

5.1 Khái niệm về đo lường

5.2 Cảm biến

5.3 Bộ phận chấp hành

5.4 Chuyển đổi tín hiệu tương tự - số (ADC)

5.5 Chuyển đổi tín hiệu số - tương tự (DAC)

5.6 Các thiết bị độc lập đầu vào và đầu ra của hệ thống

5.1 KHÁI NIỆM VỀ ĐO LƯỜNG

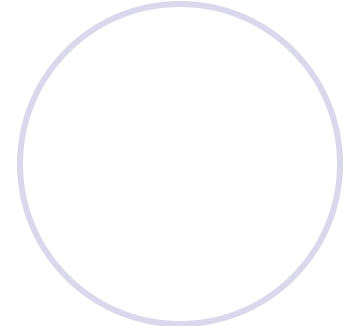
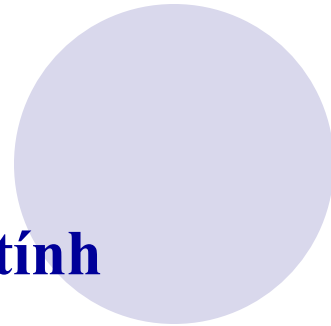
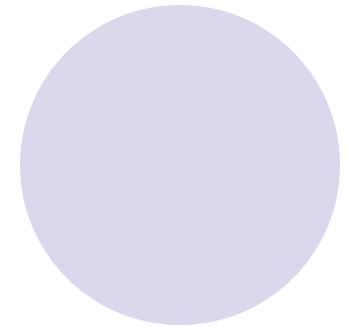
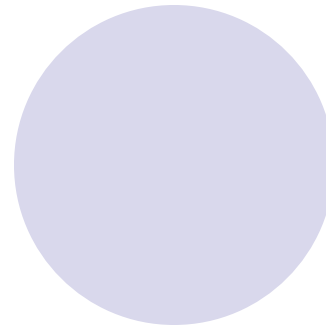
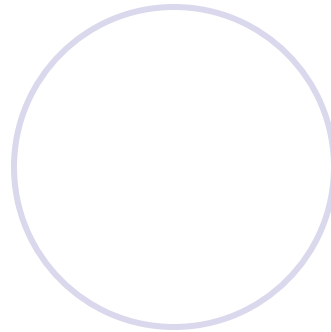
a) Định nghĩa

b) Phân loại cảm biến

c) Chuẩn cảm biến

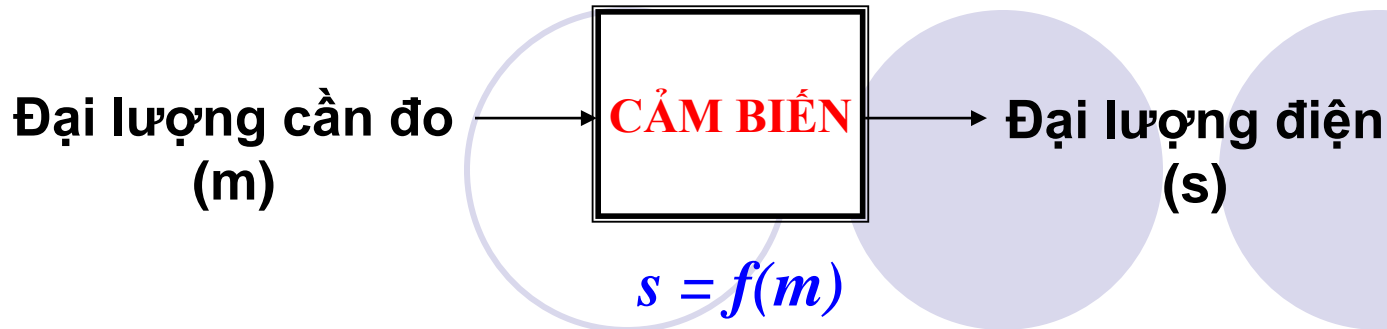
d) Độ nhạy, độ tuyến tính

e) Thời gian hồi đáp



5.1 KHÁI NIỆM VỀ ĐO LƯỜNG

a. Định nghĩa



b. Phân loại cảm biến

✓ Cảm biến thụ động

- RDT (Resistance Temperature Detectors)
- Thermistor
- Strain gage

✓ Cảm biến tích cực

- Thermocouple
- Photodiode
- Piezoelectric

5.1 Khái niệm về đo lường

c. Chuẩn cảm biến

✓ **Chuẩn đơn giản**

Ví dụ: đo tốc độ động cơ bằng encoder

✓ **Chuẩn nhiều lần**

Ví dụ: đo mức chất lỏng bằng cảm biến tụ điện, điện dung phụ thuộc vào chiều cao chất lỏng, hằng số điện môi

d. Độ nhạy

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m}$$

Ví dụ:

$\Omega / ^\circ C$ đối với nhiệt điện trở

$\mu V / ^\circ C$ đối với cặp nhiệt

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.1 KHÁI NIỆM VỀ ĐO LƯỜNG

e. Độ tuyến tính

f. Khoảng giới hạn đo

h. Thời gian hồi đáp



TABLE 5.2 Desirable Features for Selecting Measuring Devices Used in Automated Systems

<i>Desirable Feature</i>	<i>Definition and Comments</i>
High accuracy	The measurement contains small systematic errors about the true value.
High precision	The random variability or noise in the measured value is low.
Wide operating range	The measuring device possesses high accuracy and precision over a wide range of values of the physical variable being measured.
High speed of response	The ability of the device to respond quickly to changes in the physical variable being measured. Ideally, the time lag would be zero.
Ease of calibration	Calibration of the measuring device should be quick and easy.
Minimum drift	Drift refers to the gradual loss in accuracy over time. High drift requires frequent recalibration of the measuring device.
High reliability	The device should not be subject to frequent malfunctions or failures during service. It must be capable of operating in the potentially harsh environment of the manufacturing process where it will be applied.
Low cost	The cost to purchase (or fabricate) and install the measuring device should be low relative to the value of the data provided by the sensor.

5.2 CẢM BIẾN

Các thiết bị đo lường thường sử dụng trong hệ thống tự động hóa

<i>Measuring Device</i>	<i>Description</i>
Accelerometer	Analog device used to measure vibration and shock. Can be based on various physical phenomena.
Ammeter	Analog device that measures the strength of an electrical current.
Bimetallic switch	Binary switch that uses bimetallic coil to open and close electrical contact as a result of temperature change. <i>Bimetallic coil</i> consists of two metal strips of different thermal expansion coefficients bonded together.
Bimetallic thermometer	Analog temperature measuring device consisting of bimetallic coil (see definition above) that changes shape in response to temperature change. Shape change of coil can be calibrated to indicate temperature.
DC tachometer	Analog device consisting of dc generator that produces electrical voltage proportional to rotational speed.
Dynamometer	Analog device used to measure force, power, or torque. Can be based on various physical phenomena (e.g., strain gage, piezoelectric effect).
Float transducer	Float attached to lever arm. Pivoting movement of lever arm can be used to measure liquid level in vessel (analog device) or to activate contact switch (binary device).

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.2 CẢM BIẾN

Các thiết bị đo lường thường sử dụng trong hệ thống tự động hóa

Fluid flow sensor	Analog measurement of liquid flow, usually based on pressure difference between flow in two pipes of different diameter.
Fluid flow switch	Binary switch similar to limit switch but activated by increase in fluid pressure rather than by contacting object.
Linear variable differential transformer	Analog position sensor consisting of primary coil opposite two secondary coils separated by a magnetic core. When primary coil is energized, induced voltage in secondary coil is function of core position. Can also be adapted to measure force or pressure.
Limit switch (mechanical)	Binary contact sensor in which lever arm or pushbutton closes (or opens) an electrical contact.
Manometer	Analog device used to measure pressure of gas or liquid. Based on comparison of known and unknown pressure forces. A <i>barometer</i> is a specific type of manometer used to measure atmospheric pressure.
Ohmmeter	Analog device that measures electrical resistance.
Optical encoder	Digital device used to measure position and/or speed, consisting of a slotted disk separating a light source from a photocell. As disk rotates, photocell senses light through slots as a series of pulses. Number and frequency of pulses are proportional (respectively) to position and speed of shaft connected to disk. Can be adapted for linear as well as rotational measurements.

5.2 CẢM BIẾN

Các thiết bị đo lường thường sử dụng trong hệ thống tự động hóa

Photoelectric sensor	Binary noncontact sensor (switch) consisting of emitter (light source) and receiver (photocell) triggered by interruption of light beam. Two common types: (1) <i>transmitted type</i> , in which object blocks light beam between emitter and receiver; and (2) <i>retroreflective type</i> , in which emitter and receiver are located in one device and beam is reflected off remote reflector except when object breaks the reflected light beam.
Photoelectric sensor array	Digital sensor consisting of linear series of photoelectric sensors. Array is designed to indicate height or size of object interrupting some but not all of the light beams.
Photometer	Analog sensor that measures illumination and light intensity.
Piezoelectric transducer	Analog device based on piezoelectric effect of certain materials (e.g., quartz) in which an electrical charge is produced when the material is deformed. Charge can be measured and is proportional to deformation. Can be used to measure force, pressure, and acceleration.
Potentiometer	Analog position sensor consisting of resistor and contact slider. Position of slider on resistor determines measured resistance. Available for both linear and rotational (angular) measurements.
Proximity switch	Binary noncontact sensor is triggered when nearby object induces changes in electromagnetic field. Two types: (1) inductive and (2) capacitive.

5.2 CẢM BIẾN

Các thiết bị đo lường thường sử dụng trong hệ thống tự động hóa

Radiation pyrometer	Analog temperature-measuring device that senses electromagnetic radiation in the visible and infrared range of spectrum.
Resistance-temperature detector	Analog temperature-measuring device based on increase in electrical resistance of a metallic material as temperature is increased.
Strain gage	Widely used analog sensor to measure force, torque, or pressure. Based on change in electrical resistance resulting from strain of a conducting material.
Thermistor	Analog temperature-measuring device based on decrease in electrical resistance of a semiconductor material as temperature is increased.
Thermocouple	Analog temperature-measuring device based on thermoelectric effect, in which the junction of two dissimilar metal wires emits a small voltage that is a function of the temperature of the junction. Common standard thermocouples include: chromel-alumel, iron-constantan, and chromel-constantan.
Ultrasonic range sensor	Time lapse between emission and reflection (from object) of high-frequency sound pulses is measured. Can be used to measure distance or simply to indicate presence of object.

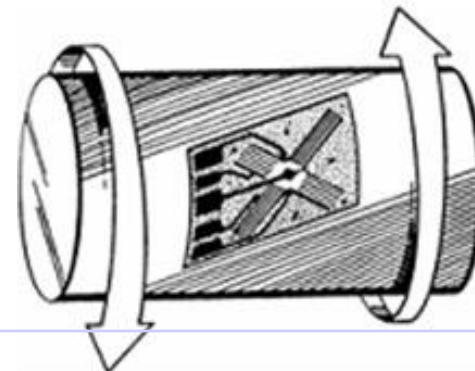
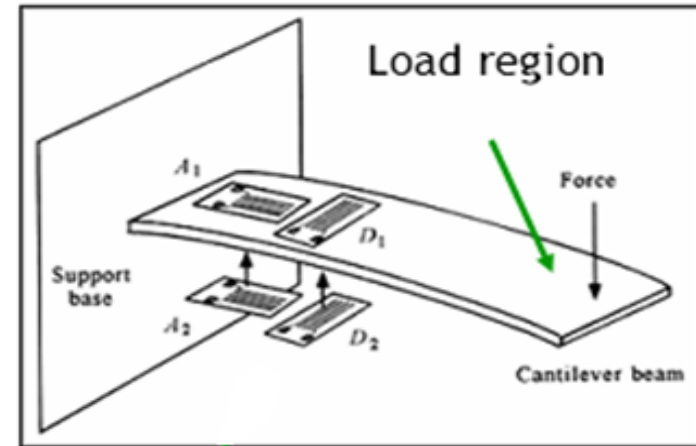
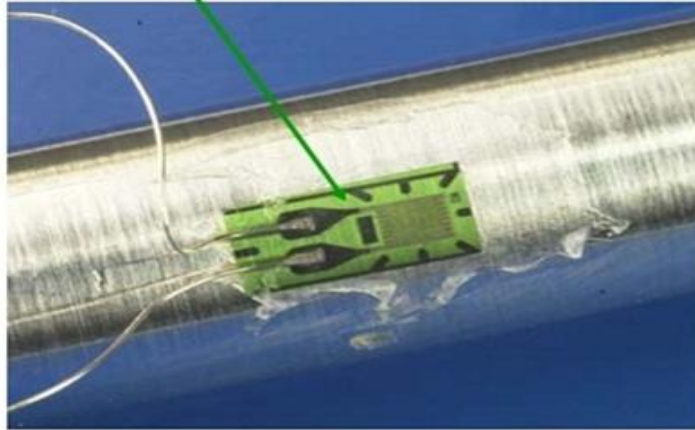
Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Hiệu ứng này được phát hiện đầu tiên bởi Lord Kelvin vào năm 1856, tuy nhiên mãi đến 75 năm sau mới đưa vào ứng dụng đầu tiên. **Đó là bộ đo biến dạng (strain gauge)**

Strain gauge on a rod

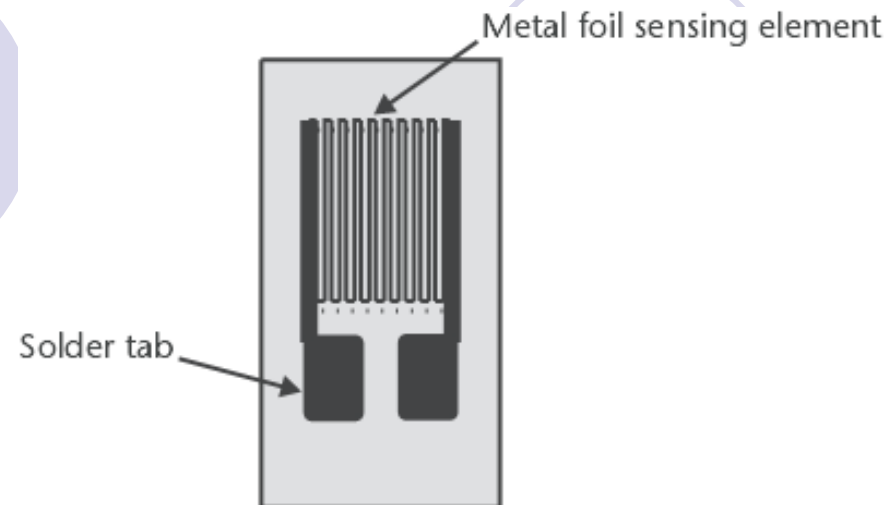
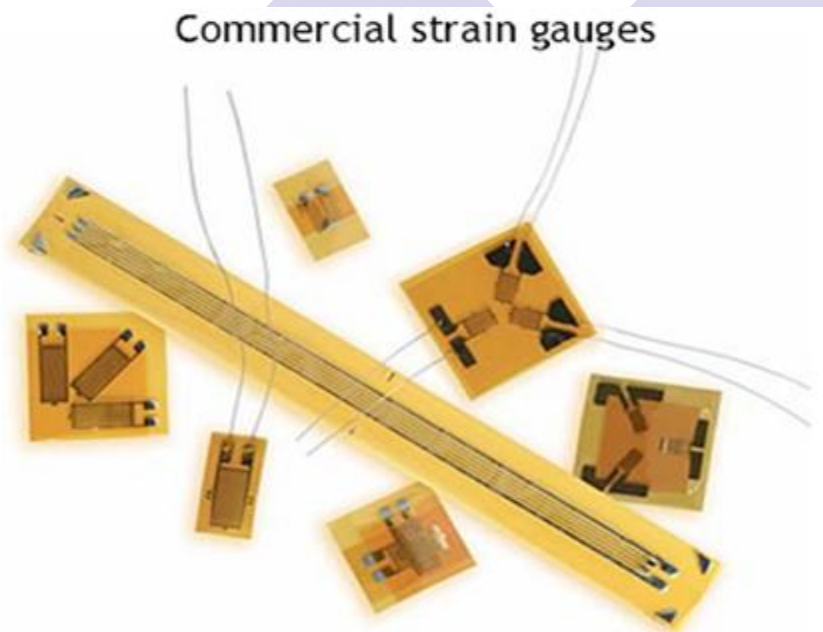


5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Định nghĩa: Vật liệu có hiệu ứng áp điện trở là vật liệu có điện trở thay đổi khi nó chịu tác dụng một áp lực.

- Tùy theo loại vật liệu áp điện trở mà nhận được sự thay đổi điện trở khác nhau dưới tác động của ngoại lực.
- Ví dụ phần tử cảm nhận làm bằng vật liệu Fe có sự thay đổi điện trở lớn hơn rất nhiều so với dây làm bằng Cu.



5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Độ nhạy: của đầu đo biến dạng thường được gọi là “**hệ số đầu đo**”. Đây là số không thứ nguyên:

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

Khi chịu tác động ngoại lực, các phần tử cảm nhận phải nằm trong vùng đàn hồi & tuân theo định luật Hooke. Mối quan hệ giữa ứng suất σ (N/m²) và biến dạng ε tuân theo định luật Hooke và module đàn hồi Young cho như sau:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Ví dụ: $E_{Si} = 190GPa$; $E_{stainless\ steel} = 200GPa$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Cho khối vật liệu dạng thanh chịu 1 lực tác động dọc trục gây biến dạng dọc trục, đồng thời nó cũng bị biến dạng theo chiều vuông góc với trục.

Biến dạng theo chiều dọc thanh:

$$\varepsilon_l = \frac{dl}{l}$$

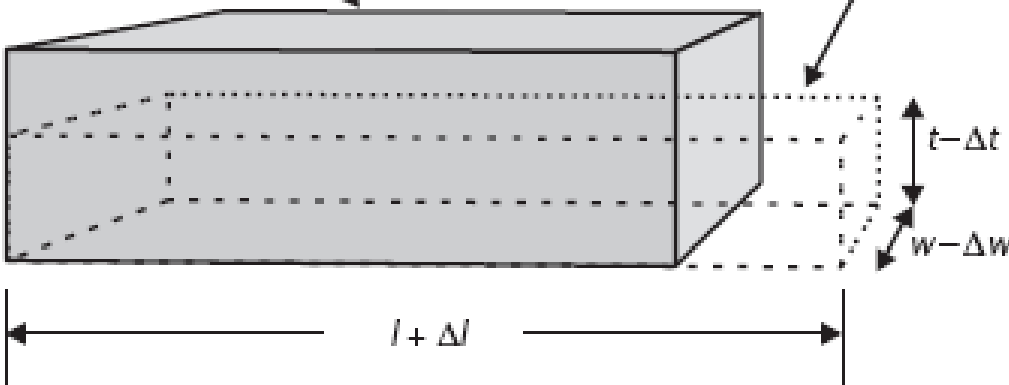
Quan hệ giữa biến dạng theo chiều dọc và chiều vuông góc với thanh được thể hiện bằng hệ số Poisson, ν :

$$\nu = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_l}$$

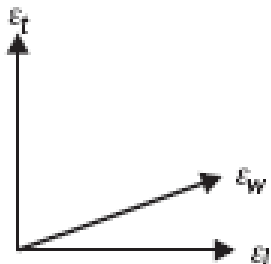
Thường các loại vật liệu đàn hồi có hệ số Poisson khoảng 0,3 (Si khoảng 0,22).

Initial shape

Final shape



Note: The original length, width, and thickness of the block is l , w , and t , respectively.



5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Khảo sát sự thay đổi điện trở của thanh khi bị biến dạng:

Điện trở trước khi tác dụng lực của khối vật liệu trên được cho như sau:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}$$

ρ : điện trở suất của vật liệu ($\Omega \cdot \text{cm}$)

l : chiều dài (cm)

A : diện tích mặt cắt ngang (với w : chiều rộng; t : chiều dày)

Công thức dạng khác,

$$R = \frac{\rho \cdot l}{w \cdot t}$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Lấy vi phân từng phần công thức trên:

$$dR = \frac{l}{w.t} d\rho + \frac{\rho}{w.t} dl - \frac{\rho.l}{w^2.t} dw - \frac{\rho l}{w.t^2} dt$$

Tất cả chia cho $R = \frac{\rho.l}{w.t}$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dw}{w} - \frac{dt}{t} \quad (*)$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Theo định nghĩa, ta có công thức biến dạng: $\varepsilon_l = \frac{dl}{l}$

Giả thiết các thông số trên thay đổi một lượng rất nhỏ, do vậy:

$$dl = \Delta l, dw = \Delta w, dt = \Delta t$$

$$\frac{dw}{w} = \varepsilon_w = -\nu \cdot \varepsilon_l ; \quad \frac{dt}{t} = \varepsilon_t = -\nu \cdot \varepsilon_l \quad (**)$$

Ghi chú: Công thức trên có dấu “ - ” vì thanh bị biến dạng co lại theo chiều ngang ngược với biến dạng căng theo chiều dọc

Từ (*) và (**), ta được:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_l + \nu \cdot \varepsilon_l + \nu \cdot \varepsilon_l$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Do đó hệ số đầu đo, GF là:

$$GF = \frac{dR/R}{\varepsilon_l} = \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l} + (1 + 2\nu)$$

Kết luận: Từ công thức trên chúng ta thấy, có hai hiệu ứng ảnh hưởng đến hệ số đầu đo (GF). Đó là:

✓ Hiệu ứng áp điện trở:

✓ Hiệu ứng hình học: $(1+2\nu)$

Hệ số Poisson thường từ $0,2 \div 0,3$ nên hiệu ứng hình học ảnh hưởng đến hệ số đầu đo GF nằm trong khoảng từ $1,4 \div 1,6$.

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Cảm biến xác định biến dạng dựa vào sự thay đổi điện trở gọi là **strain gauge**. Vật liệu làm đầu dò khác nhau cho hệ số đầu đo khác nhau:

Table 5.1 Gauge Factors of Different Materials

<i>Material</i>	<i>Gauge Factor</i>
Metal foil strain gauge	2–5
Thin-film metal	2
Single crystal silicon	–125 to +200
Polysilicon	±30
Thick-film resistors	10

Sự thay đổi điện trở suất của kim loại theo nhiệt độ:

Measured resistivity ($\mu\Omega$ cm) at selected temperatures (deg K)

Specimens	293	333	373	433	473	533	573	673	773	873
Pure Ni	7.092	8.747	10.54	12.52	14.69	18.37	21.20	29.93	33.32	36.94
Ni + 28 % Cu	42.41	44.27	45.03	45.74	46.10	46.64	46.80	47.54	48.53	49.67
Ni + 38 % Cu	47.66	48.00	48.22	48.43	48.55	48.72	48.81	49.08	49.54	50.37
Ni + 45 % Cu	49.89	49.78	49.67	49.47	49.33	49.17	49.08	48.88	49.04	49.55
Ni + 50 % Cu	49.99	49.76	49.53	49.19	48.98	48.71	48.56	48.25	48.39	48.85
Ni + 60 % Cu	43.83	43.67	43.50	43.25	43.11	42.90	42.77	42.55	42.63	42.89
Ni + 70 % Cu	35.00	35.10	35.19	35.27	35.31	35.38	35.42	35.50	35.75	36.06
Pure Cu	1.698	1.945	2.205	2.597	2.861	3.257	3.527	4.205	4.895	5.607

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Sử dụng cầu Wheatstone để xác định độ biến dạng của phần tử strain gauge. Khảo sát sự thay đổi điện trở strain gauge R_1 .

Trường hợp: điện áp output $V_0 = 0$

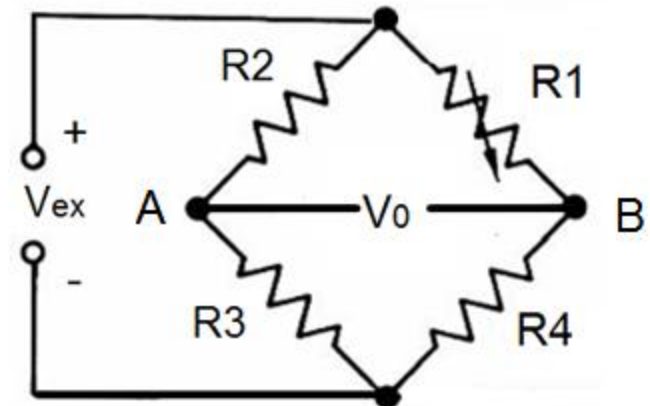
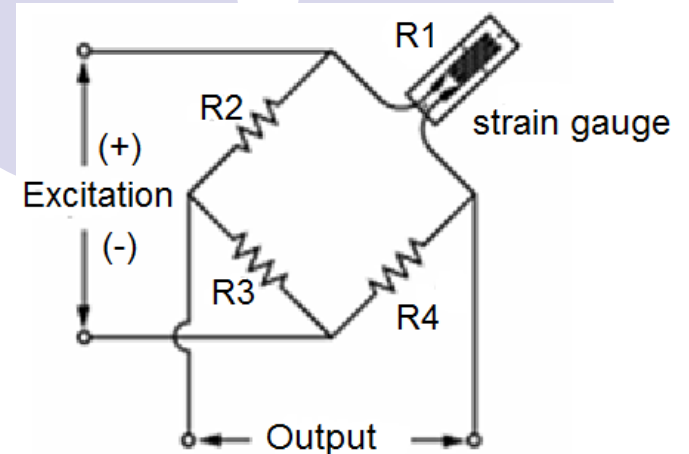
$$V_0 = 0 \Rightarrow V_A = V_B; \Rightarrow I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (1)$$

$$I_1 = I_4 = \frac{V_{ex}}{R_1 + R_4}$$

$$I_2 = I_3 = \frac{V_{ex}}{R_2 + R_3} \quad (2)$$

$$(1) \& (2) \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_4} = \frac{R_2}{R_2 + R_3}, \text{ hay } \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3}$$

$$\text{Vậy: } R_1 = R_4 \cdot \frac{R_2}{R_3}$$



Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Trường hợp: điện áp output $V_0 \neq 0$

$$V_0 = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 = -I_1 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_3$$

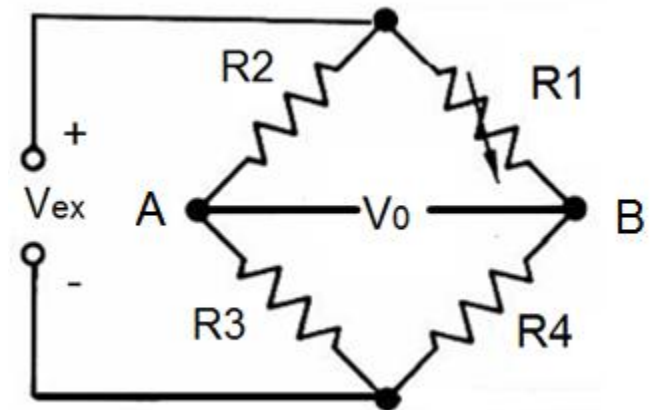
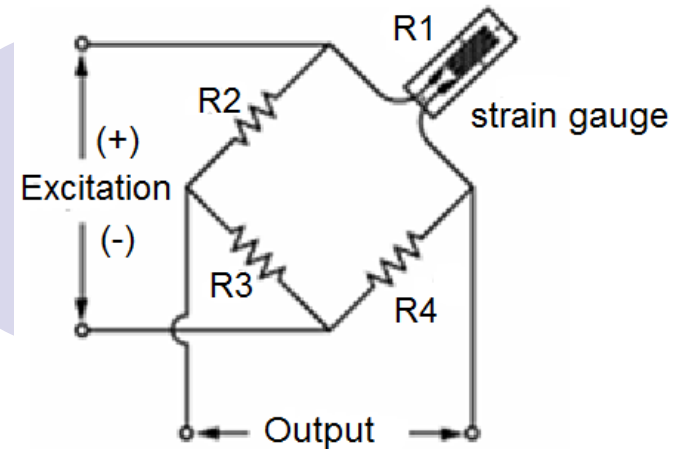
$$V_{ex} = I_1 \cdot (R_1 + R_4) = I_2 \cdot (R_1 + R_3)$$

Vậy:
$$V_0 = V_{ex} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right)$$

Chúng ta biết rằng: $V_0 \neq 0$ là do điện trở R_1 của strain gauge có sự thay đổi. Như vậy ta có thể thay $V_0 = \Delta V$ và $R_1 = R_1 + \Delta R_1$ vào biểu thức trên, cụ thể như sau:

$$\frac{\Delta V_0}{V_{ex}} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\frac{R_4}{R_1} \cdot \left(\frac{\Delta V_0}{V_{ex}} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right)}{\left(1 - \frac{\Delta V_0}{V_{ex}} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right)} - 1 \quad (3)$$



Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

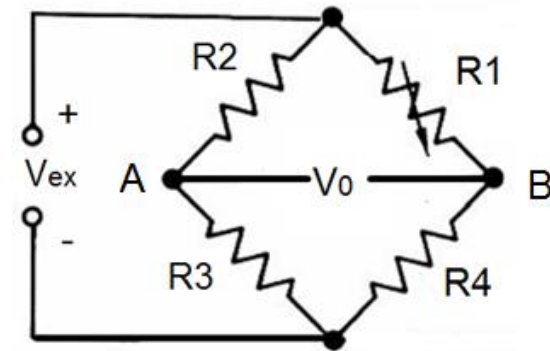
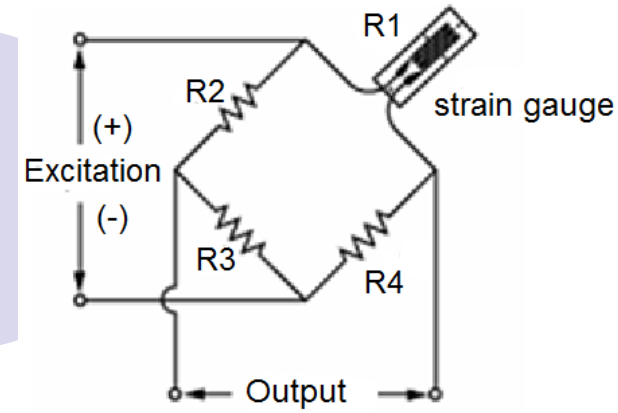
Trường hợp: điện áp output $V_0 \neq 0$

Giả sử chúng ta có các giá trị điện trở ban đầu trong mạch Wheatstone: $R_2 = R_3 = R_4 = R$, nên giá trị ban đầu của strain gauge $R_1 = R$. Thay các giá trị này vào biểu thức (3), ta được:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\frac{\Delta V_0}{V_{ex}} + \frac{1}{2} - \left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta V_0}{V_{ex}} \right)}{\left(\frac{1}{2} - \frac{\Delta V_0}{V_{ex}} \right)} = \frac{2 \cdot \frac{\Delta V_0}{V_{ex}}}{\frac{1}{2} - \frac{\Delta V_0}{V_{ex}}}$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{2}{\frac{1}{2} \cdot \frac{V_{ex}}{\Delta V_0} - 1}$$

$$\Rightarrow -\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{ex}}{\Delta V_0} = 2 \Rightarrow \Delta V_0 = \frac{1}{4} \cdot V_{ex} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} \right) \quad (4)$$



5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Trường hợp: điện áp output $V_0 \neq 0$

Hệ số đầu đo GF là:

$$GF = \frac{\text{độ biến trở}}{\text{độ biến dạng}} = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\varepsilon} \quad (5)$$

Từ (4) & (5), ta được:

$$\Delta V_0 = \frac{1}{4} \cdot V_{ex} \cdot GF \cdot \varepsilon$$

Độ nhạy S của cảm biến sử dụng cầu WheatStone để xác định biến dạng được cho như sau:

$$S = \frac{\Delta s}{\Delta m} = \frac{\Delta V_0}{\varepsilon} = \frac{V_{ex} \cdot GF \cdot \varepsilon}{4 \cdot \varepsilon}$$

$$\Rightarrow \mathbf{S} = \frac{1}{4} \cdot V_{ex} \cdot GF$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.1. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

1. Hai yếu tố nào quyết định đến sự thay đổi ($\Delta R/R$)?
2. Đầu đo có điện trở ban đầu R_0 ; hệ số đầu đo GF; biến dạng ε . Xác định ΔR và ($\Delta R/R$) theo các thông số được cho trong các trường hợp dưới đây.

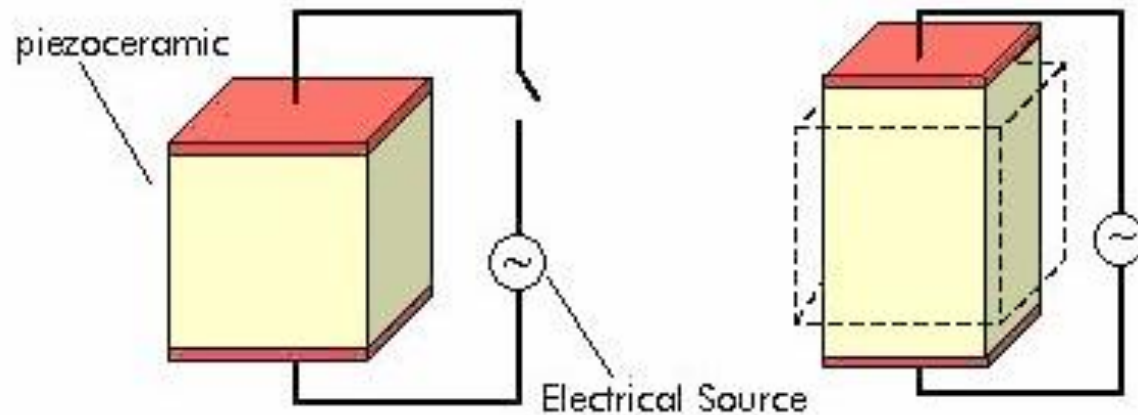
	$R_0(\Omega)$	GF	$\varepsilon(\mu\text{m}/\text{m})$
(a)	120	2,02	1600
(b)	350	3,47	650
(c)	350	2,07	650
(d)	1000	2,06	200

3. Dữ liệu như bài 02, xác định điện áp ra v_0 trong trường hợp sử dụng cầu cân bằng Wheatstone cho các trường hợp điện áp vào v_{ex} như dưới đây.
(a) 2V (b) 4V (c) 7V (d) 10V
4. Như tìm hiểu trong bài 3, v_{ex} tăng thì v_0 tăng. Vậy có điều gì xảy ra không nếu tăng v_{ex} tới 50V để tăng v_0 ?
5. Xác định biến dạng ε cho các đầu đo được cho trong bài 2, tương ứng với các tín hiệu đầu ra v_0 được cho như sau: ($v_{ex} = 5V$)
(a) 1,5mV (b) 3,3mV (c) 4,8mV (d) 5,7mV

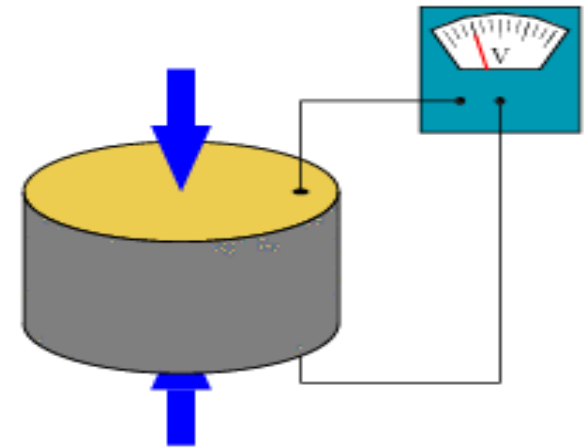
5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện (piezoelectric)

Khi khối vật liệu áp điện chịu tác dụng bởi 1 lực cơ học thì giữa 2 bản cực của nó sẽ xuất hiện một hiệu điện thế. Hoặc, khối vật liệu áp điện sẽ bị biến dạng khi áp vào 2 bản cực của nó một hiệu điện thế tương ứng.



Hình 1: Áp vào hai bản cực vật liệu áp điện một hiệu điện thế



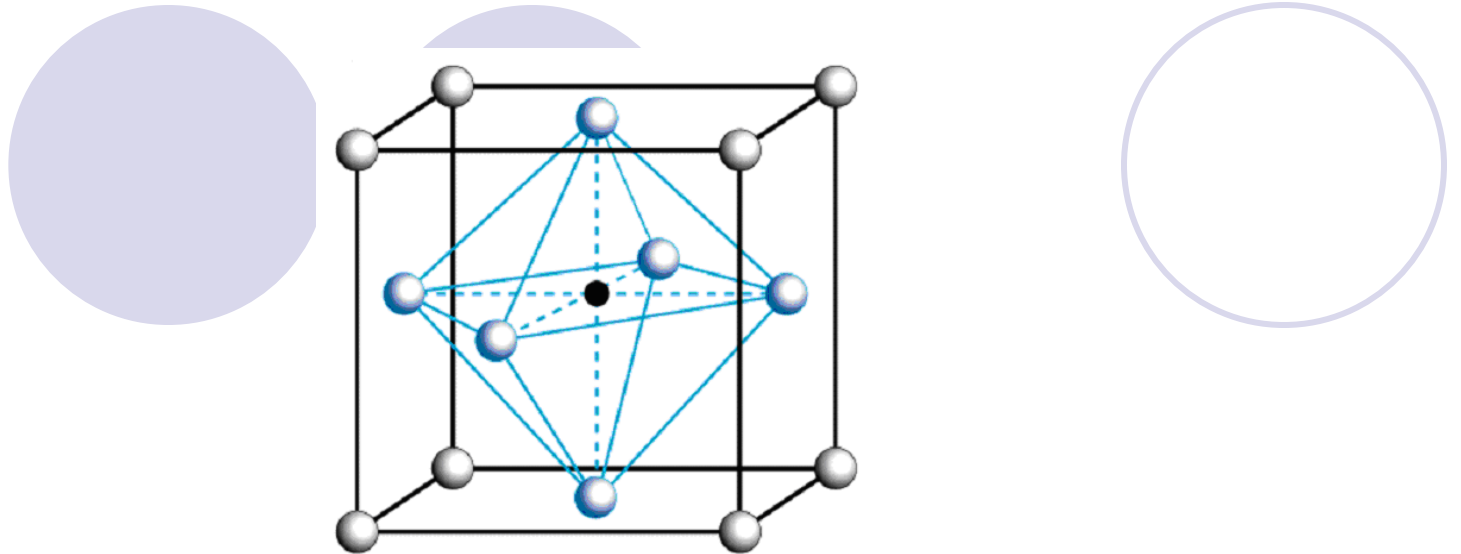
Hình 2: Khối vật liệu áp điện chịu tác dụng của một áp lực

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện (piezoresistivity)

1. Cấu trúc:

Vật liệu áp điện là một tập hợp các tinh thể Perovskite. Mỗi tinh thể được tạo thành bởi: 1 ion kim loại hoá trị IV đặt trong mạng của ion kim loại hoá trị II và Oxy.



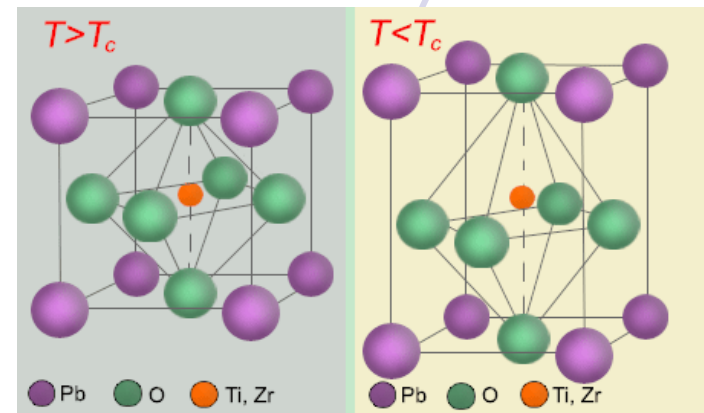
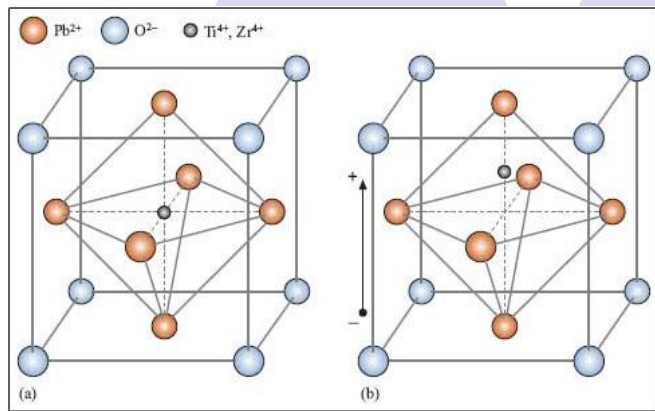
Hình 3: Cấu trúc tinh thể Perovskite

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện (piezoresistivity)

2. Tính chất

Trên nhiệt độ Curie (nhiệt độ tới hạn): tinh thể Perovskite trong vật liệu áp điện có cấu trúc lập phương đối xứng (momen lưỡng cực bằng 0)
Dưới nhiệt độ Curie: tinh thể Perovskite cấu trúc tứ giác đối xứng và có momen lưỡng cực khác 0.



Hình 4: Cấu trúc tinh thể Perovskite của vật liệu áp điện

(a) Cấu trúc vật liệu áp điện ở trên nhiệt độ Curie

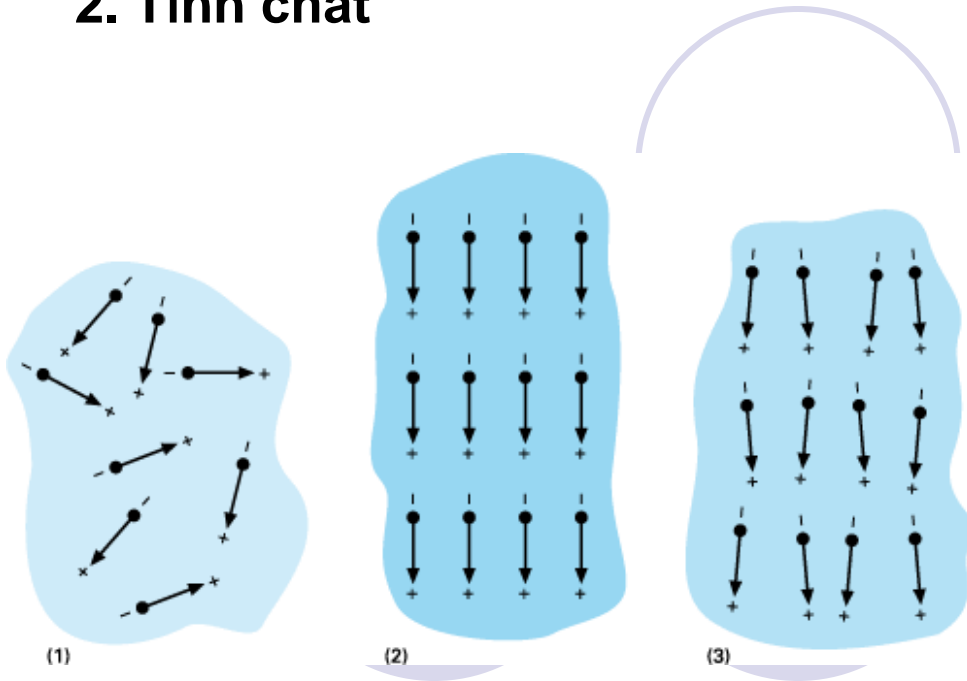
(b) Cấu trúc vật liệu áp điện ở dưới nhiệt độ Curie

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

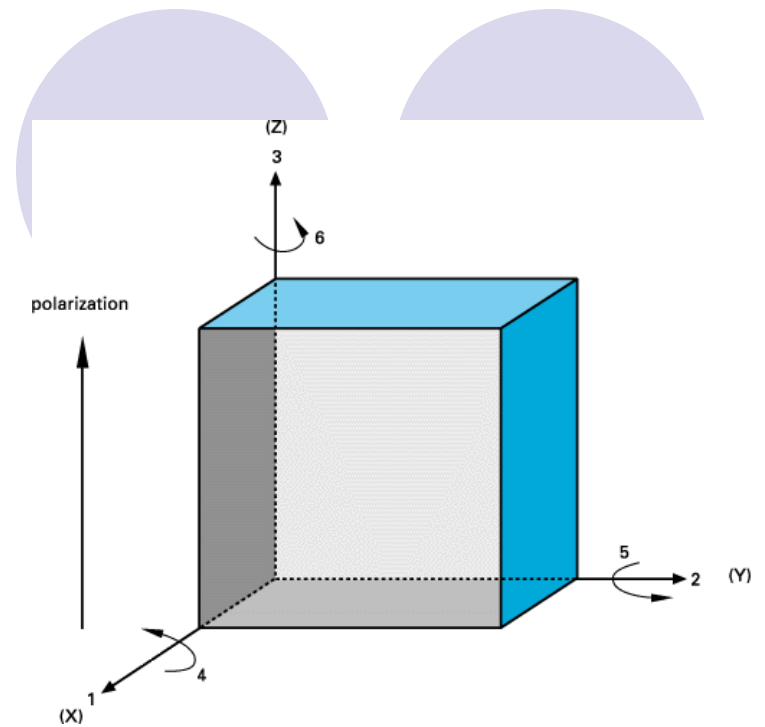
5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện

2. Tính chất



Hình 5: Sự phân cực trong vật liệu áp điện



Hình 6: Chiều tác động trong vật liệu áp điện

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện

1. Hằng số điện tích áp điện, d

Định nghĩa: là sự phân cực tạo ra bởi một đơn vị ứng suất tác động lên một khối vật liệu áp điện; **hay** là một biến dạng của khối vật liệu áp điện khi một đơn vị điện trường đặt vào khối vật liệu áp điện đó

$$d_{ij} = \frac{\text{sự thay đổi hình dạng (m/V)}}{\text{hiệu điện thế cung cấp}}$$
$$\frac{\text{cường độ điện tích}}{\text{lực tác động}} \quad (\text{C/N})$$

i : chiều của sự phân cực tạo ra trong vật liệu hay chiều của điện trường áp vào.

j : chiều của ứng suất áp vào hay chiều của chuyển vị được tạo ra.

Ví dụ: d_{33} ; d_{15}

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện

2. Hằng số hiệu thế áp điện, g

Định nghĩa: là hiệu điện thế sinh ra bởi một vật liệu áp điện chịu tác động bởi 1 đơn vị ứng suất; **hay** là biến dạng cơ học của vật liệu áp điện khi một đơn vị điện trường đặt vào

$$g_{ij} = \frac{\text{trường điện thế}}{\text{lực tác động}} \quad (\text{V.m/N})$$
$$\frac{\text{sự thay đổi hình dạng}}{\text{cường độ điện tích tác động}} \quad (\text{m/C})$$

i : chiều của điện trường tạo ra trong vật liệu

j : chiều của ứng suất áp vào hay chiều của chuyển vị được tạo ra.

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện

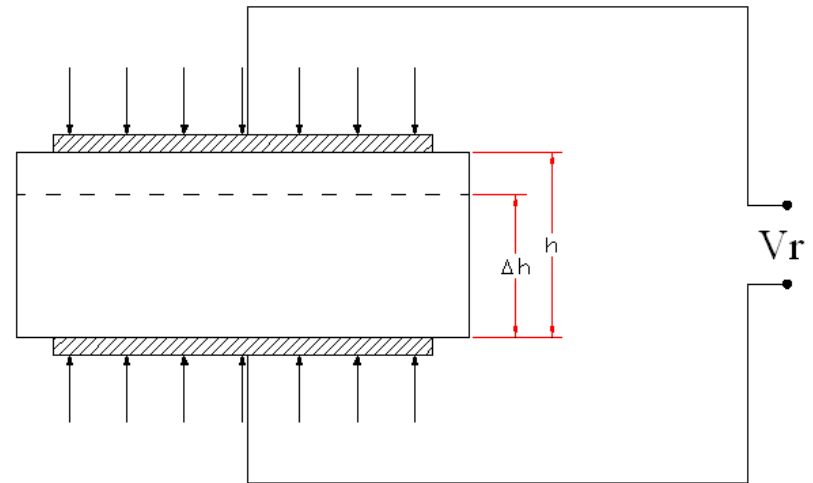
Khi khối vật liệu áp điện chịu tác dụng một áp lực như trên thì **điện tích hình thành trên bề mặt khối vật liệu** áp điện được tính như sau:

$$Q_{33} = d_{33}F_3$$

Như vậy, **điện áp sinh ra từ khối vật liệu áp điện** hình chữ nhật có diện tích mặt A , độ dày h và hằng số điện môi ϵ_r được cho như sau:

$$V_r = \frac{Q_{33}}{C}$$

trong đó: điện dung $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h}$



Hình 7: Phần tử cảm nhận bằng vật liệu áp điện

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Vậy:

$$V_r = \frac{Q_{33}}{C} = \frac{d_{33}F_3h}{\epsilon_0\epsilon_r A}$$
$$V_r = \frac{d_{33}h}{\epsilon_0\epsilon_r} p$$

Bảng tính chất của vật liệu áp điện

Vật liệu	Dạng	d_{33} (pC/N)	Hằng số điện môi ϵ_r
Quartz	Đơn tinh thể	2	4
BaTiO ₃	Ceramic	190	12
PZT	Ceramic	300-600	400-3000
Zinc Oxide	Đơn tinh thể	12	12

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện trở (piezoresistivity)

Ví dụ: Một khối vật liệu áp điện có kích thước: 10x10(mm), dày 1mm có: $d_{33} = 600\text{pC/N}$; $\epsilon_r = 3000$. Khi tác dụng 1 lực $F_3 = 100\text{N}$ thì điện áp sinh ra giữa 2 bản cực là bao nhiêu?

Giải:

$$V_r = \frac{Q_{33}}{C} = \frac{d_{33}F_3h}{\epsilon_0\epsilon_r A} = \frac{600 \left[\frac{\text{pC}}{\text{N}} \right] \cdot 100[\text{N}] \cdot 1 \cdot 10^{-3}[\text{m}]}{8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \right] \cdot 3000 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10^{-6}[\text{m}^2]}$$

$$V_r = 22,6\text{V}$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện

Độ nhạy điện tích:

$$S_q = \frac{Q_3}{F_3}$$

Với $Q_3 = S_q \cdot F_3 = S_q \cdot A \cdot p$

A : diện tích vùng bị tác động; p : áp lực tác động

Độ nhạy điện thế:

Ta có: $Q_3 = V_3 \cdot C$; hoặc: $Q_3 = S_q \cdot A \cdot p$

suy ra: $V_3 = \frac{S_q \cdot A \cdot p}{C} = \frac{S_q \cdot A \cdot h \cdot p}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} = \frac{S_q \cdot h \cdot p}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$

Vậy độ nhạy điện thế là: $S_v = \frac{V_3}{h \cdot p} = \frac{S_q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}$

Tín hiệu output V_3 là : $V_3 = S_v \cdot h \cdot p$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Hiệu ứng áp điện

Bảng tra độ nhạy điện thế S_v & độ nhạy điện tích S_q của vật liệu áp điện:

Vật liệu	Hướng tác động	S_q (pC/N)	S_v (V.m/N)
Quartz SiO_2	Theo chiều X	2.2	0.055
BaTiO_3	Theo hướng phân cực	130	0.011

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

- Cảm nhận sự dịch chuyển của đối tượng dựa vào sự thay đổi điện dung.
- Cấu tạo gồm một hay nhiều điện cực cố định được ghép với một hay nhiều điện cực di động.

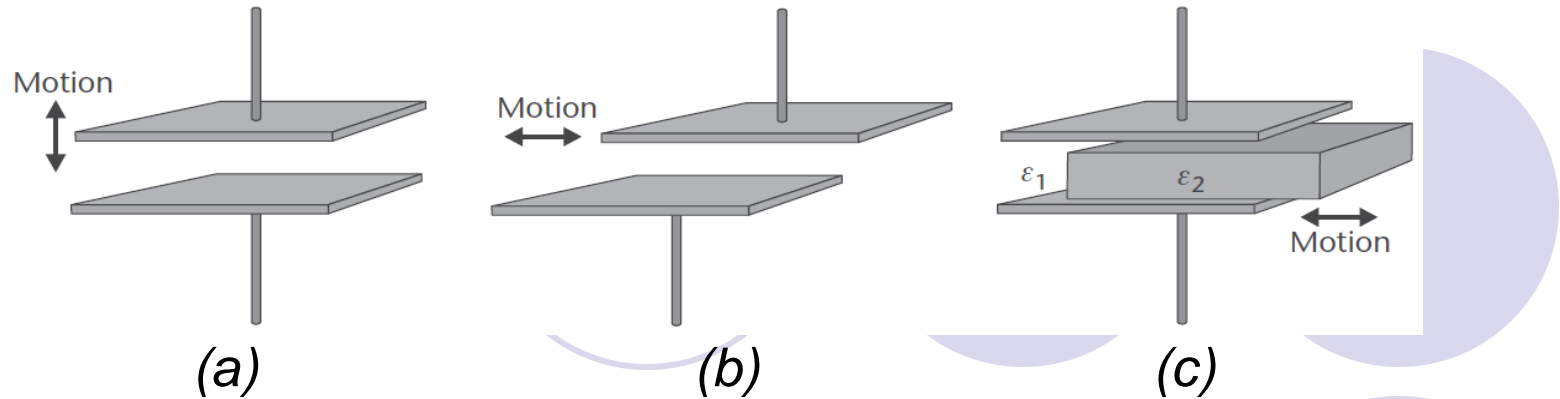
$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

Trong đó: ϵ_0 : hằng số điện môi của chân không; ϵ_r : hằng số điện môi của môi trường; d : khoảng cách giữa hai bản cực; A : diện tích nằm giữa hai bản cực

- Công thức trên cho thấy, điện dung của cảm biến thay đổi nếu thay đổi một trong các đại lượng A , d , ϵ_r

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung



Trường hợp 01: (hình (a)) Điện cực bên dưới cố định; điện cực bên trên di động. Khoảng cách d thay đổi dẫn đến sự thay đổi điện dung của tụ điện C . Sự thay đổi khoảng cách d với điện dung C là không tuyến tính.

Trường hợp 02: (hình (b)) Khoảng cách giữa 02 bản cực không đổi; diện tích giao giữa 02 bản cực thay đổi. Sự thay đổi diện tích A với điện dung C là tuyến tính.

Trường hợp 03: (hình (c)) Khoảng cách giữa 02 bản cực và diện tích giao giữa 02 bản cực là không đổi; hằng số điện môi ϵ_r giữa 02 bản cực thay đổi.

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

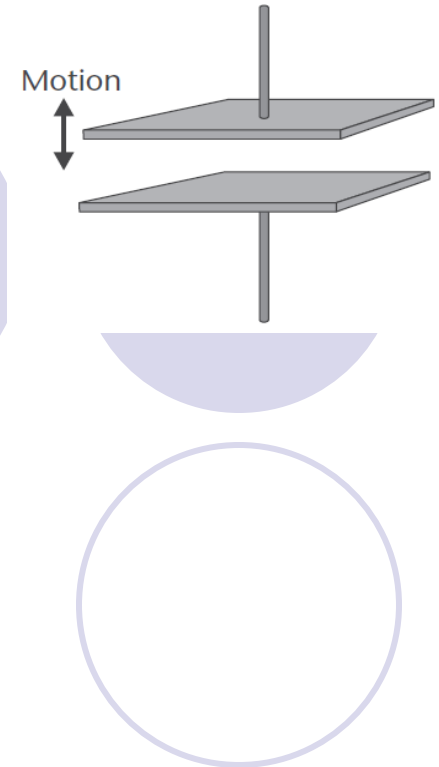
Xét trường hợp riêng: Điện dung của tụ điện thay đổi khi khoảng cách giữa 02 bản cực thay đổi 01 khoảng Δd . Biến thiên điện dung được thể hiện bằng công thức dưới đây:

$$C + \Delta C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{(d + \Delta d)}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{(d + \Delta d) \cdot C} - \frac{C}{C}$$

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{d}{(d + \Delta d)} - 1$$

$$\frac{\Delta C}{C} = - \frac{\Delta d}{(d + \Delta d)}$$



5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

$$\frac{\Delta C}{C} = - \frac{\left(\Delta d / d \right)}{\left(1 + \Delta d / d \right)}$$

Kết luận: Từ công thức trên ta thấy sự biến đổi ($\Delta C/C$) theo ($\Delta d/d$) là không tuyến tính do có sự xuất hiện của ($\Delta d/d$) trong mẫu số.

Để tránh sự khó khăn trong việc sử dụng cảm biến điện dung với tín hiệu ra không tuyến tính, ta sẽ xác định sự thay đổi trở kháng của tụ điện theo sự dịch chuyển khoảng cách giữa 02 bản cực. Công thức tính trở kháng của tụ điện:

$$Z_C = - \frac{j}{\omega \cdot C}$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

$$Z_C + \Delta Z_C = -\frac{j}{\omega} \left(\frac{1}{C + \Delta C} \right)$$

$$\frac{\Delta Z_C}{Z_C} = -\frac{j}{\omega} \left(\frac{1}{C + \Delta C} \right) \cdot \left(\frac{1}{Z_C} \right) - 1$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta Z_C}{Z_C} &= + \left(\frac{C}{C + \Delta C} \right) - 1 \\ &= \left(\frac{C - C - \Delta C}{C + \Delta C} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta Z_C}{Z_C} = \frac{-\Delta C}{C + \Delta C} = -\frac{\Delta C / C}{1 + \Delta C / C}$$

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

Trong đó:

$$\frac{\Delta C}{C} = - \frac{\left(\frac{\Delta d}{d} \right)}{\left(1 + \frac{\Delta d}{d} \right)}$$

Như vậy:

$$\frac{\Delta Z_C}{Z_C} = - \frac{\frac{\Delta C}{C}}{1 + \frac{\Delta C}{C}} = - \frac{\left(\frac{\Delta d}{d} \right)}{1 + \left[- \frac{\left(\frac{\Delta d}{d} \right)}{\left(1 + \frac{\Delta d}{d} \right)} \right]}$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

Vậy ta được:

$$\frac{\Delta Z_C}{Z_C} = \frac{\Delta d}{d}$$

Kết luận: Trong công thức trên, ta thấy trở kháng của tụ điện Z_C quan hệ tuyến tính với khoảng cách d . Việc đo được ΔZ_C đối với cảm biến điện dung dạng đơn giản (hai bản cực song song) sẽ cho phép xác định được khoảng cách dịch chuyển Δd .

Lưu ý:

- Xét đầu cảm biến hình trụ có đường kính D thì sự thay đổi điện dung chỉ tuyến tính với sự dịch chuyển giữa 02 bản cực khi khoảng cách giữa 02 bản cực nằm trong khoảng $0 < d < D/4$
- Nếu $d + \Delta d > D/4$, sự thất thoát từ trong vùng điện trường sẽ gây ra sự thay đổi không tuyến tính của điện dung C .
- Vùng tuyến tính có khả năng mở rộng tới $d \approx D/2$ nếu đầu cảm biến được bảo vệ bằng 01 vòng tiếp đất.

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

Độ nhạy:

$$S = \frac{\Delta Z_C}{\Delta d} = \left| \frac{Z_C}{d} \right| = \left| \frac{1}{\omega \cdot C \cdot d} \right| = \left| \frac{1}{\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A} \right|$$

Độ nhạy có thể được cải thiện bằng cách:

- Giảm diện tích A của đầu đo.
- Giảm tần số ω . Tuy nhiên phải phụ thuộc vào khả năng đáp ứng của thiết bị

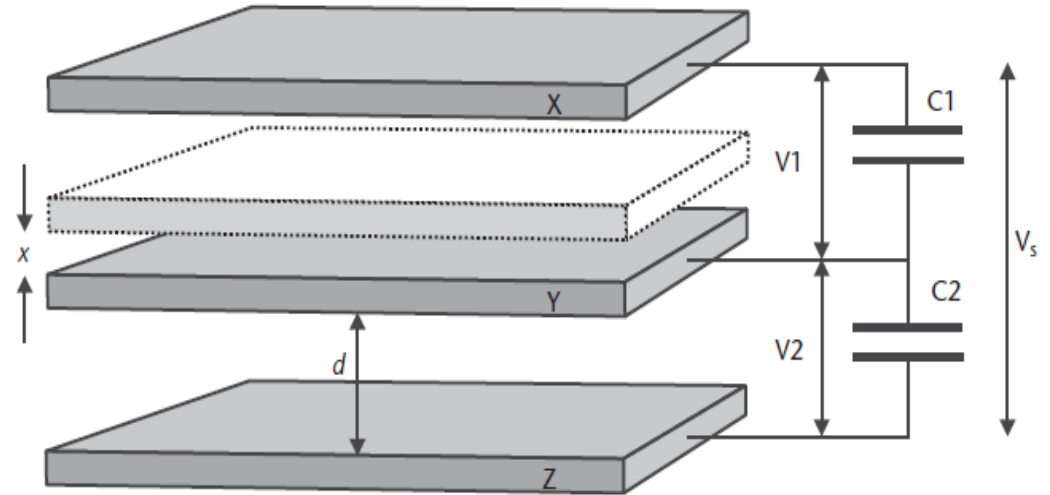
Kết luận:

- Biến thiên điện dung là hàm tuyến tính khi diện tích của bản cực & hằng số điện môi thay đổi; phi tuyến khi khoảng cách giữa 02 bản cực thay đổi.
- Biến thiên dung kháng của tụ điện là hàm tuyến tính khi khoảng cách giữa 02 bản cực thay đổi & phi tuyến khi diện tích bản cực & hằng số điện môi thay đổi.

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

Cảm biến điện dung vi sai:



Cấu tạo:

- Tấm X & Z là 02 bản cực cố định; tấm Y là bản cực di động.
- Khoảng cách ban đầu giữa các bản cực của tụ điện là d ; x là khoảng cách di chuyển của tấm Y.

Như vậy khi bản cực Y di chuyển khoảng cách x , ta có:

$$\begin{aligned} C_1 = C_{12} &= \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d - x} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d(1 - x/d)} \\ &= C_0 \cdot \frac{1}{(1 - x/d)} \end{aligned}$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

$$C_2 = C_{23} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d + x} = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d(1 + x/d)}$$
$$= C_0 \cdot \frac{1}{(1 + x/d)}$$

Khi điện dung thay đổi thì trở kháng cũng thay đổi:

$$\Delta Z = Z_2 - Z_1 = \frac{1}{\omega \cdot C_2} - \frac{1}{\omega \cdot C_1}$$
$$= \frac{1}{\omega} \cdot \left(\frac{1}{C_{23}} - \frac{1}{C_{12}} \right)$$

$$= \frac{1}{\omega} \cdot \left(\frac{1}{C_0 \cdot \left(\frac{1}{1+x/d} \right)} - \frac{1}{C_0 \cdot \left(\frac{1}{1-x/d} \right)} \right)$$

5.2 CẢM BIẾN

5.2.2. Kỹ thuật điện dung

$$= \frac{1}{\omega \cdot C_0} \cdot \left(1 + \frac{x}{d} - \left(1 - \frac{x}{d} \right) \right)$$
$$= \frac{1}{\omega \cdot C_0} \cdot \left(2 \cdot \frac{x}{d} \right)$$

Như vậy, $\Delta Z = Z_2 - Z_1 = 2 \cdot \left(\frac{x}{d} \right) \frac{1}{\omega \cdot C_0}$

Tất cả nhân 02 vế của biểu thức trên cho dòng điện i:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 2 \cdot V_0 \left(\frac{x}{d} \right) = V_s \left(\frac{x}{d} \right)$$

$$\Delta V = V_s \left(\frac{x}{d} \right)$$

Kết luận: Bản cực Y di chuyển một đoạn x, điện áp chênh lệch giữa 02 tụ điện thay đổi tuyến tính đo được giá trị ΔV

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.1. Đo lực kiểu treo

Khảo sát lại cầu Wheatstone như hình vẽ:
Điều kiện về dòng điện:

$$I_1 = I_2 = \frac{V_{ex}}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

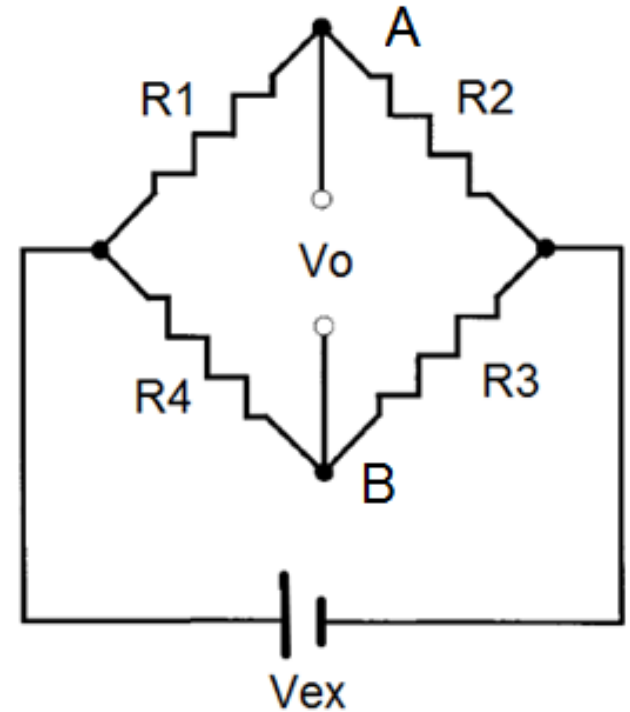
$$I_4 = I_3 = \frac{V_{ex}}{R_4 + R_3}$$

Điều kiện về điện áp khi chưa hoạt động: $V_0 = 0$

$$V_0 = 0 \Rightarrow V_A = V_B; \Rightarrow I_1 R_1 = I_4 R_4 \quad (2)$$

$$(1) \& (2) \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_3}{R_3 + R_4}, \text{ hay } R_1 \cdot R_4 = R_3 \cdot R_2$$

Vậy:
$$R_1 = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_4}$$



Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.3 CẢM BIẾN LỰC

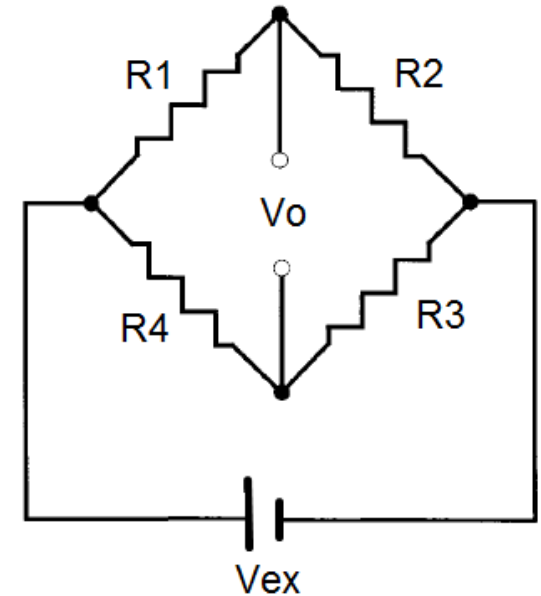
5.3.1. Đo lực kiểu treo

Khi hoạt động: $V_0 \neq 0$

$$\Rightarrow V_0 = i_1 \cdot R_1 - i_4 \cdot R_4 = i_4 \cdot R_3 - i_1 \cdot R_2 \quad (3)$$

Thay (1) vào (3):

$$V_0 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \right) \cdot V_{ex}$$
$$= \left(\frac{R_1 \cdot R_3 - R_4 \cdot R_2}{(R_1 + R_2) \cdot (R_4 + R_3)} \right) \cdot V_{ex}$$



Khi đó;

$$\Delta V_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2) \cdot (R_4 + \Delta R_4 + R_3 + \Delta R_3)} \cdot V_{ex} \quad (4)$$

Khai triển biểu thức (4) & loại bỏ đi các số hạng quá nhỏ, ta được:

$$\Delta V_0 = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot V_{ex} \quad (5) \quad 47$$

5.3 CẢM BIẾN LỰC

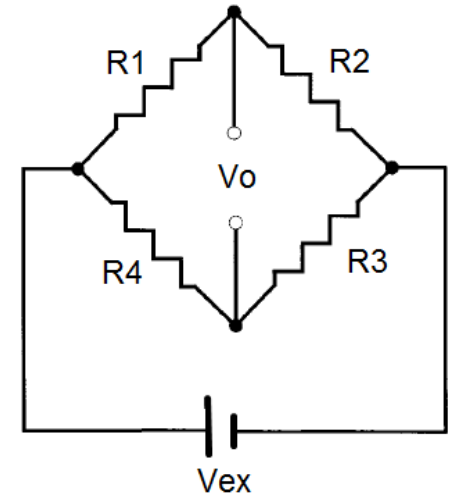
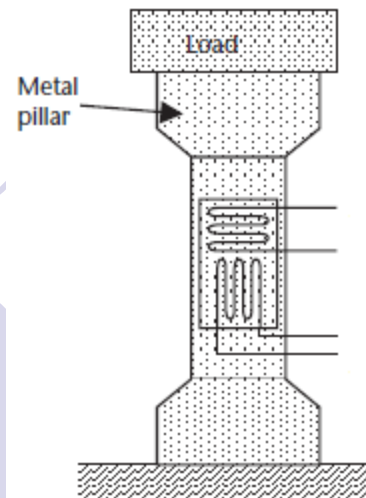
5.3.1. Đo lực kiểu treo

Khi 1 lực P tác dụng lên phần tử đo lực thì mặt 1; 2; 3; 4 của phần tử tải đều bị biến dạng. Mặt 1, 3: biến dạng theo chiều dọc ε_a ; mặt 2, 4 biến dạng theo chiều ngang ε_t

$$\varepsilon_a = \frac{P}{A.E} \quad \varepsilon_t = \frac{-\nu.P}{A.E} \quad (6)$$

- Hệ số Poisson: $\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a}$

- A: diện tích mặt cắt ngang
- E: module đàn hồi của vật liệu làm phần tử đo tải



Theo nguyên tắc áp điện trở đã nghiên cứu trước thì khi có một lực P tác dụng đáp ứng của các phần tử đo như sau:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = GF \cdot \varepsilon_a = \frac{GF \cdot P}{A \cdot E} \quad (7)$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = GF \cdot \varepsilon_t = -\frac{\nu \cdot GF \cdot P}{A \cdot E} \quad (8)$$

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.1. Đo lực kiểu treo

Thay (7), (8) vào công thức (5)

Lưu ý rằng: cầu Wheatstone sử dụng 4 đầu đo biến dạng với điện áp ra V_0 ; $R_1 = R_2$.

$$V_0 = \frac{GF \cdot P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot A \cdot E} \cdot V_s \quad (9)$$

Lực tác dụng P được xác định:

$$P = \frac{2 \cdot A \cdot E}{GF \cdot (1 + \nu) \cdot V_s} \cdot V_0 = C \cdot V_0 \quad (10)$$

Theo (10), lực tác dụng P tỷ lệ tuyến tính với giá trị điện áp V_0 và hệ số tỷ lệ (hệ số hiệu chỉnh) C:

$$C = \frac{2 \cdot A \cdot E}{GF \cdot (1 + \nu) \cdot V_s} \quad (11)$$

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.1. Đo lực kiểu treo

Độ nhạy:

- Độ nhạy của đầu dò lực:

$$S = \frac{V_0}{P} = \frac{1}{C} = \frac{GF \cdot (1 + \nu) \cdot V_s}{2 \cdot A \cdot E} \quad (12)$$

- Các yếu tố ảnh hưởng đến độ nhạy S:

1. Diện tích mặt cắt ngang A của phần tử đo tải
2. Hằng số đàn hồi của vật liệu làm phần tử đo tải
 - + Module đàn hồi E
 - + Hệ số Poisson ν
3. Hệ số đầu đo GF .
4. Điện áp cung cấp cho cầu Wheatstone V_s

Khả năng đo của đầu đo lực: phụ thuộc vào độ bền mỏi của vật liệu S_f và diện tích mặt cắt ngang A .

$$P_{\max} = S_f \cdot A \quad (13)$$

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.1. Đo lực kiểu treo

Nhận xét:

- Độ nhạy S & khả năng đo của đầu đo phụ thuộc vào diện tích mặt cắt ngang A
- Tuy nhiên, độ nhạy $S \uparrow \rightarrow$ khả năng đo \downarrow (hay độ nhạy $S \downarrow \rightarrow$ khả năng đo \uparrow)

Xét trường hợp lực tác dụng lớn nhất

Theo công thức (9), đối với lực P_{max} thì $(V_0/V_s)_{max}$ sẽ là:

$$\left(\frac{V_0}{V_s}\right)_{max} = \frac{GF \cdot S_f \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot E} \quad (14)$$

Trong thực tế, người ta thường sử dụng hệ số $(V_0/V_s)_{max}$ đã hiệu chỉnh, đó là $(V_0/V_s)^*$. Như vậy:

$$\left(\frac{V_0}{V_s}\right)^* = \frac{GF \cdot S_f \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot E} = \frac{GF \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot E} \cdot \frac{P_{max}}{A} \quad (15)$$

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.1. Đo lực kiểu treo

Từ công thức (10),

$$P = \frac{2 \cdot A \cdot E}{GF \cdot (1 + \nu)} \cdot \frac{V_0}{V_S}$$
$$\Rightarrow \frac{GF \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot A \cdot E} = \frac{V_0}{V_S} \cdot \frac{1}{P} \quad (16)$$

Thay (16) vào (15), ta được:

$$\left(\frac{V_0}{V_S}\right)^* = \left(\frac{V_0}{V_S}\right) \cdot \frac{1}{P} \cdot P_{max}$$

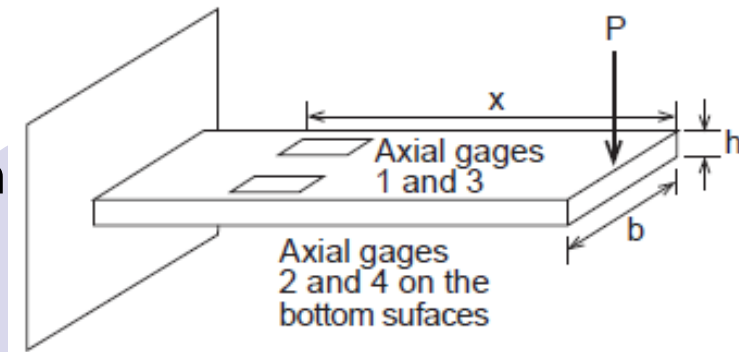
Như vậy, ta xác định được giá trị lực tác dụng:

$$P = \frac{\left(\frac{V_0}{V_S}\right)}{\left(\frac{V_0}{V_S}\right)^*} \cdot P_{max} \quad (15)$$

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.2. Đo lực kiểu dầm

- Đo lực kiểu dầm có dạng như hình bên
- Sử dụng 4 đầu đo biến dạng: 1,3 mặt trên 2,4 mặt dưới
- Lực tác dụng P
- Lực tác dụng cách đầu đo 1 khoảng cách x



Khi tác dụng 01 lực P thì xảy ra biến dạng trên thanh dầm như sau:

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \frac{6M}{E \cdot b \cdot h^2} = \frac{6P \cdot x}{E \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

b: chiều rộng của thanh dầm; h: chiều cao của thanh dầm

Theo nguyên tắc áp trở, đáp ứng xảy ra khi có biến dạng trên dầm:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = GF \frac{6 \cdot P \cdot x}{E \cdot b \cdot h^2} \quad (2)$$

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.2. Đo lực kiểu dầm

Thay (2) vào (5) & $R_1=R_2$ xác định được điện áp ra:

$$V_0 = \frac{6 \cdot GF \cdot P \cdot x}{E \cdot b \cdot h^2} \cdot V_s \quad (3)$$

Và lực ta đo được là:

$$P = \frac{E \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot GF \cdot x \cdot V_s} \cdot V_0 \quad (4)$$

Độ nhạy:

$$S = \frac{V_0}{P} = \frac{6 \cdot GF \cdot x \cdot V_s}{E \cdot b \cdot h^2} \quad (5)$$

Như vậy, độ nhạy phụ thuộc:

1. Hình dạng của dầm đo: b, h
2. Module đàn hồi E
3. Vị trí tác dụng lực lên dầm, x
4. Hệ số đầu đo của cảm biến biến dạng GF
5. Điện áp cung cấp cho cầu Wheatstone, V_s

5.3 CẢM BIẾN LỰC

5.3.2. Đo lực kiểu dầm

Giới hạn:

Khả năng đo của đầu đo lực kiểu dầm phụ thuộc:

1. Hình dạng mặt cắt ngang của dầm đo: b, h
2. Điểm đặt lực
3. Độ bền mỏi của dầm, S_f [N/cm²]

Xác định

$\left(\frac{V_0}{V_s}\right)_{max}$

Từ (4) suy ra:

$$P_{max} = \frac{E \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot GF \cdot x} \cdot \left(\frac{V_0}{V_s}\right)_{max}$$

Từ (6)&(7) suy ra:

$$\left(\frac{V_0}{V_s}\right)_{max} = \frac{S_f \cdot GF}{E}$$

$$P = \frac{\left(\frac{V_0}{V_s}\right)^*}{\left(\frac{V_0}{V_s}\right)_{max}} \cdot P_{max}$$

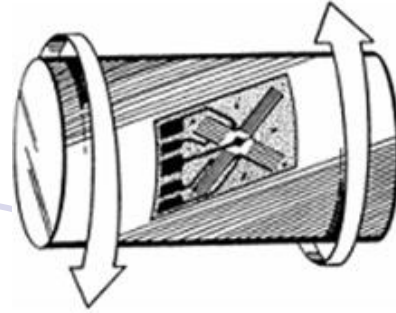
:hệ số thương mại nằm trong khoảng từ 4 ÷ 5 mV/V

$$P_{max} = S_f \frac{b \cdot h^2}{6} \frac{1}{x}$$

(6)

(7)

5.4 ĐO MOMENT XOẮN



Ứng suất cắt [N/cm^2] xuất hiện trên trục tỷ lệ với momen xoắn T [$\text{cm}\cdot\text{N}$], xác định bởi công thức:

$$\tau_{xy} = \frac{T \cdot D}{2 \cdot J} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D^3} \quad (1)$$

D : đường kính trục [cm]

J : moment quán tính phân cực của mặt cắt ngang hình tròn [cm^4]

Khi thanh bị xoắn, ứng suất theo các trục x , y , z là:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 0 \quad (2)$$

Ứng suất cắt là:

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xy} = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D^3} \quad (3)$$

5.4 ĐO MOMENT XOẮN

Từ công thức (3) & tuân theo định luật Hooke, ta thu được công thức biến dạng:

$$\varepsilon_1 = \frac{16.T}{\pi.D^3} \cdot \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \quad \varepsilon_2 = -\frac{16.T}{\pi.D^3} \cdot \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \quad (4)$$

Theo nguyên lý áp điện trở:

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{16.T}{\pi.D^3} \cdot \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \cdot GF \quad (5)$$

Thay công thức (5) vào công thức cầu Wheatstone, ta được:

$$V_0 = \frac{16.T}{\pi.D^3} \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \cdot GF \cdot V_S \quad (6)$$

Như vậy, moment được xác định:

$$T = \frac{\pi.D^3.E}{16.(1+\nu).GF.V_S} \cdot V_0 = C.V_0 \quad (7)$$

Với C là hệ số hiệu chỉnh:

$$C = \frac{\pi.D^3.E}{16.(1+\nu).GF.V_S}$$

5.4 ĐO MOMENT XOẮN

Độ nhạy:

$$S = \frac{V_0}{T} = \frac{1}{C} = \frac{16 \cdot (1 + \nu) \cdot GF \cdot V_S}{\pi \cdot D^3 \cdot E} \quad (8)$$

Độ nhạy phụ thuộc:

- Đường kính trục, D
- Vật liệu làm trục, E ; ν
- Hệ số đầu đo, GF
- Điện áp cung cấp cho cầu Wheatstone

Giới hạn: Giới hạn của đầu đo moment xoắn phụ thuộc vào ứng suất cắt cho phép S_τ của trục đo:

$$T_{max} = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot S_\tau}{16} \quad (9)$$

Từ (7) & (9), ta được:

$$\left(\frac{V_0}{V_S}\right)_{max} = \frac{S_\tau \cdot GF \cdot (1 + \nu)}{E}$$

$$T = \frac{\left(\frac{V_0}{V_S}\right)}{\left(\frac{V_0}{V_S}\right)^*} \cdot T_{max}$$

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.1 Tổng quan

5.5.2. Ứng dụng

5.5.3. Lưu lượng kế dựa vào phương pháp đo thể tích trực tiếp

5.5.4. Đo lưu lượng dựa vào tốc độ dòng chảy

5.5.5. Lưu lượng kế dựa vào sự chênh áp suất

5.5.6. Lưu lượng kế dựa vào dòng chảy xoáy

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.1. Tổng quan

a. Lưu lượng và đơn vị đo

Lưu lượng chất lưu là lượng chất lưu chảy qua tiết diện ống trong một đơn vị thời gian.

- ✓ Lưu lượng thể tích (thể tích/ thời gian – [m³/s])
- ✓ Lưu lượng khối (khối lượng/ thời gian – [kg/s])

Lưu lượng trung bình trong khoảng thời gian $\Delta t = t_1 - t_2$:

$$Q_{tb} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Lưu lượng tức thời:

$$Q = \frac{dV}{dt}$$

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.1. Tổng quan

b. Các phương pháp đo lưu lượng

Tùy thuộc vào tính chất chất lưu, yêu cầu công nghệ, người ta sử dụng các lưu lượng kế khác nhau. Nguyên lý hoạt động của các lưu lượng kế dựa trên cơ sở:

- **Đếm trực tiếp thể tích chất lưu** chảy qua lưu lượng kế trong khoảng thời gian xác định Δt
- **Đo vận tốc chất lưu** chảy qua lưu lượng kế, lưu lượng là hàm của vận tốc
- **Đo độ giảm áp qua tiết diện** thu hẹp trên dòng chảy, lưu lượng là hàm phụ thuộc vào độ giảm áp.
- **Tín hiệu đo biến đổi trực tiếp** thành tín hiệu điện hoặc nhờ bộ chuyển đổi điện thích hợp.

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.2. Ứng dụng

a. Lưu lượng kế cầm tay

- Đo lưu lượng nước trong ngành cấp thoát nước, trạm bơm, trạm đo (nước uống và nước thải)
- Đo lưu lượng của các sản phẩm dầu: dầu thô, sản phẩm hóa dầu, các quá trình trong công nghiệp chế biến thực phẩm và hóa chất.

b. Lưu lượng kế cố định

- Đo lưu lượng của tất cả các loại nước: trên hệ thống ống cấp, thoát nước (nước uống và nước thải)
- Đo lưu lượng của các sản phẩm dầu: dầu thô, sản phẩm hóa dầu, lưu chất trong các quá trình trong công nghiệp chế biến thực phẩm và hóa dầu



5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.2. Ứng dụng

c. Lưu lượng kế hoạt động trong môi trường nguy hại

- Đo lưu lượng trong hệ thống chất thải: nước cống / nước mưa.
- Đo lưu lượng trong hệ thống xử lý nước thải, kênh đào tưới tiêu,.... ở các khu vực nguy hiểm.
- Đo lưu lượng tại các khu vực mà con người rất khó tiếp cận.

d. Lưu lượng kế chế tạo bằng công nghệ MEMS

- Lưu lượng kế trên được chế tạo bằng công nghệ MEMS.
- Có khả năng loại bỏ nhiễu do môi trường như bù nhiệt độ với độ chính xác và độ lặp cao, khả năng điều khiển chống ồn, tiếng kêu lổ thông hơi,...
- Ngoài ra, lưu lượng kế này được ứng dụng trong các thiết bị y tế; cảnh báo hơi độc và điều khiển thông gió; thiết bị phân tích vật liệu, máy phân tích môi trường, thiết bị công nghệ cao..

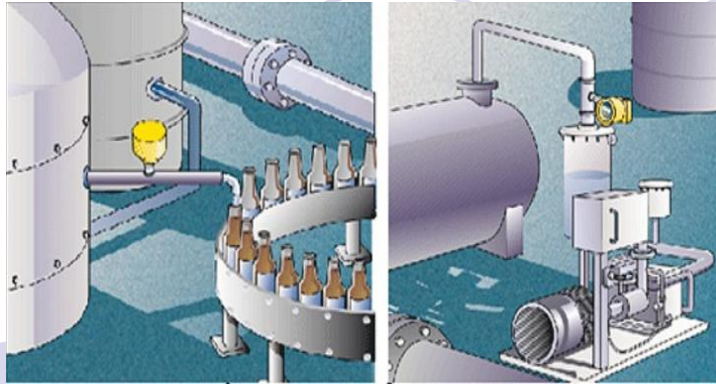


Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

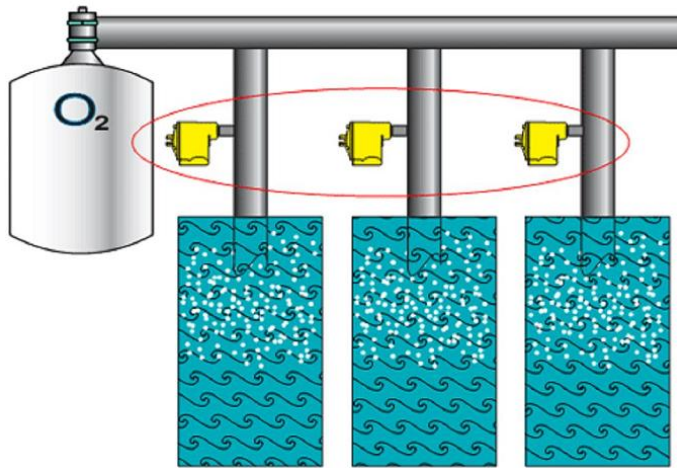
5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.2. Ứng dụng

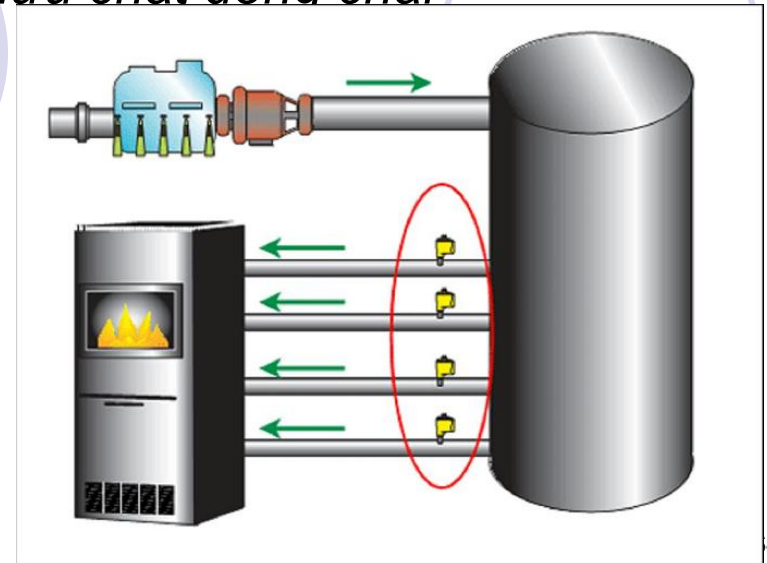
e. Lưu lượng kế ứng dụng trong hệ thống điều khiển lưu chất



Hệ thống chiết rót lưu chất đóng chai



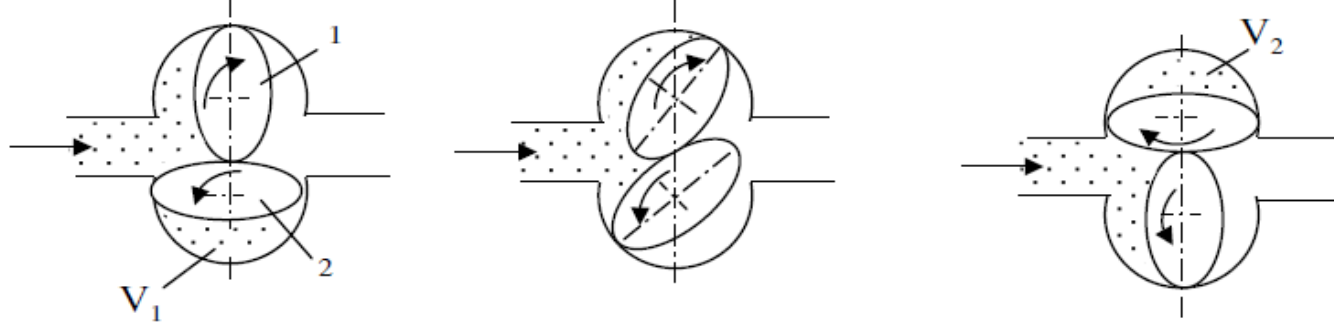
Hệ thống cung cấp O₂ cho hệ thống xử lý chất thải



Hệ thống cung cấp khí cho buồng đốt

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.3. Lưu lượng kế dựa vào phương pháp đo thể tích trực tiếp



Thể tích chất lưu chảy qua lưu lượng kế trong thời gian $\Delta t = t_1 - t_2$, tỷ lệ với số vòng quay của lưu lượng kế:

$$\Delta V = q_v (N_2 - N_1)$$

q_v : Thể tích chất lưu chảy qua lưu lượng kế ứng với 1 vòng quay

N_1, N_2 : tổng số vòng quay của lưu lượng kế tại thời điểm t_1, t_2

Lưu lượng trung bình:

$$Q_{tb} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{q_v (N_2 - N_1)}{t_2 - t_1}$$

Lưu lượng tức thời:

$$Q = \frac{dV}{dt} = q_v \frac{dN}{dt} = q_v n$$

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

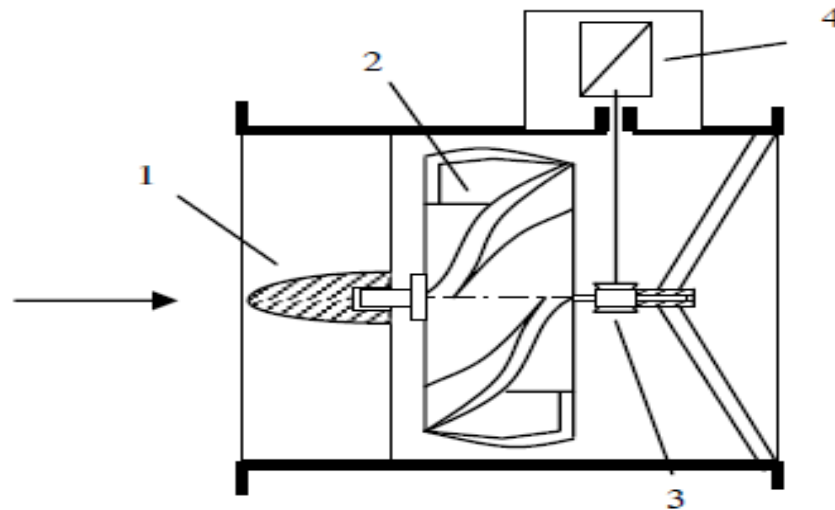
5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.3. Lưu lượng kế dựa vào phương pháp đo thể tích trực tiếp

Các phương pháp đo số vòng quay và chuyển thành tín hiệu điện:

- Dùng tốc độ kế quang.
- Dùng nam châm nhỏ gắn trên trục quay của lưu lượng kế, khi nam châm đi qua một cuộn dây đặt cố định sẽ tạo ra xung điện.
- Dùng mạch đo thích hợp để đo tần số hoặc điện áp.

5.5.4. Đo lưu lượng dựa vào tốc độ dòng chảy



1: Bộ chỉnh dòng chảy; 2: Tuabin; 3: Bộ truyền bánh răng trục vít;
4: Thiết bị đếm

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.4. Đo lưu lượng dựa vào tốc độ dòng chảy

Tốc độ quay của lưu lượng kế tỷ lệ với tốc độ của dòng chảy

$$n = kW$$

k: hệ số tỷ lệ, phụ thuộc cấu tạo của lưu lượng kế

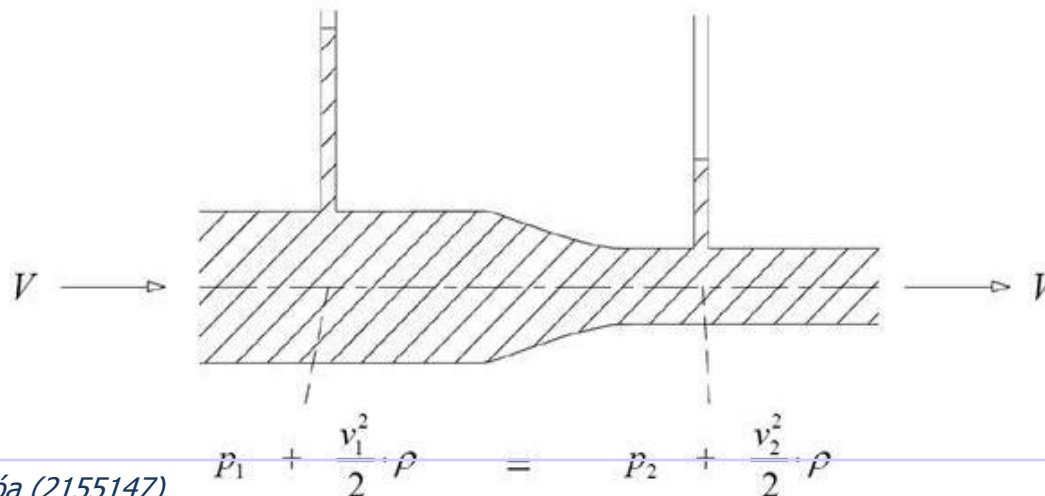
W: tốc độ dòng chảy

Lưu lượng thể tích chất lưu chảy qua lưu lượng kế:

$$Q = WF = \frac{F}{k}n$$

n: tốc độ quay của lưu lượng kế; *F*: tiết diện dòng chảy

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào sự chênh lệch áp suất



5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào sự chênh lệch áp suất

Phương pháp đo lưu lượng dựa vào sự chênh lệch áp suất được dùng khá phổ biến.

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2$$

Phương trình Bernoulli

$$p_1 + (\rho/2) \cdot (V_1)^2 = p_2 + (\rho/2) \cdot (V_2)^2 = \text{const}$$

Theo phương trình năng lượng Bernoulli, năng lượng của một dòng chảy gồm **năng lượng tĩnh (áp suất)** và **động năng (vận tốc)** là một hằng số.

Khi **vận tốc tăng**, **áp suất tĩnh lập tức bị giảm đi**.

Sự giảm áp suất hay hiệu áp Δp là thước đo cho lưu lượng Q :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho/2)(V_2^2 - V_1^2)$$

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào sự chênh lệch áp suất

Từ phương trình trên ta tính được:

$$V_2 = \alpha \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$$

Trong đó:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

Như vậy, ta có lưu lượng theo thể tích là:

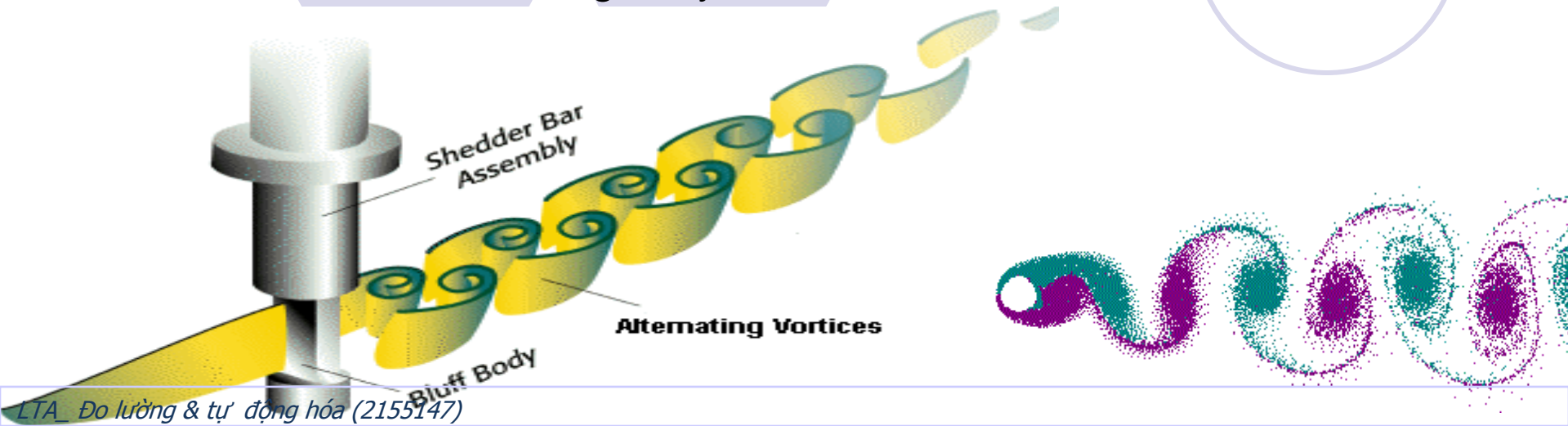
$$Q_v = A_2 \cdot V_2 = \alpha \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \sqrt{p_1 - p_2}$$

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

- Đo lưu lượng bằng dòng xoáy dựa trên **hiệu ứng sự phát sinh dòng xoáy** khi một vật cản nằm trong lưu chất. Các vòng xoáy của lưu chất xuất hiện tuần tự và bị dòng chảy cuốn trôi đi.
- Hiện tượng này được Leonardo da Vinci và Strouhal ghi nhận năm 1878: một sợi dây nằm trong dòng lưu chất chuyển động có sự rung động như một dây đàn. Sự dao động này tỉ lệ thuận với vận tốc dòng chảy và tỉ lệ nghịch với đường kính sợi dây.
- Và Karman đã phát hiện ra nguyên nhân của dao động này là do **sự sinh ra** và **biến mất** của các dòng xoáy bên cạnh vật cản.

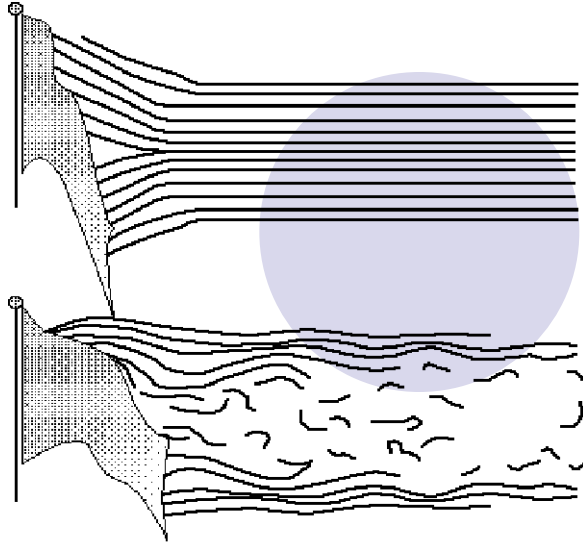


Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

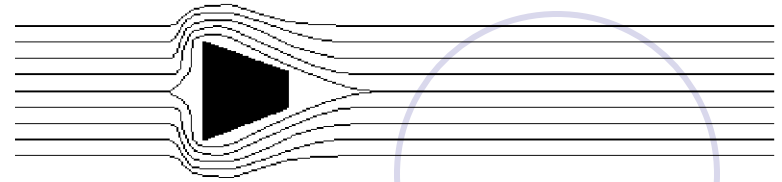
5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

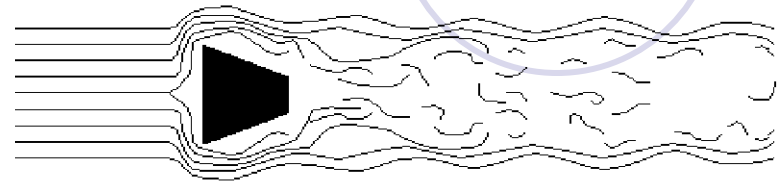
- Như vậy, nguyên lý hoạt động của lưu lượng kế là: đo tần số dòng xoáy dựa trên hiệu ứng sự phát sinh dòng xoáy khi một vật cản nằm trong lưu chất.
- Nguyên nhân gây ra sự dao động là sự sinh ra và biến mất của các dòng xoáy bên cạnh vật cản. Các dòng xoáy ở 2 bên của vật cản có chiều xoáy ngược nhau.



Dòng tầng,
Không có xoáy



Dòng chuyển tiếp,
Xoáy không đều



Dòng rối
Xoáy đều



Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Nguyên lý Karman: Tần số xoáy Karman tỉ lệ với vận tốc dòng chảy:

$$f = St \times \frac{v}{d}$$

Với f : tần số xoáy karman; St : Hệ số Strouhal; v : vận tốc dòng chảy; d : chiều rộng vật cản.

Theo thực nghiệm nếu dòng chảy có $30.000 < Re < 150.000$ thì $0.2 \leq St \leq 0.21$.

Như vậy, ta có thể đo tốc độ dòng bằng cách đo tần số xoáy Karman

Trong điều kiện hằng số St không phụ thuộc vào trị số Re ta có thể tính lưu lượng chất lưu như sau:

$$Q = A \times v = \frac{A \times d \times f}{St}$$

Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Yêu cầu về hình dáng của vật cản phải được cấu tạo sao cho hằng số St là hằng số trong khoảng rộng Re.



Đặc điểm của phương pháp đo dòng chảy xoáy:

- ✓ Cấu trúc đơn giản, do không có các bộ phận chuyển động nên lưu lượng kế luôn đảm bảo độ bền và độ tin cậy cao.
- ✓ Lắp đặt đơn giản, thích hợp cho các chất lỏng không dẫn điện.
- ✓ Phương pháp này rất kinh tế và có độ tin cậy cao.
- ✓ Tần số dòng xoáy không bị ảnh hưởng bởi sự dơ bẩn hay sự hư hỏng nhẹ của vật cản.



5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Đặc điểm của phương pháp đo dòng chảy xoáy:

- ✓ Mọi quan hệ giữa đại lượng đo và đại lượng hiển thị tuyến tính và không thay đổi theo thời gian hoạt động của lưu lượng kế.
- ✓ Sai số phép đo bé.
- ✓ Giá trị đo không phụ thuộc vào các tính chất vật lý của môi trường dòng chảy.
- ✓ Chỉ cần hiệu chỉnh một lần duy nhất trước khi đưa lưu lượng kế vào hoạt động, sau đó không cần hiệu chỉnh lại với các loại lưu chất khác.
- ✓ Các yếu tố cần quan tâm khi sử dụng lưu lượng kế kiểu xoáy là: cách lắp đặt, nhiệt độ lưu chất, tỉ trọng và độ nhớt của lưu chất, các yếu tố nhiễu do rung động

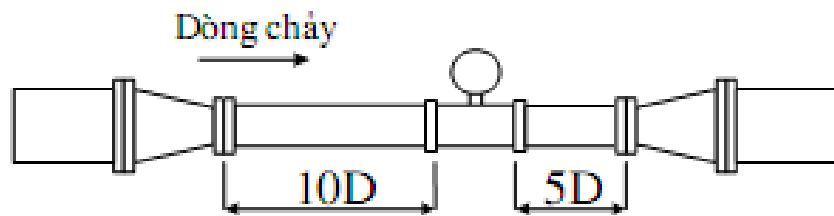
Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

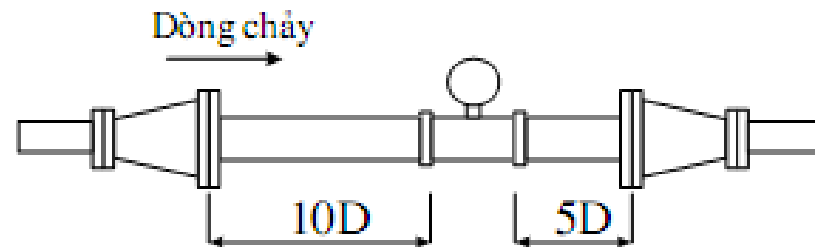
5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Các quy định về lắp đặt lưu lượng kế dòng xoáy

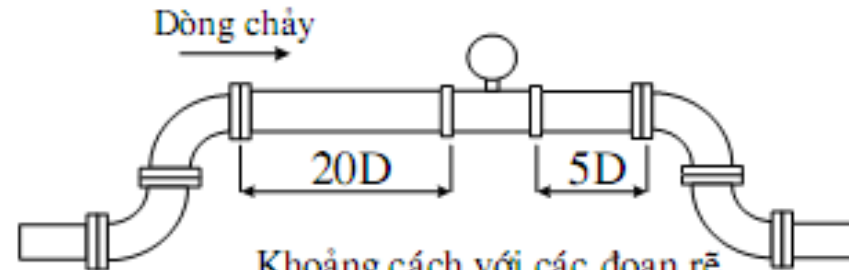
- Lắp lưu lượng kế theo chiều mũi tên cùng chiều dòng chảy vào
- Phải đảm bảo khoảng cách tối thiểu giữa lưu lượng kế với các đoạn nối với các điểm nối khác (van, đoạn cong...) theo chiều xuôi và chiều ngược dòng chảy để thu được các tín hiệu đầu vào chính xác nhất (D là đường kính của lưu lượng kế)



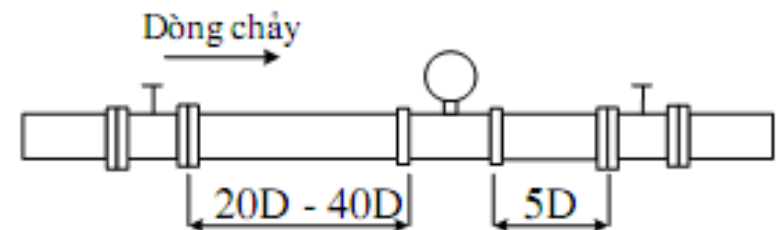
Khoảng cách với ống mở rộng



Khoảng cách với ống thu hẹp



Khoảng cách với các đoạn rẽ



Khoảng cách với các van

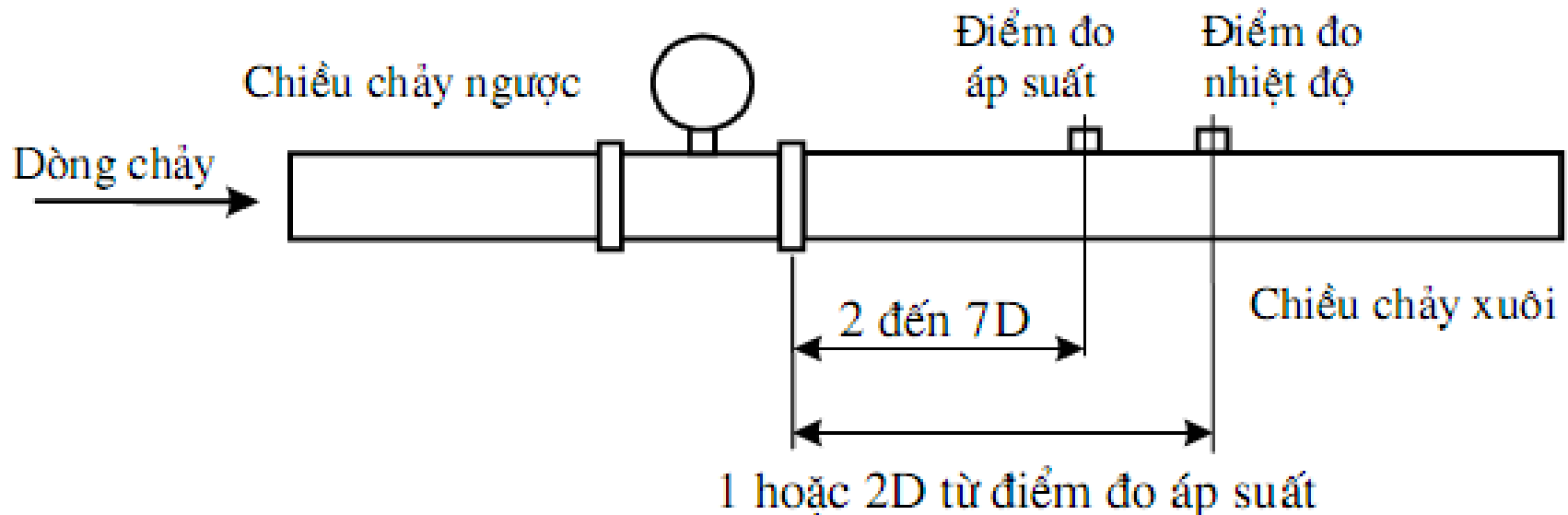
Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Các quy định về lắp đặt lưu lượng kế dòng xoáy

- Việc lắp đặt các điểm đo áp suất và nhiệt độ trên cùng một đường ống với lưu lượng kế có quy định về khoảng cách
- Không đo những chất lỏng có chứa cả các chất rắn như cát, sỏi... loại bỏ định kỳ các vật rắn bám vào thanh chắn.

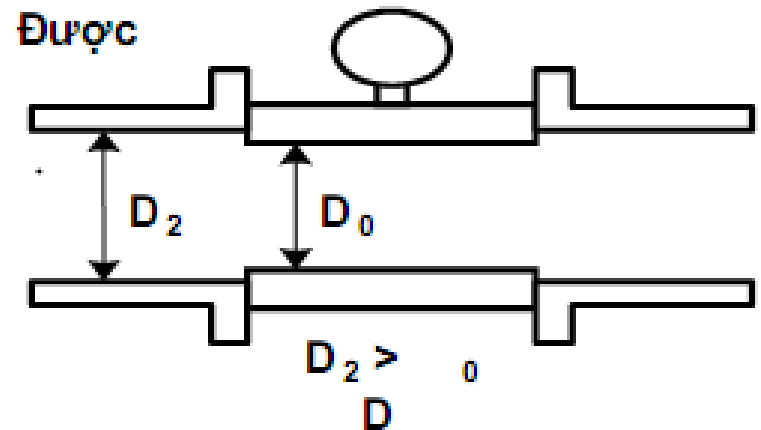
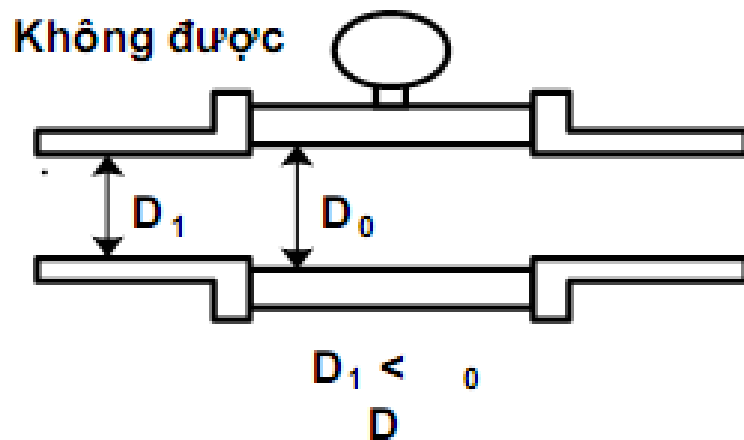


5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Các quy định về lắp đặt lưu lượng kế dòng xoáy

- Thường không thể đo các lưu chất khi dòng chảy có tạp chất, dòng chảy phân tầng hoặc dòng chảy có bọt khí.
- Tốt nhất là lưu lượng kế và đường ống phải có cùng đường kính. Trong trường hợp không tránh khỏi phải khác nhau thì đường kính của lưu lượng kế phải nhỏ hơn đường kính ống:



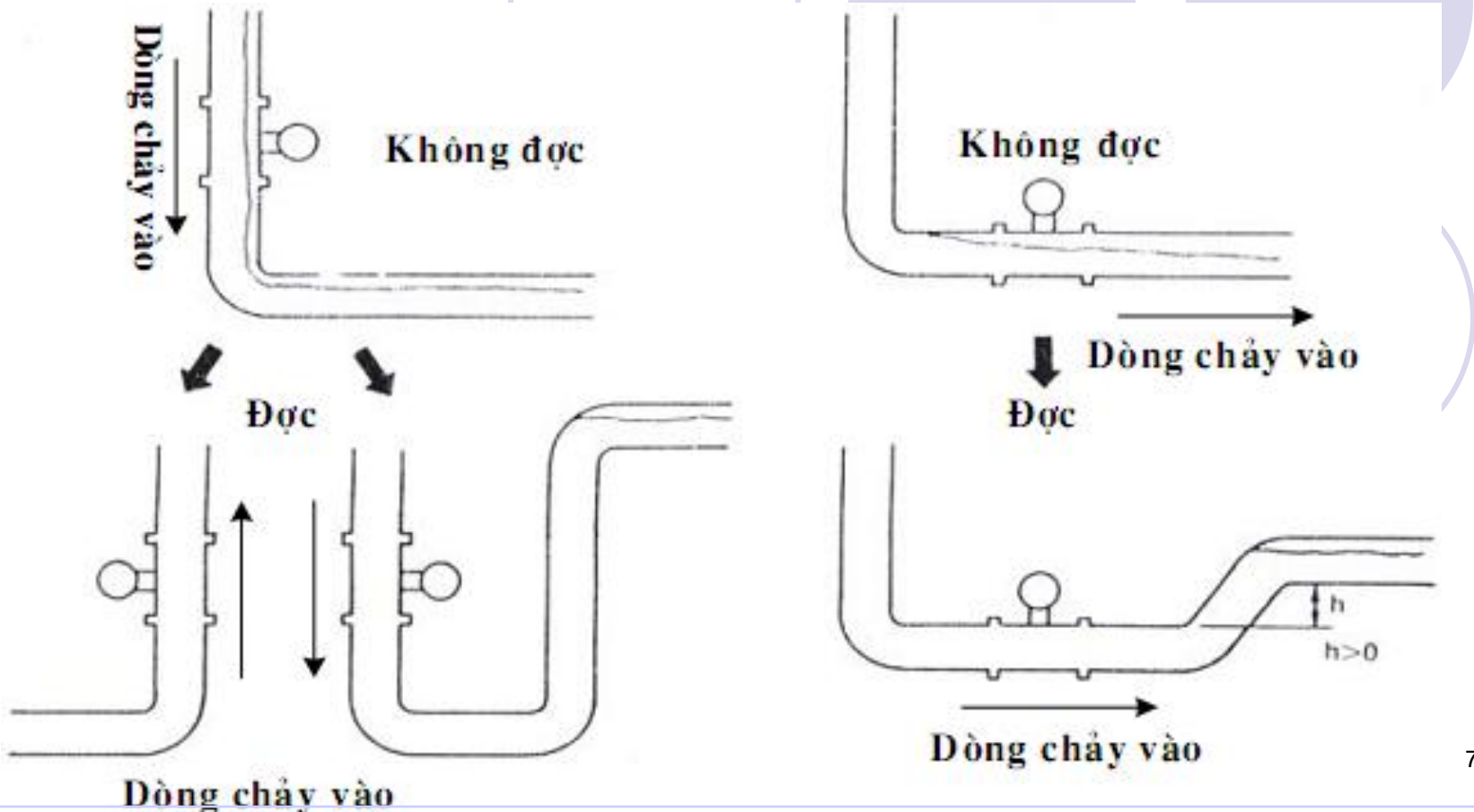
Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Các quy định về lắp đặt lưu lượng kế dòng xoáy

Để đo được chính xác lưu lượng của lưu chất thì yêu cầu phải đo với những đường ống luôn đầy



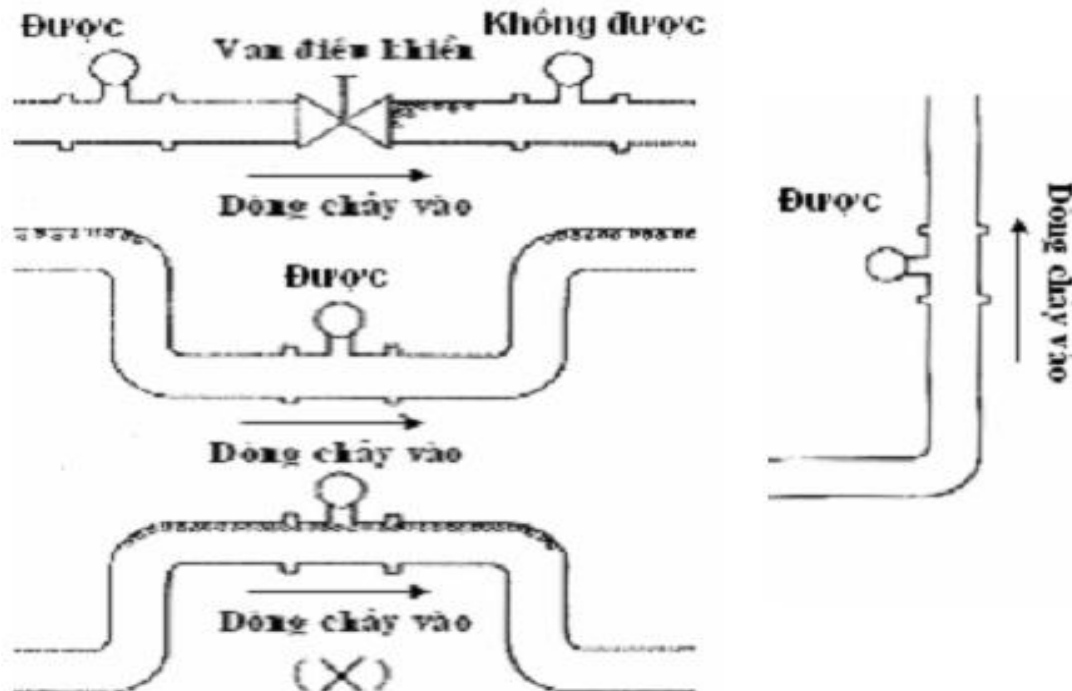
Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Các quy định về lắp đặt lưu lượng kế dòng xoáy

Các lưu chất sẽ gây ra các lỗi trong quá trình đo. Phải tránh các bọt khí tạo ra trong chất lỏng vì vậy mà đường ống phải lắp đặt sao cho tránh được sự tạo thành của các bọt khí. Nên lắp đặt van theo chiều xuôi dòng chảy vì sự giảm áp suất khi dòng chảy qua van sẽ làm các bọt khí thoát đi:



5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Đo lưu lượng dựa vào dòng chảy xoáy

Các quy định về lắp đặt lưu lượng kế dòng xoáy

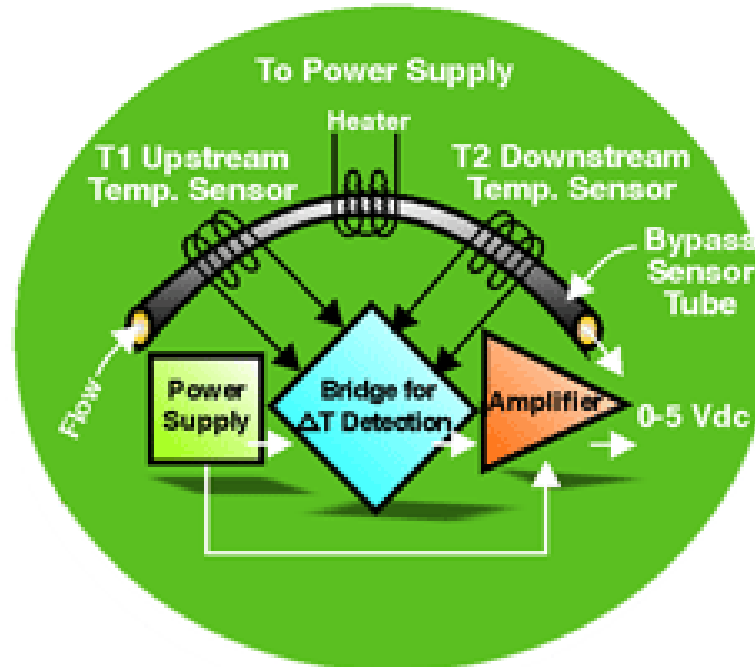
- Không lắp đặt lưu lượng kế trong môi trường có nhiệt độ thay đổi đột ngột
- Trong một môi trường có các thiết bị phát nhiệt nóng thì phải lắp đặt lưu lượng kế ở chỗ có thông gió. Không lắp đặt lưu lượng kế trong môi trường dễ bị ăn mòn.
- Không được cho lưu lượng kế vào trong bất kỳ một chất lỏng nào.
- Nên lắp đặt lưu lượng kế trong những môi trường hạn chế thấp nhất mức va chạm và chấn động.

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Lưu lượng kế khối nhiệt

a. Giới thiệu

Thiết bị đo là loại cảm biến được cấu tạo bằng một miếng kim loại mỏng, đường kính nhỏ, ở bên ngoài miếng kim loại người ta đặt một cuộn dây đun nóng, và đối xứng về hai phía cuộn dây có đặt hai cảm biến đo nhiệt độ tương ứng T1 và T2.

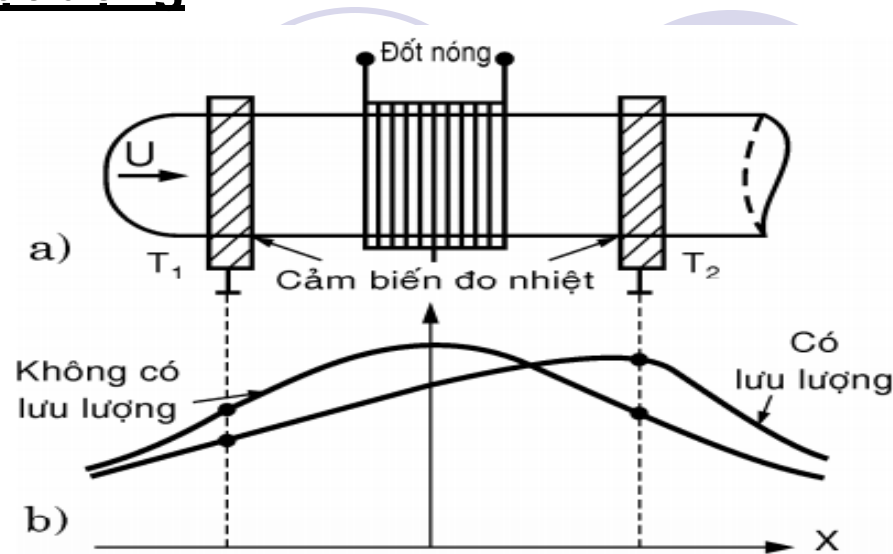


Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Lưu lượng kế khối nhiệt

a. Nguyên tắc hoạt động



- Khi lưu lượng bằng không, sự đun nóng đối xứng $T_1 = T_2$; khi có lưu lượng, T_1 giảm T_2 tăng, độ sai biệt: $\Delta T = T_2 - T_1$ tỉ lệ với lưu lượng Q cần đo.

- Những cảm biến đo nhiệt độ có thể là hai cặp nhiệt điện, hoặc hai nhiệt điện trở được mắc vào hai nhánh của cầu đo Wheastone với hai điện trở cố định khác được mắc trong hai nhánh còn lại của cầu, điện áp không cân bằng chính là tín hiệu đo.

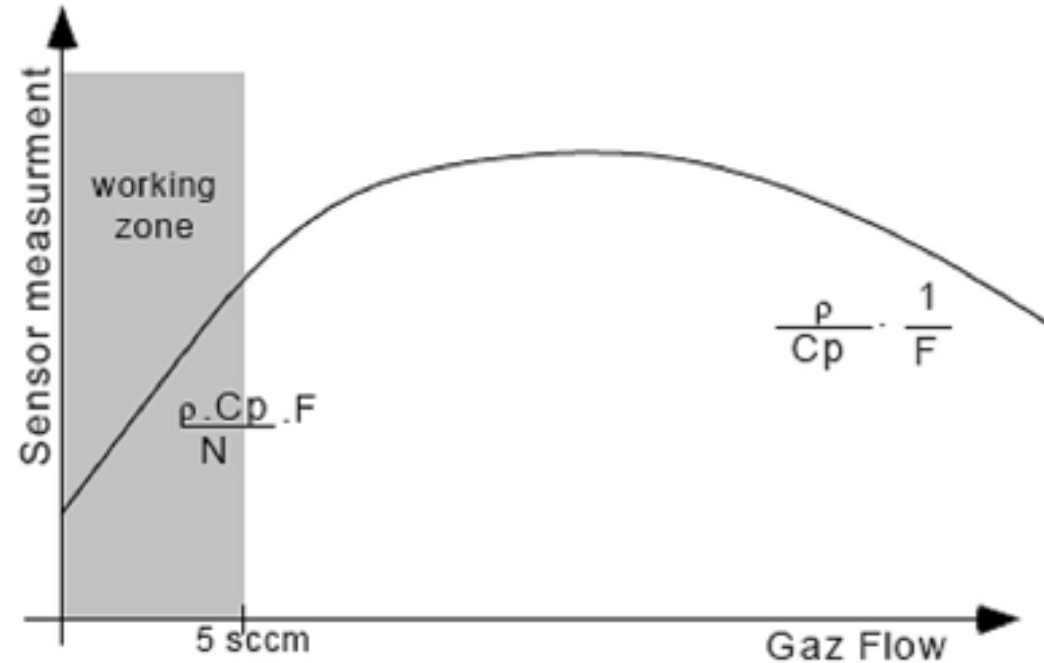
Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Lưu lượng kế khối nhiệt

a. Nguyên tắc hoạt động

$$V = \rho \frac{C_p F}{N}$$



V : Điện thế cầu wheastone

F : Lưu lượng khối

Cp : Nhiệt dung riêng

N : hệ số spin tùy theo từng chất *Monoatomic gas 1.04; Diatomic gas 1.00; Triatomic gas 0.94; Polyatomic gas 0.88*

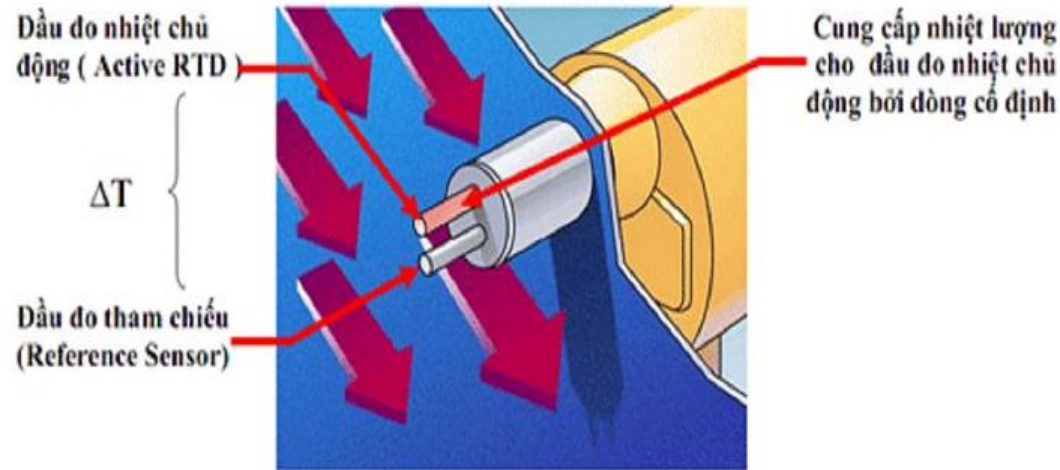
Chương 5: ĐO LƯỜNG TRONG HỆ THỐNG TỰ ĐỘNG HÓA

5.5 CẢM BIẾN LƯU LƯỢNG

5.5.5. Lưu lượng kế khối nhiệt

a. Nguyên tắc hoạt động

Cách khác: Dùng công nghệ phân tán nhiệt



- Dùng một dòng cố định để cung cấp nhiệt lượng cho đầu đo nhiệt chủ động
- Đầu đo tham chiếu sẽ đo nhiệt độ của dòng môi chất làm giá trị tham chiếu.
- Khi tốc độ dòng môi chất tăng lên thì đầu đo nhiệt chủ động sẽ được làm mát

→ ΔT giảm

→ ΔR và ΔU đầu ra giảm

→ lưu lượng của môi chất.