

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Pengendalian**

Secara umum sistem pengendalian adalah susunan komponen-komponen fisik yang dirakit sedemikian rupa sehingga mampu mengatur sistemnya sendiri atau sistem diluarnya. Sistem kontrol adalah proses pengaturan atau pengendalian terhadap satu atau beberapa besaran (variabel, parameter) sehingga berada pada suatu harga range tertentu. Istilah lain sistem kontrol atau teknik kendali adalah teknik pengaturan, sistem pengendalian, atau sistem pengontrolan (Pakpahan, 1988). Sistem pengendalian atau teknik pengaturan juga dapat didefinisikan suatu usaha atau perlakuan terhadap suatu sistem dengan masukan tertentu guna mendapatkan keluaran sesuai yang diinginkan. Dalam buku berjudul "Modern Control Systems", bahwa sistem pengaturan merupakan hubungan timbal balik antara komponen-komponen yang membentuk suatu konfigurasi sistem yang memberikan suatu hasil yang dikehendaki berupa respon (Dorf, 1983).

Contoh sistem pengaturan yang paling mendasar adalah kendali on-off saklar listrik. Aktivitas menghidupkan dan mematikan saklar menyebabkan adanya situasi saklar hidup atau mati. Masukan on atau off mengakibatkan terjadinya proses pada suatu pengendalian saklar listrik sehingga sistem bekerja sesuai dengan kondisi yang diinginkan, yaitu listrik menyala atau mati. Keadaan on-off (hidup atau mati) merupakan masukan, sedangkan mengalir dan tidak mengalirnya listrik merupakan keluaran. Suatu keadaan dimana listrik sudah dihidupkan namun tidak menyala, berarti ada yang salah pada sistem tersebut.

Proses yang dicontohkan itu mengilustrasikan sistem kendali yang terjadi secara manual.

Secara umum ada empat aspek yang berkaitan dengan sistem pengendalian yaitu masukan, keluaran, sistem dan proses. Masukan (input) adalah rangsangan dari luar yang diterapkan ke sebuah sistem kendali untuk memperoleh tanggapan tertentu dari sistem pengaturan. Keluaran (output) adalah tanggapan sebenarnya yang didapatkan dari suatu sistem kendali. Tanggapan ini bisa sama dengan masukan atau mungkin juga tidak sama dengan tanggapan pada masukannya. Untuk menggambarkan sistem pengendalian, kita bisa lustrasikan dengan sebuah perangkat yang sering dikenal dalam kehidupan sehari-hari yaitu "sekering". Sekering merupakan alat yang dipergunakan untuk memutus arus listrik dan biasanya dipasang pada instalasi listrik PLN atau perangkat elektronik. Sekering akan putus apabila diberi beban arus listrik yang berlebihan, dan akibatnya lampu akan padam. Fenomena ini menunjukkan bahwa sebenarnya terjadi pengukuran terhadap aliran listrik, membandingkan terhadap kapasitas maksimal, dan selanjutnya melakukan langkah koreksi dengan cara memutus arus. Proses yang dicontohkan itu menggambarkan sistem kendali yang terjadi secara otomatis.

Menurut Distefano,dkk(1992), ada tiga jenis sistem pengaturan dasar yakni :

#### 1. Pengendalian Alamiah

Contohnya pengendalian suhu tubuh manusia, mekanisme buka-tutup pada jantung, sistem peredaran darah, sistem syaraf, sistem kendali pankreas dan kadar gula dalam darah, sistem pengaturan adrenalin, dan sistem kendali lainnya yang ada pada makhluk hidup.

## 2. Pengendalian Buatan

Contohnya yaitu mekanisme on-off pada saklar listrik, mekanisme buka-tutup pada keran air, sistem kontrol untuk menghidupkan dan mematikan televisi/radio/tape, kendali pada mainan anak-anak, pengaturan pada kendali suhu ruangan ber-AC, serta kendali perangkat elektronik seperti pada kulkas, freezer dan mesin cuci.

## 3. Sistem Kendali yang komponennya buatan dan alamiah

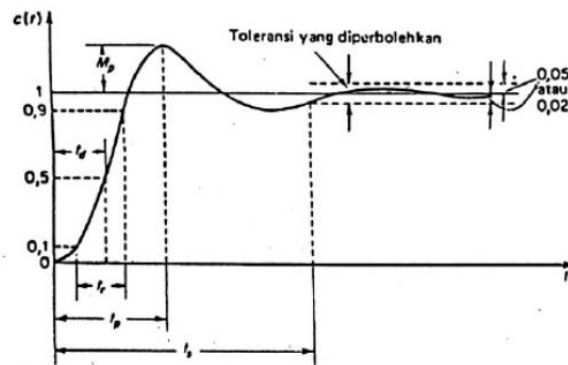
Contohnya adalah pengendalian ketika orang mengendarai sepeda, motor atau mobil. Pengendara senantiasa mempergunakan matanya sebagai komponen alamiah untuk mengamati keadaan, disamping itu pengendara juga mengatur kecepatan berkendara dengan mengatur putaran mesinnya yang merupakan komponen buatan.

## 2.2 Sistem Pengendalian Proses

Sistem pengendalian proses adalah gabungan kerja dari alat-alat pengendalian otomatis. Semua peralatan yang membentuk sistem pengendalian disebut instrumentasi pengendalian proses. Dalam bidang ini, pengendalian proses diterapkan pada reaktor, penukar panas (*heat exchanger*), kolom pemisahan (misalnya distilasi, absorpsi, ekstraksi), tangki penampung cairan, aliran fluida, dan masih banyak lagi. (Arfy Sasmita, 2010)

Tujuan utama dari suatu sistem pengendalian adalah untuk mendapatkan kerja yang optimal pada suatu sistem yang dirancang. Untuk mengukur performansi dalam pengaturan, biasanya diekspresikan dengan ukuran-ukuran waktu naik ( $t_r$ ), waktu puncak ( $t_p$ ), settling time ( $t_s$ ), maximum overshoot ( $M_p$ ), waktu tunda/delay time ( $t_d$ ), nilai error, dan ratio. Nilai tersebut bisa diamati pada

respon transien dari suatu sistem pengendalian, misal pada gambar 1. Dalam optimisasi agar mencapai target optimal sesuai yang dikehendaki, maka sistem kontrol berfungsi : melakukan pengukuran (measurement), membandingkan (comparison), pencatatan dan penghitungan (computation) dan perbaikan (correction).

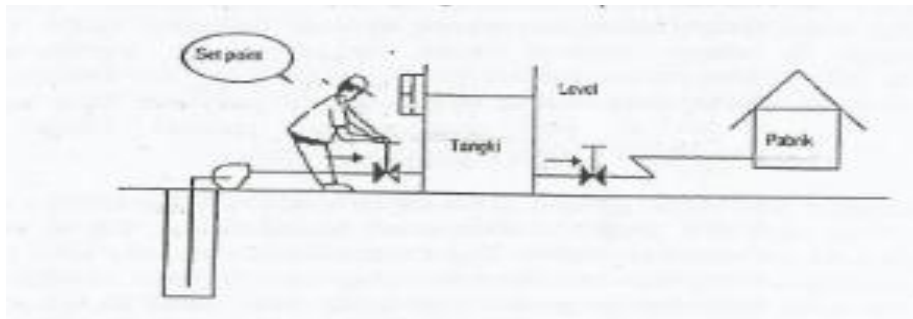


Gambar 1. Respon Transien Sistem Pengendalian  
(Marwan Effendy, 2011)

Alat pengendalian yang umum digunakan adalah Programmable Logic Controller (PLC). Alat ini digunakan untuk membaca input analog maupun digital, melakukan serangkaian program logika, dan menghasilkan serangkaian output analog maupun digital. Pada kasus sistem pengaturan temperatur, temperatur ruangan menjadi input bagi PLC. Pernyataan-pernyataan logis akan membandingkan setpoint dengan masukan nilai temperatur dan menentukan apakah perlu dilakukan penambahan atau pengurangan pendinginan untuk menjaga temperatur agar tetap konstan. Output dari PLC akan memperbesar atau memperkecil aliran keluaran udara pendingin bergantung pada kebutuhan. Untuk suatu sistem pengendalian yang kompleks, perlu digunakan sistem pengendalian yang lebih kompleks daripada PLC. Contoh dari sistem ini adalah Distributed Control System (DCS) atau sistem SCADA.

### 2.3 Prinsip-prinsip Pengendalian Proses

Perhatikan gambar berikut, pertama operator harus mengamati ketinggian *level*, kemudian mengevaluasi apakah *level* yang ada sudah seperti yang dikehendaki. Jika *level* tidak sama dengan yang dikehendakinya, maka operator harus memperkirakan seberapa banyak *valve* perlu ditutup atau perlu dibuka. Selanjutnya, operator harus benar-benar mengubah bukaan *valve* sesuai dengan yang diperkirakan tadi.



Gambar 2. Pengendalian *Level* Di Dalam Tangki Oleh Manusia (Frans Gunterus, 1994)

Prinsip pengendalian proses, jika dikaji lebih jauh lagi, dalam mengendalikan proses operator mengerjakan empat langkah berikut:

Mengukur – Membandingkan – Menghitung – Mengoreksi

Saat operator mengamati ketinggian *level*, yang ia kerjakan sebenarnya adalah langkah **mengukur** proses variabel. Istilah *process variable* pertama kali diperkenalkan sebagai besaran parameter proses yang dikendalikan. Kemudian operator **membandingkan** apakah hasil pengukuran tadi sesuai dengan apa yang dikendalikan. Besar *process variable* yang dikehendaki tadi disebut *set point*. Pada contoh ini, jika *level* di tangki dikehendaki selalu 50%, *set point* di dalam sistem pengendalian ini besarnya 50%. Perbedaan antara *process variable* dan *set point* disebut *error*.

$$\text{Error} = \text{set point} - \text{process variable}$$

*Process variable* bisa lebih besar atau bisa juga lebih kecil daripada *set point*. Oleh karena itu, *error* bisa negatif bisa juga positif. Berdasarkan besarnya *error* itulah, operator menentukan ke arah mana dan seberapa besar koreksi bukaan *valve* perlu dilakukan. Bila *error* bernilai negatif (berarti *process variable* lebih besar dari *set point* atau level lebih tinggi dari 50%) operator harus mengurangi *flow* dengan lebih menutup *valve*. Sebaliknya, bila *error* positif (berarti *process variable* lebih kecil dari *set point* atau level di bawah 50%) operator harus menambah *flow* dengan lebih membuka *valve*.

Seorang operator yang berpengalaman tidak akan sembarang membuka atau menutup *valve*. Ia juga akan memperkirakan seberapa banyak *valve* perlu lebih dibuka atau lebih ditutup. Pada tahapan itu, operator sebenarnya sedang melakukan langkah **menghitung**. Langkah berikutnya yang perlu dikerjakan oleh operator adalah mengubah bukaan *valve* sesuai dengan hasil perbandingan dan perhitungan tadi. Langkah terakhir inilah yang disebut dengan langkah **mengoreksi**.

Keempat langkah tersebut yang dilakukan oleh operator yaitu; mengukur, membandingkan, menghitung dan mengoreksi, seluruhnya dapat dikerjakan oleh instrumentasi. Manusia, kemudian sama sekali tidak menentukan keempat langkah tadi. Operator hanya perlu menentukan besarnya *set point*, dan semuanya akan dikerjakan secara otomatis oleh instrumen. Sistem semacam itulah yang disebut sistem pengendalian otomatis (*automatic control system*). (Frans Gunterus, 1994)

## **2.4 Parameter-parameter yang dikendalikan**

Ada banyak parameter yang harus dikendalikan di dalam suatu proses diantaranya yang paling umum ada empat yaitu :

1. Tekanan (pressure) di dalam suatu pipa/vessel,
2. Laju aliran (flow) didalam pipa
3. Temperatur di unit proses penukar kalor (heat exchanger), dan
4. Level permukaan cairan di sebuah tangki.

Disamping dari keempat tersebut diatas, parameter lain yang dianggap penting dan perlu dikendalikan karena keperluan spesifik proses diantaranya pH di industri kimia, warna produk di industri pencairan gas (LNG). Apabila yang dikendalikan pada sistem pengaturan adalah tekanan pada proses pembakaran di ruang bakar, maka sistem pengendaliannya disebut sistem kendali tekanan pembakaran di ruang bakar. Jika yang dikendalikan adalah temperatur pada sebuah alat penukar kalor, maka sistem pengendaliannya disebut sistem kendali temperatur alat penukar kalor. Apabila yang dikontrol adalah level fluida pada bejana tekan suatu industri perminyakan, maka system kontrolnya dinamakan sistem kendali level cairan. Hal ini perlu dimengerti karena terkadang orang salah dalam penggunaan suatu kalimat, misalnya sistem kendali pesawat terbang. Pernyataan ini akan lebih lengkap jika diketahui variabel yang dikendalikan pada pesawat tersebut, apakah kecepatan terbang pesawat, ketinggian terbang, gerak rolling atau gerak pitching.

## **2.5 Laju Alir Fluida**

Fluida adalah suatu zat yang bisa mengalami perubahan-perubahan bentuknya secara *continue*/terus-menerus bila terkena tekanan/gaya geser walaupun relatif kecil atau bisa juga dikatakan suatu zat yang mengalir, kata fluida mencakup zat cair, gas, air, dan udara karena zat-zat ini dapat mengalir. Sebaliknya batu dan benda-benda keras (seluruh zat-zat padat tidak dapat

dikategorikan sebagai fluida karena zat-zat tersebut tidak bisa mengalir secara *continue* (Irma Suryani, 2013).

Laju alir adalah banyaknya zat yang mengalir dengan kecepatan tertentu persatuan waktu. Laju alir suatu fluida dapat dibedakan ke dalam 3 macam pola aliran, yaitu aliran laminar, aliran turbulen dan aliran dari campuran keduanya (transisi).

### 2.5.1 Aliran Laminar

Aliran dengan fluida yang bergerak dalam lapisan – lapisan, atau lamina – lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Dalam aliran laminar ini viskositas berfungsi untuk meredam kecendrungan terjadinya gerakan relative antara lapisan. Sehingga aliran laminar memenuhi hukum viskositas Newton yaitu :

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

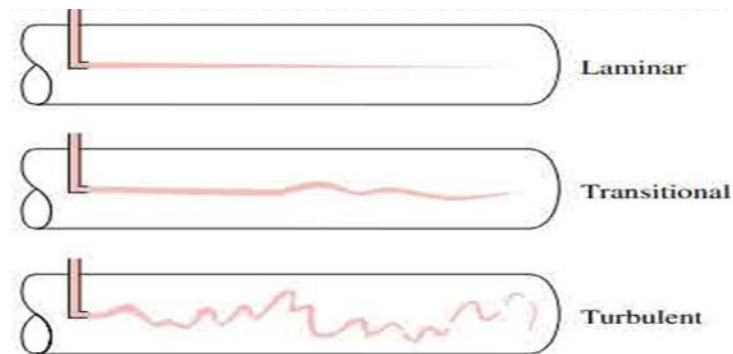
### 2.5.2 Aliran Turbulen

Aliran dimana pergerakan dari partikel – partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida kebagian fluida yang lain dalam skala yang besar. Dalam keadaan aliran turbulen maka turbulensi yang terjadi membangkitkan tegangan geser yang merata diseluruh fluida sehingga menghasilkan kerugian – kerugian aliran.

### 2.5.3 Aliran Transisi

Aliran transisi merupakan aliran peralihan dari aliran laminar ke aliran turbulen.





Gambar 3. Pola Aliran Fluida  
(Ilham Khoir, 2014)

## 2.6 Hukum Bernouli

Hukum Bernouli dapat di contohkan pada sebuah pipa, jika terdapat aliran fluida pada suatu pipa yang luas penampang dan ketinggiannya tidak sama. Misalnya, massa jenis fluida  $\rho$ , kecepatan fluida pada penampang A1 sebesar  $V_1$ , dalam waktu  $t$  panjang bagian system yang bergerak ke kanan  $V_1 \cdot t$ . Pada penampang A2 kecepatan  $V_2$  dan dalam waktu  $t$  system yang bergerak ke kanan  $v_2 \cdot t$ .

Pada penampang A1 fluida mendapat tekanan  $P_1$  dari fluida di kirinya dan pada penampang A2 mendapat tekanan : dari fluida di kananya. Gaya pada A1 adalah  $F_1 = P_1 \cdot A_1$  dan penampang A2 adalah  $F_2 = P_2 \cdot A_2$ .

Dan dapat dirumuskan

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{konstan}$$

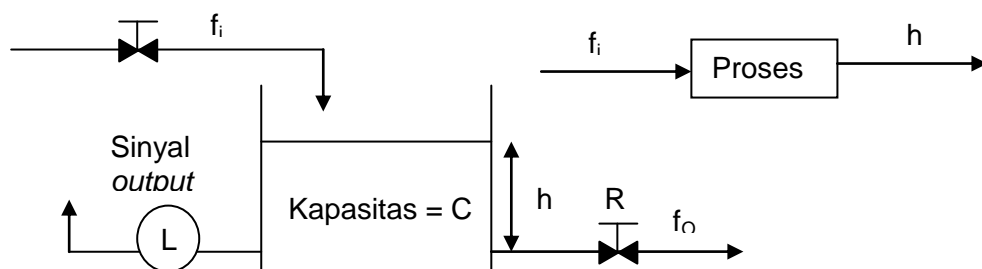
Rumus di atas dinamakan persamaan Bernouli untuk aliran fluida yang tidak kompresibel. Persamaan tersebut pertama kali diajukan oleh Daniel Bernouli dalam teorinya *Hidrodinamika*.

Hukum Bernoulli menyatakan bahwa tekanan dari fluida yang bergerak seperti udara berkurang ketika fluida tersebut bergerak lebih cepat. Hukum Bernoulli ditemukan oleh Daniel Bernoulli, seorang matematikawan Swiss yang menemukannya pada 1700-an. Persamaan Bernoulli memiliki hubungan antara tekanan, kecepatan fluida, dan elevasi dalam sistem aliran.

Secara umum hukum Bernoulli menyatakan bahwa tekanan suatu fluida di tempat yang kecepatannya tinggi lebih kecil dibandingkan dengan fluida yang kecepatannya rendah. Jadi semakin besar kecepatan fluida dalam suatu pipa maka tekanan yang dihasilkan akan semakin kecil, dan sebaliknya semakin kecil kecepatan fluida dalam suatu fluida maka tekanan yang dihasilkan akan semakin besar.

## 2.7 Proses Orde Satu *Self-Regulation*

Di dalam ilmu sistem pengendalian, dikenal sebuah elemen proses yang mampu mengendalikan dirinya sendiri, walaupun padanya tidak dipasang instrumentasi pengendalian otomatis. Elemen proses yang mempunyai sifat seperti itu disebut elemen proses *self regulation*. Contoh elemen proses *self regulation* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4. Proses Orde Satu *Self Regulation*  
(Frans Gunterus, 1994)

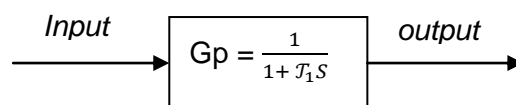
*Input* proses adalah *flow* tangki ( $F_i$ ) dan *output* proses adalah level ( $h$ ) pada tangki, yang dapat dibaca sebagai *sinyal output* dari LT (*level transmitter*). Pada

keadaan awal, diandaikan *level* di 50% tangki dan  $F_i$  serta  $F_o$  juga sama 50% skala *flow*. Pada Keadaan awal itu semua parameter seimbang, sehingga *level* tetap di 50% sampai terjadi perubahan pada  $F_i$  sebesar  $f_i$ .

Andaikan keadaan seimbang terganggu karena  $F_i$  naik secara mendadak sebesar  $f_i$  10%. Dengan bertambahnya  $F_i$ , *level* ( $h$ ) juga akan berubah dan cenderung naik. Namun, kenaikan *level* sebesar  $h$  akan secara alami diikuti oleh kenaikan  $F_o$  sebesar  $f_o$  sehingga akan dicapai keseimbangan yang baru dimana  $F_i$  sama dengan  $F_o$ . *Level* akan terhenti dikesetimbangan yang baru itu selama tidak terjadi perubahan  $F_i$  maupun  $F_o$ . Keseimbangan baru ini pasti ada diatas 50%, dan  $F_i$  maupun  $F_o$  juga ada di atas 50% skala *flow*. keadaan mencapai keseimbangan sendiri inilah yang disebut *self regulation*.

Andaikan keseimbangan baru terjadi pada *level* 70%, *steady state gain* dari proses itu dikatakan sama dengan dua ( $G_p = 2$ ). Mengapa demikian, karena untuk 10% penambahan input ( $f_i$ ) akhirnya dihasilkan 20% penambahan *output* ( $h$ ). tentu saja keadaan *self regulation* ini hanya terjadi untuk batas-batas tertentu. Yang jelas, kalau diandaikan  $G_p = 2$ ,  $F_i$  tidak pernah boleh ditambah lebih dari 25%, air akan tumpah keluar dari tangki.

Lalu apakah keadaan proses diatas bisa disebut *self regulation*?. Keadaan tumpahnya air memang bisa terjadi, bahkan juga pada sistem yang sudah dilengkapi pengendalian otomatis sekalipun. Hal itu disebabkan karena sistem pengendalian hanya mampu mengatasi *load* atau *disturbance* sampai batas-batas tertentu saja.

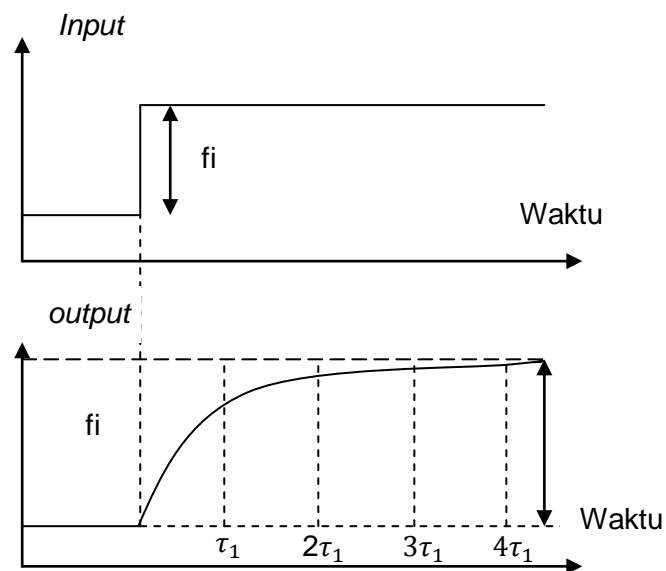


Gambar 5. Diagram Kotak Proses Orde Satu *Self Regulation*  
(Frans Gunterus, 1994)

Proses *self regulation* memerlukan waktu untuk mencapai keseimbangan yang baru. Sehingga, *transfer function* proses itu pasti merupakan persamaan fungsi waktu. Bentuk *transfer function* seperti pada gambar 3 itulah yang disebut bentuk persamaan differensial pangkat satu. Simbol  $s$  di persamaan itu adalah bentuk transformasi laplace. Asal usul proses *self regulation* dapat memiliki *transfer function* dapat dilihat pada persamaan matematika berikut:

$$g_p = \frac{G_p}{(2\pi\tau_1/\tau_0)^2}$$

*Transfer function* adalah temperatur  $\tau_1$ , yang disebut sebagai *lag time* atau *time constant*. Jika, kapasitas tangki ditandai dengan  $C$ , dan hambatan yang ditimbulkan oleh bukaan *control valve* ditandai dengan  $R$ , maka besar  $\tau_1$  adalah  $R/C$ .



Gambar 6. Kurva Waktu Proses Orde Satu *Self Regulation*  
(Frans Gunterus, 1994)

## 2.8 Hasil Kerja Sistem Pengendalian Otomatis

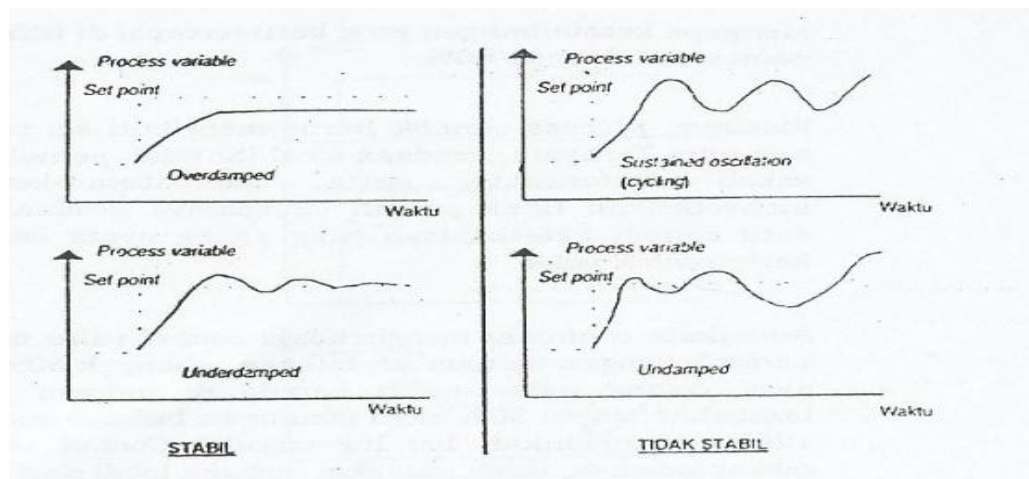
Suatu sistem pengendalain dikatakan stabil, apabila nilai *process variable* berhasil mendekati *set point* (besarnya *process variabel* yang dikehendaki), walaupun diperlukan waktu untuk itu. Keadaan stabil itu dapat dicapai dengan respon yang *overdumped* ataupun *underdumped*. kedua respon itu mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pada respon *underdumped*, jelas bahwa koreksi sistem berjalan lebih cepat dari respon *overdumped*. Tetapi, tidak berarti bahwa *underdumped* lebih bagus dari *overdumped*. Ada proses yang membutuhkan respon yang lambat (*overdumped*) dan ada yang membutuhkan respon yang cepat (*underdumped*).

Kebutuhan tersebut ditentukan oleh sifat proses dan kualitas produk yang dikehendaki. Operator yang berpengalaman tentu dapat menunjukkan di bagian mana proses memerlukan respon yang *overdumped* dan di bagian mana diperlukan yang *underdumped*. Yang pasti, sistem pengendalian tidak pernah menghendaki sistem yang tidak stabil. Tidak yang *sustain oscillation*, apalagi yang *undamped*.

Pada respon *sustain oscillation*, proses variabel tidak pernah sama dengan *set point*, proses variabel naik turun di sekitar *set point* seolah-olah seperti roda sepeda yang sedang berputar. Oleh karena sifat ilmiah, *sustain oscillation* juga disebut *cycling*.

Pada respon *undamped*, proses variabel berosilasi dengan amplitudo semakin membesar. Proses variabel semakin lama semakin menjauhi *set point*, dan pada keadaan itu *control valve* akan terbuka-tertutup secara bergantian. Akibatnya, tercapailah keadaan yang sangat berbahaya seperti yang terjadi pada *feedback* positif. Kelak akan diketahui bahwa keadaan *sustain oscillation* dengan

amplitudo yang kecil di sebagian proses dapat ditolerir sebentar, demi untuk penyetelan *control unit (tuning)*. Namun, keadaan *undamped* (osilasi dengan amplitudo membesar) tidak pernah dapat ditolerir dalam keadaan bagaimana pun. Kedua keadaan tidak stabil di atas adalah keadaan yang paling tidak dikehendaki di dalam sistem pengendalian.



Gambar 7. Respon sistem pengendalian otomatis  
(Frans Gunterus, 1994)