

2. LANDASAN TEORI

2.1. Formulasi Permasalahan Optimasi Portal Beton Bertulang Penahan Gempa

Pada proyek konstruksi, sering kali terdapat pertimbangan antara memperbesar dimensi elemen, meningkatkan mutu beton, menambah tulangan, ataupun meningkatkan mutu tulangan untuk mendapatkan kapasitas elemen yang lebih besar dari beban yang terjadi, namun juga tidak berlebihan sehingga boros. Hal yang menjadi pertimbangan utama dalam pengambilan keputusan adalah harga satuan dari beton sesuai dengan mutunya dan tulangan sesuai dengan mutunya. Sehingga pada setiap daerah, keputusan yang diambil bisa berbeda sesuai dengan harga material pada masing-masing daerah.

Hal ini mengakibatkan perlunya *trade-off* yang tepat untuk mengambil keputusan yang tepat. Semakin tinggi mutu yang digunakan, semakin kuat struktur tersebut, namun semakin besar pula biaya yang perlu dikeluarkan. Sementara dimensi setiap elemen belum tentu efisien untuk menahan setiap gaya dalam yang terjadi. Sehingga diperlukan adanya proses optimasi.

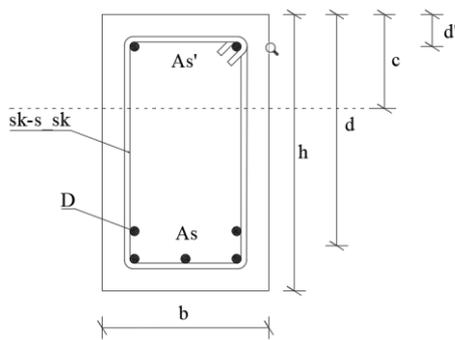
Optimasi portal beton bertulang biasanya memiliki tujuan untuk merancang suatu struktur portal beton bertulang dengan biaya seminimal mungkin. Untuk mencapai hasil optimasi yang optimal, diperlukan variabel yang akan dioptimasi, *constraints*, dan tujuan atau *objective function* yang ingin dicapai dari proses optimasi. Komponen yang biasa dioptimasi adalah dimensi balok dan kolom, mutu beton (f_c'), mutu tulangan (f_y), jumlah tulangan longitudinal, diameter tulangan longitudinal, jumlah tulangan transversal, dan diameter tulangan transversal. Dalam proses optimasi, beberapa *constraints* perlu ditetapkan untuk menghasilkan struktur portal beton bertulang yang memenuhi peraturan-peraturan yang ada, seperti SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019 dengan metode *Load and Resistance Factor Design* (LRFD).

2.1.1. Variabel Desain Portal Beton Bertulang

2.1.1.1. Dimensi Balok dan Kolom

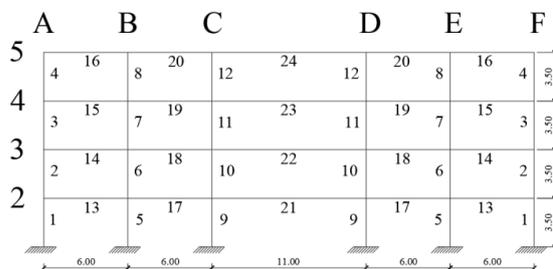
Salah satu variabel yang digunakan dalam proses optimasi adalah dimensi balok dan kolom. Balok beton memiliki lebar minimum 250 mm dan tinggi minimum 300 mm dengan selimut beton minimum 40 mm. Sedangkan kolom beton memiliki lebar dan tinggi minimum

300 sesuai dengan syarat sistem rangka pemikul momen khusus dengan selimut beton minimum 40 mm. Data yang diambil dari setiap elemen yang terpilih berupa dimensi elemen, luas penampang, dan momen inersia. Contoh penampang elemen ada pada Gambar 2.1, dimana h adalah tinggi elemen, b adalah lebar elemen, A_s adalah luasan tulangan tarik terpasang, A_s' adalah luasan tulangan tekan terpasang, d adalah jarak dari serat terluar ke titik berat tulangan tarik terpasang, d' adalah jarak dari serat terluar ke titik berat tulangan tekan terpasang, c adalah garis netral pada penampang, D adalah diameter tulangan lentur terpasang, s_k adalah diameter tulangan sengkang terpasang, s_{sk} adalah jarak antar tulangan sengkang terpasang.



Gambar 2.1. Contoh penampang profil elemen balok dan kolom

Optimasi untuk dimensi setiap elemen dilakukan dengan mengelompokkan balok dan kolom ke dalam beberapa grup. Pengelompokan dilakukan berdasarkan lokasi balok dan kolom dalam sistem portal struktur. Diperlukan pengelompokan elemen balok dan kolom untuk mempermudah dan mempercepat proses optimasi. Selain itu, beban gempa tidak datang dari 1 arah saja, namun pada kedua arah. Sehingga pengelompokan elemen biasanya dilakukan untuk setiap elemen yang simetris pada struktur bangunan. Contoh pengelompokan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Contoh pengelompokan balok dan kolom

2.1.1.2. Mutu Beton dan Tulangan

Beton yang biasanya digunakan adalah beton dengan mutu K (kg/cm^2) yang lebih umum digunakan di Indonesia, mutu yang sangat sering digunakan di lapangan adalah K-300, K-350, K-400, K-450, K-500, K-600. Tulangan yang paling umum digunakan untuk desain gempa adalah tulangan baja ulir/*deform* (BjTS) dengan f_y (*tensile strength*) 420 MPa untuk tulangan longitudinal maupun tulangan transversal. Dengan meningkatnya mutu beton maupun mutu tulangan, maka kapasitas elemen yang bersangkutan akan meningkat, begitu pula peningkatan dengan biaya pengeluaran dan sebaliknya. Kenaikan biaya tidak linear terhadap kenaikan mutu sehingga perlu dilakukan optimasi pada variabel mutu.

2.1.1.3. Diameter Tulangan

Variabel terakhir perlu dioptimasi adalah diameter tulangan ulir untuk tulangan longitudinal dan tulangan transversal (sengkang) balok dan kolom. Diameter tulangan yang digunakan cukup mempengaruhi biaya yang dikeluarkan. Dengan diameter tulangan yang kecil, bisa didapatkan tulangan yang cukup banyak dalam satu baris, namun perlu diperhatikan apakah kapasitas yang dihasilkan cukup. Sebaliknya apabila diameter tulangan besar, peletakan tulangan dalam 1 baris pasti sedikit sehingga diperlukan tulangan 2 baris atau bahkan lebih, mengakibatkan berkurangnya lengan momen sehingga kapasitas lentur berkurang. Maka dari itu perlu dilakukan optimasi diameter tulangan yang sesuai pada setiap elemen. Diameter yang digunakan sesuai dengan Tabel 2.1. Diameter tulangan yang digunakan adalah diameter tulangan yang paling sering dipakai dan dijual di lapangan.

Tabel 2.1. Daftar diameter tulangan ulir

Diameter Tulangan Ulir	
D6	D19
D8	D22
D10	D25
D13	D32
D16	

2.1.2. Constraint Desain

Hasil struktur portal beton bertulang yang dioptimasi harus memenuhi beberapa persyaratan. Persyaratan yang ada digunakan untuk memastikan bahwa desain yang dihasilkan dari proses optimasi tidak mengalami kegagalan. Persyaratan tersebut kemudian akan berperan sebagai *constraints*. 4 *constraints* utama yang paling sering digunakan dapat dilihat dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. *Constraints* penelitian

<i>Constraints</i>	Persyaratan Desain
g_1	Kapasitas Elemen
g_2	<i>Constructability</i>
g_3	Dimensi Minimum
g_4	Simpangan antar tingkat

2.1.2.1. Kapasitas Balok

Pada *constraint* kapasitas balok, setiap elemen balok dilakukan pengecekan apakah memenuhi syarat kapasitas momen dan kapasitas geser. Perhitungan *constraint* kapasitas dirumuskan pada Persamaan 2.1-2.22. Beban yang ditinjau biasanya berupa kombinasi antara beban gravitasi, beban hidup, dan beban gempa. Rumus kapasitas yang digunakan berdasarkan SNI 2847:2019.

a. Kapasitas Lentur

$$M_n = T (d - \frac{1}{2} a) \quad (2.1)$$

$$C = T \rightarrow 0.85 f_c' a b = A_s f_y \quad (2.2)$$

$$g_1 = \phi M_n > M_u \quad (2.3)$$

dimana:

M_n = momen lentur nominal (Nmm)

M_u = momen lentur *ultimate* (Nmm)

ϕ = faktor reduksi kekuatan lentur (0.9)

d = jarak lapisan terluar terhitung dari titik berat tulangan (mm)

a = $\beta_1 c$

f_c' = mutu beton (MPa)

f_y = mutu tulangan ulir (MPa)

β_1 = nilai distribusi tegangan beton persegi ekuivalen

c = jarak dari serat tekan terjauh sampai ke sumbu netral (mm)

b = lebar balok (mm)

A_s = jumlah tulangan terpasang dikalikan dengan luas penampang tulangan (mm²)

Nilai distribusi tegangan persegi beton ekuivalen harus sesuai dengan Pasal 22.2.2.4.1 hingga 22.2.2.4.3 dan memenuhi persyaratan Pasal 22.2.2.3. Nilai distribusi tegangan ini bersifat nonlinier, nilai tegangan tidak proporsional terhadap regangan. Kapasitas lentur balok beton bertulang memiliki regangan maksimum untuk serat tekan terjauh diasumsikan sebesar 0.003 sesuai dengan Pasal 22.2.2.1. Sedangkan untuk kekuatan tarik beton diabaikan dalam perhitungan sesuai dengan Pasal 22.2.2.2. Nilai distribusi tegangan persegi beton ekuivalen dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Nilai β_1 untuk distribusi tegangan beton persegi ekuivalen

f_c' , MPa	β_1
$17 \leq f_c' \leq 28$	0.85
$28 < f_c' < 55$	$0.85 - \frac{0.05(f_c' - 28)}{7}$
$f_c' \geq 55$	0.65

Batasan tulangan lentur minimum juga diatur untuk menghasilkan kekuatan lentur yang melebihi kekuatan retak dengan cukup. Tujuannya adalah untuk menghasilkan kekuatan yang mampu bertahan setelah terjadi retak lentur, dengan retak dan lendutan yang terlihat, memperingatkan kemungkinan kelebihan beban sehingga tidak akan terjadi kegagalan secara tiba-tiba. Batasan tulangan lentur minimum yang digunakan berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.6.1.2 yaitu pada Persamaan 2.4 hingga 2.6.

$$A_{smin} = \frac{0.25\sqrt{f_c'}}{f_y} b d \quad (2.4)$$

$$A_{smin} = \frac{1.4}{f_y} b d \quad (2.5)$$

$$g_1 = A_s \text{ terpasang} > A_{smin} \quad (2.6)$$

Selain itu juga ada batasan tulangan lentur maksimum. Tujuannya adalah untuk membatasi rasio tulangan dalam balok beton nonprategang untuk mengurangi perilaku getas lentur jika terjadi kelebihan beban. Batasan tulangan lentur maksimum yang digunakan berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 9.3.3.1 yaitu pada Persamaan 2.7 hingga 2.8. Persamaan 2.8 akan diberlakukan apabila $P_u < 0.1 f_c' A_g$.

$$\rho < 0.025 \quad (2.7)$$

$$\rho < \epsilon_t < 0.004 \quad (2.8)$$

dimana:

ϵ_t = tegangan tarik pada tulangan terluar beton

Spasi minimum tulangan longitudinal diberlakukan sesuai Pasal 25.2.1 yaitu terbesar antara 25 mm dan diameter tulangan terpasang. Hal ini dilakukan agar setiap agregat bisa masuk dan merata secara sempurna. Dengan tambahan syarat kekuatan lentur sepanjang bentang (baik positif maupun negatif) yaitu tertulis pada Persamaan 2.9 dan 2.10.

$$\rho \text{ di setiap irisan} \geq \frac{1}{4} \rho \text{ terbesar} \quad (2.9)$$

$$\frac{\rho'}{\rho} \geq \frac{1}{2} \quad (2.10)$$

dimana:

ρ = rasio luasan tulangan tarik terpasang terhadap luasan bruto penampang

ρ' = rasio luasan tulangan tekan terpasang terhadap luasan bruto penampang

b. Kapasitas geser

Kapasitas geser satu arah nominal penampang balok beton diatur dalam Pasal 22.5.1.1. kapasitas geser satu arah ini memiliki beberapa perumusan yang berbeda bergantung pada kombinasi aksial geser yang terjadi. Namun pada kenyataannya, balok menerima gaya aksial yang sangat kecil bahkan tidak menerima sama sekali. Maka dari itu, pada penelitian ini hanya digunakan Persamaan 2.11 hingga 2.14 sebagai kapasitas geser satu arah pada balok beton.

$$V_n = V_c + V_s \quad (2.11)$$

$$V_c = 0.17 \lambda \sqrt{f_c'} b d \quad (2.12)$$

$$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s} \quad (2.13)$$

$$g1 = \phi V_n > V_u \quad (2.14)$$

dimana:

V_n = kapasitas geser total (N)

V_c = kapasitas geser beton saja (N)

V_s = kapasitas geser sengkang saja (N)

V_u = gaya geser *ultimate* (N)

ϕ = faktor reduksi kekuatan geser (0.75)

λ = 1 untuk beton normal

= 0.75-0.85 untuk beton ringan

A_v = jumlah kaki dengking dikalikan luasan penampang sengkang (mm²)

f_{yt} = mutu tulangan sengkang (MPa)

s = jarak antar sengkang (mm)

Kapasitas geser satu arah nominal sengkang dibatasi supaya tidak terjadi keretakan beton terlebih dahulu sebelum sengkang menerima beban geser. Maka dari itu, pada Pasal 22.5.1.2 diberi batasan maksimum kapasitas geser satu arah sengkang sesuai pada Persamaan 2.15.

$$V_s \max = 0.66 \sqrt{f_c'} b d \quad (2.15)$$

Kebutuhan tulangan sengkang minimum juga dibatasi pada Pasal 9.6.3.3 adanya kemungkinan terbentuknya retak tarik diagonal miring akibat tegangan yang jauh lebih kecil daripada akibat beban statis desain. Hal ini diberlakukan walaupun pengujian berdasarkan beban statis menunjukkan bahwa tulangan geser tidak diperlukan sama sekali. Kebutuhan tulangan sengkang minimum dapat dilihat pada Persamaan 2.16 dan 2.17.

$$A_v \min = 0.062 \sqrt{f_c'} \frac{b s}{f_{yt}} \quad (2.16)$$

$$A_v \min = 0.35 \frac{b s}{f_{yt}} \quad (2.17)$$

Spasi minimum tulangan geser biasanya diberlakukan *rule of thumb* yaitu 70 mm hingga 80 mm supaya setiap agregat bisa masuk dan merata sempurna. Namun untuk spasi maksimum tulangan geser tertulis pada Pasal 9.7.6.2.2 yaitu tertulis

pada Persamaan 2.18 dan 2.19.

- $V_s \leq 0.33 \sqrt{f'c'} b d$
Terkecil dari $d/2$ dan 600 mm (2.18)

- $V_s > 0.33 \sqrt{f'c'} b d$
Terkecil dari $d/4$ dan 300 mm (2.19)

Senggang pengegang pertama harus ditempatkan tidak lebih dari 50 mm dari muka kolom penumpu. Spasi maksimum tambahan tulangan geser diberlakukan pada daerah sendi plastis, yaitu daerah *joint* hingga jarak $2h$ dari tumpuan. Hal ini sesuai dengan SNI Pasal 18.6.4.4 yang tertulis pada Persamaan 2.20 hingga 2.22.

$$s > \frac{d}{4} \quad (2.20)$$

$$s > 6db \quad (2.21)$$

$$s > 150mm \quad (2.22)$$

Gaya geser desain (V_e), diambil dari superposisi gaya geser akibat beban gravitasi (W_u) terfaktor dengan gaya geser akibat momen yang mungkin terjadi pada ujung-ujung balok karena pelelehan tulangan longitudinal yang terpasang. Sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 18.6.5.1 pada persamaan 2.23 dan 2.24.

$$V_e = \frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{L} \pm \frac{W_u L}{2} \quad (2.23)$$

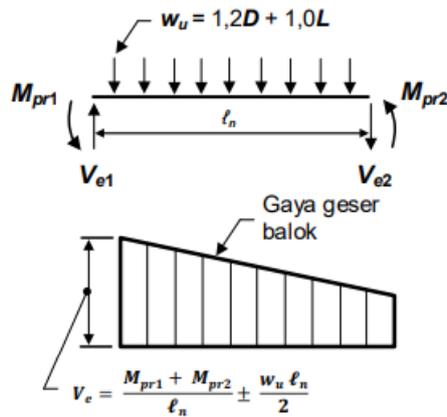
$$W_u = 1.2D + 1.0L \quad (2.24)$$

Dimana:

M_{pr1} = kapasitas lentur positif yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)

M_{pr2} = kapasitas lentur negatif yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)

W_u = Beban gravitasi terfaktor



Gambar 2.3. Gaya geser desain untuk balok

Sumber: Gambar R18.6.5 SNI 2847:2019

Kapasitas geser nominal yang disumbangkan beton (V_c) untuk daerah di dalam sendi plastis (daerah *joint* hingga jarak $2h$ dari tumpuan) harus dianggap sebesar 0 ($V_c = 0$) apabila Persamaan 2.25 dan 2.26 yang sesuai dengan SNI 2847:2019 pasal 18.6.5.2 terpenuhi.

$$\frac{M_{pr1} + M_{pr2}}{L} \geq \frac{1}{2} V_u \quad (2.25)$$

$$N_u < \frac{A_g f_c'}{20} \quad (2.26)$$

dimana:

M_{pr1} = kapasitas lentur positif yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)

M_{pr2} = kapasitas lentur negatif yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)

L = bentang as ke as balok (mm)

V_u = gaya geser *ultimate* terbesar (N)

N_u = gaya aksial *ultimate* terkecil (N)

A_g = luas penampang balok bruto (mm²)

f_c' = mutu beton (MPa)

2.1.2.2. Kapasitas Kolom

Pada *constraint* kapasitas kolom, setiap elemen kolom dilakukan pengecekan apakah memenuhi syarat kapasitas kombinasi momen dan aksial serta kapasitas geser. Perhitungan *constraint* kapasitas dirumuskan pada Persamaan 2.27-2.49. Beban yang ditinjau biasanya berupa kombinasi antara beban gravitasi, beban hidup, dan beban gempa. Rumus kapasitas yang digunakan berdasarkan SNI 2847:2019 Pasal 10.5.1.1 yaitu tertulis pada Persamaan 2.27-2.29.

$$g1 = \phi Pn \geq Pu \quad (2.27)$$

$$g1 = \phi Mn \geq Mu \quad (2.28)$$

$$g1 = \phi Vn \geq Vu \quad (2.29)$$

dimana:

Pn = kapasitas aksial kolom (N)

Pu = gaya aksial *ultimate* (N)

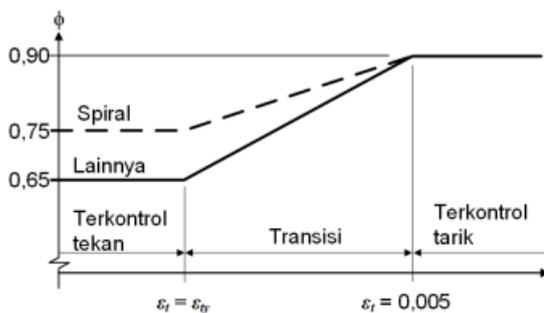
Mn = kapasitas momen lentur kolom (Nmm)

Mu = gaya momen lentur *ultimate* (Nmm)

Vn = kapasitas geser kolom (N)

Vu = gaya geser *ultimate* (N)

ϕ = faktor reduksi kekuatan sesuai dengan Gambar 2.4



Gambar 2.4. Faktor reduksi kekuatan kolom

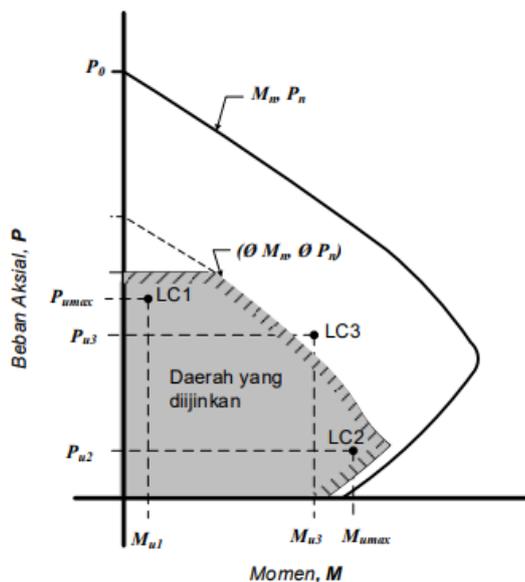
Sumber: Gambar R21.2.2b SNI 2847:2019

Tulangan longitudinal pada kolom juga dibatasi sesuai dengan Pasal 18.7.4.1 yaitu tertulis pada Persamaan 2.30.

$$1\% < \rho < 6\% \quad (2.30)$$

a. Kapasitas kombinasi beban aksial dan lentur

Kombinasi gaya aksial dan lentur terfaktor terjadi bersamaan untuk setiap kombinasi harus dipertimbangkan sesuai dengan Pasal 10.3.2.1. Kombinasi beban kritis sangat sulit untuk dipahami tanpa melakukan pengecekan pada tiap kombinasi. Gambar 2.4 menunjukkan contoh kombinasi beban kritis kolom yang harus masuk dalam daerah yang diijinkan. Gambar ini juga sering kali disebut dengan grafik perut buncit.



Gambar 2.5. Kombinasi beban kritis kolom

Sumber: SNI 2847:2019 Gambar R10.4.2.1

Gaya aksial nominal maksimal kolom dibatasi dalam Pasal 22.4.2.2. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi eksentrisitas insidental. Rumusan gaya aksial nominal yang diijinkan sesuai dengan Persamaan 2.31.

$$P_o = 0.85 f_c' (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (2.31)$$

dimana:

P_o = kapasitas tekan nominal maksimal kolom (N)

A_g = luas penampang kolom bruto (mm^2)

A_{st} = luas penampang tulangan longitudinal (mm^2)

Untuk membuat sistem portal yang menjamin terjadinya *strong column weak beam* maka diperlukan syarat tambahan sesuai pada Persamaan 2.32. Hal ini

dilakukan untuk menjamin sendi plastis terletak pada ujung balok dekat perletakan, bukan pada kolom. Apabila sendi plastis terjadi pada kolom, kemungkinan akan terjadi *collapse*.

$$\Sigma M_{nc} \geq \frac{6}{5} \Sigma M_{nb} \quad (2.32)$$

dimana:

ΣM_{nc} = kapasitas lentur nominal kolom yang ditinjau (Nmm)

ΣM_{nb} = kapasitas lentur nominal balok yang merangka pada kolom yang ditinjau (Nmm)

b. Kapasitas geser

Kapasitas geser satu arah nominal penampang beton diatur dalam Pasal 22.5.1.1. kapasitas geser satu arah ini memiliki beberapa perumusan yang berbeda bergantung pada kombinasi aksial geser yang terjadi. Maka dari itu, Persamaan 2.33 hingga 2.35 dibuat berdasarkan kombinasi aksial geser yang terjadi pada kolom.

- Tidak ada gaya aksial

$$V_c = 0.17 \lambda \sqrt{f_c'} b d \quad (2.33)$$

- Terjadi gaya aksial tekan

$$V_c = 0.17 \lambda \left(1 + \frac{Nu}{14 A_g}\right) \sqrt{f_c'} b d \quad (2.34)$$

- Terjadi gaya aksial tarik

$$V_c = 0.17 \lambda \left(1 - \frac{Nu}{3.5 A_g}\right) \sqrt{f_c'} b d \quad (2.35)$$

Sama seperti balok, kapasitas geser nominal yang disumbangkan beton (V_c) untuk daerah di dalam sendi plastis (daerah lo) harus dianggap sebesar 0 ($V_c = 0$) apabila Persamaan 2.36 dan 2.37 terpenuhi.

$$\frac{M_{pr3} + M_{pr4}}{h_n} \geq \frac{1}{2} V_u \quad (2.36)$$

$$Nu < \frac{A_g f_c'}{20} \quad (2.37)$$

dimana:

M_{pr3} = kapasitas lentur atas kolom yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)

M_{pr4} = kapasitas lentur bawah kolom yang mengasumsikan tegangan tarik dalam

batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)

h_n = tinggi bersih kolom (mm)

V_u = gaya geser *ultimate* terbesar (N)

N_u = gaya aksial *ultimate* terkecil (N)

A_g = luas penampang balok bruto (mm^2)

f_c' = mutu beton (MPa)

Lebar daerah kritis kolom diatur dalam Persamaan 2.37.

$$l_o = \max \left[h_k, \frac{1}{6} h_n, 450 \text{ mm} \right] \quad (2.38)$$

dimana:

l_o = daerah kritis kolom (mm)

h_k = dimensi terbesar kolom (mm)

Dalam daerah kritis kolom, terdapat batasan jarak antar sengkang minimum sesuai dengan Pasal 18.7.5.3 sehingga dapat memberi pengekangan beton yang cukup. Batasan yang tertulis pada Persamaan 2.39 hingga 2.41 diperbolehkan untuk saling tumpang.

$$s < \frac{1}{4} b_k \quad (2.39)$$

$$s < 6 d_b \quad (2.40)$$

$$s < 100 + \frac{350 - h_x}{3} \quad (2.41)$$

dimana:

b_k = dimensi terkecil kolom (mm)

d_b = diameter tulangan longitudinal terkecil (mm)

h_x = jarak antar sengkang (mm)

Diperlukan *confinement* pada daerah kritis kolom untuk meningkatkan kapasitas dan daktilitas kolom beton. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi kesalahan saat konstruksi dan untuk menyesuaikan dengan Pasal 18.7.5.4. Keperluan *confinement* ini tertulis pada Persamaan 2.42 hingga 2.45.

- $P_u \leq 0.3 A_g f_c'$ dan $f_c' \leq 70 \text{ MPa}$ (2.42)

Terbesar antara (a) dan (b)

- $P_u > 0.3 A_g f_c'$ atau $f_c' > 70 \text{ MPa}$ (2.43)

Terbesar antara (a), (b), dan (c)

$$(a) \frac{A_{sh}}{s_{bc}} \geq 0.3 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_c'}{f_{yt}}$$

$$(b) \frac{A_{sh}}{s_{bc}} \geq 0.09 \frac{f_c'}{f_{yt}}$$

$$(c) \frac{A_{sh}}{s_{bc}} \geq 0.2 k_f k_n \frac{P_u}{f_{yt} A_{ch}}$$

$$k_f = \frac{f_c'}{175} + 0.6 \geq 1.0 \quad (2.44)$$

$$k_n = \frac{nl}{nl-2} \quad (2.45)$$

dimana:

A_{sh} = luas penampang total tulangan transversal (mm^2)

A_{ch} = luas penampang kolom diukur sampai tepi luar tulangan transversal (mm^2)

k_f = faktor kekuatan beton sesuai dengan Persamaan 2.44

k_n = faktor keefektifan pengeangan sesuai dengan Persamaan 2.45

nl = jumlah tulangan longitudinal di sekeliling inti kolom

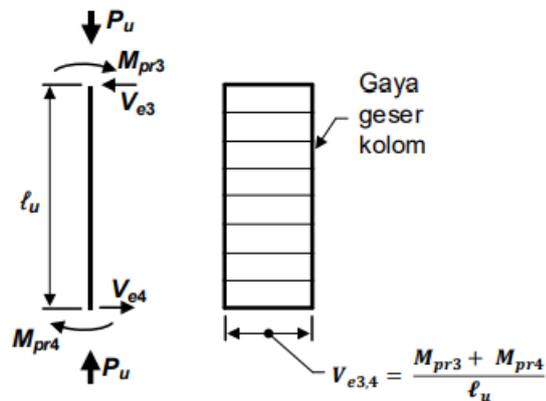
Geser desain (V_e) perlu dilakukan juga untuk desain tulangan transversal kolom yang menerima M_{pr3} dan M_{pr4} akibat gaya aksial P_u minimum dan P_u maksimum yang terjadi. Sesuai dengan persamaan 2.46 yang diatur pada SNI 2847:2019

$$V_{e_{3,4}} = \frac{M_{pr3} + M_{pr4}}{l_u} \quad (2.46)$$

dimana:

M_{pr3} = kapasitas lentur atas kolom yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)

M_{pr4} = kapasitas lentur bawah kolom yang mengasumsikan tegangan tarik dalam batang tulangan longitudinal sebesar paling sedikit $1.25f_y$ (Nmm)



Gambar 2.6. Kombinasi beban kritis kolom

Sumber: SNI 2847:2019 Gambar R18.6.5

Dalam perencanaan gaya geser kolom, perlu dilakukan perhitungan kapasitas *beam-column joint* yang merupakan hubungan antara balok dan kolom. Hal ini untuk memastikan gaya geser yang terjadi pada pertemuan balok dan kolom tidak lebih besar dari kapasitas yang mampu dipikul. Sesuai dengan persamaan 2.47 untuk kolom eksterior dan 2.48 untuk kolom interior yang diatur pada SNI 2847:2019 pasal 18.8.2.1.

$$V_j = T - V_e \quad (2.47)$$

$$V_j = T_1 + Cc_2 - V_e \quad (2.48)$$

Kekuatan yang tersedia pada *joint* (V_n) harus lebih besar dibandingkan gaya geser yang terjadi pada *joint* (V_j). Seperti yang tertulis pada persamaan 2.49 hingga 2.52 yang diatur pada SNI 2847:2019 pasal 18.8.4.1.

$$V_j \leq \phi V_n \quad (2.49)$$

Bila ada 4 balok merangka ke joint

$$V_n = 1.7A_j \sqrt{f_c'} \quad (2.50)$$

Bila ada 3 balok merangka ke joint atau 2 balok merangka ke joint pada sisi berlawanan

$$V_n = 1.2A_j \sqrt{f_c'} \quad (2.51)$$

Kondisi lainnya

$$V_n = 1.0A_j \sqrt{f_c'} \quad (2.52)$$

dimana:

ϕ = 0.85 (factor reduksi geser pada hubungan balok-kolom)

A_j = $b_j \times h_j$ = Luas efektif joint

b_j = lebar efektif joint

h_j = tinggi efektif joint

Tabel 2.4. Kekuatan geser nominal Join V_n

Konfigurasi Joint	V_n
Untuk joint yang terkekang oleh balok-balok pada keempat sisinya ^[1]	$1,7\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ ^[2]
Untuk joint yang terkekang oleh balok-balok pada tiga sisinya atau dua sisi berlawanan ^[1]	$1,2\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ ^[2]
Untuk kasus-kasus lainnya	$1,0\lambda\sqrt{f_c'}A_j$ ^[2]

^[1]Mengacu pada 18.8.4.2

^[2] λ diambil 0,75 untuk beton ringan dan 1,0 untuk beton normal. Nilai A_j berdasarkan 18.8.4.3

Sumber: SNI 2847:2019 Gambar R18.8.4.1

Untuk memastikan kolom dapat menanggung beban aksial dengan baik, pengikat tulangan longitudinal disusun secara selang-seling dengan jarak bersih 150 mm, dan didukung secara lateral dengan memadai. Hal ini sesuai dengan SNI 2847:2019 Pasal 25.7.2.



Gambar 2.7. Spasi bersih sengkang pengikat tulangan lateral

Sumber: SNI 2847:2019 Gambar R25.7.2.3a

2.1.2.3. Constructability

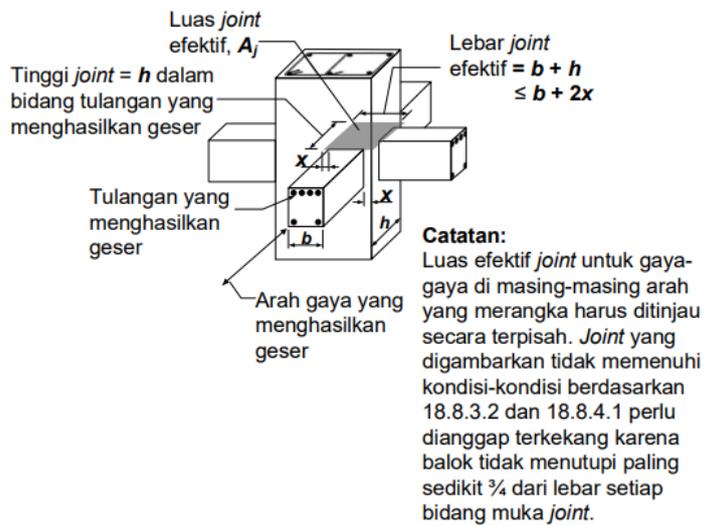
Constraint constructability merupakan batasan untuk pertemuan antara balok dan kolom. Umumnya dimensi kolom lebih besar daripada dimensi balok agar secara tidak langsung menjamin syarat *strong column weak beam*. *Constraint* ini membuat dimensi balok lebih kecil dibanding dimensi kolom, seperti terlihat pada Gambar 2.5. *Constructability* ditinjau agar struktur yang dihasilkan dapat lebih mudah terealisasikan di lapangan. *Constraint* ini dirumuskan dalam Persamaan 2.53.

$$g2 = dc \geq bw \quad (2.53)$$

dimana:

dc = dimensi kolom dimana balok menumpu (mm)

bw = dimensi balok yang menumpu kolom (mm)



Gambar 2.8. *Constructability* balok dan kolom

Sumber: Gambar R18.8.4 SNI 2847:2019

2.1.2.4. Constraint Dimensi Minimum

Pada *constraint* dimensi minimum, dilakukan pengecekan pada setiap balok agar memenuhi semua *rule of thumb* dimensi. *Constraint* ini bertujuan agar boleh tidak mengecek defleksi ijin pada setiap balok sehingga *constraint* ini disebut sebagai *constraint* dimensi minimum. *Constraint* dimensi minimum dirumuskan dalam Persamaan 2.54 hingga 2.56.

$$g3 = b \geq 250 \text{ mm} \quad (2.54)$$

$$g3 = \frac{b}{h} \geq 0.3 \quad (2.55)$$

$$g3 = \frac{ln}{d} \geq 4 \quad (2.56)$$

dimana:

b = lebar balok (mm)

h = tinggi balok (mm)

ln = bentang bersih balok (mm)

2.1.2.5. Simpangan Antar Tingkat

Pada *constraint* simpangan antar tingkat, dilakukan pengecekan pada setiap balok agar memenuhi batasan simpangan ijin. *Constraint* simpangan antar tingkat dirumuskan dalam Persamaan 2.57.

$$g4 = \Delta < 0.01 h_{sx} \quad (2.57)$$

dimana:

Δ = simpangan antar tingkat yang terjadi (mm)

hsx = tinggi 1 tingkat (mm)

2.1.2.6. Ketidakberaturan Tingkat Lemah Akibat Diskontinuitas

Menurut Tabel 14 pada SNI 1726:2019 untuk menghindari ketidakberaturan akibat diskontinuitas, perlu dipastikan bahwa kekuatan lateral suatu tingkat tidak kurang dari 80% kekuatan lateral di atasnya. *Constraint* ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas dirumuskan dalam Persamaan 2.58.

$$Vn_x < 0.8 Vn_{x+1} \quad (2.58)$$

dimana:

Vn = kekuatan lateral suatu tingkat (Vc + Vs)

Vc = kapasitas geser kolom beton

Vs = kapasitas geser sengkang terpasang pada kolom beton

x = lantai yang ditinjau

2.1.3. Objective Function

Objective function adalah fungsi yang menghasilkan suatu nilai yang merupakan tujuan utama dari proses optimasi. Tujuan yang ingin dicapai adalah untuk mendapatkan biaya seminimal mungkin dari suatu struktur portal beton bertulang tanpa melanggar semua peraturan SNI yang ada. *Objective function* yang digunakan dirumuskan dalam Persamaan 2.59.

$$f(y) = \Sigma(P_{ci} Q_{ci}) + \Sigma(P_{si} Q_{si}) \quad (2.59)$$

dimana:

P_{ci} = harga beton per m^3 dengan mutu i (Rp/ m^3)

Q_{ci} = kuantitas beton dengan mutu i (m^3)

P_{si} = harga baja per kg dengan mutu i (Rp/kg)

Q_{si} = kuantitas baja dengan mutu i (kg)

Objective function terpenalti merupakan fungsi yang menghasilkan biaya akhir hasil optimasi yang memiliki pelanggaran terhadap beberapa *constraints*. Hasil yang melanggar *constraint* akan diberi penalti dengan mengalikan biaya struktur dengan denda yang ditentukan. Denda dihitung berdasarkan akumulasi pelanggaran yang terjadi pada setiap *constraint*. Tujuan *objective function* terpenalti adalah untuk mengeliminasi semua hasil yang melanggar *constraint*. *Objective function* terpenalti dalam penelitian ini dirumuskan dalam Persamaan 2.60.

$$f_p(y) = f(y) \times (1 + \alpha_c \times \gamma_c + \alpha_b \times \gamma_b + \alpha_d \times \gamma_d + \gamma_v) \quad (2.60)$$

dimana:

P_{ci} = harga beton per m^3 dengan mutu i (Rp/ m^3)

Q_{ci} = kuantitas beton dengan mutu i (m^3)

P_{si} = harga baja per kg dengan mutu i (Rp/kg)

Q_{si} = kuantitas baja dengan mutu i (kg)

γ_c = banyaknya *constraints* terlanggar pada elemen kolom

γ_b = banyaknya *constraints* terlanggar pada elemen balok

γ_d = banyaknya *constraints drift* yang terlanggar

γ_v = banyaknya *constraints* ketidakberaturan tingkat lemah yang terlanggar

α_c = konstanta penalti kolom, jumlah kolom pada struktur

α_b = konstanta penalti balok, jumlah balok pada struktur

α_d = konstanta penalti *drift*, banyaknya lantai pada struktur

2.2. Prosedur Analisis Gempa

Menurut SNI 1726:2019, prosedur analisis gempa terdiri dari analisis gaya lateral ekuivalen, Analisis spektrum respons ragam dan prosedur respons riwayat waktu seismik. Sebelum desain perencanaan bangunan terhadap gempa, prosedur analisis gempa perlu ditentukan terlebih dahulu. Dalam menentukan prosedur analisis gempa yang diijinkan sesuai dengan SNI, perlu untuk menentukan kategori resiko seismik sesuai dengan perencanaan jenis pemanfaatan bangunan yang diatur pada Tabel 3 SNI 1726:2019. Data tanah dari bangunan yang direncanakan juga perlu diolah terlebih dahulu, karena digunakan untuk menentukan klasifikasi situs yang diatur pada bab 5 SNI 1726:2019. Lokasi dari bangunan juga dibutuhkan untuk menentukan koefisien situs dan parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan yang diatur pada Pasal 6.2 SNI 1726:2019. Melalui parameter respons spektral dan kategori resiko seismik yang sesuai dengan perencanaan bangunan, kategori desain seismik dapat ditentukan sesuai dengan Tabel 8 dan 9 SNI 1726:2019.

Langkah selanjutnya adalah memeriksa ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal yang terjadi pada bangunan sesuai yang diatur pada SNI 1726:2019 Tabel 13 dan Tabel 14. Tabel 12 SNI 1726:2019 mengatur mengenai jenis dan pemodelan struktur yang perlu disesuaikan dengan kategori desain seismik bangunan. Setelah menentukan periode fundamental struktur berdasarkan Tabel 17 SNI 1726:2019, prosedur analisis gempa dapat ditentukan sesuai dengan periode fundamental struktur, ketidakberaturan horizontal dan vertikal dan kategori desain seismik. Prosedur analisis gempa yang paling sering digunakan untuk optimasi portal adalah metode statik ekuivalen. Struktur diasumsi akan menerima beban gravitasi terbesar akibat gempa yang bersifat statis, mengabaikan efek resonansi yang terjadi.

2.3. Metaheuristik

Heuristik adalah strategi atau cara yang digunakan untuk mendapatkan sebuah solusi melalui proses trial and error dalam waktu yang relative lebih singkat, namun dengan

meningkatnya penelitian mengenai algoritma heuristik, algoritma tersebut berkembang menjadi meta-heuristik. Meta, karena memiliki arti “level atau tingkatan yang lebih tinggi” mencerminkan bahwa algoritma metaheuristik secara umum dapat menyelesaikan suatu permasalahan dengan lebih baik dibandingkan dengan algoritma heuristik tradisional (Yang, 2010). Sebagian besar algoritma metaheuristik terinspirasi dari sifat abstrak yang dimiliki oleh alam, hal ini dikarenakan alam terbukti dapat memecahkan seluruh masalah yang ditemui. Sebagai contoh metode Simulated Annealing (SA) terinspirasi dari proses pendinginan cairan logam yang terjadi pada ilmu metalurgi.

2.3.1. *Symbiotic Organisms Search (SOS)*

Symbiotic Organisms Search (SOS) yang diperkenalkan oleh Cheng dan Prayogo (2014) adalah algoritma metaheuristik terinspirasi dari peristiwa simbiosis yang terjadi di ekosistem alam. SOS sudah banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan dalam dunia teknik sipil, sebagai contoh SOS pernah diterapkan dalam optimasi *multi-objective* struktur rangka batang (Tejani et al. 2019), optimasi penjadwalan proyek (Abdullahi & Ngadi 2016), dan bahkan optimasi topologi, ukuran, dan bentuk rangka batang (Dang et al. 2022). Simbiosis merupakan suatu interaksi antar kelompok organisme yang berbeda. Interaksi antar organisme yang berbeda ini diterapkan pada algoritma SOS, yaitu fase mutualisme, fase komensalisme dan fase parasitisme. Diharapkan dari ketiga fase yang akan dilalui, solusi yang terbaik dapat dihasilkan.

2.3.1.1. *Mutualism Phase*

Mutual memiliki arti “saling” mencerminkan sifat dari hubungan mutualisme yang bersifat saling menguntungkan. Contohnya adalah burung clover yang membersihkan sisa makanan pada mulut buaya, secara bersamaan burung clover memperoleh makanan dengan lebih mudah. Maka dari itu, pada fase mutualisme hasil interaksi antar pasangan organisme akan tergantikan oleh hasil pasangan organisme yang lebih baik.

$$X_{i_{new}} = X_i + rand(0.1) \times (X_{best} - Mutual_Vector * BF_1) \quad (2.61)$$

$$X_{j_{new}} = X_j + rand(0.1) \times (X_{best} - Mutual_Vector * BF_2) \quad (2.62)$$

$$Mutual\ Vector = \frac{X_i + X_j}{2} \quad (2.63)$$

dimana:

X_i = organisme yang sesuai dengan anggota ke- i dalam ekosistem

X_j = organisme yang dipilih secara acak dari ekosistem

X_{inew} = kandidat baru X_i

X_{jnew} = kandidat baru X_j

BF_1 = angka acak antara 1 atau 2

BF_2 = angka acak antara 1 atau 2

X_{best} = solusi global atau organisme dengan tingkat adaptasi terbaik

2.3.1.2. Commensalism Phase

Fase komensalisme hanya menguntungkan satu organisme namun tidak menguntungkan atau merugikan organisme yang lain. Contoh simbiosis komensalisme adalah ikan remora yang menempel pada ikan hiu agar mendapatkan sisa-sisa makanan dari ikan hiu, sehingga tidak merugikan namun tidak menguntungkan ikan hiu. Pada fase komensalisme, organisme yang terpilih (X_i) akan mengambil keuntungan melalui interaksi dengan organisme yang dipilih secara acak (X_j). Organisme X_i akan terus berubah menjadi lebih optimal namun organisme X_j tidak menerima dampak.

$$X_{inew} = X_i + rand(-1,1) \times (X_{best} - X_j) \quad (2.64)$$

dimana:

X_i = organisme yang sesuai dengan anggota ke- i dalam ekosistem

X_j = organisme yang dipilih secara acak dari ekosistem

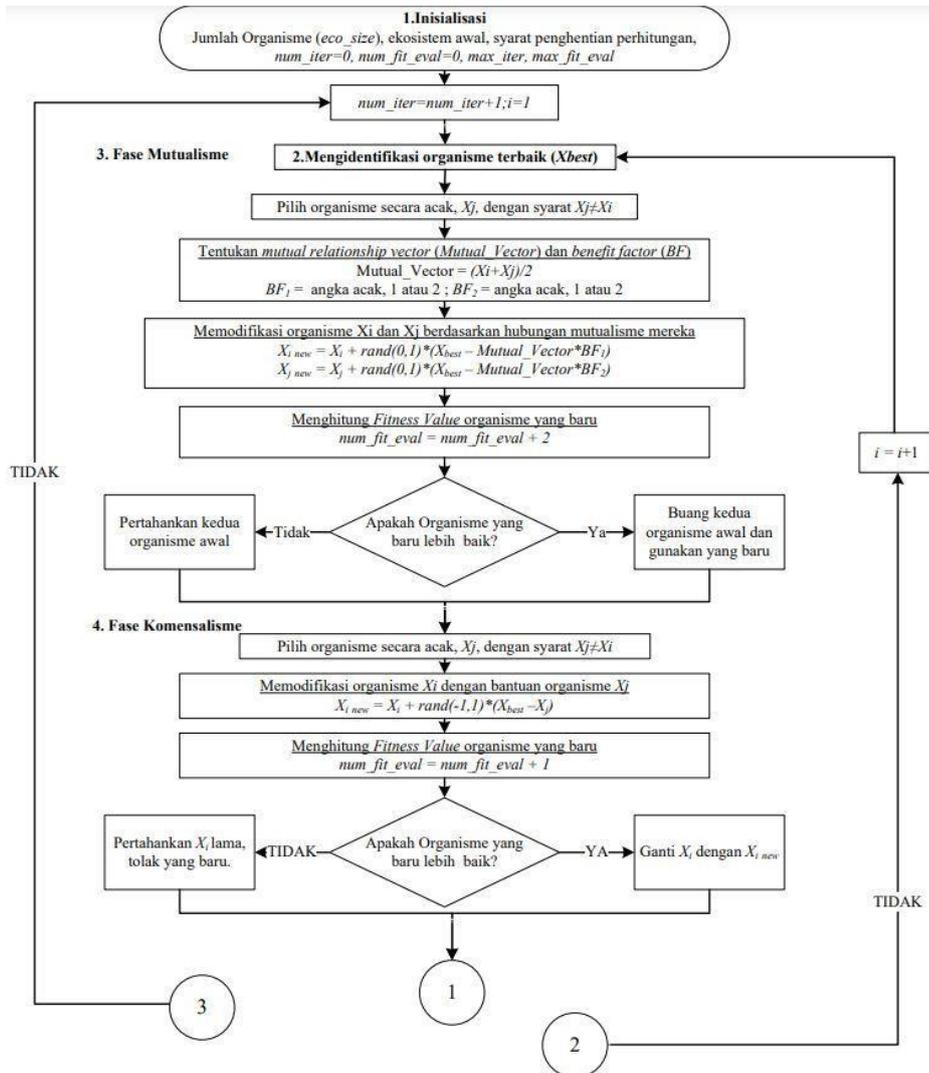
X_{inew} = kandidat baru X_i

X_{best} = solusi global atau organisme dengan tingkat adaptasi terbaik

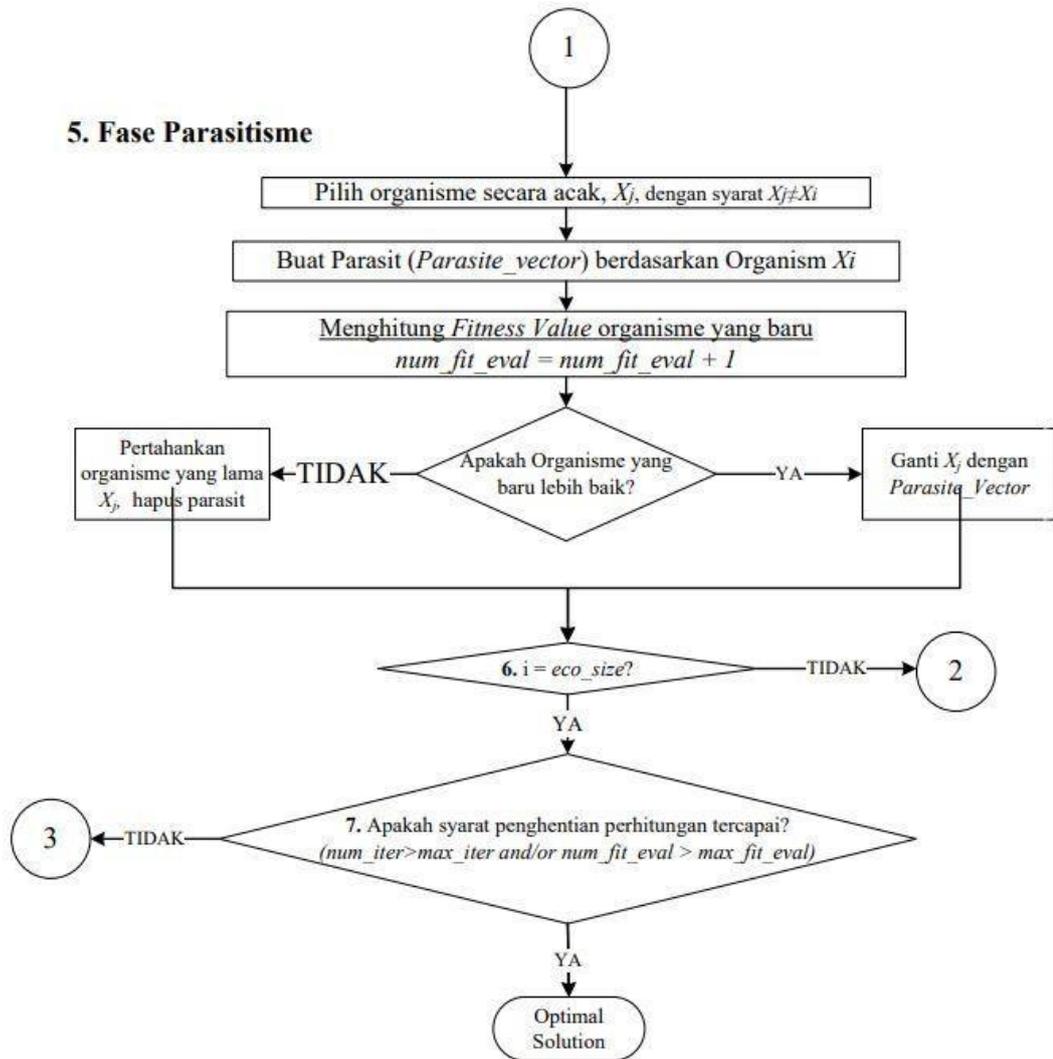
2.3.1.3. Paratism Phase

Pada ekosistem, parasit merupakan suatu organisme yang mendapatkan keuntungan atau hidup dari kerugian organisme lain. Sebagai contoh benalu yang mengambil air dan nutrisi dari pohon inangnya, menyebabkan pohon inang mengalami kekurangan

nutrisi untuk hidup. Pada fase parasitisme, organisme terpilih (X_i) akan berfungsi sebagai parasite dan membuat *Parasite_Vector* yang kemudian akan dibandingkan organisme acak (X_j). Organisme X_j akan digantikan dengan organisme baru, apabila Organisme X_j dinilai lebih buruk dibandingkan *Parasite_Vector*.



Gambar 2.9. Diagram alir algoritma SOS



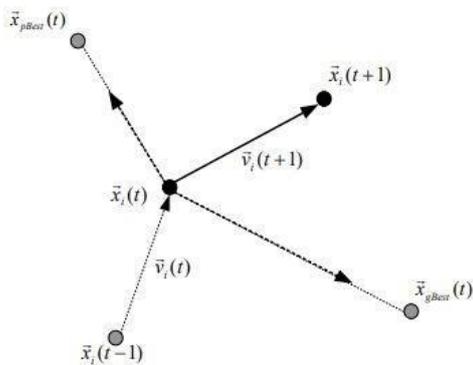
Gambar 2.10. Diagram alir algoritma SOS (lanjutan)

Sumber : Cheng, M. Y., & Prayogo, D. (2014). Symbiotic organisms search: a new metaheuristic optimization algorithm. *Computers and Structures*, 139. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2014.03.007>, p. 3.

2.3.2. Particle Swarm Optimization (PSO)

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) terinspirasi dari perilaku koloni burung yang dapat bekerja sama dalam mencari makanan (Kennedy & Eberhart, 1995). Analogi tersebut diterapkan pada cara kerja algoritma PSO yang memiliki beberapa partikel

yang akan bergerak secara individu mencari solusi yang terbaik. Setiap partikel akan memiliki *velocity* atau kecepatan awal yang berbeda-beda, namun kecepatan partikel akan berubah sesuai dengan pengalaman atau iterasi tiap partikel. Melalui proses pencarian yang dilakukan oleh setiap partikel, algoritma akan menentukan lokasi terbaik berdasarkan feedback dari solusi masing-masing partikel hingga solusi yang terbaik dapat ditentukan. Algoritma PSO terinspirasi dari perilaku koloni burung yang dapat bekerja sama dalam mencari makanan (Kennedy & Eberhart, 1995). Analogi tersebut diterapkan pada cara kerja algoritma PSO yang memiliki beberapa partikel yang akan bergerak secara individu mencari solusi yang terbaik. Setiap partikel akan memiliki *velocity* atau kecepatan awal yang berbeda-beda, namun kecepatan partikel akan berubah sesuai dengan pengalaman atau iterasi tiap partikel. Melalui proses pencarian yang dilakukan oleh setiap partikel, algoritma akan menentukan lokasi terbaik berdasarkan feedback dari solusi masing-masing partikel hingga solusi yang terbaik dapat ditentukan.



Gambar 2.11. Ilustrasi pergerakan partikel dalam PSO

Pada algoritma PSO, partikel yang akan mencari solusi diletakan secara acak dengan masing-masing kecepatannya. Setelah mendapatkan tiap partikel telah mendapatkan solusi, kecepatan partikel akan berubah. Perubahan kecepatan ini terjadi karena feedback dari tiap partikel, yang dipengaruhi oleh kecepatan partikel saat ini ($V_i(t)$), lokasi terbaik yang didapatkan oleh partikel ($P_i(t)$), lokasi terbaik dari populasi partikel ($P_g(t)$), dan lokasi dari

partikel tersebut ($X_i(t)$).

$$v_i(t + 1) = wv_i(t) + r_1c_1(X_{pbest}(t) - X_i(t)) + r_2c_2(X_{gbest}(t) - X_i(t)) \quad (2.62)$$

Lokasi partikel dapat ditentukan dengan :

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + v_i(t + 1) \quad (2.63)$$

dimana:

$v_i(t + 1)$ = kecepatan partikel

w = berat partikel

$v_i(t)$ = kecepatan partikel saat ini

r_1, r_2 = angka acak antara 0-1

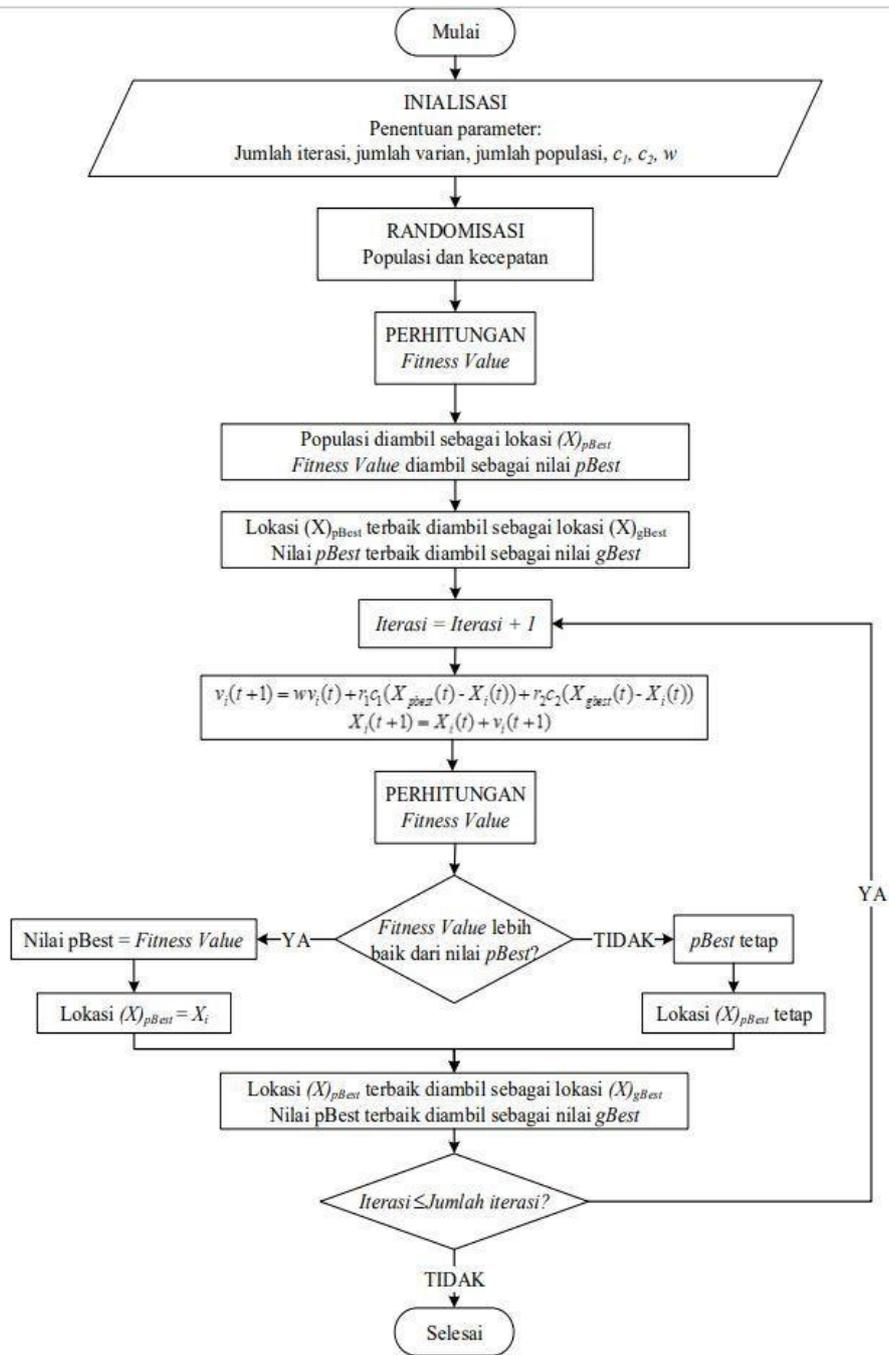
c_1, c_2 = konstanta yang telah ditentukan sebelumnya (umumnya 2)

$X_{pbest}(t)$ = posisi *pbest* (*personal best*)

$X_i(t)$ = posisi partikel saat ini

$X_{gbest}(t)$ = posisi *gbest* (*global best*)

$X_i(t + 1)$ = posisi partikel



Gambar 2.12. Diagram alir algoritma PSO