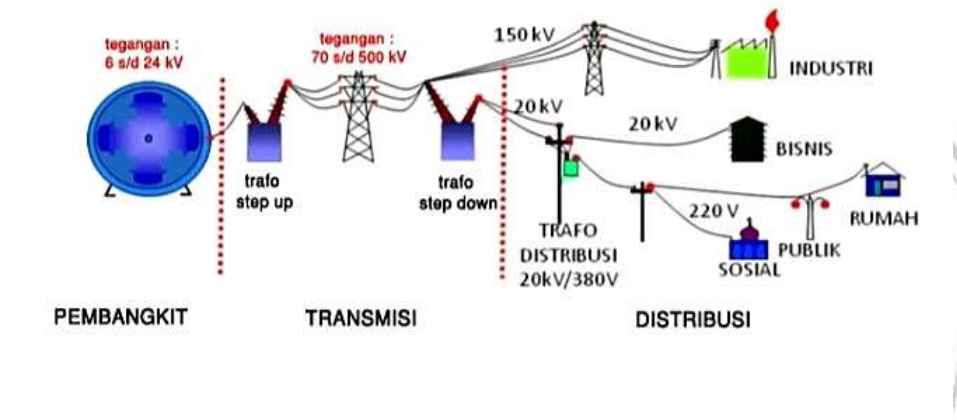
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem energi listrik terdiri dari tiga komponen utama, yaitu pembangkit listrik, jalur transmisi, dan jaringan distribusi. Fungsi dari sistem distribusi membentuk bagian integral yang menghubungkan beban yang terpisah satu sama lain, yang mengalirkan dan mendistribusikan energi listrik dari sumber pembangkit menuju pelanggan atau beban



Gambar 2.1 Proses Pendistribusian Daya Listrik

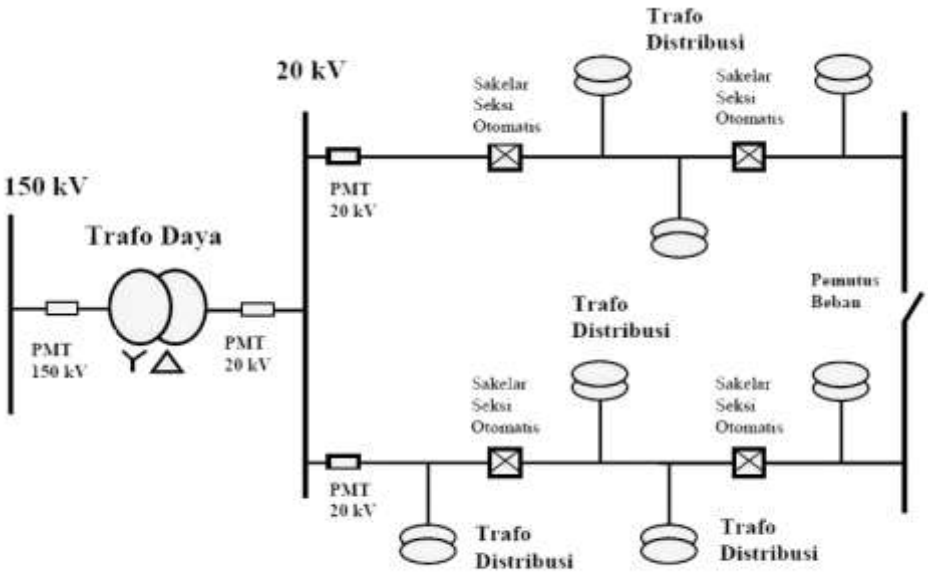
Pada prosesnya, sistem distribusi mengalirkan daya dari pusat pembangkit listrik ke jaringan transmisi, kemudian berlanjut ke stasiun listrik utama. Setelah itu, listrik dialirkan ke dalam jaringan distribusi utama, dan setelah melalui stasiun distribusi, energi listrik disalurkan menuju jaringan distribusi sekunder. Akhirnya, tenaga listrik mencapai konsumen melalui tahap akhir distribusi. Sebelumnya dilakukan penurunan dari masing-masing tegangan setiap jalur pendistribusian. Pembagian saluran distribusi sendiri terdiri dari dua bagian, yaitu:

1. Saluran distribusi utama adalah saluran yang menghubungkan gardu induk dan gardu distribusi.
2. Saluran distribusi sekunder, yang juga dikenal sebagai jaringan tegangan rendah (JTR), merupakan saluran yang menghubungkan gardu distribusi dengan beban.

Sebelum mencapai pelanggan, terjadi dua tahap penurunan tegangan dalam sistem distribusi. Pertama, pada Gardu Induk (GI), tegangan awal 500 KV mengalami penurunan menjadi 150 KV atau 70 KV. Kedua, pada gardu distribusi, tegangan 150 KV atau 70 KV tersebut turun kembali menjadi 20 KV sebelum mencapai titik akhir distribusi [9].

2.2 Jaringan Distribusi Tipe Radial

Sistem ini diterapkan di Indonesia karena kemudahannya dalam penerapan, dengan keunggulan utama berupa biaya yang sangat ekonomis. Spesifikasi sistem melibatkan satu jalur tanpa cadangan, yang menghubungkan langsung sumber tegangan ke pelanggan dalam satu alur. Meskipun demikian, kelemahan sistem terletak pada distribusi listrik yang menyebabkan kehilangan tegangan yang signifikan dan kerugian daya. Layanan ini juga cenderung tidak stabil karena hanya memiliki satu jalur tanpa backup, sehingga selama proses perbaikan, distribusi listrik akan terganggu dan perlu dimatikan. Untuk melokalisir gangguan pada bentuk radial ini biasanya dilengkapi dengan peralatan pengaman, fungsinya untuk membatasi daerah yang mengalami pemdaman total [10]. Penerapan sistem radial sangat sederhana dan mudah dalam pemasanganya, sistem pada umumnya seperti saluran udara tegangan menengah (SUTM) banyak digunakan jaringan tipe radial.



Gambar 2.2 Saluran Distribusi Tipe Radial

2.3 Gangguan Pada Sistem Distribusi

Jaringan distribusi merupakan elemen infrastruktur listrik yang paling terdekat dengan beban atau konsumen. Secara fisik, jaringan distribusi umumnya memiliki panjang yang lebih besar daripada saluran transmisi, dan tingkat gangguannya juga lebih tinggi. Jumlah gangguan mencapai 4.444 per 100 kilometer per tahun, melebihi tingkat gangguan pada saluran transmisi. Jaringan distribusi terbagi menjadi dua kategori, yaitu jaringan distribusi tegangan rendah (JTR) dan jaringan distribusi tegangan menengah (JTM). Gangguan yang umumnya terjadi pada saluran distribusi 20 kV dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu gangguan yang berasal dari dalam sistem, seperti kegagalan fungsi peralatan listrik, dan gangguan yang berasal dari luar sistem seperti gangguan yang disebabkan oleh sentuhan pohon, sambaran petir, manusia, hewan, cuaca dan lain sebagainya [11]. Terdapat beberapa jenis gangguan pada sistern Distribusi:

1. Gangguan Hubung singkat

   Gangguan hubung singkat dapat terjadi antara fase-fase (baik 3 fase atau 2 fase), antara satu fase, atau terhubung ke sistem grounding. Ciri khas dari gangguan ini dapat bersifat sementara atau permanen. Gangguan permanen dapat melibatkan hubung singkat pada kabel, masalah pada belitan trafo, gangguan pada generator, atau kerusakan isolasi. Disisi lain, gangguan sementara seringkali terjadi akibat petir, kontak dengan pohon, atau dampak dari angin kencang

2. Gangguan beban lebih

   Gangguan seperti ini seringkali terjadi ketika beban pada jaringan distribusi melebihi kapasitas yang telah diinstal. Pada awalnya, jenis gangguan ini bukanlah masalah intrinsik karena dapat disebabkan oleh faktor dari luar. Meskipun begitu, gangguan seperti ini harus segera diatasi karena memicu mengakibatkan kerusakan pada peralatan di dalam sistem.

3. Gangguan tegangan lebih

   Gangguan tegangan ini berasal dari masalah yang terjadi dalam sistem itu sendiri. Contohnya seperti, hubung singkat, kerusakan peralatan, kegagalan isolasi switching, atau kerusakan pada pembangkit dan situasi sejenisnya.

2.4 Keandalan Sistem Distibusi

Pada dasarnya keandalan menggambarkan kemampuan suatu sistem untuk beroperasi secara efektif selama suatu periode waktu. Evaluasi terhadap keandalan sistem melibatkan penilaian terkait frekuensi, durasi, dan efisiensi pemulihan sistem setelah mengalami gangguan. Sistem yang memiliki tingkat keandalan tinggi akan memberikan pasokan daya listrik secara konsisten saat dibutuhkan, sedangkan sistem yang kurang andal cenderung mengalami pemadaman lebih sering. Keandalan jaringan distribusi sangat dipengaruhi oleh gangguan yang dapat menyebabkan pemutusan pasokan listrik atau gangguan, yang pada gilirannya memengaruhi ketersediaan layanan listrik untuk pelanggan. Tingkat keandalan dapat diukur melalui frekuensi pemadaman, durasi pemadaman, dan efisiensi waktu pemulihan setelah terjadi pemadaman. Semakin tinggi frekuensi pemutusan beban pada sistem maka keandalan sistem semakin berkurang, begitu juga sebaliknya, semakin rendah frekuensi pemutusan beban maka semakin handal sistem [12].

2.5 Indek Keandalan Sistem Distribusi

Keandalan sistem distribusi mencerminkan sejauh mana tegangan listrik dapat disalurkan secara efisien dan stabil kepada pelanggan, terutama mereka yang memerlukan kontinuitas nyata. Pemadaman tenaga listrik dapat berdampak pada sistem produksi pelanggan dengan daya besar. Struktur jaringan tegangan menengah memainkan peran penting dalam menentukan keandalan distribusi tenaga listrik. Kualitas jaringan ini memungkinkan manuver tegangan yang efisien, memungkinkan alokasi yang tepat saat terjadi gangguan. Oleh karena itu, diperlukan analisis dan perhitungan untuk menilai kualitas suatu jaringan. Indeks keandalan yaitu besaran untuk membandingkan penampilan suatu sistem distribusi [13]. Indeks keandalan sistem distribusi digunakan untuk menakar keandalan masing-masing titik beban/load point.

Dibawah ini adalah beberapa indeks yang digunakan untuk menilai tingkat keandalan :

1. λi = laju kegagalan rata-rata (fault/year)

$$i = \Sigma * N \tag{2.1}$$

Keterangan : λ = laju kegagalan peralatan

N = banyaknya peralatan

2. Ui = lama/durasi terputusnya pasokan listrik tahunan rata-rata (hours/year).

$$Ui = \Sigma\lambda * r \quad (2.2)$$

Keterangan : λ = laju kegagalan peralatan

r = waktu perbaikan

2.5.1 Pengertian SAIFI

Salah satu parameter keandalan, yakni SAIFI dihitung dengan mengalikan frekuensi pemadaman pada suatu penyulang dengan jumlah pelanggan yang terkena pemadaman, dan hasilnya dibagi dengan total jumlah pelanggan. Satuan dari perhitungan SAIFI adalah pemadaman per pelanggan. Secara matematis, SAIFI dapat dirumuskan dengan persamaan.:

$$SAIFI = \frac{Jumlah\ keseluruhan\ kegagalan\ yang\ dialami\ sistem}{jumlah\ seluruh\ pelanggan}$$

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda i\ x\ Ni}{N} \quad (2.3)$$

Keterangan : λi = Laju kegagalan pada titik i.

Ni = Total pelanggan pada titik i.

N = Total keseluruhan pelanggan.

2.5.2 Pengertian SAIDI

SAIDI adalah indikator keandalan yang dihitung dengan mengalikan durasi pemadaman sistem dalam jam dengan jumlah pelanggan atau konsumen yang terkena pemadaman, kemudian hasilnya dibagi dengan total jumlah pelanggan atau konsumen secara keseluruhan. Satuan pada perhitungan SAIDI, jam/pelanggan. Secara matematis SAIDI dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$SAIDI = \frac{Jumlah\ waktu\ gangguan\ dari\ semua\ konsumen}{jumlah\ seluruh\ pelanggan}$$

$$SAIDI = \frac{\sum Ui\ x\ Ni}{N} \quad (2.4)$$

Keterangan : Ui = Durasi padam rata – rata dalam setahun i.

Ni = Total pelanggan pada titik i.

Nt = Total keseluruhan pelanggan.

2.6 *Recloser*

Recloser adalah suatu perangkat yang terpasang dalam jaringan distribusi tegangan menengah sekitar 20 kV, bertugas untuk mendeteksi gangguan baik yang bersifat sementara maupun permanen. Ketika terjadi gangguan yang bersifat sementara atau temporer, kontak pemotong beralih (PBO) akan membuka saklar. Setelah melewati periode waktu tertentu yang telah diatur melalui pengaturan, kontak PBO secara otomatis akan mulai menutup kembali. Namun, jika gangguan bersifat permanen, PBO akan mengunci saklar dan mencegah penyalaan kembali.

Gambar 2.3 *Recloser*

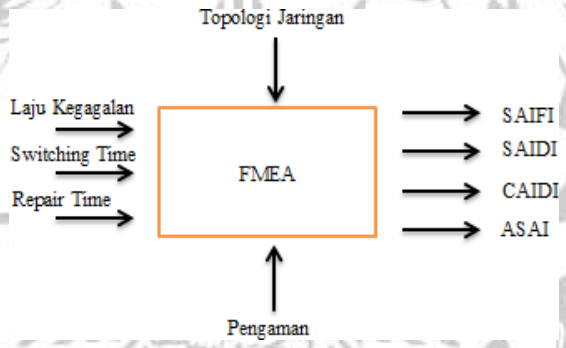
Saat ini, pemasangan *recloser* umumnya didasarkan pada jarak aman antara satu *recloser* dengan peralatan pemutus lainnya, tanpa memperhitungkan jumlah pelanggan pada area yang dilindungi. *Recloser* memiliki fungsi untuk dengan cepat memisahkan area atau jaringan yang mengalami gangguan sistem, sehingga dapat sementara waktu membatasi daerah gangguan sampai gangguan tersebut dianggap tidak ada lagi, dengan demikian *recloser* akan masuk kembali sesuai settingannya sehingga jaringan akan aktif kembali secara otomatis [14]. *Recloser* memiliki kesamaan dengan *Circuit Breaker* (CB) dan berperan dalam mengidentifikasi lokasi gangguan karena ditempatkan pada jalur distribusi tenaga listrik.

2.7 *Failure Mode Effect Analysis* (FMEA)

FMEA merupakan metode untuk menganalisis keandalan sistem, digunakan khususnya untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dalam suatu penyulang. Kegagalan biasanya terjadi karena kerusakan komponen atau ketidaksesuaian dengan pengaturannya. FMEA berfungsi untuk mengidentifikasi dan menganalisis dampak dari kegagalan yang mungkin terjadi tersebut. Kegunaan metode FMEA diantaranya :

1. Untuk mendukung keberlangsungan sistem
2. Mengidentifikasi kegagalan yang terjadi pada saat yang bersamaan.
3. Menyusun strategi penggantian peralatan yang tidak memenuhi standar.

Metode FMEA memerlukan informasi jaringan terkait dengan peralatan yang terkoneksi, tingkat kegagalan, durasi kegagalan, waktu perbaikan, waktu beralih, dan faktor-faktor lainnya.

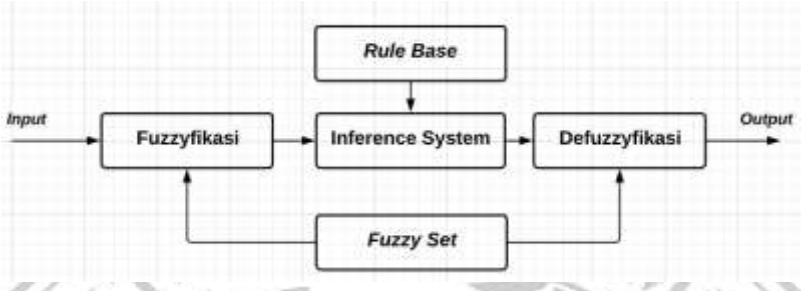


Gambar 2.4 Diagram Blok FMEA

2.8 *Fuzzy Logic Controller* (FLC)

Logika *fuzzy* merupakan suatu pendekatan yang digunakan dalam menggambarkan permasalahan dengan tingkat ketidakpastian, dan diaplikasikan oleh sistem komputasi pada komputer. *fuzzy* beroperasi dengan merujuk pada prinsip kerja otak manusia, dimana kemampuannya untuk mempertimbangkan informasi terhadap suatu masalah dan menghasilkan keputusan menjadi dasar dari metode ini. Kelebihan metode *fuzzy* meliputi kinerja operasional yang cepat, desain yang relatif mudah, dan kebutuhan terhadap model matematika yang tidak harus sangat akurat. Pertama kali diperkenalkan oleh Zadeh pada tahun 1965 melalui artikel yang berjudul "*Fuzzy Sets*," pendekatan *fuzzy* menjadi dikenal. Pada tahun 1970-an, peneliti Jepang berhasil menerapkan teori fuzzy dalam menyelesaikan

berbagai masalah praktis dengan sukses [15]. Model Mamdani dan Sugeno adalah bentuk umum dari pemodelan logika fuzzy yang sering diterapkan. *Distinguishing factor* antara kedua model terletak pada karakteristik jenis output yang dihasilkan oleh keduanya. Pada model *fuzzy* Mamdani, outputnya dinyatakan dalam bentuk nilai linguistik, sedangkan pada model *fuzzy* Sugeno, keluarannya direpresentasikan sebagai nilai berupa fungsi linear atau konstan.



Gambar 2.5 Blok Diagram Logika *Fuzzy*

Dalam desain kontrol menggunakan logika fuzzy, ada tiga langkah yang perlu dilalui, yakni tahap fuzzyfikasi, inferensi, dan defuzzyfikasi. Langkah pertama dalam proses adalah tahap fuzzyfikasi, yang melibatkan pembuatan fungsi keanggotaan atau nilai keanggotaan untuk himpunan *fuzzy*. Pada tahap ini, nilai input dan output awal yang berupa nilai tegas (crisp) diubah menjadi nilai keanggotaan *fuzzy*. Kemudian, dalam tahap inferensi, dibentuk basis aturan di mana nilai keanggotaan *fuzzy* yang diperoleh dari tahap fuzzyfikasi digunakan untuk mengimplikasikan penalaran *fuzzy*. Inti dari tahap ini adalah untuk menghasilkan output yang menjadi komponen integral dalam proses pengambilan keputusan secara keseluruhan. Sementara itu, defuzzyfikasi adalah langkah terakhir dalam logika fuzzy. Pada tahap ini, nilai keluaran dari proses inferensi dikonversi kembali menjadi nilai tegas sehingga dapat dihasilkan sebagai output oleh sistem. Dalam proses defuzzyfikasi, salah satu metode yang dapat diterapkan adalah metode *centroid.* Metode *centroid* adalah suatu pendekatan dimana titik pusat dari semua daerah *fuzzy* hasil dari basis aturan digunakan untuk menentukan hasil optimal. Pernyataan IF-THEN menjadi dasar utama dari aturan berbasis pada metode *fuzzy*. Sejumlah keunggulan dari logika *fuzzy* mencakup :

a) Sistem logika *fuzzy* memiliki desain yang sangat sederhana, sehingga dapat dipahami dengan mudah.

b) Sistem logika fuzzy mampu beroperasi dengan fleksibilitas.
c) Sistem ini memiliki ketahanan terhadap data yang tidak presisi.
d) Meskipun kompleks, fungsi-fungsi non-linier dapat dimodelkan dengan baik oleh sistem ini

2.9 *Particle Swarm Optimization* (PSO)

Particle Swarm Optimization atau biasa disebut PSO, merupakan teknik optimasi metaheuristik yang memanfaatkan variabel acak untuk menginisialisasi dan menghasilkan individu. Algoritma PSO terinspirasi oleh perilaku sosial sekumpulan ikan atau kawanan burung. Tindakan individu dan interaksi dengan individu lain dalam kawanan membentuk perilaku sosial. Setiap partikel atau individu berperilaku berdasarkan kecerdasan sendiri dan juga dipengaruhi oleh tindakan kelompok yang lebih besar. Meskipun tiap partikel tersebar di antara kelompok, anggota partikel lain akan dapat langsung mengikuti jejak jika satu partikel menemukan rute yang benar atau terpendek ke sumber makanan [16].

Sejumlah partikel pada populasi berusaha menemukan solusi menggunakan algoritma PSO. Populasi tersebut terbentuk secara *random* dengan memperhatikan nilai minimum dan maksimum yang ditetapkan. Setiap partikel mencerminkan suatu pendekatan atau solusi potensial untuk mengatasi permasalahan yang tengah dihadapi. Dengan melakukan eksplorasi pada ruang pencarian, setiap partikel berusaha menemukan solusi terbaik. Untuk mencapai tujuan ini, setiap partikel melakukan modifikasi pada posisi terbaik lokalnya dan posisi terbaik global yang dipengaruhi oleh keseluruhan kawanan partikel. Dapat diperhatikan melalui pada gambar berikut:

Gambar 2.6 Perpindahan Posisi Terbaru PSO

Untuk mengidentifikasi jawaban yang optimal untuk permasalahan, pendekatan algoritma PSO mencakup beberapa tahapan, yaitu [16]:

1. Inisialisasi

   Inisialisasi partikel dan pembangkitan kecepatan dibentuk secara acak untuk menyederhanakan masalah. Dalam inisialisasi partikel, masalah dapat direpresentasi menggunakan angka permutasi untuk mengetahui nilai dari dalam dimensi tertentu, yang kemudian akan dikonversi menjadi indeks data. Populasi awal dibentuk dengan menentukan posisi dan kecepatan partikel secara acak, dengan memperhatikan batas atas (x_{max}) dan batas bawah (x_{min}) dari pemodelan variabel, seperti dalam formula persamaan berikut ini :

$$v_o^i = x_{min} + rand\,(\,x_{max} - x_{min}\,) \quad (2.5)$$

$$x_o^i = x_{min} + rand\,(\,x_{max} - x_{min}\,) \quad (2.6)$$

   Keteragan:

   v_o^i = Kecepatan awal

   x_o^i = Posisi awal

   x_{min} = Batas atas

   x_{max} = Batas atas

   $rand$ = Nilai random antara 0-1

2. *Fitness function*

   Tujuan dari fungsi fitness adalah mengukur seberapa baik partikel memenuhi batasan dengan menemukan solusi yang memuaskan. Dalam menentukan partikel yang memiliki nilai fitness tertinggi, setiap partikel dinilai menggunakan fungsi fitness. Nilai fitness yang optimal adalah nilai yang menghasilkan solusi dengan tingkat kesalahan yang dapat diabaikan. Setiap kesalahan yang terjadi akan diberikan nilai 1. Total kesalahan dikalikan dengan 1 untuk mencegah nilai fitness menjadi tak terbatas.

3. Mencari G*best* dan P*best*

   Dengan memeriksa nilai P*best* sebelum iterasi dan sesudah iterasi, dapat diperoleh nilai P*best* yang diperbarui. Jika partikel baru memiliki nilai *fitness* yang lebih tinggi daripada Pbest sebelumnya, maka partikel tersebut akan menjadi P*best* yang baru. Sementara itu, nilai *fitness* tertinggi diantara semua P*best* digunakan untuk menentukan nilai G*best*.

4. *Update Velocitiy* dan posisi

   Nilai kecepatan dihitung dengan menambahkan pengalaman dan momentum dari G*best* dan P*best*. Dengan mengalikan bobot inersia dan kecepatan sebelumnya, maka momentum akan didapatkan. Tiga parameter w, C_1 dan C_2 harus diperhitungkan ketika pencarian. Persamaan berikut ini dapat digunakan untuk menghitung nilai kecepatan:

$$V_J^K = WV_J^K + C_1 rand_1 \,(Pbest_j - X_J^K) + C_2 rand_2 \times (Gbest_j - X_J^K) \quad (2.7)$$

Keteragan:

V_J^K = Kecepatan dimensi ke-j pada iterasi ke-k

W = Bobot *inertia*

C_1 = Nilai koefisien akselerasi ke-1

C_2 = Nilai koefisien akselerasi ke-2

$rand$ = Nilai random antara 0-1

Persamaan berikut ini menggunakan bobot inersia w untuk meredam kecepatan partikel untuk mengidentifikasi titik optimal yang tepat dan efektif:

$$w^t = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}}\right) iter \quad (2.8)$$

Keteragan:

w^t = bobot inersia pada iterasi ke-t

w_{max} = batas atas dari bobot inersia

w_{min} = batas bawah dari bobot inersia

$iter_{max}$ = jumlah iterasi maksimum

Setiap iterasi akan diakhiri dengan pembaruan lokasi setiap partikel menggunakan vektor kecepatan. Dengan menambahkan posisi sebelumnya dan kecepatan saat ini, pembaruan posisi terbaru dapat ditemukan. Persamaan berikut digunakan untuk mendapatkan posisi terbaru:

$$X_J^{K+1} = X_J^K + V_J^{K+1} \tag{2.9}$$

Keteragan:

X_J^K = Posisi partikel dimensi ke-j pada iterasi ke-k

V_J^{K+1} = Kecepatan dimensi ke-j pada iterasi ke-k

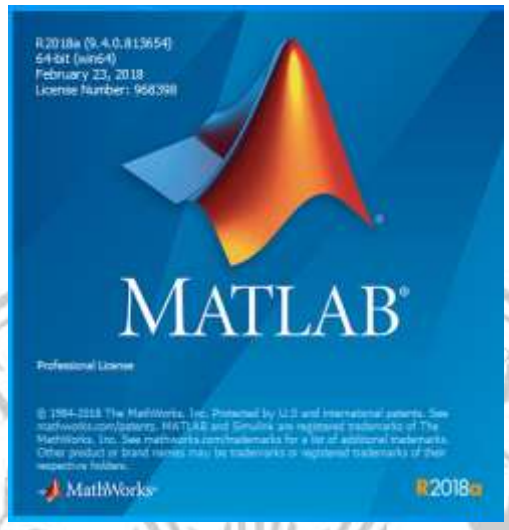
5. *Stopping condition*

   Program PSO dapat dihentikan jika kondisi konvergensi terpenuhi. Hingga konvergensi tercapai, Proses-proses yang telah dijelaskan sebelumnya akan diiterasi. Pentingnya kriteria konvergensi terletak pada upaya mencegah penambahan fungsi evaluasi setelah solusi optimal berhasil ditemukan meskipun tidak selalu diperlukan dalam membatasi jumlah iterasi dapat digunakan sebagai kondisi penghentian. Ketika PSO menemukan kesalahan minimum yang diperlukan, nilai optimal, atau jumlah iterasi maksimum, maka iterasi dihentikan.

2.10 MATLAB

Perangkat lunak MATLAB adalah platform pemrograman tinggi yang digunakan untuk menyelesaikan masalah dalam kerangka model matematika. MATLAB umumnya dipakai dalam berbagai disiplin untuk merancang algoritma matematika, melakukan komputasi, pemodelan akuisisi data, simulasi, serta tujuan-tujuan lainnya. Karakteristik utama MATLAB terletak pada penggunaan matriks (baris dan kolom) sebagai dasar bahasa pemrograman. Berbagai *toolbox* yang dapat diakses dalam MATLAB mencakup seperti *Signal Processing, Control System,*

System Identification, Optimization, Fuzzy, Neural Network dan banyak lainnya. MATLAB juga menyediakan produk tambahan berupa *Simulink*, sebuah sistem yang digunakan untuk melakukan simulasi dinamika pada proses atau sistem [17].



Gambar 2.7 Tampilan Antarmuka *sostware* MATLAB