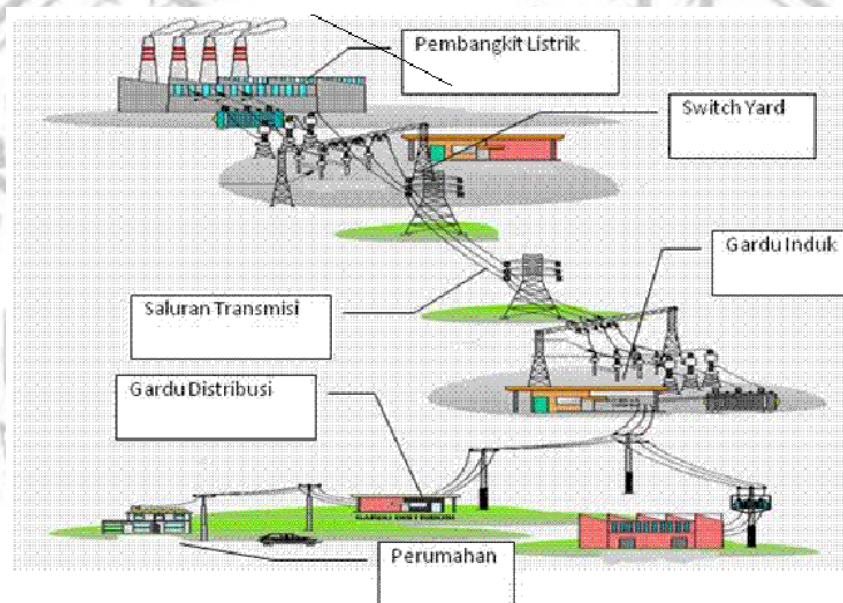


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik modern ialah sistem yang kompleks yang terdiri dari pusat pembangkit, saluran transmisi serta jaringan distribusi yang berperan untuk menyalurkan energi dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Secara umum, sistem kelistrikan dapat tergambar dalam skema dibawah ini.



Gambar 2.1 Skema Sistem Tenaga

1. *Power Plant*

Power plant merupakan sarana yang dirancang serta digunakan guna menciptakan tenaga listrik. *Power plant* biasanya terdiri dari sebagian komponen utama, yaitu generator, turbin, pembangkit uap, pembakaran ataupun reaktor nuklir, dan sistem kontrol serta distribusi listrik. Pertama pembangkit tenaga listrik turbin akan bekerja setelah itu memutar generator yang bakal merubah tenaga mekanik sebagai tenaga listrik.

2. Sistem Transmisi Tenaga Listrik

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan jaringan infrastruktur yang digunakan guna mentransfer tenaga listrik dari pembangkit listrik (*power plant*) ke konsumen akhir. Tujuan utama dari sistem transmisi tenaga listrik yaitu guna menyediakan pasokan listrik yang andal, efektif serta terjamin kepada konsumen.

3. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik bertugas mengirimkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke konsumen akhir, seperti rumah tangga, gedung perkantoran, industry, serta sektor-sektor yang lain. Sistem distribusi ini terdiri dari jaringan kabel serta perlengkapan yang mendistribusikan listrik dengan nyaman serta efektif ke bermacam titik pengguna.

2.1.1 Tujuan Operasi Sistem Tenaga Listrik

Untuk mencapai tujuan dari operasi sistem tenaga listrik perlu memperhatikan tiga aspek, yaitu:

- a. **Ekonomi** ialah listrik harus dioperasikan secara ekonomis, namun tetap mempertimbangkan keandalan dan kualitasnya.
- b. **Keandalan** ialah tingkat keamanan sistem akan potensi terjadinya hambatan. Sebisa mungkin hambatan yang terjadi pada pembangkit atau transmisi dapat dikendalikan tanpa menyebabkan pemadaman di sisi konsumen.
- c. **Kualitas** tenaga listrik yang diukur dengan kualitas tegangan serta frekuensi yang dilindungi sedemikian rupa sehingga tetap pada kisaran yang ditetapkan.

Pada saat melaksanakan pengendalian operasi sistem tenaga listrik, susunan prioritas tujuan diatas dapat berganti sesuai dengan kondisi sesungguhnya (*real time*). Ketika hambatan terjadi, maka keamanan menjadi aspek paling utama yang diperhatikan, sedangkan ekonomi dan kualitas tidak menjadi aspek utama yang diperhatikan.

2.1.2 Prinsip Kerja Pembangkit Tenaga Listrik

Pembangkit Tenaga Listrik ialah bagian dari sistem tenaga listrik yang berperan membangkitkan tenaga listrik dengan mengganti sumber tenaga lain jadi tenaga listrik. Adapun sumber energi tersebut bisa berupa energi air, batu bara, angin, surya, bahan bakar minyak dan lain sebagainya. Setiap energi memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda-beda, oleh karena itu penggunaannya pun disesuaikan dengan kepentingannya. Umumnya, pembangkit tenaga listrik diklasifikasikan kedalam dua bagian besar[7]. **Pertama**, pembangkit listrik termis, yang mana pembangkit ini mengkonversikan energi panas menjadi energi listrik. Energi panas tersebut dapat berasal dari panas bumi, minyak, uap, gas dan lain sebagainya. Dengan begitu dapat dikatakan bahwa pembangkit termis yang berasal dari panas bumi dapat disebut dengan pembangkit panas bumi, sedangkan untuk pembangkit termis yang berasal dari uap dapat disebut dengan pembangkit tenaga uap. **Kedua**, pembangkit tenaga non termis, berbeda dengan pembangkit tenaga termis yang mengkonversi energi panas menjadi energi listrik, pembangkit tenaga non termis berasal dari energi penggerak yang awalnya bukan bersifat panas. Sebagai contoh seperti PLTA atau pembangkit listrik tenaga air. Oleh karena itu, untuk menentukan sebutan atau nama dari sebuah pembangkit disesuaikan dengan oleh apa penggerak awal dari pembangkit tersebut.

2.1.3 Biaya Pembangkit Tenaga Listrik

Biaya operasi atau biaya baku produksi dibagi menjadi dua kategori, yakni:

- a. **Biaya tetap**, merupakan biaya yang pasti ada meskipun unit pembangkit sedang tidak beroperasi. Adapun yang termasuk dalam biaya ini seperti *employee cost*, *administration cost*, *interest cost*, *capital cost*, dan kurs mata uang asing terhadap rupiah. Biaya-biaya tersebut disebut dengan komponen A, sedangkan untuk *fixed operation cost* dan *maintenance cost* disebut dengan komponen B.

b. **Biaya variabel**, merupakan biaya yang hanya ada saat unit pembangkit beroperasi, seperti *fuel cost* dan *maintenance cost*. Banyaknya biaya yang dibutuhkan pada kategori ini disesuaikan dengan seberapa banyak produksi beban yang dilakukan. Rp/kWh merupakan satuan yang menyatakan biaya variabel. Biaya variabel juga dikenal dengan istilah biaya energi atau harga energi. Biaya pembelian bahan bakar dalam variabel ini disebut dengan komponen C, sedangkan *maintenance variabel cost* disebut dengan komponen D.

2.2 Sistem Kelistrikan Mahakam Wilayah Kalimantan Timur

Sistem Kelistrikan Mahakam merupakan sistem pembangkit listrik yang mensuplai listrik ke Kalimantan Timur di Indonesia. Sistem tersebut dipasok oleh beberapa macam jenis pembangkit, diantaranya PLTGU, dan PLTD. Sistem Kelistrikan Mahakam mempunyai daya mampu sebesar 125,1 Mega Watt (MW). PT PLN (Persero) wilayah Kalimantan Timur mempunyai beberapa unit-unit pembangkit yaitu:

1. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Gunung Malang memiliki 6 buah unit pembangkit dengan total daya 18 MW.
2. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Batakan memiliki 2 buah unit pembangkit dengan total daya 7 MW.
3. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Keledang memiliki 5 buah unit pembangkit dengan total daya 18,7 MW.
4. Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap Tanjung Batu memiliki 3 buah unit pembangkit dengan total daya 54,2 MW.
5. Pembangkit Listrik Tenaga Diesel Karang Asam memiliki 7 buah unit pembangkit dengan total daya 27,2 MW.

2.3 Pertimbangan Operasi Ekonomis

Dalam manajemen sistem tenaga listrik operasi ekonomis pembangkit tenaga listrik menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan. Operasi ekonomis adalah sebuah bagian dari pembenahan unit-unit pembangkit yang memiliki tujuan guna meminimalkan biaya yang harus dikeluarkan ketika inputan pembangkitan. Dalam pelaksanaannya, pengoperasian sistem tenaga listrik perlu dipantau secara berkala dalam jangka waktu tertentu hingga tercapainya biaya bahan bakar yang optimal sebagai tujuan utamanya.

Dalam pengaturan pembangkit, untuk meminimalisir biaya operasi dapat dilakukan dengan cara menentukan kombinasi yang sesuai dalam unit pembangkit. Pengaturan pembangkit guna memastikan pembangkit yang tengah beroperasi serta pembangkit yang tidak beroperasi dalam mengatur beban system sepanjang siklus waktu tertentu disebut dengan *unit commitment*. Dalam mempertimbangkan teknis dan ekonominya dibutuhkan pengaturan atau penjadwalan unit pembangkit.

2.4 Economic Dispatch

Economic dispatch atau yang biasa disingkat dengan ED adalah sebuah rancangan dalam sistem tenaga listrik guna menganalisis aliran daya optimal dengan maksud untuk menekan dan menemukan biaya yang ekonomis dalam sebuah operasi pembangkit[8]. *Economic dispatch* memiliki tujuan dasar untuk menjadwalkan keluaran dari segala unit pembangkit yang ada dalam sistem tenaga listrik, sehingga meminimalisir biaya bahan bakar namun tetap memenuhi kebutuhan listrik konsumen dengan baik.

Optimasi *Economic Dispatch* merupakan sebuah upaya untuk mengurangi total biaya pembangkit dari sebuah generator termal dengan terpenuhinya *equality constraints* dan *inequality constraints* [9]. *Equality constraints* merupakan batasan kesetimbangan daya listrik, harus memastikan bahwa total daya listrik yang dibangkitkan dari unit-unit pembangkit harus sesuai dengan total beban listrik yang diperlukan oleh sistem. Persamaan yang merepresentasikan *equality constraint* untuk menjaga keseimbangan daya listrik adalah sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (2.1)$$

Sedangkan *inequality constraints* merupakan batasan yang harus memastikan bahwa daya listrik keluaran yang dibangkitkan unit wajib lebih besar atau sama dengan daya listrik minimum yang diperkenankan dan lebih kecil atau sama dengan daya listrik maksimum yang diperkenankan. Persamaan yang merepresentasikan *inequality constraint* adalah sebagai berikut:

$$P_{min_i} \leq P_i \leq P_{max_i} \quad (2.2)$$

Optimisasi *economic dispatch* dibagi kedalam dua macam, yaitu *static economic dispatch* dan *dynamic economic dispatch* [10]. *Static economic dispatch* biasa dipakai dalam satu tingkatan beban saja dan jika dipakai pada sistem dengan rentang beban tertentu, sehingga hal tersebut akan melanggar batasan *rate-rate*. Dengan begitu fungsi *static economic dispatch* kurang berjalan dengan efektif. Sedangkan untuk *dynamic economic dispatch* adalah hasil pemekaran dari *static economic dispatch* yang dipakai untuk menentukan pembagian *output* daya listrik pada setiap unit pembangkit secara ekonomis dengan jangka waktu tertentu, hal tersebut tidak melanggar *ramp-rate*. Sehingga *output* pembangkit pada waktu-*n* berdampak dalam menentukan *output* pembangkit pada waktu-*n* selanjutnya.

2.5 Perhitungan Biaya Pembangkitan

Untuk menangani permasalahan *economic dispatch* dalam unit-unit pembangkit tenaga listrik, diperlukan penentuan *output* daya dari masing-masing pembangkit yang dapat memenuhi kebutuhan konsumen dengan biaya bahan bakar yang minimal, sambil memperhatikan kapasitas masing-masing pembangkit. Model fungsi biaya untuk unit-unit pembangkit listrik membutuhkan data karakteristik laju panas, yang juga dikenal sebagai *heat rate* (H), diukur dalam

satuan Btu per jam, serta biaya masukan untuk pembangkitan, yang dinyatakan dalam rupiah per MBtu.

$$F=H \times \text{Cost} \quad (2.3)$$

Setelah mendapatkan biaya pembangkitan dari berbagai tingkat daya aktif, langkah berikutnya adalah melakukan interpolasi untuk memperoleh persamaan eksponensial yang merepresentasikan fungsi biaya terhadap daya aktif dari titik-titik tersebut. Dengan begitu, dapat diperoleh persamaan karakteristik biaya dari unit pembangkit. Persamaan karakteristik biaya ini akan digunakan sebagai fungsi objektif dalam permasalahan optimasi biaya pembangkitan:

$$FT = \sum_{i=1}^n F_i (P_i) \quad (2.4)$$

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$$

Diketahui:

FT : total biaya pembangkitan (Rp)

$F_i(P_i)$: fungsi biaya input-output pembangkit ke-I (Rp/jam)

a_i, b_i, c_i : koefisien biaya dari pembangkit i

P_i : output pembangkit I (MW)

N : jumlah unit pembangkit

i : indeks dispatchable unit

Hal-hal yang perlu dipertimbangkan dalam situasi economic dispatch ini adalah:

1. *Equality constraint*

Agar keseimbangan daya listrik tetap terjaga, persamaan equality constraint harus memverifikasi bahwa total daya listrik yang dihasilkan oleh unit-unit pembangkit listrik sepadan dengan total beban listrik yang dibutuhkan oleh sistem. Persamaan yang mengekspresikan equality constraint untuk menjaga keseimbangan daya listrik adalah sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_D + P_L \quad (2.5)$$

2. Inequality constraint

Dalam sistem pembangkitan listrik, ada pembatasan atas dan bawah yang harus dipenuhi pada keluarannya, termasuk:

$$P_{min_i} \leq P_i \leq P_{max_i} \quad (2.6)$$

2.6 Perhitungan Rugi-rugi Transmisi

Dalam perhitungan ED (*economic dispatch*) dengan mempertimbangkan hitungan rugi-rugi transmisi dapat memberikan hasil yang lebih optimal, sebab memperhitungkan energi total sesungguhnya yang wajib dibangkitkan oleh pembangkit disebabkan oleh terdaptnya rugi-rugi[11]. Maka uraian biaya pembangkitnya pun semakin optimal. Nilai rugi-rugi transmisi dalam masing-masing saluran antar bus dapat mengalami perubahan sesuai seberapa besar energi yang disalurkan. Dalam menetapkan pembebanan pembangkit untuk memfasilitasi rugi transmisi harus dijelaskan sebagai fungsi dari pembebanan pusat pembangkit. Maka dari itu rumus yang digunakan adalah rumus *losses* Kron yang terdiri dari persamaan linear & persamaan konstan. Adapun rumus tersebut digambarkan seperti berikut:

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (2.7)$$

Keterangan:

P_L : Rugi-rugi transmisi.

B_{ij} : Koefisien kerugian transmisi atau *Loss coefficients*.

P_i, P_j : Output pembangkit ke - i,j.

B_{0i}, B_{00} : Konstanta rugi-rugi daya.

Loss coefficients bisa dikatakan konstan untuk perubahan daya keluaran masing-masing pembangkit pada sistem.

2.7 Particle Swarm Optimization

Particle swarm optimization adalah metode yang menjadikan sifat natural sekelompok hewan seperti burung, rayap, lebah, dan semut sebagai inspirasi dasar dalam gagasannya[12]. Metode ini meniru sifat natural organisme tersebut seperti kebiasaan yang kerap dilakukan pada aktivitas sehari-hari dan keterkaitan antara satu individu dengan individu yang lain dalam sebuah populasi. Kata "*particle*" dalam metode ini mengarah pada individu, misalnya seekor burung dalam populasi burung. Setiap *particle* tersebut saling memiliki keterkaitan dengan kecerdasannya masing-masing. Selain itu, perilaku kelompok lain dalam populasi juga memberikan pengaruh terhadap individu/*particle* tersebut. Dengan begitu, apabila salah satu individu menemukan jalan yang lebih efektif untuk mengarah ke sumber makanan, maka individu yang lain pun akan meniru jalan tersebut. Walaupun lokasi semula mereka berada jauh dari populasi tersebut.

Algoritma *behaviorally inspired* adalah sebutan lain untuk metode optimasi berlandaskan kecerdasan *particle* yang bisa dijadikan pilihan *alternative* selain algoritma genetika, yang juga terkenal dengan *evolution-based procedures*. Pada tahun 1995, J.Kennedy dan R.C Eberhart menjadi penggagas pertama algoritme *particle swarm optimization* ini. Dalam metode PSO terdapat tiga elemen penting yaitu, *particle*, komponen sosial & kognitif, serta kecepatan *particle*[12]. Masing-masing *particle* tersebut mewakili solusi dari sebuah *problem* yang dialami. Pada *particle* untuk pembelajaran terdiri dari dua faktor yaitu, *cognitive learning* dan *social learning*. *Cognitive learning* disebut sebagai pBest yang merupakan posisi terbaik yang telah dicapai oleh sebuah *particle*, sedangkan *social learning* disebut

sebagai gBest yang merupakan posisi terbaik *particle* secara menyeluruh dalam *swarm*. Dalam metode ini parameter pBest dan gBest berguna untuk mengukur kecepatan *particle* dan kecepatan mengukur posisi *particle* berikutnya.

Metode PSO berasal dari upaya untuk meninterpretasikan sistem sosial, secara menyeluruh landasan matematis untuk metode tersebut tidak dikembangkan bersamaan dengan algoritmanya[13]. Clerc pada tahun 1999 dalam studinya tentang stabilitas dan konvergensi PSO memperkenalkan *constriction factor*. Clerc menjelaskan penggunaan *constriction factor* mungkin dibutuhkan untuk memastikan konvergensi algoritma gerombolan *particle*. Kemudian lahir lah metode CFPSO (*constriction factor particle swarm optimization*) yang pada dasarnya merupakan hasil pengembangan dari PSO *standart* dengan menambahkan *constriction factor* (faktor pembatas) yang memiliki tujuan untuk mempercepat pencarian algoritma PSO yang mengarah pada konvergensi.

Pendekatan *constriction factor* menghasilkan konvergensi individu seiring dengan berjalannya waktu. Berbeda dengan metode komputasi evolusioner lainnya, metode CFPSO memastikan konvergensi prosedur pencarian berdasarkan teori matematika. Oleh sebab itu, metode tersebut mampu menghasilkan solusi yang berkualitas lebih tinggi dibandingkan dengan metode PSO *standart*[13]. Metode CFPSO berprinsip pada penggunaan sekelompok partikel atau agen yang bertugas mencari solusi optimal dalam suatu ruang pencarian. Dalam hal ini, setiap partikel memperhitungkan posisi dan kecepatannya sendiri, sekaligus mengamati posisi dan kecepatan terbaik partikel di dalam kelompok (*pbest*) serta posisi dan kecepatan terbaik global dari seluruh partikel (*gbest*).

Kennedy dan Eberhart memperkenalkan algoritma PSO pada tahun 1995, yang terinspirasi dari perilaku sosial hewan seperti kumpulan burung, ikan, atau serangga pada *swarm* [14]. Algoritma ini memperhitungkan dampak tindakan setiap partikel individu terhadap keseluruhan grup. Setiap partikel individu bergerak dalam ruangnya sendiri dan mengingat posisi terbaik yang pernah dicapainya. Kemudian,

informasi tentang posisi terbaik akan disampaikan kepada partikel lain yang akan menyesuaikan posisi dan kecepatannya berdasarkan informasi tersebut. Dalam algoritma PSO, posisi dan kecepatan partikel dinyatakan dalam bentuk dimensi ruang dengan formulasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned} X_i &= X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in} \\ V_i &= V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Diketahui:

- X : Posisi partikel
- V : Kecepatan Partikel
- i : Indeks partikel
- n : Ukuran dimensi ruang

Persamaan untuk memperbarui kecepatan dari individu ke-i dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\begin{aligned} V_i^{k+1} &= V_i^k + c_1 r_1 (P_{best\ i}^k - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best\ i}^k - X_i^k) \\ X_i^{k+1} &= X_i^k + V_i^{k+1} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Diketahui:

- V_i^k : Velocity individu ke-i pada iterasi k
- X_i^k : Posisi individu ke-i pada iterasi k
- C_1, C_2 : Koefisien akselerasi
- R_1, R_2 : Jumlah random antara 0 sampai 1
- $P_{best\ i}^k$: Personal best individu ke-i sampai iterasi k.
- $G_{best\ i}^k$: Global best kelompok sampai iterasi k.

Persamaan yang mengubah kecepatan setiap partikel dengan menggunakan Faktor Kontraksi seperti yang diperlihatkan dalam persamaan berikut [15]:

$$V_i^{k+1} = k \times [V_i^k + c_1 r_1 (P_{best\ i}^k - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best\ i}^k - X_i^k)] \quad (2.10)$$

Dengan koefisien *constriction* (K) yaitu:

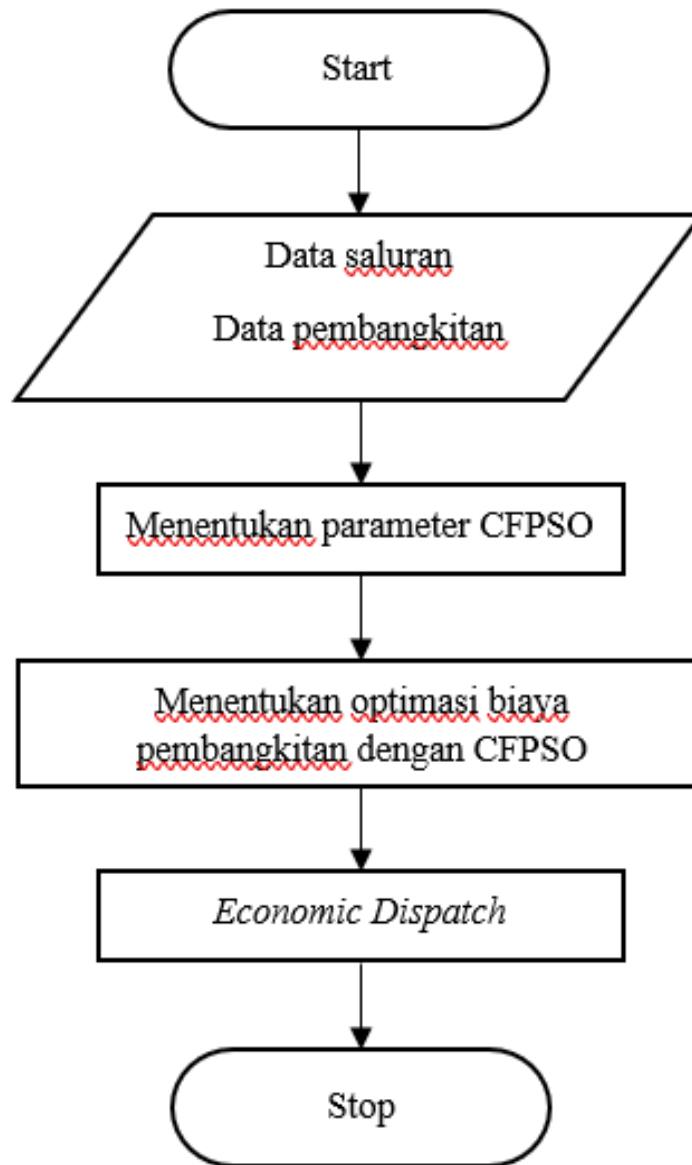
$$K = \frac{2}{|2 - \varphi \sqrt{\varphi^2 + 4\varphi}|} \quad (2.11)$$

Dengan

$$\varphi = c_1 + c_2 \text{ dan } \varphi > 4 \quad (2.12)$$



2.8 Diagram Alir CFPSO



Gambar 2.2. Flowchart Metode Constriction Factor Particle Swarm Optimization (CFPSO) [14]

Pada tahap awal penelitian, dilakukan pengumpulan data dari studi literatur jurnal penelitian sebelumnya yang terdiri dari data saluran, pembebanan, dan pembangkitan. Berikutnya, parameter-parameter CFPSO ditetapkan seperti, *Dimensi masalah, jumlah kelompok, iterasi maksimum, koefisien percepatan, dan daya output/Pd.* yang akan digunakan dalam perhitungan menggunakan program MATLAB. Pengoptimalan biaya pembangkitan menggunakan metode CFPSO diimplementasikan melalui pemrograman di perangkat lunak MATLAB. Ini melibatkan penggunaan rumus PSO bersama dengan faktor konstiksi dalam persamaan modifikasi kecepatan dan persamaan koefisien konstiksi. Hasil simulasi perhitungan diperoleh setelah program tersebut dijalankan.

