

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron menciptakan tenaga listrik dari sumber tenaga mekanik, memanfaatkan induksi elektromagnetik [14]. Generator sinkron memiliki ciri khas yakni jumlah putaran rotor berbanding lurus oleh total rotasi medan magnet pada stator. Asal mula energi mekanik yang dihasilkan berasal dari *prime over* (penggerak mula), contohnya; mesin tenaga diesel, mesin tenaga uap, turbin gas, turbin air atau berbagai instrumen serupa. Tegangan yang dihasilkan generator sinkron yakni tegangan AC [15].

2.1.1 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Prinsip kerja generator sinkron berpedoma pada induksi elektromagnetik. Prime over menyebabkan kutub-kutub di rotor berotasi. Ketika koil kutub diberikan tegangan searah menyebabkan timbulnya medan magnet (garis gaya magnet) yang kecepatan putarnya berbanding lurus dengan putaran kutub.

Bersumber pada Dalil Faraday ketika belitan konduktor berotasi membagi garis-garis gaya magnet yang statis atau belitan yang statis dibagi oleh garis-garis gaya magnet yang berputar menyebabkan adanya *Electro Motive Force* (EMF) alias GGL (Gaya Gerak Listrik).

GGL pada penghantar jangkar merupakan tegangan AC. Pengaruh arus yang melalui medan jangkar bereaksi dengan medan primer menyebabkan tegangan terminal drop, keadaan ini dinamakan reaksi jangkar [16].

Interaksi kecepatan mekanik rotor dinotasikan n (rpm), serta jumlah pole magnet dinotasikan P_f , dan frekuensi dinyatakan f (Hz), dengan Persamaan 2.1.

$$n = \frac{120f}{P_f} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.1}$$

Variasi tegangan induksi disimbolkan E_A , yang didapat dari fase stator diulustrasikan pada Persamaan 2.2.

$$E_A = K\phi\omega \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.2}$$

Tegangan dipengaruhi fluks (ϕ), frekuensi (f), kecepatan rotasi (ω) serta struktur mesin dinyatakan konstanta (K) [17].

Tegangan keluaran generator (V_{ϕ}) timbul adanya selisih tegangan induksi dengan jumlah rugi-rugi karena reaksi jangkar ($jX_I I_A$), lalu induktansi diri ($jX_A I_A$) dan resistansi lilitan stator ($R_A I_A$). Tegangan keluaran generator direpresentasikan ke dalam persamaan 2.3.

$$V_{\phi} = E_A - jX_A I_A - R_A I_A \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.3}$$

Himpunan reaktansi karena reaksi jangkar serta induktansi diri dinamakan reaktansi sinkron. Melalui Persamaan 2.4 tegangan keluaran generator menjadi:

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.4}$$

Tegangan dan arus skema tiga fase ketika keadaan setara memiliki nilai yang sama, namun berbeda sudut sebesar 120° [17]. Apabila skema tiga fase hubungan bintang atau Y, tegangan terminal menjadi Persamaan 2.5:

$$V_T = \sqrt{3} V_{\phi} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.5}$$

2.1.2 Struktur Generator Sinkron

Struktur generator sinkron terbagi menjadi tiga bagian utama. Bagian pertama yakni stator yang berwujud silinder dan merupakan unit yang statis. Bagian kedua yakni rotor merupakan unit yang berputar dan berbentuk silinder. Bagian terakhir yakni celah udara yang terletak diantara stator dan rotor [16].

2.1.2.1 Stator

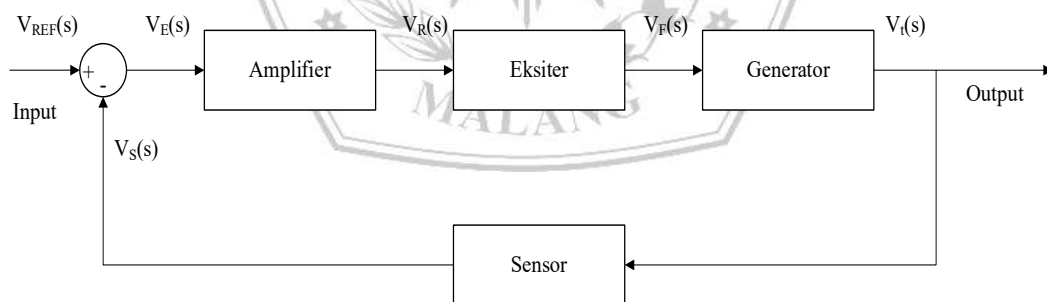
Stator berguna untuk menampung induksi magnet yang dihantarkan rotor. Pada stator terdapat rangka silinder dengan lilitan kawat yang berperan mengalirkan arus AC menuju beban. Stator merupakan bagian yang diam pada generator sinkron. Stator terbuat dari bahan *ferromagnetic* (bahan yang kuat ditarik magnet) dengan bentuk laminasi yang berfungsi meminimalisir rugi-rugi arus pusar [15].

2.1.2.2 Rotor

Rotor merupakan komponen generator yang berputar. Rotor berperan menciptakan medan magnet kemudian diinduksikan ke stator. Rotor dan stator dibatasi dengan celah udara. Terdapat dua bagian rotor yakni inti kutub dan kumparan medan [15].

2.2 Automatic Voltage Regulator (AVR)

Desain dan analisis tanggapan tegangan menggunakan sistem kontrol AVR jenis arus searah. Ada beberapa analisis tanggapan tegangan diantaranya analisis kesalahan, analisis peralihan, analisis kekokohan (robust), dan analisis kinerja dalam bentuk frekuensi fungsi alih terbuka (open loop) maupun fungsi alih tertutup (close loop). Pada analisis kesalahan dipengaruhi oleh jenis sistem, konstanta kesalahan posisi, konstanta kesalahan kecepatan, konstanta kesalahan percepatan, dan kesalahan keadaan mantap. Kemudian analisis peralihan direpresentasikan oleh *rise time* (waktu naik), *settling time* (waktu puncak), *peak* (angka puncak), *overshoot* (lewatan maksimal) dan *steady state* (waktu keadaan mantap). Pada analisis kekokohan menerapkan pedoman puncak maksimum serta pedoman margin penguatan dan margin fasa. Selanjutnya analisis kinerja open loop dalam bentuk frekuensi dinyatakan oleh margin penguatan, frekuensi penguatan, margin fasa serta frekuensi margin fasa melalui diagram Bode, namun pada close loop analisa kinerja dinyatakan oleh lebar pita, nilai puncak resonansi serta frekuensi puncak resonansi melalui diagram Bode [18]. Sistem kontrol AVR terdiri dari berbagai elemen. AVR terdiri dari empat elemen utama seperti tipe Amplifier, tipe Eksiter, tipe Generator, serta tipe Sensor [18]. Skema sistem AVR tanpa kontrol ditampilkan pada Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2.1 Skema AVR Tanpa Kontrol

Pengaplikasian AVR pada sistem kontrol perlu memodelkan matematika dari masing-masing elemen. Terdapat dua cara memodelkan elemen menurut matematis pertama mode fungsi alih (transfer function) dan mode variabel keadaan (state variable). State variable digunakan pada sistem non-linier atau linier. Sedangkan fungsi alih lebih praktis dan hanya digunakan pada sistem linier. Pada fungsi alih diasumsikan agar melinearisasikan model nonlinear. Perbedaan besar kecilnya tegangan dipengaruhi oleh reaktansi transien dari generator sinkron

sedangkan cepat lambatnya durasi dipengaruhi oleh konstanta waktu generator sinkron [19].

2.2.1 Model Amplifier

Pada mekanisme eksitasi, amplifier berwujud *magnetic amplifier*, *rotating amplifier* maupun sistem amplifier elektronik. Model amplifier dinyatakan pada bentuk tipe orde satu oleh variable penguatan berbanding terbalik dengan konstanta waktu [18]. Model amplifier dinotasikan ke dalam fungsi alih melalui Persamaan 2.6:

$$\frac{V_R(s)}{V_E(s)} = \frac{k_A}{1+\tau_A s} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.6}$$

Dengan k_A dan $\tau_A s$ menyatakan penguat dan waktu konstan dari amplifier. Nilai k_A berkisar diantara 10 hingga 40 dan nilai $\tau_A s$ berada diangka 0.02 sampai 0.1.

2.2.2 Model Eksiter

Mekanisme eksitasi yakni listrik arus searah dialirkan dan diubah oleh penguat melalui generator listrik, menyebabkan generator menciptakan tenaga listrik. Nilai output tegangan generator dipengaruhi oleh arus eksitasi [18]. Model eksiter dinyatakan dalam bentuk sistem orde pertama oleh fungsi alih melalui Persamaan 2.7:

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{k_E}{1+\tau_E s} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.7}$$

Dengan k_E dan $\tau_E s$ menyatakan penguat dan waktu konstan dari eksiter. Nilai k_E berkisar diantara 1 hingga 2 dan nilai $\tau_E s$ berada diangka 0.4 sampai 1.

2.2.3 Model Generator

Gaya gerak listrik dihasilkan oleh generator sinkron akibat adanya raksi magnetisasi namun tegangan terminal dipengaruhi oleh beban [18]. Pada model generator dinyatakan dalam bentuk sistem orde pertama oleh fungsi alih melalui Persamaan 2.8:

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{k_G}{1+\tau_G s} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.8}$$

Dengan k_G dan $\tau_G s$ menyatakan penguat dan waktu konstan dari generator. Nilai k_G berkisar diantara 0.7 hingga 1 dan nilai $\tau_G s$ berada diangka 1 sampai 2.

2.2.4 Model Sensor

Mekanisme eksitasi generator memakai transformator potensial dengan tujuan seperti perangkat sensor tegangan terminal [18]. Pada model sensor dinyatakan dalam bentuk sistem orde pertama oleh fungsi alih melalui Persamaan 2.9:

$$\frac{V_s(s)}{V_t(s)} = \frac{k_R}{1 + \tau_{RS}s} \dots \dots \dots \text{Persamaan 2.9}$$

Dengan k_R dan τ_{RS} menyatakan penguat dan waktu konstan dari sensor. Nilai k_R berkisar diantara 0.02 hingga 1 dan nilai τ_{RS} berada diangka 0.01 sampai 2.2.

2.3 Fractional Order PID (FOPID)

2.3.1 Definisi Kalkulus Fraksional

Metode kalkulus fraksional banyak dimanfaatkan dalam bidang sains maupun teknik. Penggunaannya dalam bidang teknik seperti merancang sistem kontrol. Kalkulus fraksional berhubungan dengan konsep integral dan turunan. [20]. Terdapat beberapa rumusan tentang kalkulus fraksional diantaranya konsep Grunwald–Letnikov, Riemann–Liouville, dan Caputo.

1. Konsep Grunwald-Letnikov dinyatakan dalam Persamaan 2.10.

$${}_a D_t^a = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^a} \sum_{r=0}^{\lceil \frac{t-a}{h} \rceil} (-1)^r \binom{n}{r} f(t-rh) \dots \dots \dots \text{Persamaan 2.10}$$

Dengan $\lceil \frac{t-a}{h} \rceil$ merupakan bilangan bulat, a dan t merupakan limit dari operasi, n berupa bilangan bulat dengan jangkauan $n - 1 < a < n$. Sedangkan nilai koefisien binomial didapatkan dari Persamaan 2.11.

$$\binom{n}{r} = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(r+1)\Gamma(n-r+1)} \dots \dots \dots \text{Persamaan 2.11}$$

Pada persamaan 2.11 terdapat fungsi Gamma yang dijabarkan pada Persamaan 2.12.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \dots \dots \dots \text{Persamaan 2.12}$$

2. Konsep Riemann–Liouville dinyatakan dalam Persamaan 2.13.

$${}_a D_t^a = D^n J^{n-a} f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-a)} \left(\frac{d}{dt} \right)^n \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \dots \dots \dots \text{Persamaan 2.13}$$

Untuk n merupakan bilangan bulat dengan jangkauan $n - 1 < a < n$, a merupakan bilangan real, sedangkan a dan t merupakan limit integral.

3. Konsep Caputo dinyatakan dalam Persamaan 2.14.

$${}_a D_t^\alpha = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_a^t \frac{f^n(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.14}$$

Untuk n merupakan bilangan bulat dengan jangkauan $n - 1 < \alpha < n$, a merupakan bilangan real, sedangkan a dan t merupakan limit integral [21].

2.3.2 Pendekatan Rasional untuk Kalkulus Fraksional

Pendekatan rasional pada transformasi laplace berfungsi menyederhanakan elemen fraksional. Elemen fraksional berupa jangkauan batas frekuensi agar mendapatkan hasil yang baik. Terdapat beberapa pendekatan rasional diantaranya yang pertama *Oustaloup's Approximation* (Pendekatan Oustaloup), yang kedua *Matsuda's Approximation* (Pendekatan Matsuda), dan terakhir *El-Khazali's Integro-Differential Approximation* (Pendekatan Integral-Derivatif EL-Khazali's) [22]. Dari ketiga pendekatan yang paling umum digunakan adalah Oustaloup's Approximation [23]. Berikut persamaan Oustaloup's Approximation ditunjukkan Persamaan 2.15.

$$G_f(s) = A \prod_{n=-M}^M \frac{s + \omega'_n}{s + \omega_n} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.15}$$

Nilai nol dari numerator dan denominator didapatkan melalui persamaan berikut.

$$\omega'_n = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{n+M+\frac{1}{2}(1-\lambda)}{2M+1}} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.16}$$

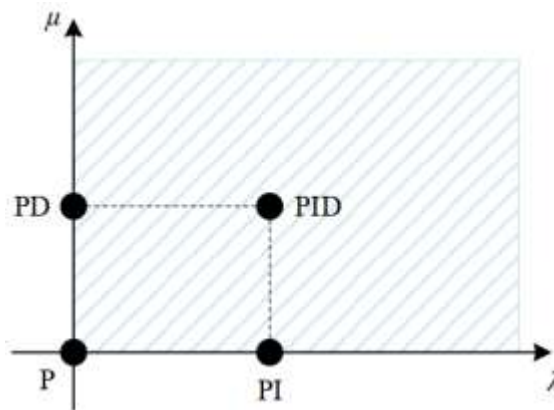
$$\omega_n = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{n+M+\frac{1}{2}(1+\lambda)}{2M+1}} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.17}$$

$$A = \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{-\frac{\gamma}{2}} \prod_{n=-M}^M \frac{\omega_n}{\omega'_n} \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.18}$$

2.3.3 Kontrol FOPID

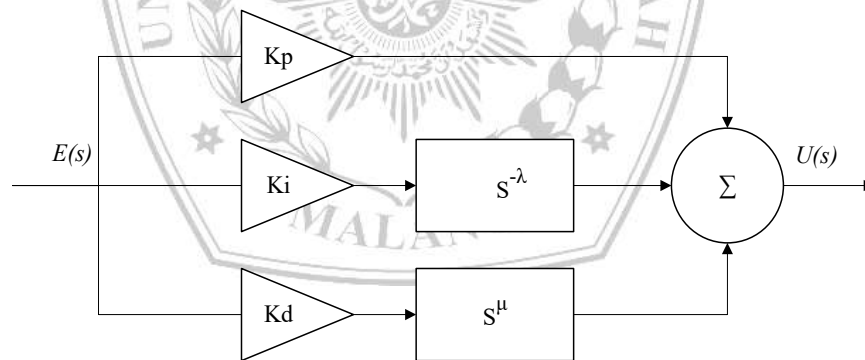
Kontrol FOPID merupakan pengembangan dari kontrol klasik PID. Kelebihan dari control FOPID diantaranya desain yang sederhana mampu menurunkan overshoot dan settling time pada suatu sistem. Pengontrol FOPID juga

kurang peka terhadap perubahan parameter sistem. Dengan λ mensimbolkan integral dan μ mensimbolkan derivatif. Model FOPID bisa dinyatakan kedalam beberapa model lain diantaranya model PID jika λ dan μ bernilai satu. Kemudian model PI Ketika λ bernilai satu dan μ bernilai nol. Lalu PD Ketika λ bernilai 0 dan μ bernilai satu. Yang terakhir model P Ketika nilai λ dan μ bernilai nol. Keempat model ditampilkan melalui Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Perubahan Model FOPID

Skema FOPID ditampilkan pada Gambar 2.3:



Gambar 2.3 Skema FOPID

Untuk fungsi alih Gambar 2.3 dinyatakan dalam Persamaan 2.15.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.15}$$

2.3.4 Perangkat Lunak Kontrol FOPID

Untuk analisis dan simulasi FOPID, terdapat perangkat lunak yang digunakan yang akan dijelaskan berikut ini [21].

1. *Ninteger*

Ninteger ditemukan oleh D. Valerio serta J. Costa sekitar tahun 2005, dapat diunduh secara daring. Spesifikasi dari *Ninteger* yaitu.

- Memiliki tiga puluh mode memperkiraan turunan dan integral orde fraksional.
- *Graphical user interfaces* (GUI) yang digunakan pada desain kontrol.

2. FOMCON

FOMCON ditemukan oleh A. Tepljakov pada tahun 2103, dapat diunduh secara daring. Spesifikasi dari FOMCON yaitu.

- Terdapat analisis sitem seperti; *Bode plot*, *Nyquist* dan *Nichols plot*, respon step.
- Terdapat alat untuk mendesain FOPID, penyetelan parameter, dan mengoptimasi.
- Mampu membaca sistem dalam doamain waktu dan frekuensi.

3. CRONE

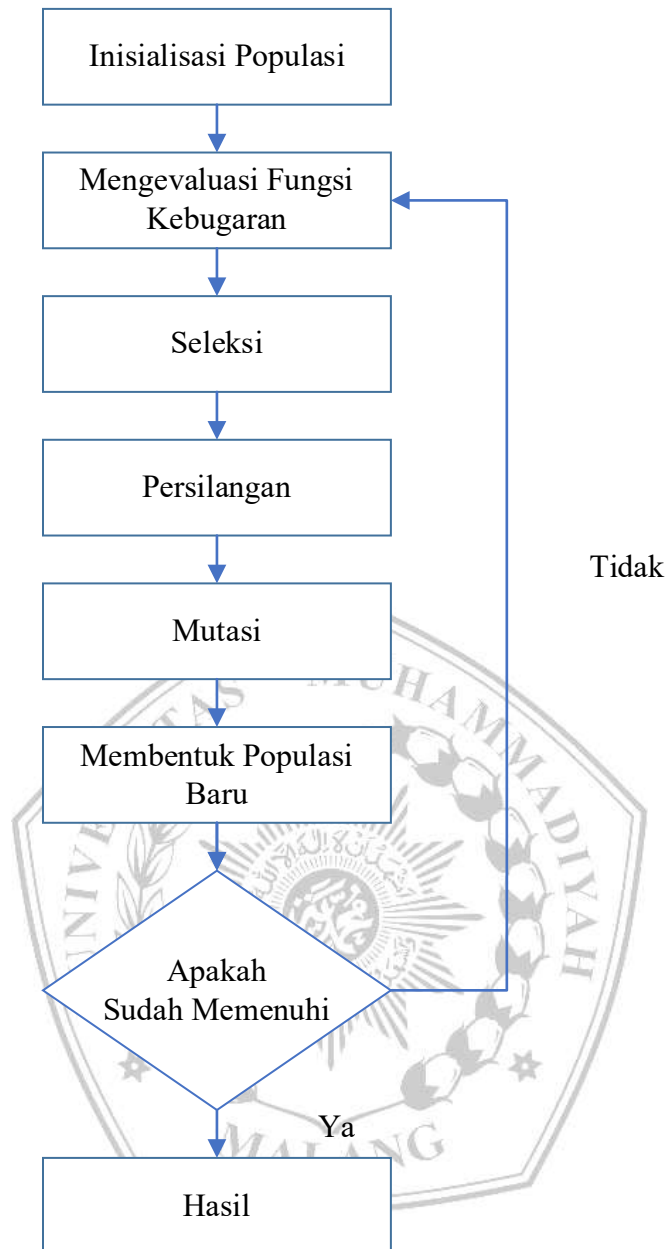
CRONE ditemukan oleh A. Oustaloup, dpat diunduh secara daring. Spesifikasi dari CRONE yaitu.

- Terdapat alat matematik seperti menyelesaikan diferensial bukan bilangan bulat, persamaan karakteristik bukan bilangan bulat, perubahan *invers Laplace* dari fungsi alih bukan bilangan bulat

2.4 Genetical Algorithm (GA)

Konsep GA ditemukan John Holland sekitar tahun 1960. Ide dari konsep GA berdasarkan mode evolusi oleh individu yang dapat bertahan pada persaingan kelompok di suatu ekosistem [24]. Konsep GA merupakan mode penelusuran secara random untuk menuntaskan persamaan nonlinier serta mengoptimalkan masalah yang rumit. GA merepresentasikan populasi ke dalam suatu individu atau kromosom yang berevolusi terus-menerus. Masing-masing perulangan algoritma dinamakan generasi. Evolusi direpresentasikan melalui *fitness function* (fungsi kebugaran) serta operasi genetika misalnya *selection* (seleksi), *crossover* (persilangan), *mutation* (persilangan).

Proses awal GA diawali menginisialisasi populasi secara random. Populasi diwakilkan peforma individu berdasarkan fungsi objektif, lalu *fitness* (kebugaran) akan mengavaluasi. Kebugaran perkromosom selanjutnya akan diproses melalui reproduksi, persilangan, mutasi [25]. Proses GA diilustrasikan pada Diagram Alir 2.1 berikut.



Diagam Alir 2.1 Proses GA

Poses diagram alir GA bila diurutkan menjadi berikut.

1. Menentukan populasi awal individu secara acak.
2. Mengevaluasi fungsi kebugaran.
3. Memilih personel populasi yang tepat.
4. Menseleksi dengan mode probabilistik.
5. Mengaplikasikan operasi persilangan.
6. Menggunakan operasi mutasi dengan probabilitas rendah.

7. Menampilkan hasil ketika memenuhi syarat dan mengulangi langkah kedua apabila hingga syarat belum terpenuhi.

2.4.1 Inisialisasi Populasi

GA mendapat solusi dari gabungan data atau nilai yang dinamakan populasi. Inisialisasi populasi dipilih secara random. Bentuk kromosom pada individu terdiri dari berbagai jenis, diantaranya dalam bentuk bilangan biner, integer, dan riil [26].

2.4.2 Mengevaluasi Fungsi Kebugaran

Fungsi kebugaran merupakan indikator GA untuk mempertahankan hidup untuk setiap kromosom. Semakin besar nilai kebugaran, maka kinerja sistem semakin bagus [27]. Fungsi objektif untuk algoritma GA sangat penting karena setiap kromosom akan dievaluasi menjadi nilai fitness yang menentukan GA apakah sudah optimal. Ada beberapa fungsi objektif untuk penalaan FOPID diantaranya *Integral of Squared Error (ISE)*, *Integral Absolute of the Time Error (IAE)*, *Integral of Time multiplied by Absolute Error (ITAE)*, *Integral of Time multiplied by the Squared Error (ITSE)* [28]. Persamaan fungsi objektif dinyatakan pada persamaan berikut.

$$ISE = \int_0^{\tau} e^2(t)dt \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.19}$$

$$IAE = \int_0^{\tau} |e(t)|dt \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.20}$$

$$ITAE = \int_0^{\tau} t|e(t)|dt \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.21}$$

$$ITSE = \int_0^{\tau} te^2(t)dt \dots\dots\dots \text{Persamaan 2.22}$$

Dengan $e(t)$ adalah sinyal kesalahan dalam bentuk waktu atau dalam simulink sinyal referensi dikurangi sinyal keluaran.

Untuk ISE menyatakan kelipatan galat antara waktu ke waktu. ISE berperan mempercepat meniadakan kesalahan besar, namun mentoleransi kesalahan kecil dalam rentang waktu yang lama. ISE menghasilkan respon yang kencang serta amplitude yang rendah, akan tetapi memiliki osilasi yang berkelanjutan. Pada IAE menyatakan galat mutlak antara waktu ke waktu. IAE menghasilkan respon yang lambat dari ISE namun osilasi dapat dikurangi. Sedangkan ITAE menyatakan perkalian antara galat mutlak dengan waktu ke waktu. Nilai galat yang rendah akan berbanding terbalik dengan keluaran ITAE. ITAE memiliki kelemahan yaitu nilai overshoot cukup tinggi. Yang terakhir ITSE

merupakan perkalian waktu tambahan dari galat fungsi yang dipengaruhi oleh durasi galat. ITSE sering diaplikasikan pada sistem yang memerlukan waktu yang cepat [29].

2.4.3 Seleksi

Seleksi berguna memilih individu yang akan membuat populasi baru. Seleksi dipengaruhi oleh nilai fitness, nilai kebugaran yang besar memperoleh duplikat yang tinggi untuk generasi selanjutnya. Beberapa jenis operator seleksi diantaranya *roulette*, *tournament*, dan *ranking* [26].

2.4.4 Persilangan

Operator persilangan menyerupai sistem alam pindah silang pada kromosom untuk memilih individu secara random dari hasil operator seleksi. Cara kerjanya dengan menukar sebagian informasi serta mengumpulkan kembali bagian dari individu dengan kebugaran tertinggi. Ada beberapa jenis operator persilangan diantaranya *single-point*, *multipoint*, *uniform*, *arithmetic*, dan *intermediate recombination* [26].

2.4.5 Mutasi

Mutasi merupakan teknik pergantian sepasang gen dalam satu kromosom dengan sepasang gen lainnya untuk mendapatkan genetika yang baru. Mutasi berfungsi mempertahankan perbedaan pada suatu populasi dengan menukar informasi setiap individu. Ada beberapa jenis operator mutasi diantaranya *insert mutation*, *uniform mutation*, dan *adaptive feasible* [26].

2.4.6 Populasi Baru

Selanjutnya penentuan kromosom baru serta generasi populasi menengah, populasi akan dibandingkan oleh generasi terakhir kemudian kromosom terbaik dari setiap populasi akan diambil untuk proses selanjutnya [27].

