# BAB II

# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Penelitian Terdahulu

Pertama, penelitian yang pernah dilakukan oleh Mochamad Andrik, Mohamad Farul, Iwan Cahyono, dan Rukslin tahun 2018. Penelitian ini bertujuan untuk menjaga frekuensi sistem tenaga listrik tetap berada dalam rentang yang diinginkan, yaitu antara 49 Hz hingga 51 Hz. Dengan cara pengoptimalan *Load Frequency Control* (LFC) denagn *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) [4]. Kesamaan antara penelitian sebelumnya dan saat ini meliputi:

1. Membuat *system Load Frequency control* yang di optimalkan.
2. Tujuan penelitian untuk mengoptimalkan *Load frequency control.*
3. Menggunakan perangkat aplikasi yang sama yaitu, MATLAB SIMULINK

Perbedaan antara penelitian sebelumnya dan saat ini :

1. Jenis tempat yang akan di kontrol yaitu, Pembangkit listrik tenaga mikro hidro
2. Pengontrolan mekanisme ini berlangsung secara otomatis melalui pengaturan posisi bukaan gate. Tujuannya adalah untuk menyesuaikan aliran air yang masuk agar sesuai dengan beban yang ada.
3. *Controller* yang digunakan adalah *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS).

Kedua, penelitian yang dilakukan Gusti Made Ngurah Christy Aryanata, I Nengah Suweden,dan I Made Mataram tahun 2018. Penelitian ini bertujuan untuk pengaturan putaran untuk menjaga kestabilan sistem secara keseluruhan terhadap adanya variasi beban atau gangguan pada sistem PLTG. Dengan cara mengoptimalkan Governor sebagai *Control Load Frequency Control* dengan *Fuzzy Logic Controller*. Kecepatan governor pada tiap pembangkit memberikan kecepatan pokok sebagai fungsi pengaturan [5]. Kesamaan antara penelitian sebelumnya dan saat ini meliputi:

1. Membuat *system Load Frequency control* yang di optimalkan.
2. Tujuan penelitian untuk mengoptimalkan *Load frequency control*
3. Menggunakan perangkat aplikasi yang sama yaitu, MATLAB SIMULINK

Perbedaan antara penelitian sebelumnya dan saat ini :

1. Jenis tempat yang akan di kontrol adalah pembangkit listrik tenaga gas.
2. Mekanisme pengontrolan dilakukan secara mengatur laju bahan bakar yang dibakar untuk mengontrol laju putaran turbin gas. Pengaturan ini memungkinkan PLTG untuk mengubah laju pembangkitan daya listrik sesuai dengan fluktuasi permintaan beban.
3. *Controller* yang digunakan sebagain pengoptimal adalah *Fuzzy Logic*.

Ketiga, Penelitian yang pernah dilakukan Bagas Budi Wicaksono dan Trisna Wati Tahun 2020. Penelitian ini bertujuan untuk menjaga frekuensi sistem tenaga listrik tetap berada dalam rentang yang diinginkan, yaitu antara 49 Hz hingga 51 Hz, dengan cara pengoptimalan *Load Frequency Control*(LFC) dengan *Proportional Integral Derivative*(PID) [2].Kesamaan antara penelitian sebelumnya dan saat ini meliputi :

1. Membuat *system Load Frequency control* yang di optimalkan.
2. Jenis tempat yang akan di kontrol adalah pembangkit listrik tenaga uap
3. Tujuan penelitian untuk mengoptimalkan Load Frequency Control.
4. Menggunakan perangkat aplikasi yang sama yaitu, MATLAB SIMULINK.

Perbedaan antara penelitian sebelumnya dan saat ini :

1. *Controller* yang digunakan adalah *Proportional Integral Derivative* (PID).

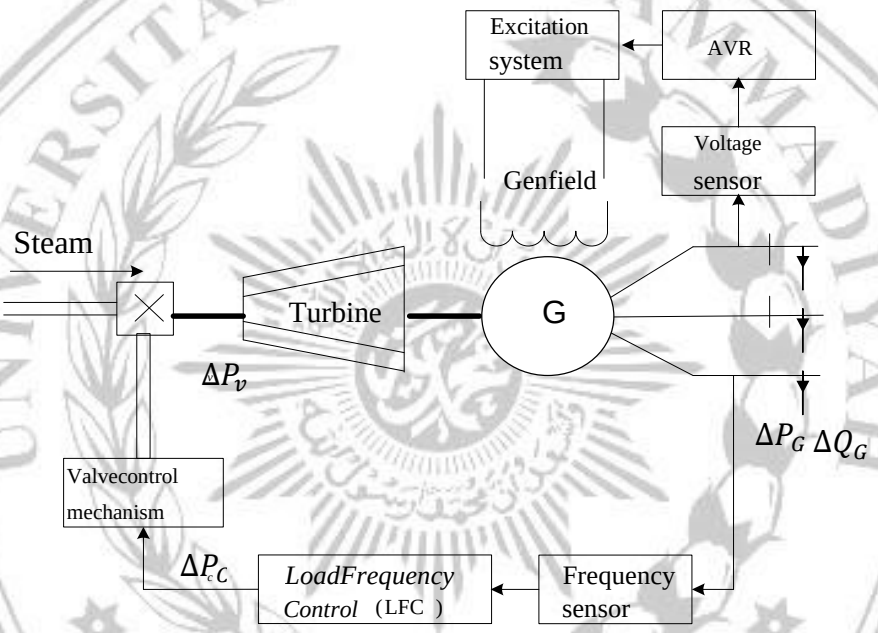
## 2.2 Landasan Teori

Pada landasan teori menjelaskan mengenai konsep terkait dengan studi yang dilakukan.Penjelasan ini diharapkan dapat membantu peneliti dan pembaca dapat memahami konsep teori yang digunakan pada laporan penelitian ini.

### 2.2.1 Sistem Load Frequency Control

*Load Frequency Control* (LFC) adalah salah satu mekanisme dalam suatu sistem tenaga listrik yang digunakan untuk memperbaiki mutu dan keandalan frekuensi sistem [1]. LFC didasarkan pada kebutuhan untuk menjaga keseimbangan antara daya yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dan permintaan beban di jaringan listrik. Keseimbangan ini sangat penting untuk menjaga frekuensi jaringan listrik pada nilai nominal yang ditentukan (antara 50 atau 60 Hz), karena fluktuasi frekuensi dapat menyebabkan gangguan dalam sistem tenaga listrik.

Implementasi LFC dalam sistem ini melibatkan penyesuaian respons governor di setiap area dengan memantau deviasi frekuensi dan beban di masing-masing wilayah. Untuk memastikan performa optimal dari frekuensi dan daya beban sistem,, governor harus tanggap terhadap perubahan beban dengan cepat. Langkah ini dilaksanakan dengan mengatur penggerak utama untuk menambah daya di wilayah yang membutuhkan. Pengaturan ini secara langsung mempengaruhi putaran turbin, yang berimbas pada kecepatan putar rotor generator. Kecepatan rotor disesuaikan sesuai kebutuhan daya beban. Cara kerja Load Frequency Control (LFC) pada sebuah pembangkit dapat dilihat pada Gambar 2.1




**Gambar 2.1** Diagram Skema LFC

Dari Gambar 2.1 Keluaran generator, yang berupa frekuensi, dideteksi menggunakan sensor frekuensi, dan sinyal ini kemudian disampaikan ke blok Load Frequency Control (LFC).. Blok LFC menerima sinyal frekuensi yang merupakan aliran daya area. Sinyal-sinyal ini kemudian diatur di dalam blok LFC untuk memberikan respon pada katup yang mengontrol penggerak utama. Proses ini membantu dalam mengatur daya pembangkit agar sesuai dengan kebutuhan, dengan tujuan menjaga frekuensi pada tingkat yang diinginkan dan memastikan keseimbangan sistem.

### 2.2.2 Pengaturan Frekuensi

Dalam pengendalian frekuensi dilakukan melalui penyesuaian jumlah daya aktif yang dihasilkan oleh sistem. Pentingnya menyesuaikan pasokan daya aktif terletak pada kebutuhan untuk memastikan kesesuaian dengan kebutuhan daya aktif beban. Pada konteks ini, penyesuaian dilakukan melalui pengaturan torsi pada penggerak generator.

Dalam konteks matematis frekuensi (f) didefinisikan sebagai $f = \omega / (2\pi)$, di mana $\omega$ adalah kecepatan sudut. Apabila generator menghasilkan daya aktif yang kurang dari kebutuhan daya beban, maka frekuensi akan mengalami penurunan. Sebaliknya, Apabila generator menghasilkan daya aktif yang melebihi dari kebutuhan daya beban, maka frekuensi akan mengalami peningkatan [6]. Hubungan ini dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut:

$$Tg - Tb = \Delta T < 0, \text{ maka } d\omega/dt < 0 \text{ , frekuensi turun} \quad (2.1)$$

$$TG - TB = \Delta T > 0, \text{ maka } d\omega/dt > 0 \text{ , frekuensi naik} \quad (2.2)$$

Kontrol daya aktif pada generator diimplementasikan melalui regulasi pada penggerak utama generator. Peningkatan kecepatan putaran generator akan berdampak pada kenaikan frekuensi sistem. Dari perspektif penggerak utama generator, regulasi frekuensi sistem melibatkan kontrol pemberian uap. Proses pengaturan pada penggerak utama ini dijalankan oleh perangkat governor.

### 2.2.3 Sistem Kontrol

Sistem kendali merupakan suatu alat atau kumpulan alat untuk mengendalikan, memerintah, dan mengatur keadaan dari suatu sistem [6]. kendali yang optimal dalam sistem LFC memiliki signifikansi yang besar dalam memastikan kestabilan dan kinerja yang efisien pada jaringan listrik. Optimalitas kontrol ini menjadi kunci dalam menjaga deviasi frekuensi pada nilai nominal dan menyesuaikan produksi daya dengan konsumsi secara cepat dan tepat. Dengan penerapan kontrol yang optimal, sistem LFC dapat merespons fluktuasi beban dengan efektif, mencegah terjadinya deviasi frekuensi yang berlebihan, dan memastikan bahwa produksi daya selalu sejalan dengan kebutuhan konsumen. Sebagai hasilnya, kendali yang optimal dalam LFC menjadi elemen utama dalam

menjaga keseimbangan sistem tenaga listrik, meminimalkan gangguan, dan meningkatkan keandalan operasional secara keseluruhan.

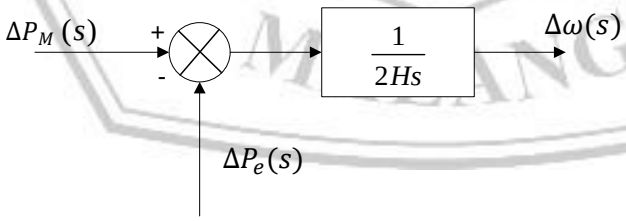
### 2.2.4 Pemodelan Generator

Generator merupakan sebuah mesin yang mengubah energi gerak(mekanik) menjadi energi listrik. Apabila generator diberi tegangan dan arus searah, kumparan rotor rangkaian tertutup dari suatu penghantar akan menimbulkan fluks magnet [7]. Prinsip dasar kerja generator didasarkan pada prinsip elektromagnetisme.

Generator menghasilkan muatan listrik dengan menggerakkan muatan tersebut melalui suatu sirkuit listrik eksternal. Penting untuk dicatat bahwa generator tidak bisa menciptakan aliran listrik, melainkan menghasilkan muatan listrik dengan mendorong aliran muatan yang sudah ada dalam kawat lilitan., seperti turbine uap, mesin pembakaran internal, turbine air, tenaga surya, dan sumber energi lainnya, digunakan untuk memberikan daya mekanis pada generator.

Generator selanjutnya terkait erat dengan Hukum *Faraday*, yang menyatakan bahwa ketika seutas kawat penghantar listrik ditempatkan dalam medan magnet yang berubah-ubah, akan terinduksi gaya gerak listrik di dalam kawat tersebut. Proses ini menciptakan aliran listrik dalam sirkuit terhubung, menghasilkan daya listrik yang dapat digunakan.

Dengan demikian, generator bekerja dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik, memanfaatkan prinsip elektromagnetisme dan hukum Faraday dalam prosesnya. Diagram blok pada Gambar 2.2 menggambarkan model generator.




**Gambar 2.2** Diagram Blok Generator

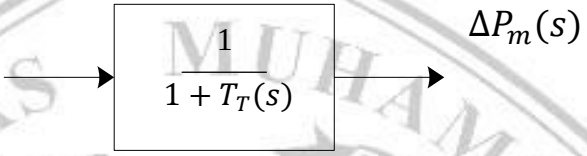
### 2.2.5 Perancangan Model Turbin

Energi mekanik yang disebut sebagai prime mover atau penggerak utama[8]. Perancangan Model turbin ini memperhitungkan perubahan daya output

mekanik ($\Delta P_m$) sebagai respons terhadap perubahan pergerakan katup uap ($\Delta P_V$). Model sederhana dari mulai aktifnya turbin uap nonreheat dapat diaproksimasi dengan waktu konstan ($T_T$), sehingga dapat diperoleh fungsi transfer sebagai berikut:

$$G_T = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_V(s)} = \frac{1}{1+T_T} \tag{2.3}$$

Pada persamaan di atas dapat di buat model blok diagram sebagai berikut,




**Gamabar 2.3** Diagram Blok Turbin

### 2.2.6 Perancangan Model Beban

Beban pada sistem pembangkit listrik mencakup beberapa jenis instrument listrik. Pada beban resistif, daya tidak berpengaruh pada frekuensi. Namun, pada beban motor, perubahan frekuensi bisa mempengaruhi putaran atau daya elektrik (Pe) yang dihasilkan oleh mesin [8]. Dampak dari perubahan beban terhadap daya elektrik, dijelaskan sebagai berikut:

$$\Delta P_e = \Delta P_L - D\Delta_\omega \tag{2.4}$$

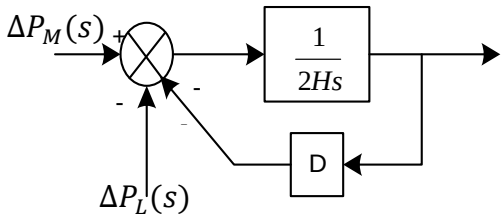
Keterangan,

$D$ =Konstanta Redaman (Dumping Constant)

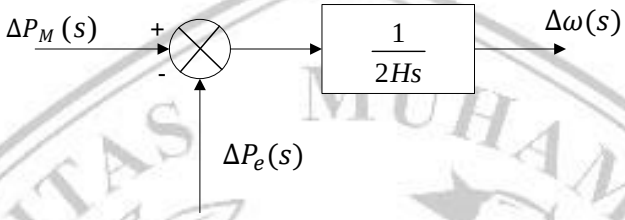
$\Delta P$ = Perubahan Beban

$D\Delta_\omega$ =Sensitivitas Frekuensi

Pada persamaan (2.4) dapat diubah menjadi model blok diagram sebagai berikut,



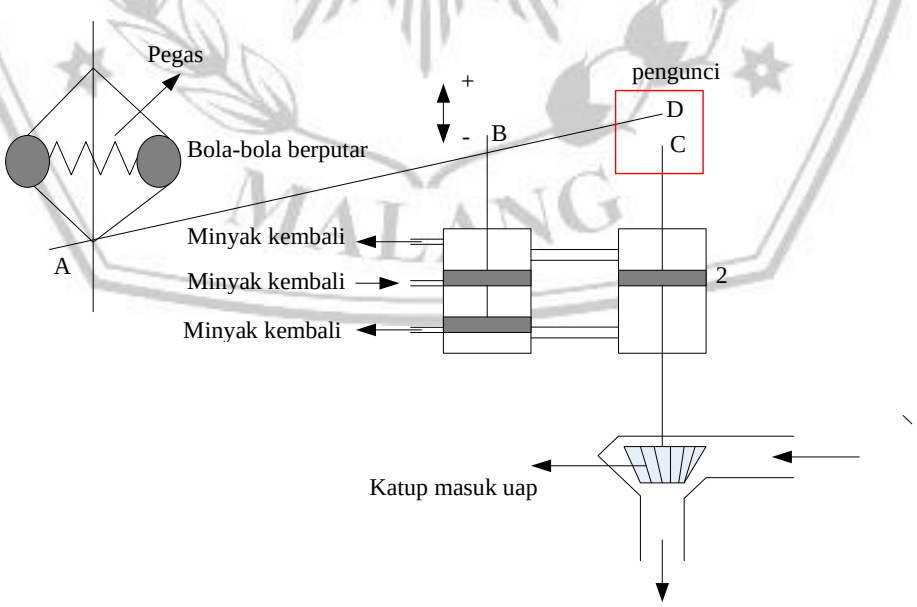

**Gambar 2.4** Model Diagram Blok *Load Damping*




**Gambar 2.5** Diagram Blok Efek *Load Damping* Model Sederhana

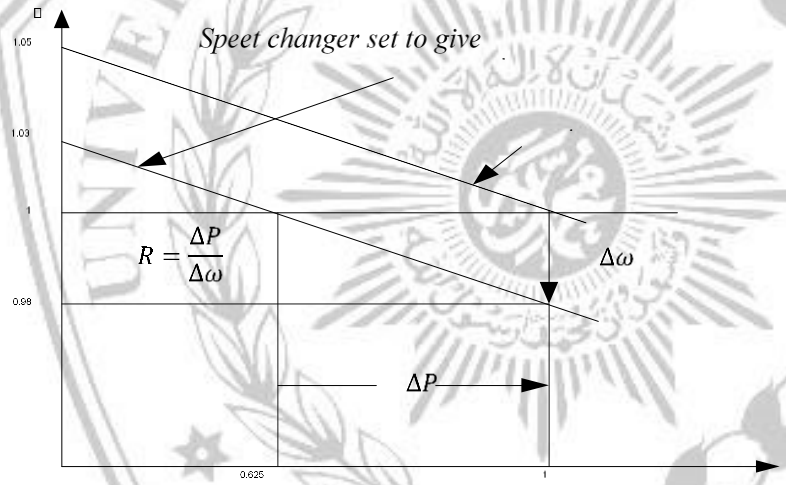
### 2.2.7 Perancangan Model Governor

Governor adalah komponen dari pembangkit listrik yang bertanggung jawab untuk mengatur penyediaan bahan penggerak utama dalam sistem pembangkit. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), governor mengatur penyediaan air, sementara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), governor mengatur penyediaan uap. Pengaturan bahan penggerak utama ini berpengaruh langsung terhadap kecepatan rotasi rotor generator [6]. Kecepatan rotasi generator disesuaikan pada kebutuhan daya yang diperlukan oleh beban.



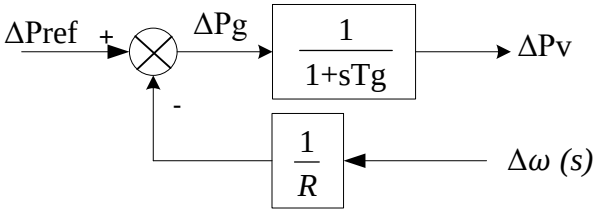

**Gambar 2.6** Model Prinsip Kinerja Governor

Ketika ω mengalami penurunan, bola-bola dalam Gambar 2.6 akan mengalami pergerakan. Sebagai akibatnya, titik A akan menurun; jika A mengalami penurunan, titik B akan mengalami penurunan. Penurunan titik B akan mengakibatkan torak pada pengarah minyak memompa minyak ke torak utama. Proses ini mengakibatkan katup pada torak utama terangkat. Dengan bertambahnya uap, kecepatan putar generator juga meningkat, maka nilai frekuensi akan naik, perubahan nilai frekuensi mulai menurun, dan model matematisnya diwakili oleh df/dt=0, yang berarti TG-TB=0. Dapat diartikan penambahan uap tidak berhenti seketika karena governor memerlukan waktu agar dapat kembali ke keadaan semula. Sehingga menyebabkan kenaikan frekuensi df/dt >0,. Selanjutnya, governor akan merespons kenaikan frekuensi ini dengan mengurangi suplai uap/air ke turbin. Proses ini akan berkelanjutan secara dinamis hingga sistem mencapai keadaan steady state.




**Gambar 2.7** Karakteristik Kecepatan Governor

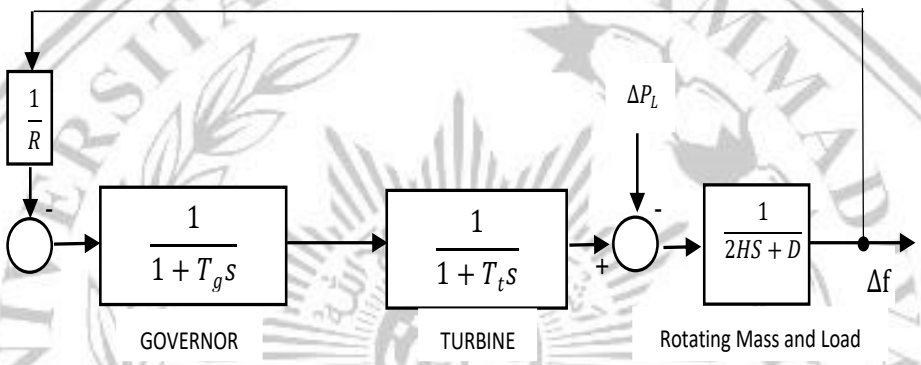
Gambar 2.7 menggambarkan kurva karakteristik governor pada kondisi steady state perbandingan antara daya aktif (Watt) terhadap percepatan gerak rotor (rad). Kemiringan governor memiliki batasan kecepatan spesifik, yaitu berkisar antara 5 hingga 6 persen dari nol hingga mencapai keadaan penuh. Mekanisme kecepatan governor beroperasi sebagai pembanding, di mana keluaran dari governor ΔPg, diperoleh dengan mengurangkan daya referensi dengan 1/R Δω yang merupakan karakteristik dari governor. Representasi blok diagram dari governor dapat dilihat pada Gambar 2.8..




**Gambar 2.8** Diagram Blok Governor

### 2.2.8 Merancang Model LFC

Dengan mengintegrasikan Turbin, Beban, Generator, dan Governor, diperoleh representasi sistem LFC pada sistem terisolasi, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.9.




**Gambar 2.9** Diagram Sistem Blok LFC

Keterangan,

H = Momen Inersia

D = Load Damping

$T_T$ = Konstanta Waktu Turbin

$T_T$ = Konstanta Waktu Governor

R = Speed Droop

$\Delta f$ = Perubahan Frekuensi

$\Delta P_G$ = Perubahan Lever Katub

$\Delta P_M$ = Perubahan Daya Mekanik

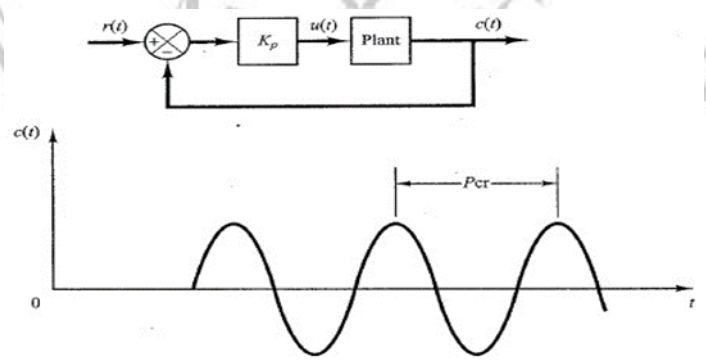
### 2.2.9 Kontrol PI

Setiap sistem rentan terhadap error yang bisa timbul akibat gangguan, dan error tersebut memiliki potensi mengubah perilaku sistem. Perubahan perilaku ini dapat mengakibatkan ketidakstabilan sistem. Untuk mengembalikan stabilitas sistem, penambahan suatu subsistem, yaitu kontroler, dapat dilakukan. Fungsi utama kontroler PI adalah mengurangi sinyal error, yang merupakan perbedaan antara sinyal set dan sinyal aktual.

Karena kontroler proporsional plus integral merupakan kombinasi dari dua unit kontrol, segala kelebihan dan kekurangan yang terkandung dalam kontroler proporsional dan kontroler integral juga terdapat pada kontroler ini. Sifat kontroler proporsional yang cenderung meninggalkan offset dapat dikompensasi oleh kelebihan yang dimiliki oleh kontroler integral.

Dalam metode kedua aturan penalaan Ziegler-Nichols untuk menentukan parameter kontrol PID (Kp, Ti, dan Td), fokus utama terletak pada nilai critical gain (Kcr) dan critical period (Pcr). Pendekatan ini melibatkan kontrol proporsional dengan peningkatan nilai gain (Kp) dari 0 hingga mencapai nilai kritis Kcr, di mana output pertama kali menunjukkan osilasi yang berkelanjutan. Jika output tidak menghasilkan osilasi berkelanjutan, metode ini dianggap tidak berlaku.

Selanjutnya, nilai critical period (Pcr) diperoleh dari periode osilasi. Proses penentuan Kcr dan Pcr diilustrasikan secara detail pada Gambar 2.10. Pendekatan ini memberikan landasan yang jelas dan terukur untuk mengidentifikasi parameter PID yang optimal tanpa mengandalkan keberuntungan atau pendekatan percobaan dan kesalahan yang tidak terkendali.




**Gambar 2.10** Penentuan nilai *critical gain* Kcr dan *critical period* Pcr.

Aturan penalaan parameter PID metode kedua Ziegler Nichols terlihat dalam tabel 2.1 berikut.

**Tabel 2.1** Metode kedua aturan penalaan Ziegler Nichols

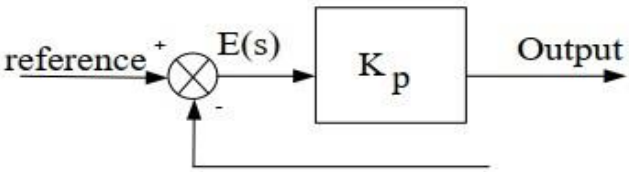
| Tipe kontroler | Kp | Ti | Td |
|---|---|---|---|
| P | 0,5 Kcr | ∞ | 0 |
| PI | 0,45 Kcr | $\frac{1}{1,2} Pcr$ | 0 |
| PID | 0,6 Kcr | 0,5 Pcr | 0,25 Pcr |

.

### 2.2.10 Kontrol Proportional

Keluaran dari kontrol proporsional bersifat proporsional terhadap besarnya sinyal error, yang merupakan selisih antara besaran referensi dan besaran aktual. Output dari kontroler proporsional diperoleh dengan mengalikan gain proporsional dengan sinyal inputnya. Setiap perubahan pada sinyal input mengakibatkan keluaran sistem berubah sejauh nilai konstanta pengali.

Hubungan besaran aktual, dan keluaran dari kontroler proporsional. Sinyal kesalahan dihitung sebagai selisih antara besaran setting dan besaran aktual. Perbedaan ini memengaruhi kontroler sehingga menghasilkan sinyal positif bertujuan untuk mempercepat pencapaian nilai setting, sementara sinyal negatif digunakan untuk memperlambat pencapaian nilai yang diinginkan..




**Gambar 2.11** Diagram Blok Kontrol Proportional

Kontrol proportional ditandai dengan konstanta proportional, dapat dinyatakan sebagai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan (Kp). Penggunaan kontroler proporsional memerlukan perhatian pada beberapa ketentuan berikut:

1. Jika nilai Kp kecil, kontroler proporsional hanya mampu melakukan koreksi terhadap kesalahan yang kecil, sehingga menghasilkan respons sistem yang lambat.

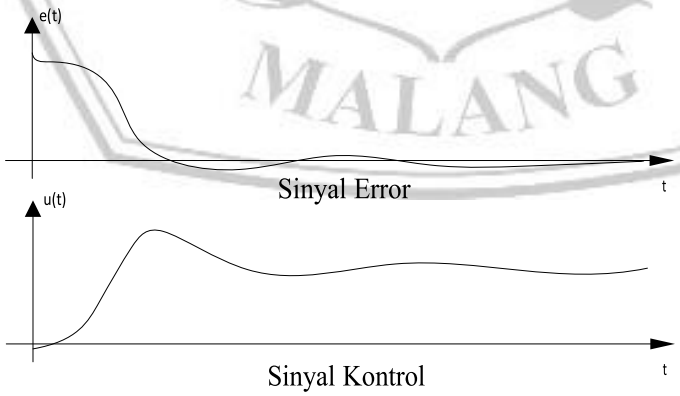
2. Peningkatan nilai Kp akan mempercepat respons sistem dalam mencapai keadaan mantap.
3. Namun, apabila nilai Kp diperbesar secara berlebihan, hal ini dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil atau menghasilkan respons yang bersifat osilatif.

### 2.2.11 Kontrol Integral

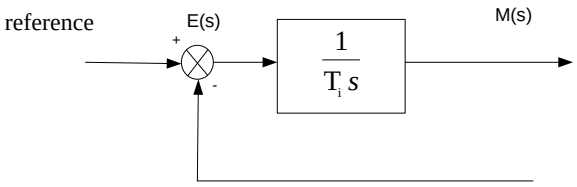
Fungsi dari kontrol integral adalah menghasilkan respons sistem yang menghasilkan sinyal kesalahan nol. Jika suatu sistem tidak mengandung elemen *integrator* (1/s), kontrol proporsional saja tidak dapat menjamin bahwa output sistem akan memiliki sinyal kesalahan nol. Kontrol integral memungkinkan perbaikan respons sistem sehingga sinyal kesalahan mantapnya menjadi nol. Kontrol integral memiliki karakteristik serupa dengan cara kerja kontrol integral. Output kontrol dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan.

Output kontrol integral merupakan jumlah kelanjutan dari perubahan input. Jika sinyal kesalahan tidak berubah, output akan tetap pada keadaan sebelum perubahan input terjadi. Sinyal output dari kontrol integral mencerminkan besarnya area di bawah kurva kesalahan.

Nilai sinyal output akan tetap sebanding dengan nilai sebelumnya saat sinyal kesalahan mencapai titik nol. Pada Gambar 2.13 memberikan contoh keadaan sinyal kesalahan pada saat dimasukkan ke dalam kontrol integral dan output dari kontrol integral saat perubahan sinyal kesalahan terjadi.

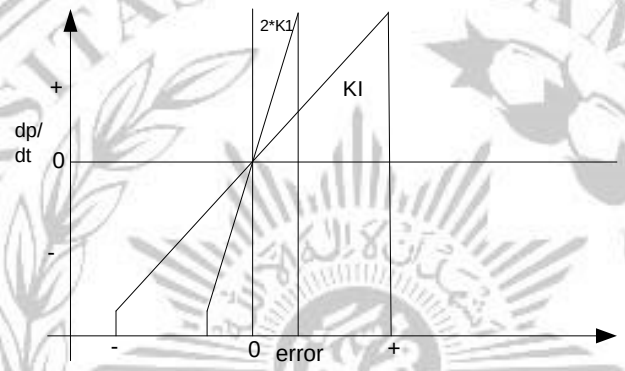



**Gambar 2.12** kurva *u(t)* terhadap *t* dan Kurva sinyal kesalahan *e(t)* terhadap *t* pada pembangkit keadaan kesalahan nol.




**Gambar 2.13** Diagram Blok Kontrol Integral.

Dampak modifikasi parameter kontrol integral pada output dapat dilihat pada Gambar 2.12. Jika sinyal kesalahan mengalami peningkatan, perubahan output kontrol akan mengalami peningkatan dibandingkan sebelumnya. ketika nilai parameter integrator ditingkatkan, sinyal kesalahan yang semula relatif kecil dapat menyebabkan nilai output menjadi lebih besar.




**Gambar 2.14** Perubahan Nilai Outpun Akibat Kesalahan dan Penguatan.

Saat diimplementasikan, kontrol integral memiliki karakteristik berikut:

1. Output kontrol dibutuhkan nilai waktu tertentu, yang dapat mengakibatkan perlambatan respons kontroler integral.
2. Jika sinyal kesalahan tidak nol, nilai input akan menghasilkan peningkatan atau penurunan tergantung pada besarnya sinyal kesalahan dan nilai Ki (konstanta integral).
3. Saat sinyal kesalahan bernilai nol, output kontrol akan tetap bernilai sama dengan sebelumnya.
4. Jika konstanta integral Ki bernilai lebih besar dapat mempercepat eliminasi *offset*. Namun, saat nilai Ki semakin besar, osilasi dari sinyal output kontrol juga dapat meningkat.

### 2.2.12 Kontrol MPC

` Sistem kendali prediktif masuk dalam kategori konsep perancangan pengendali berbasis model proses, di mana model proses digunakan untuk merancang pengendali plant dengan meminimalkan fungsi objektif. Dalam *control predictive*, pemodelan internal yang merupakan representasi linear dari proses yang digunakan untuk memahami perilaku sistem, model internal digunakan untuk memprediksi perilaku sistem dalam suatu rentang waktu terbatas yang disebut dengan *preceding horizon*. Hasil prediksi ini kemudian diterapkan pada setiap waktu untuk mengoptimalkan sinyal output sistem melalui perubahan sinyal input.

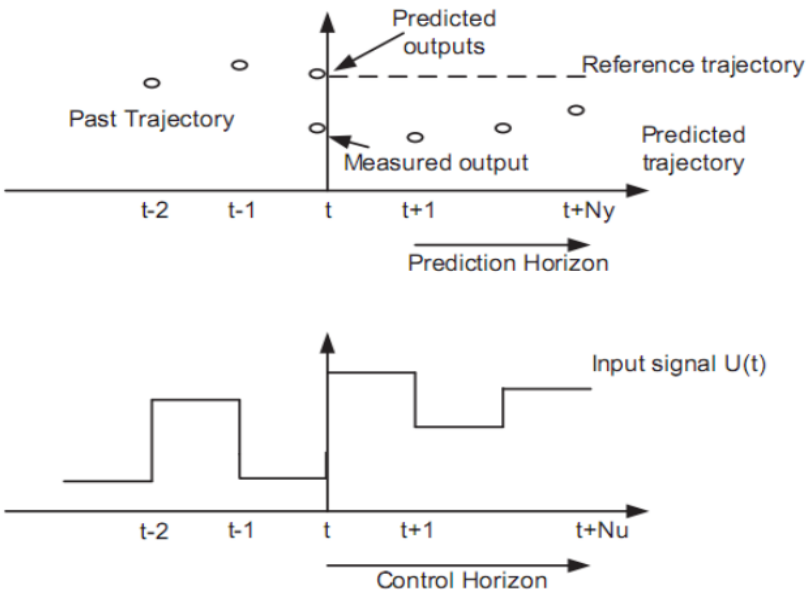
Keunggulan kontrol *Model Predictive Control* dibandingkan dengan kontrol konvensional lainnya meliputi:

1. Dapat digunakan untuk mengendalikan berbagai jenis proses, mulai dari yang sederhana hingga kompleks.
2. Memiliki kemampuan pengendali feedforward untuk mengkompensasi gangguan yang terukur.
3. Dalam pengimplementasiannya lebih mudah.
4. Sangat berguna jika sinyal referensi untuk keaadaan yang akan datang.

Prinsip dasar dari setiap jenis *control predictive* terdapat langkah-langkah berikut:

1. Penggunaan Model Proses: Menggunakan model proses untuk memprediksi keluaran dalam rentang waktu tertentu (horizon).
2. Perhitungan Sinyal Kendali: Menghitung sinyal kendali dengan meminimalkan fungsi objektif yang telah ditentukan, dengan tujuan menjaga output proses sesuai dengan trayektori referensi.
3. Pengiriman Sinyal Kendali: Sinyal kendali u(t) dikirimkan ke proses, sementara sinyal kendali terprediksi berikutnya dibuang.

Langkah awal dalam merancang pengendali adalah mengulang proses pengendalian dengan nilai proses yang baru, dan melakukan perbaikan pada semua perhitungan yang diperlukan. Konsep *receding horizon* diilustrasikan dalam Gambar 2.14.




**Gambar 2.15** Konsep *Receding Horizon*

Dalam *Model Predictive Control* (MPC), terdapat lima konsep dasar yang digunakan, melibatkan model proses dan gangguan, prinsip receding horizon, pengendalian constraints, optimalisasi, dan performance index. Struktur dasar dari MPC diilustrasikan pada Gambar 2.15.

Dalam penyetelan pengendali MPC, terdapat beberapa parameter yang perlu disesuaikan, yaitu:

1. *Model Horizon*: Jumlah interval sampel yang diperlukan untuk mencapai kondisi *steady state* saat input diberikan kepada proses.
2. *Prediction Horizon*: Jarak waktu ke depan dalam menghitung seberapa jauh prediksi yang dilakukan ketika menghitung output pengendali.
3. *Sampling Time*: Rentang waktu yang digunakan dalam pengambilan data.