sqrt{K_a}$ karena diasumsikan urugan menggunakan tanah kepasiran (*cohesionless soil*). Kemudian gaya lateral akibat tanah urugan bisa didapat seperti pada Persamaan 2.37 dan gaya lateral akibat *surcharge load* dapat dilihat pada Persamaan 2.38.

$$[\sigma_h']_{active\ soil} = \gamma_{fill}HK_a \quad (2.35)$$

$$[\sigma_h']_{active\ surcharge} = qK_a \quad (2.36)$$

$$P_{active\ soil} = \frac{1}{2} \times [\sigma_h']_{active\ fill} \times H = \frac{1}{2}\gamma_{fill}K_aH^2 \quad (2.37)$$

$$P_{active\ surcharge} = [\sigma_h']_{active\ surcharge} \times H = qK_aH \quad (2.38)$$

Di mana:

- γ_{fill} = massa jenis tanah urugan
 H = kedalaman tanah di depan dinding
 q = *surcharge load*

Tekanan tanah pasif pada suatu kedalaman dengan urugan yang bersifat kohesif dapat diperoleh melalui Persamaan 2.39 dan total gaya pasif per satuan panjang dinding penahan dapat dilihat pada Persamaan 2.40, dengan nilai koefisien tekanan tanah pasif (K_p) pada Persamaan 2.34. Nilai gaya pasif tanah hanya disumbangkan oleh tanah disebelah *shear key* saja dan tanah di sebelah *base slab* diasumsikan untuk tidak berkontribusi, hal ini dilakukan sebagai upaya untuk meningkatkan keamanan desain dengan mempersiapkan kondisi disaat tanah disebelah *base slab* tidak tersedia karena sedang digali.

$$[\sigma_h']_{passive} = \gamma_{base}D_sK_p + 2c_{base}\sqrt{K_p} \quad (2.39)$$

$$P_{passive\ soil} = \frac{1}{2}\gamma_{base}K_pD_s^2 + 2c_{base}D_s\sqrt{K_p} \quad (2.40)$$

Di mana:

- γ_{base} = massa jenis tanah dasar
 D_s = kedalaman tanah di sebelah *shear key*
 c_{base} = kohesi tanah dasar

2.2.4. Teori Terzaghi

Teori Terzaghi adalah hasil dari penelitian oleh Karl von Terzaghi (1883-1963) yang ditemukan pada tahun 1943. Menurut Teori Terzaghi, daya dukung tanah didasarkan atas kontribusi dari 3 aspek yaitu: 1) Berat sendiri tanah di zona geser; 2) kohesi tanah; dan 3) pengaruh *surcharge*. Teori Terzaghi akan digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung tanah dalam pengecekan mekanisme kegagalan daya dukung tanah seperti yang tertulis pada Persamaan 2.41.

$$q_u = c_{base}N_c + \gamma_{fill}DN_q + \frac{1}{2}\gamma_{base}N_gx_1 \quad (2.41)$$

Di mana:

c_{base}	= kohesi <i>base soil</i>
γ_{fill}	= massa jenis tanah urugan
D	= kedalaman tanah urugan di muka dinding
γ_{base}	= massa jenis tanah dasar
x_1	= lebar <i>base slab</i>
N_c, N_q, N_g	= <i>bearing capacity factor</i>

2.2.5. Teori Mononobe-Okabe (M-O)

Perhitungan beban gempa dapat didekati secara *pseudo-static* dengan digunakan menggunakan Teori Monobe-Okabe (M-O) (Mononobe & Matsuo, 1929) (Kramer, 1996). Teori ini diusulkan untuk kondisi tanah yang kering dan *cohesionless* yang berdasarkan atas tiga buah asumsi (Das & Nagaratnam Sivakugan, 2018): 1) Dinding penahan tanah dapat bergerak cukup untuk menimbulkan tekanan aktif; 2) Saat nilai minimum P_a tercapai, zona yang mengalami kelongsoran akibat kegagalan geser akan bergerak pada lapisan yang mengalami *sliding*; 3) Tanah di belakang *stem* bergerak sebagai *rigid body*. Berdasarkan tiga asumsi di atas maka dapat dikatakan bahwa akselerasi terdistribusi secara merata sepanjang dinding. Dalam Teori M-O total beban lateral gempa per unit panjang dinding, P_{ae} dapat dirumuskan oleh Persamaan 2.42.

$$P_{ae} = \frac{1}{2}k_{ae}\gamma_{soil}H^2(1 - k_v) \quad (2.42)$$

Di mana:

γ_{soil}	= massa jenis tanah
H	= tinggi dinding
k_v	= koefisien akselerasi vertikal

Nilai k_{ae} didapat dengan menggunakan Persamaan 2.43.

$$k_{ae} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2(\beta) \cos(\varphi - \theta - \beta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2} \quad (2.43)$$

Di mana:

δ = sudut friksi antara tanah dengan bagian belakang dinding

φ = sudut gesekan tanah

β = kemiringan bagian belakang dinding terhadap vertikal

i = kemiringan permukaan tanah urugan

Nilai θ yang merupakan sudut inersia seismik didapat dengan menggunakan Persamaan 2.44.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right) \quad (2.44)$$

Dimana

Nilai P_{ae} merupakan total beban lateral gempa per unit panjang yang merupakan penjumlahan dari beban lateral statis, P_a , dan beban lateral dinamis, ΔP_{ae} , seperti pada Persamaan 2.45.

$$P_{ae} = P_a + \Delta P_{ae} \quad (2.45)$$

Menurut Seed dan Whitman, titik tangkap gaya komponen dinamik (gempa) berada mendekati $0,6h$ diatas dasar, sedangkan \bar{h} adalah tinggi diantara dasar dan titik tangkap total gaya yang dirumuskan pada Persamaan 2.46.

$$\bar{h} = \frac{P_a \left(\frac{h}{3} \right) + \Delta P_{ae}(0,6h)}{P_{ae}} \quad (2.46)$$

Untuk gaya dinamik pasif, alur perhitungan serupa dengan perhitungan gaya dinamik aktif yang dirumuskan pada Persamaan 2.47 dan 2.48.

$$k_{pe} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta - \beta)}{\cos \theta \cos^2(\beta) \cos(\varphi - \theta - \beta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \theta - i)}{\cos(\delta + \beta + \theta) \cos(i - \beta)}} \right]^2} \quad (2.47)$$

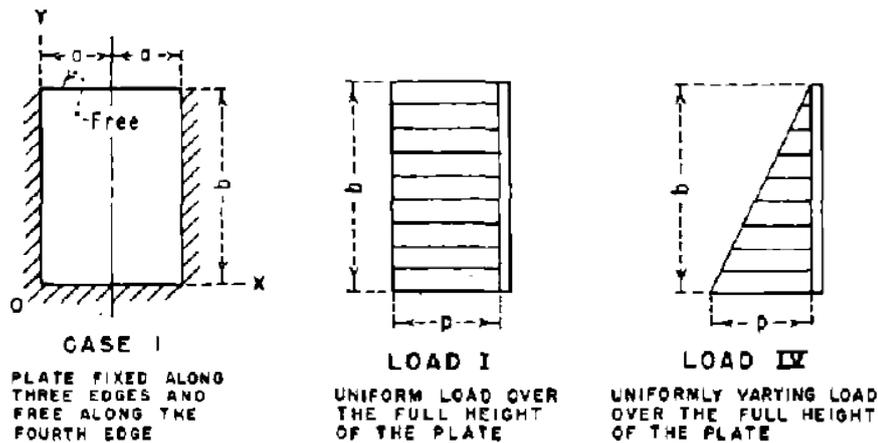
$$P_{pe} = P_p + \Delta P_{pe} \quad (2.48)$$

2.2.6. Tabel Moody untuk Pelat Terjepit di Tiga Sisi

Perhitungan momen ultimit untuk desain tulangan pelat *stem* dan pelat *heel* perlu memperhatikan kondisi pelat yang dapat diasumsikan seperti pelat yang terjepit di tiga sisi. Hal ini juga berlaku sama untuk perhitungan geser ultimit pada pelat. Kondisi terjepit di ketiga sisi ini adalah akibat dari keberadaan *counterfort* yang memberi ketahanan momen pada ketiga sisi

pelat. Teori yang dapat digunakan dalam mencari momen dan geser ultimit adalah teori yang diusulkan oleh W.T. Moody pada tahun 1963.

Moody memberikan tabel yang berisikan koefisien momen yang akan dikalikan dengan (pb^2) untuk mendapatkan momen ultimit dan koefisien reaksi yang akan dikalikan (pb) untuk mendapatkan reaksi ultimit (Moody, 1963). Tabel yang akan digunakan sesuai dengan kondisi pembebanan pada dinding adalah tabel untuk kondisi tumpuan 1 dan jenis pembebanan 1 dan 4 seperti yang dapat terlihat di Gambar 2.5. Kombinasi pembebanan 1 dan 4 ini akan dapat disuperposisi untuk merepresentasikan kondisi pembebanan yang berbentuk trapesium



Gambar 2.5. Kondisi tumpuan 1 merepresentasikan pelat terjepit di ketiga sisinya, jenis pembebanan 1 merepresentasikan pembebanan seragam, dan jenis pembebanan 3 merepresntasika pembenan yang bervariasi secara linier.

Sumber: Moody, W.T. (1963). Moments and reactions for rectangular plates. *A Water Resources Technical Publication, Engineering Monograph No. 27.*

Pemodelan perhitungan desain akan menggunakan data dari tabel berdasarkan rasio $\frac{a}{b}$ yang didapat untuk setiap tahap iterasi untuk mencari koefisien momen dan koefisien reaksi yang sesuai.

Di mana:

$$a = 0,5 \times \text{jarak antar counterfort}$$

$$b = \text{tinggi stem}$$

Dalam penggunaan koefisien dari tabel moody perlu diperhatikan bahwa koefisien yang telah dianalisa adalah untuk rasio $\frac{a}{b}$: $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1, dan $\frac{3}{2}$. Oleh karena itu, untuk kondisi dimana rasio berada diantara nilai yang tersedia akan perlu dilakukan interpolasi linier. Nilai-nilai koefisien dapat dilihat pada Lampiran 1.

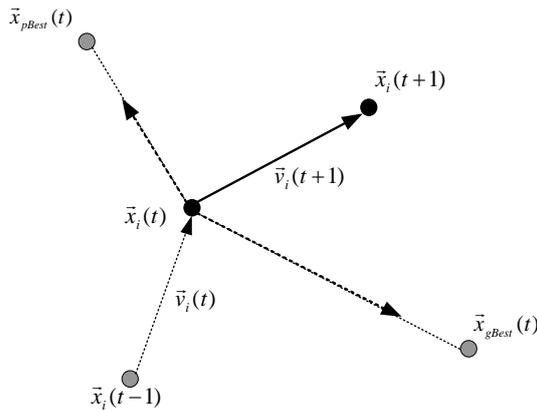
2.3. Metaheuristik

Proses optimasi dapat dilakukan menggunakan metode *trial and error* analitikal, metode heuristik, dan metode metaheuristik. Dalam penelitian ini, digunakan metode metaheuristik karena metode *trial and error* belum mampu memberikan hasil sesuai dengan yang diharapkan dan biaya yang dikeluarkan sangat bergantung pada pengalaman dari perancang (Pei & Xia, 2012). Metode analitikal dinilai tidak praktis untuk menyelesaikan proyek dengan skala besar karena adanya penambahan jumlah variabel sehingga pemecahan masalah menjadi kompleks (Savin et al., 1997). Sedangkan metode heuristik juga dinilai tidak selalu memberikan solusi yang terbaik pada semua kasus. Dari beberapa algoritma metode metaheuristik yang ada, masih terdapat beberapa batasan, dimana algoritma tersebut memerlukan parameter spesifik sehingga perlu dilakukan tuning parameter. Tuning parameter yang kurang tepat dapat meningkatkan waktu komputasi dalam penyelesaian masalah.

Heuristik berasal dari kata Yunani, *heuriskein* yang berarti seni untuk menemukan strategi dalam menyelesaikan persoalan, sedangkan *meta* berarti metodologi tingkat tinggi atau lanjut (Talbi, 2009). Metode metaheuristik merupakan metode penyelesaian yang menggunakan konsep pendekatan sehingga hasil yang dihasilkan oleh metode tersebut merupakan hasil pendekatan yang mendekati hasil eksak. Metode ini mampu menghasilkan penyelesaian yang baik dalam waktu yang cepat. Penggunaan metode ini sering diaplikasikan dalam dunia teknik sipil. Dalam metode metaheuristik terdapat beberapa jenis algoritma, beberapa di antaranya adalah *Symbiotic Organisms Search (SOS)* dan *Particle Swarm Optimization (PSO)*. Penelitian ini menggunakan algoritma SOS dan PSO.

2.3.1. Particle Swarm Optimization (PSO)

PSO adalah algoritma optimasi ciptaan Russell Eberhart dan James Kennedy pada tahun 1995 (Kennedy & Eberhart, 1995). Algoritma ini terinspirasi dari cara sekelompok burung dan ikan dalam mencari makanan dimana dalam prosesnya mereka mempunyai kecerdasan dan akan mengingat lokasi yang telah dilewati dan akan cenderung kembali mengunjungi tempat yang paling memenuhi kebutuhan makanan mereka. Ilustrasi pergerakan partikel dalam PSO bisa dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Ilustrasi Pergerakan Partikel dalam PSO

Sumber : Halim, S., & Tanaya, P., S. (2020). *Optimasi struktur retaining wall tipe kantilever dengan metode metaheuristik*. [Unpublished undergraduate thesis, Petra Christian University]. P. 14.

Alur pengerjaan PSO diawali dengan pembentukan sekelompok partikel yang memiliki kecepatan masing-masing dan ditempatkan secara acak pada sebuah ruang pencarian. Setelah itu, sebuah vektor kecepatan diberikan kepada masing-masing partikel secara acak lalu mereka akan bergerak menuju ke lokasi yang paling optimal. Arah vektor kecepatan berikutnya akan ditentukan berdasarkan posisi terbaik partikel tersebut ($X_{pbest}(t)$) dan posisi terbaik dari semua partikel yang berada di lokasi pencarian ($X_{gbest}(t)$). Pergerakan setiap partikel dipengaruhi oleh 4 faktor, yaitu kecepatan partikel saat ini ($V_i(t)$), lokasi terbaik yang pernah ditempati partikel tersebut ($P_i(t)$), lokasi terbaik dari populasi ($P_g(t)$), dan lokasi partikel tersebut ($X_i(t)$). Diagram alir PSO dapat dilihat pada Gambar 2.7. Perumusan vektor kecepatan suatu partikel dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.49.

$$v_i(t + 1) = wv_i(t) + r_1c_1(X_{pbest}(t) - X_i(t)) + r_2c_2(X_{gbest}(t) - X_i(t)) \quad (2.49)$$

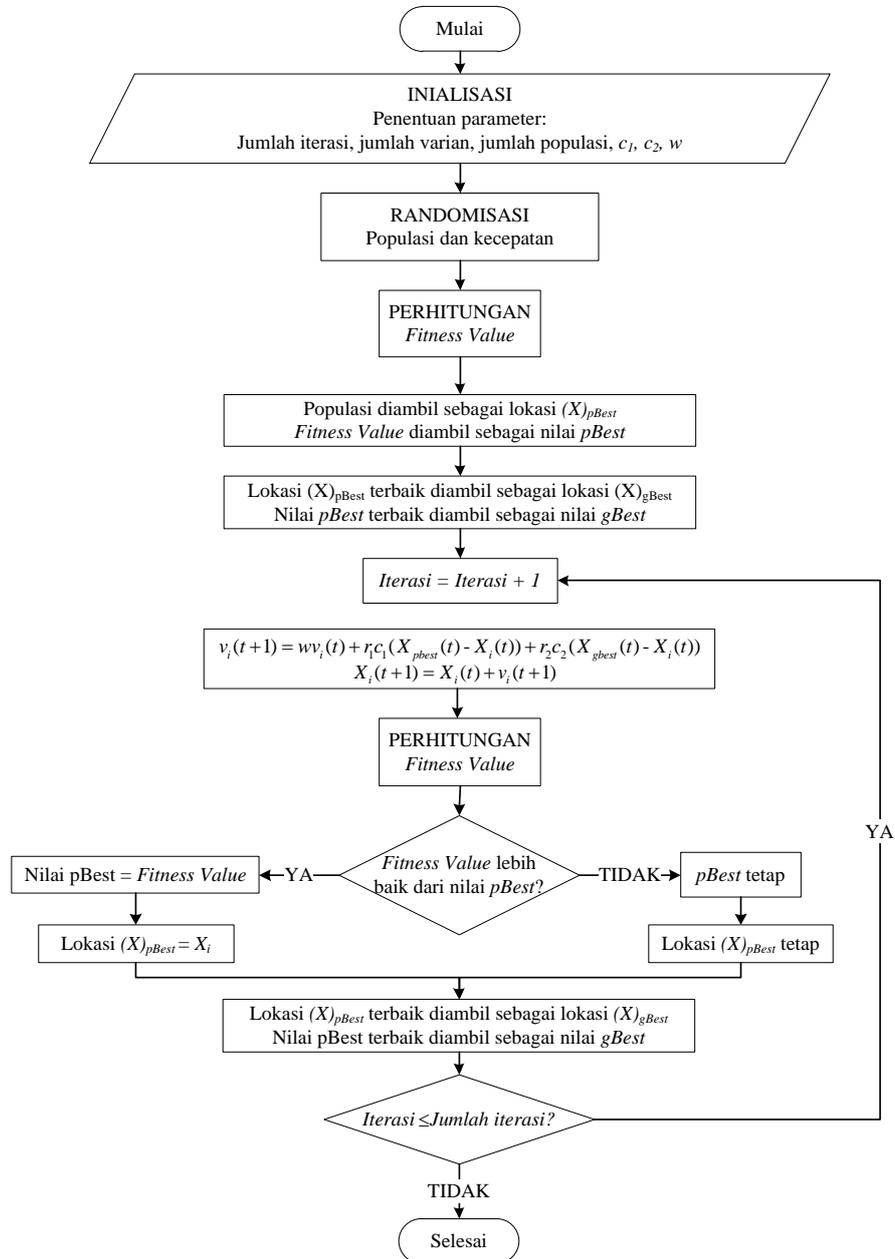
Setelah kecepatan setiap partikel ditemukan, pembaharuan lokasi partikel dapat dicari menggunakan Persamaan 2.50.

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + v_i(t + 1) \quad (2.50)$$

Keterangan:

- $v_i(t + 1)$ = kecepatan partikel selanjutnya
- w = berat partikel
- $v_i(t)$ = kecepatan partikel saat ini
- r_1, r_2 = angka acak antara 0-1
- c_1, c_2 = konstanta yang telah ditentukan sebelumnya (umumnya 2)

- $X_{pbest}(t)$ = posisi terbaik suatu partikel dalam ruang pencarian (*personal best*)
- $X_i(t)$ = posisi partikel saat ini
- $X_{gbest}(t)$ = posisi terbaik semua partikel dalam ruang pencarian (*global best*)
- $X_i(t + 1)$ = posisi partikel selanjutnya



Gambar 2.7 Diagram Alir Algoritma PSO

Sumber : Franky, & Jason, M. (2021). *Optimasi struktur baja rangka terbreis konsentris khusus dengan metode metaheuristik berdasarkan SNI 1729:2020 dan SNI 7860:2020*. [Unpublished undergraduate thesis, Petra Christian University]. P. 26.

2.3.2. Symbiotic Organisms Search (SOS)

Symbiotic Organism Search (SOS) merupakan algoritma optimasi metaheuristik yang diperkenalkan pada tahun 2014 oleh Cheng dan Prayogo (M. Y. Cheng & Prayogo, 2014). Algoritma ini mensimulasikan hubungan interaksi antar organisme di alam. Dalam suatu ekosistem, jarang ditemui organisme yang hidup dalam isolasi. Hal ini dikarenakan, adanya ketergantungan antar spesies, baik untuk makanan maupun untuk bertahan hidup. Hubungan ketergantungan ini dikenal dengan sebutan simbiosis. Simbiosis sendiri berasal dari Bahasa Yunani yang artinya hidup berdampingan.

Seperti algoritma berbasis populasi yang lain, SOS menggunakan populasi kandidat solusi dalam suatu daerah uji tertentu secara iteratif, dengan tujuan untuk mencari solusi yang global dan optimal. SOS dimulai dari populasi awal, ekosistem, yang berisi sekumpulan organisme acak dalam suatu daerah uji. Satu organisme menggambarkan satu kandidat solusi terhadap permasalahan terkait. Tiap-tiap organisme tersebut memiliki fitness value, yang merupakan derajat adaptasi terhadap objek yang diinginkan.

Fase mutualisme adalah fase dimana pasangan organisme memperoleh keuntungan dari interaksi yang terjadi. Contohnya adalah interaksi antara lebah dan bunga. Dalam fase ini, apabila hasil interaksi lebih baik dari iterasi sebelumnya, maka hasil itu akan menggantikan hasil interaksi sebelumnya. Maka, fase mutualisme dapat dituliskan ke dalam persamaan matematis seperti terlihat pada Persamaan 2.51 sampai Persamaan 2.53.

$$X_{i_{new}} = X_i + rand(0,1) \times (X_{best} - Mutual_Vector \times BF_1) \quad (2.51)$$

$$X_{j_{new}} = X_j + rand(0,1) \times (X_{best} - Mutual_Vector \times BF_2) \quad (2.52)$$

$$Mutual_Vector = \frac{X_i + X_j}{2} \quad (2.53)$$

Keterangan:

X_i = organisme yang sesuai anggota ke- i dalam ekosistem

X_j = organisme dalam ekosistem yang dipilih secara acak

$X_{i_{new}}$ = kandidat baru dari X_i

$X_{j_{new}}$ = kandidat baru dari X_j

BF_1 = angka acak antara 1 atau 2

BF_2 = angka acak antara 1 atau 2

X_{best} = solusi global dengan derajat adaptasi terbaik

Dalam fase komensalisme, salah satu organisme diuntungkan sedangkan organisme lain tidak mendapatkan dampak (tidak diuntungkan maupun dirugikan). Contoh simbiosis

komensalisme di alam adalah hubungan ikan hiu dan ikan remora. Pada fase ini, organisme acak X_j , akan berinteraksi dengan organisme X_i , dengan tujuan agar organisme X_i memperoleh keuntungan dari interaksi tersebut. Nilai baru X_i akan menggantikan nilai lama ketika hasil yang diperoleh lebih baik dari hasil interaksi sebelumnya. Diketahui juga bahwa organisme X_j tidak memperoleh keuntungan maupun kerugian. Organisme X_j menyediakan keuntungan bagi organisme X_i agar dapat meningkatkan derajat adaptasi, sehingga fase ini dapat dituliskan menjadi persamaan matematis seperti yang terlihat pada Persamaan 2.54.

$$X_{i\ new} = X_i + rand(-1,1) \times (X_{best} - X_j) \quad (2.54)$$

Keterangan:

X_i = organisme yang sesuai anggota ke- i dalam ekosistem

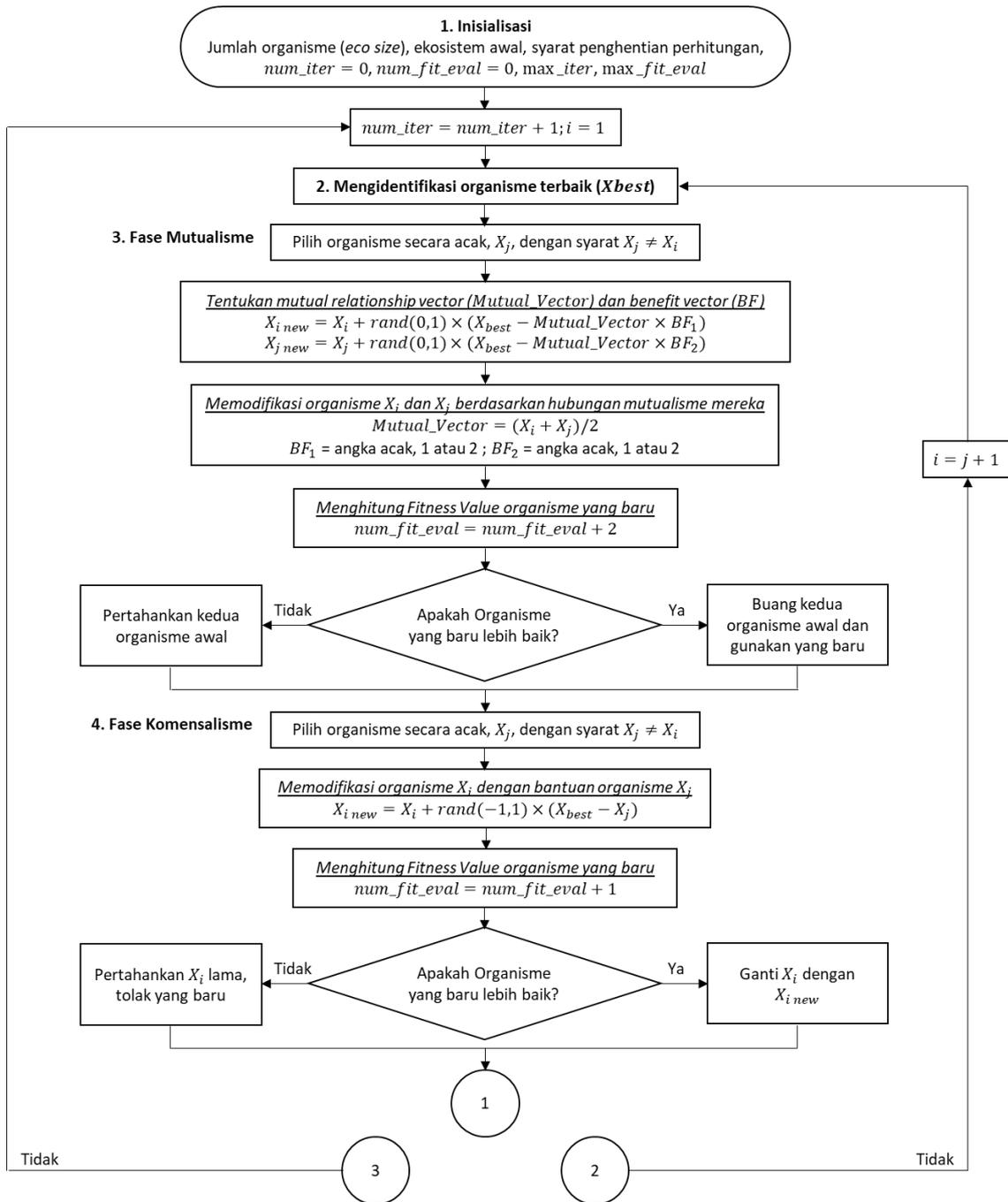
X_j = organisme dalam ekosistem yang dipilih secara acak

$X_{i\ new}$ = kandidat baru dari X_i

X_{best} = solusi global dengan derajat adaptasi terbaik

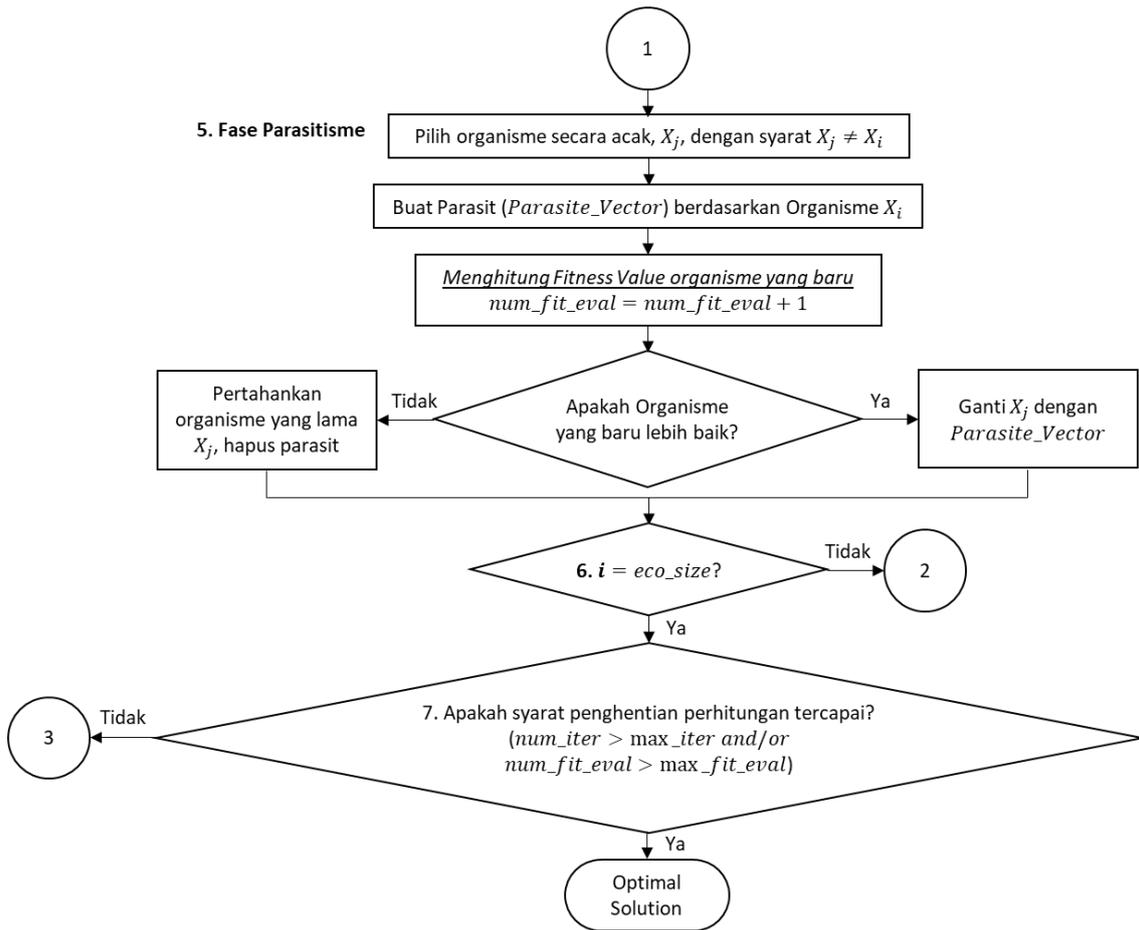
Fase ketiga adalah fase parasitisme, dimana satu organisme memperoleh keuntungan sedangkan organisme lain mengalami kerugian. Jenis simbiosis ini ditemukan pada hubungan antara nyamuk anopheles dan manusia. Dalam algoritma SOS, organisme X_i berperan sebagai parasit yang diduplikasi untuk menghasilkan parasit buatan *Parasite_Vector*. Organisme acak X_j akan berperan sebagai tuan rumah dari *Parasite_Vector*, yang kemudian keduanya akan dibandingkan. *Parasite_Vector* akan menggantikan X_j apabila nilai yang dihasilkan lebih baik dari nilai X_j .

Berdasarkan penjelasan di atas, garis besar kerangka alur algoritma SOS, antara lain adalah inialisasi dan iterasi (fase mutualisme, komensalisme, parasitisme) yang berlanjut hingga kriteria tercapai. Penggambaran alur algoritma SOS dapat dilihat melalui Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Diagram Alir Algoritma SOS

Sumber: Cheng, M-Y. & Prayogo, D. (2014). Symbiotic organisms search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Computers and Structures*.



Gambar 2.8 Diagram Alir Algoritma SOS

Sumber: Cheng, M-Y. & Prayogo, D. (2014). Symbiotic organisms search: A new metaheuristic optimization algorithm. *Computers and Structures*.

2.4. Penelitian Terdahulu

Beberapa referensi dari penelitian terdahulu yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3

Penelitian Terdahulu

No	Nama/Tahun	Judul	Kesimpulan
1.	(Tanaya et al., 2020)	Optimasi Struktur Retaining Wall Tipe Kantilever dengan Metode Metaheuristik	Dari kedua algoritma metaheuristik yang dibandingkan yaitu PSO dan SOS. Performa algoritma SOS lebih baik dikarenakan mampu menemukan hasil desain struktur retaining wall tipe

			kantilever yang optimal meskipun SOS lebih lambat memberikan hasil yang konvergen.
2.	(Kalemci et al., 2020)	Design of reinforced concrete cantilever retaining wall using Grey wolf optimization algorithm	Penelitian dilakukan untuk mengetahui performa Algoritma <i>Grey Wolf</i> dalam mengoptimasi desain <i>retaining wall</i> dengan <i>shear key</i> . Hasil optimasi menunjukkan bahwa Algoritma <i>Grey Wolf</i> termasuk suatu algoritma optimasi yang kompetitif dibandingkan algoritma-algoritma optimasi lainnya karena Algoritma <i>Grey Wolf</i> mampu memberikan hasil optimasi yang serupa dengan algoritma-algoritma metaheuristik lain.
3.	(Tahsin Öztürk et al., 2020)	Optimum design of reinforced concrete counterfort retaining walls using TLBO, Jaya algorithm	Penelitian ini menggunakan SAP 2000-OAPI untuk melakukan analisa struktur terhadap <i>retaining wall</i> dengan <i>counterfort</i> . SAP 2000-OAPI digunakan untuk mendapatkan gaya-gaya dalam pada berbagai elemen struktur dinding secara akurat. Selain itu, dari kedua algoritma yang digunakan yaitu Jaya dan TLBO, hasil <i>run</i> menunjukkan performa algoritma TLBO lebih baik untuk kasus permasalahan ini.