

CHƯƠNG 17.

ĐO LƯU LƯỢNG CHẤT LỎNG VÀ CHẤT KHÍ (2 LT)

17.1. Cơ sở chung và phân loại các phương pháp đo lưu lượng.

17.1.1. Cơ sở chung về đo lưu lượng chất lỏng và chất khí (chất lưu):

Chất lưu là các môi trường vật chất ở dạng lỏng hoặc khí tồn tại dưới những điều kiện nhiệt độ, áp suất, thể tích được xác định bởi các định luật nhiệt động học. Dưới tác dụng của lực bên ngoài, ví dụ sự chênh lệch áp suất, chất lưu sẽ chuyển động, chuyển động này được đặc trưng bởi dòng chảy với các thông số: vận tốc, khối lượng riêng, áp suất và nhiệt độ ở các điểm khác nhau của chất lưu, độ nhớt, độ khuếch tán nhiệt, nhiệt lượng riêng... Thông số thường quan tâm nhất của sự chuyển động này là vận tốc và lưu lượng của chất lưu, khi đó thường xem các thông số còn lại là không đổi. Một trong số các tham số quan trọng của quá trình công nghệ là lưu lượng các chất chảy qua ống dẫn.

Lưu lượng vật chất là số lượng chất ấy chảy qua tiết diện ngang của ống dẫn trong một đơn vị thời gian. Muốn nâng cao chất lượng sản phẩm và hiệu quả của hệ thống điều khiển tự động các quá trình công nghệ cần phải đo được chính xác thể tích và lưu lượng các chất. Việc đo lưu lượng là một phần thiết yếu trong mọi quá trình công nghiệp và trong các ngành công nghệ. Đo lưu lượng đóng một vai trò vô cùng quan trọng cũng như việc đo nhiệt độ, áp suất, mức chất lỏng...

Trong việc đo lưu lượng, ta cần phân biệt:

- Lưu lượng được tính bằng thể tích trên đơn vị thời gian:

$$Q_v = V/t \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

- Lưu lượng được tính bằng trọng khối trên một đơn vị thời gian:

$$Q_m = m/t \quad (\text{kg/s})$$

Khi biết tỉ trọng ρ của môi trường cần đo thì hai loại lưu lượng trên được tính bằng phương trình:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho$$

- Lưu lượng tức thời: được tính theo công thức:

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

với V là thể tích của chất lưu.

- Lưu lượng trung bình: được tính theo công thức:

$$Q_{tb} = V \cdot (t_2 - t_1)$$

với $(t_2 - t_1)$ là khoảng thời gian đo.

Trong quá trình sản xuất của các ngành công nghiệp hoá chất, chế biến, điện năng... lưu lượng tính bằng trọng khối cần biết nhưng cũng khó đo đặc hơn. Trong một hệ thống khép kín, lưu lượng tính bằng trọng khối, lưu khối cố định trong khi đó lưu lượng tính bằng thể tích thay đổi theo nhiệt độ và áp suất.

Môi trường đo khác nhau được đặc trưng bằng tính chất hoá lý và các yêu cầu công nghệ, do đó mà ta có nhiều phương pháp đo lưu lượng dựa trên những

nguyên lý khác nhau. Để thích ứng với các nhu cầu khác nhau trong công nghiệp, người ta đã phát triển rất nhiều phương pháp đo lưu lượng chất lỏng, hơi nước, chất khí...

17.1.2. Phân loại thiết bị đo lưu lượng chất lỏng và chất khí:

Vận tốc và lưu lượng của chất lưu thường được đo gián tiếp thông qua ảnh hưởng của nó đến các đặc trưng vật lý của vật trung gian hoặc đến hiện tượng vật lý trong đó vận tốc, lưu lượng là một thông số và vật trung gian nơi xảy ra hiện tượng vật lý đó. Vật trung gian có thể chính là chất lưu hoặc một phần tử cấu thành của cảm biến.

- *Khi vật trung gian là bản thân chất lưu:* thì vận tốc, lưu lượng của nó được xác định thông qua áp suất động $\rho U^2/2$, qua hiệu ứng Doppler tác động bởi laze hoặc siêu âm và thời gian truyền qua của một đồng vị phóng xạ. Trong trường hợp này phải sử dụng thêm các cảm biến thích hợp với các đại lượng trung gian cần đo là áp suất, ánh sáng, siêu âm, tia phóng xạ.

- *Khi vật trung gian là một phần tử của cảm biến đặt trong chất lưu:* thì vận tốc của chất lưu sẽ xác định một trong các đặc trưng vật lý của vật trung gian như: nhiệt độ của vật trung gian, tốc độ quay của vật trung gian.

Các phương pháp đo lưu lượng cơ bản gồm:

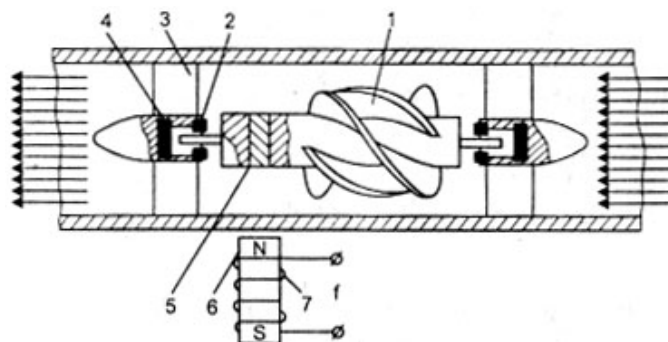
- Lưu lượng kế cơ khí: lưu lượng kế cánh quạt-tuabin (Turbine flowmeters), lưu lượng kế phao nổi (Variable-area flowmeters), lưu lượng kế bản chắn (Palette flowmeters).
- Lưu lượng kế điện từ (Electro-magnetic flowmeters)
- Lưu lượng kế tần số dòng xoáy.
- Lưu lượng kế khối lượng nhiệt
- Lưu lượng kế đo độ giảm áp suất (Differential pressure flowmeters)

17.2. Các phương pháp đo lưu lượng.

17.2.1. Lưu tốc kế cánh quạt (tuốcbin) (Turbine flowmeter):

Dùng để đo tốc độ dòng chảy qua một ống dẫn, thường là công tơ nước hoặc đo tốc độ của tàu biển.

a) **Cấu tạo:** như hình 17.1: gồm có cánh quạt 1 giống như cánh tua bin, quay trên giá đỡ 2 được gắn vào thanh đỡ 3 trong ống dẫn: 4



Hình 17.1. Cấu tạo của lưu tốc kế cánh quạt

Ổ đỡ 4 có tác dụng hạn chế tốc độ di chuyển của cánh quạt. Trục cánh quạt được làm bằng vật liệu không dẫn từ trong đó gắn lõi thép 5 bằng vật liệu mềm.

Bên ngoài ống đặt nam châm vĩnh cửu 6 trên nó quấn cuộn dây cảm ứng 7.

b) Nguyên lý hoạt động: khi cánh quạt quay, từ thông của nam châm sẽ tăng lên khi lõi thép 5 nằm dọc trục của nam châm và giảm xuống khi lõi thép nằm vuông góc với nó.

Khi từ thông móc vòng trong cuộn dây cảm ứng thay đổi sẽ xuất hiện một suất điện động cảm ứng. Mỗi vòng quay từ thông tăng giảm hai lần nên tần số cảm ứng f trong cuộn dây cũng tăng gấp hai lần số vòng của trục. Đo tần số f bằng tần số kế từ đó suy ra tốc độ dòng chảy.

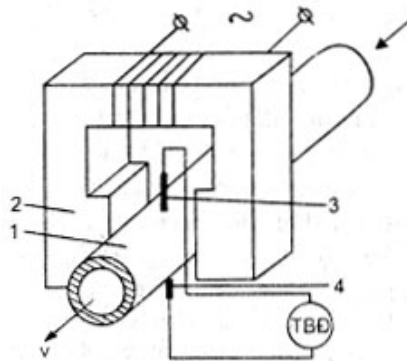
Với phương pháp trên sai số của thiết bị từ $1 \div 0,3\%$. Nguyên nhân gây sai số do quán tính của cánh quạt, ma sát giữa trục quay và giá đỡ.

Có thể giảm sai số bằng cách giảm mômen quán tính của cánh quạt.

17.2.2. Lưu tốc kế kiểu cảm ứng (Electro-magnetic flowmeters):

Dùng đo tốc độ dòng chảy dẫn điện

a) Cấu tạo: như hình 17.2:



Hình 17.2. Cấu tạo của lưu tốc kế kiểu cảm ứng

b) Nguyên lý hoạt động: ống 1 được chế tạo bằng vật liệu không dẫn từ cho chất lỏng dẫn điện chảy qua. Từ trường biến thiên do nam châm 2 tạo nên xuyên qua dòng chất lỏng cảm ứng một sức điện động. Sức điện động này được lấy ra trên hai điện cực 3 và 4 và đưa vào thiết bị đo. Độ lớn của sức điện động được tính:

$$E = k\omega Bdv$$

trong đó:

k - hệ số

ω - tần số góc của từ thông do nam châm tạo ra.

B - độ cảm ứng từ

d - đường kính trong ống dẫn

v - tốc độ trung bình của chất lỏng theo tiết diện ống.

Sức điện động có thể biểu diễn qua lưu lượng của chất lỏng.

$$E = \frac{4k\omega}{\pi d} Q \cdot B$$

với $Q = \frac{v \cdot \pi \cdot d^2}{4}$ là lưu lượng, tức là số lượng chất lỏng chảy qua tiết diện ống trong một đơn vị thời gian.

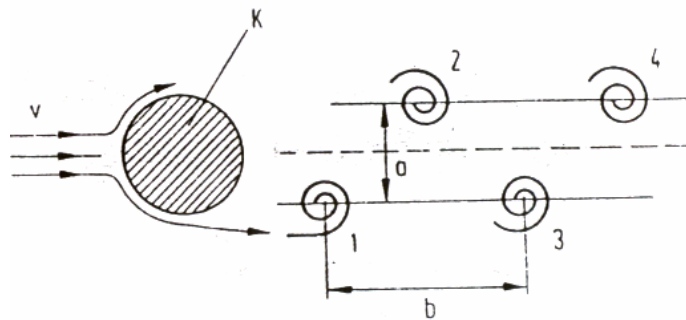
Lưu tốc kế sử dụng phương pháp trên có ưu điểm là không có quán tính do vậy có thể đo được lưu tốc biến thiên theo thời gian. Chỉ thị của dụng cụ không phụ thuộc vào thông số vật lý của chất lỏng (áp suất, nhiệt độ, mật độ, độ nhớt), ngoài ra nó không phụ thuộc vào sức cản phụ đối với dòng chất lỏng như lưu tốc cánh quạt.

Sai số của thiết bị do xuất hiện sức điện động kí sinh hình thành ở các điện cực. Sai số cơ bản trong khoảng $1 \div 2,5\%$.

17.2.3. Phương pháp đo lưu lượng bằng tần số dòng xoáy (Vortex Flow Metter):

a) **Nguyên lý hoạt động:** phương pháp đo lưu lượng bằng 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 này là sự sinh ra và biến mất của các dòng xoáy bên cạnh vật cản. Các dòng xoáy ở 2 cạnh bên của vật cản có chiều xoáy ngược nhau.

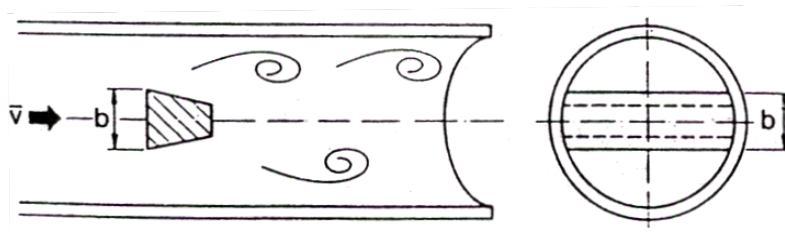


Hình 17.3. Dòng xoáy xuất hiện sau vật cản

Tần số sự biến mất của dòng xoáy (và cả sự xuất hiện) là một hiệu ứng dùng để đo lưu lượng tính bằng thể tích. Liên hệ giữa kích thước hình học vật cản, vận tốc lưu chất v và tần số biến mất của dòng xoáy f - tần số dòng xoáy được diễn tả trong **hằng số Strouhal S** :

$$S = \frac{f \cdot b}{v}$$

với: b - đường kính của vật cản
 f - tần số dòng xoáy
 v - vận tốc dòng xoáy



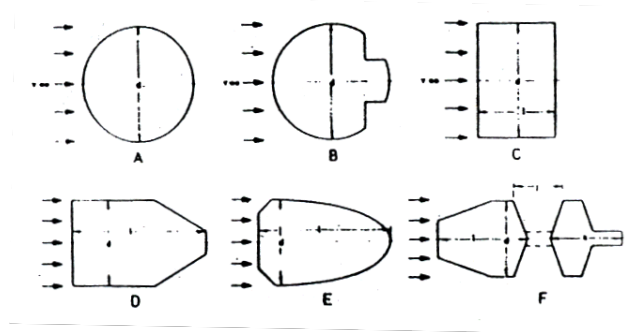
Hình 17.4. Phương pháp đo lưu lượng bằng dòng xoáy

Với điều kiện hằng số Strouhal S không phụ thuộc vào trị số Reynold ta có thể tích lưu lượng theo thể tích trên đơn vị thời gian được tính:

$$Q_v = \frac{1}{S} b \cdot A \cdot f$$

với A là diện tích cắt ngang của dòng chảy.

Để hình thành một con đường dòng xoáy có tính xác định và lặp lại thật tốt yêu cầu vật cản phải đáp ứng đủ một số điều kiện. Hình dáng một số vật cản được trình bày dưới đây:



Hình 17.5. Hình dáng một số vật cản

Hình dáng của vật cản phải được cấu tạo sao cho trong một khoảng trị số Reynold khá rộng mà trị số Strouhal vẫn là hằng số. Với vật cản có hình dạng lăng kính, ta có trị số S khá ổn định trong suốt một dải trị số Reynold khá rộng do vậy các thiết bị đo được bán trên thị trường thường có vật cản hình lăng kính..

Tần số dao động của vận tốc có thể được đo với nhiều phương pháp khác nhau. Cũng có thể đo sự dao động áp suất với màng lọc cơ giãn hoặc đo các dòng xoáy với sóng siêu âm. Lực tác dụng lên vật cản có hướng thẳng góc với dòng chảy và trục của vật cản và được đo bằng các cảm ứng áp điện.

b) Đặc điểm của phương pháp đo lưu lượng bằng tần số dòng xoáy:

- 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. Đường biểu diễn của nó tuyến tính và không thay đổi theo thời gian sử dụng. Sai số phép đo rất bé. Khoảng đo lưu lượng tính bằng thể tích từ 3 đến 100%.

Một tính chất rất đặc biệt của phép đo bằng dòng xoáy là nó độc lập với các tính chất vật lý của môi trường dòng chảy. Sau một lần chỉnh định, sau đó ta không cần chỉnh định lại với từng loại lưu chất.

Một ưu điểm nữa là các thiết bị đo lưu lượng bằng dòng xoáy không có bộ phận cơ học chuyển động và sự đòi hỏi về cấu trúc khá đơn giản.

- Lưu lượng kế kiểu xoáy được dùng để đo các lưu chất là chất lỏng, khí và hơi (trừ các lưu chất có độ nhớt quá lớn) với độ chính xác tương đối cao:

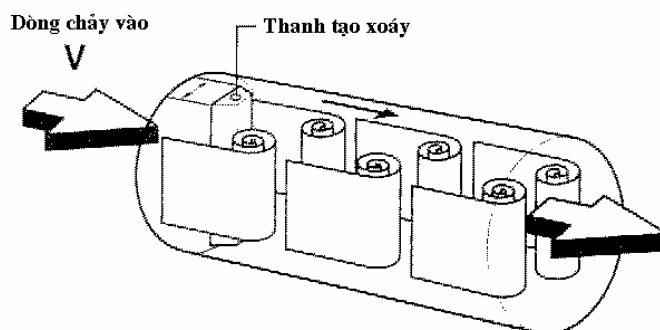
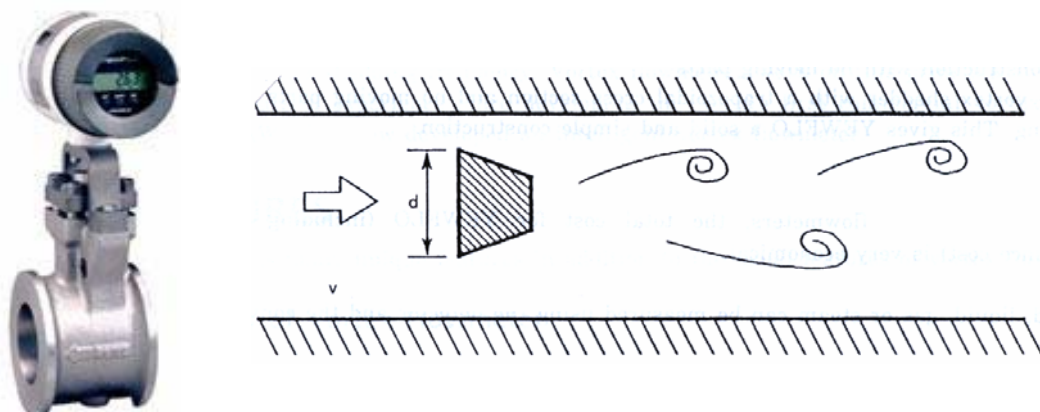
Lưu chất	Độ chính xác
Chất lỏng	± 1 %
Khí	± 1 %
Hơi	± 1,5 %

- 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

Ví dụ: lưu lượng kế kiểu xoáy YEWFLOW của hãng Yokogawa - Nhật Bản:

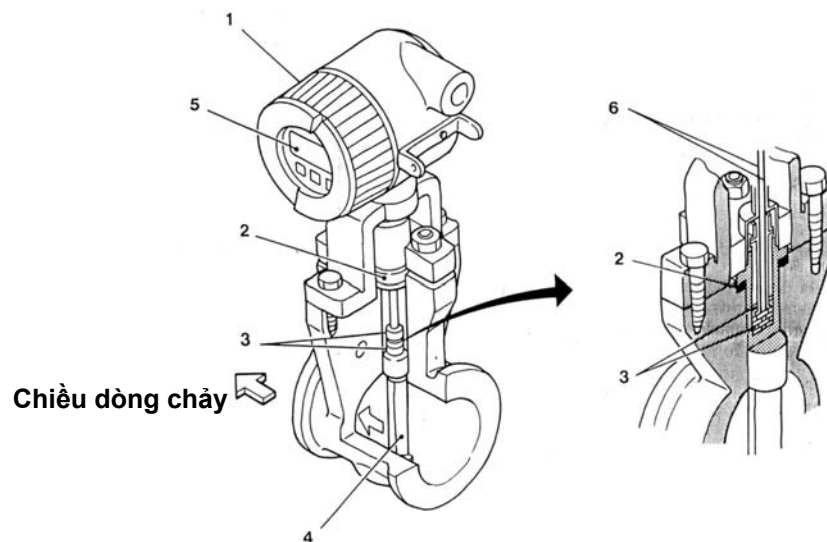
$$Q = f \cdot \frac{(\frac{\pi \cdot D^2}{4} - d \cdot D) \cdot d}{S}$$

với: Q - lưu lượng tỉ lệ
 d - độ rộng của thanh tạo xoáy
 D - đường kính bên trong của YEFWLO



Hình 17.6. Lưu lượng kế kiểu xoáy YEFWLO

Cấu trúc của lưu lượng kế này như hình 17.7:

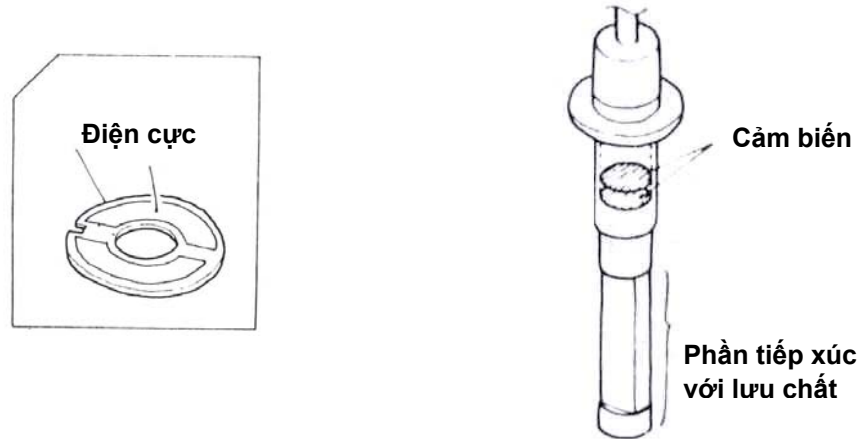


Hình 17.7. Cấu trúc của lưu lượng kế kiểu xoáy YEFWLO

- | | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| 1. Bộ chuyển đổi | 2. Miếng đệm |
| 3. Thành phần cảm biến | 4. Thanh tạo xoáy |
| 5. Màn hình hiển thị tín hiệu đầu ra | 6. Dây tín hiệu cảm biến. |

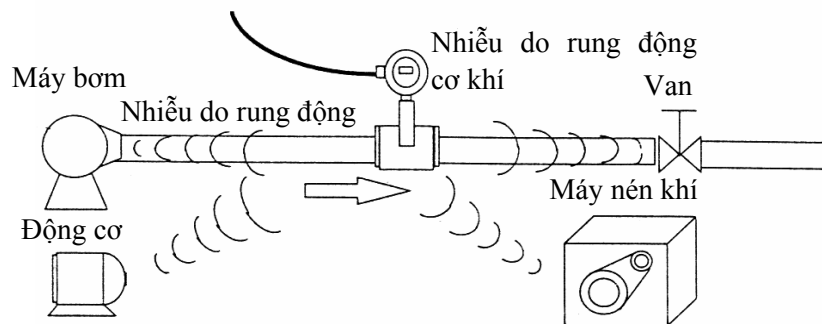
Thanh tạo xoáy sẽ tạo ra các lực nâng có ứng suất thay đổi. Tần số của các thay đổi về ứng suất này tức là tần số xoáy sẽ được phát hiện bởi các thành phần

áp điện được hàn kín trong trong thanh tạo xoáy. Có 2 thành phần áp điện để phân biệt các lực tạo ra bởi xoáy và các lực tạo ra do những yếu tố khác. Chúng có nhiệm vụ chuyển đổi các lực xoáy thành các tín hiệu điện được đưa tới bộ chuyển đổi để xử lý. Những thành phần này được đặt trong thanh tạo xoáy và không tiếp xúc với lưu chất như hình 17.8:



Hình 17.8. Cấu tạo của cảm biến áp điện đo lực tạo xoáy.

c) Nhiễu và chống nhiễu: cảm biến áp điện rất nhạy cảm với nhiễu, đặc biệt là do sự rung trên các đường ống, do vậy các cảm biến lưu lượng tần số dòng xoáy phải được thiết kế để hạn chế đến mức tối đa tác động của nhiễu kể cả với phần cứng và phần mềm.

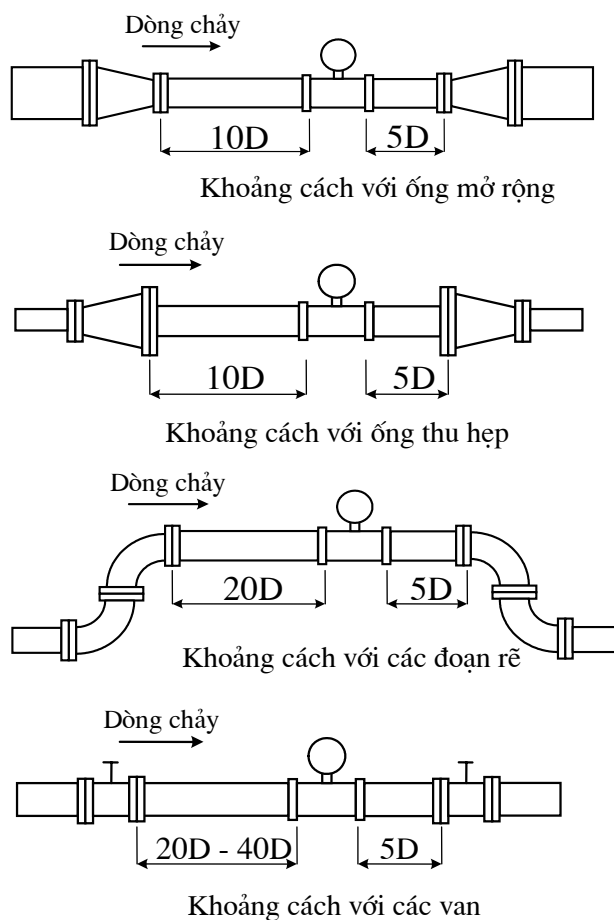


Hình 17.9. Các nhiễu tác động lên lưu lượng kế tần số dòng xoáy.

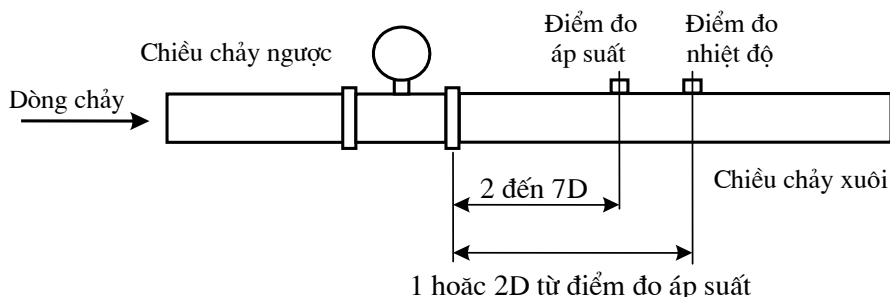
d) Các quy định về lắp đặt lưu lượng kế tần số dòng xoáy: việc lắp đặt lưu lượng kế tần số dòng xoáy phải tuân theo các quy tắc sau:

- 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): như hình 17.10.
- 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 như hình 17.11.
- 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.
- Có thể đo được lưu lượng khí, chất lỏng hay hơi khi không có sự biến đổi

trạng thái. Tuy nhiên thường không thể đo các lưu chất khi dòng chảy có tạp chất, dòng chảy phân tầng hoặc dòng chảy có bọt khí.

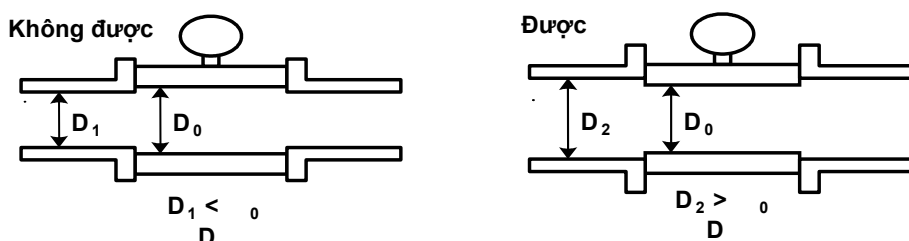


Hình 17.10. Khoảng cách tối thiểu giữa lưu lượng kế với các đoạn nối với các điểm nối khác

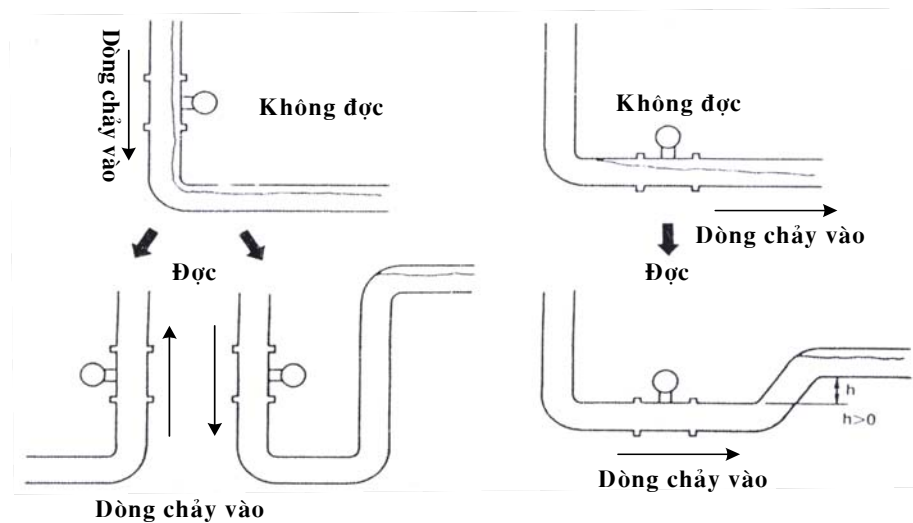


Hình 17.11. Khoảng cách lắp đặt các điểm đo áp suất và nhiệt độ trên cùng một đường ống với lưu lượng kế.

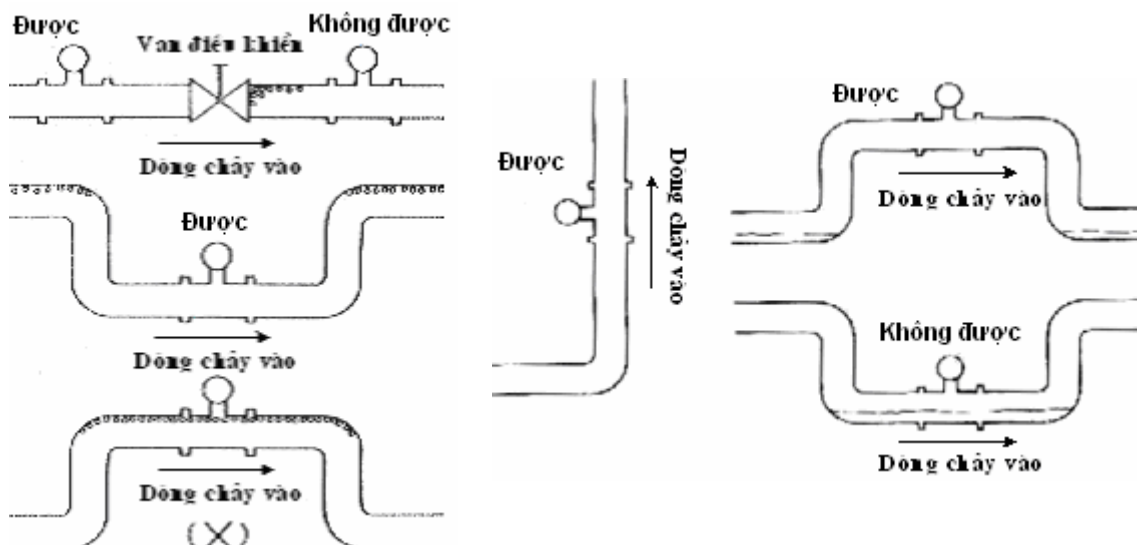
- Tốt nhất là lưu lượng kế và đường ống phải có cùng đường kính. Trong trường hợp không tránh khỏi phải khác nhau thì đường kính của lưu lượng kế phải nhỏ hơn đường kính ống:



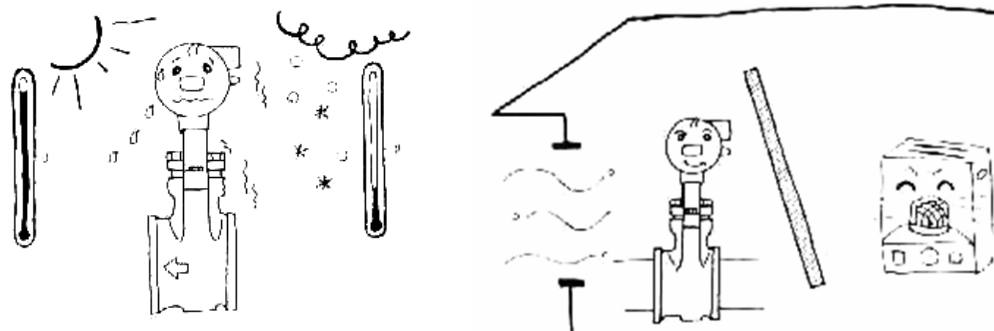
- Để đo được chính xác lưu lượng của lưu chất thì yêu cầu phải đo với những đường ống luôn đầy như hình minh họa:



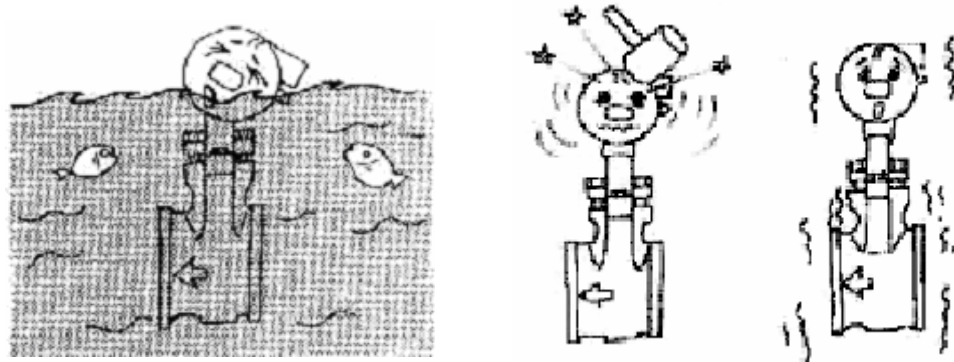
- Các lưu chất chứa cả chất lỏng và chất khí sẽ gây ra các lỗi trong quá trình đo. Phải tránh các bọt khí tạo ra trong chất lỏng vì vậy mà đường ống phải lắp đặt sao cho tránh được sự tạo thành của các bọt khí. Nên lắp đặt van theo chiều xuôi dòng chảy vì sự giảm áp suất khi dòng chảy qua van sẽ làm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



- Lưu ý tránh lắp đặt lưu lượng kế trong trường hợp có mức chất lỏng trong ống giữ nguyên ở một trạng thái không đổi.
- 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.



17.2.4. Phương pháp đo lưu lượng bằng siêu âm.

a) **Nguyên lý hoạt động:** tần số của siêu âm cao hơn tần số mà thính giác của con người có thể cảm nhận được. Trong kỹ thuật, tần số hữu ích của siêu âm trải dài từ 20 kHz đến 10 MHz. Tần số, độ dài sóng và vận tốc truyền sóng được liên kết với nhau theo công thức:

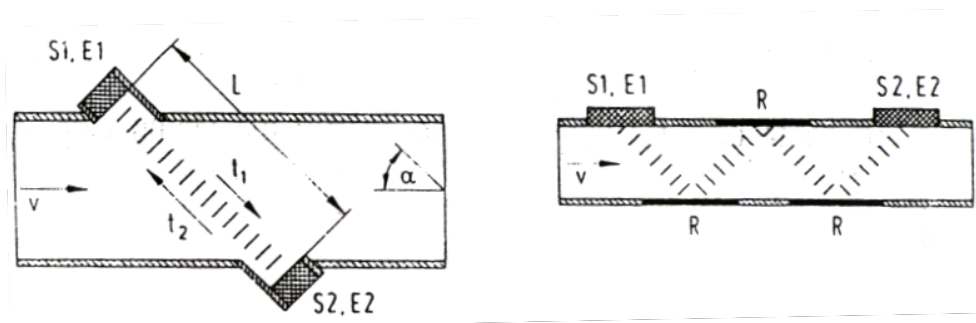
$$C_0 = f \cdot \lambda$$

Vận tốc truyền sóng lệ thuộc vào đặc tính của môi trường và đặc biệt vào nhiệt độ của môi trường.

- **Phương pháp hiệu số thời gian truyền sóng:**

Hình 17.12 trình bày một cấu trúc dùng để đo lưu lượng: các cảm biến siêu âm nằm cách nhau một khoảng L trong ống dẫn có lưu chất dịch chuyển một vận tốc v . Cảm biến 1 phát sóng và cảm biến 2 thu sóng, vận tốc truyền sóng được gia tăng thêm thành phần $v \cdot \cos \alpha$.

Với phương pháp đo sóng siêu âm ta được vận tốc v của dòng chảy và sau khi nhân v với diện tích mặt cắt ngang của ống, ta thu được lưu lượng tính bằng thể tích.



Hình 17.12. Cấu trúc ống đo lưu lượng bằng siêu âm

Nếu gọi t_1 là thời gian truyền sóng từ 1 đến 2 và t_2 từ 2 đến 1 thì ta có được vận tốc dòng chảy v được tính là:

$$v = \frac{L}{2 \cos \alpha} \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2}$$

Để đo được thời gian truyền sóng một cách chính xác thì các cảm biến siêu âm phải hoạt động nhanh. Các cảm biến này cần phải phát được các sóng có sườn dốc thẳng đứng. Cả 2 cảm biến đối diện nhau phát cùng lúc một sóng siêu âm. Cả 2 hoạt động đầu tiên như nguồn phát và sau đó hoạt động như hai cảm biến thu sóng siêu âm của nhau. Vận tốc dòng chảy được xác định rất nhanh chóng với phương pháp này.

- *Phương pháp hiệu số tần số:*

Các cảm biến vẫn được đặt như hình 17.12 tuy nhiên chúng được vận hành khác đi. Cảm biến 1 gửi một xung cho cảm biến 2. Cảm biến 2 trả lời bằng một xung cho cảm biến 1 và làm cho cảm biến 1 phát đi một xung. Tần số f_1 của cảm biến 1 và tần số f_2 của cảm biến 2 được đo lần lượt :

$$f_1 = \frac{1}{t_1} = \frac{C_0 + v \cos \alpha}{L}; \quad f_2 = \frac{1}{t_2} = \frac{C_0 - v \cos \alpha}{L}$$

từ hiệu số:
$$f_1 - f_2 = \frac{2v \cos \alpha}{L}$$

tính được vận tốc dòng chảy v độc lập với vận tốc truyền sóng C_0 :

$$v = \frac{L}{2 \cos \alpha} (f_1 - f_2)$$

và do:

$$\frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} = \frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = f_1 - f_2$$

nên ta có cùng kết quả như ở phương pháp đo trên.

Vì tần số được đo từ một chuỗi xung, do đó phép đo mất thời gian hơn. Ngoài ra do sự phản hồi sóng siêu âm từ các bọt nước, vật rắn trong chất lỏng... nên phép đo này bị nhiễu nhiều hơn so với phép đo hiệu số thời gian.

- *Phương pháp hiệu chỉnh độ dài sóng (hiệu chỉnh pha):*

Với sự liên hệ $C_0 = f \lambda$, khi vận tốc truyền sóng thay đổi và với tần số không đổi thì độ dài sóng phải thay đổi.

Chọn tần số f_0 sao cho với vận tốc dòng chảy $v = 0$ thì khoảng cách giữa hai cảm biến bằng $n \lambda_0$. Khi vận tốc dòng chảy khác không ta có $C_1 = C_0 + v \cos \alpha$ và $C_2 = C_0 - v \cos \alpha$ và với tần số không thay đổi ta có độ dài sóng:

$$\lambda_1 = \frac{C_1}{f_0}; \quad \lambda_2 = \frac{C_2}{f_0}$$

Với phương pháp hiệu chỉnh pha thì tần số siêu âm được thay đổi sao cho dù với vận tốc dòng chảy nào ta luôn có $n \lambda_0$ là khoảng cách L giữa hai cảm biến. Độ dài sóng λ_0 được giữ cố định do đó với hai hướng truyền sóng khác nhau ta có:

$$f_1 = \frac{C_1}{l_0}; \quad f_2 = \frac{C_2}{l_0}$$

Từ hiệu số:

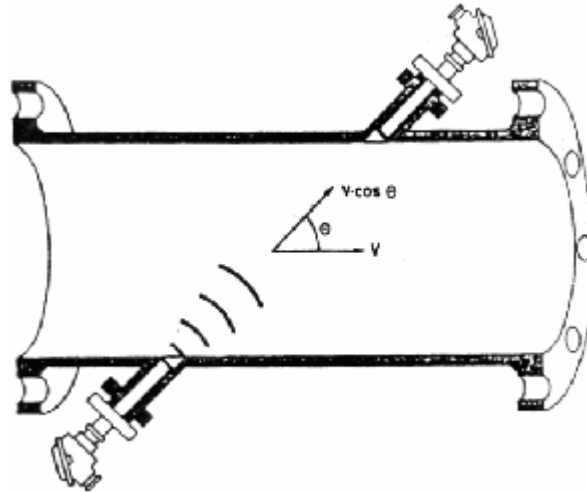
$$f_1 - f_2 = \frac{1}{l_0} [(C_0 + v \cos \alpha) - (C_0 - v \cos \alpha)] = \frac{2v \cos \alpha}{l_0}$$

suy ra vận tốc dòng chảy v độc lập với vận tốc sóng siêu âm C_0 :

$$v = \frac{l_0}{2 \cos \alpha} (f_1 - f_2)$$

Phương pháp này cho ta kết quả chính xác nhất trong 3 phương pháp đo lưu lượng bằng siêu âm. Hình 17.13 là mặt cắt dọc theo một cảm biến đo lưu lượng

bằng siêu âm trong công nghiệp:



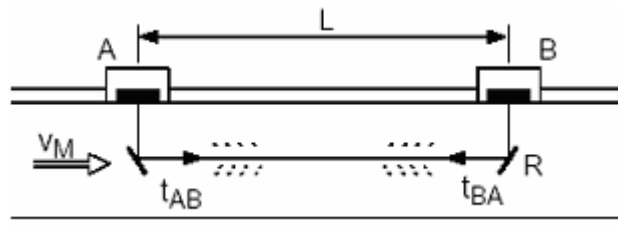
Hình 17.13. Ống đo lưu lượng với siêu âm trong công nghiệp

Ví dụ: lưu lượng kế siêu âm SITRAN F US của hãng Siemens - Đức:



Hình 17.14. Lưu lượng kế siêu âm SITRAN F US của Siemens

- Nguyên lý làm việc: như hình 17.15:



Hình 17.15. Nguyên lý làm việc của lưu lượng kế sóng siêu âm

Với: A, B: 2 bộ chuyển đổi sóng siêu âm.

R: vật phản xạ

L: khoảng cách giữa 2 bộ chuyển đổi.

VM: vận tốc của dòng chảy

t_{AB}/V_{AB} : tỉ số giữa thời gian và vận tốc truyền sóng âm từ A đến B

t_{BA}/V_{BA} : tỉ số giữa thời gian và vận tốc truyền sóng âm từ B đến A.

Tốc độ truyền âm thanh v của sóng siêu âm trong một môi trường phụ thuộc vào vận tốc âm thanh C_M trong môi trường đó và vận tốc dòng chảy V_M (hiệu ứng mang).

$$V_{AB} = C_M + V_M \quad ; \quad V_{BA} = C_M - V_M$$

Hiệu ứng này được Siemens ứng dụng trong lưu lượng kế siêu âm. Hai bộ chuyển đổi sóng siêu âm sẽ lần lượt gửi cho nhau những tín hiệu sóng siêu âm và đo được 2 đại lượng thời gian thực t_{AB} và t_{BA} qua lại giữa các tín hiệu này.

$$t_{AB} = L/(C_M + V_M) \quad ; \quad t_{BA} = L/(C_M - V_M)$$

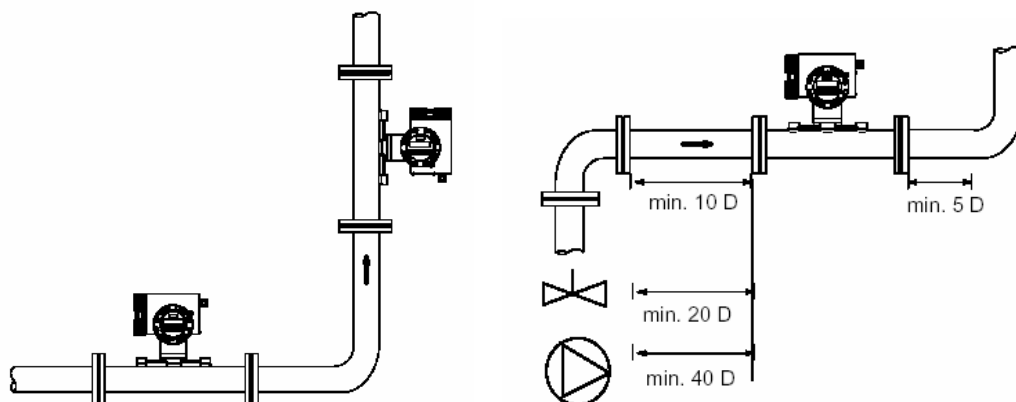
Nếu có dòng chảy vào thì thời gian qua lại giữa các tín hiệu sẽ nhanh hơn với chiều xuôi và chậm hơn với chiều ngược dòng chảy. Sự chênh lệch về thời gian này chính là giá trị vận tốc của dòng chảy V_M :

$$V_M = \frac{L(t_{AB} - t_{BA})}{2 \cdot t_{AB} \cdot t_{BA}}$$

Kết quả này không phụ thuộc vào tốc độ âm thanh trong môi trường và do đó không phụ thuộc vào môi trường đo.

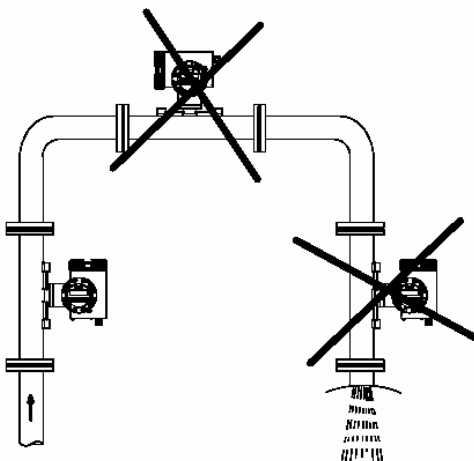
- *Lắp đặt lưu lượng kế siêu âm*: việc lắp đặt lưu lượng kế sóng siêu âm họ SITRANS F US phải tuân theo những quy tắc sau:

- Lưu lượng kế có thể được lắp trên những đường ống nằm ngang hay dọc.
- Đảm bảo khoảng cách hợp lý giữa lưu lượng kế với các thiết bị lắp trên cùng đường ống.

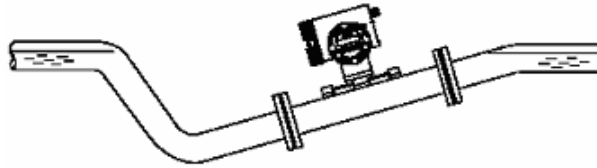


Lưu lượng kế có thể nằm ngang hoặc dọc

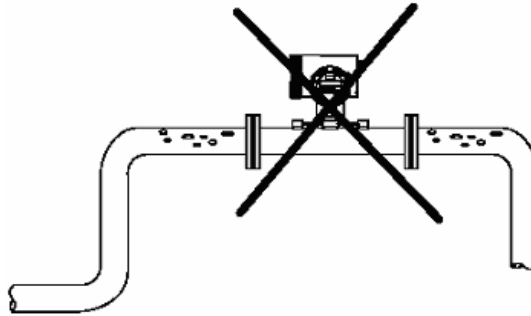
- Giá trị đo chỉ chính xác khi đường ống luôn đầy, do đó nên lắp đặt SITRANS F US sao cho đường ống đo luôn ở trong môi trường đầy. Nếu đường ống được đặt dốc, nên đặt thêm một ống xi phông:



- Với những đường ống có đầu ra mở, không nên lắp lưu lượng kế ở ngay phía đầu ra, phải đảm bảo rằng đường ống luôn đầy:



- Nên tránh lắp đặt lưu lượng kế ở những điểm cao nhất do các bọt khí có thể ảnh hưởng tới độ chính xác của thiết bị đo:



- Đặc điểm kỹ thuật:

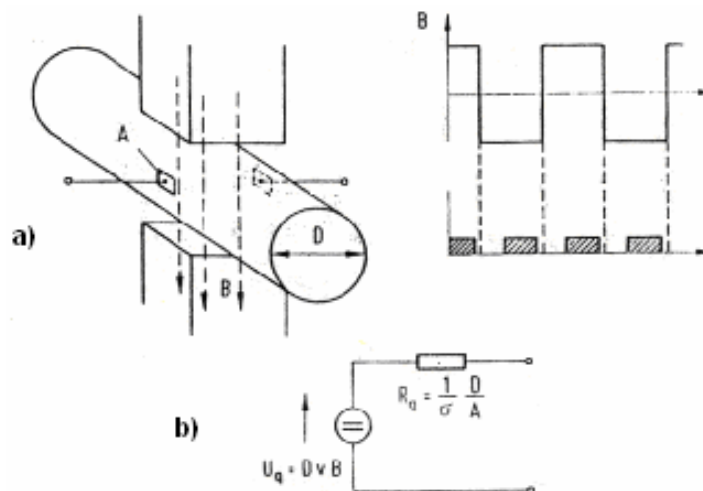
- Lưu lượng kế sóng siêu âm được dùng để đo các lưu chất là chất lỏng với độ chính xác:

Lưu chất	Độ chính xác
Chất lỏng	$\pm 0,5 - 2 \%$

- Các yếu tố cần quan tâm khi sử dụng lưu lượng kế sóng siêu âm: cách lắp đặt và nhiệt độ lưu chất.

17.2.5. Phương pháp đo lưu lượng bằng cảm ứng điện từ

a) **Nguyên lý hoạt động:** theo định luật cảm ứng điện từ của Faraday, một dây dẫn mang điện di chuyển trong một từ trường sẽ sinh ra một điện thế, điện thế này tỷ lệ với vận tốc di chuyển của dây dẫn điện và cường độ của từ trường. Hiệu ứng này được dùng trong phương pháp đo lưu lượng các *chất lỏng dẫn điện* có chứa các ion mang điện tích.



Hình 17.16. Đo lưu lượng bằng hiệu ứng cảm ứng điện từ:
a) Nguyên lý b) Mạch điện thay thế

Với điện trường E ta có một điện thế U đo được ở hai điện cực nằm trên ống lưu chất có đường kính D :

$$U = D \cdot v \cdot B \quad (1)$$

Với vận tốc v , ta có lưu lượng tính theo thể tích khi diện tích mặt cắt ngang ống là:

$$Q_v = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v = \frac{\pi D}{4} \cdot \frac{U}{B}$$

Như thế điện thế đo được là thước đo của lưu lượng chất lỏng được tính bằng thể tích trên đơn vị thời gian.

Trong phương trình (1) ta thấy không có thành phần độ dẫn điện σ . Nó không đóng vai trò nào cho trị số hiệu điện thế U , tuy nhiên nó lại xác định trị số điện trở trong R_q của nguồn điện. Đó là điện trở của cột chất lỏng giữa hai điện cực. Với D là đường kính của ống dẫn lưu chất, A là diện tích của điện cực ta có:

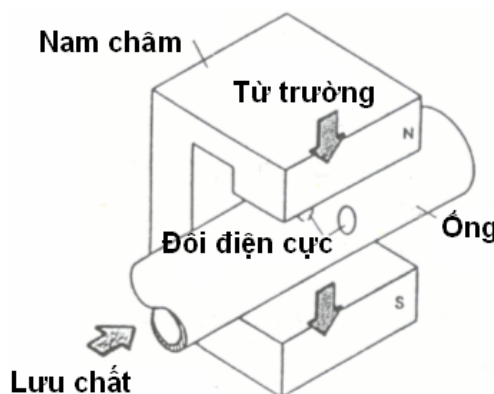
$$R_q = \frac{1}{\sigma} \frac{D}{a}$$

Thiết bị đo lưu lượng với cảm ứng điện với cảm ứng điện từ là một nguồn điện có điện trở trong rất lớn (hình 17.16.b). Để đo được điện thế của nó ta cần một mạch khuếch đại có điện trở vào cũng khá lớn.

b) Các tính chất kỹ thuật: lưu lượng kế cảm ứng điện từ có đầu ra là một điện thế tỉ lệ với lưu lượng trong một từ trường đồng nhất khi mà hình dạng dòng chảy có đối xứng xoay. Một ưu điểm của phương pháp đo lưu lượng bằng cảm ứng điện từ là mặt cắt của dòng chảy không bị thu hẹp bởi các ống blende hay ống phun.

Phương pháp đo này có thể thực hiện để đo lưu lượng các chất lỏng dơ bẩn, chất kem sền sệt hay ngay cả với môi trường có tính chất ăn mòn cao như acid, kiềm... Từ 10 đến 100% thang đo ta có sai số phép đo nhỏ hơn 1%.

Hình 17.17 là cảm biến đo lưu lượng bằng phương pháp cảm ứng điện từ trong công nghiệp.



Hình 17.17. Cảm biến đo lưu lượng bằng cảm ứng điện từ

Phương pháp đo lưu lượng bằng cảm ứng điện từ có sự liên hệ rất tuyến tính giữa lưu lượng thể tích và điện thế cần đo. Khoảng đo rất rộng và trị số đo không bị ảnh hưởng bởi các thông số của lưu chất như độ nhớt, tỷ trọng, áp suất, nhiệt độ. Trong ống dẫn lưu chất không có vật cản.

Cảm biến được chế tạo có độ rộng chuẩn từ vài milimet đến vài mét. Trong

công nghiệp, thiết bị đo lưu lượng với phương pháp cảm ứng điện từ được dùng ở những nơi áp suất cao và nhiệt độ rất cao cũng như ở những nơi dễ gây cháy nổ, ngập lụt...

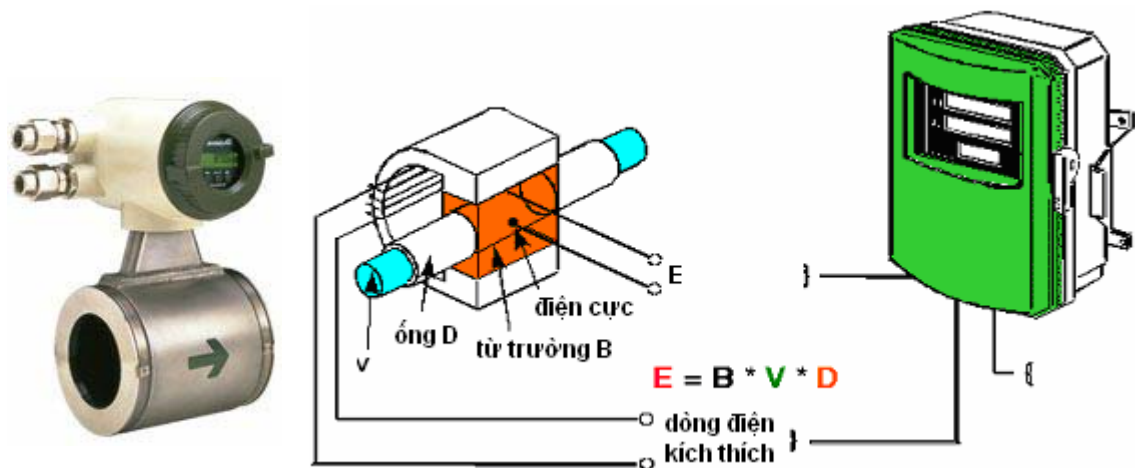
Phương pháp đo lưu lượng bằng cảm ứng điện từ dù có đắt tiền và phức tạp hơn các phương pháp khác nhưng nó đã được nghiên cứu và thử nghiệm lâu dài trong công nghiệp. Nó tỏ ra bền bỉ, ít bị hư hỏng dù phải làm việc với những lưu chất độc hại, ăn mòn cao như nước thải, hoá chất.

Lưu lượng kế điện từ được dùng để đo các lưu chất là chất lỏng dẫn điện với độ chính xác cao:

Lưu chất	Độ chính xác
Chất lỏng	$\pm 0,2 - 1 \%$

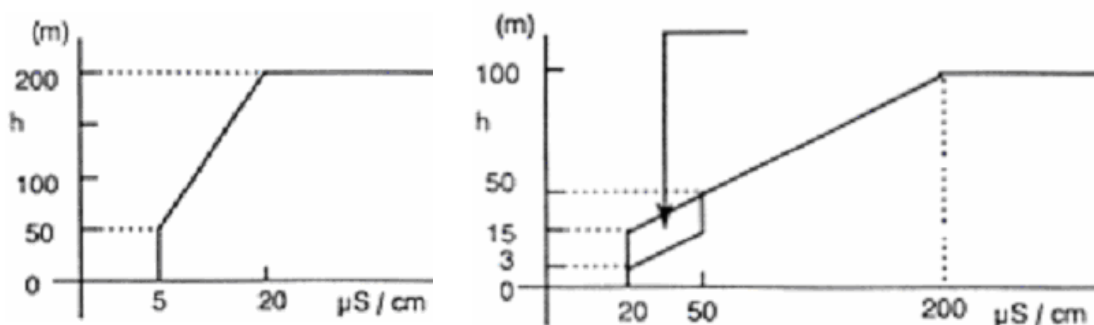
Các yếu tố cơ bản cần quan tâm khi sử dụng lưu lượng kế điện từ gồm cách lắp đặt, nhiệt độ lưu chất và độ dẫn điện của lưu chất

Ví dụ: lưu lượng kế cảm ứng điện từ ADMAG AE của hãng Yokogawa - Nhật Bản:



Hình 17.18. Lưu lượng kế cảm ứng điện từ ADMAG AE

- **Nhiều và chóng nhiều:** khi đo các chất lỏng bằng lưu lượng kế điện từ, độ chính xác của lưu lượng kế có thể thay đổi phụ thuộc vào độ dẫn điện. Mối quan hệ giữa độ chính xác và độ dẫn điện được mô tả như hình 17.19. Độ dẫn điện của chất lỏng lại phụ thuộc rất nhiều vào nhiệt độ.

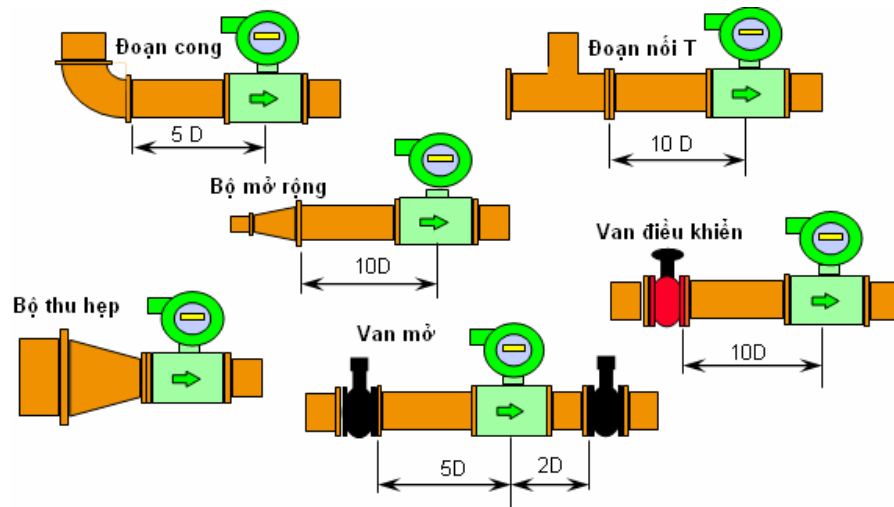


Hình 17.19. Độ chính xác thay đổi phụ thuộc vào chiều dài cáp và độ dẫn điện

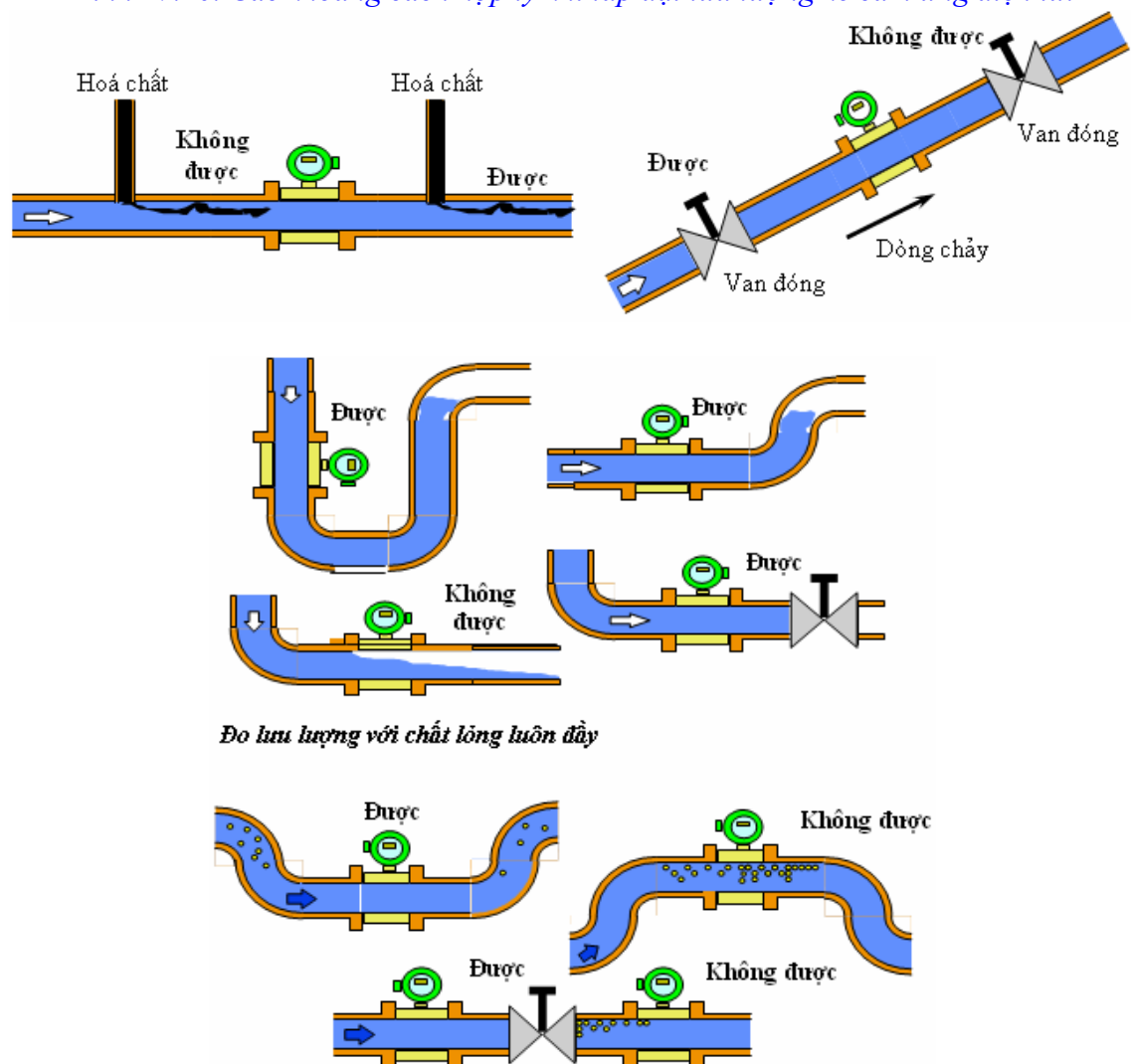
Một nguyên nhân khác cũng dẫn đến sự sai lệch về độ chính xác của phép đo

đó là ảnh hưởng của các chất ăn mòn do trong quá trình hoạt động lâu ngày bám lên điện cực.

- *Cách lắp đặt lưu lượng kế cảm ứng điện từ*: đảm bảo khoảng cách và vị trí hợp lý: như hình 17.20 và hình 17.21:



Hình 17.20. Các khoảng cách hợp lý khi lắp đặt lưu lượng kế cảm ứng điện từ.

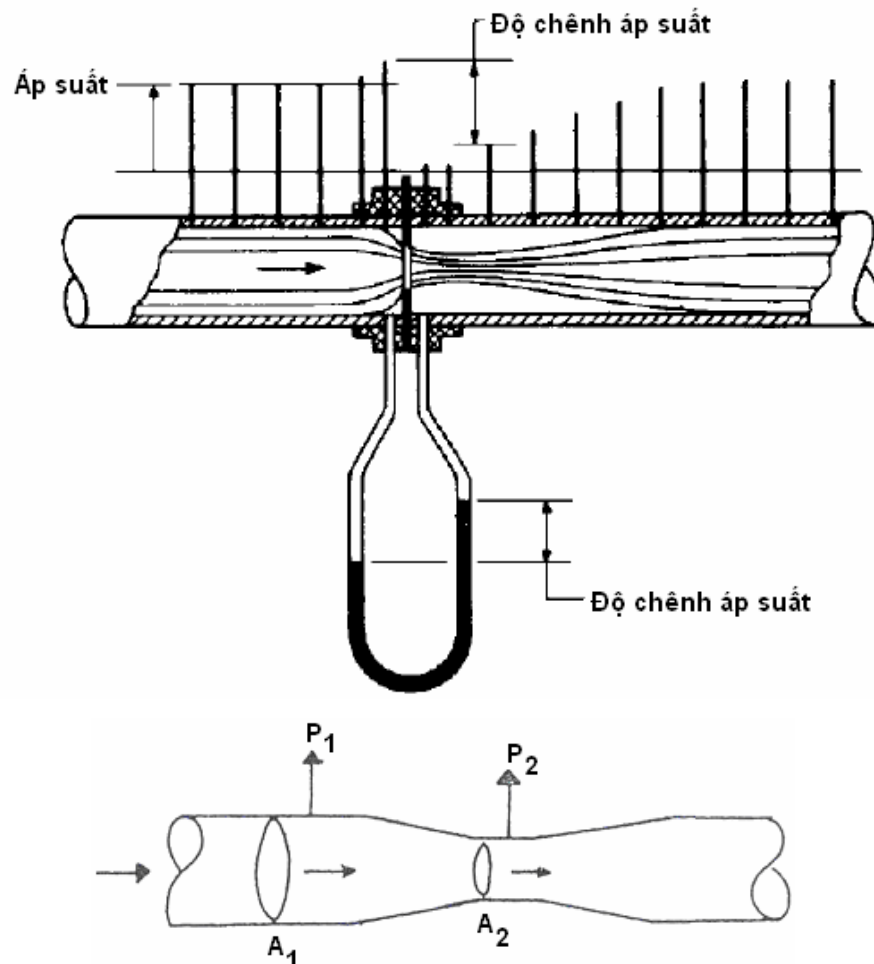


Đo chất lỏng có lẫn bọt khí

Hình 17.21. Vị trí lắp đặt hợp lý của lưu lượng kế cảm ứng điện từ.

17.2.6. Phương pháp đo lưu lượng bằng cách đo độ giảm áp suất (Differential pressure flowmeters)

a) **Nguyên lý hoạt động:** một trong những nguyên tắc phổ biến để đo lưu lượng chất lỏng, khí và hơi là nguyên tắc thay đổi độ giảm áp suất qua ống thu hẹp như hình 17.22: một thiết bị thu hẹp được đặt trong lòng đường ống khi có lưu chất chảy qua sẽ có sự chênh áp suất trước và sau lỗ thu hẹp, độ chênh áp suất này phụ thuộc vào lưu lượng chảy qua ống:



Hình 17.22. Nguyên lý hoạt động của lưu lượng kế độ giảm áp suất

Nguyên lý này được ứng dụng rất rộng rãi trong công nghiệp để đo lưu lượng dựa trên các thiết bị như tấm chắn (blende, orifice plate), ống venturi (Venturi tube), ống Dall (Dall flow tube), ống phun (flow nozzle).

Để được dùng như một thiết bị đo lưu lượng, ta cần tính toán lưu lượng dựa trên độ chênh áp suất:

- Với các lưu chất không chịu nén: trong trường hợp đơn giản, ta coi đường ống nằm ngang ta có lưu lượng được tính là:

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

với: ρ - tỷ trọng của lưu chất

C_D - hệ số phóng (discharge coefficient): với ống venturi $C_D = 0,97$; với tấm chắn $C_D = 0,6$

Trong tính toán thực tế, với đường kính ống là D và đường kính vật thu hẹp là d ta có:

$$Q = C_D \cdot E \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} = K \cdot \sqrt{\Delta P}$$

với: $m = A_2/A_1 = d^2/D^2$; $E = \frac{1}{\sqrt{(1 - m^2)}}$

ΔP - độ chênh áp ; K - hằng số theo những ứng dụng thực tế.

Giá trị C_D có thể được thành lập bằng cách thí nghiệm và có thể tính toán được C_D dựa theo các đồ thị cho sẵn (ví dụ như chuẩn ISO 5167:1980 cho phép tính toán C_D dựa trên phương trình Stolz hay chuẩn BS 1042 cho phép tính ra C_D từ các đồ thị).

- Với các lưu chất chịu nén: với các chất khí thì tỷ trọng của lưu chất sẽ thay đổi khi đi qua thiết bị thu hẹp vì vậy tỷ trọng của lưu chất cũng thay đổi làm cho việc tính toán lưu lượng khí trở nên phức tạp hơn:

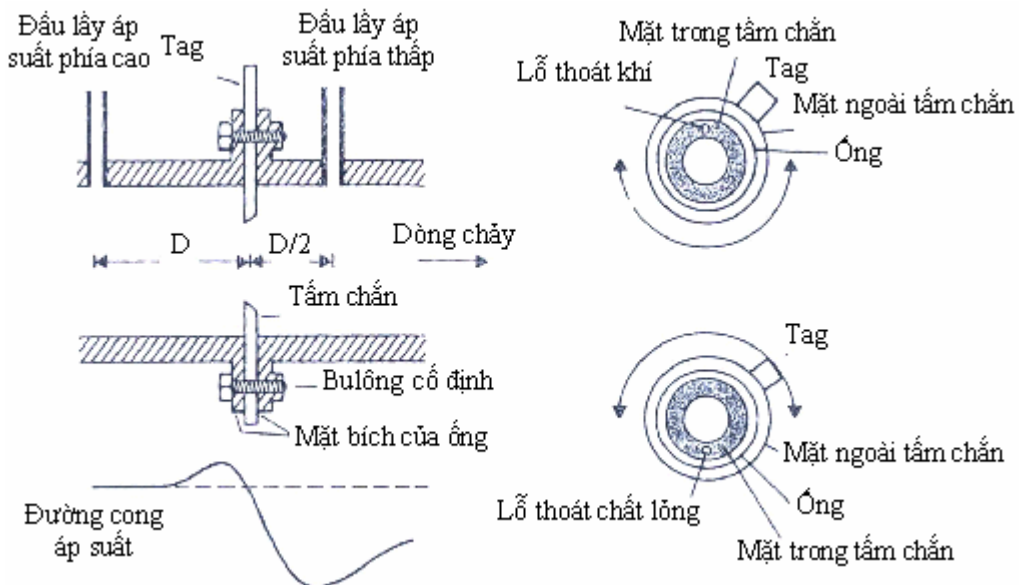
$$Q_m = C_D \cdot \varepsilon \cdot \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot (P_1 - P_2)} = C_D \cdot \varepsilon \cdot E \cdot A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_1 \cdot \Delta P}$$

với: ρ_1 - tỉ trọng của khí tại áp suất P_1
 ε - hệ số tỉ lệ mở rộng.

Việc tính toán được ε là khá phức tạp do ε phụ thuộc vào γ (tỉ lệ nhiệt dung riêng C_p/C_v), P_1 , P_2 , A_1 , A_2 . Chuẩn BS 1042 dùng một đồ thị chuyên khảo để tính toán ra ε còn ISO 5167 đưa ra một phương trình được dùng lặp đi lặp lại cho việc tính toán liên tục các giá trị gần đúng của ε cho đến khi đạt được giá trị chính xác theo yêu cầu.

b) Các đặc điểm và lưu ý trong quá trình sử dụng:

- **Tấm chắn:** được dùng để tạo ra một sự thay đổi đột ngột trong đường ống, đơn giản chỉ gồm một tấm kim loại hình tròn được chèn thêm vào mặt bích của đường ống như hình 17.23. Tấm chắn có tác dụng tạo ra một sự chênh áp đo được tại D và $D/2$ với D là đường kính của ống:



Hình 17.23. Cấu trúc và lắp đặt tấm chắn.

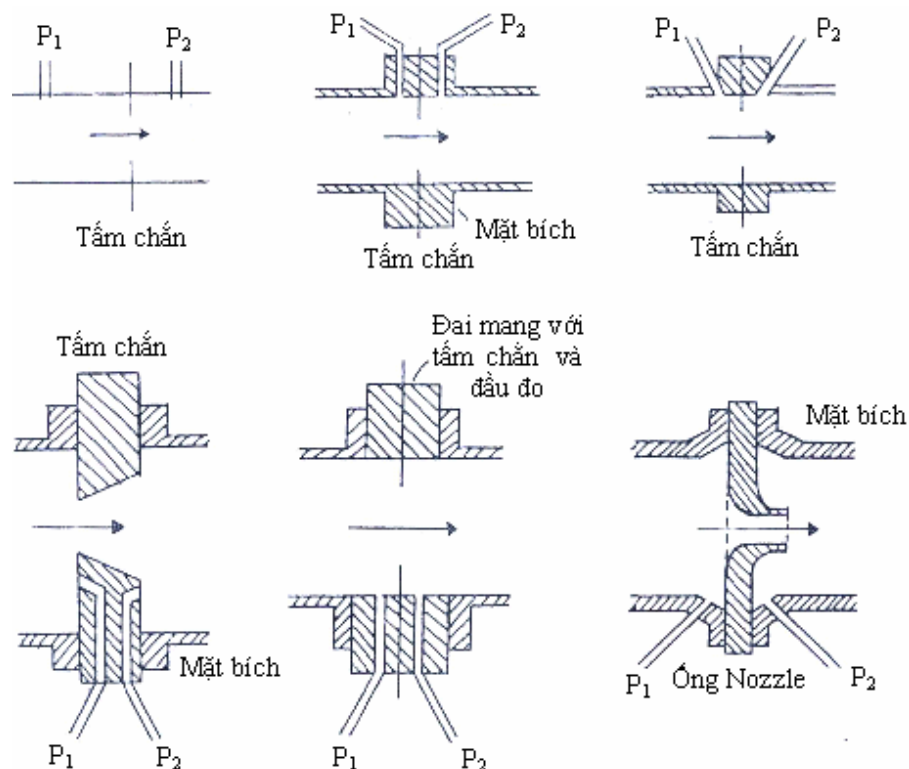
Ta có thể thấy áp suất sau tấm chắn thấp hơn áp suất trước khi đi qua tấm chắn do tấm chắn đã gây ra một tổn hao áp suất (permanent pressure loss). Với tấm chắn tổn hao này từ $0,51.\Delta P \div 0,96.\Delta P$, với ống venturi là $0,1.\Delta P \div 0,15.\Delta P$.

Khi lưu chất chảy qua tấm chắn, sẽ có một lực đáng kể tác dụng lên bề mặt tấm chắn do vậy bề mặt phải đủ cứng để chống lại tác động của lực này. Chuẩn BS 1042 đưa ra độ dày chuẩn tối đa là $0,1D$. Tấm chắn cũng phải có cạnh sắc, cạnh này sẽ phải chịu được các ảnh hưởng của sự mài mòn từ dòng chảy của lưu chất nên được làm từ các vật liệu như thép chống gỉ để tránh sự ăn mòn quá mức.

Trên bề mặt tấm chắn cũng phải khoan một lỗ nhỏ, đối với chất lỏng, lỗ nhỏ này được đặt ở phía trên để làm đường thoát cho các khí và hơi; đối với các lưu chất là khí hay hơi, lỗ lại phải nằm ở phía dưới, nằm ngang bằng với thành ống để cho phép các hơi ngưng tụ có thể đi qua.

- *Lắp đặt tấm chắn*: cần thận trọng khi tiến hành lắp đặt tấm chắn trên đường ống. Việc lắp đặt quá gần những chỗ rẽ hay van điều khiển có thể gây ra sự thay đổi áp suất cục bộ, do vậy nên để một khoảng trống ít nhất là mười lần đường kính ống ($10D$) trước và sau tấm chắn.

Có nhiều cách bố trí các vòi lấy tín hiệu áp suất được sử dụng với các tấm chắn. Các cách bố trí thường gặp nhất được trình bày như hình 17.24:

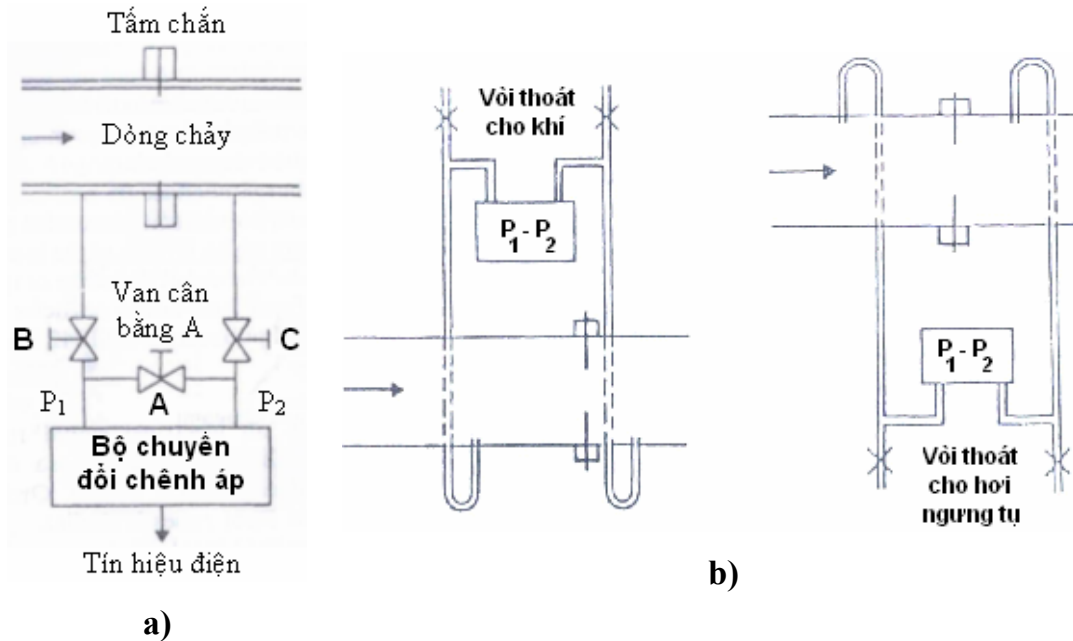


Hình 17.24. Các cách bố trí và lắp đặt tấm chắn trên đường ống

Các tấm chắn được sử dụng trong rất nhiều các ứng dụng thực tế và có thể nói là một thiết bị đo lưu lượng thông dụng nhất hiện nay.

- *Đo độ chênh áp*: việc chuyển đổi tín hiệu chênh áp thành tín hiệu điện đòi hỏi phải có một bộ biến đổi áp suất vi sai (ΔP). Bộ biến đổi ΔP được kết nối qua một khối ống phân phối như hình 17.25a. Khối này cho phép bộ biến đổi được cách ly để tháo lắp hay bảo dưỡng thông qua các van B và C.

Van A là van cân bằng và được sử dụng trong quá trình điều chỉnh điểm không khi van B và C đóng còn van A mở. Trong quá trình vận hành bình thường, van A luôn đóng. Khi vận hành các van này, phải đảm bảo rằng áp suất không thể đi qua được trong toàn bộ đường ống để tránh hư hỏng màng của bộ biến đổi. Luôn phải đảm bảo thứ tự: van A mở, van B, C đóng hay mở van B, C, đóng van A.



Hình 17.25. Đo độ chênh áp suất trong lưu lượng kế áp suất vi sai

Việc lắp đặt đường ống dẫn áp suất cũng phải thận trọng để tránh các vấn đề xảy ra do sự ngưng tụ của các chất lỏng (đối với đo khí) và các túi khí (đối với đo chất lỏng): với chất khí nên đặt BCD ΔP ở trên tấm chắn với đường ống thẳng lấy áp suất đi xuống dưới; với chất lỏng thì BCD ΔP nên đặt ở dưới tấm chắn với đường ống thẳng lấy tín hiệu áp suất đi lên. Nếu như vì điều kiện vị trí mặt bằng không cho phép thực hiện được cách lắp đặt như trên thì phải bố trí đường ống với các vòi thoát (ống dẫn khí hay ống thoát chất lỏng) như hình 17.25b.

- Lưu lượng kế chênh áp được dùng để đo các lưu chất là chất lỏng, chất khí và hơi với độ chính xác $0,5 \pm 2 \%$.

- Các yếu tố cần quan tâm khi sử dụng lưu lượng kế chênh áp gồm cách lắp đặt, nhiệt độ lưu chất và tổn hao áp suất.

Ví dụ: lưu lượng kế chênh áp EJA của Yokogawa - Nhật Bản: hình 17.26:



Hình 17.26. Lưu lượng kế đo chênh áp EJA và tấm chắn lấy tín hiệu áp suất

Bảng 17.1 trình bày sự so sánh một số phương pháp đo lưu lượng thường dùng trong công nghiệp:

Bảng 17.1. So sánh một số phương pháp đo lưu lượng thường dùng trong công nghiệp

<div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="transform: rotate(-45deg); transform-origin: center;">Lưu lượng kế</div> <div style="margin-left: 10px;">Môi trường đo</div> </div>		Dòng xoáy	Siêu âm	Điện từ	Chênh áp
		lỏng, hơi, khí	lỏng	lỏng (dẫn điện)	lỏng, hơi, khí
Đường kính ống	mm	10 ÷ 300	25 ÷ 100	2,5 ÷ 3000	10 ÷ 1000
Dải nhiệt độ	°C	-200 ÷ 400	-20 ÷ 180	-40 ÷ 180	-200 ÷ 500
Áp suất lớn nhất	bar	64	40	40	315
Độ chính xác	%	± 1	± 0,5 ÷ 2	± 0,2 ÷ 1	± 0,5 ÷ 2
Tổn hao áp suất (liên quan đến độ chênh áp)	%	1 ÷ 2	0	0	0,4 ÷ 0,95
Dải độ nhớt		0,01 ÷ 20	0,1 ÷ 1000	0,1 ÷ 1000	0 ÷ 1000

17.2.7. Đo lưu lượng chất rắn bằng các loại cân băng tải

Ngoài việc đo lưu lượng của chất lỏng, chất khí thì trong các dây chuyền sản xuất của một hệ thống tự động hóa việc đo lưu lượng của chất rắn cũng đóng một vai trò quan trọng. Ví dụ như việc xác định lưu lượng nhiên liệu than cấp vào lò của nhà máy nhiệt điện hay xác định lưu lượng phối liệu, clinker, thạch cao, phụ gia... trong các dây chuyền sản xuất xi măng... Để đo được lưu lượng của các vật liệu rắn này, trong các nhà máy công nghiệp người ta thường sử dụng các cân băng tải (cân băng định lượng).

a) Nguyên lý hoạt động: cân băng tải là thiết bị cung cấp nhiên liệu kiểu trọng lượng: vật liệu được chuyên chở trên băng tải có tốc độ được điều chỉnh để nhận được lưu lượng tương ứng với giá trị đặt trước của người vận hành.

Tốc độ của băng tải chính là tốc độ của vật liệu được truyền tải v (m/s). Tải của băng chuyền chính là trọng lượng của vật liệu được chuyên tải trên một đơn vị chiều dài σ (kg/m). Các cân băng tải được trang bị bộ phận đo trọng lượng (load cell) để đo σ (tải băng truyền) và bộ điều khiển để điều chỉnh tốc độ băng tải v sao cho ở điểm đo nhiên liệu, lưu lượng dòng chảy vật liệu bằng giá trị đặt do người vận hành đặt trước.

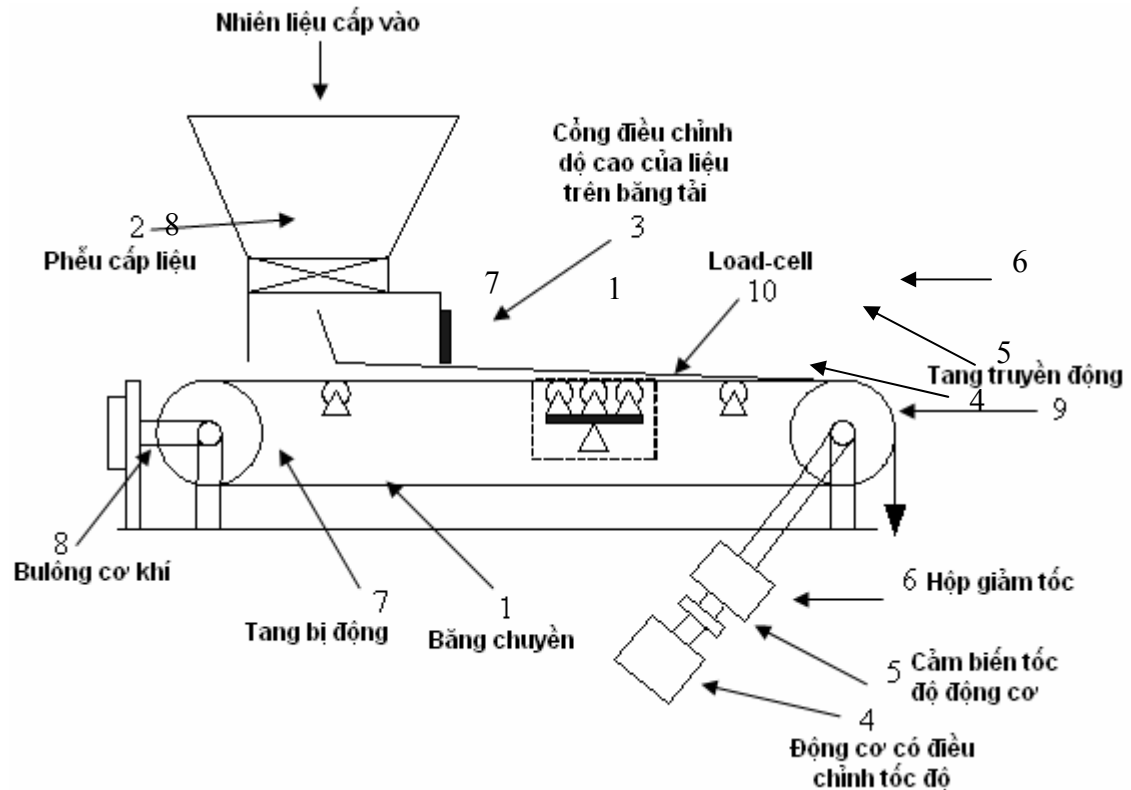
Lưu lượng dòng chảy vật liệu được tính bằng tích giữa trọng lượng vật liệu trên một mét chiều dài băng tải với vận tốc chuyển động dài của băng tải (cũng chính là vận tốc chuyển động của vật liệu):

$$Q = \sigma \cdot v$$

trong đó: Q - lưu lượng dòng chảy vật liệu (kg/s)
 σ - trọng lượng vật liệu trên một đơn vị chiều dài (kg/m)
 v - tốc độ băng tải (m/s)

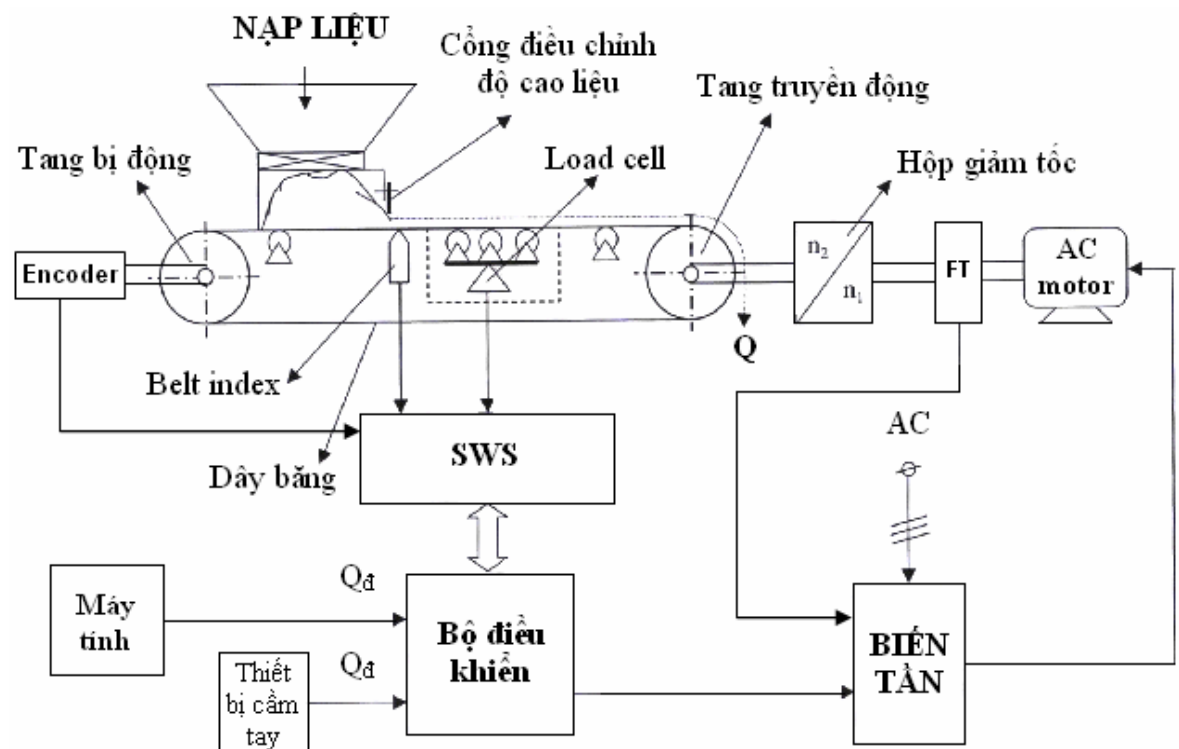
Cấu trúc chung của một hệ cân băng tải gồm các thiết bị được minh họa như hình 17.27 bao gồm hai bộ phận:

- Các bộ phận cơ bản, gồm: băng truyền 1, phễu cấp liệu 2, cổng điều chỉnh độ cao của liệu trên băng tải 3.
- Các bộ phận truyền động cân băng, gồm: động cơ có điều chỉnh tốc độ 4, cảm biến tốc độ động cơ 5, hộp giảm tốc 6, tang bị động 7, bulông cơ khí 8, tang truyền động 9, load-cell 10.



Hình 17.27. Cấu trúc chung của hệ thống cân băng tải.

Ví dụ: cân băng tải với bộ điều khiển lưu lượng: hình 17.28:



Hình 17.28. Sơ đồ cấu trúc của hệ thống điều chỉnh lưu lượng chất rắn

Hình 17.28 là sơ đồ cấu trúc một hệ thống điều chỉnh lưu lượng chất rắn sử dụng cân băng tải. Ngoài các thiết bị cơ bản của một hệ cân băng tải, hệ thống điều chỉnh này còn bao gồm thiết bị định vị của băng tải đặt trên băng tải một dấu hiệu bằng kim loại gọi là “belt index” giúp cho việc phân đoạn băng tải và làm tăng độ chính xác của cân, đồng thời xác định sự trượt của băng tải.

Bộ điều khiển điều chỉnh tốc độ băng tải để nhận lưu lượng nhiên liệu ở điểm đổ tương ứng với giá trị đặt. Lưu lượng liệu là tích số của tải trên một mét dài băng truyền với tốc độ băng truyền.

Giao diện SWS (Smart Weighing System) nối giữa cân băng tải và bộ điều khiển. Tất cả các tín hiệu từ đầu ra của các cảm biến sẽ được nối với hệ SWS đặt trên băng tải. Hệ SWS thu thập các tín hiệu rồi gửi về bộ điều khiển theo thủ tục truyền tin nối tiếp.

Để đo tải của băng truyền, hệ dùng một load-cell biến đổi trọng lượng thành tín hiệu điện. Tốc độ băng tải đo được nhờ một máy phát tốc kiểu xung đặt giữa động cơ và hộp giảm tốc bánh răng. Số xung phát ra tỉ lệ với tốc độ của động cơ.

Như vậy, có hai yếu tố chính cần quan tâm trong hệ điều chỉnh lưu lượng cân băng tải đó là đo trọng lượng của nhiên liệu trên băng tải và điều chỉnh tốc độ động cơ.

- *Đo trọng lượng của nhiên liệu trên băng tải:* trọng lượng đo được từ tín hiệu của load-cell bao gồm cả trọng lượng của băng tải và trọng lượng của nhiên liệu trên băng. Vì vậy, để có được trọng lượng của nhiên liệu, ta phải tiến hành “trừ bì”. Bộ điều khiển xác định được trọng lượng của nhiên liệu nhờ tự động trừ bì các phân đoạn băng tải.

- *Điều chỉnh tốc độ động cơ:* để điều chỉnh tốc độ động cơ, các hệ thống cân băng tải thường sử dụng biến tần. Động cơ sử dụng là loại động cơ xoay chiều 3 pha rotor lồng sóc.

Tốc độ động cơ đo được nhờ máy phát xung. Số xung phát ra từ máy phát xung tỉ lệ với tốc độ động cơ và được đưa tới SWS, sau khi được xử lý được truyền tới bộ điều khiển.

Bộ điều khiển có nhiệm vụ tính toán lưu lượng bằng cách nhân tải trên băng truyền ở thời điểm đo liệu với tốc độ băng truyền. Bộ điều chỉnh PID trong bộ điều khiển sẽ chỉnh định tốc độ băng truyền phụ thuộc vào lưu lượng ở cầu cân. Bộ điều khiển đảm bảo lưu lượng không đổi của dòng nhiên liệu ở điểm đổ liệu của băng cân.