

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjabarkan mengenai tinjauan pustaka yang telah diperoleh sebagai penunjang pengerjaan tugas akhir ini.

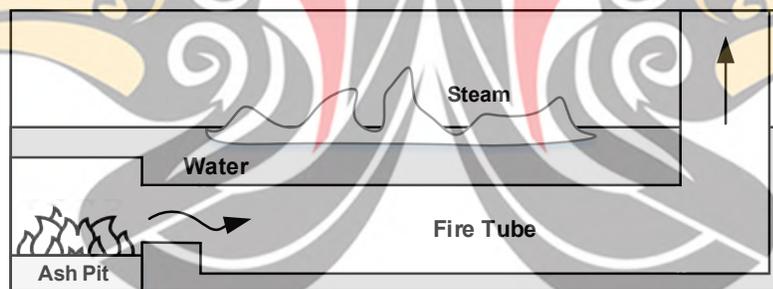
#### **2.1 Boiler**

*Boiler* merupakan sebuah bejana tertutup berbentuk tabung dimana terjadi proses pembakaran untuk memanaskan air hingga menjadi air panas dan *steam*. Keluaran yang dihasilkan berupa *steam* bertekanan yang kemudian digunakan untuk mengalirkan panas pada suatu proses. Air menjadi media yang sangat bermanfaat dan murah dalam melakukan transfer panas dalam suatu proses. Air juga berfungsi sebagai pencegah kerusakan termal pada *boiler*. Sistem pada boiler dibagi menjadi tiga, yaitu sistem bahan bakar yang berfungsi menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan, sistem *feed water* yang menyediakan air bagi *boiler* secara otomatis untuk kebutuhan *steam* dan sistem *steam* berperan dalam mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* dalam *boiler* (UNEP Divison of Technology, Industry and Economics, 2011).

Berdasarkan cara perpindahan panasnya maka *boiler* dibagi menjadi dua, yaitu *fire tube boiler* dan *water tube boiler*. Pada *water tube boiler*, *feed water* tersirkulasi melalui pipa-pipa melewati *furnace* sehingga dipanaskan oleh gas pembakar membentuk *steam* pada daerah uap dalam drum. Jenis ini memungkinkan *boiler* menghasilkan *steam* berkapasitas besar dengan tekanan tinggi. Sedangkan pada *fire tube boiler* perpindahan panas terjadi dengan cara gas panas hasil pembakaran melewati pipa-pipa dan *feedwater* pada bagian *shell* yang akan diubah menjadi *steam*. *Boiler* jenis ini biasanya digunakan untuk menghasilkan kapasitas *steam* yang relatif kecil dengan tekanan rendah sampai menengah. Air yang telah menerima perpindahan panas akan naik ke atas menuju *steam drum* dan menjadi *steam* (UNEP Divison of Technology, Industry and Economics, 2011).

## 2.2 Steam Drum

*Steam drum* merupakan sebuah bejana tertutup yang dirancang untuk menahan tekanan internal yang digunakan untuk mengumpulkan dan memisahkan campuran uap / air yang tersirkulasi melalui *boiler*. Sirkulasi pada *steam drum* didasarkan pada prinsip konveksi. Pada prinsip tersebut, suatu cairan yang dipanaskan akan mengembang dan menjadi kurang padat sehingga bergerak ke atas melalui cairan-cairan yang lebih berat dan padat. Air yang suhunya lebih rendah dari atas ke bawah yang kemudian akan mengalir kembali ke atas ketika dipanaskan. Gelembung uap akan terbentuk karena suhu cairan yang terus meningkat. Gelembung-gelembung ini akan meningkat ketika naik ke atas. Ketika uap telah terkumpul maka akan timbul tekanan di bagian atas. Saat tekanan meningkat maka titik didih juga akan meningkat. Apabila tekanan yang dibutuhkan telah tercapai uap akan dikirimkan ke *header*. Sirkulasi pada *steam drum* dapat diketahui melalui gambar di bawah ini (*National Center for Construction Education and Research*, 2014).



Gambar 2.1 Sirkulasi air pada *steam drum*  
(*UNEP Divison of Technology, Industry and Economics*, 2011)

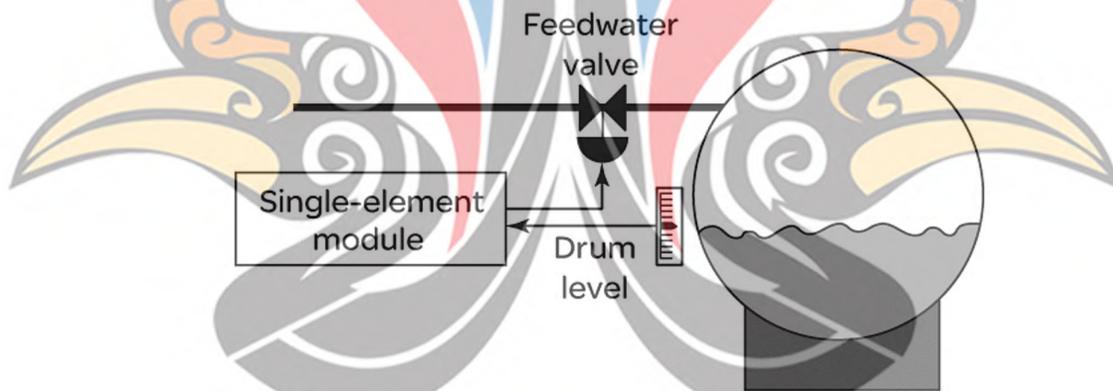
## 2.3 Pengendalian Ketinggian Air

Ketinggian air pada *steam drum* memiliki memiliki pengaruh yang mendalam terhadap kualitas air dan kecepatan *stream-water separation*. Pengendalian ketinggian air adalah untuk mempertahankan muatan uap yang dihasilkan secara konstan. Jika ketinggian air terlalu rendah menyebabkan stagnansi pada aliran serta *overheated* (panas berlebih) pada pipa-pipa sehingga dapat menyebabkan kebocoran maupun kerusakan. Apabila ketinggian air terlalu tinggi akan menyebabkan pemisahan antara air dan uap tidak sempurna. Dampak yang terjadi

yaitu kualitas uap air yang dihasilkan masih banyak mengandung air basah dengan suhu uap yang menurun dan kedepannya mampu menimbulkan korosi pada pipa (Zhao, 2014). Terdapat beberapa jenis pengendalian ketinggian air pada *steam drum* yang dijabarkan pada subbab di bawah ini.

### 2.3.1 *Single Element Control*

Kontrol jenis ini merupakan metode paling sederhana dan kurang efektif dengan hanya mempertimbangkan hasil pembacaan ketinggian air. Variabel proses diperoleh dari *level transmitter* yang kemudian dibandingkan dengan *set point*. Hasil perbandingan kedua nilai merupakan nilai deviasi. Kemudian sinyal diberikan kepada kontroler yang kemudian memberikan *output* berupa aksi korektif. *Output* kemudian digunakan mengatur *feed water control valve* yang menyesuaikan aliran dari *feed water* (Salim, 2015).

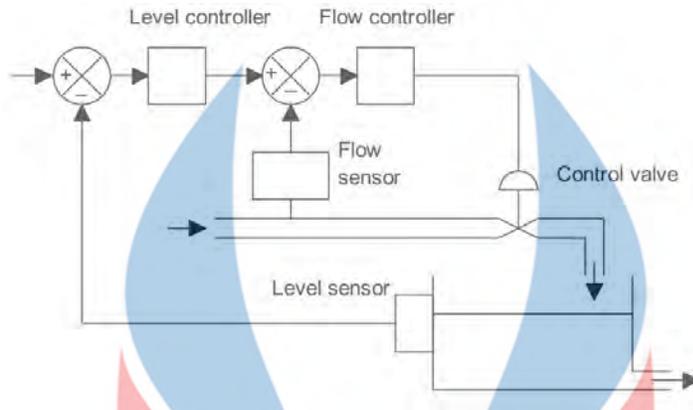


Gambar 2.2 *Single element control* (Salim, 2016)

### 2.3.2 *Two Element Control*

Kontrol dua elemen memiliki dua variabel, yaitu ketinggian air dan laju aliran *feed water* untuk mengatur *feed water control valve*. Perubahan ketinggian air terjadi agak lambat disebabkan luasnya penampang tanki. Hal ini berbeda dengan perubahan aliran yang dapat terjadi dengan sangat cepat sehingga jika terjadi gangguan yang menyebabkan perubahan laju aliran yang masuk maka terdapat penundaan (*delay*) yang cukup besar sebelum perubahan ketinggian air terinisiasi sebagai nilai koreksi. Hal ini menyebabkan mampu merespon dengan cepat

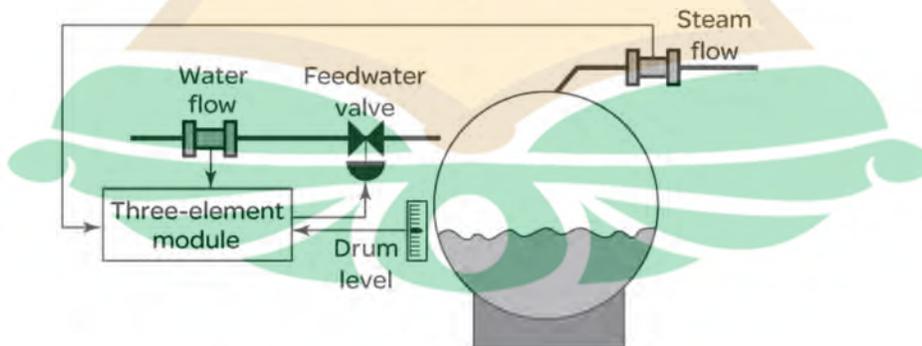
terhadap gangguan pada aliran serta mampu mengurangi fluktuasi perubahan ketinggian (Bolton, 2015). [www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)



Gambar 2.3 *Two element control* (Bolton, 2015)

### 2.3.3 *Three Element Control*

Tiga elemen yang digunakan sebagai variabel adalah ketinggian air, aliran *steam* dan aliran *feed water*. Metode ini sangat cocok untuk *boiler plant* yang terdiri dari beberapa boiler dan pompa *feed water*. Dengan menggunakan mekanisme kontrol *cascade*, elemen ketinggian air berperan sebagai *loop* primer, elemen aliran *feed water* sebagai *loop* sekunder sedangkan aliran *steam* sebagai kontroler *feed forward*. Elemen aliran uap mengoreksi jika terjadi gangguan yang tidak terukur dalam sistem yang kemudian elemen aliran *feed water* merespon dengan cepat terhadap variasi *feed water* yang dibutuhkan berdasarkan sinyal *feed forward* dari tekanan *feed water* dan laju aliran uap (Shiji,2016).



Gambar 2.4 *Three element control* (Shiji, 2016)

## 2.4 Pemodelan Matematis Steam Drum

Dinamika yang terjadi di dalam *steam drum* dapat dinyatakan dengan hukum kesetimbangan massa. Prinsip dari hukum ini sendiri adalah total massa yang masuk ke dalam suatu tahap proses atau proses secara keseluruhan sama dengan total massa yang dihasilkan. Perubahan yang terjadi yaitu perubahan suatu bentuk energi ketika *input* menjadi bentuk energi lainnya. Hukum kesetimbangan massa berlaku persamaan 2.1.

$$\left[ \begin{array}{c} \text{laju perubahan massa} \\ \text{di dalam steam drum} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{laju aliran massa} \\ \text{feed water} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{laju aliran massa} \\ \text{steam} \end{array} \right] \quad (2.1)$$

Laju perubahan massa di dalam *steam drum* yang terbagi menjadi dua fase, yaitu fase cair (*liquid*) dan uap (*vapor*) sehingga persamaan yang diperoleh menjadi persamaan 2.2.

$$\frac{d}{dt}(\rho_w V_w + \rho_s V_s) = \frac{d}{dt}(\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \quad (2.2)$$

Untuk memperoleh volume *steam* digunakan persamaan 2.3.

$$V_{steam} = V_{steamdrum} - V_{water} \quad (2.3)$$

(Shiji, 2016)

## 2.5 Pemodelan Matematis Transmitter

*Transmitter* digunakan untuk mengukur elemen *feed forward* yang digunakan pada pengendalian ketinggian air pada *steam drum*. Berdasarkan metode pengendalian *three element control* maka menggunakan 3 jenis *transmitter* yakni, *level transmitter* untuk mengukur ketinggian cairan pada *steam drum* dan 2 jenis *flow transmitter* yang terdiri dari *feed water flow transmitter* untuk mengukur laju aliran air yang dialirkan menuju *steam drum* dan *steam flow transmitter* untuk mengukur laju aliran *steam* keluaran dari *steam drum*.

Fungsi alih dari masing-masing jenis *transmitter* yang digunakan dapat diperoleh dengan persamaan 2.4 dengan memperoleh nilai *gain transmitter* melalui persamaan 2.5.

$$\frac{I(s)}{T(s)} = \frac{G_T}{\tau_T s + 1} \quad (2.4)$$

$$G_T = \frac{Span_{output}}{Span_{input}} \quad (2.5)$$

(Seborg, 2011)

## 2.6 Pemodelan Matematis Control Valve

Untuk kebutuhan mengendalikan ketinggian air dalam steam drum maka dibutuhkan control valve yang mengatur jumlah debit air yang dialirkan. Model matematis dari control valve dapat dilihat pada persamaan 2.6.

$$\frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{G_{CV}}{\tau_{CV} s + 1} \quad (2.6)$$

Untuk mendapatkan gain control valve ( $G_{CV}$ ), dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan 2.7.

$$G_{CV} = K_{I/P} \times K_{Actuator} \quad (2.7)$$

Gain dari transducer dan actuator dapat diperoleh melalui 2.8 dan 2.9.

$$K_{I/P} = \frac{Span_{output}}{Span_{input}} \quad (2.8)$$

$$K_{Actuator} = \frac{Q_{max}}{Span_{output}} \quad (2.9)$$

Nilai laju aliran maksimum pada control valve dapat diperoleh melalui persamaan 2.10.

$$Q_{max} = kv_{100\%} \sqrt{\frac{1000\Delta P}{\rho}} \quad (2.10)$$

(Seborg, 2011)

## 2.7 PID Controller

Kontroler PID merupakan suatu sistem kendali yang tersusun dari pengedali proportional (P), integral (I) dan derivative (D). Sistem kendali PID memiliki

kelebihan mudah dipelajari, dan mudah dalam penentuan nilai parameter-parameternya. dalam merancang kontroler PID dibutuhkan persamaan matematis *plant* yang akan dikontrol dan spesifikasi sistem yang diinginkan yang kemudian dapat ditentukan nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Penjumlahan ketiga kontroler tersebut dapat dimodelkan secara matematis pada persamaan 2.15.

$$G(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.11)$$

(Ogata, 2010)

Penggabungan ketiga sistem kendali tersebut untuk memanfaatkan kelebihan-kelebihan masing-masing kontroler yakni kontrol proporsional yang unggul dalam *risetime* yang cepat, kontrol integral yang dapat menghilangkan *error*, dan kontrol *derivative* yang dapat meredam *overshoot*. Sehingga apabila digabungkan akan mendapatkan hasil pengontrolan dengan sifat menghilangkan *error*, mengurangi *rise time*, menambah *settling time*, dan memperkecil *overshoot*. Namun, pada kenyataannya kontrol yang dihasilkan tidak akan sempurna seperti teori (Ogata, 2010).

Pada implementasi control PID disesuaikan dengan kebutuhan dan berdasarkan Tabel 2.1

Tabel 2.1 Karakteristik PID

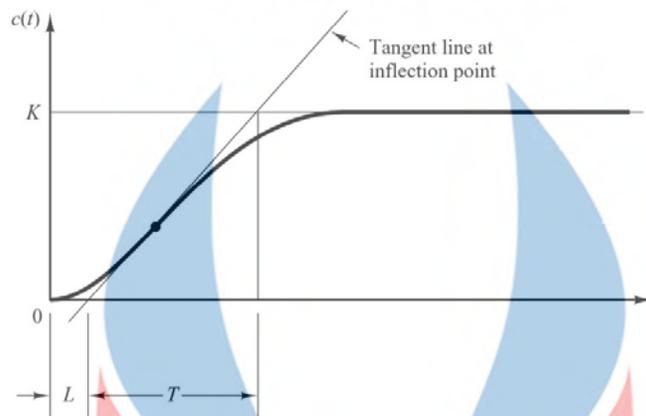
| Penguatan | <i>Rise Time</i> | <i>Overshoot</i> | <i>Settling Time</i> | <i>Steady State Error</i> |
|-----------|------------------|------------------|----------------------|---------------------------|
| $K_p$     | Berkurang        | Bertambah        | Sedikit Berubah      | Berkurang                 |
| $K_i$     | Berkurang        | Bertambah        | Hilang               | Hilang                    |
| $K_d$     | Sedikit berubah  | Berkurang        | Berkurang            | Sedikit Berubah           |

\*) Ogata, 2010

## 2.8 Metode Tuning Ziegler-Nichols

Penentuan parameter PID yang akan digunakan pada suatu sistem dapat dicari dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols (Z-N). Metode ini diperkenalkan pada tahun 1942. Metode Z-N memiliki dua cara, yaitu metode kurva reaksi didasarkan pada reaksi sistem *open loop* dengan melihat *step response* dan metode osilasi didasarkan pada reaksi sistem *close loop* dengan melihat pada *frequency*

response. Keduanya digunakan untuk memperoleh *overshoot* maksimum sebesar 25% (Ogata, 2010).



Gambar 2.5 Kurva respon berbentuk S (Ogata, 2015)

Pada metode kurva reaksi dengan *plant* sebagai *open loop* dikenai sinyal *step function*. Kelemahan metode ini terletak pada ketidakmampuannya untuk menangani *plant integrator* maupun *plant* yang memiliki *pole* kompleks. Jika *plant* tidak mengandung unsur *integrator* maupun *pole-pole* yang kompleks maka respon sistem akan menghasilkan kurva berbentuk S pada Gambar 2.5 (Ogata, 2015).

Kurva berbentuk S mempunyai dua konstanta, waktu mati (*dead time*)  $L$  dan waktu tunda  $T$ . Dari Gambar 1 terlihat bahwa kurva reaksi berubah naik, setelah selang waktu  $L$ . Pada kurva dibuat suatu garis yang bersinggungan dengan garis kurva. Garis singgung itu akan memotong dengan sumbu absis dan garis maksimum. Perpotongan garis singgung dengan sumbu absis merupakan ukuran  $L$ , dan perpotongan dengan garis maksimum merupakan  $T$  yang diukur dari titik waktu  $L$ . Aturan *tuning* PID berdasarkan cara kurva reaksi dapat dilihat pada Tabel 2.2 (Ogata, 2010).

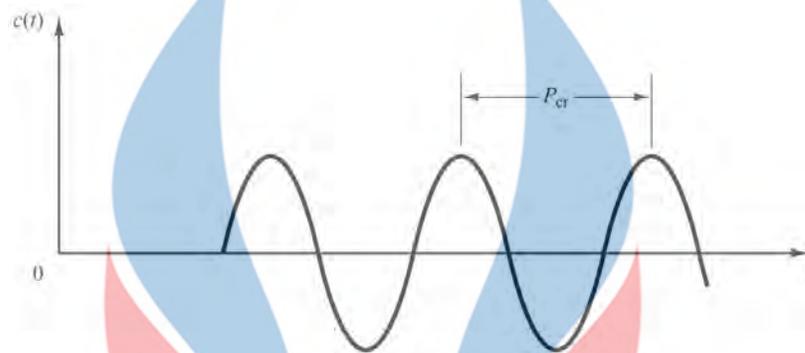
Tabel 2.2 Aturan *Tuning* PID Metode Kurva Reaksi

| Jenis Kontroler | $K_p$     | $T_i$   | $T_d$  |
|-----------------|-----------|---------|--------|
| P               | $T/L$     | $\sim$  | 0      |
| PI              | $0,9T/L$  | $L/0,3$ | 0      |
| PID             | $1,2 T/L$ | $2L$    | $0,5L$ |

\*) Ogata, 2010

Metode osilasi menetapkan parameter integrator diatur tak hingga dan parameter derivatif diatur nol ( $T_i = \sim$ ;  $T_d = 0$ ) sehingga parameter yang digunakan

hanyalah pengendalian proporsional. Nilai  $K_p$  dinaikkan dari 0 hingga mencapai *Critical Gain* ( $K_{cr}$ ) dimana reaksi sistem berosilasi dengan magnitud tetap (*sustain oscillation*). Periode dari osilasi disebut *Critical Period* ( $P_{cr}$ ). Respon sistem yang diharapkan dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Ogata, 2015).



Gambar 2.6 Respon sistem dalam keadaan *sustain oscillation* (Ogata, 2010).

Nilai  $K_{cr}$  dan  $P_{cr}$  yang telah diperoleh disubstitusikan ke dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Aturan *Tuning* PID Metode Osilasi

| Jenis Kontroler | $K_p$        | $T_i$       | $T_d$         |
|-----------------|--------------|-------------|---------------|
| P               | $0,5K_{cr}$  | $\sim$      | 0             |
| PI              | $0,45K_{cr}$ | $0,8P_{cr}$ | 0             |
| PID             | $0,6K_{cr}$  | $0,5P_{cr}$ | $0.125P_{cr}$ |

\*) Ogata, 2010

## 2.9 Spesifikasi Respon Transien

Karakteristik performa suatu sistem control sering kali dinyatakan dalam bentuk respon transien terhadap masukan *unit-step* dikarenakan mudah dibangkitkan dan dapat naik dengan cukup drastis. Dalam melakukan perbandingan respon transien berbagai macam sistem dilakukan menggunakan syarat awal standar yaitu sistem mula-mula dalam keadaan diam sehingga keluaran dan semua turunan waktunya pada awal respon sama dengan nol. Dengan cara ini maka karakteristik respon sistem dapat dibandingkan dengan mudah.

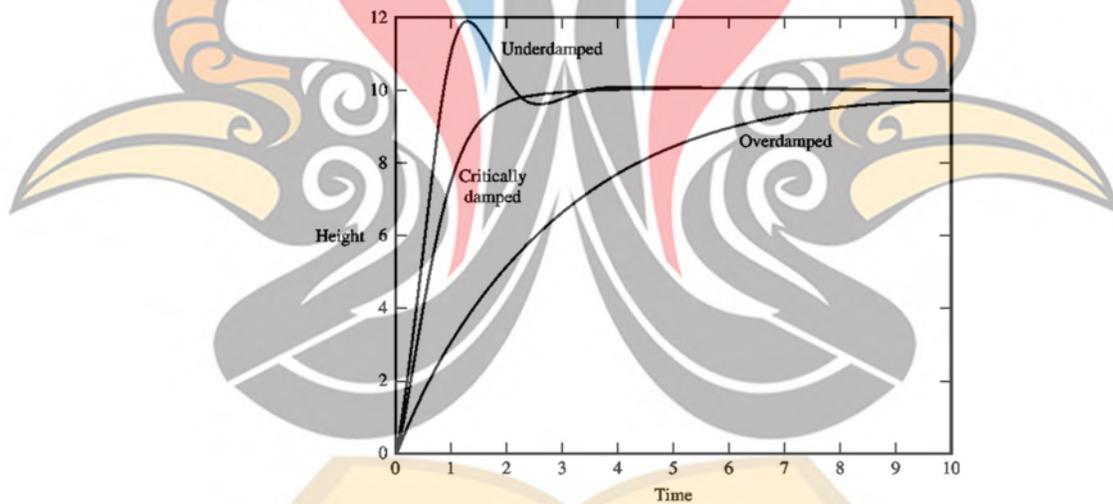


Apabila ingin mendapatkan besar dari *error steady state* (%) maka dapat dinyatakan dengan galat relatif pada persamaan 2.18.

$$E_{ss} (\%) = \frac{E_{ss}}{c(t)} \times 100\% \quad (2.13)$$

(Ogata, 2010)

Pada kondisi dalam keadaan *underdamped* dihasilkan respon keluaran yang melesat naik untuk mencapai *steady state* dengan memiliki efek osilasi. Respon dengan keadaan *critically damped* memiliki respon keluaran yang tidak melampaui nilai masukan namun membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai *steady state*. Sedangkan respon yang memiliki kondisi *overdamped* mampu mencapai *steady state* dengan cepat dan tidak melewati batas *steady state* (Coughanowr, 2009).

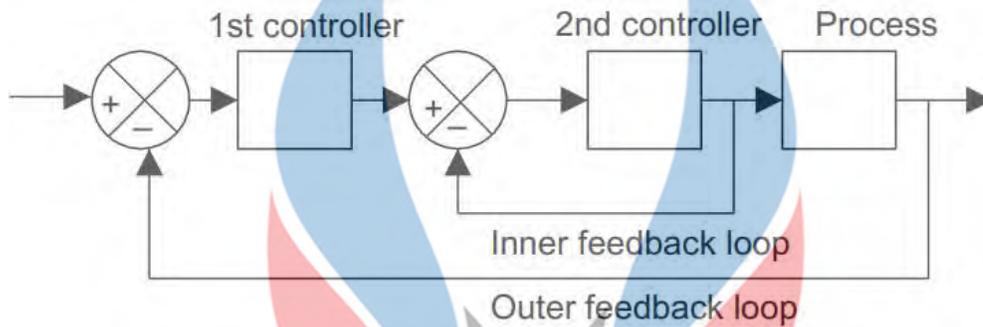


Gambar 2.8 Klasifikasi respon sistem berdasarkan redaman  
(Coughanowr, 2009)

## 2.10 Sistem Kontrol *Cascade*

Sistem pengendalian *cascade* melibatkan penggunaan dua *controller* dengan keluaran dari kontroler pertama yang nantinya akan dijadikan sebagai *set point* pada *controller* kedua seperti pada gambar 2.9. Sistem ini dapat memberikan respon yang lebih baik terhadap gangguan. Pada penggunaan sistem pengendalian *cascade*, sensor ketinggian air memberikan umpan balik pada *loop* luar yang disebut sebagai

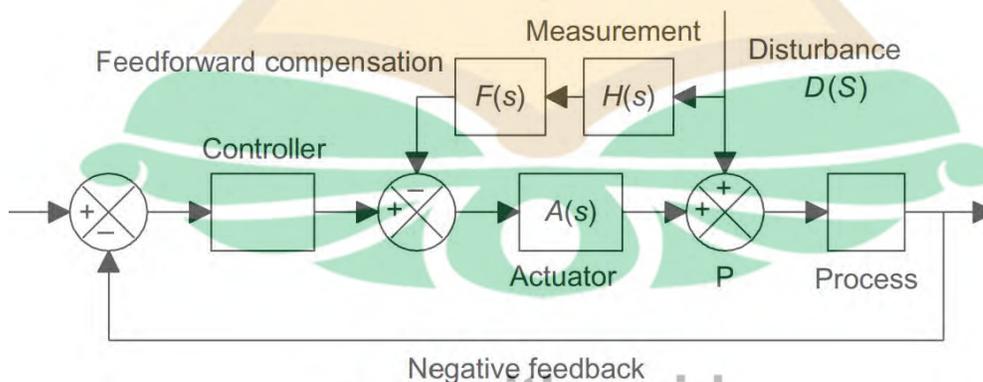
*primary loop* yang kemudian keluarannya menjadi masukan *set point* untuk *controller* kedua untuk mengontrol laju aliran cairan. Hal ini menyebabkan *primary loop* mampu merespon dengan cepat terhadap gangguan pada aliran serta mampu mengurangi fluktuasi perubahan ketinggian yang terjadi pada sistem dengan *single loop* (Bolton, 2015).



Gambar 2.9 Sistem kendali *cascade* (Bolton, 2015)

## 2.11 Sistem Pengendalian *Feed Forward*

Sistem pengendalian *close loop* dapat terjadi gangguan yang merambat melalui proses dan muncul sebagai masukan sinyal kesalahan pada *controller* sebelum suatu tindakan dapat diambil untuk memperbaiki penyimpangan dari *set point* yang terjadi. Untuk mengatasi masalah tersebut maka pengendalian *feed forward* digunakan. Gangguan akan diukur dan sinyal akan ditambahkan pada keluaran *controller* sehingga tindakan korektif dapat dimulai tanpa menunggu efek gangguan muncul terlebih dahulu pada masukan sinyal kesalahan di *controller* (Bolton, 2015).



Gambar 2.10 Sistem pengendalian menggunakan *feed forward* (Bolton, 2015)

## 2.12 Interpolasi

Suatu nilai pada tabel yang terletak di antara nilai-nilai yang tercantum maka diperlukan interpolasi. Suatu kuantitas yang dicari disimbolkan dengan variabel Y adalah fungsi dari satu variabel X dan jika diinterpolasi linier sesuai maka terdapat proporsionalitas langsung antara perbedaan yang sesuai dalam variabel Y dan X. Persamaan yang diperoleh pada proses interpolasi dipaparkan pada persamaan 2.19.

$$Y = \left( \frac{X_2 - X}{X_2 - X_1} \right) Y_1 + \left( \frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \right) Y_2 \quad (2.14)$$

(Smith, 2001)

Persamaan 2.29 diperoleh melalui tabel interpolasi seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Tabel Interpolasi

| Variabel X | Variabel M |
|------------|------------|
| X1         | Y1         |
| X          | Y          |
| X2         | Y2         |

\*) Smith, 2001

## 2.13 Transformasi Laplace

Fungsi alih dari suatu persamaan sistem linear, *time invariant* dan diferensial yang merupakan rasio dari *output* dan *input* dengan asumsi bahwa semua kondisi awal adalah nol dinyatakan dalam bentuk transformasi Laplace yang merupakan suatu metode operasional untuk menyelesaikan persamaan diferensial linier di persamaan 2.15.

$$F(s) = \mathcal{L} [f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (2.15)$$

$F(s)$  adalah simbol untuk transformasi Laplace, variabel  $s$  merupakan variabel independen kompleks waktu kontinu,  $f(t)$  adalah beberapa fungsi waktu yang ditransformasikan ke dalam bentuk Laplace, dan  $\mathcal{L}$  adalah operator yang dinyatakan sebagai integral. Tabel transformasi Laplace dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Transformasi Laplace

| $f(t)$                   | $F(s)$  |
|--------------------------|---------|
| Unit impulse $\delta(t)$ | 1       |
| Unit step $1(t)$         | $1/s$   |
| $t$                      | $1/s^2$ |

(Seborg, 2011)

Tabel 2.4 Posisi Penelitian Pengendalian *Ketinggian Air Steam Drum*

| No. | Penulis   | Tahun | Judul  | Metode                                     | Keterangan  |
|-----|---|-------|--|--|---|
| 1   | R. Manojkumar,<br>M. Aravinth, R.<br>Manikandan   | 2014  | <i>Three Element Control of<br/>Boiler Drum Using Particle<br/>Swarm Optimization<br/>Technique</i>                                | PI<br><i>tuning</i><br>PSO                 | Dari hasil penelitian, penulis tidak melakukan pemodelan matematis sistem, metode <i>tuning</i> PSO menghasilkan respon sistem dengan nilai <i>overshoot</i> yang lebih rendah dibandingkan metode Ziegler-Nichols namun metode <i>tuning</i> tersebut kurang cocok diterapkan pada sistem dengan kinerja cepat.  |
| 2   | Paisal Tajun<br>Aripin, Erna<br>Kusuma Wati,<br>V. Vekky R.<br>Repi, Hari Hadi<br>Santoso | 2017  | Rancang Bangun Sistem<br>Pengendalian <i>Level</i> pada<br><i>Knock Out Gas Drum</i><br>Menggunakan Pengendali<br>PID di Plant LNG | PID<br><i>tuning</i><br>Zigler-<br>Nichols | Dari hasil penelitian, penulis melakukan pemodelan sistem menggunakan pemodelan linearitas berdasarkan perbandingan pembacaan sensor dengan kapasitas tangki, melalui <i>tuning</i> Ziegler-Nichols pada <i>single element control</i> dengan variasi <i>set point</i> yang berbeda diperoleh respon sistem pada kontrol <i>Proportional</i> yang lebih rendah dibandingkan kontrol PID |
| 3   | Rangaswamy<br>dan<br>Vijayaragavan  | 2018  | <i>Efficient Drum Level<br/>Control for Steam</i>  | PID<br><i>tuning</i><br>Zigler-<br>Nichols | Dari hasil penelitian, penulis tidak melakukan pemodelan matematis komponen pengendalian sistem dan perbandingan respon sistem sebelum dan setelah diberikan kontroler, respon sistem setelah diberi kontroler dengan   |

| No. | Penulis                        | Tahun | Judul  | Metode                            | Keterangan   |
|-----|--------------------------------|-------|--|-----------------------------------|--|
| 4   | Muhammad Izzudin Abdillah Afif | 2019  | Perancangan Pengendalian Ketinggian Air <i>Steam Drum</i> Menggunakan PID dengan Metode <i>Tuning</i> Ziegler-Nichols di PT. Pertamina EP Aset V- <i>field</i> Sanga-Sanga | PID <i>tuning</i> Ziegler-Nichols | masing-masing jenis <i>element control</i> maka diperoleh respon sistem dengan nilai <i>rise time</i> yang semakin besar dan <i>overshoot</i> yang semakin kecil namun ketiga jenis <i>element control</i> masih memiliki respon sistem negatif melalui metode <i>tuning</i> Ziegler –Nichols. |