

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Untuk memudahkan dalam memahami cara kerja sistem yang dirancang maupun dasar - dasar perencanaan dari sistem yang dibuat, maka perlu adanya penjelasan dan uraian mengenai teori penunjang yang digunakan dalam penulisan skripsi ini.

Teori penunjang yang digunakan dalam bab ini, antara lain:

- Sistem Pengendalian dan *Loop* Pengendalian
- Sistem orde satu
- Kontrol Logika Fuzzy
- Pemanas Air (*Water Heater*)
- Sistem Termal
- Transformasi Laplace

#### 2.1. Sistem Pengendalian

Sistem pengendalian berfungsi untuk mengendalikan jalannya proses agar variabel proses yang sedang diukur dapat dikendalikan dan diatur sesuai dengan nilai yang dikehendaki (*setpoint*). Sistem pengendalian mempunyai beberapa persyaratan umum, antara lain:

- Setiap sistem pengendalian harus stabil.
- Sistem pengendalian harus mempunyai kestabilan relatif yang layak.
- Kecepatan respon harus cukup cepat dan menunjukkan peredaman yang layak.
- Suatu sistem pengendalian juga harus mampu memperkecil kesalahan sampai nol atau sampai pada suatu harga yang dapat ditoleransi.

Secara umum bentuk *loop* sistem pengendalian dibagi menjadi dua macam Sistem Pengendalian *Loop* Terbuka (*Open Loop Control System*) dan Sistem Pengendalian *Loop* Tertutup (*Close Loop Control System*).

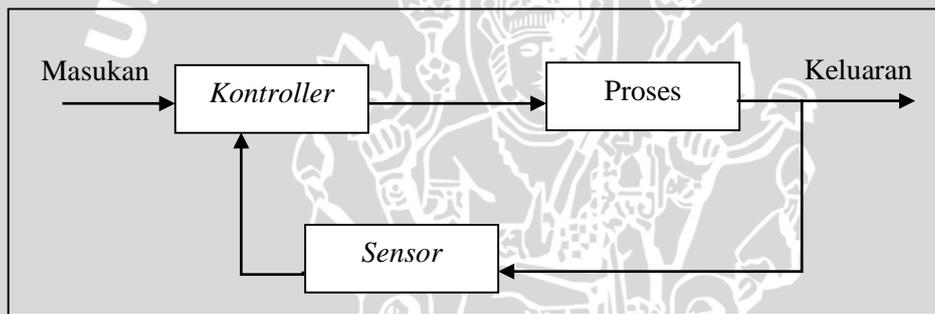
Sistem pengendalian *loop* terbuka adalah sistem pengendalian yang keluarannya tidak dapat mempengaruhi aksi dari pengendaliannya. Jadi, pada sistem ini keluaran dari kontrolernya tidak diukur atau diumpanbalikkan untuk dibandingkan dengan masukannya (K. Ogata, 1985), seperti ditampilkan dalam Gambar 2.1.



**Gambar 2.1 Blok Diagram Sistem *Loop* Terbuka**

Salah satu contoh sistem loop terbuka adalah sistem pengaturan temperatur ruangan. Untuk mendapatkan temperatur yang diinginkan, operator menggunakan pengalamannya untuk mengeset daya yang dibutuhkan sistem agar keluaran sistem yang berupa temperatur ruangan sesuai dengan temperatur ruangan yang diinginkan.

Sistem pengendalian *loop* tertutup adalah sistem pengendalian yang sinyal keluarannya mempunyai pengaruh langsung pada aksi pengendaliannya. Sinyal kesalahan yang bekerja yaitu antara sinyal masukan dan sinyal umpan balik yang disajikan ke kontroler disajikan sedemikian rupa untuk mengurangi kesalahan dan membawa keluaran sistem ke nilai yang dikehendaki. Blok diagram sistem *loop* tertutup ditampilkan dalam Gambar 2.2.



**Gambar 2.2 Blok Diagram *Loop* Tertutup**

Komponen sistem kontrol loop tertutup tersebut terdiri dari komponen-komponen sebagai berikut:

- Masukan merupakan rangsangan yang diberikan pada sistem kontrol, merupakan harga yang diinginkan bagi variabel yang dikontrol selama pengontrolan.
- Keluaran merupakan tanggapan pada sistem kontrol, merupakan harga yang akan dipertahankan bagi variabel yang dikontrol, dan merupakan harga yang ditunjukkan oleh alat pencatat.
- Proses merupakan sesuatu operasi yang dikontrol berlangsung secara kontinyu ditandai oleh suatu deretan perubahan kecil yang menuju ke suatu hasil atau keadaan akhir tertentu.

- *Kontroller* merupakan peralatan/rangkaian untuk mengontrol beban (sistem). Alat ini bisa digabung dengan penguat.
- *Sensor* merupakan alat pendeteksi kesalahan yang menunjukkan selisih antara masukan dan respons melalui umpan balik (*feedback path*).

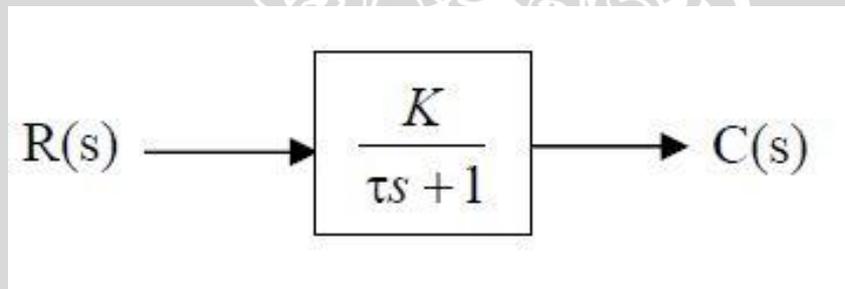
Contohnya *thermostat* pada ruangan untuk menjalankan atau mematikan alat pemanas atau pendingin agar suhu tetap nyaman. Biasanya berupa pengukur tidak langsung seperti pengukur *level* dengan radar dan ultrasonik. (W. Bolton, 2006: 290).

## 2.2. Sistem orde satu

Fungsi alih dari suatu sistem orde satu secara umum dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.1)$$

Dengan  $R(s)$  adalah fungsi masukan dan  $C(s)$  adalah fungsi keluaran. Seperti yang terlihat dalam diagram blok sistem orde satu Gambar 2.3 berikut ini, hubungan masukan dan keluaran sistem dari diagram tersebut dapat dinyatakan dengan:

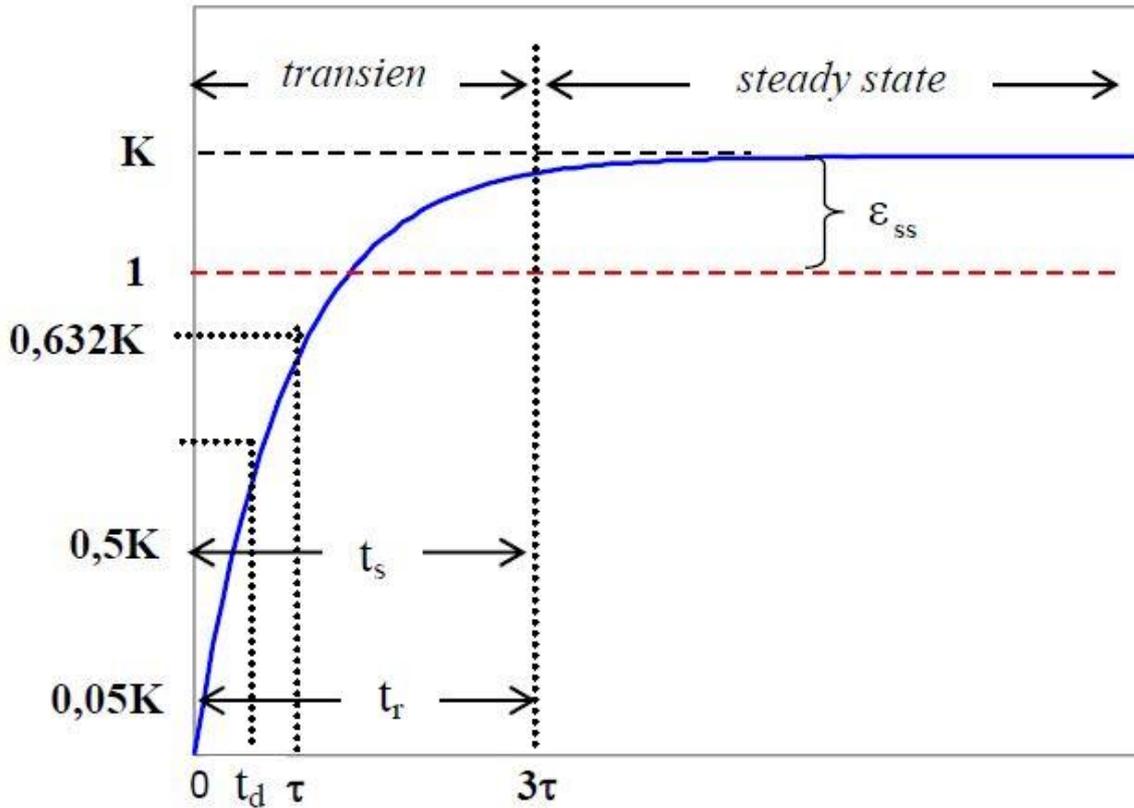


**Gambar 2.3.** Block Diagram Sistem Orde Satu

*Offset* adalah *error* sistem pada keadaan *steady state* atau juga sering disebut *error steady state* (*ess*). Untuk mencari besarnya *error steady state* pada sistem orde pertama menggunakan persamaan:

$$ess = \left| \frac{\text{Set Point} - \text{Keluaran}}{\text{Set Point}} \right| \times 100\% \quad (2.2)$$

Salah satu contoh kurva respon keluaran sistem orde satu dengan karakteristik dari fungsi masukan yang berupa fungsi tangga satuan (*step*) adalah seperti Gambar 2.4.



**Gambar 2.4.** Kurva Respon Keluaran Sistem Orde Satu

Karakteristik Sistem Orde Satu yang dapat dilihat pada Gambar 2.4. adalah sebagai berikut:

1. *Settling Time* ( $t_s$ )

Ukuran waktu yang menyatakan respon sistem telah masuk pada daerah stabil.

2. *Rise Time* ( $t_r$ )

Ukuran waktu yang menyatakan respon sistem telah naik dari 5% ke 95% atau 100% ke 90% dari nilai respon pada keadaan *steady state*.

3. *Delay Time* ( $t_d$ )

Ukuran waktu yang dibutuhkan respon mulai  $t=0$  sampai respon mencapai 50% dari nilai pada keadaan *steady state*. Waktu tunda menyatakan besarnya faktor keterlambatan respon akibat proses *sampling*.

### 2.3. Logika Fuzzy

*Fuzzy* secara harfiah berarti samar, sedangkan kebalikannya dalam hal ini adalah *Crisp* yang secara harfiah berarti tegas. Dalam kehidupan sehari-hari nilai samar lebih akrab

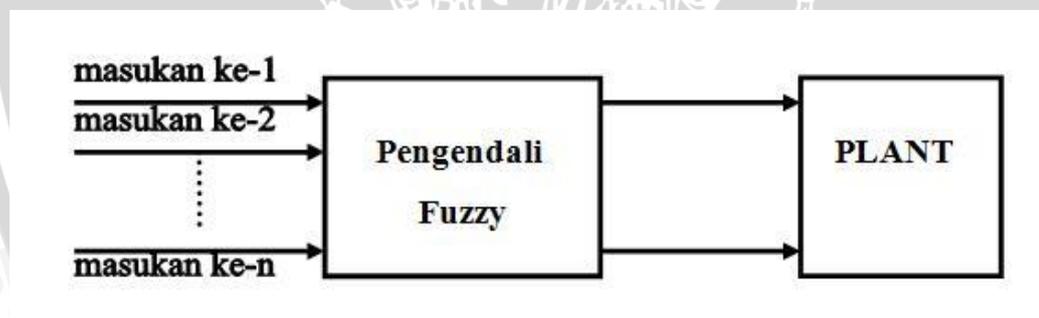
daripada nilai tegas. Temperatur tertentu biasa dinyatakan sebagai panas, agak panas, atau sangat dingin daripada dinyatakan dalam nilai terukur tertentu.

Tahun 1965 L.A. Zadeh memodifikasi teori himpunan yang disebut himpunan kabur (*fuzzy Set*). Himpunan *fuzzy* di dasarkan pada gagasan untuk memperluas jangkauan fungsi karakteristik sehingga fungsi tersebut akan mencakup bilangan real pada interval  $[0,1]$ . Nilai keanggotaannya menunjukkan bahwa suatu nilai dalam semesta pembicaraan tidak hanya berada pada 0 atau 1, namun juga nilai yang terletak diantaranya. Dengan kata lain nilai kebenaran suatu hal tidak hanya bernilai benar atau salah. Nilai 0 menunjukkan salah, nilai 1 menunjukkan benar dan masih ada nilai-nilai yang terletak diantaranya.

Sejak tahun 1982 pengendalian berbasis logika *fuzzy* mengalami perkembangan pesat, terutama dalam hubungannya dengan penyelesaian masalah kendali yang bersifat tak linier, sulit dimodelkan, berubah karakteristiknya terhadap waktu (*time varying*) dan kompleks (Sivanandam, 2006).

### 2.3.1. Struktur Dasar Kontrol Logika Fuzzy

Dalam sistem pengendalian dengan logika *fuzzy* dilibatkan suatu blok pengendali yang menerima satu atau lebih masukan dan mengumpangkan satu atau lebih keluaran ke plant atau blok lain sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Pengendali Fuzzy

Sumber : Coughanowr,1991

Komponen utama penyusun kontrol logika *fuzzy* adalah unit fuzzifikasi, *fuzzy inference*, dan unit defuzzifikasi. Basis pengetahuan terdiri dari dua jenis (Yan, 1994).

### 2.3.2. Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan menotasikan nilai kebenaran anggota-anggota himpunan *fuzzy*. Interval nilai yang digunakan untuk menentukan fungsi keanggotaan, yaitu nol dan satu. Tiap fungsi keanggotaan memetakan elemen himpunan *crisp* ke semesta himpunan *fuzzy*.

Suatu himpunan *fuzzy*  $A$  dalam semesta pembicaraan  $U$  dinyatakan dengan fungsi keanggotaan,  $\mu_A$  yang harganya berada dalam interval  $[0,1]$ . Secara matematika hal ini dinyatakan dengan :

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1]$$

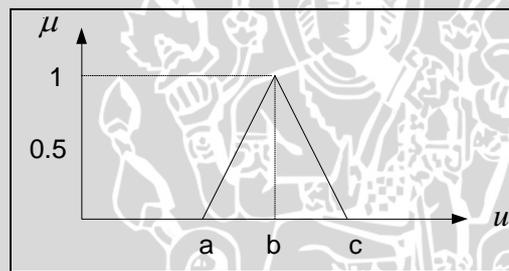
(Kuswadi, 2000)

- Fungsi keanggotaan bentuk Triangular

Definisi fungsi triangular sebagai berikut:

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b} & b \leq u \leq c \\ 0 & u > c \end{cases} \quad (2.3)$$

Fungsi keanggotaan bentuk Triangular ditunjukkan dalam Gambar 2.6.



**Gambar 2.6.** Fungsi Keanggotaan Bentuk Triangular

Sumber : Yan, 1994

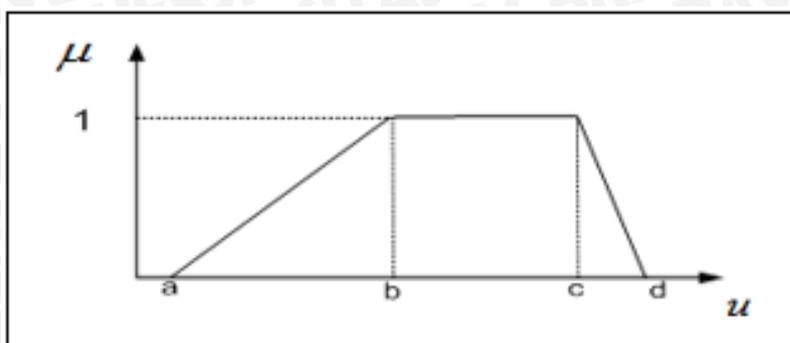
Fungsi keanggotaan bentuk triangular ini digunakan bila diinginkan himpunan *fuzzy* mempunyai nilai proporsional terhadap nol maupun satu.

- Fungsi keanggotaan bentuk Trapezium

Definisi fungsi trapesium sebagai berikut :

$$T(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ 1 & b \leq u \leq c \\ \frac{d-u}{d-c} & c \leq u \leq d \\ 0 & d \leq u \end{cases} \quad (2.4)$$

Fungsi keanggotaan bentuk Trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7.** Fungsi Keanggotaan Bentuk Trapesium

Sumber : Yan, 1994

### 2.3.3. Kontroler Logika Fuzzy

Kontroler logika *fuzzy* adalah sistem berbasis aturan (*rule based system*) yang didalamnya terdapat himpunan aturan *fuzzy* yang mempresentasikan mekanisme pengambilan keputusan. Aturan yang dibuat digunakan untuk memetakan variabel *input* ke variabel output dengan pernyataan *If - Then*.

Kontroler ini akan menggunakan data tertentu (*crisp*) dari sejumlah sensor kemudian mengubahnya menjadi bentuk linguistik atau fungsi keanggotaan melalui proses fuzzifikasi. Lalu dengan aturan *fuzzy*, *inference engine* yang akan menentukan hasil keluaran *fuzzy*. Setelah itu hasil ini akan diubah kembali menjadi bentuk numerik melalui proses defuzzifikasi.

#### 2.3.3.1. Fuzzifikasi

Proses fuzzifikasi merupakan proses untuk mengubah variabel non *fuzzy* (variabel numerik) menjadi variabel *fuzzy* (variabel linguistik). Nilai masukan-masukan yang masih dalam bentuk variabel numerik yang telah dikuantisasi sebelum diolah oleh pengendali logika *fuzzy* harus diubah terlebih dahulu ke dalam variabel *fuzzy*. Melalui fungsi keanggotaan yang telah disusun, maka dari nilai-nilai masukan tersebut menjadi informasi *fuzzy* yang berguna nantinya untuk proses pengolahan secara *fuzzy* pula. Proses ini disebut fuzzifikasi (Yan,1994). Proses fuzzifikasi diekspresikan sebagai berikut:

$$x = \text{fuzzifier}(x_0)$$

dengan:

$$x_0 = \text{nilai } \textit{crisp} \text{ variabel masukan}$$

$x$  = himpunan *fuzzy* variabel yang terdefinisi  
*fuzzifier* = operator fuzzifikasi yang memetakan himpunan *crisp* ke himpunan *fuzzy*

Pedoman memilih fungsi keanggotaan untuk proses fuzzifikasi, menurut Jun Yan, menggunakan :

1. Himpunan *fuzzy* dengan distribusi simetris.
2. Gunakan himpunan *fuzzy* dengan jumlah ganjil, berkaitan erat dengan jumlah kaidah (*rules*).
3. Mengatur himpunan *fuzzy* agar saling menumpuk.
4. Menggunakan fungsi keanggotaan bentuk segitiga atau trapesium.

### 2.3.3.2. Kaidah Aturan Fuzzy (*Fuzzy Rule*)

*Fuzzy rule* adalah bagian yang menggambarkan dinamika suatu sistem terhadap masukan yang dikarakteristikan oleh sekumpulan variabel-variabel linguistik dan berbasis pengetahuan seorang operator ahli. Pernyataan tersebut umumnya dinyatakan oleh suatu pernyataan bersyarat.

Dalam pengendali berbasis *fuzzy*, aturan pengendalian *fuzzy* berbentuk aturan “IF – THEN”. Untuk sebuah sistem *Multi Input Single Output* (MISO) basis aturan pengendalian *fuzzy* berbentuk seperti berikut ini,

Rule 1 IF X is  $A_1$  AND Y is  $B_1$  THEN Z is  $C_1$

Rule 2 IF X is  $A_2$  AND Y is  $B_2$  THEN Z is  $C_2$

⋮  
 ⋮  
 ⋮

Rule n IF X is  $A_n$  AND Y is  $B_n$  THEN Z is  $C_n$

Dengan X, Y, Z merupakan variabel linguistik, dimana X dan Y merupakan variabel masukan, dan Z merupakan variabel keluaran sistem.  $A_n$ ,  $B_n$ , dan  $C_n$  merupakan nilai linguistik dari X, Y, dan Z (Lee, 1990).

### 2.3.3.3. Metode Inferensi MAX-MIN

Metode inferensi merupakan proses untuk mendapatkan keluaran dari suatu kondisi masukan dengan mengikuti aturan-aturan yang telah ditetapkan. Keputusan yang didapatkan pada proses ini masih dalam bentuk *fuzzy* yaitu derajat keanggotaan keluaran.

Pada metode Max–Min aturan operasi minimum Mamdani digunakan untuk implikasi *fuzzy*. Persamaan aturan minimum adalah

$$\mu_{C_i} = \bigcup_1^n \alpha_i \wedge \mu_{C_i} \tag{2.5}$$

dengan  $\alpha_i = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0)$

Sebagai contoh , terdapat dua basis kaidah atur *fuzzy*, yaitu :

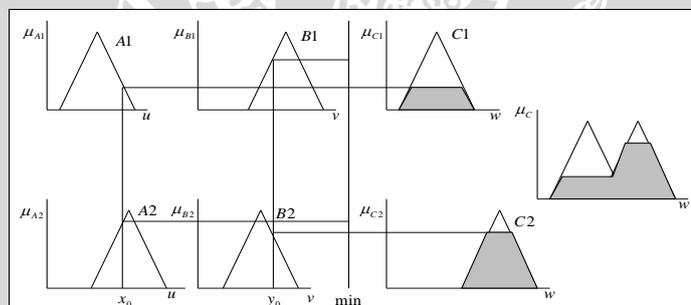
R<sub>1</sub> : Jika x adalah A<sub>1</sub> dan y adalah B<sub>1</sub> maka z adalah C<sub>1</sub>

R<sub>2</sub> : Jika x adalah A<sub>2</sub> dan y adalah B<sub>2</sub> maka z adalah C<sub>2</sub>

Pada metode penalaran MAX-MIN fungsi keanggotaan konsekuen dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned} \mu_{C_1}(W) &= \mu_{c_1} \vee \mu_{c_2} = [\alpha_1 \wedge \mu_{c_1}(w)] \vee [\alpha_2 \wedge \mu_{c_2}(w)] \\ \alpha_1 &= \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0) \\ \alpha_2 &= \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0) \end{aligned} \tag{2.6}$$

Lebih jelas metode ini dideskripsikan dalam Gambar 2.8.



**Gambar 2.8.** Inferensi Fuzzy dengan Metode MAX-MIN

Sumber : Yan, 1994

**2.3.3.4. Metode Defuzzifikasi Center Of Gravity (COG)**

Defuzzifikasi adalah proses untuk mendapatkan nilai numerik dari data *fuzzy* yang dihasilkan dari proses inferensi (Yan, 1994). Proses defuzzifikasi dinyatakan sebagai berikut:

$$y_0 = defuzzifier(y) \tag{2.7}$$

dengan:

y : aksi kontrol *fuzzy*



$y_0$  : aksi kontrol *crisp*  
*defuzzifier* : operator defuzzifikasi

Metode (*Center Of Gravity*)

Metode ini didefinisikan sebagai berikut:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n w_i u_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2.8)$$

Dengan:

$U$  : Keluaran

$w_i$  : Bobot nilai benar  $w_i$

$u_i$  : Nilai linguistik pada fungsi keanggotaan keluaran

$n$  : Banyak derajat keanggotaan

#### 2.4. Pemanas Air (*Water Heater*)

Pemanas air adalah alat yang digunakan untuk memanaskan air yang menggunakan energi sebagai sumber pemanas. Pada tahun 1868 seorang pelukis asal London, Inggris, Benjamin Waddy Maughan menemukan pemanas air domestik instan pertama. Cara kerja alat ini sederhana air dingin ditempatkan dibagian atas wadah berupa tabung yang juga diisi jaringan kawat-kawat tipis sebagai pengantar panas, dimana bagian bawahnya diletakkan sebuah alat pemanas berbahan bakar gas. Lalu air panas mengalir ke bak mandi tanpa ada perantara.

Pemanas air sudah semakin berkembang dan sudah banyak sekali sistem yang digunakan. Jenis-jenis pemanas air yang beredar di masyarakat salah satunya pemanas air listrik. Seperti namanya pemanas air ini menggunakan listrik sebagai energi utama untuk memanaskan air. Pemanas air listrik terdiri dari 2 ( dua ) tipe yaitu pemanas air listrik instan dan pemanas air listrik dengan penampungan dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9.** Pemanas Air Listrik dengan Penampung

### 2.5. Sistem Termal

Sistem thermal merupakan sistem yang melibatkan pemindahan panas dari bahan yang satu ke bahan yang lain. Sistem thermal dapat dianalisa dalam bentuk tahanan dan kapasitansi, meskipun kapasitansi thermal dan tahanan thermal tidak dapat digambarkan secara tepat sebagai parameter yang bulat, karena sebenarnya mereka terdistribusi di seluruh bahan yang bersangkutan.

Perpindahan panas dari suatu bahan ke bahan yang lain dibedakan menjadi tiga cara yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Untuk perpindahan panas secara konduksi atau konveksi, besarnya aliran arus panas adalah: (K. Ogata, 1985)

$$q = K \cdot \Delta\theta \quad (2.9)$$

Dimana:

$q$  = laju arus panas, kcal/det

$\Delta\theta$  = perbedaan temperatur, °C

$K$  = koefisien, kcal/det °C

Untuk perpindahan panas secara konduksi, besarnya koefisien  $K$  adalah:

$$K = \frac{kA}{\Delta X} \quad (2.10)$$

Untuk perpindahan panas secara konveksi, besarnya koefisien  $K$  adalah:

$$K = HA \quad (2.11)$$

Dimana:

$k$  : konduktivitas thermal, kcal/m det °C

$A$  : luas daerah normal terhadap arus panas, m<sup>2</sup>

$\Delta X$  : ketebalan konduktor, m<sup>2</sup>

$H$  : koefisien konveksi, kcal/m<sup>2</sup> det °C

Tahanan thermal  $R$  untuk perpindahan panas antara dua bahan dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$R = \frac{\text{perubahan beda temperature, } ^\circ\text{C}}{\text{perubahan laju aliran kalor, } W} \quad (2.12)$$

Untuk perpindahan panas secara konduksi atau konveksi, besarnya tahanan thermal adalah:

$$R = \frac{d(\Delta\theta)}{dq} = \frac{1}{K} \quad (2.13)$$

$$R = \frac{1}{Gc} \quad (2.14)$$

Dimana:

$G$  : Laju aliran cairan keadaan stabil, M<sup>3</sup>/ det.

$c$  : Kalor jenis zat, J / °C N.

Dengan Kapasitas Termal ( $C$ ) didefinisikan oleh:

$$C = \frac{\text{perubahan kalor yang tersimpan, } J}{\text{perubahan temperatur, } ^\circ\text{C}} \quad (2.15)$$

$$C = W c$$

Dimana:

$W$  : Berat zat yang ditinjau, N

$c$  : kalor jenis zat, J / °C N

Untuk laju air ( $G$ ) di dalam tabung yang hanya dipengaruhi gravitasi bumi dapat digunakan rumus dengan  $G = \sqrt{2gh}$ . Untuk  $g$  adalah percepatan gravitasi bumi dengan nilai 9.8 m/s<sup>2</sup> dan  $h$  adalah tinggi dari tangki air dengan satuan meter. (Tipler, Paul A, 1991)

## 2.6. Transformasi Laplace

Transformasi Laplace merupakan metode operasional yang dapat digunakan secara mudah untuk menyelesaikan persamaan diferensial linier.

Transformasi tersebut dapat mengubah beberapa fungsi umum seperti sinusoida, sinusoida teredam dan fungsi eksponensial menjadi fungsi aljabar kompleks.

Penggunaan Transformasi Laplace ini memungkinkan penggunaan teknik grafis untuk meramal kinerja sistem. Keuntungan lain penggunaan Transformasi Laplace adalah diperolehnya secara serentak baik komponen peralihan maupun komponen keadaan mantap (*steady state*) jawaban persamaan pada waktu menyelesaikan persamaan deferensial

$$F(s) = \mathcal{L}[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (2.16)$$

dengan:

$F(s)$  = Transformasi Laplace dari  $f(t)$ .

$f(t)$  = fungsi waktu  $t$  sedemikian rupa sehingga  $f(t) = 0$  untuk  $t < 0$

$s$  = variabel kompleks ( $s = \sigma + j\omega$ ).

$\mathcal{L}$  = simbol operasional yang menunjukkan bahwa besaran setelah simbol tersebut ditransformasi dengan integral

$$\text{Laplace} : \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt .$$

Sebagai contoh pemakaian Transformasi Laplace dalam Diferensiasi (transformasi fungsi turunan) dapat dilihat dari persamaan berikut:

$$\mathcal{L}\left[\frac{d f(t)}{dt}\right] = s F(s) - f(0) \quad (2.17)$$

dimana  $f(0)$  merupakan harga  $f(t)$  untuk  $t = 0$ .

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^2 f(t)}{dt^2}\right] = s^2 F(s) - s f(0) - \frac{d}{dt} f(0) \quad (2.18)$$

sedangkan Transformasi Laplace turunan ke- $n$  adalah sebagai berikut

$$\mathcal{L}\left[\frac{d^n f(t)}{dt^n}\right] = s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - s^{n-2}f'(0) - \dots - \frac{d^{n-2}}{dt^{n-2}} f(0) - \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} f(0) \quad (2.19)$$