

EE2090: Kỹ thuật điện & Điều khiển quá trình

Chương 3: Đặc tính các thành phần hệ thống



Nội dung chương 3

3.1 Thiết bị đo

3.1.1 Cấu tạo chung của thiết bị đo

3.1.2 Đặc tính vận hành của thiết bị đo

3.1.3 Đặc tính động học của thiết bị đo

3.3.4. Các thiết bị đo trong công nghiệp: mức, lưu lượng, áp suất, nhiệt độ, thành phần hoá học.

3.2 Thiết bị chấp hành và van điều khiển

3.2.1 Cấu trúc chung của thiết bị chấp hành

3.2.2 Van điều khiển và phân loại

3.2.3 Đặc tính dòng chảy của van điều khiển

3.2.4 Đặc tính động học của van điều khiển

3.3 Thiết bị điều khiển và bộ điều khiển PID

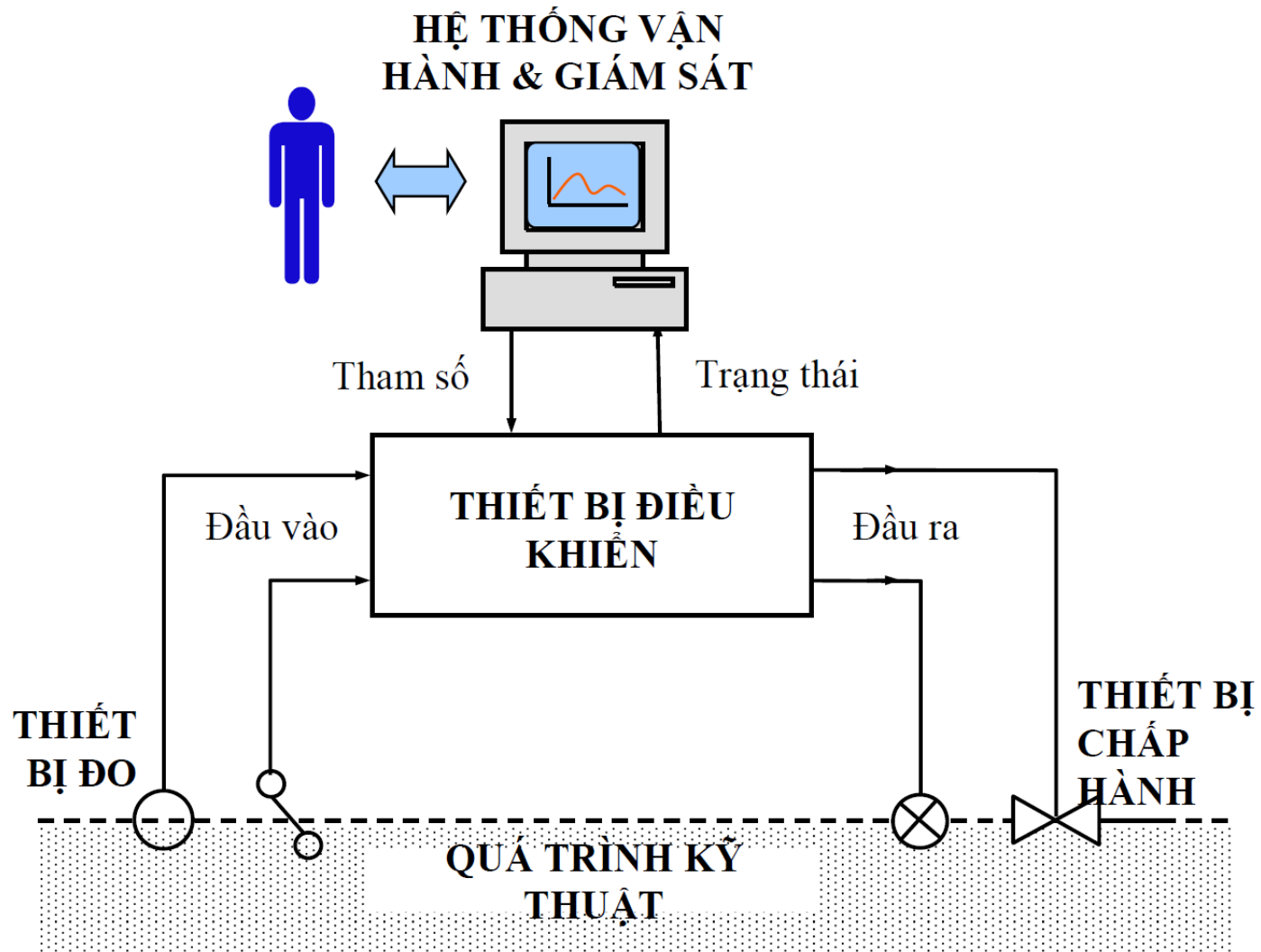
3.3.1 Điều khiển tương tự và điều khiển số

3.3.2 Thuật toán điều khiển hai vị trí

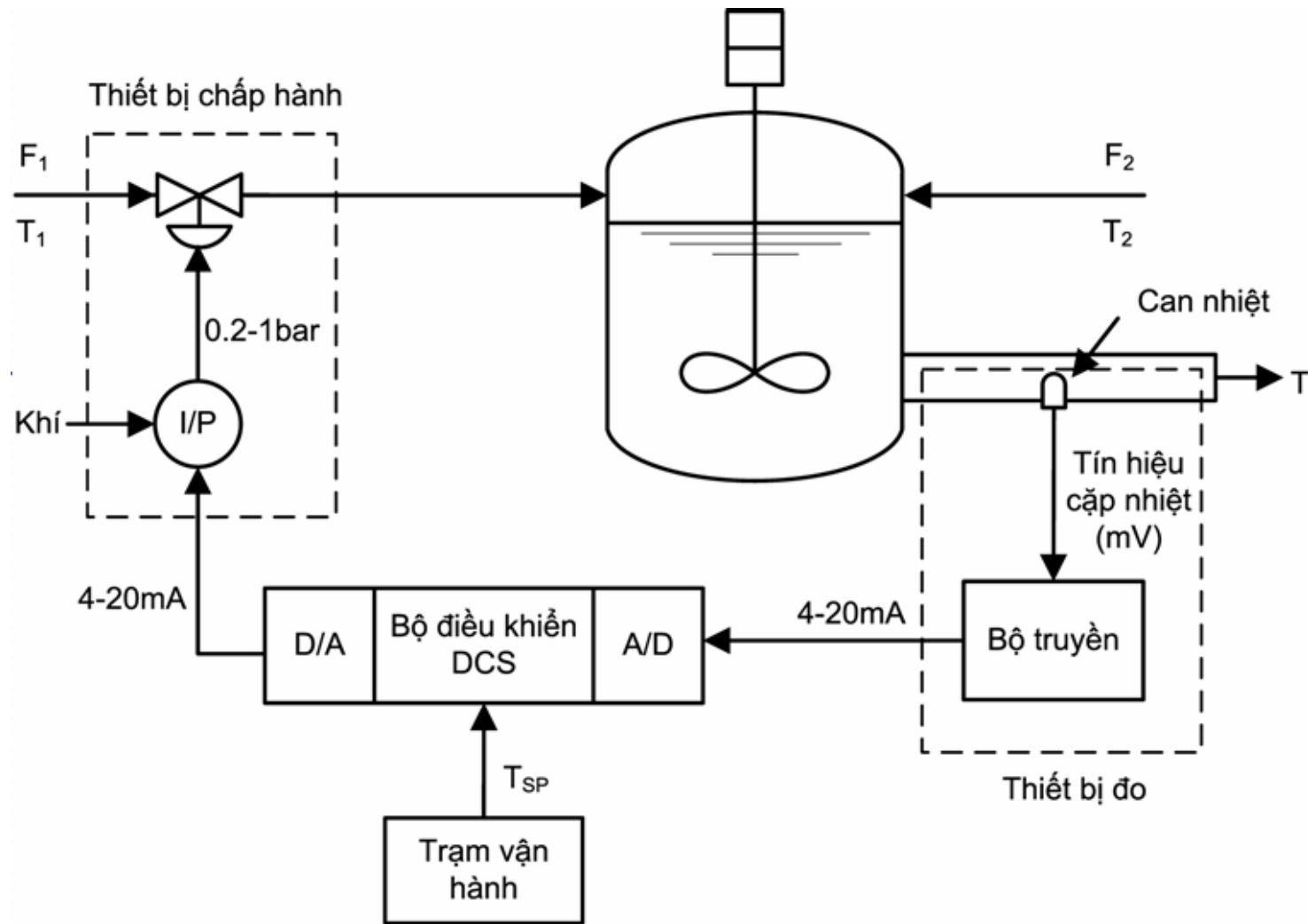
3.3.3 Thuật toán PID lý tưởng

3.3.4 Bộ điều khiển PID thực

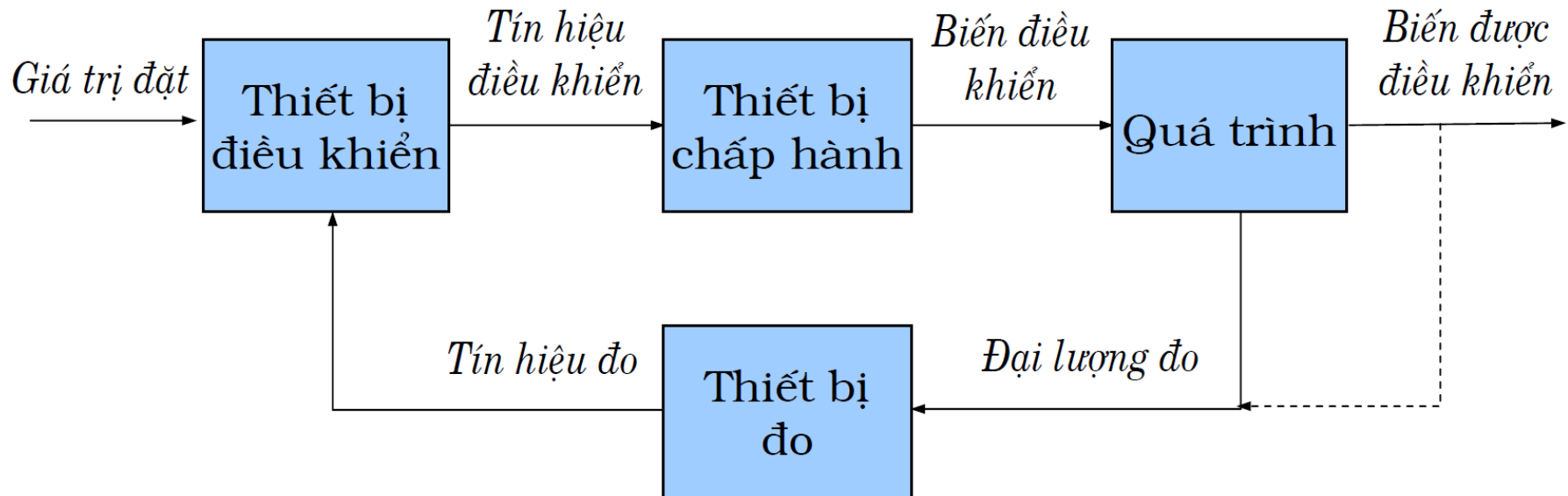
Cấu trúc cơ bản của các HTĐKQ



Ví dụ hệ thống điều khiển nhiệt độ



Các thành phần cơ bản của hệ thống



Thuật ngữ

Set Point (SP), Set Value (SV)

Control Signal, Controller Output (CO)

Control Variable, Manipulated Variable (MV)

Controlled Variable (CV), Process Value (PV)

Measured Variable

Giá trị đặt

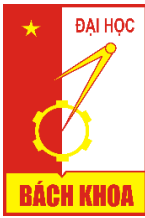
Tín hiệu điều khiển

Biến điều khiển

Biến được điều khiển

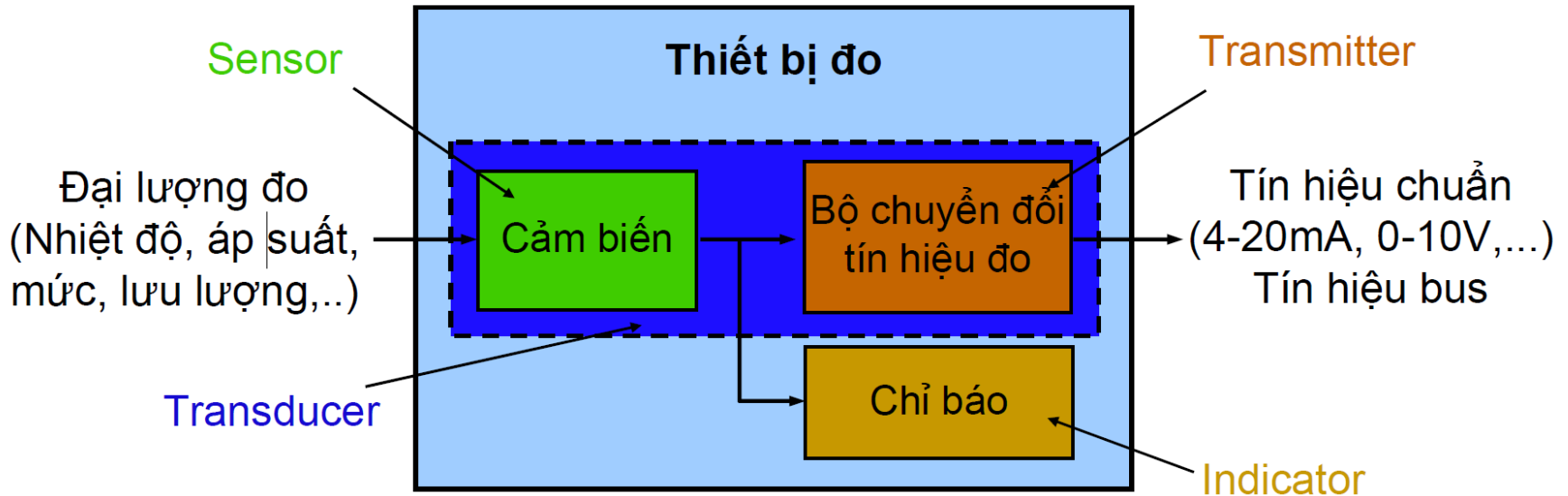
Đại lượng đo

Chuẩn tín hiệu



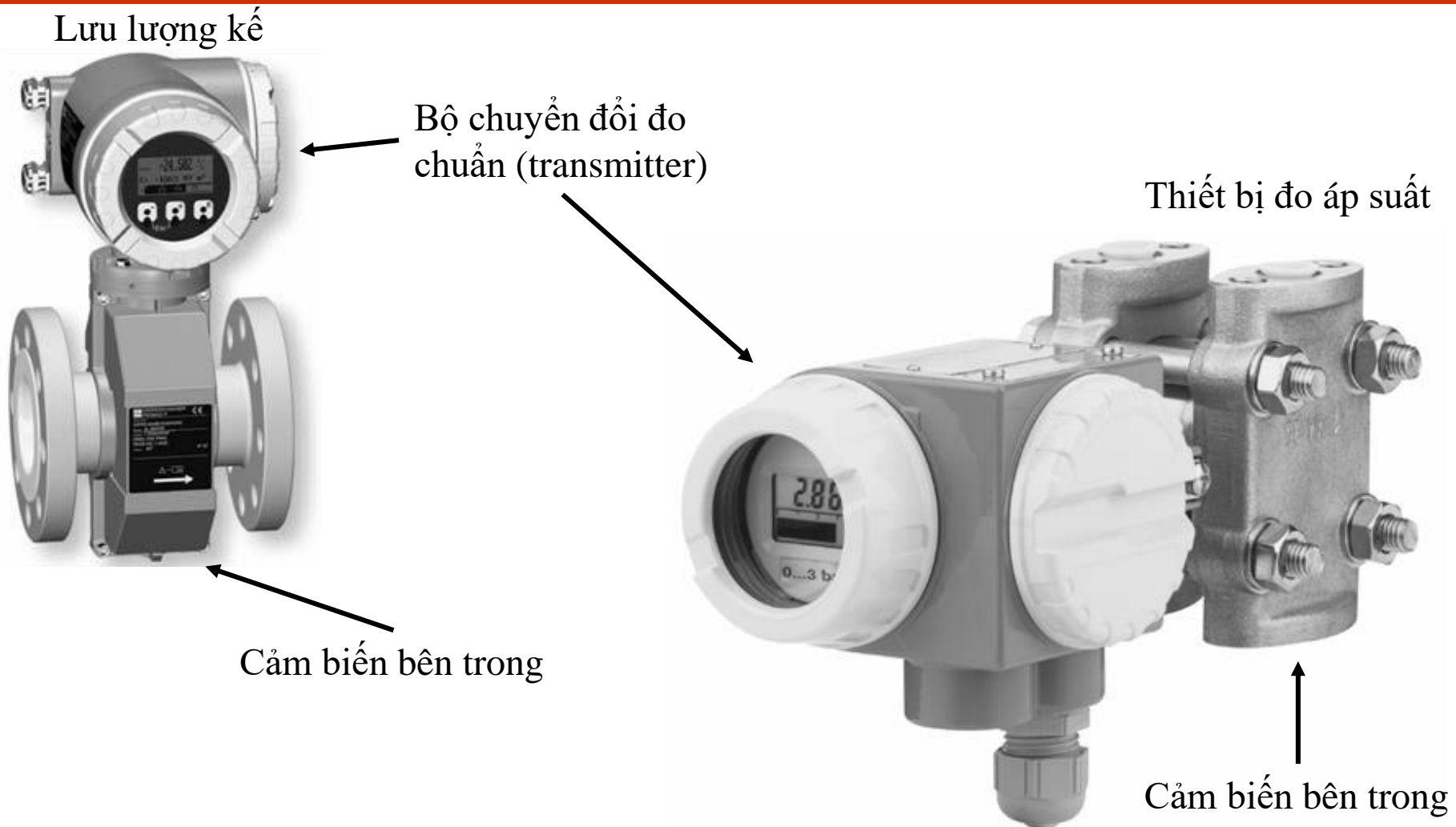
- Tín hiệu tương tự:
 - Điện: 0-20mA, 4-20mA, 10-50mA, 0-5V, 1-5V, ...
 - Khí nén: 0.2-1bar (3-15 psig)
- Tín hiệu logic:
 - 0-5 VDC, 0-24 VDC, 110/120 VAC, 220/230 VAC,...
- Tín hiệu xung/số:
 - Tín hiệu điều chế độ rộng xung, tần số xung
 - Chuẩn bus trường: Foundation Fieldbus, Profibus-PA,...
 - Chuẩn nối tiếp thông thường: RS-485, RS-422

3.1 Thiết bị đo quá trình



- *Measurement device*: Thiết bị đo
- *Sensor*: Cảm biến (vd cặp nhiệt, ống venturi, siêu âm,...)
- *Sensor element*: Cảm biến, phần tử cảm biến
- *Signal conditioning*: Điều hòa tín hiệu
- *Transmitter*: Bộ chuyển đổi đo chuẩn (điều hòa + truyền tín hiệu)
- *Transducer*: Bộ chuyển đổi theo nghĩa rộng (vd áp suất-dịch chuyển, dịch chuyển-điện áp), có thể là sensor hoặc sensor + transmitter

Ví dụ thiết bị đo



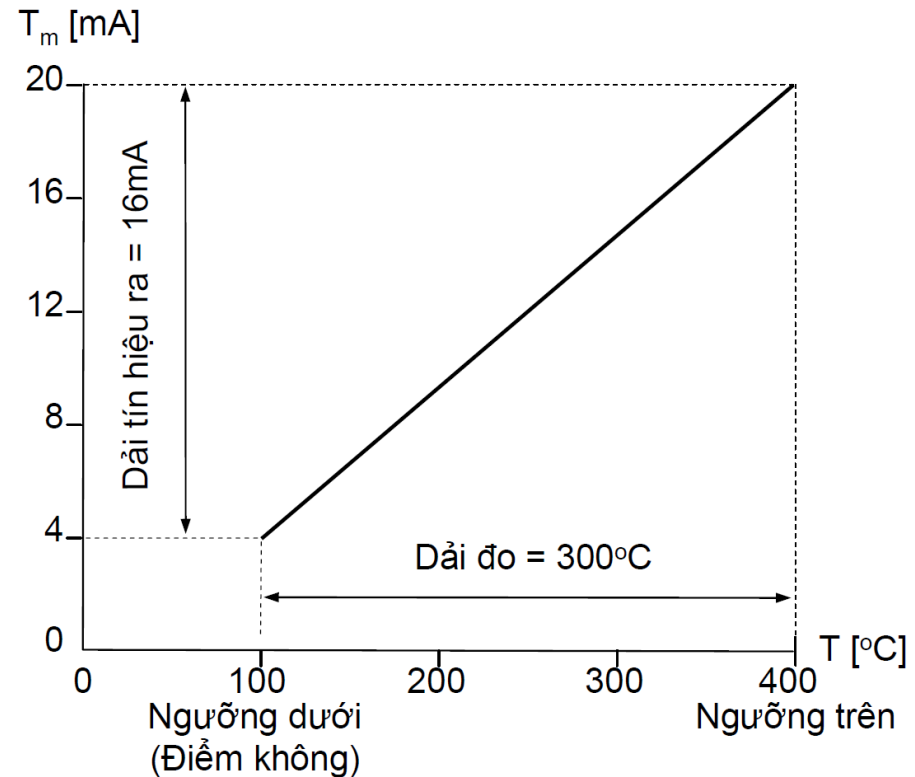
3.1.1 Đặc tính vận hành

- Phạm vi đo và dải đo
- Độ phân giải
- Độ tin cậy
- Ảnh hưởng do tác động môi trường

Phạm vi đo (range) và dải đo (span)

- Phạm vi đo là phạm vi danh định của đại lượng đo mà một thiết bị đo được sử dụng theo quy định, được xác định bởi giới hạn dưới x_{min} và giới hạn trên x_{max}
- Dải đo là khoảng cách giữa giới hạn trên và giới hạn dưới của phạm vi đo:

$$S_x = x_{max} - x_{min}$$



VÍ DỤ

Phạm vi đo (phạm vi đầu vào): $100 - 300^{\circ}\text{C}$

Dải đo (dải đầu vào): 300°C

Phạm vi đầu ra: 4-20mA

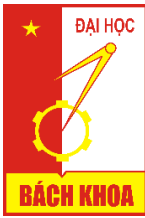
Dải tín hiệu ra (dải đầu ra): 16m

Độ phân giải (resolution) và độ tin cậy (reliability)



- **Độ phân giải** được định nghĩa là một bước thay đổi của tín hiệu ra (khi có thay đổi của tín hiệu vào).
 - Kích cỡ các bước không cố định thì bước thay đổi lớn nhất là *độ phân giải cực đại*
 - Thường được biểu diễn bằng tỉ lệ phần trăm so với dải tín hiệu ra của thiết bị.
 - *Độ phân giải trung bình (%)* = $\frac{100}{N}$ với N là tổng số bước thay đổi trong toàn bộ phạm vi đo
- **Độ tin cậy** là xác suất mà thiết bị hoạt động tốt qua một khoảng thời gian trong một số điều kiện quy định.
 - *Quá phạm vi (overrange)* và *thời gian hồi phục (recovery time)*
 - *Độ lệch hay độ trôi (drift)*
 - *Lệch độ nhạy (sensitivity drift)*

Tác động của môi trường



- **Điều kiện làm việc** (operating conditions) bao gồm nhiệt độ và áp suất bên ngoài, áp suất dòng chảy, các trường điện từ, gia tốc, độ rung và vị trí lắp đặt.
- **Giới hạn làm việc** (operative limits) là phạm vi các điều kiện làm việc mà không gây ra hư hỏng thiết bị.
- Tác động của nhiệt độ: trôi điểm không do nhiệt hoặc lệch độ nhạy do nhiệt

3.1.2 Đặc tính tĩnh

- Sai số và độ chính xác
- Dải chết và độ trễ
- Tính trung thực và khả năng tái tạo
- Độ tuyến tính
- Độ nhạy

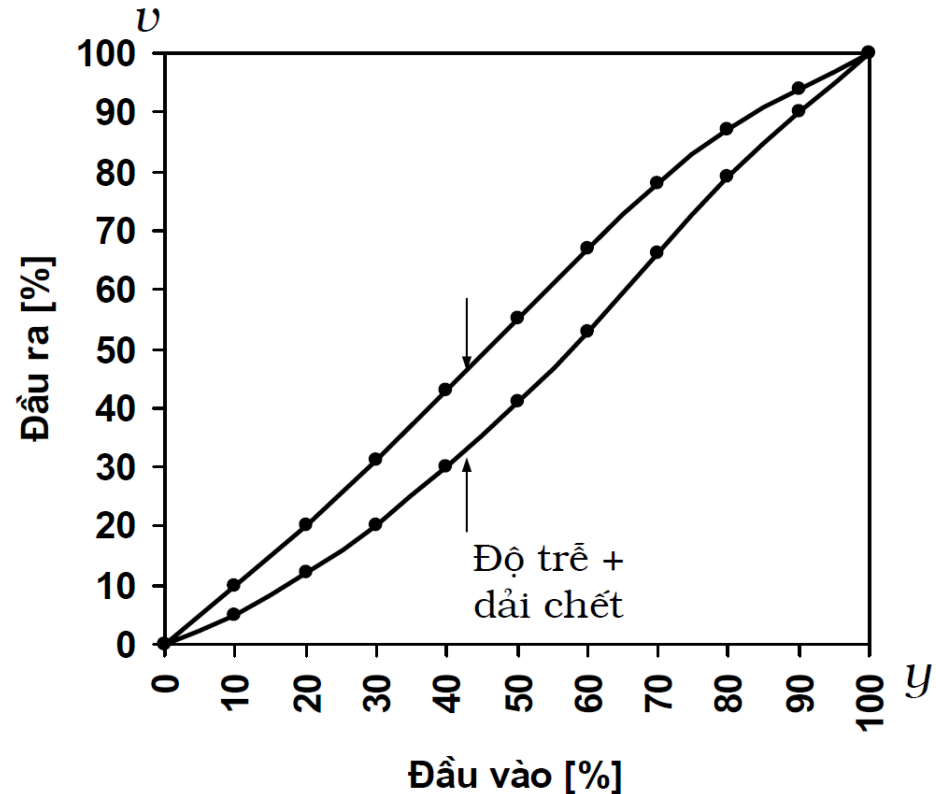
Sai số đo, độ chính xác và độ phân giải



- **Sai số đo** là sai lệch giữa giá trị quan sát được và giá trị lý tưởng của đại lượng đo
 - Sai số hệ thống
 - Sai số ngẫu nhiên
- **Độ chính xác**, cấp chính xác: mức độ phù hợp của đầu ra của một thiết bị đo so với giá trị thực (lý tưởng) của đại lượng đo xác định bởi một số tiêu chuẩn
 - Theo đại lượng đo, ví dụ $+1^{\circ}\text{C}/-2^{\circ}\text{C}$
 - Tỷ lệ phần trăm của dải đo, ví dụ $\pm 0.5\%$ dải đo
 - Tỷ lệ phần trăm của đầu ra, ví dụ $\pm 1\%$ đầu ra.
- **Định chuẩn** (calibration): Quy trình xác định độ chính xác của một thiết bị đo và thực hiện hiệu chuẩn cho phù hợp với ứng dụng

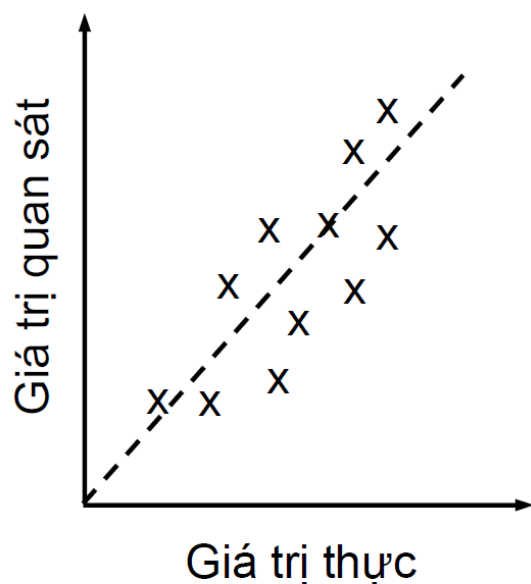
Đồ thị định chuẩn

- **Dải chết** (*deadband*):
biến thiên nhỏ nhất của giá trị đo mà thiết bị đo có thể đáp ứng với tín hiệu đầu ra thay đổi
- **Độ trễ** (*hysteresis*): Sự khác nhau trong đáp ứng với thay đổi đầu vào theo hai chiều khác nhau

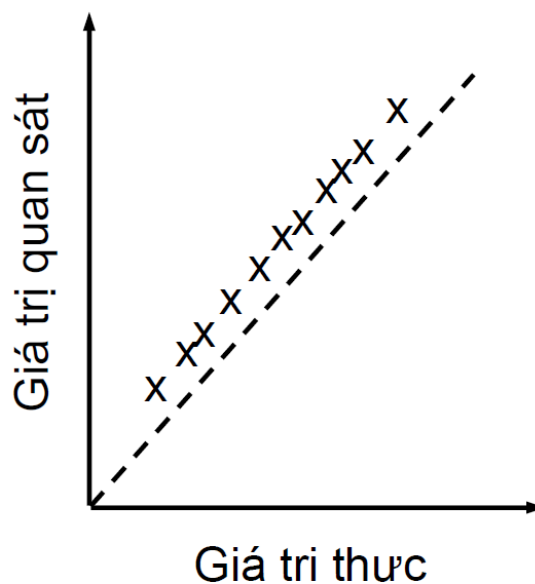


Tính trung thực, khả năng lặp lại

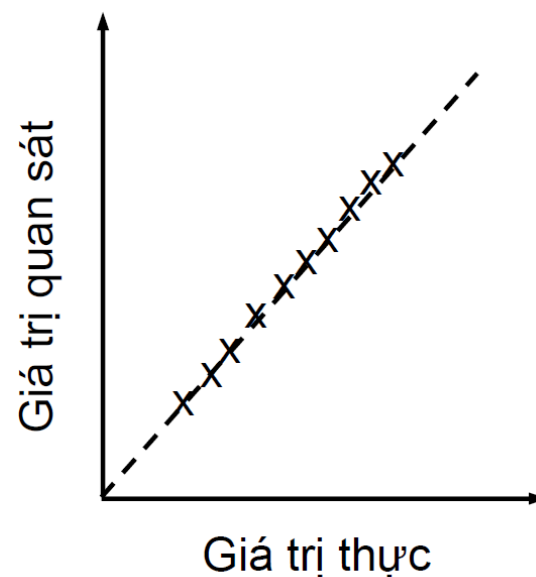
- **Tính trung thực** hay **khả năng lặp lại** (repeatability): Độ lệch lớn nhất của các giá trị quan sát được sau nhiều lần lặp lại so với giá trị trung bình của một đại lượng đo
- **Tính trung thực \neq Độ chính xác**



Kém trung thực
Kém chính xác



Trung thực
Kém chính xác



Trung thực
Chính xác

Độ tuyến tính



- Đặc tính tuyến tính

$$v = k_m(y - y_0) + v_0 = k_my + v_c \frac{1}{2}$$

y – đại lượng đo (đầu vào)

y_0 – điểm không đầu vào

- Trong đó: v – tín hiệu đo (đầu ra)

v_0 – điểm không đầu ra

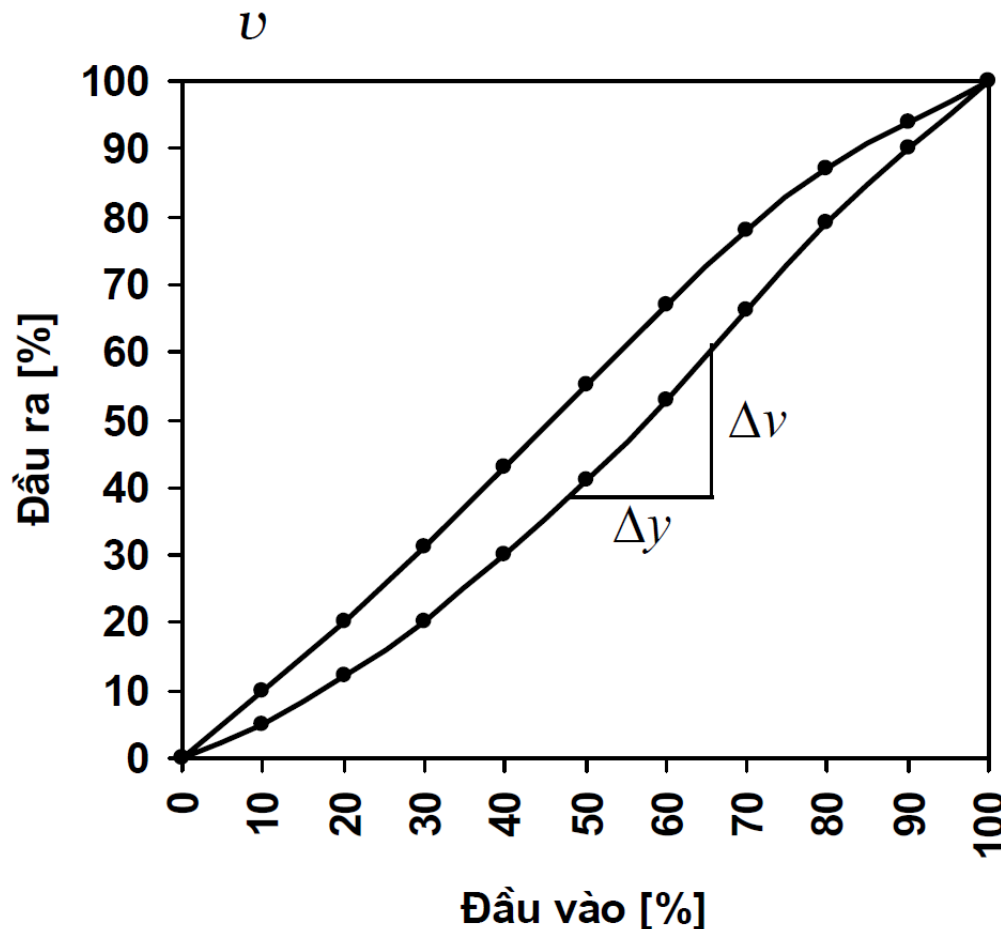
k_m – độ nhạy

- Ví dụ: Một cảm biến điện trở thay đổi điện trở R của nó một cách tuyến tính từ 100 đến 180 khi nhiệt độ T thay đổi từ 20° tới $120^\circ C$. Phương trình đặc tuyến vào-ra là:

$$R = \frac{80}{100}(T - 20) + 100 = 0.8T + 84$$

- **Độ tuyến tính:** Mức độ gần với đặc tính tuyến tính

Độ nhạy



- Độ nhạy hay hệ số khuếch đại tĩnh của một thiết bị đo tại một giá trị đo là tỉ lệ giữa thay đổi tín hiệu ra và thay đổi đại lượng đầu vào tương ứng ở trạng thái xác lập

$$y \quad k_m = \left. \frac{\Delta v}{\Delta y} \right|_{y_s} = \frac{(v - v_s)}{y - y_s}$$

Chuẩn hóa tín hiệu đo

- Thông thường quy về % của dải đầu ra hoặc chuẩn hóa đơn vị
- Ví dụ: Một thiết bị đo áp suất có đặc tính tuyến tính, phạm vi đo từ 20 đến 220 psig và phạm vi tín hiệu ra từ 4 đến 20 mA. Phương trình đặc tuyến vào-ra cho tín hiệu đo chưa chuẩn hóa là:

$$y[\text{mA}] = \frac{16}{200} (P - 20) + 4 = 0.08P + 5.6$$
$$(k_m = 0.08 [\text{mA/psig}])$$

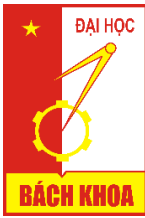
- Chuẩn hóa tín hiệu đo theo phần trăm của dải tín hiệu ra:

$$y[\%] = \frac{100}{200} (P - 20) = 0.5P - 10$$
$$k_m = 0.5 [\%/psig]$$

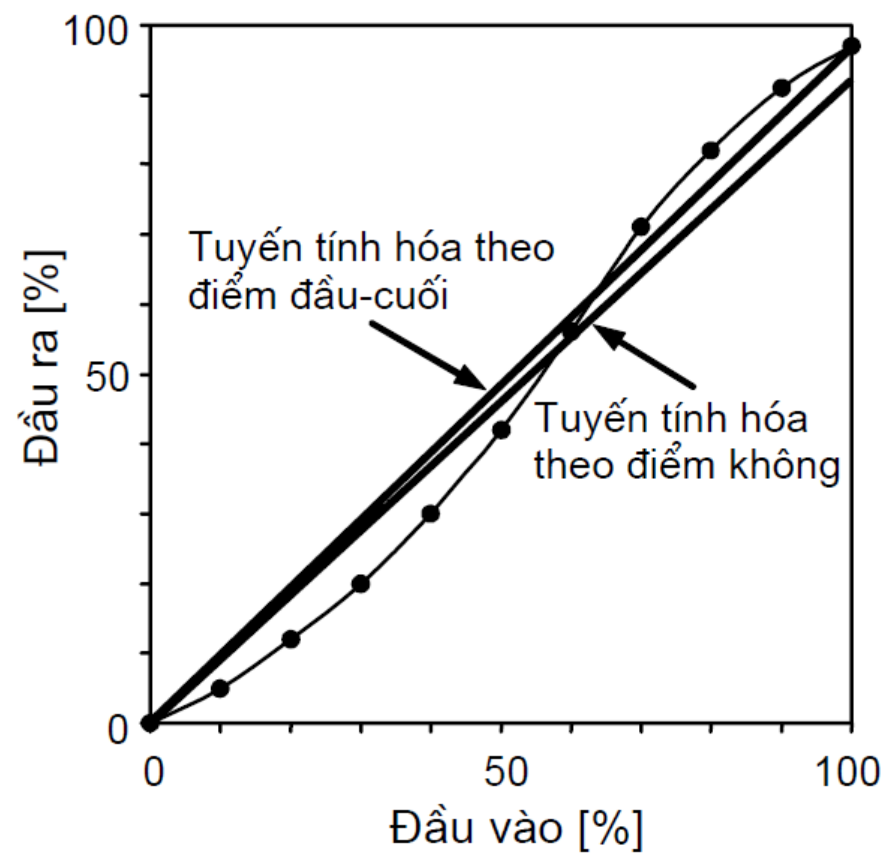
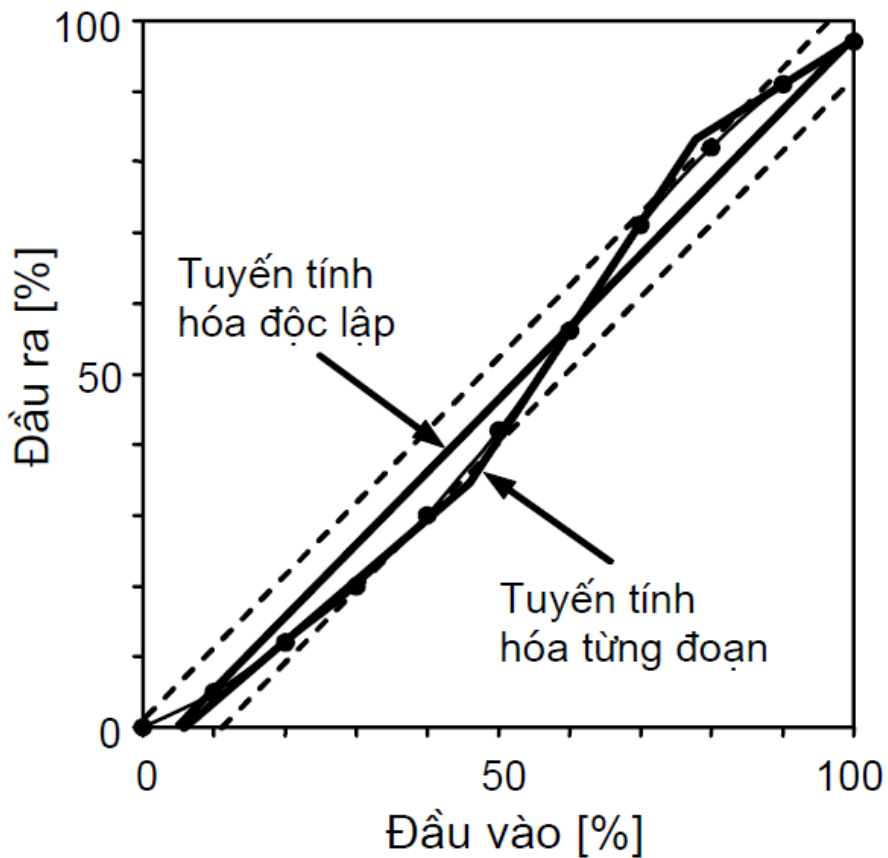
- Chuẩn hóa đơn vị

$$k_m = 0.005 [\text{psig}^{-1}]$$

Tuyến tính hóa đặc tính tĩnh



- *Tuyến tính hóa từng đoạn*: Đường cong định chuẩn được xấp xỉ bằng một đường gấp khúc.
- *Tuyến tính hóa độc lập*: Đường cong định chuẩn được xấp xỉ bằng một đường thẳng sao cho giá trị tuyệt đối của sai số lớn nhất được cực tiểu hóa.
- *Tuyến tính hóa theo điểm không*: Đường xấp xỉ tuyến tính đi qua điểm đầu của đường cong định chuẩn (điểm không) và có độ dốc sao cho giá trị tuyệt đối của sai số lớn nhất được cực tiểu hóa.
- *Tuyến tính hóa theo điểm đầu-cuối*: Đường xấp xỉ tuyến tính đi qua điểm đầu và điểm cuối của đường cong định chuẩn.
- *Tuyến tính hóa bình phương cực tiểu*: Đường xấp xỉ tuyến tính được xác định sao cho tổng bình phương các sai số là cực tiểu.



3.1.3 Đặc tính động học

- Đặc tính động học của hầu hết các thiết bị đo có thể biểu diễn bằng một khâu quán tính bậc nhất

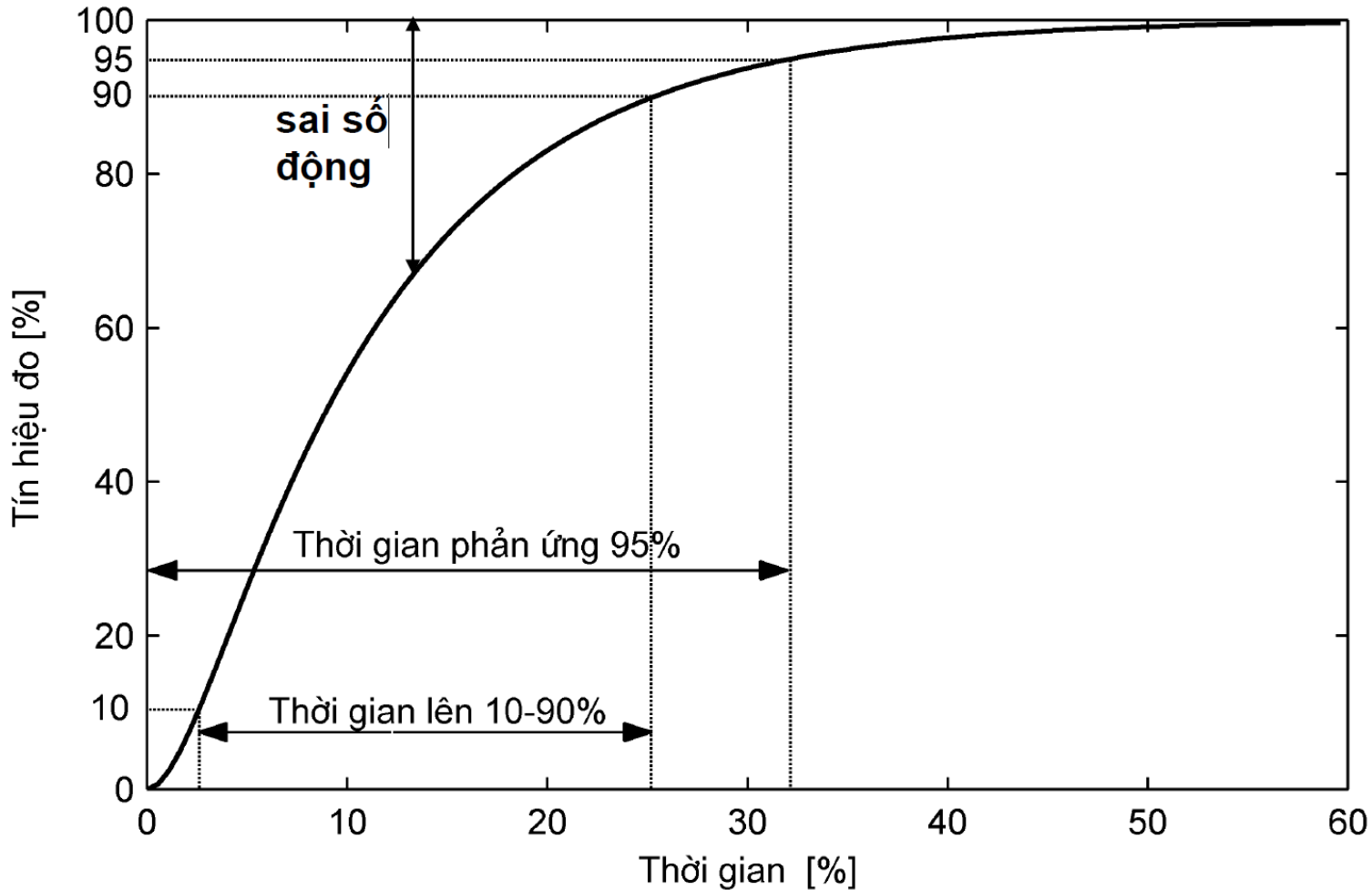
$$G_m(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k_m}{1 + \tau s}$$

- hoặc một khâu bậc hai ổn định

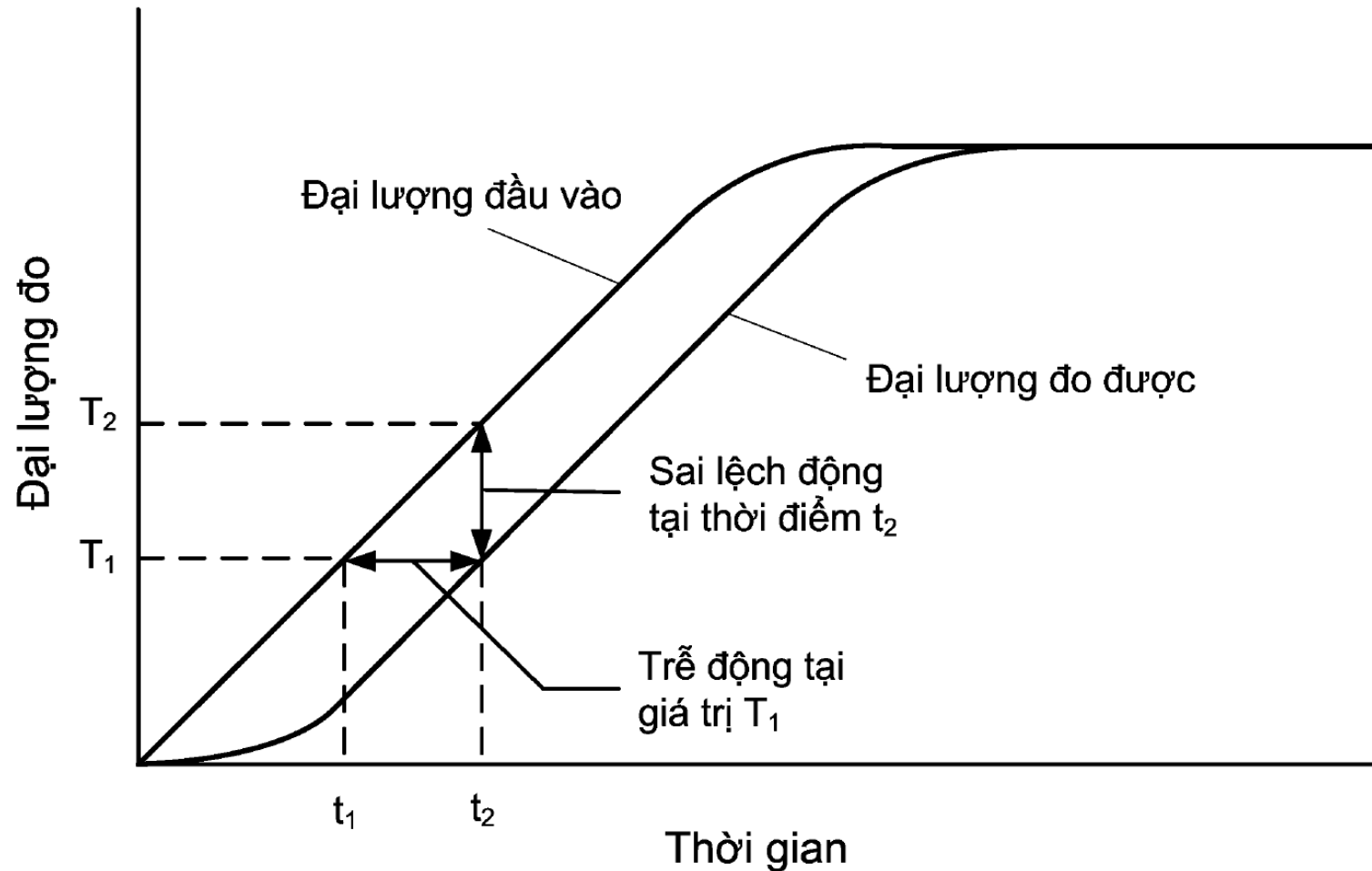
$$G_m(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{k_m \omega_0}{\omega_0^2 + 2\zeta \omega_0 s + s^2} = \frac{k_m}{\tau^2 + 2\tau\zeta s + s^2}, \quad \zeta > 0$$

- Nếu đặc tính động học của thiết bị đo không thể bỏ qua:
 - đưa vào mô hình đối tượng điều khiển, hoặc
 - Vẫn sử dụng mô hình tĩnh của thiết bị đo, coi sai số đo (động) là nhiễu đo

Đáp ứng bậc thang sai số



Đáp ứng tín hiệu dốc

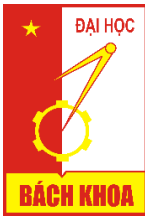


3.1.4 Các loại cảm biến quá trình tiêu biểu



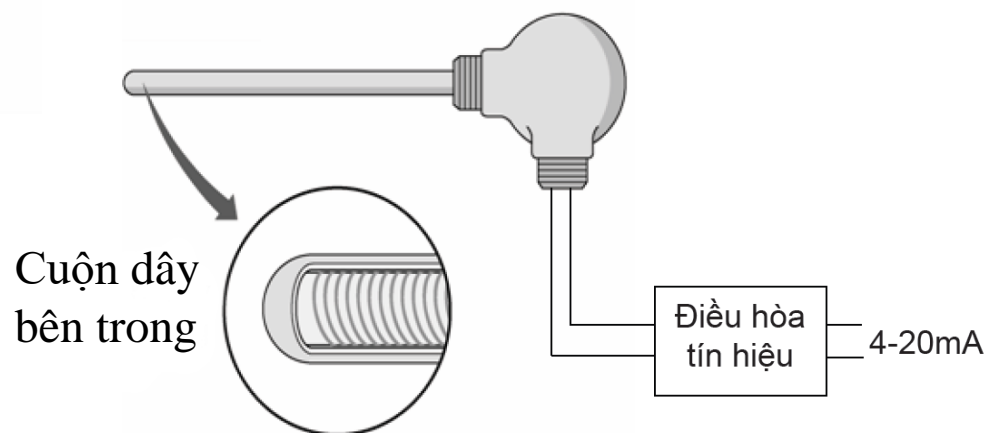
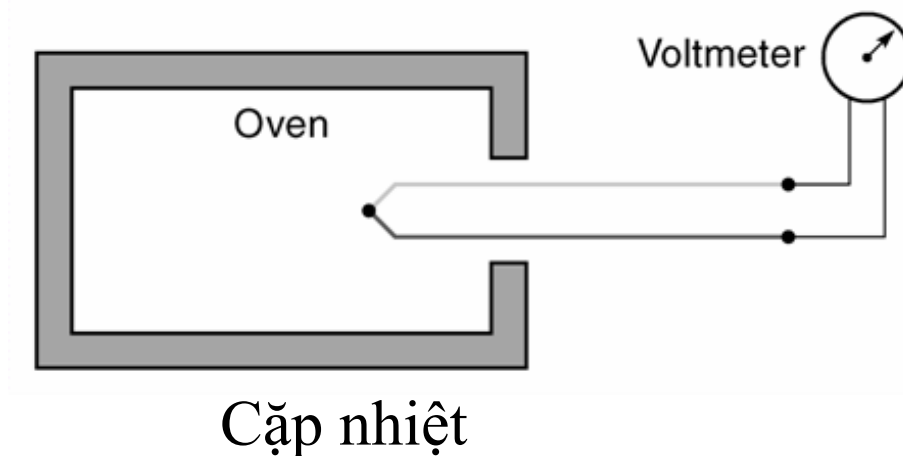
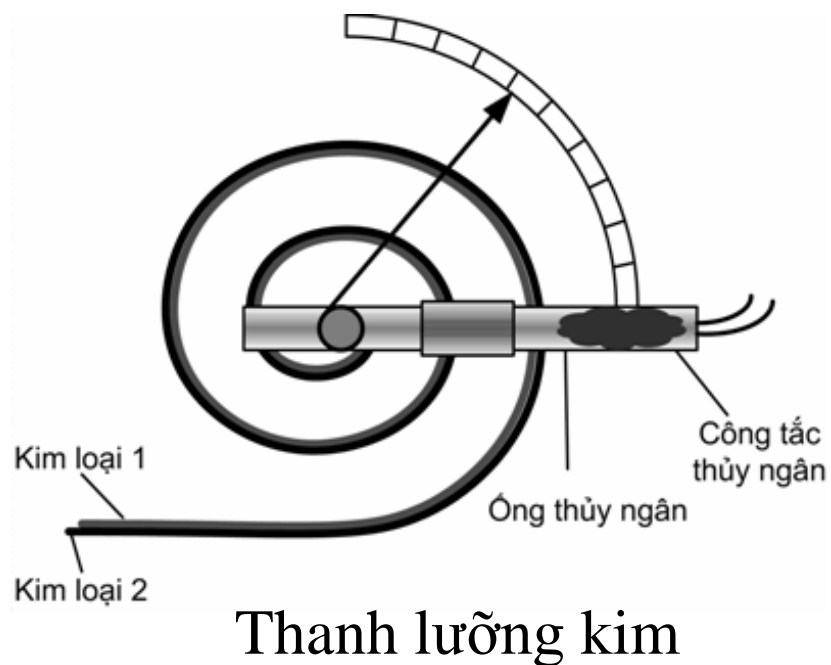
- Các tiêu chuẩn lựa chọn:
 - Các đặc tính vận hành: phạm vi đo, dải đo, độ tin cậy vận hành, dải chết, độ nhạy
 - Các đặc tính tĩnh: Độ chính xác, tính trung thực, độ tuyến tính
 - Các đặc tính động: Độ trễ, tốc độ đáp ứng, đặc tính tần số...
 - Vật liệu chế tạo: phù hợp với môi trường làm việc (nhiệt độ, áp suất, xâm thực, ăn mòn, ...)
 - Kinh nghiệm sử dụng
 - Đặc tính điện-cơ: mức độ an toàn cháy nổ, cấp bảo vệ (IP), vỏ bọc
 - Mức độ can thiệp ngược trở lại quá trình (làm giảm độ chính xác)

Cảm biến nhiệt độ



- Đơn vị chuẩn theo hệ thống SI: Kelvin (K), Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
- Các nhiệt kế giãn nở: Giãn nở một chất theo nhiệt độ làm thay đổi chiều dài, thể tích hoặc áp suất, ví dụ trong nhiệt kế thủy ngân và nhiệt kế lưỡng kim
- Điện trở thay đổi theo nhiệt độ, sử dụng trong nhiệt điện trở kim loại (RTD) hoặc nhiệt điện trở bán dẫn (Thermistor)
- Điện thế thay theo nhiệt độ tại điểm tiếp xúc giữa hai kim loại khác nhau, áp dụng trong cặp nhiệt (Thermocouple, TC)
- Nhiệt bức xạ, bước sóng nhiệt bức xạ thay đổi theo nhiệt độ, ví dụ hỏa kế bức xạ (Pyrometer) áp dụng cho đo nhiệt độ cao (quá trình đốt cháy)

Cảm biến nhiệt độ



Thiết bị đo sử dụng RTD

Nhiệt kế điện trở kim loại (RTD)

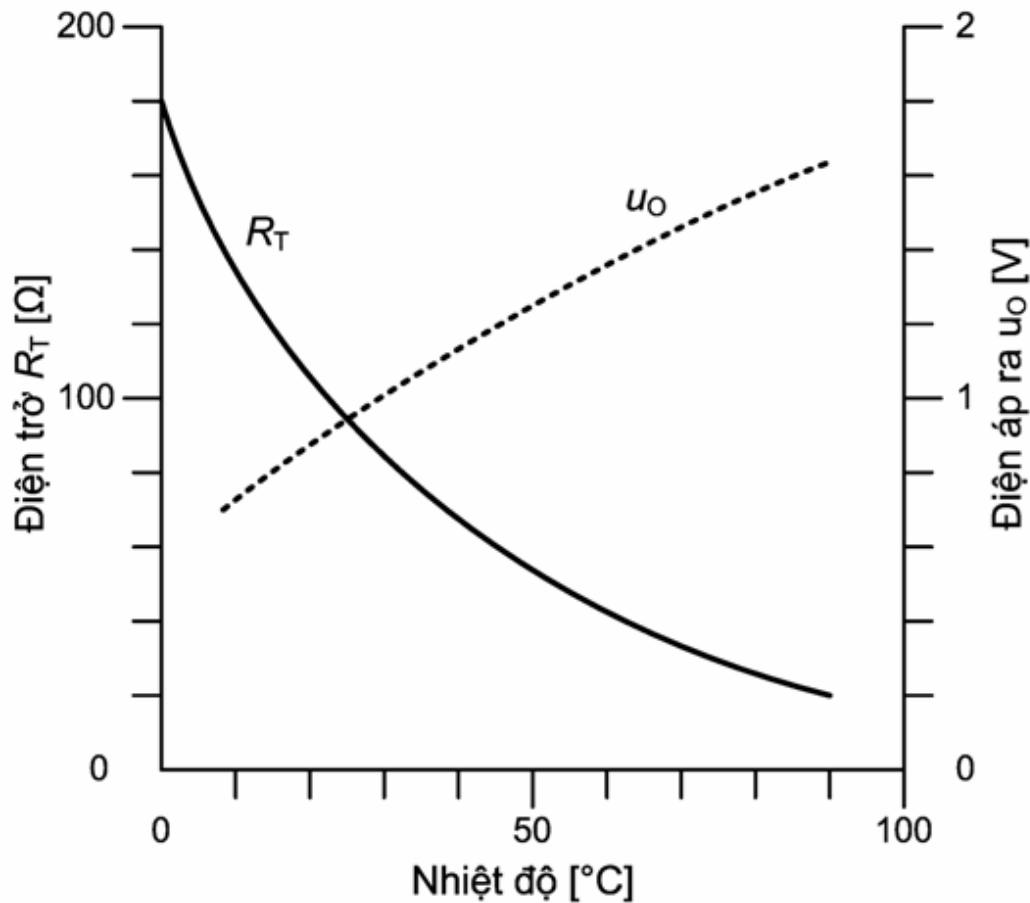


- Quan hệ giữa điện trở với nhiệt độ của hầu hết kim loại có dạng:

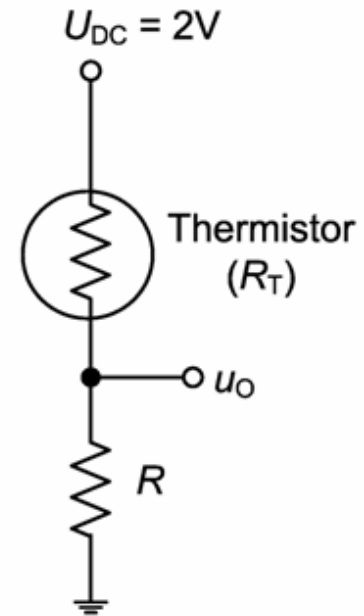
$$R = R_0(1 + \alpha T + \beta T^2 + \dots)$$

- Các loại vật liệu thường được sử dụng:
 - platin ($\alpha \approx 0.0039$): độ tuyến tính, độ bền và độ chính xác cao. Loại thông dụng PT100 ($R = 100\Omega$ tại 0°C)
$$R = R_0(1 + a_1T + a_2T^2),$$
$$a_1 = 0.0039, a_2 = -0.6 \times 10^{-6}$$
 - niken ($\alpha \approx 0.0068$): rẻ hơn platin, độ nhạy lớn nhất, nhưng độ phi tuyến cũng cao nhất.
 - đồng ($\alpha \approx 0.0043$)

Nhiệt điện trở bán dẫn (thermistor)



Đặc tính đo



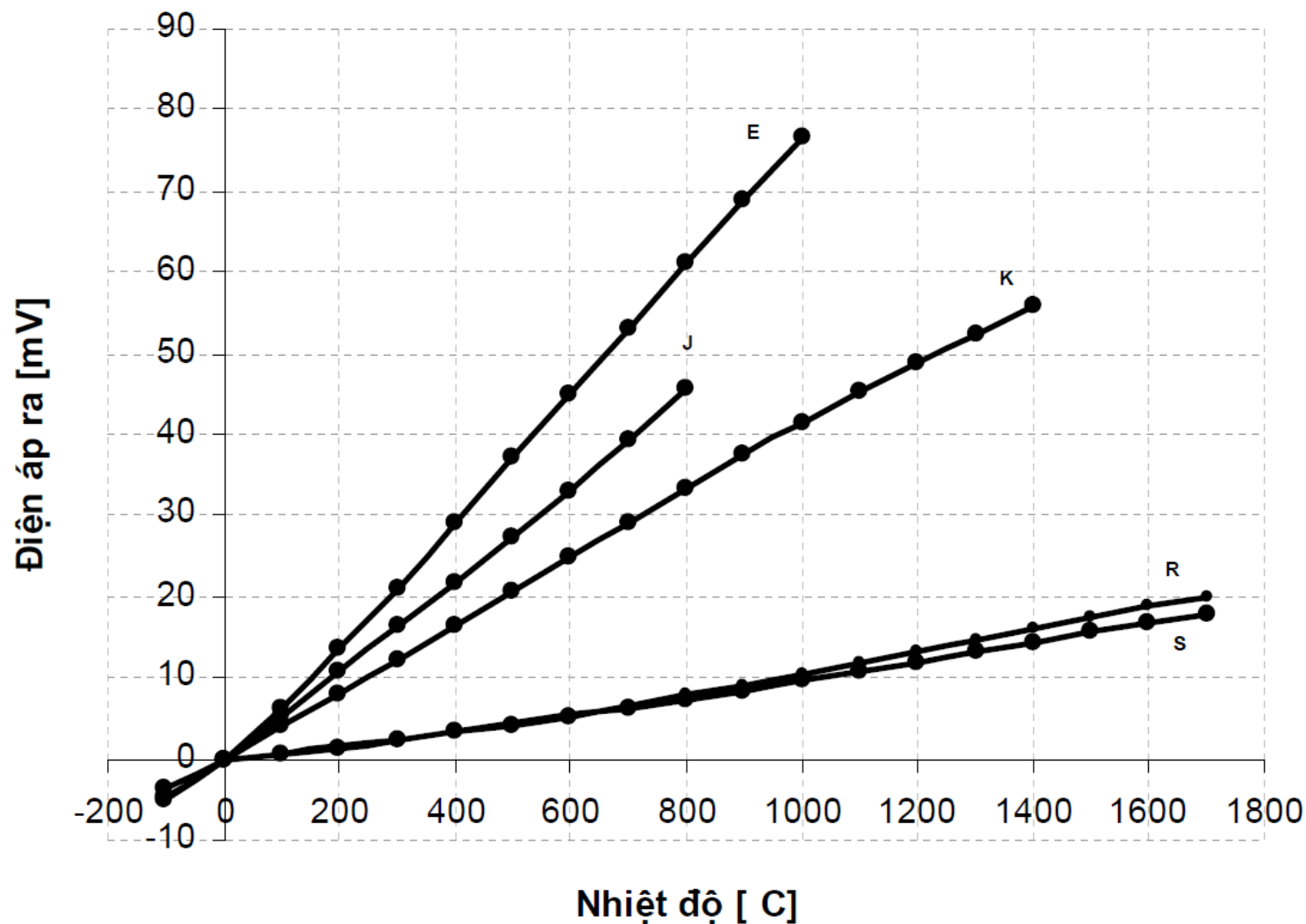
Mạch bù đơn giản

Một số kiểu cặp nhiệt thông dụng

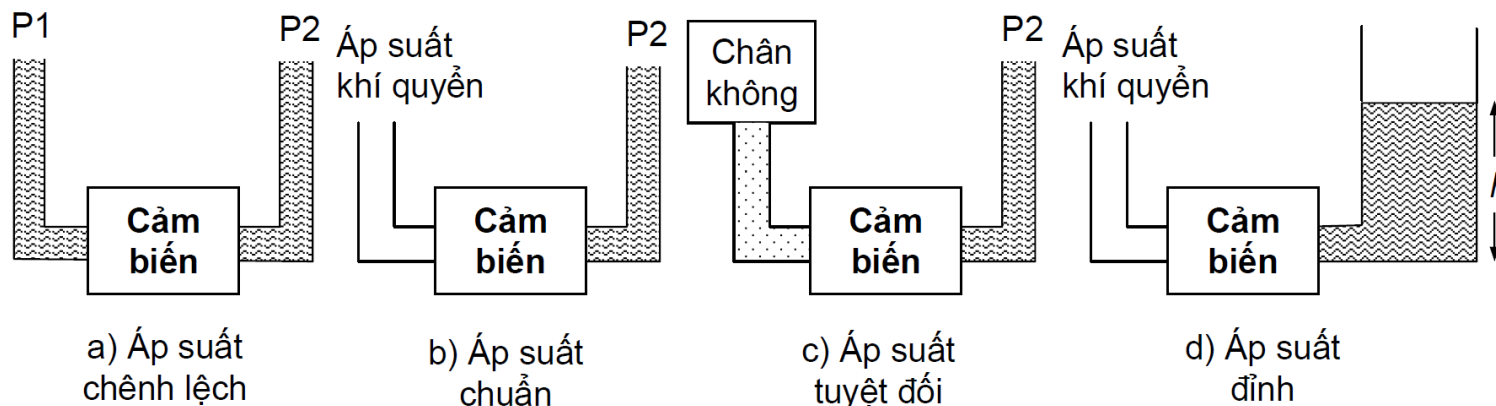
Kiểu	Vật liệu cặp nhiệt điện	$\Delta U/\Delta T$ * $\mu V/^{\circ}C$	Phạm vi thích hợp ($^{\circ}C$)	Ghi chú
E	Chromel – Constantan	68	0-800	Độ nhạy cao nhất
J	Sắt – Constantan	46	20-700	Sử dụng cho môi trường áp thấp; có thể thay thế sắt bằng thép không gỉ
K	Chromel – Alumel	42	0-1100	Ứng dụng rất rộng rãi
R	Platin/Rodi (13%) – Platin	8	0-1600	Sử dụng đo nhiệt độ cao, thông dụng ở Anh
S	Platin/Rodi (10%) – Platin	8	0-1600	Sử dụng đo nhiệt độ cao ít thông dụng ở Anh
T	Đồng – Constantan	46	-185 tới +300	Sử dụng trong KT nhiệt lạnh, môi trường áp thấp

* Tại $T_0 = 100^{\circ}C$

Đặc tính đo của một số cặp nhiệt



Cảm biến áp suất



Chuyển đổi giữa các đơn vị áp suất thông dụng

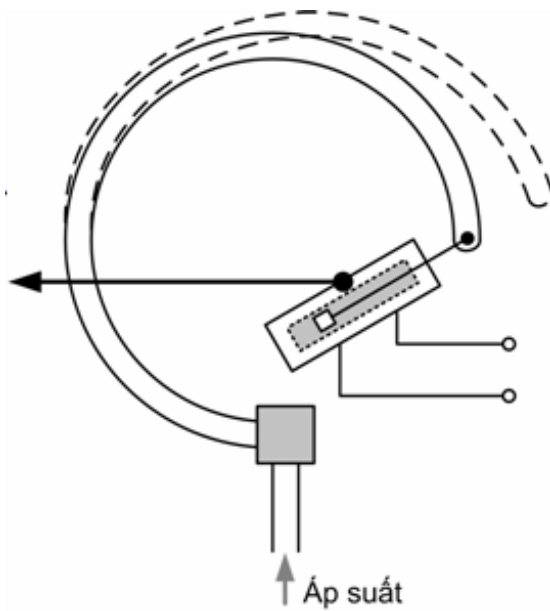
Đơn vị	kPa	psi	bar	atmophe	inch WG	torr
kPa	1	0.145	0.01	0.009872	4.141	0.74966
psi	6.895	1	0.06895	0.068027	27.7	51.7
bar	100	14.5	1	0.986395	401.8	749.66
atmophe	101.3565	14.7	1.0138	1	407.19	760
inch WG	0.249	0.036	0.00249	0.002449	1	1.86121
torr (mmHg)	0.1333	0.019342	0.001334	0.001316	0.535776	1

Các loại cảm biến áp suất thông dụng

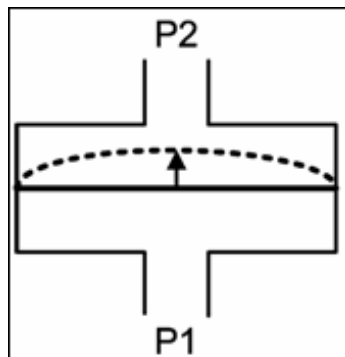


- Cảm biến đàn hồi hai phần tử:
 - Các phần tử cảm biến đàn hồi: Ống Bourdon, màng rung, màng chắn
 - Các phần tử cảm biến dịch chuyển:
 - Thay đổi điện trở (cảm biến sức căng, chiết áp)
 - Thay đổi điện dung (cảm biến tụ điện)
 - Thay đổi điện cảm (cảm biến cảm ứng)
 - Thay đổi từ thông (biến áp vi sai, LVTD)
- Cảm biến piezo:
 - Áp điện (piezo-electric): hiệu ứng tích điện khác dấu trên hai bề mặt tinh thể thạch anh khi chịu một lực tác động
 - Áp trở: hiện tượng thay đổi điện trở của tinh thể thạch anh dưới tác động của một lực lên bề mặt
- Cảm biến đo chân không
 - Chân không kế Pirani (Pirani gauge)
 - Chân không kế ion hóa (Ionisation gauge)

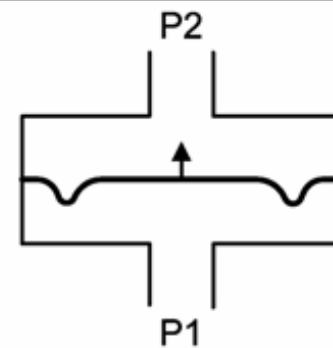
Các phần tử đàn hồi



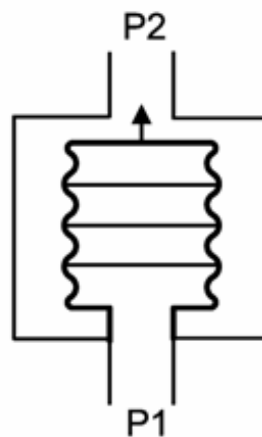
Ống Bourdon



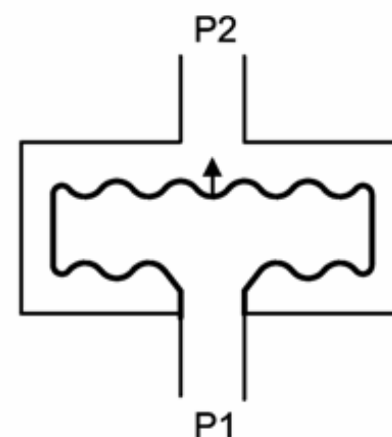
a) Màng chắn phẳng



b) Màng chắn nhẵn



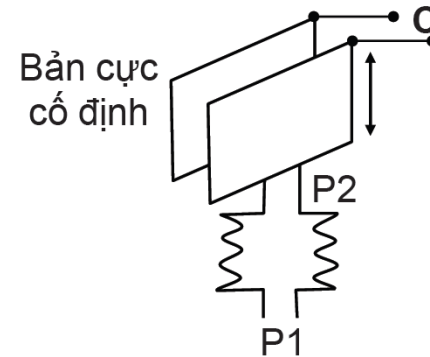
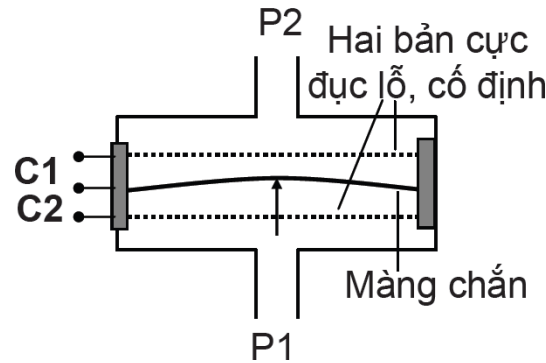
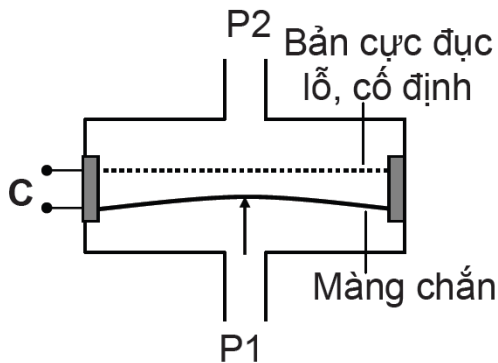
c) Màng rung



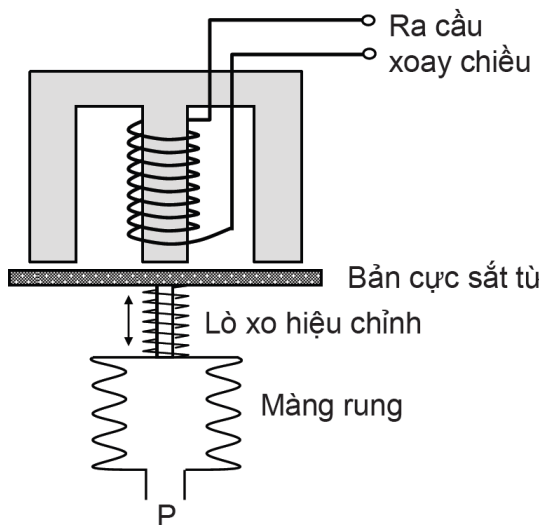
d) Capsule

Màng mỏng đàn hồi

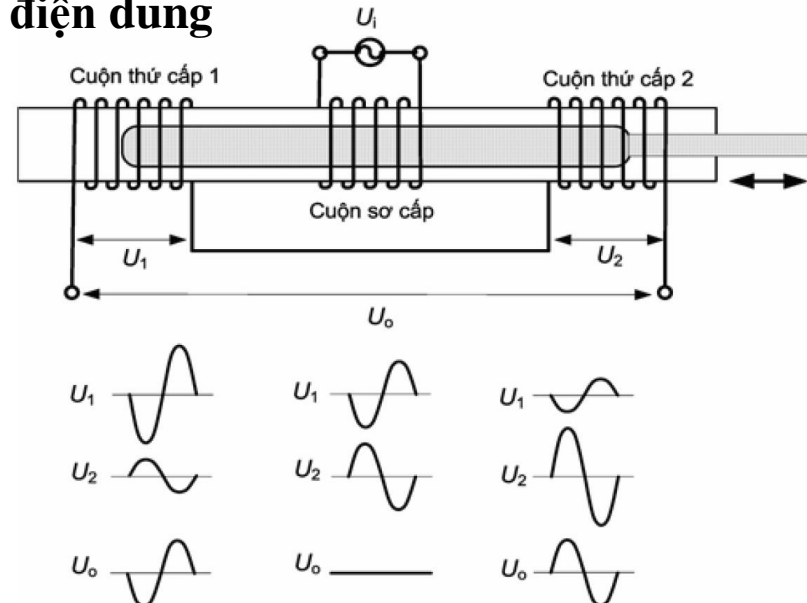
Các phần tử cảm biến dịch chuyển



Cảm biến điện dung

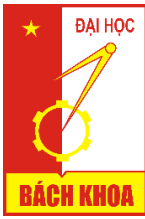


Cảm biến cảm ứng



Biến áp vi sai (LVTD)

Cảm biến lưu lượng



- Lưu lượng của lưu chất là lượng chất lỏng hoặc một chất khí đi qua một vị trí của đường ống dẫn kín hoặc kênh dẫn hở trong một đơn vị thời gian
- Lưu lượng chất rắn được tính bằng đơn vị khối lượng vận chuyển trong một đơn vị thời gian.

- Lưu lượng thể tích [m^3/s] hoặc [lít/s], [lít/phút] :

$$F = \frac{dV}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

- Lưu lượng thể tích của chất khí phụ thuộc vào áp suất và nhiệt độ

$$F = \frac{P_0 T}{P T_0} F_0$$

- Với F_0 lưu lượng thể tích chuẩn tại áp suất P_0 và nhiệt độ tuyệt đối T_0 , F đo tại áp suất P và nhiệt độ tuyệt đối T

- Lưu lượng khối lượng [kg/s]

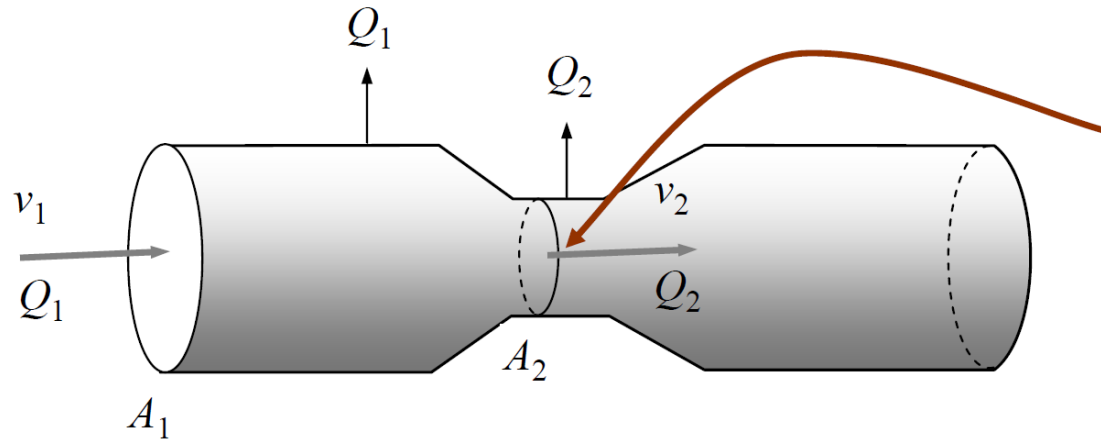
$$w = \rho F$$

Cảm biến lưu lượng



- Lưu lượng kế chênh áp: đo gián tiếp thông qua chênh áp, ví dụ: ống venturi, bản lỗ định cỡ (orifice plate), ống Pitot
- Lưu lượng kế turbin: đo gián tiếp thông qua tốc độ quay
- Lưu lượng kế điện từ: dựa trên thay đổi điện dung hoặc điện cảm khi dòng chảy thay đổi
- Lưu lượng kế siêu âm: đo không tiếp xúc sử dụng sóng siêu âm và xác định vận tốc dòng chảy dựa trên hiệu ứng Doppler
- Lưu lượng kế biến điện
- Lưu lượng kế che luồng xoáy
- Lưu lượng kế khối

Lưu lượng kế chênh áp



- ☐ Orifice Plate
- ☐ Dall Tube
- ☐ Venturi tube
- ☐ Pitot tube

- Lưu chất không nén được

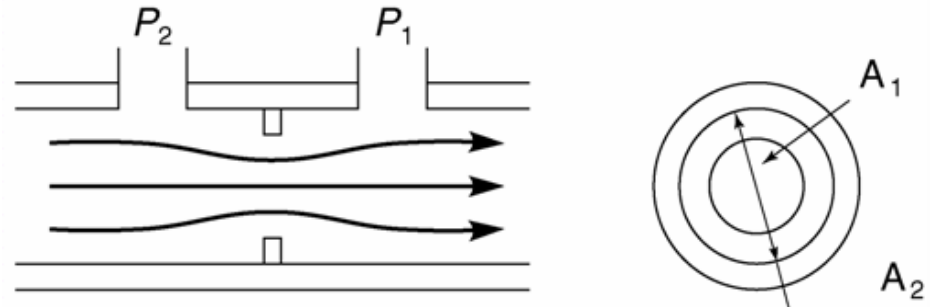
$$Q = C_D \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} = K\sqrt{\Delta P}$$

- Lưu chất nén được

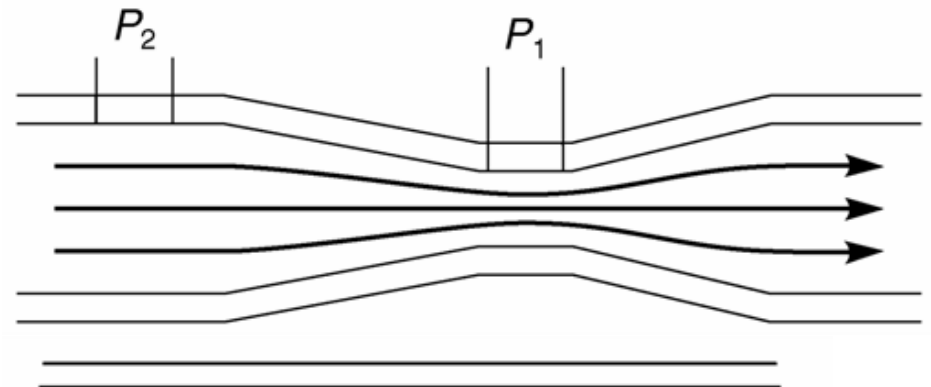
$$Q = \varepsilon C_D \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2(P_1 - P_2)} = \varepsilon E C_D A_2 \sqrt{2\rho_1(P_1 - P_2)}$$

Lưu lượng kế chênh áp

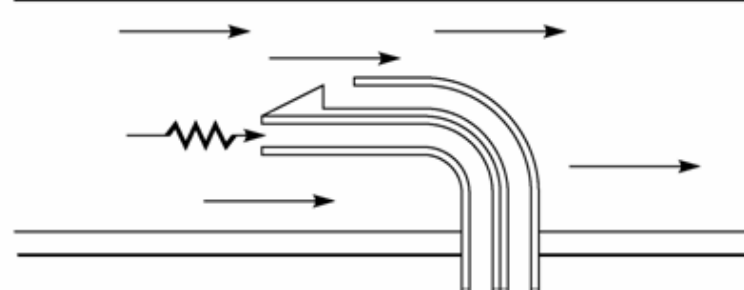
Orifice Plate



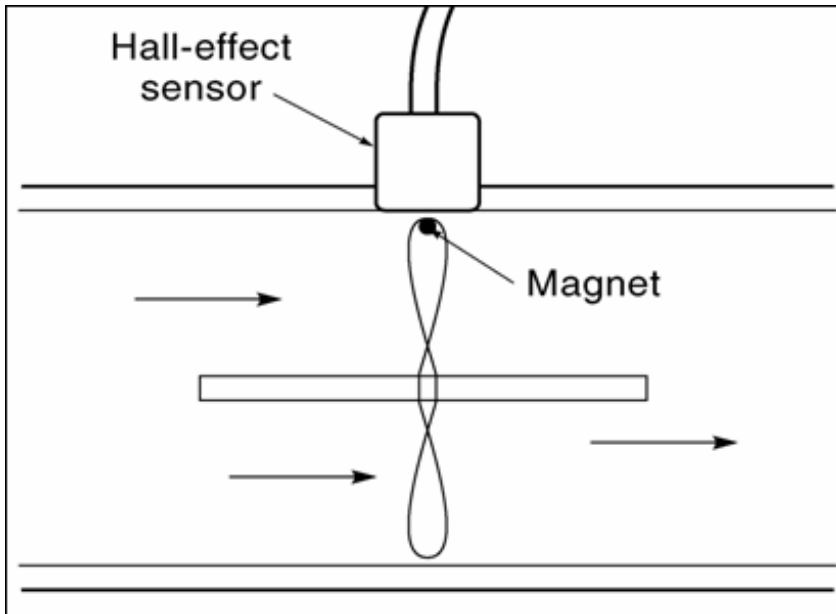
Venturi tube



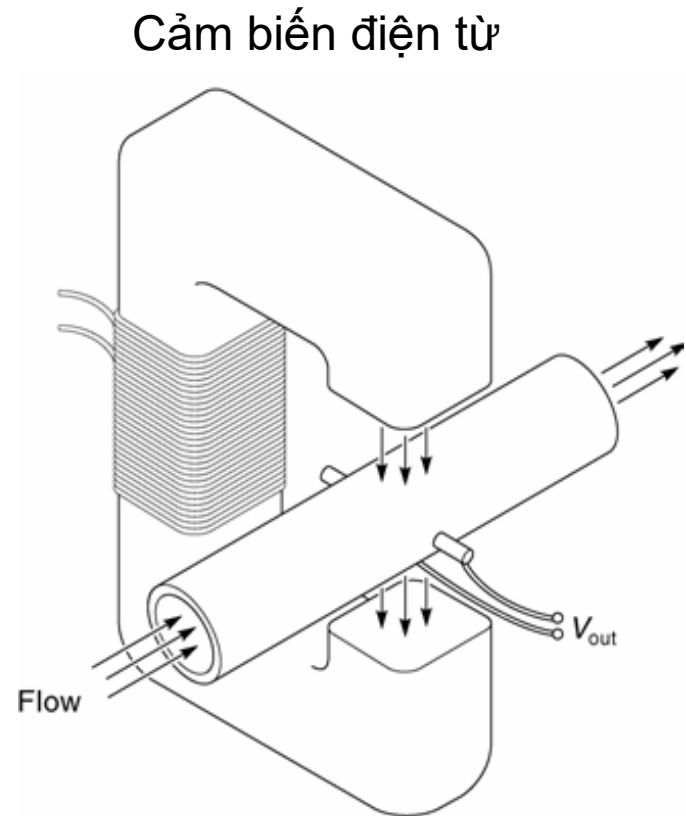
Pitot tube



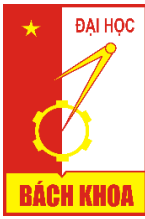
Lưu lượng kế



Cảm biến turbin

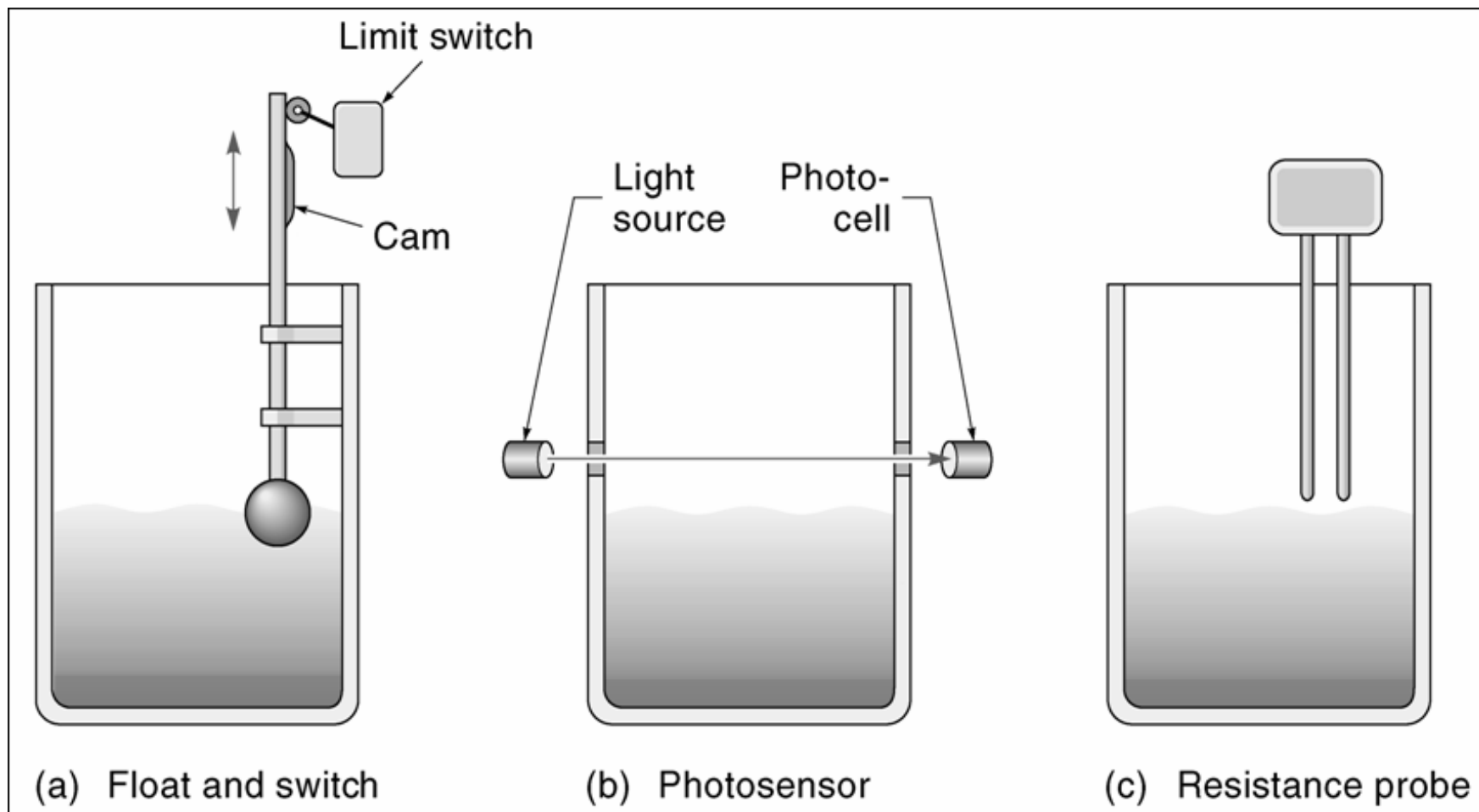


Cảm biến mức

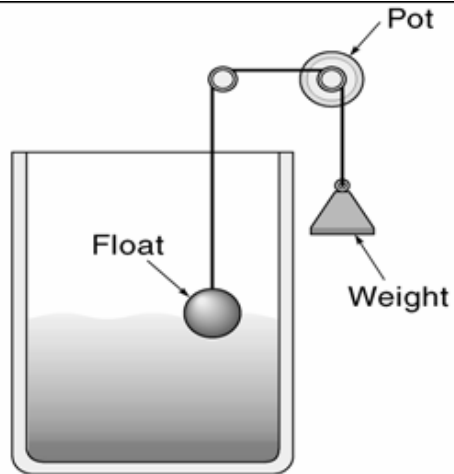


- Phương pháp tiếp xúc bề mặt: phao, que dò, dịch chuyển
- Phương pháp điện học: thay đổi điện trở, điện dung
- Phương pháp chênh áp: đo chênh lệch áp suất giữa 2 vị trí khác nhau
- Phương pháp siêu âm: sử dụng cảm biến siêu âm
- Phương pháp quang học:
- Phương pháp đo khối lượng: sử dụng cảm biến trọng lượng

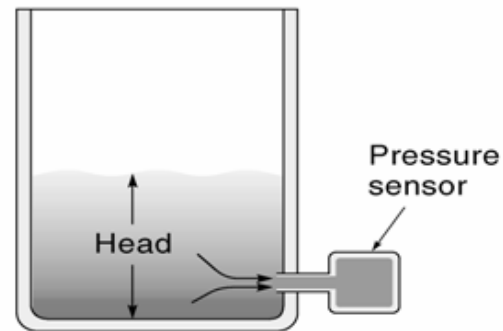
Cảm biến đo mức



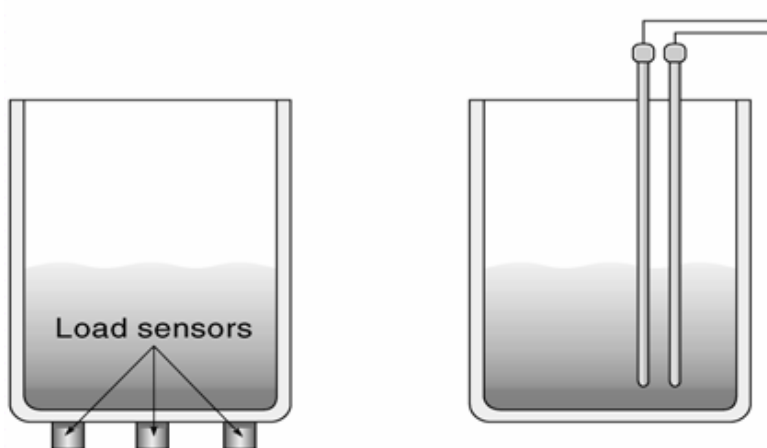
Cảm biến đo mức



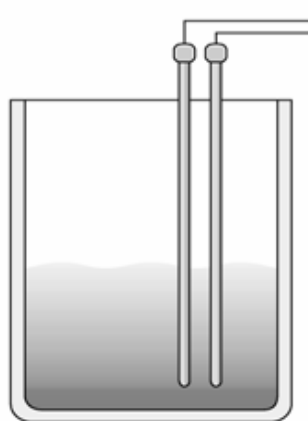
(a) Float and pot



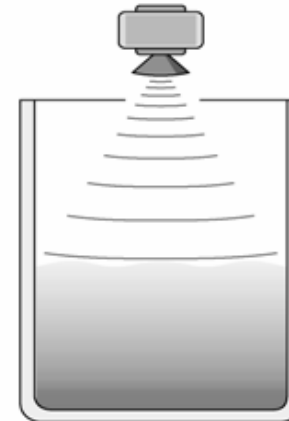
(b) Sensing pressure head



(c) Weighing tank

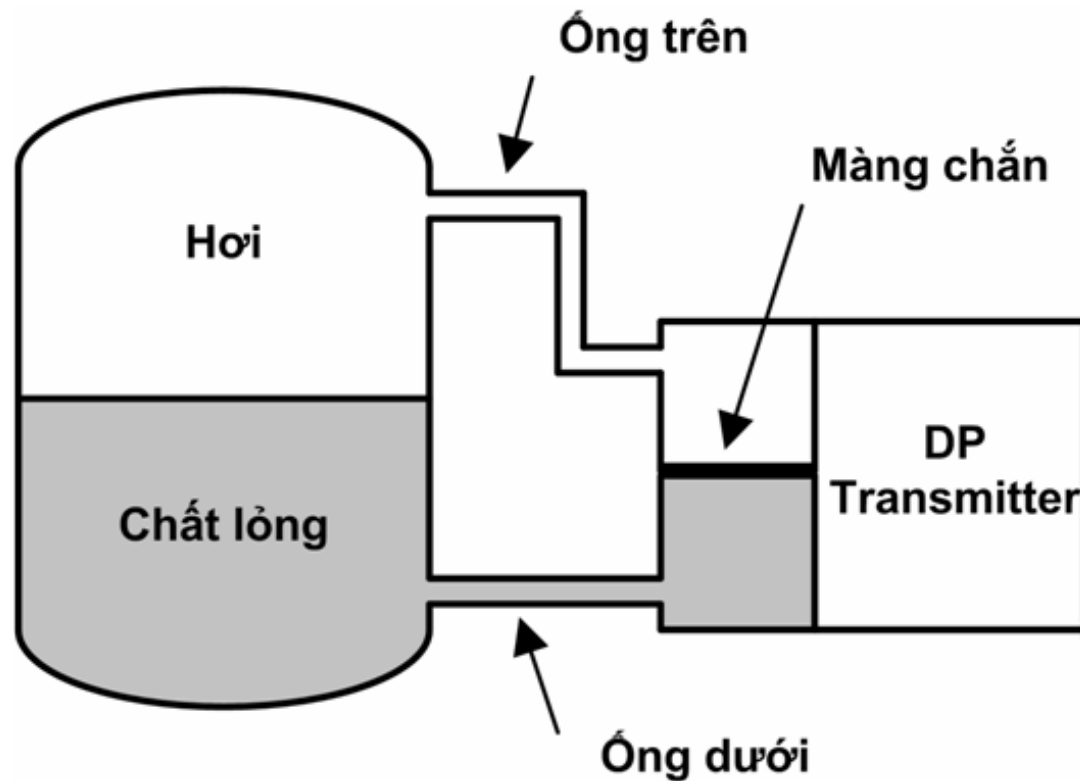


(d) Electrodes measure R or C



(e) Ultrasonic ranging

Ví dụ đo mức với phương pháp chênh áp



Cảm biến đo nồng độ, thành phần

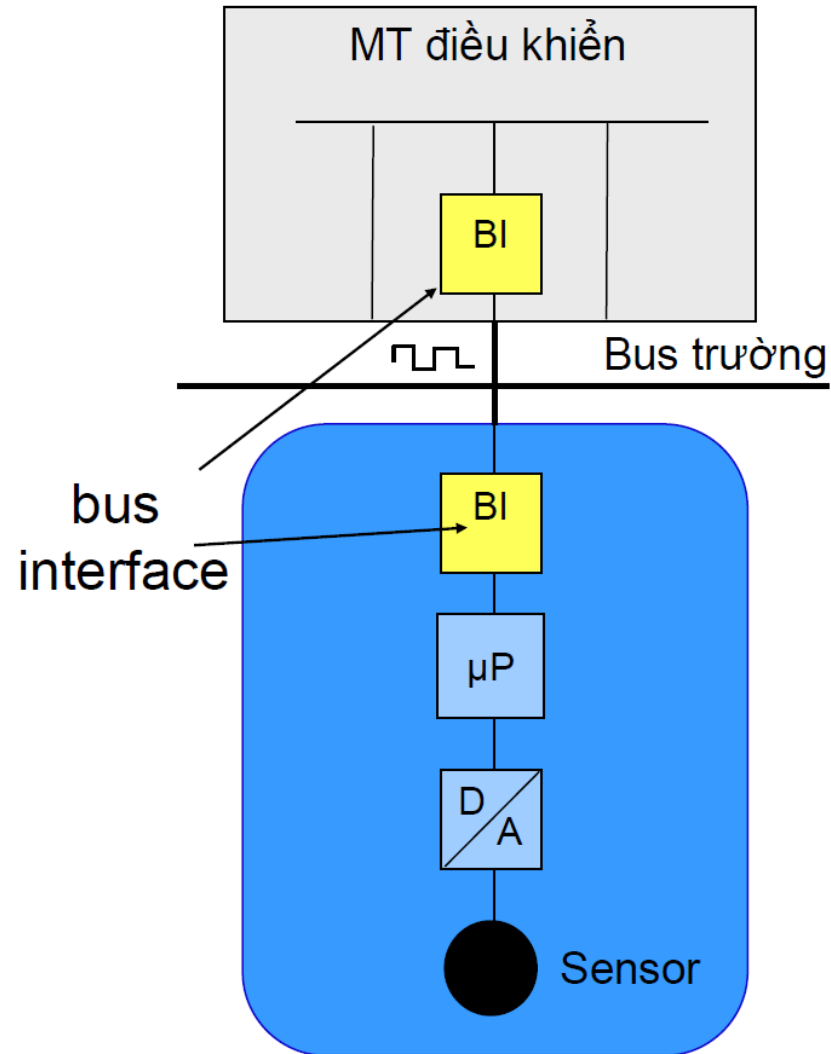
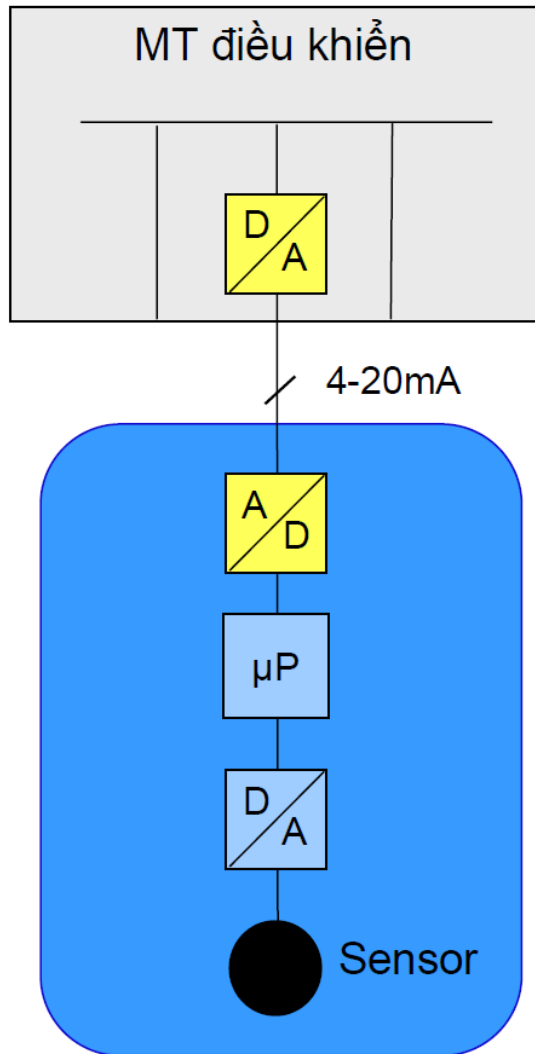


- Phép đo phức tạp nhất, tốn kém nhất, thời gian trễ cũng lớn nhất, độ tin cậy thấp có thể ảnh hưởng rất xấu tới chất lượng điều khiển
- Rất nhiều phương pháp đo khác nhau: Ghi sắc ký (gas-liquid chromatography, GLC), phép đo phổ và hấp thụ bức xạ (cực tím, siêu âm, ánh sáng thường) là các phương pháp thông dụng nhất
- Lựa chọn phương pháp đo phụ thuộc rất nhiều vào đặc điểm riêng của lưu chất
- Nhiều phép đo phân tích cần sự phối hợp của nhiều phương pháp khác nhau

3.2.4 Transmitter

- Điều hòa tín hiệu, chuyển đổi tín hiệu ra từ cảm biến sang tín hiệu chuẩn (4-20mA, 1-5 V,...), chủ yếu 4-20mA hoặc tín hiệu bus trường (đối với các thiết bị bus trường)
- Truyền phát, điều khiển đường truyền phục vụ truyền xa (tín hiệu tương tự hoặc tín hiệu bus trường)
- Có thể tích hợp các chức năng xử lý thông khác, ví dụ cảnh giới ngưỡng giá trị

Thiết bị thông thường và thiết bị bus trường



Ví dụ

Pressure Transmitter



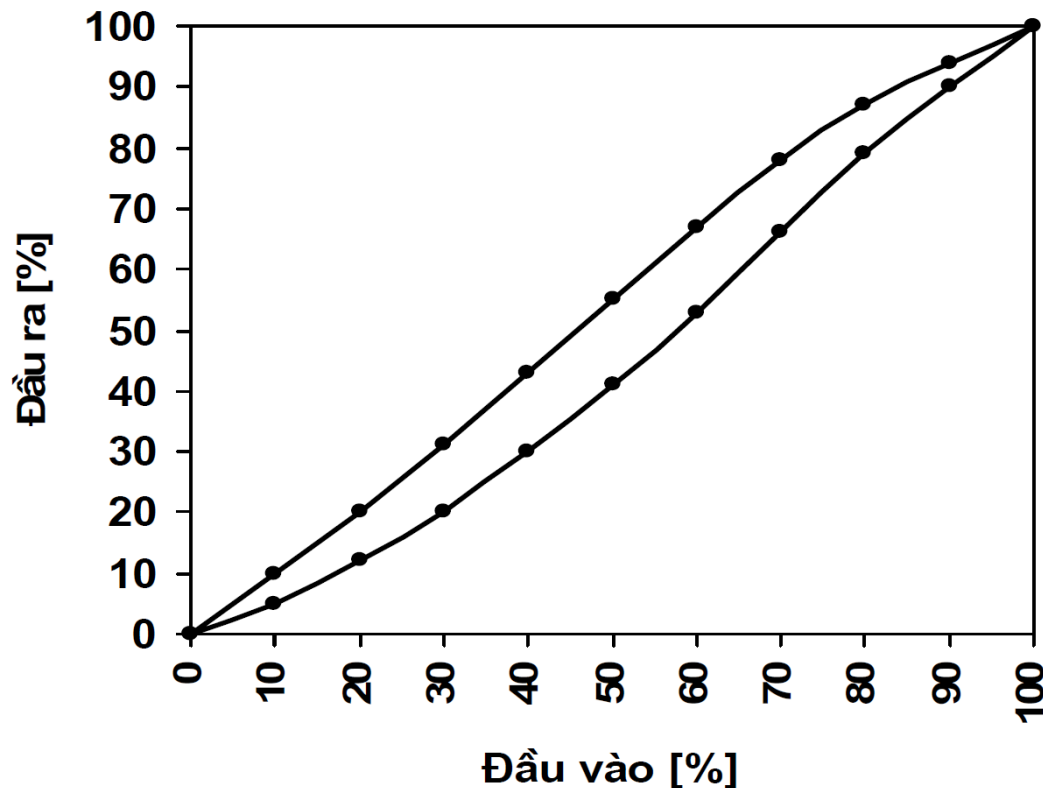
Flowmeter



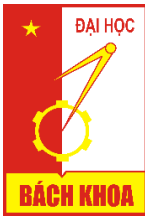
Level Transmitter

Định chuẩn thiết bị đo (calibration)

- Xác định độ chính xác của thiết bị đo, thể hiện qua bảng hoặc đồ thị định chuẩn
- Thực hiện hiệu chuẩn cho phù hợp với ứng dụng và nếu cần thiết thực hiện bù trong thuật toán điều khiển



3.2 Thiết bị chấp hành và van điều khiển



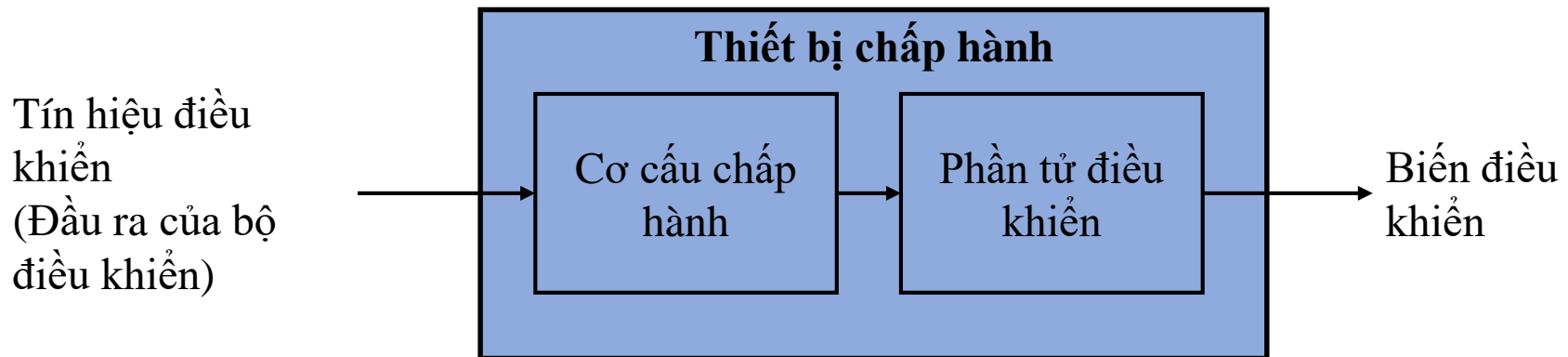
3.2.1 Cấu trúc chung của thiết bị chấp hành

3.2.2 Van điều khiển và phân loại

3.2.3 Đặc tính dòng chảy của van điều khiển

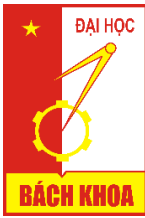
3.2.4 Đặc tính động học của van điều khiển

3.2 Thiết bị chấp hành và van điều khiển



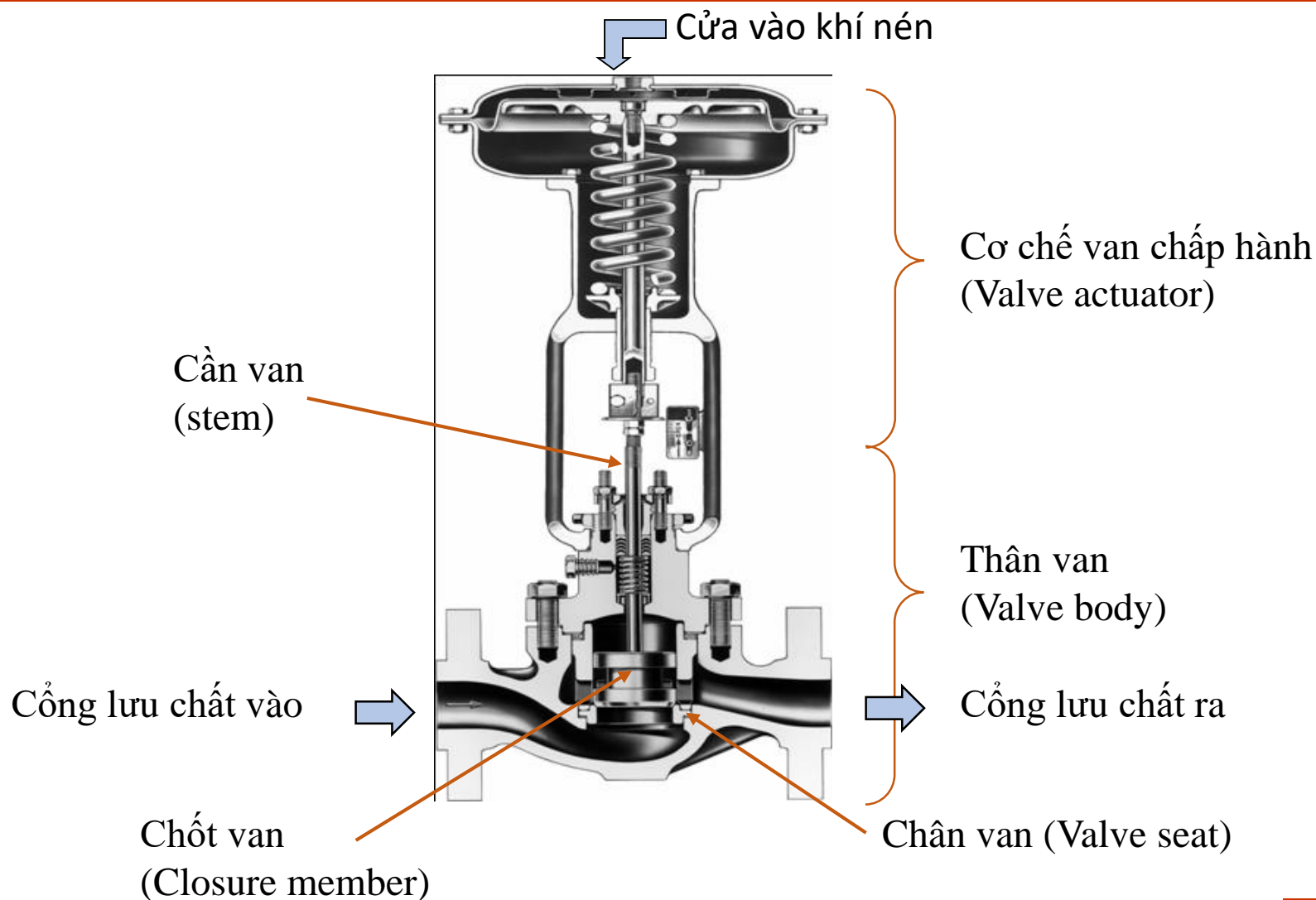
- *Thiết bị chấp hành (actuator system, final control element)*: thay đổi đại lượng điều khiển theo tín hiệu điều khiển, ví dụ van điều khiển, máy bơm, quạt gió, hệ thống băng tải
- *Phần tử điều khiển (control element)*: Can thiệp trực tiếp tới đại lượng điều khiển, ví dụ van tỉ lệ, van on/off, tiếp điểm, sợi đốt, băng tải
- *Cơ cấu tác động, cơ cấu chấp hành (actuator, actuating element)*: cơ cấu truyền động, truyền năng cho phần tử chấp hành, ví dụ động cơ (điện), cuộn hút, cơ cấu khí nén

3.2.2 Van điều khiển và các phụ kiện

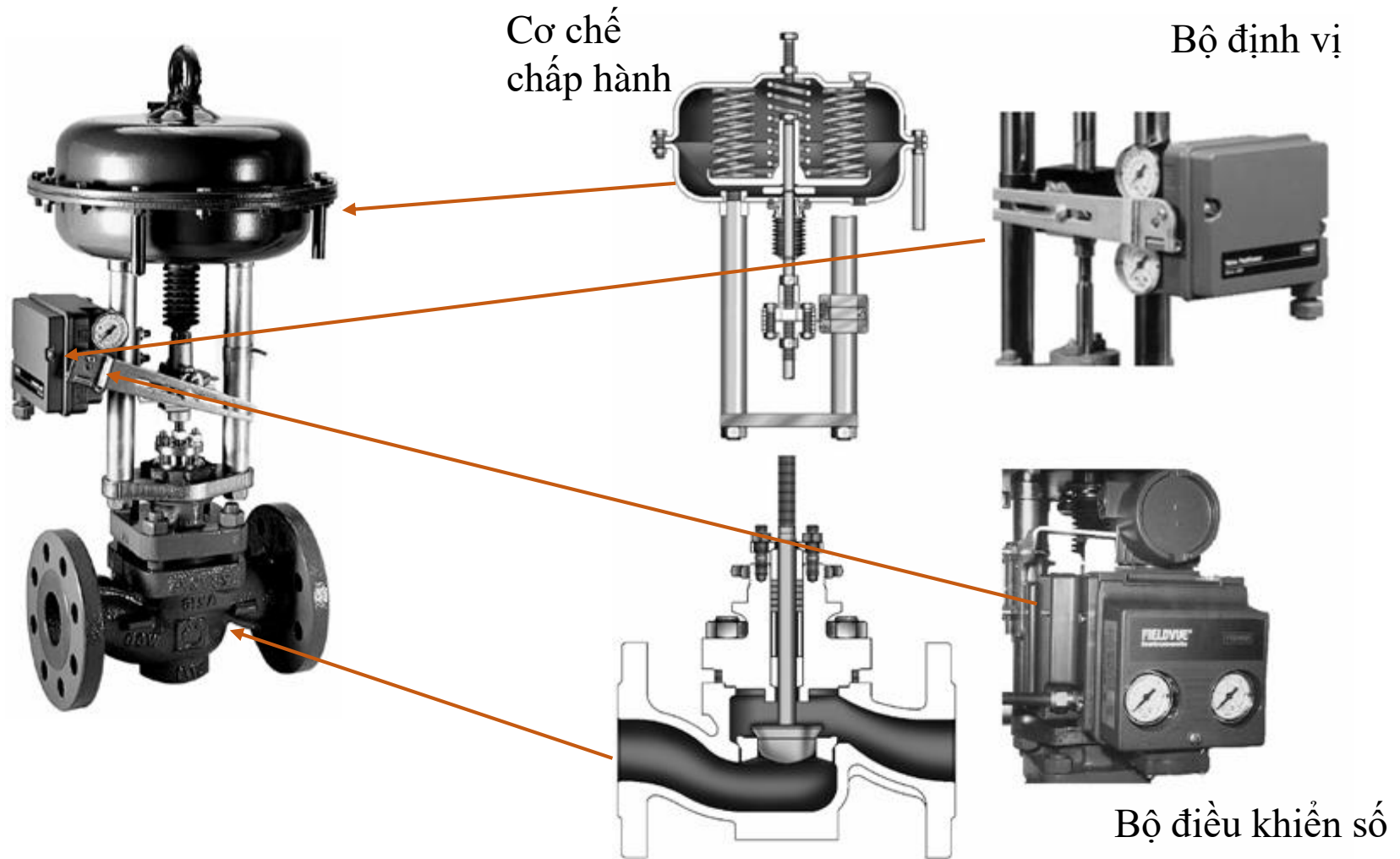


- Van điều khiển (control valve):
 - Thiết bị chấp hành quan trọng và phổ biến nhất trong hệ thống điều khiển quá trình, cho phép điều chỉnh lưu lượng lưu chất qua các đường ống dẫn.
 - Bao gồm thân van nối với một cơ chế chấp hành (cùng với các phụ kiện liên quan) có khả năng thay đổi độ mở van theo tín hiệu từ bộ điều khiển.
- Cơ chế chấp hành (actuator):
 - Một cơ chế truyền động khí nén, thủy lực hoặc điện để định vị thành phần đóng mở van.
- Các phụ kiện van:
 - Khâu chuyển đổi (transducer)
 - Bộ định vị (positioner)
 - Rơ le tăng áp (booster relay)
 - Cảm biến giới hạn (limit switches)
 - Van cuộn hút (solenoid valve)
 - ...

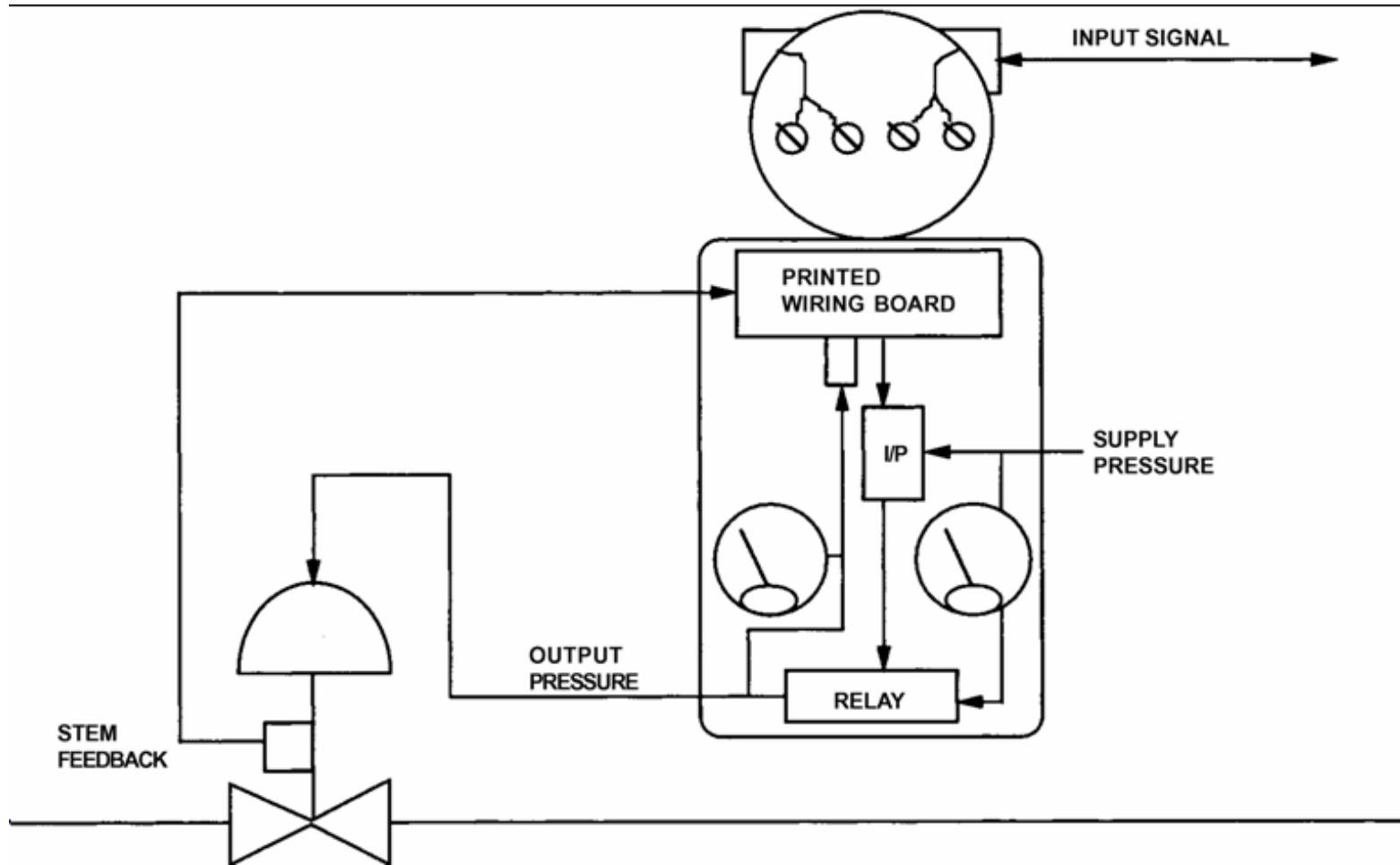
Các bộ phận cơ bản của van điều khiển



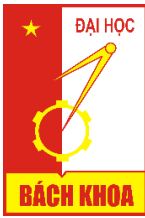
Ví dụ các bộ phận và phụ kiện van cầu



Ví dụ sơ đồ khối một van điều khiển

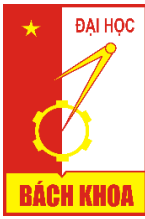


Phân loại van điều khiển



- Phân loại theo kiểu truyền động
 - Điện-cơ: sử dụng động cơ servo hoặc động cơ bước
 - Thủy lực: sử dụng bơm dầu kết hợp màng chắn hoặc piston
 - Khí nén: sử dụng khí nén kết hợp màng chắn hoặc piston
 - Kết hợp điện-thủy lực, điện-khí nén
 - Từ: sử dụng cuộn hút kết hợp lò xo
- Phân loại theo tính chất chuyển động
 - Van trượt (linear valve): cần van (stem) chuyển động thẳng
 - Van xoay (rotary valve): trục van (shaft) chuyển động xoay

Phân loại van điều khiển (tiếp)



- Phân loại theo thiết kế chốt van
 - Van cầu (globe valve): Chốt trượt đầu hình cầu/hình nón
 - Van nút (plug valve): Chốt xoay hình trụ
 - Van bi (ball valve): Chốt xoay hình cầu hoặc một phần hình cầu
 - Van bướm (butterfly valve): Chốt xoay hình đĩa
- Phân loại theo loại tín hiệu vào
 - Van tương tự: đầu vào 4-20mA, 3-15psi
 - Van số: đầu vào số trực tiếp hoặc qua bus trường

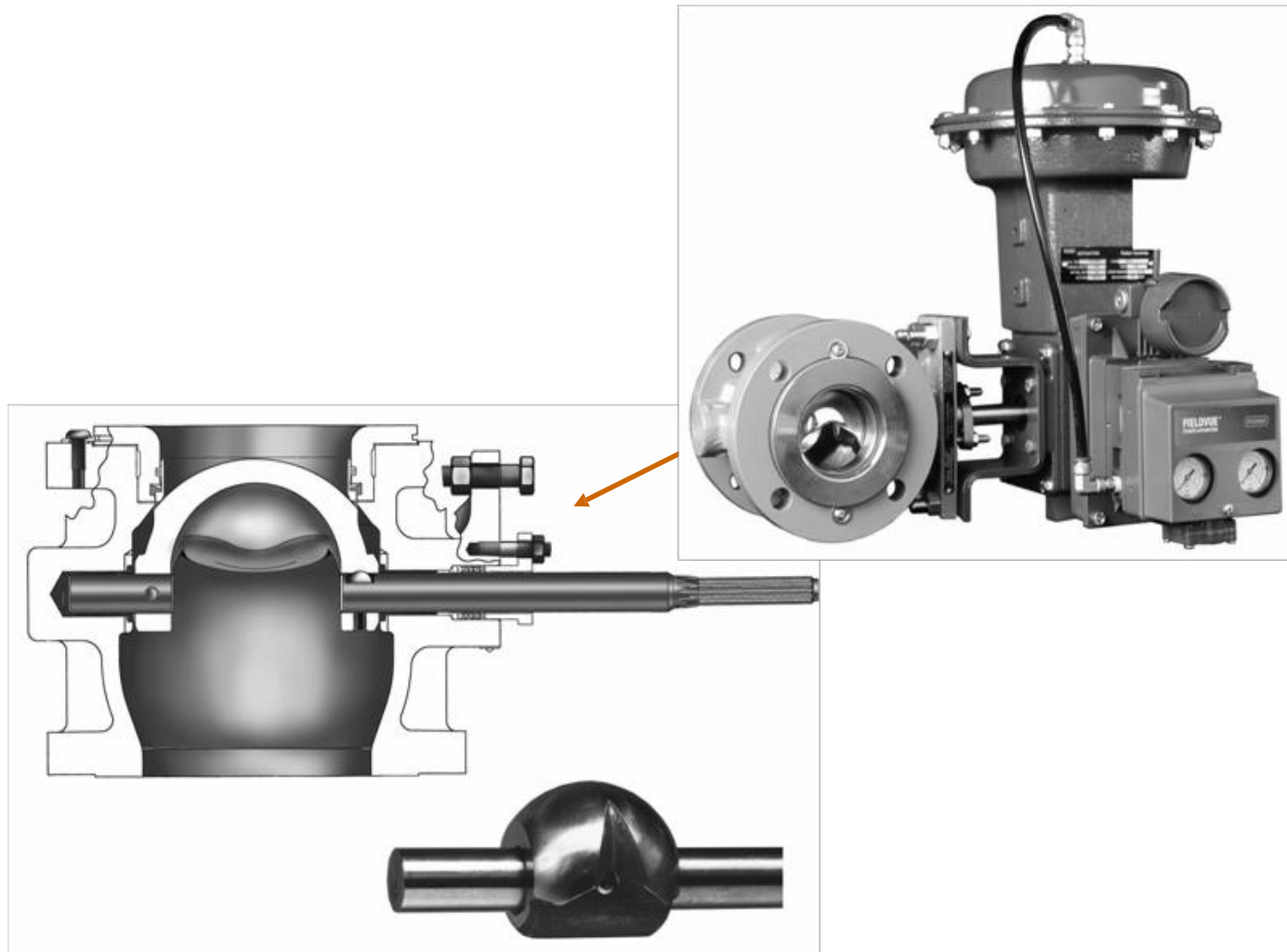
Ví dụ van cầu (Fisher Controls)



Tích hợp bộ điều khiển số định vị
(truyền động khí nén)

Tích hợp chuyển đổi I/P
(truyền động điện-khí nén)

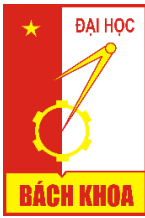
Ví dụ van bi (Fisher Controls)



Ví dụ van bướm (Baumann)

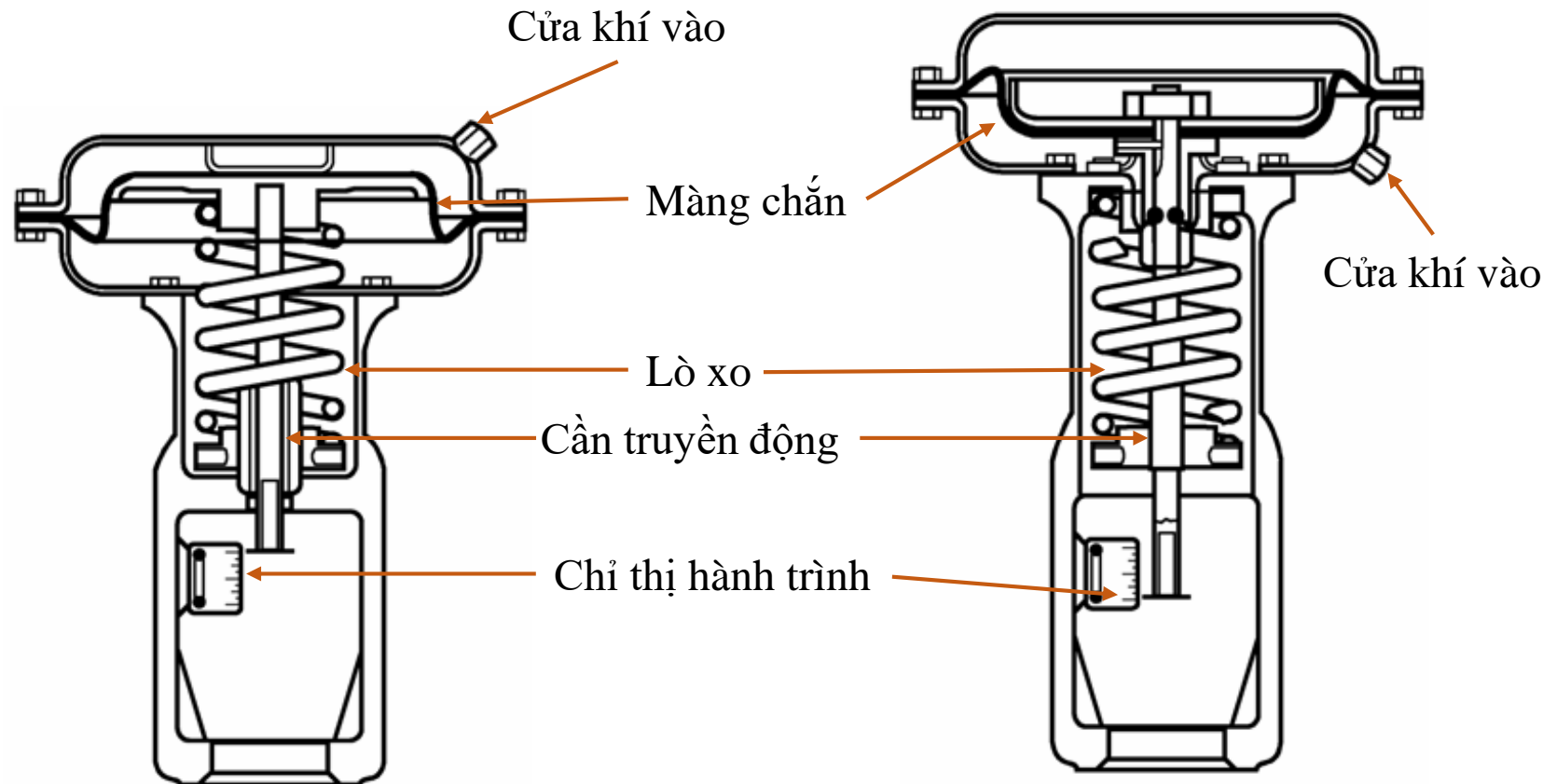


Cơ cấu chấp hành (actuators)



- Phân loại theo năng lượng truyền động (điện, thủy lực, khí nén, điện-khí nén, điện-thủy lực)
- Phân loại theo cơ cấu truyền động
 - Màng rung (Bellows):
 - Màng chắn (Diaphragm):
 - Piston
 - Vane
- Phân loại theo kiểu tác động
 - Tác động đơn (Single-acting): a device in which the power supply acts in only one direction, e.g., a spring diaphragm actuator or a spring return piston actuator.
 - Tác động kép (Double-acting): a device in which power is supplied in either direction

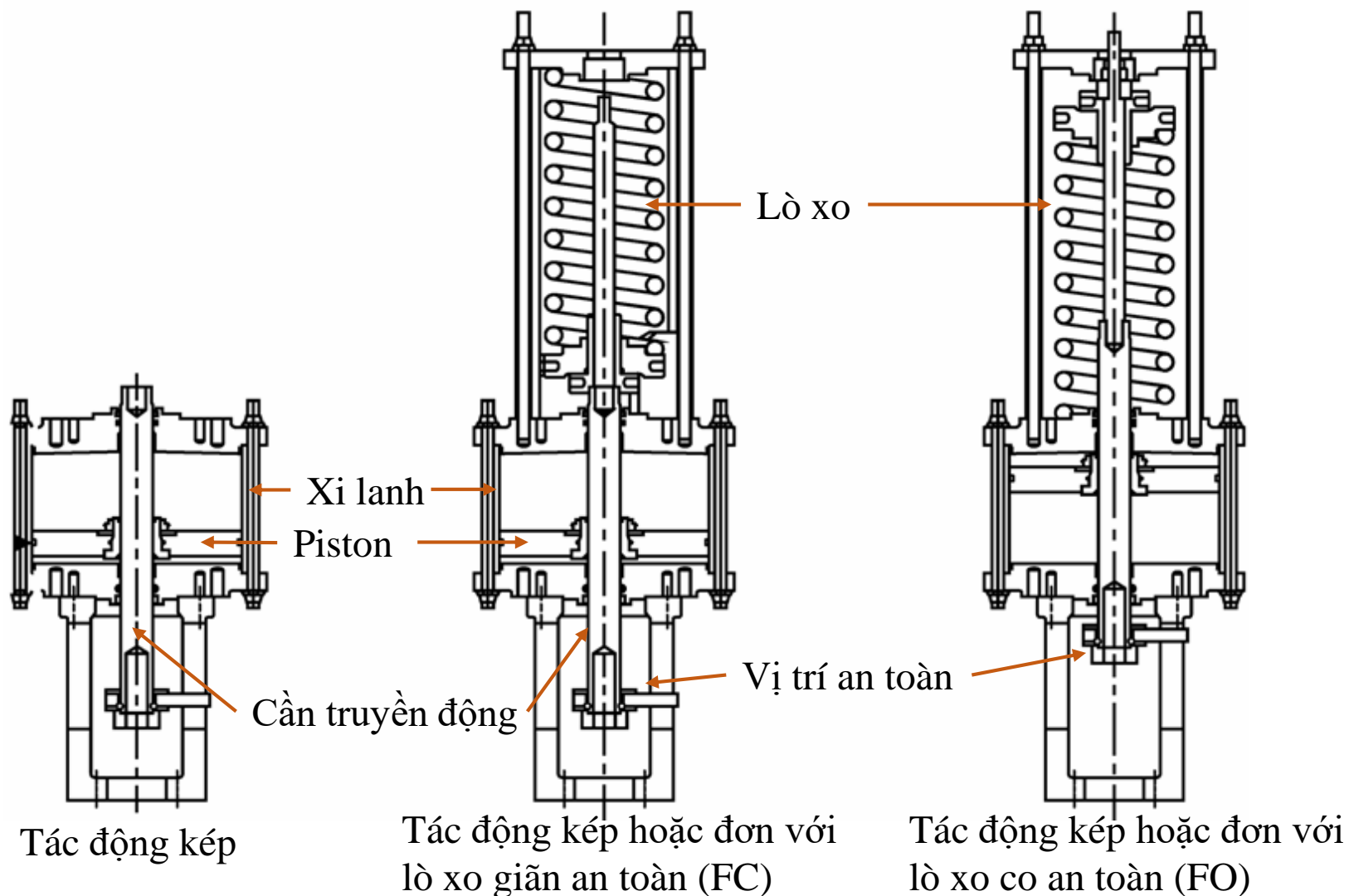
Tác động khí nén: Cơ chế lò xo/màng chắn



a) Mở khi sự cố (FO, AC)
(Fail-Open hay Air-to-close)

b) Đóng khi sự cố (FO, AC)
(Fail-Closed hay Air-to-Open)

Tác động khí nén: Cơ chế piston



Kiểu tác động của van

- Đóng an toàn (fail-closed, FC hoặc air-to-open, AO)
- Mở an toàn (fail-open, FO hoặc air-to-close, AC)
- Lựa chọn kiểu tác động của van phụ thuộc vào yêu cầu an toàn hệ thống

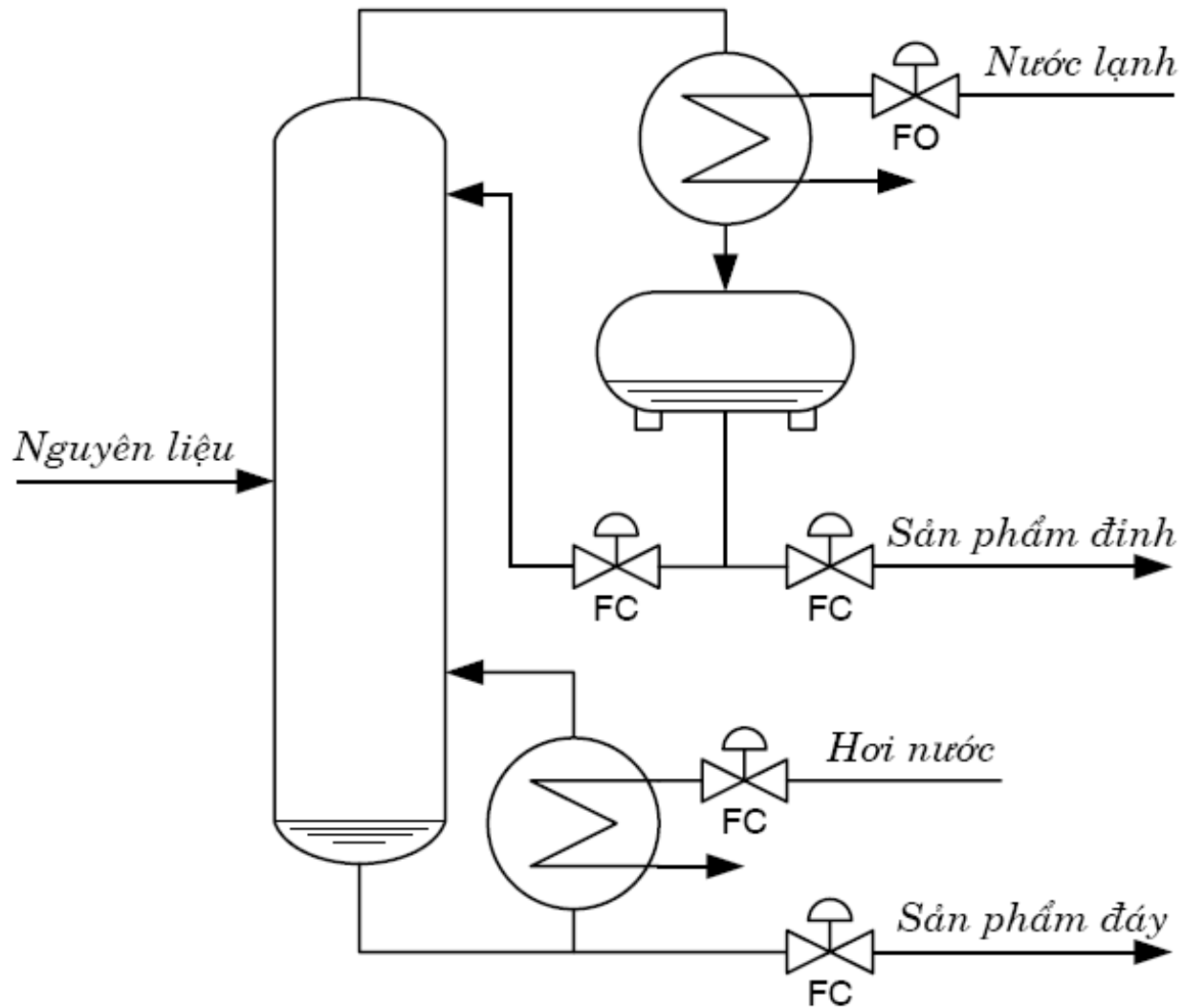


a) Van đóng an toàn



b) Van mở an toàn

Ví dụ



3.2.2 Đặc tính dòng chảy

- Đặc tính van (Valve characteristic): Quan hệ giữa lưu lượng qua van và độ mở van
- Đặc tính dòng chảy (đặc tính tĩnh):
 - Đặc tính dòng chảy cố hữu (Inherent flow characteristic): Đặc tính tĩnh của van trong điều kiện áp suất sụt qua van không đổi
 - Đặc tính dòng chảy lắp đặt (Installed flow characteristic): Đặc tính tĩnh của van sau khi lắp đặt

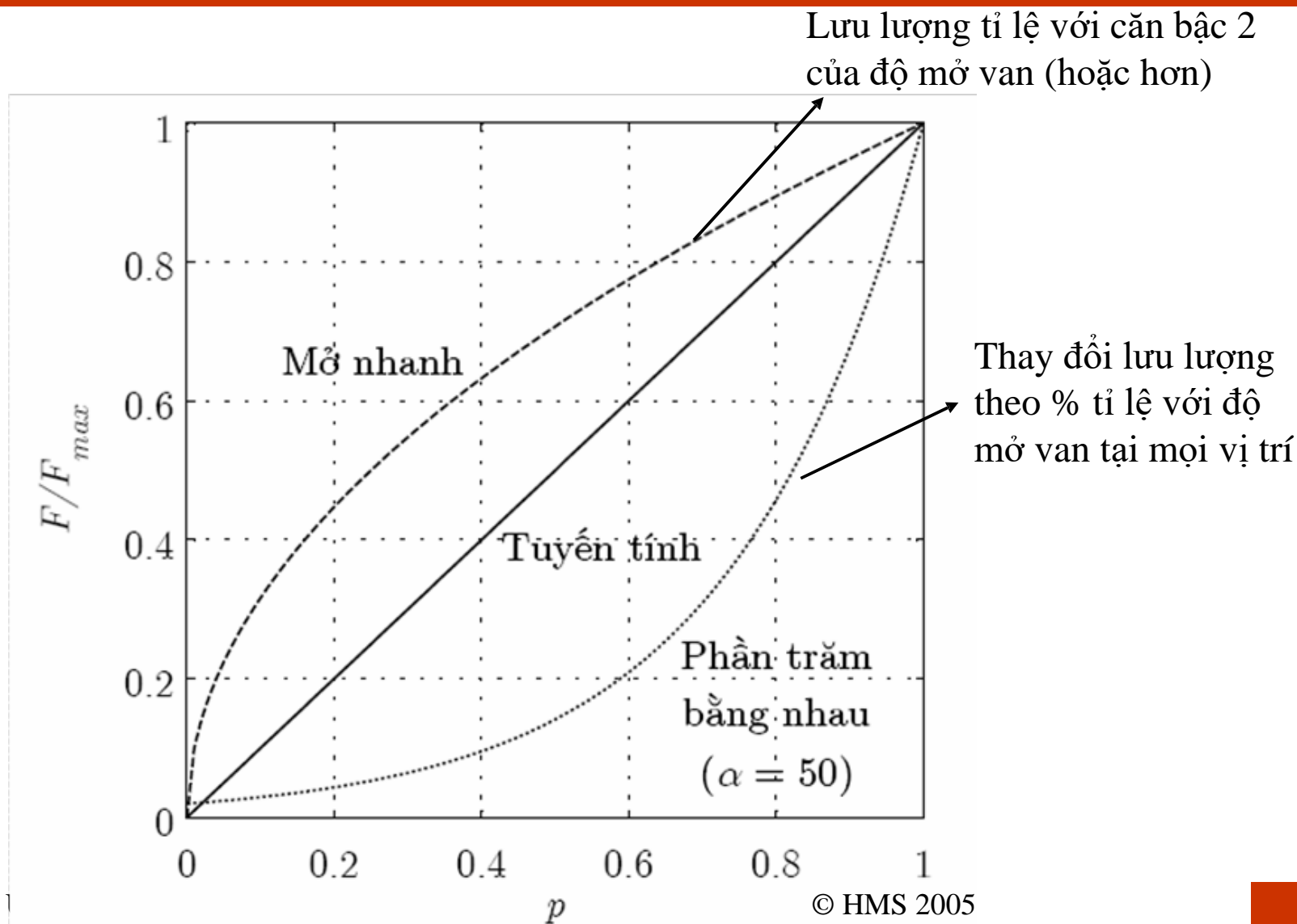
Đặc tính dòng chảy cổ hữu

- Phân biệt 3 loại van:
 - Van tuyến tính (Linear):
 - Van mở nhanh (Quick Opening):
 - Van tỉ lệ phần trăm bằng nhau (Equal Percentage):
- Ví dụ cho dòng chất lỏng chảy dòng

$$F = C_v f(p) \sqrt{\frac{\Delta P}{g_s}}, \quad f(p) = F / F_{max}$$

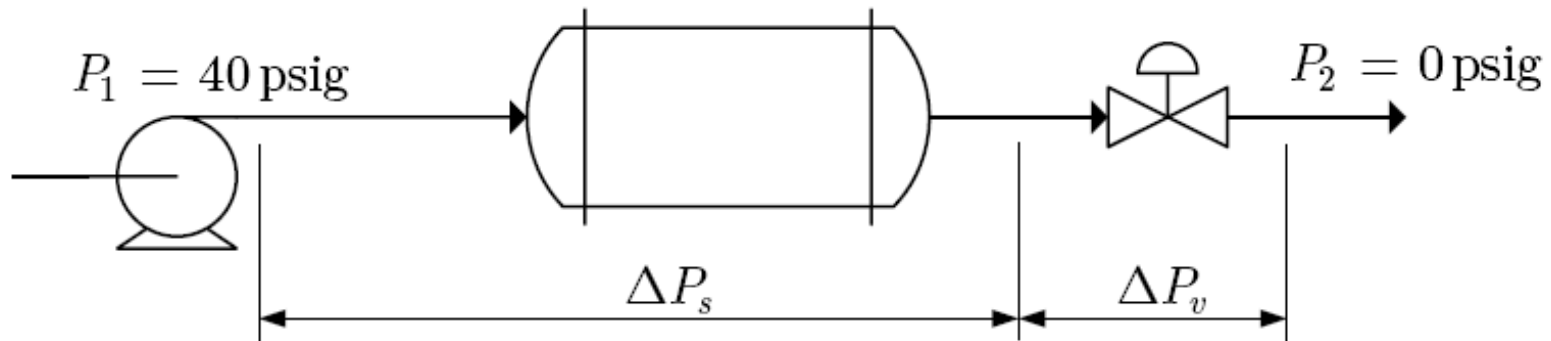
- F là lưu lượng chất lỏng qua van
- ΔP là áp suất sụt qua van
- C_v là hệ số van (phụ thuộc vào thiết kế và kích cỡ van)
- g_s là trọng lượng riêng của chất lỏng (=1 đối với nước ở 15°C)
- Hàm $f(p)$ biểu diễn đặc tính van theo độ mở van p
 - Van tuyến tính (Linear): $f = p$
 - Van QO (Quick Opening): $f = \sqrt{p}$
 - Van EP (Equal Percentage): $f = \alpha^{p-1}$ ($20 \leq \alpha \leq 50$)

Các đặc tính cơ hữu tiêu biểu



Đặc tính dòng chảy lắp đặt

■ Ví dụ minh họa



■ Van tuyến tính và giả thiết $\Delta P_s = 30 \text{ psi}$

- Chọn hệ số van C_v sao cho độ mở van $p = 0.5$ tương ứng với lưu lượng thiết kế 200 gal/min:

$$C_v = \frac{\bar{F}}{p \sqrt{\Delta P_v}} = \frac{200}{0.5 \sqrt{10}} = 126.5$$

Đặc tính dòng chảy lắp đặt (tiếp)



- Khi lưu lượng F giảm xuống 25% (50 gal/min):

$$\Delta P_s(F) = 30 \times (0.25)^2 = 18.75 \text{ [psi]}$$

$$\Delta P_v = 40 - 1.875 = 38.125 \text{ [psi]}$$

$$p = \frac{F}{C_v \sqrt{\Delta P_v(F)}} = \frac{50}{126.5 \times 38.125} = 0.064$$

(không phải $0.5/4 = 0.125$ như mong đợi)

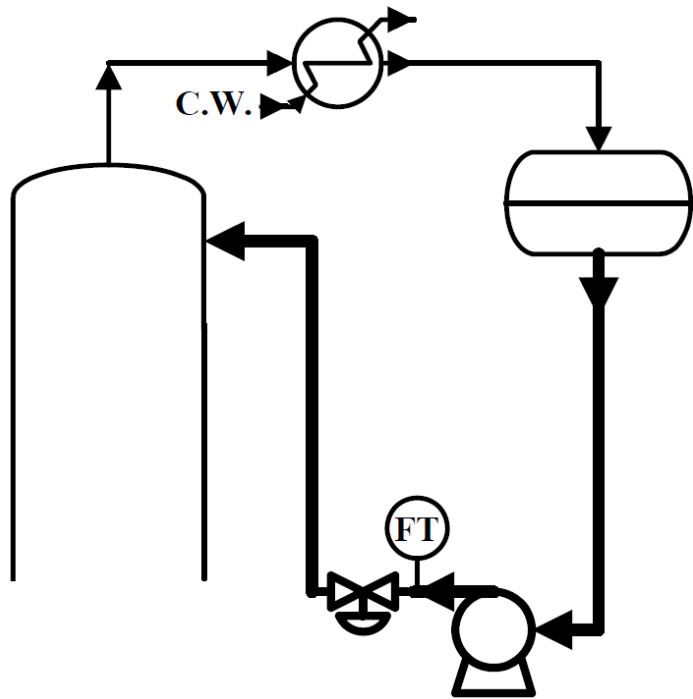
- Van EP ($\alpha = 50$)

$$C_v = \frac{\bar{F}}{\alpha^{p-1} \sqrt{\Delta P_v}} = \frac{200}{0.5^{-0.5} \sqrt{10}} = 44.7$$

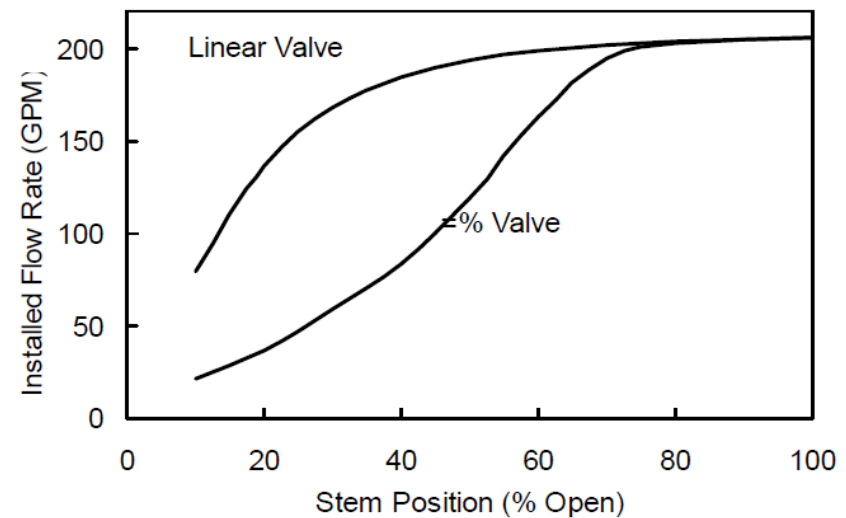
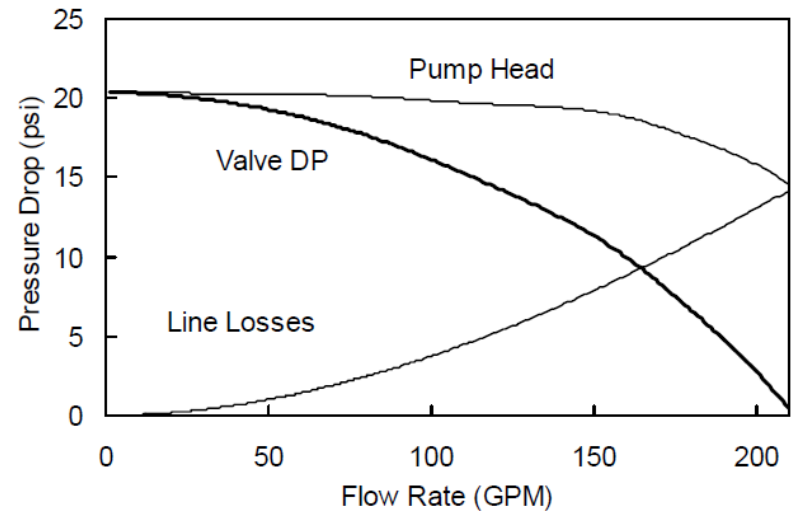
- Để giảm lưu lượng xuống $F = 50$ gallons /phút:

$$p = \log_{\alpha} \left(\frac{F}{C_v \sqrt{\Delta P_v(F)}} \right) + 1 = \log_{50} \left(\frac{50}{44.7 \times 38.125} \right) + 1 \approx 0.1$$

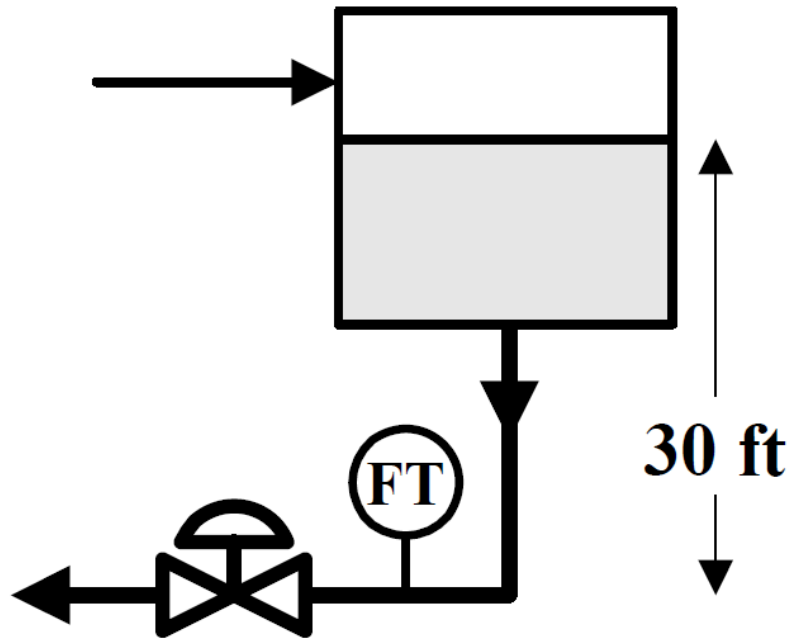
Hệ thống dòng chảy thông thường



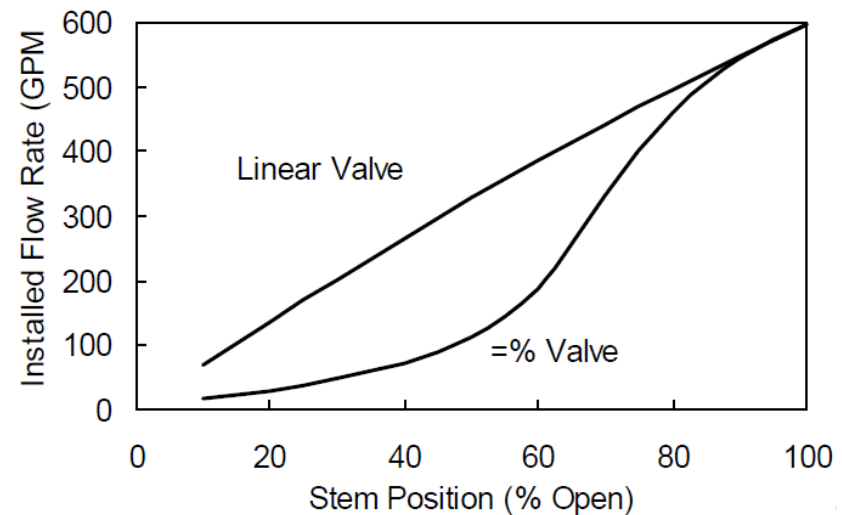
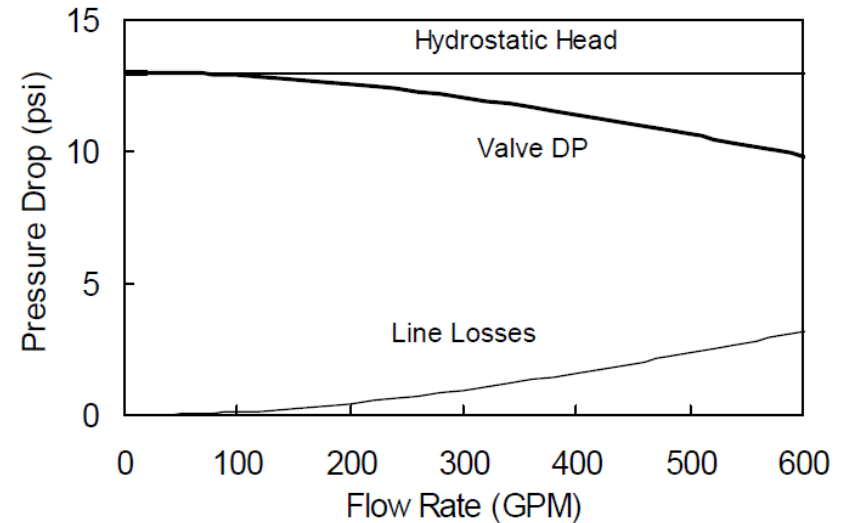
➔ Van EP có đặc tính lắp đặt gần tuyến tính hơn van tuyến tính!



Hệ thống với sụt áp suất ít thay đổi



Van tuyến tính có đặc tính lắp đặt tốt hơn

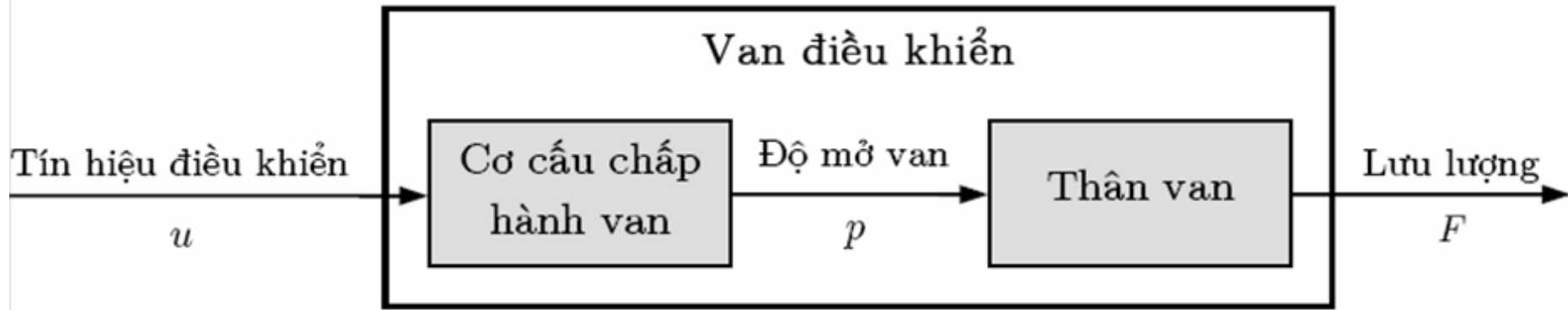


Lựa chọn đặc tính van điều khiển



- Quick Opening: Được sử dụng cho các van thoát an toàn, cần đóng mở nhanh
- Linear: Được sử dụng khi áp suất sụt qua van được giữ tương đối cố định
- Equal Percentage: Chiếm tới khoảng 90% các ứng dụng van điều khiển bởi đặc tính lắp đặt gần tuyến tính. Khi tỉ lệ sụt áp suất qua van với lưu lượng thấp nhất và cao nhất lớn hơn 5 \Rightarrow nên chọn van EP.

3.2.4 Đặc tính động học của van điều khiển



- Mô hình động học van điều khiển thường có thể đưa về một khâu quán tính bậc nhất:

$$G_v(s) = \frac{F(s)}{u(s)} = \frac{k_v}{\tau_v s + 1} \qquad k_v = \frac{dF}{du} = \frac{dF}{dp} \frac{dp}{du}$$

- τ_v : 3-15 giây

Đơn giản hóa cho cơ chế chấp hành $\Rightarrow k_v = \begin{cases} \frac{dF}{dp}, & \text{cho van FC} \\ -\frac{dF}{dp}, & \text{cho van FO} \end{cases}$

Bộ định vị van (Valve Positioner)



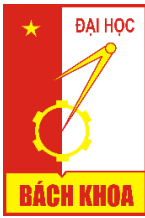
- Vấn đề: van điều khiển thông thường có độ chính xác không cao (có thể sai số vị trí tới 5%) do:
 - Dải chết (Deadband), độ trễ (Hysteresis)
 - Ma sát thay đổi do bụi bẩn, thiếu bôi trơn và han gỉ
 - Áp suất lưu chất thay đổi
 - Đặc tính phi tuyến của cơ chế chấp hành
- Bộ định vị: Sử dụng tín hiệu đo vị trí mở van thực và tác động tới cơ chế chấp hành để điều chỉnh độ mở van chính xác hơn theo tín hiệu điều khiển
 - Thực chất là một bộ điều khiển vòng trong, trong cấu trúc điều khiển tầng
 - Thông thường chỉ sử dụng luật tỉ lệ với hệ số khuếch đại tương đối lớn (10-200)
 - Có thể giảm sai số vị trí xuống tới 0.5%

Khi nào nên sử dụng bộ định vị



- Nên sử dụng khi:
 - Cần độ chính xác cao hoặc tăng tốc độ tác động
 - Động học của quá trình chậm hơn đáng kể so với của van (hằng số thời gian lớn hơn 3 lần so với của van), ví dụ quá trình phản ứng, quá trình nhiệt, quá trình trộn,
 - ...
- Không nên sử dụng khi
 - Quá trình tương đối nhanh (hằng số thời gian không lớn hơn 3 lần so với của van): bộ định vị có thể làm chậm và giảm chất lượng điều khiển vòng ngoài
 - Đã sử dụng một bộ điều khiển số tại chỗ (tích hợp với van), bộ điều khiển số đã đóng vai trò định vị

3.3 Thiết bị điều khiển



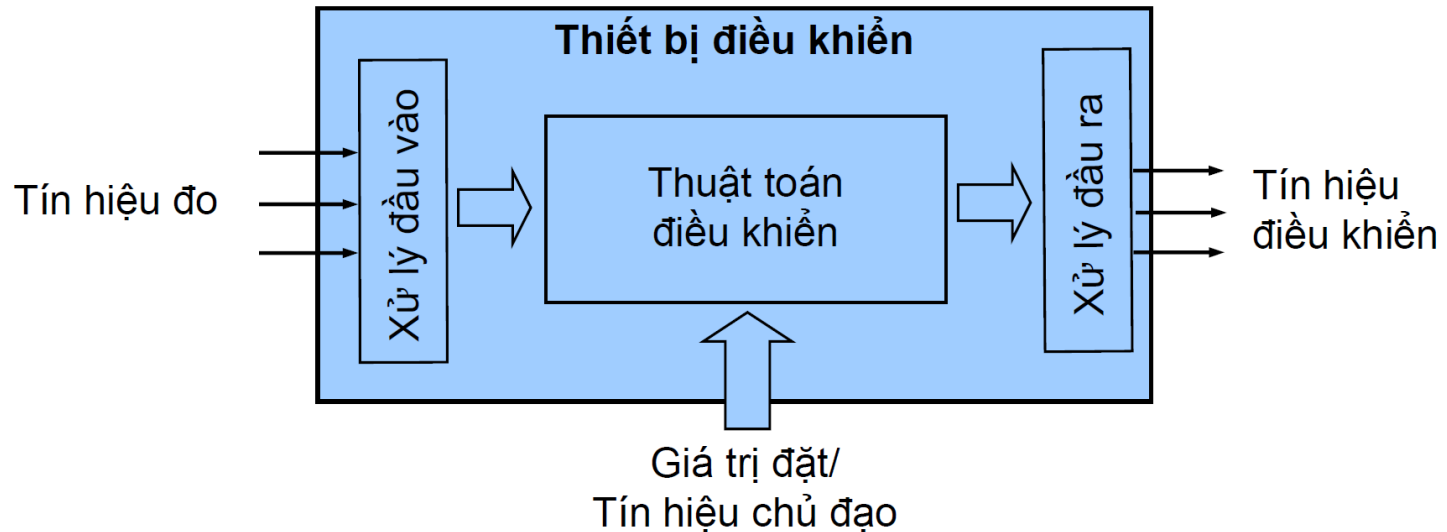
3.3.1 Giới thiệu chung

3.3.2 Thuật toán điều khiển hai vị trí

3.3.3 Thuật toán PID lý tưởng

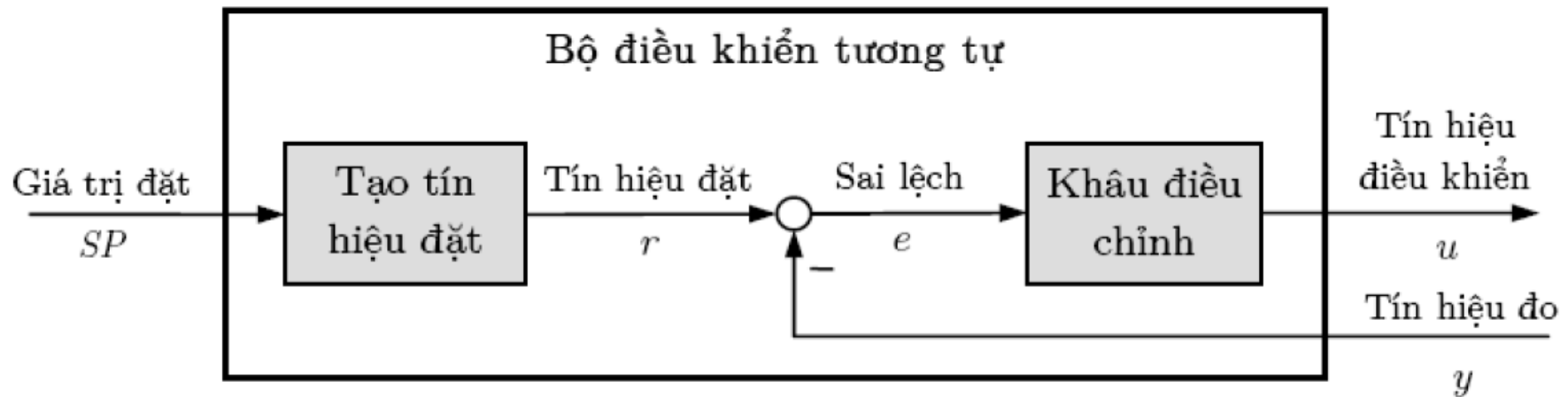
3.3.4 Bộ điều khiển PID thực

3.3.1 Giới thiệu chung

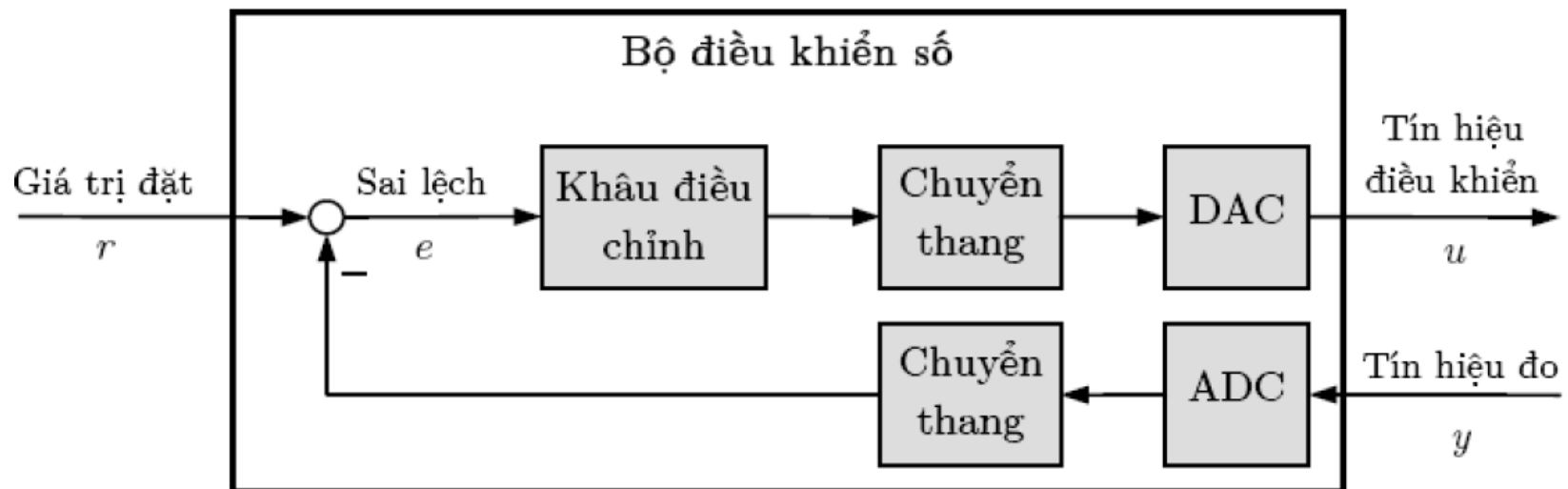


- *Control equipment*: Thiết bị điều khiển, vd PLC, IPC, Digital Controller, DCS Controller,...
- *Controller*: Bộ điều khiển, có thể hiểu là
 - Cả thiết bị điều khiển, hoặc
 - Chỉ riêng khối tính toán điều khiển, vd PI, PID, FLC, ON/OFF,...

Cấu trúc các bộ điều khiển phản hồi



(a)



(b)

ĐIỀU KHIỂN QUÁ TRÌNH (Công nghiệp chế biến, khai thác)

Các bộ điều chỉnh cơ

Thiết bị điều chỉnh PID khí nén
(1920-1930)

Thiết bị điều chỉnh PID điện tử
(1940-1950)

Điều khiển số trực tiếp
(DDC, 1965-1975)

Bộ điều chỉnh số gọn
(CDC, 1980)

PC công nghiệp (IPC)
PC-104, CompactPCI, SBC
(PC-based Control)

Hệ ĐKPT tích hợp
(DCS, 1975)

PC-based DCS

Hệ điều khiển lai
Hệ điều khiển trường (FCS, 2000)

ĐIỀU KHIỂN RỜI RẠC (Công nghiệp chế tạo, lắp ráp)

Các thiết bị cơ khí

Role điện – cơ,
(1920)

Các mạch logic lập trình cứng
(PLD, 1960)

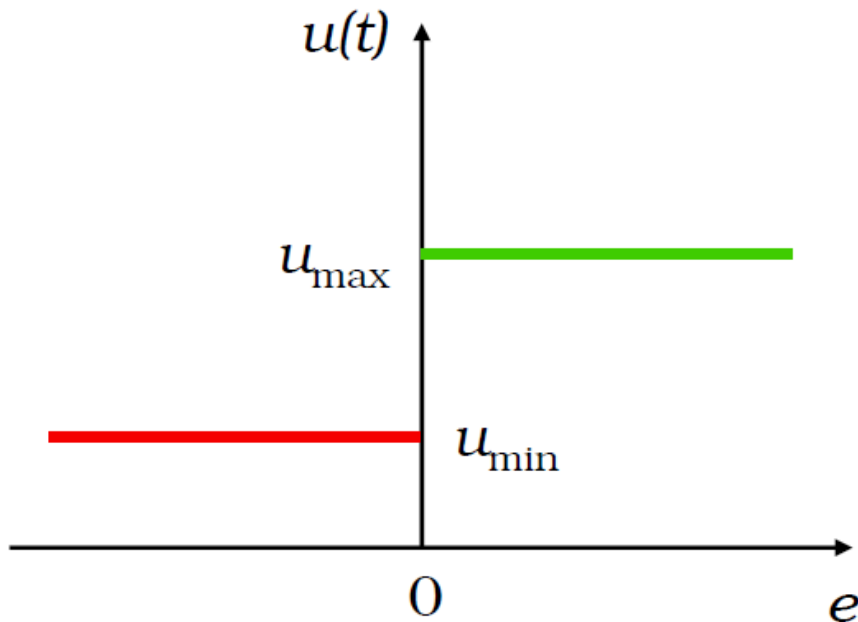
Thiết bị điều khiển
khả trình (PLC, 1970)

PLC-based DCS

PLC mềm
(Soft-PLC, 1996)

3.3.2 Điều khiển hai vị trí

- Còn gọi là điều khiển on/off, điều khiển “bang-bang”
- Tín hiệu điều khiển chỉ có thể nhận một trong 2 giá trị
- Là một bộ điều khiển phi tuyến tính

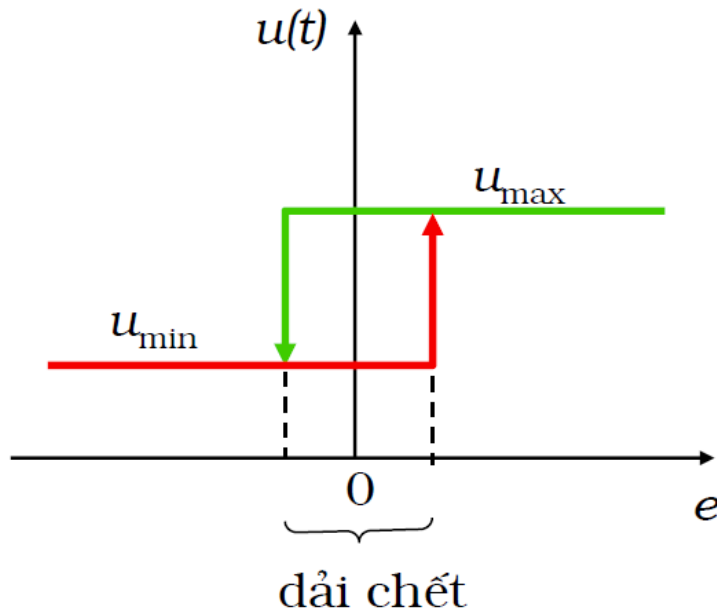


Trường hợp lý tưởng

$$u(t) = \begin{cases} u_{min}, e < 0 & \text{"ON"} \\ u_{max}, e \geq 0 & \text{"OFF"} \end{cases}$$

Bộ điều khiển hai vị trí thực

- Sử dụng dải chết (dead band) để khắc phục hiện tượng “bang-bang”
- Ưu điểm: Đơn giản, rẻ
- Nhược điểm: Chất lượng thấp



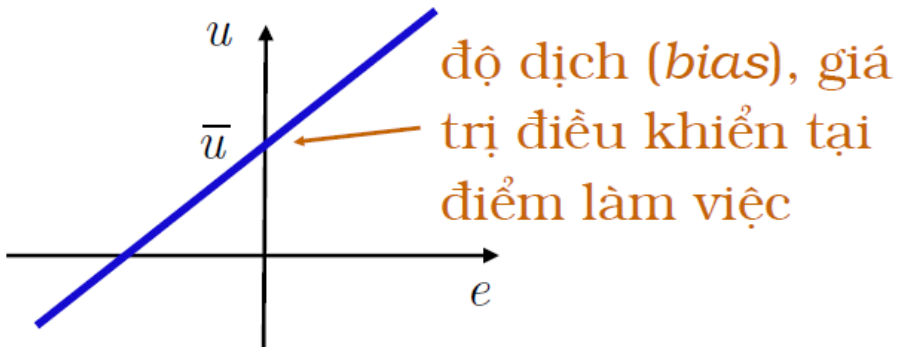
$$u(t) = \begin{cases} u_m, e < -\delta \\ u_m, e > +\delta \\ u(t), -\delta \leq e \leq \delta \end{cases}$$

3.3.3 Bộ điều khiển PID lý tưởng



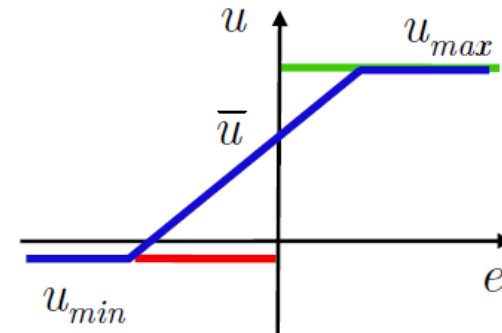
- Các luật điều chỉnh P, PI, PD và PID (gọi chung là PID) được sử dụng phổ biến nhất trong các hệ thống điều khiển quá trình
- Cấu trúc và nguyên lý hoạt động đơn giản, dễ hiểu và dễ sử dụng đối với những người làm thực tế
- Có rất nhiều phương pháp và công cụ mạnh hỗ trợ chỉnh định các tham số của bộ điều chỉnh
- Thuật toán PID thích hợp cho một phần lớn các quá trình công nghiệp.

Luật điều chỉnh tỉ lệ (P)



Trường hợp lý tưởng

$$u(t) = \bar{u} + k_c e(t)$$



Trường hợp thực tế

⇒ Khái niệm dải tỉ lệ

$$PB = (u_{\max} - u_{\min}) / k_c$$

- Đơn giản, tác động nhanh
- Khó tránh khỏi sai lệch tĩnh với đối tượng không có đặc tính tích phân
- Phù hợp nhất với các đối tượng quán tính-tích phân

Luật điều chỉnh tỉ lệ-tích phân (PI)

$$u(t) = \bar{u} + k_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right)$$

$$K_{PI}(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

- Sử dụng phổ biến nhất (> 90%) trong các bộ PID
- Tác động tích phân (thành phần I) giúp triệt tiêu sai lệch tĩnh khi giá trị đặt thay đổi dạng bậc thang (tại sao? cho lớp đối tượng nào?)
- Thành phần tích phân làm xấu đi đặc tính động học của hệ thống: tác động chậm, dễ dao động hơn và dễ mất ổn định hơn (tại sao?)
- Phù hợp nhất với các đối tượng quán tính (tại sao?)

Luật tỉ lệ-vi tích phân (PID)

$$u(t) = \bar{u} + k_c(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \tau_d \frac{de(t)}{dt})$$

$$K_{PID}(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

- Thành phần D cải thiện tốc độ đáp ứng và giúp ổn định một số quá trình dao động (không tắt dần)
 - Thành phần D nhạy cảm với nhiễu đo
 - Thành phần D nhạy cảm với thay đổi giá trị đặt
- => thuật toán cải tiến:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - T_d \frac{dy(t)}{dt} \right)$$

Ba dạng biểu diễn luật PID

- Dạng chuẩn:

$$u(t) = \bar{u} + k_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$
$$K_{PID}(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

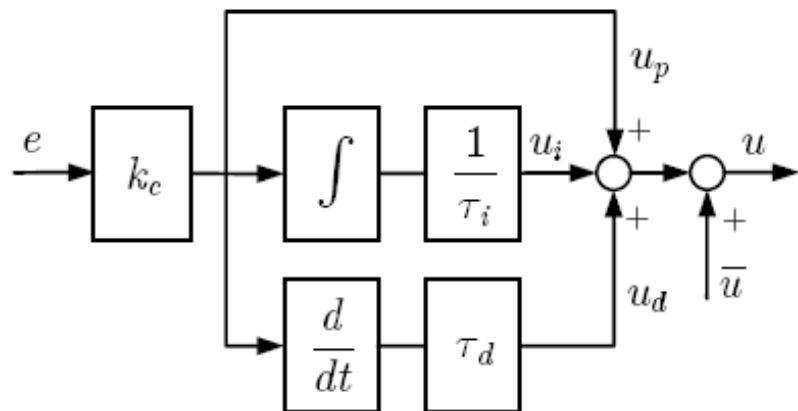
- Dạng song song:

$$u(t) = \bar{u} + k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt}$$
$$K_{PID}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_i + k_p s + k_d s^2}{s}$$

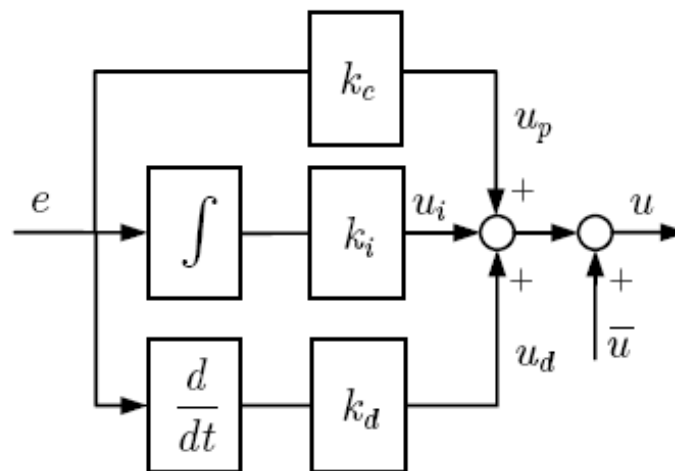
- Dạng nối tiếp:

$$K_{PID}(s) = k'_c \left(1 + \frac{1}{\tau'_i s} \right) (1 + \tau'_d s)$$

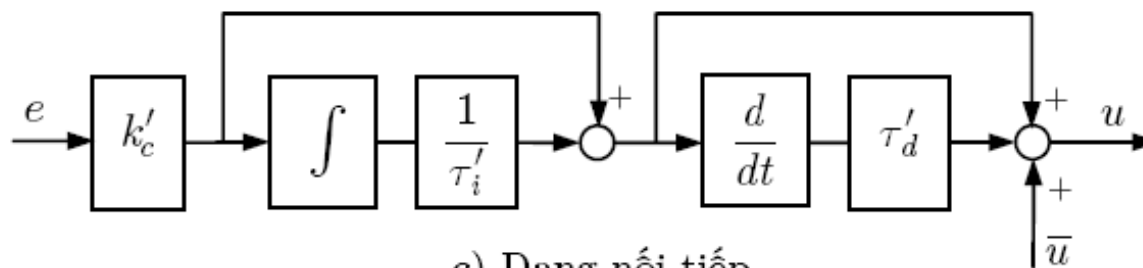
Sơ đồ khối 3 dạng PID



a) Dạng chuẩn



b) Dạng song song



c) Dạng nối tiếp

3.3.4 Bộ điều khiển PID thực



- Thuật toán xấp xỉ khâu vi phân
- Chống bão hòa tích phân
- Bộ điều khiển hai bậc tự do
- Thuật toán số
- Chuyển chế độ Auto-Manual
- Lọc nhiễu

Xấp xỉ khâu vi phân

- Khâu vi phân lý tưởng không thực hiện được bởi không có tính nhân quả

- Thuật toán xấp xỉ thông dụng

$$u_d(s) = k_c \frac{\tau_d s}{1 + \frac{\tau_d s}{N}} (r(s) - y(s))$$

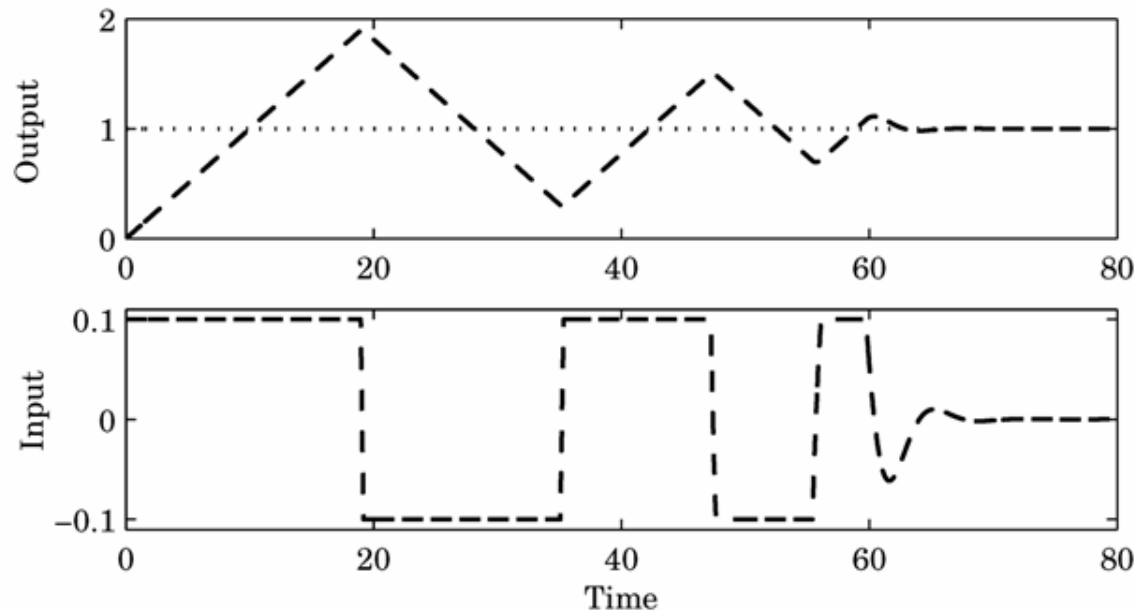
- N trở thành một tham số của bộ PID (N tăng sẽ làm tăng tác
- Thông thường N được chọn trong khoảng từ 3 — 30

- Sử dụng trọng số giá trị đặt (để tránh nhạy cảm với thay đổi giá trị đặt)

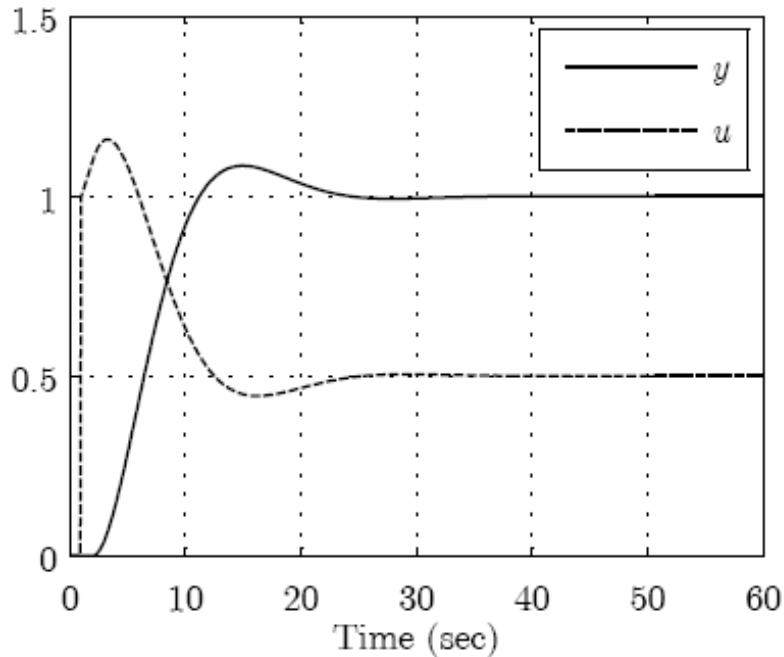
$$u_d(s) = k_c \frac{\tau_d s}{1 + \frac{\tau_d s}{N}} (cr(s) - y(s))$$

Hiện tượng bão hòa tích phân (reset windup)

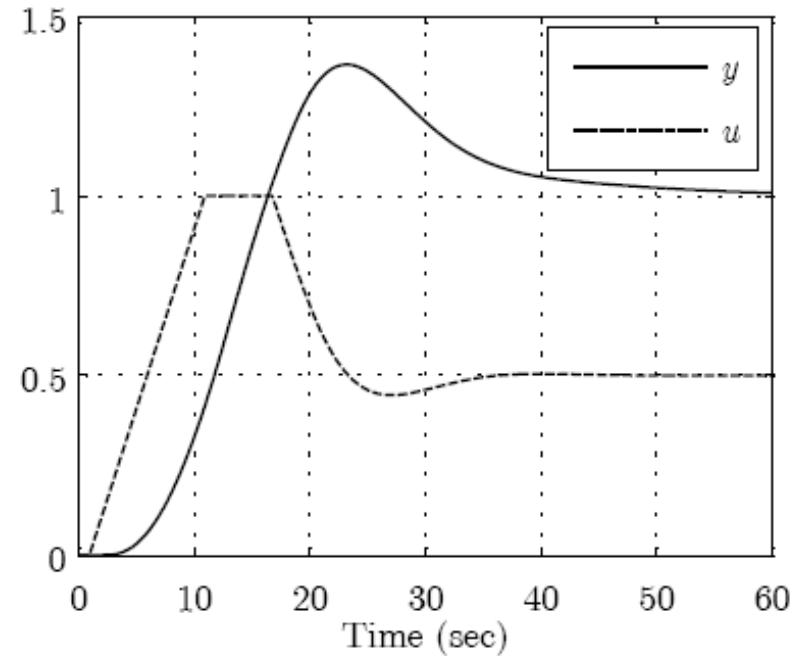
- Hiện tượng đầu ra của bộ điều chỉnh vẫn tiếp tục tăng quá mức giới hạn khi sai lệch điều khiển đã trở về không.
- Windup có thể xảy ra khi:
 - bộ điều khiển có chứa thành phần tích phân và
 - tín hiệu điều khiển bị hạn chế



Hiện tượng bão hòa tích phân



a) Tín hiệu điều khiển không bị giới hạn



b) Tín hiệu điều khiển bị giới hạn

Các biện pháp khắc phục (Antiwindup)

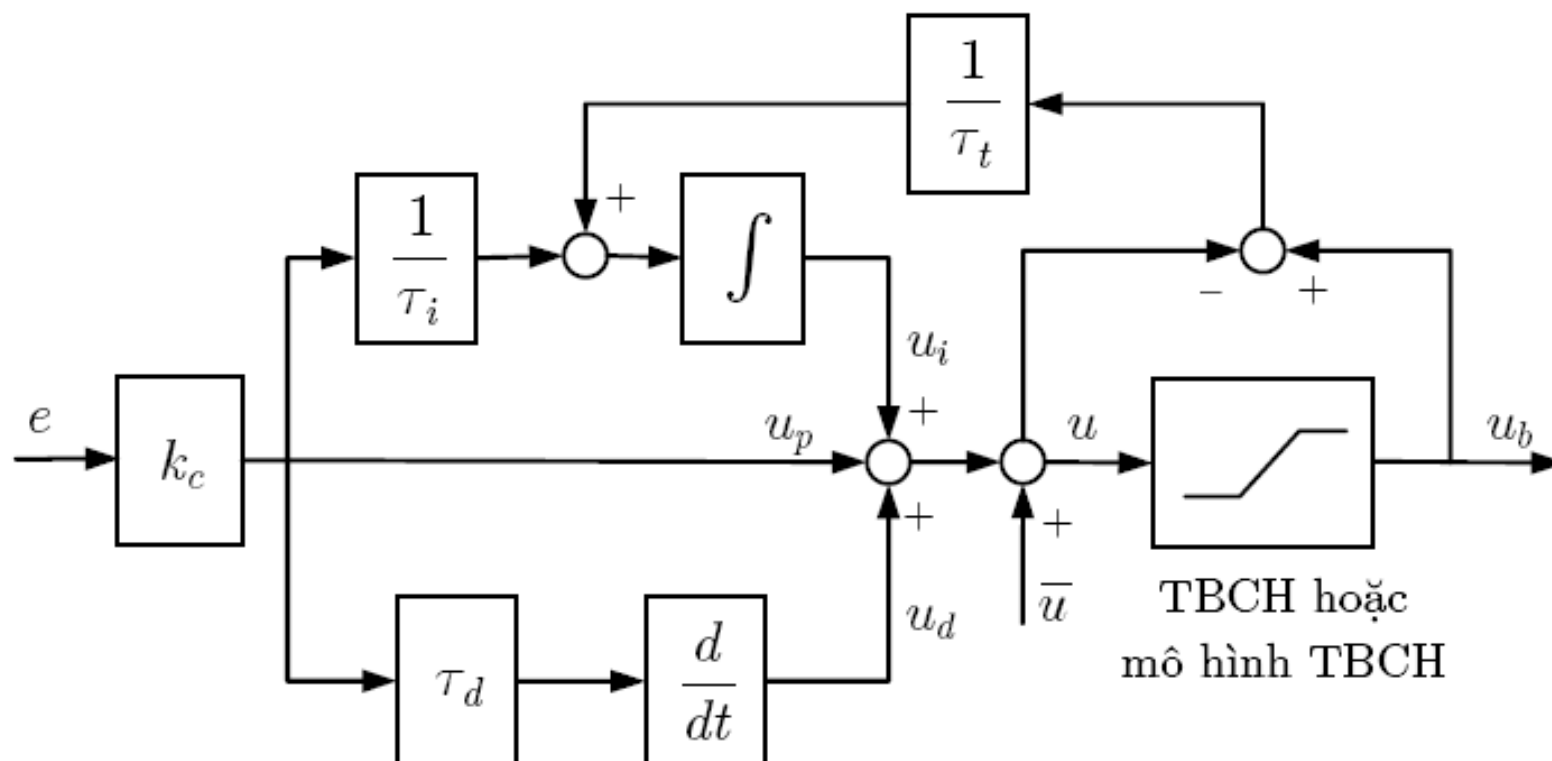


1. Cắt bỏ thành phần tích phân khi giá trị được điều khiển đạt tới giá trị đặt, loại trừ hoàn toàn hiện tượng windup.
2. Giảm hệ số khuếch đại để đầu ra của bộ điều chỉnh nằm trong giới hạn cho phép, tránh việc xảy ra hiện tượng windup.
3. Theo dõi giá trị thực của tín hiệu điều khiển bị giới hạn và phản hồi về bộ điều chỉnh để giảm thành phần tích phân, hạn chế windup.

$$\frac{du_i}{dt} = \frac{k_c}{\tau_i} e + \frac{1}{\tau_t} (u_b - u)$$

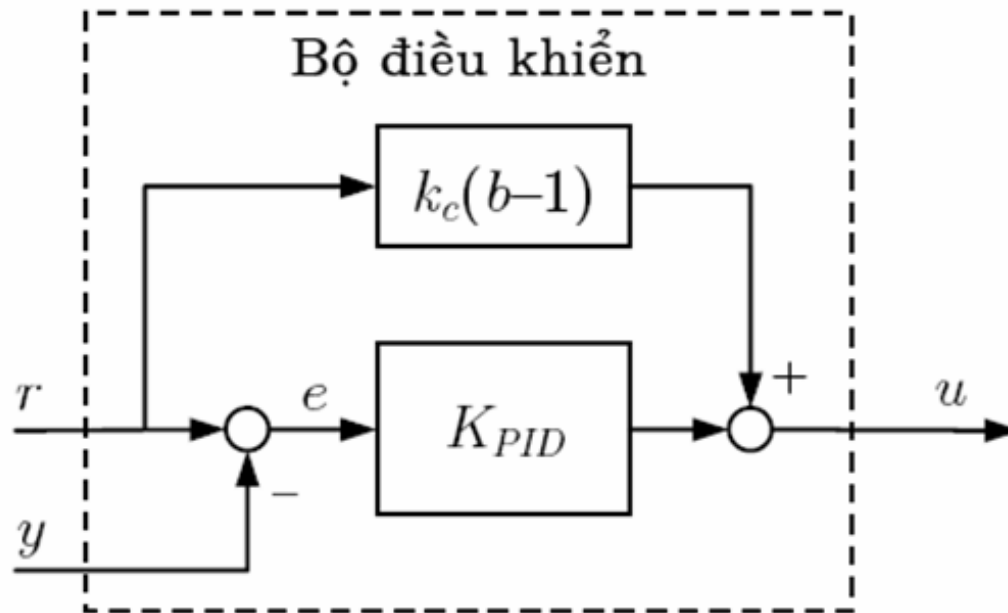
4. Đặt một khâu giới hạn tại đầu ra của bộ điều chỉnh PID để mô phỏng đặc tính phi tuyến của phần tử chấp hành, sử dụng thuật toán bù giống như trong phương pháp 3.

Chống bão hòa tích phân



$$\frac{du_i}{dt} = \frac{k_c}{\tau_i} e + \frac{1}{\tau_t} (u_b - u)$$

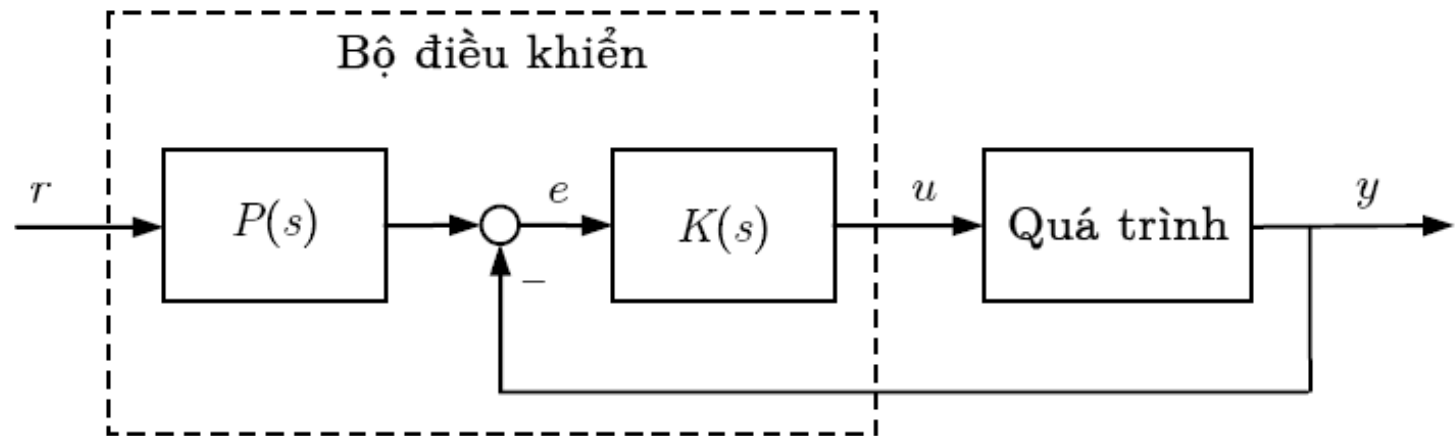
Bộ ĐK 2 bậc tự do -trọng số giá trị đặt



- Bộ điều chỉnh hai bậc tự do
- b có vai trò làm mềm quá trình quá độ

$$\begin{aligned} u &= k_c(b-1)r + k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \frac{\tau_d s}{1 + \tau_d s/N} \right) (r - y) \\ &= k_c \left(br - \frac{1}{\tau_i s} (r - y) + \frac{\tau_d s}{1 + \tau_d s/N} (r - y) \right) \end{aligned}$$

Cấu trúc bộ PID thực theo chuẩn ISA



$$u = k_c \left(br - y + \frac{1}{\tau_i s} (r - y) + \frac{\tau_d s}{1 + \tau_d s/N} (cr - y) \right)$$

$$K(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \frac{\tau_d s}{1 + \tau_d s/N} \right)$$

$$P(s) = \frac{1 + (b\tau_i + \tau_d/N)s + \tau_i\tau_d(c + b/N)s^2}{1 + (\tau_i + \tau_d/N)s + \tau_i\tau_d(1 + 1/N)s^2}$$

Lưu ý về bộ PID theo chuẩn ISA



- Cấu trúc theo chuẩn ISA tương đương với cấu trúc minh họa trên hình slides trước trong trường hợp $c = 1$.
- $K(s)$ là chính là hàm truyền đạt của bộ PID thực một bậc tự do. Do đó các tham số có thể được chỉnh định bằng nhiều phương pháp đã được nghiên cứu.
- $P(s)$ đóng vai trò như một khâu lọc trước giúp mềm hóa đáp ứng quá độ với giá trị đặt.
 - Nếu N đã được đặt cố định sau khi chỉnh định $K(s)$ thì b và c chỉ có thể thay đổi được các điểm không của $P(s)$.
 - Khi $K(s)$ đã được chỉnh định tốt cho mục đích ổn định hệ thống và đáp ứng với nhiễu, ta có thể chỉnh định các tham số b và c để cải thiện chất lượng đáp ứng với giá trị đặt.
- Khi $b = 1$ và $c = 1$, $P(s)$ trở thành một khâu khuếch đại đơn vị.

Thuật toán PID số

- Thành phần tỉ lệ: $u_p(t) = k_c(br(t) - y(t))$
- Xấp xỉ thành phần tích phân (T là chu kỳ trích mẫu)

$$u_i(t) = \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \approx u_i(t - T) + \frac{k_c T}{\tau_i} e(t)$$

- Hoặc

$$u_i(t) \approx u_i(t - T) + \frac{k_c T}{2\tau_i} (e(t) - e(t - T))$$

- Xấp xỉ thành phần vi phân đã cải tiến: $\frac{\tau_d}{N} \frac{du_d}{dt} + u_d = -k_c \tau_d \frac{dy}{dt}$

$$\frac{du(t)}{dt} \approx \frac{(u(t) - e(t - T))}{T}$$

$$u_d(t) = \frac{\tau_d}{\tau_d + NT} u_d(t - T) - \frac{k_c \tau_d N}{\tau_d + NT} (y(t) - y(t - T))$$

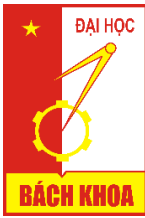
- Thuật toán điều khiển: $u(t) = \bar{u} + u_p(t) + u_i(t) + u_d(t)$

Chuyển chế độ Auto \leftrightarrow Manual



- Vấn đề: Khi chuyển từ chế độ bằng tay sang tự động hoặc ngược lại, tín hiệu điều khiển thay đổi lớn sẽ gây dao động mạnh
=> yêu cầu “bumpless transfer”
- Trong khi vận hành bằng tay, cho bộ điều khiển PID làm việc nhưng ở chế độ bám (tracking mode), cập nhật trạng thái của bộ điều khiển => kết quả tính toán tự động sẽ xấp xỉ giá trị đưa bằng tay và chuyển từ chế độ M sang chế độ A sẽ diễn ra hoàn toàn trơn tru.
- Trước khi chuyển từ chế độ A sang chế độ M, đặt giá trị đưa bằng tay đúng bằng tín hiệu điều khiển hiện tại.

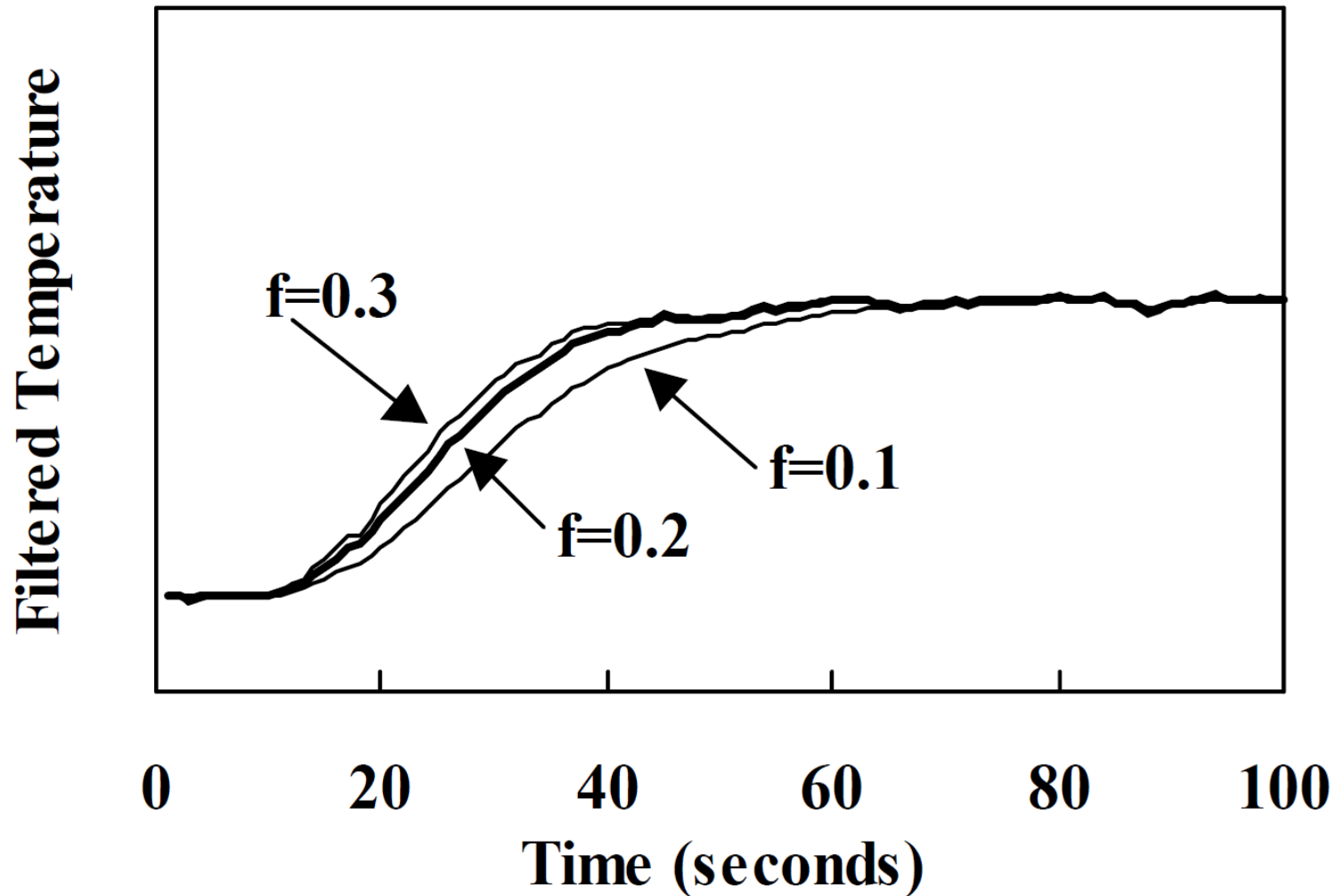
Lọc nhiễu đo (lọc số)



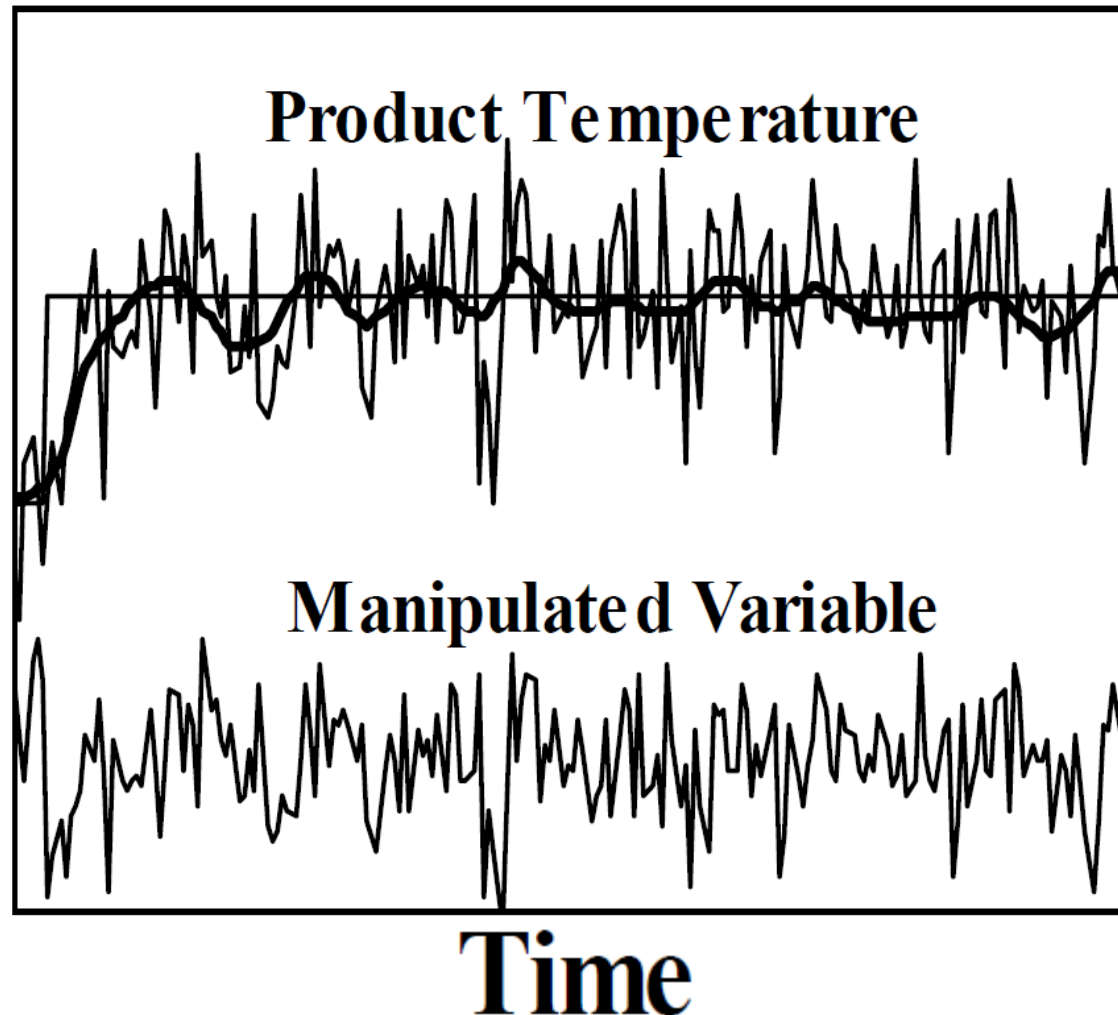
$$y_f(t) = fy(t) + (1 - f)y_f(t - h)$$

- Lọc nhiễu giảm ảnh hưởng của nhiễu đo bằng cách lấy giá trị trung bình xấp xỉ
- Đặc tính động học của khâu lọc nhiễu cần được quan tâm trong vòng điều chỉnh
- Sử dụng khâu lọc chỉ như cần thiết bằng cách thay đổi hệ số f trong khoảng $(0 \div 1)$

Minh họa đặc tính đáp ứng của hệ hở với khâu lọc



Đặc tính điều khiển khi không có khâu lọc



Đặc tính điều khiển khi có khâu lọc

