

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Operasi Sistem Tenaga Listrik

Pusat-pusat listrik dan gardu induk satu sama lain dihubungkan oleh saluran transmisi agar tenaga listrik dapat mengalir sesuai dengan kebutuhan dan terbentuklah suatu sistem tenaga listrik. Setiap GI sesungguhnya merupakan pusat beban untuk suatu daerah pelanggan tertentu, bebannya berubah-ubah sepanjang waktu sehingga daya yang dibangkitkan dalam pusat-pusat listrik harus selalu berubah. Perubahan beban dan perubahan pembangkitan daya ini selanjutnya juga menyebabkan aliran daya dalam saluran-saluran transmisi berubah-ubah sepanjang waktu.

Proses pembangkitan tenaga listrik dalam pusat-pusat listrik termis memerlukan biaya bahan bakar yang tidak sedikit. Biaya bahan bakar serta rugi-rugi dalam jaringan merupakan faktor-faktor yang harus ditekan agar menjadi sekecil mungkin. Mutu tenaga listrik yang baik merupakan kendala (*constraint*) terhadap biaya pengadaan tenaga listrik yang serendah mungkin.

Biaya operasional dari sistem tenaga listrik pada umumnya merupakan bagian biaya yang terbesar dari biaya operasi suatu perusahaan listrik. Biaya operasional dari sistem meliputi :

- a. Biaya pembelian tenaga listrik
- b. Biaya pegawai

- c. Biaya bahan bakar dan material operasi
- d. Biaya lain-lain.

Dari keempat biaya di atas, biaya bahan bakar pada umumnya adalah biaya yang terbesar. Untuk PLN biaya bahan bakar adalah kira-kira 60% dari biaya operasi secara keseluruhan^[2].

A.1 Manajemen Operasi Tenaga Listrik

Operasi sistem tenaga listrik menyangkut berbagai aspek yang luas, khususnya karena menyangkut biaya yang tidak sedikit serta menyangkut penyediaan tenaga listrik bagi masyarakat sehingga menyangkut hajat hidup orang banyak. Oleh karena itu, operasi sistem tenaga listrik memerlukan manajemen yang baik.

A.1.1 Rencana Operasi

Rencana operasi adalah suatu rencana bagaimana suatu sistem tenaga listrik akan dioperasikan untuk kurun waktu tertentu. Tergantung kepada masalah yang harus dipersiapkan, maka ada beberapa macam rencana operasi^[2], yaitu:

- a. Rencana Tahunan

Masalah-masalah yang penyelesaiannya memerlukan waktu kira-kira satu tahun dicakup dalam rencana ini, misalnya rencana pemeliharaan unit pembangkit yang memerlukan persiapan pada satu tahun sebelumnya karena pengadaan suku cadang unit pembangkit tersebut memerlukan waktu satu tahun. Rencana operasi tahunan juga meliputi perencanaan alokasi energi yang akan diproduksi dalam satu tahun dalam setiap pusat

listrik. Alokasi energi yang akan diproduksi pusat listrik termis berarti pula alokasi biaya bahan bakar yang merupakan biaya terbesar dalam perusahaan listrik pada umumnya demikian pula halnya pada Perusahaan Umum Listrik Negara (PLN).

b. Rencana Triwulan

Rencana operasi triwulan merupakan peninjauan kembali rencana operasi tahunan dengan jangkauan waktu tiga bulan kedepan. Hal-hal yang direncanakan dalam rencana operasi tahunan ternyata setelah waktu berjalan tidak cocok dengan kenyataan tidak perlu dikoreksi dalam rencana operasi triwulan. Misalnya unit pembangkit baru yang diperkirakan dapat beroperasi dalam triwulan kedua dari rencana tahunan ternyata menjelang triwulan kedua diperkirakan belum dapat beroperasi dalam triwulan kedua. Maka sehubungan dengan hal ini perlu dilakukan koreksi-koreksi terhadap rencana operasi tahunan dalam menyusun rencana operasi triwulan kedua.

c. Rencana Bulanan

Selain merupakan koreksi terhadap rencana triwulan untuk jangkauan waktu satu bulan kedepan, rencana operasi bulanan mulai mengandung rencana yang menyangkut langkah-langkah operasional dalam sistem, sedangkan rencana operasi dalam tahun dan triwulan lebih banyak mengandung hal-hal yang bersifat manajerial. Hal-hal yang bersifat operasional yang dicakup dalam rencana operasi bulanan adalah :

1. Peninjauan atas jam kerja unit-unit pembangkitan yang bersifat *peaking units* terutama dalam kaitannya dengan rencana pemeliharaan. Hal ini

diperlukan untuk membuat jadwal operasi unit-unit pembangkit yang bersangkutan.

2. Alokasi produksi pembangkit listrik termis dalam kaitannya dengan pemesanan bahan bakar kepada perusahaan bahan bakar.

d. Rencana Mingguan

Dalam rencana operasi mingguan tidak ada lagi hal-hal yang bersifat manajerial karena masalah-masalah manajerial diselesaikan dalam jangka seminggu. Rencana operasi mingguan mengandung rencana mengenai langkah-langkah operasional yang akan dilakukan dalam jangka waktu satu minggu yang akan datang dengan memperhatikan pengarahannya yang tercakup dalam rencana bulanan dan mempertimbangkan perkiraan atas hal-hal yang bersifat tidak menentu, seperti jumlah air yang akan diterima PLTA (pada musim hujan) serta beban untuk 168 jam (satu minggu) yang akan datang. Rencana operasi mingguan berisi jadwal operasi serta pembebanan unit-unit pembangkit untuk 168 jam yang akan datang atas dasar pertimbangan ekonomis (pembebanan yang optimum) dengan memperhatikan berbagai kendala operasional seperti beban minimum dan maksimum dari unit pembangkit serta masalah aliran daya dan tegangan dalam jaringan.

e. Rencana harian

Rencana operasi harian merupakan koreksi dari rencana operasi mingguan untuk disesuaikan dengan kondisi yang lebih baik dalam sistem tenaga listrik. Rencana operasi harian merupakan pedoman pelaksanaan Operasi *Real Time*.

A.2. Kendala-Kendala Pada Operasi Pembangkit

a. Kendala Operasi pada PLTU

Kendala operasi yang terdapat pada PLTU adalah :

- a. *Starting time* (waktu yang diperlukan untuk men-*start*) yang relatif lama, dapat mencapai 6-8 jam apabila *start* dilakukan dalam keadaan dingin.
- b. Perubahan daya per satuan waktu (MW per menit) terbatas, kira-kira 5% per menit.

Perubahan beban pada unit PLTU akan memaksa *governor* untuk melakukan penambahan atau pengurangan uap yang dialirkan ke turbin uap yang diikuti dengan penambahan atau pengurangan aliran air ketel, bahan bakar, dan udara. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan unit PLTU menyangkut suatu sistem perubahan beban dan untuk proses *start* dan *stop*.

Keperluan operasional yang perlu diperhatikan untuk setiap unit PLTU adalah :

a. Beban maksimum

Dalam keadaan yang sempurna beban maksimum dari unit PLTU adalah yang sesuai dengan yang tercantum dalam buku spesifikasi teknis unit pembangkit. Dalam spesifikasi teknis tersebut umumnya disebutkan berapa beban maksimum untuk pembebanan yang kontinyu dan berapa beban maksimum untuk waktu tertentu, misalnya berbeban 110% selama dua jam. Apabila ada bagian unit yang tidak sempurna keadaannya misalnya pemanas udara sehingga udara yang masuk ke ruang bakar

terlalu rendah suhunya, maka beban maksimum terpaksa diturunkan misalnya menjadi 90% tergantung kepada hasil pengukuran berbagai parameter.

b. Beban minimum

Beban-beban minimum dari unit PLTU berkisar sekitar 25%. Pembatasan ini biasanya berhubungan dengan masalah kontrol karena pada beban rendah banyak yang tidak linier sehingga menyulitkan kerja alat-alat kontrol. Misalnya hubungan antara suhu gas pembakaran dengan bahan bakar pada beban rendah, nyala api menjadi kurang stabil dan mudah padam. Ada PLTU campuran (*dual fuel firing*) bahan bakar minyak dan batubara, dimana jika bebannya kurang dari 25% tidak dapat beroperasi dengan menggunakan batubara melainkan hanya dapat beroperasi dengan menggunakan bahan bakar minyak, hal ini berkaitan dengan teknik pembakaran dalam ruang bakar ketel uap.

c. Kecepatan perubahan beban

Kecepatan perubahan beban yang mampu dilakukan oleh unit PLTU bergantung pula pada posisi beban permulaan dan berkaitan dengan sistem bahan bakar dan sistem pengisian air ketel.

b. Kendala Operasi Pada PLTD

PLTD yang terpelihara dengan baik praktis tidak memiliki kendala operasi. Dapat di-*start* dan di-*stop* dengan cepat tanpa banyak menambah keausan dan biaya bahan bakarnya lebih hemat daripada PLTG, namun masih lebih mahal jika dibandingkan dengan PLTU. Masalahnya adalah hingga kini belum ada unit

PLTD dengan kapasitas terpasang melebihi 30 MW, bahkan yang memiliki kapasitas terpasang di atas 15 MW pun hanya beberapa yang telah dibuat.

Secara operasional, kendala operasi pada PLTD adalah :

a. Beban Maksimum

Beban maksimum dari unit PLTD seringkali tidak bisa mencapai nilai yang tertulis dalam spesifikasi pabrik karena terdapat bagian-bagian dari mesin diesel yang tidak bekerja dengan sempurna. Misalnya pada beban 90% suhu gas buang sudah mencapai suhu maksimum yang diperbolehkan sehingga beban tidak boleh dinaikkan kembali. Suhu gas buang yang tinggi ini dapat disebabkan karena pengabut kurang baik kerjanya atau karena *turbo charger* sudah kotor sehingga tekanan udara yang masuk ke silinder kurang tinggi. Hal ini juga dapat disebabkan karena *inter cooler* (pendingin udara) kotor sehingga udara yang masuk ke silinder terlalu tinggi suhunya. Beban maksimum PLTD tidak dapat mencapai 100% juga dapat disebabkan karena suhu air pendingin terlalu tinggi.

b. Beban Minimum

Tidak ada hal yang membatasi beban minimum pada unit PLTD, hanya saja apabila unit PLTD sering dibebani rendah, misalnya kurang dari 50%, maka mesin diesel menjadi lekas kotor karena akibat dari pembakaran yang kurang sempurna dari mesin diesel pada beban rendah. Seperti halnya dengan unit-unit pembangkit pada umumnya, unit PLTD tidak baik untuk dibebani rendah mengingat efisiensinya yang menjadi rendah.

c. Kecepatan Perubahan Beban

Unit PLTD umumnya dapat diubah bebannya dari 0% menjadi 100% dalam waktu kurang dari 10 menit. Karena kemampuannya yang cepat dalam mengikuti perubahan beban, unit PLTD digunakan untuk turut mengatur frekuensi sistem hanya saja kemampuan dayanya relatif kecil dibandingkan dengan unit-unit pembangkit lainnya.

c. Kendala Operasi pada PLTP

Secara teknis, PLTP sama dengan PLTU hanya ketel uapnya ada di dalam perut bumi. Karena perubahan beban akan menyangkut perubahan penyediaan uap dari perut bumi, maka PLTP praktis hanya dapat ikut mengambil beban dasar dalam sistem. Dalam arti harus berbeban konstan. Mengenai masalah beban minimum dan beban maksimum pada PLTP, kendala-kendalanya yang menyangkut turbin uap adalah sama seperti pada PLTU, seperti masalah variabel dan pemuaian.

A.3. Cadangan Berputar (*Spinning Reserve*)

Cadangan berputar adalah total jumlah biaya pembangkitan yang tersedia dan berputar dalam sistem (tersinkron) dikurangi total beban dan rugi-rugi yang terdapat dalam sistem tersebut^[7]. Dalam sebuah sistem tenaga listrik harus disediakan cadangan berputar sehingga apabila terdapat satu atau lebih unit yang terlepas dari sistem tidak menurunkan frekuensi atau tidak menurunkan aliran daya sistem. Jadi, jika kehilangan satu unit, maka harus ada jumlah cadangan pada unit lain yang dapat menyediakan daya untuk memperbaiki kehilangan tersebut

pada suatu periode waktu tertentu. Cadangan ini tidak hanya harus cukup untuk mengurangi kegagalan pembangkit, tetapi juga harus ditentukan besar dan letak pengalokasiannya antara unit yang cepat pensinkronannya ke dalam sistem dengan unit yang lambat pensinkronannya.

Hal ini sangat berpengaruh terhadap sistem otomatis pengaturan pembangkitan yang mengatur besarnya frekuensi dan keterlepasan (*outage*) pembangkit. Besarnya cadangan berputar diperhitungkan sebagai besarnya persentase daya yang harus disediakan dari perkiraan beban puncak atau sebesar unit terbesar pada suatu periode waktu tertentu. Jika unit pembangkit berbeban 40%, maka unit harus dianggap mempunyai cadangan berputar sebesar 50% - 40% = 10%, dan jika unit dalam keadaan berbeban 60%, maka cadangan berputarnya dapat dianggap 100% - 60% = 40%^[3].

A.4. Unit Pembangkit Termal

a. Karakteristik *Input-Output* Pembangkit Termal

Karakteristik *input-output* pembangkit termal adalah karakteristik yang menggambarkan hubungan antara input bahan bakar (liter/jam) dan output yang dihasilkan oleh pembangkit (MW)^[7]. Pada umumnya karakteristik *input-output* pembangkit termal didasarkan pada :

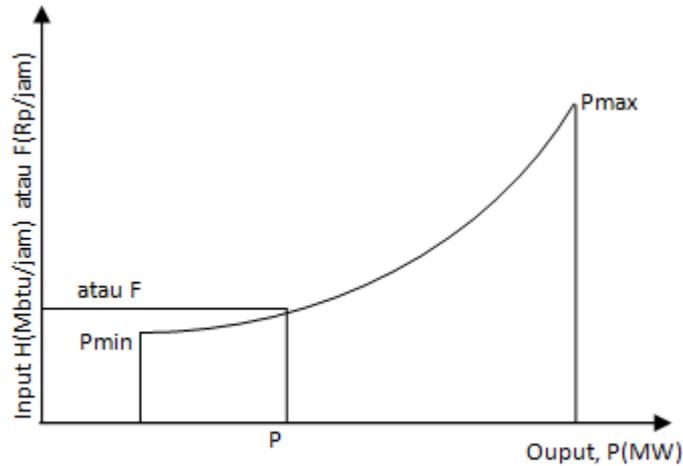
$$H_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2.1)$$

di mana : H_i = *Input* bahan bakar pembangkit termal ke-i (liter/jam)

P_i = *Output* pembangkit termal ke-i (MW)

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ = Konstanta input-output pembangkit termal ke-i

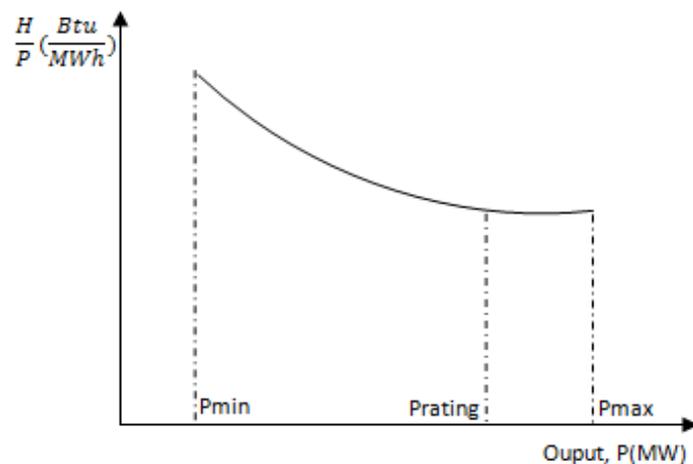
Penentuan parameter $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ membutuhkan data yang berhubungan dengan input bahan bakar H_i , dan output pembangkit P_i .



Gambar 2.1. Karakteristik *Input-Output* Unit Pembangkit Termal.

b. Karakteristik *Heat-Rate*

Karakteristik *heat-rate* merupakan karakteristik yang menunjukkan efisiensi dari sebuah sistem. Karakteristik *heat-rate* sebuah unit pembangkit menunjukkan *input* kalor yang diberikan untuk menghasilkan energi sebesar 1 kW jam pada MW *output* dari suatu unit^[7].



Gambar 2.2. Kurva Karakteristik *Heat-Rate* Pembangkit Termal.

B. Optimasi Penjadwalan Pembangkit

Meminimumkan biaya operasi pembangkitan merupakan optimasi, sehingga optimasi pembangkitan dapat didefinisikan sebagai suatu proses pembangkitan yang bertujuan untuk mengoptimalkan daya dan meminimumkan biaya pembangkitan^[4]. Untuk mengikuti siklus pembangkitan energi listrik, dilakukan penjadwalan unit yang *commit (on)* dan unit yang *off* dalam siklus tertentu. Tujuan dari penjadwalan pembangkitan adalah mengatur daya keluar dari masing-masing pusat pembangkit yang ada dalam sistem atau daya keluar dari masing-masing unit pembangkit yang ada dalam suatu pusat pembangkit, untuk mensuplai beban tertentu dalam keadaan tertentu sehingga jumlah biaya pembangkitan seminimum mungkin.

Optimasi dapat didefinisikan sebagai suatu usaha untuk meminimumkan total biaya operasi semua pembangkit dengan *constraint*-nya (batasan) masing-masing. *Constraint* ini diperlukan agar pilihan kombinasi *on-off* pembangkit yang akan dijadwalkan dapat menjaga sistem selalu berada pada kondisi normal dan ekonomis dalam pengoperasiannya. Jumlah total pembangkitan harus sama dengan total kebutuhan beban dan rugi-rugi jaringan transmisi^[7].

$$\sum_{i=1}^N P_{GTim} + \sum_{j=1}^N P_{GHjm} = P_{Dm} + P_{loss,m} \quad (2.2)$$

P_{GTim} adalah daya *output* pada unit ke 'i' dan waktu 'm' pembangkit termis dan P_{GHjm} adalah daya *output* pada unit ke 'j' dan waktu 'm' pembangkit hidro.

Dengan kata lain, pada pembangkit termis meminimisasi :

$$\sum_{i=1}^N F_i(P_{GTim}) \quad (2.3)$$

$F_i(P_{GTim})$ merupakan fungsi biaya bahan bakar dari pembangkit ke ‘i’, dan merupakan perbandingan antara biaya bahan bakar yang digunakan (\$) dengan daya yang dihasilkan (MW).

Secara umum biaya produksi dapat dituliskan sebagai fungsi kuadrat :

$$F_{ij}(P_{GTim}) = \alpha_i + \beta_i P_{GTim} + \gamma_i P_{GTim}^2 \quad (2.4)$$

Di mana $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ adalah koefisien biaya dari unit termis.

Dengan memperhatikan kapasitas pembangkit termis :

$$P_{GTim}^{min} \leq P_{GTim} \leq P_{GTim}^{max} \quad (2.5)$$

Akan diketahui total operasi biaya pada pembangkit termis :

$$OC_{T,GTim} = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N PC_{i,m} U_{i,m} \quad (2.6)$$

$U_{i,m}$ adalah variabel biner untuk mengindikasikan keadaan *on/off* unit ke ‘i’ waktu ke ‘m’.

Maka, daya dari permintaan beban merupakan kombinasi penjadwalan pembangkit hidro termis :

$$P_{Dm} = \left(\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N P_{GTim} U_{i,m} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N P_{GHjm} U_{i,m} \right) - P_{loss,m} \quad (2.7)$$

C. Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) adalah sebuah teknik *stochastic* berdasarkan populasi yang terinspirasi oleh perilaku sosial dari pergerakan burung atau ikan (*bird flocking or fish schooling*). Teknik PSO dikemukakan oleh Russell C. Eberhart dan James Kennedy pada tahun 1995. Bersama dengan *ant Colony Optimization* (ACO), PSO digolongkan ke dalam metaheuristik optimasi *Swarm*

Intelligence (SI) di mana prinsip sosio-psikologi yang mempengaruhi perilaku sosial makhluk hidup diadopsi^[1].

Sebagai sebuah alat optimasi, PSO menawarkan suatu prosedur pencarian berdasarkan populasi yang ada di dalamnya individu-individu, yang disebut partikel-partikel, mengubah posisi atau *state* mereka terhadap waktu. Mereka ‘terbang’ mengitari suatu ruang pencarian multi dimensi. Selama ‘penerbangan’ setiap individu menyesuaikan posisinya menurut pengalaman pribadinya, dan menurut pengalaman individu disebelahnya, sehingga membentuk posisi terbaik yang sesuai untuk dirinya dan untuk individu disebelahnya. Jadi, algoritma PSO menggabungkan metode *local search* dengan metode *global search* yang menyeimbangkan antara eksplorasi dan eksploitasi.

PSO memiliki banyak kemiripan dengan *Genetic Algorithms* (GA), di mana sistem diawali dengan suatu populasi yang terbentuk dari solusi-solusi acak kemudian sistem mencari optimalitas melalui pembaharuan generasi secara acak. Namun demikian, PSO tidak memiliki *evolutions operators* seperti mutasi dan *crossover* (persilangan). Sebaliknya, *potensial solutions*, yakni individu-individu yang disebut partikel-partikel, ‘terbang’ mengikuti individu-individu yang optimum saat ini (*current optimum particles*).

Dalam PSO, solusi potensial yang disebut partikel, bergerak melalui penelusuran ruang dengan *velocity* yang dinamis hingga ditemukan posisi yang relatif tidak berubah, atau sampai keterbatasan komputasi terlampaui. Oleh karena itu, partikel-partikel mempunyai kecenderungan untuk bergerak ke arean penelusuran yang lebih baik setelah melewati proses penelusuran.

Dengan demikian, mekanisme berbagi informasi yang dimiliki PSO berbeda secara signifikan dengan yang dimiliki GA. Dalam GA, setiap individu yang disebut *chromosome*, berbagi informasi satu sama lain, sehingga keseluruhan populasi bergerak sebagai sebuah kesatuan menuju optimalitas. Dalam PSO, hanya *gbest*, atau *pbest*, yang memberi informasi kepada yang lain. Ini adalah sebuah mekanisme berbagi informasi satu arah. Proses evolusi hanya mencari solusi yang terbaik. Dengan demikian, seluruh individu, yang disebut partikel-partikel, bergerak konvergen secara cepat ke solusi terbaik^[5,6].

Dalam membentuk algoritma PSO harus terpenuhi beberapa elemen dasar, diantaranya adalah^[6]:

- Partikel (*Particles*): Merupakan suatu calon hasil pemecahan akan masalah optimisasi pada suatu *swarm*.
- Populasi (*Population*): Merupakan sekumpulan n partikel pada waktu t .
- *Swarm*: Merupakan populasi acak yang tak teratur serta berpindah-pindah secara berkelompok dimana pada masing-masing partikel cenderung untuk bergerak sendiri-sendiri secara acak.
- *Velocity*: Merupakan kecepatan yang menggerakkan proses optimasi yang menentukan arah di mana partikel diperlukan untuk berpindah dan memperbaiki posisinya semula.
- *Learning Rates* (C1 dan C2): suatu konstanta untuk menilai kemampuan partikel (C1) yang menunjukkan bobot dari partikel terhadap memorinya. Nilai C1 dan C2 antara 0-2.
- *Inertia Weight*: merupakan parameter pengontrol yang digunakan untuk mengontrol dampak dari kecepatan tertentu pada kecepatan-kecepatan

sebelumnya. Karena itu, hal tersebut mempengaruhi pertukaran antara kemampuan partikel dalam menjelajah *global* dan *local*.

- *Personal best (Pbest)*: Merupakan posisi *individual best* dari suatu partikel yang dipersiapkan untuk mendapatkan suatu solusi yang terbaik.
- *Global best (Gbest)*: Merupakan suatu posisi terbaik diantara seluruh posisi terbaik (*Pbest*) yang telah diperoleh oleh masing-masing individu.
- *Stopping criteria*: Ini merupakan suatu kondisi untuk mengakhiri proses pencarian. Pada penelitian ini pencarian akan berhenti jika salah satu syarat berikut terpenuhi:
 - a. Jika nilai hasil iterasi tidak berubah untuk nilai tertentu selang iterasi maksimum yang ditentukan.
 - b. Jika jumlah iterasi telah mencapai batas maksimum.

a. Algoritma PSO

Algoritma PSO pada dasarnya mengatur suatu populasi dari partikel, dimana tiap partikel merupakan suatu hasil yang potensial bagi sebuah permasalahan optimisasi. Berikut ini adalah algoritma dari PSO :

1. Menentukan ukuran *swarm* (populasi) dan menentukan nilai awal dari masing-masing partikel secara acak (*random*).
2. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan untuk setiap partikel.
3. Menentukan kecepatan atau *velocity* mula-mula.
4. Menghitung *Pbest* dan *Gbest* mula-mula.
5. Menghitung kecepatan pada iterasi berikutnya dengan persamaan di bawah ini :

$$V_j(i) = \theta V_j(i - 1) + c_1 r_1 [P_{best,j} - X_j(i - 1)]$$

$$+c_2r_2[Gbest - Xj(i - 1)] \quad (2.8)$$

Dengan,
$$\theta = \theta_{max} - \left(\frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{iter_{max}} \right) \cdot iter \quad (2.9)$$

Ket.

i = iterasi ; $j = 1,2,3, \dots, N$; r_1 dan r_2 adalah bilangan random ; θ_{max} dan θ_{min} adalah random.

6. Menentukan posisi partikel pada iterasi berikutnya menggunakan persamaan di bawah ini :

$$Xj(i) = Xj(i - 1) + Vj(i) \quad (2.10)$$

7. Mengevaluasi nilai fungsi tujuan pada iterasi selanjutnya.
8. Memperbarui nilai $Pbest$ dan $Gbest$.
9. Mengecek apakah solusi sudah optimal atau belum. Bila sudah optimal, maka proses algoritma berhenti. Namun, bila belum optimal, kembali ke langkah 5.