

LECTURE NOTES

SENSOR & TRANSDUSER (SFM-332)

Denny Darmawan, M.Sc.
[\(darmawan@uny.ac.id\)](mailto:darmawan@uny.ac.id)

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA & ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA**

**Sensor & Transduser
(SFM-332)**

Denny Darmawan

Evaluasi:

30% Tugas/Quiz/Project

30% UTS

40% UAS

Memahami cara kerja sensor dan transduser dan konsep fisika yang melandasinya

Textbook:

Pallas Areny – *Sensor and Signal Conditioning*

Jacob Fraden – *Handbook of Modern Sensors*

Ian Sinclair – *Sensors and Transducers*

Keunggulan sistem pengukuran elektronik:

- Sensor dapat didesain untuk sembarang besaran non-listrik
- Energi tidak perlu banyak diambil dari proses yang sedang diukur karena sinyal output dapat diperkuat
- Tersedia banyak variasi IC untuk pengkondisian atau modifikasi sinyal listrik
- Tersedia banyak pilihan untuk menayangkan atau mencatat informasi dengan alat elektronik
- Transmisi sinyal untuk sinyal listrik mudah disesuaikan

Terkadang istilah sensor dan transduser mengacu pada benda yang sama

Transduser input dikenal sebagai sensor (detektor jika sinyal berupa radiasi)

Transduser output dikenal sebagai aktuator

6 jenis sinyal:

- mekanik
 - termal
 - magnetik
 - listrik
 - kimia
 - radiasi
- (korpuskuler atau elektromagnet)

device yang menghasilkan sinyal listrik disebut **sensor**

umumnya sistem pengukuran memanfaatkan sinyal listrik, sehingga bergantung pada sensor

Sensor & Transduser
(SFM-332)

[Intro sistem pengukuran]

[1.1] Konsep Dasar

Transduser =
device yang mengubah sinyal
dari satu bentuk ke bentuk yang lain

= konverter energi!

Pengkondisi sinyal terdiri atas rangkaian elektronik dengan fungsi:

- amplifikasi
- penggeseran level
- filtering
- pencocokan impedansi
- modulasi
- demodulasi

Sensor digunakan untuk memperoleh informasi

Aktuator digunakan untuk mengubah energi

Contoh:

- Umumnya sistem pengukuran membutuhkan sinyal digital
- output dari sensor terkadang berupa analog
- butuh ADC (Analog to Digital Converter)
- ADC memiliki impedansi rendah, butuh sinyal dc dengan amplitudanya bervariasi hanya pada batas kurang dari ± 10 V
- sinyal keluaran sensor yang masuk ke ADC harus dikondisikan

domain analog \rightarrow informasi dibawa oleh amplitudo sinyal

domain waktu \rightarrow informasi dibawa oleh periode, frekuensi, lebar pulsa, atau fase

domain digital \rightarrow sinyal hanya memiliki dua nilai

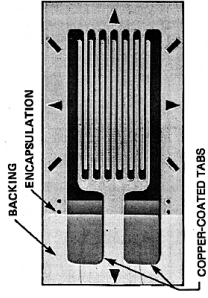
Pengkondisian Sinyal

Domain data \rightarrow nama besaran yang digunakan untuk mewakili informasi

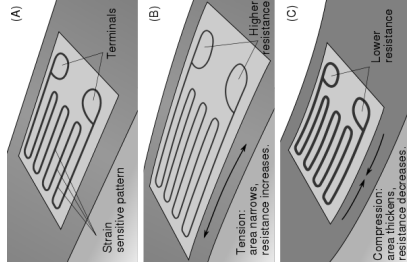
Pengkondisi sinyal (*signal conditioner*)
= bagian sistem pengukuran yang menerima sinyal output sensor dan selanjutnya menghasilkan sinyal yang cocok untuk device berikutnya

\rightarrow Pallas Areny: Gambar 1.2

Strain Gage



stanford.edu



Strain gage mekanik



Sinyal output tidak sepenuhnya berasal dari sinyal input
→ terdapat sinyal interferensi

→ Pallas Areny: Gambar 1.3

Contoh kasus:
mengukur gaya → strain gage
strain gage = ketika ada tekanan muncul variasi hambatan listrik → sensor tekanan/gaya!
perubahan suhu juga memicu variasi hambatan!
variasi suhu = interferensi (x_1) dengan gain G_1

[1.2] Klasifikasi Sensor

→ Pallas Areny: Tabel 1.1 dan 1.2

[1.3] Konfigurasi Input-Output

Filter = device yang memisahkan sinyal menurut frekuensinya

→ efektif jika spektrum frekuensi sinyal dan interferensi tidak overlap

Solusi lain:
Umpan balik negatif → Gambar 1.4

$H(s)$ tidak sensitif terhadap sinyal interferensi

Efek input penginterferensi dan input pemodifikasi dapat dikurangi dengan mengganti desain sistemnya

Solusi lain:
tambahkan input yang berlawanan

→ umumnya untuk mengkompensasi variasi suhu

Solusi: mendesain sistem yang sensitif terhadap sinyal yang diinginkan tapi tidak sensitif terhadap sinyal penginterferensi

Jika sistem digambarkan oleh fungsi transfer $G(s)$ dan $H(s)$, bentuk relasi input-output untuk negatif feedback:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \approx \frac{1}{H(s)}$$

valid jika $G(s)H(s) \gg 1$

Contoh:

gain yang bergantung pada resistor memiliki koefisien suhu positif

→ gain berubah akibat perubahan suhu

→ tambahkan resistor dengan koefisien suhu negatif (pasang secara serial)

→ gain tetap meskipun ada perubahan suhu

Kasus Strain Gage:

gunakan metal-film resistor logam atau kapasitor NPO yang kurang sensitif terhadap suhu

→ tidak selalu dapat diterapkan

Solusi lain:
Filtering

Nilai sebenarnya = nilai yang diperoleh dari pengukuran yang sempurna

→ tidak pernah dapat diperoleh/ditentukan

Watak dinamis = kelakuan sensor ketika besaran yang diukur berubah terhadap waktu

[1.4] Watak Statis Sistem Pengukuran

Akurasi sensor → diperoleh dengan kalibrasi statis

→ semua input dibuat konstan kecuali satu besaran yang akan diukur

→ input berubah sangat lambat, memberikan nilai konstan berturutan dalam range pengukuran

[Akurasi, Presisi, Sensitivitas]

sistem pengukuran

→ besaran yang diukur berubah sangat lambat

→ hanya perlu tahu watak statis dari sensor

→ hasil output sensor yang berturutan dicatat
→ plot terhadap nilai input membentuk kurva kalibrasi

Akurasi
= nilai kualitas yang menunjukkan kapasitas dari alat ukur untuk memberikan hasil yang mendekati nilai sebenarnya dari besaran terukur

Watak statis juga mempengaruhi watak dinamis dari sensor

Keterulangan/Repeatability

= kesamaan antara hasil ukur berturut-turut yang dilakukan dengan metode dan kondisi yang sama dalam interval waktu singkat

Reproducibility

= kesamaan antara hasil ukur berturut-turut yang dilakukan dengan metode dan kondisi yang sama dalam interval waktu lama

→ dilakukan dengan orang, alat dan tempat yang berbeda

Sensitivitas

= kemiringan kurva kalibrasi

$$S(x_0) = \frac{dy}{dx}$$

→ diharapkan sensor memiliki sensitivitas konstan

Kelas akurasi = perbandingan beberapa sensor berdasar akurasinya

→ semua sensor yang berada di kelas yang sama memiliki galat pengukuran yang sama

→ nilai galatnya disebut **indeks kelas**

Nilai ukur dan galatnya harus dinyatakan dalam bentuk yang baku

Error (Galat; Ketidakpastian)

= perbedaan antara nilai yang sebenarnya dari besaran terukur dengan hasil pembacaan alat ukur

Galat mutlak = selisih antara hasil pengukuran dengan nilai yang sebenarnya
(galat mutlak = hasil – nilai_sebenarnya)

Presisi

= kualitas yang menunjukkan kemampuan alat ukur untuk memberikan hasil yang sama ketika dilakukan pengukuran berulang

Galat relatif = perbandingan antar galat mutlak dengan nilai sebenarnya

$$\text{galat relatif} = \frac{\text{galat mutlak}}{\text{nilai sebenarnya}}$$

Kehadiran ralat sistematis dapat ditemukan dengan mengukur besaran yang sama menggunakan dua alat berbeda, dua metode berbeda, dua pengukur berbeda, atau mengubah kondisi pengukuran

Faktor utama yang mempengaruhi linearitas:
resolusi
batas (threshold)
histeresis

Akurasi, presisi dan sensitivitas merupakan watak yang cukup untuk menggambarkan kelakuan statis dari sensor, namun pada beberapa kasus ditambahkan watak lainnya:

Ralat dalam pengukuran tak langsung merambat dari setiap besaran terukur ke besaran yang dihitung

Ralat Sistematis

→ terjadi ketika dalam mengukur nilai yang sama dari suatu besaran pada kondisi yang sama, nilainya tetap atau berubah ketika kondisinya berubah

→ pengukuran tak langsung kurang akurat dibanding pengukuran langsung

Ralat Sistematis

→ disebabkan oleh alat, pelaku pengukuran, metode atau faktor lain (iklim, mekanis, listrik, etc.)

Linearitas
= kedekatan antara kurva kalibrasi dengan suatu garis lurus

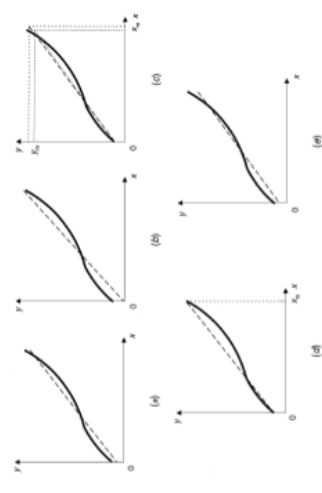


Figure 1.6 Different straight lines used as a reference to define linearity: (a) independent linearity (least squares method); (b) zero-based linearity (least squares adjusted to zero); (c) terminal-based linearity; (d) end-points-defined linearity; (e) theoretical linearity.

Laju respon

= menyatakan seberapa cepat sistem pengukuran bereaksi terhadap perubahan pada variasi input

Jika sinyal input konstan → watak statis
Jika sinyal input bervariasi → watak dinamis

Contoh 1.1:

Untuk mengukur tegangan pada resistor terdapat dua metode yang dapat digunakan:

- (1) menggunakan voltmeter yang memiliki akurasi sekitar 0,1%
 - (2) menggunakan ammeter yang memiliki akurasi juga 0,1% dan menerapkan hukum Ohm
- metode manakah yang paling akurat?

Untuk menentukan watak dinamik sensor, harus dikenalkan besaran variabel pada inputnya
→ input transient (impuls); input periodik (sinusoid); input acak (white noise)

Sistem Pengukuran Orde Nol

Watak dinamis:
Ralat dinamis
Laju respon

Ralat dinamis
= menggambarkan perbedaan antara respon sensor terhadap besar input yang sama pada saat input konstan dengan saat input bervariasi terhadap waktu

Diferensialkan hukum Ohm:

$$V = RI$$

$$dV = R dI + I dR$$

bagi dengan dV :

$$\frac{dV}{V} = \frac{R dI + I dR}{V} = \frac{R dI + I dR}{I R} = \frac{dI}{I} + \frac{dR}{R}$$

untuk variasi nilai yang cukup kecil berlaku:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,1}{100} + \frac{0,1}{100} = 0,2\%$$

Ketidakpastian jika diukur langsung 0,1%, lebih akurat

[1.5] Watak Dinamis

Sensor orde pertama
 → terdapat elemen penyimpanan energi dan elemen yang mendisipasikan energi

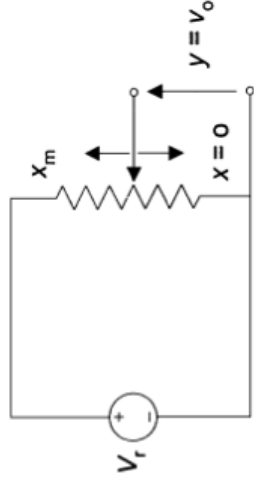
Relasi antara input $x(t)$ dan output $y(t)$ sensor orde pertama:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t)$$

Fungsi transfernya:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{\tau s + 1}$$

$k = 1/a_0$ → sensitivitas statik
 $\tau = a_1/a_0$ → konstanta waktu dari sistem
 frekuensi sudut = $\omega_c = 1/\tau$



Potensiometer linear sebagai sensor posisi

Model matematisnya:

$$y = V_r \frac{x}{x_m}$$

dengan $0 \leq x \leq x_m$ dan V_r tegangan acuan sehingga $k = V_r / x_m$

Sistem Pengukuran Orde Pertama

Kaitan antara input dengan output pada sensor orde nol:

$$y(t) = k x(t)$$

output
input
sensitivitas statis

Sensitivitas k bersifat statis, sehingga tetap sama berapapun frekuensi inputnya
 → ralat dinamis dan delay bernilai nol

Relasi input-output sensor orde nol menyatakan bahwa sensor tidak mengandung elemen penyimpanan energi
 → contoh: potensiometer

Sensor orde dua

→ terdiri atas dua elemen penyimpan energi dan satu elemen pendisipasi energi

Relasi antara input $x(t)$ dan output $y(t)$ sensor orde dua:

$$a_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = x(t)$$

Fungsi transfer untuk sensor orde dua:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2}$$

k → sensitivitas statis

ζ → rasio redaman

ω_n → frekuensi sudut redaman alami = $2\pi f_n$

Pada keadaan steady state: (panas masuk) – (panas keluar) = energi disimpan

diasumsikan tidak ada panas yang keluar dan massa tidak berubah, dan jika T_i = suhu internal, T_e = suhu eksternal, maka:

$$hA(T_e - T_i)dt - 0 = Mc dT_i$$

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{hA}{Mc} (T_e - T_i)$$

Dengan transformasi Laplace, dan $\tau = hA/Mc$ diperoleh

$$\frac{T_i(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{1 + \tau s}$$

→ konstanta waktu dan delay dari sensor terhadap perubahan suhu dipengaruhi oleh resistansi transfer panas, massa dan kalor jenis

Sistem Pengukuran Orde Kedua

Maka diperlukan dua parameter untuk menggambarkan sistemnya:

k untuk respon statis

τ atau ω_c untuk respon dinamis

Tabel 1.3 → sinyal output dari sistem pengukuran orde pertama untuk input tes yang berbeda

Tabel 1.4 → Ralat dinamis dan delay dari sistem pengukuran orde pertama untuk input tes yang berbeda

Contoh sensor orde pertama: *termometer*

berbasis massa M

dengan kalor jenis c ,

luas area perpindahan panas A ,

dan koefisien perpindahan panas h

Watak input: impedansi

Impedansi output dari besaran yang diukur menentukan impedansi input dari sensor

Sensor mengambil daya dari sistem yang diukur

loading error → jika pengambilan daya mengubah nilai variabel yang diukur

Ketika mengukur besaran x_1 , muncul besaran x_2 yang sedemikian sehingga perkalian $x_1 x_2$ memiliki dimensi daya

Contoh sensor orde dua:

Termometer yang dibungkus untuk proteksi

→ perlu ditambahkan kapasitas panas dan resistansi termal dari pembungkus hingga kapasitas panas elemen sensor dan resistansi konduksi panas dari medium tempat sensor diletakkan

[1.6] Watak Sensor Lainnya

Watak statis dan dinamis belum sepenuhnya menggambarkan kelakuan sensor secara lengkap, masih terdapat watak lain yang harus ditinjau
→ Tabel 1.6

untuk sistem orde dua umum berlaku:

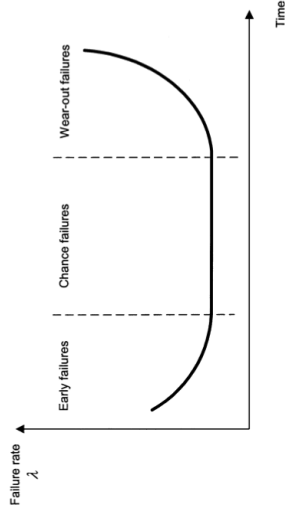
$$k = \frac{1}{a_0}$$
$$\omega_n^2 = \frac{a_0}{a_2}$$
$$\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0 a_2}}$$

→ tabel 1.5

Ralat dinamik dan delay pada sistem orde dua tidak hanya tergantung pada bentuk gelombang input, namun juga bergantung pada ω_n dan ζ

Jika pada interval waktu dt , $N_f(t)$ unit gagal dari total N dan $N_s(t)$ unit berhasil, dan waktu hidup dinyatakan dalam satuan waktu, maka nilai laju kegagalan:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s(t)} \frac{dN_f}{dt}$$



Laju kegagalan tidak konstan, namun mengikuti pola kurva di atas

Early failure → disebabkan adanya defek yang tidak terdeteksi pada proses quality control

Chance failure → akibat stress random

Wear-out failure → disebabkan usia pakai device yang telah memasuki batas masa pakai

Contoh:

Sensor pengukur tegangan → impedansi input tinggi

Sensor pengukur arus listrik → impedansi input rendah

Contoh:

Mengukur gaya → muncul kecepatan
 Mengukur laju aliran → muncul penurunan tekanan
 Mengukur suhu → muncul aliran panas
 Mengukur arus listrik → muncul penurunan tegangan

Reliabilitas

Sensor disebut reliable jika bekerja tanpa gagal pada kondisi dan periode tertentu
 → dinyatakan secara statistik

Variabel usaha (*effort*) → tegangan, tekanan, suhu (diukur antara dua titik dalam ruang)

Variabel aliran (*flow*) → arus listrik, aliran volum, aliran panas (diukur pada titik dalam ruang)

Laju kegagalan λ

= banyaknya kegagalan suatu item per satuan ukuran hidup (waktu, siklus) dinormalisasikan ke banyaknya unit yang berhasil

Daya yang diambil dari sistem yang diukur: $P = X_1 X_2$

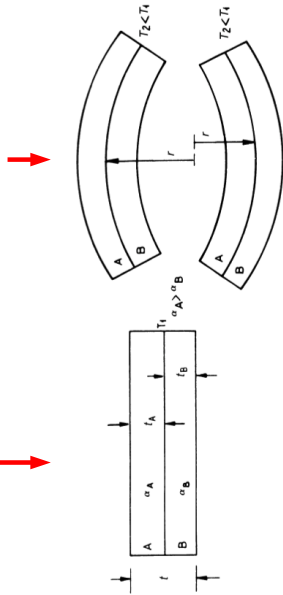
Jika diinginkan P minimum, X_2 harus sekecil mungkin
 → impedansi input harus besar

Jika P harus minimum ketika mengukur variabel aliran, X_1 harus kecil → impedansi input kecil

[1.7] Sensor Primer

bimetal

dikenai perubahan suhu



keping bimetal dengan koefisien muai yang berbeda (α_A dan α_B)

Besarnya jejari kelengkungan busur:

$$r \approx \frac{2t}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)}$$

Jejari kelengkungan berbanding terbalik dengan perubahan suhu

1) Sensor Suhu: Bimetal

Bimetal → terdiri atas gabungan dua keping logam dengan koefisien muai panjang yang berbeda

Ketika terjadi perubahan suhu, keping bimetal melengkung membentuk busur lingkaran

Sensor & Transduser (SFM-332)

[Intro sistem pengukuran] bagian 2

[1.7] Sensor Dasar

Sensor Dasar:

- 1) Sensor Suhu
- 2) Sensor Tekanan
- 3) Sensor Kecepatan dan Laju Aliran
- 4) Sensor Level
- 5) Sensor Gaya dan Torsi
- 6) Sensor Percepatan dan Kemiringan
- 7) Sensor Kecepatan

Koil bimetal untuk termometer

wikipedia.org

Keping bimetal dalam bentuk spiral



sciencephoto.com

Logam dengan $\alpha_B < 0$ menghasilkan r kecil
→ sensitivitas tinggi

Keping bimetal juga digunakan sebagai aktuator untuk membuka/menutup kontak

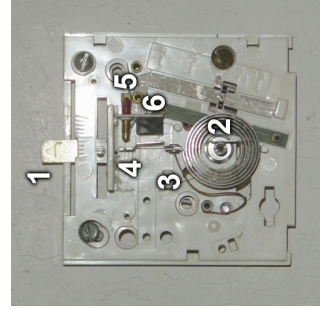
→ termostat, kontrol on/off, starter lampu neon



koboldmessring.com

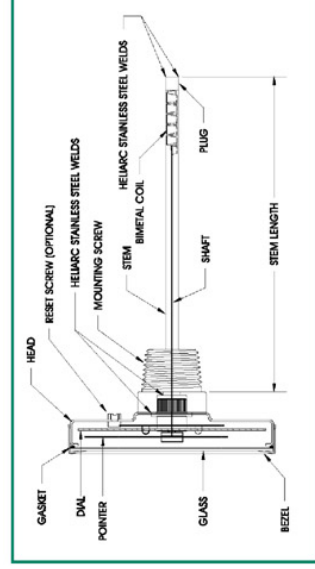
Termometer bimetal

Millivolt termostat



wikipedia.org

Termometer bimetal



reotemp.com

Keping bimetal diproduksi dalam bentuk:

Cantilever,
Spiral
Helix
Diafragma

dengan jarum penunjuk dilekatkan ke salah satu ujung keping untuk pembacaan angka suhu



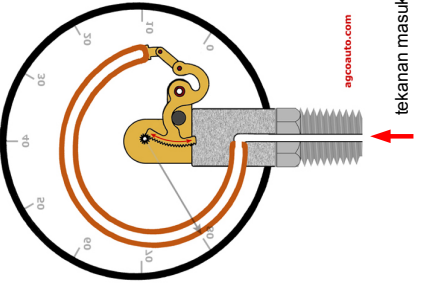
Evangelista Torricelli
(1608 – 1647)
Italian physicist & mathematician



Christiaan Huygens
(1629 – 1695)
Dutch physicist, astronomer & mathematician

Elemen elastis → mengalami perubahan ketika dikenai tekanan hingga tekanan internal setimbang dengan tekanan luar

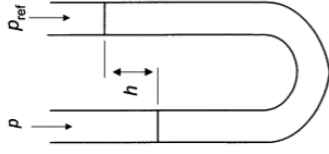
→ tabung Bourdon, diafragma, kapsul



Tabung Bourdon

TABLE 1.7 Some Common Methods to Measure Fluid Pressure in Its Normal Range

1. Liquid column + level detection
2. Elastic element
 - 2.1. Bourdon tube + displacement measurement: Potentiometer
LVDT
Inductive sensor
Digital encoder
 - 2.2. Diaphragm + deformation measurement
 - 2.2.1. Central deformation*: Potentiometer
LVDT
Inductive sensor
Unbonded strain gages
Cantilever and strain gages
Vibrating wire
 - 2.2.2. Global deformation: Variable reluctance
Capacitive sensor
Optical sensor
Piezoelectric sensor
 - 2.2.3. Local deformation: strain gages: Bonded foil
Deposited
Sputtered (thin film)
Diffused/implanted semiconductor



Manometer kolom cairan

$$h = \frac{p - p_{ref}}{\rho g}$$

→ membandingkan tekanan yang akan diukur dengan tekanan acuan dan menghasilkan selisih tinggi kolom cairan h

Manometer kolom cairan
→ ditemukan oleh Torricelli (1643) (*vertical tube*) dan Huygens (1661) (*U-tube*)

2) Sensor Tekanan

$$\text{Tekanan} = \frac{\text{Gaya}}{\text{Luas}}$$

- Differential pressure**
→ beda tekanan antara dua titik pengukuran
- Gauge pressure**
→ diukur relatif terhadap tekanan sekitar
- Absolute pressure**
→ diukur relatif terhadap tekanan di ruang hampa udara

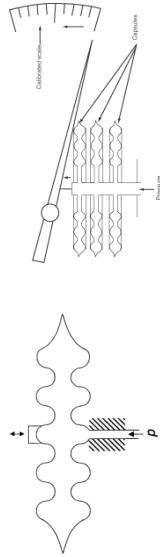
Diafragma yang besar dapat mengalami simpangan besar, namun kerentanan tinggi
 Pelat yang tipis juga dapat mengalami simpangan besar, namun rapuh
 → solusi: dikombinasi dengan *strain gage*

Sensor tekanan dengan diafragma



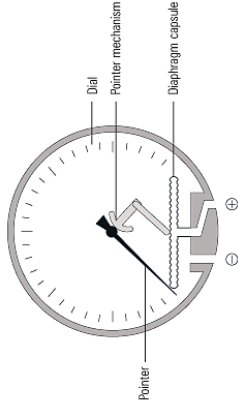
pressuregauge-vacuum.com

Sensor tekanan dengan kapsul diafragma



hydraulicspneumatics.com

Sensor tekanan dengan diafragma



spiraxsarco.com

Sensor tekanan diafragma

→ pelat lingkaran terdiri atas membran, berubah bentuk ketika dikenai tekanan



Untuk pelat tipis dengan ketebalan t dan jejari R mengalami beda tekanan Δp , jika simpangan bagian tengah sebesar $z < t / 3$, maka:

$$z \approx \frac{3(1-\nu^2)R^4}{16Et^3} \Delta p$$

E = modulus Young
 ν = rasio Poisson

Tabung Bourdon

→ tabung logam yang dipipihkan dengan salah satu ujung buntu
 → ketika tekanan masuk dari ujung terbuka, tabung cenderung meluruskan diri
 → dipatenkan oleh Bourdon pada 1849



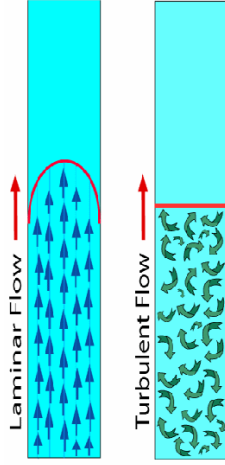
Eugene Bourdon
 (1808 – 1884)
 French Engineer

Sensor tekanan dengan tabung Bourdon



directindustry.com

Profil kecepatan aliran:



Aliran Laminar: kecepatan aliran di tengah lebih tinggi dari bagian tepi
 → profil berbentuk parabola

Aliran laminar:

→ Semua partikel mengalir sejajar dinding kanal

Aliran turbulente:

→ hanya kecepatan rerata yang sejajar sumbu kanal

Aliran

= gerak fluida dalam kanal/saluran terbuka/tertutup

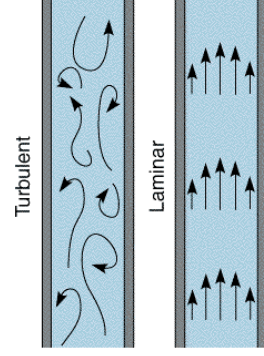
Laju aliran

= besarnya materi (dalam volum atau massa), yang mengalir tiap satuan waktu

TABLE 1.8 Measurement Principles Used in Flowmeters

Input Quantity	Measurement Principle	Output Signal
Fluid velocity: local	Pitot probe	Differential pressure
	Thermal (hot wire anemometry)	Temperature
Fluid velocity: average	Laser anemometry	Frequency shift
	Electromagnetic	Voltage
Volume flow rate*	Ultrasound: transit time	Time
	Ultrasound: Doppler	Frequency
	Orifice plate	Differential pressure
	Venturi tube	Differential pressure
	Pitot probe	Differential pressure
	Flow nozzle and tube	Differential pressure
	Elbow	Differential pressure
	Laminar flow element	Differential pressure
	Impeller (paddlewheel)	Cycles, revolutions
	Positive displacement	Cycles, revolutions
Target (drag force)	Force	
Mass flow rate	Turbine	Cycles, revolutions
	Variable area (rotameter)	Float displacement
	Variable area (weir, flume)	Level
	Vortex shedding	Frequency shift
	Coriolis effect	Force
	Thermal transport	Temperature

Tipe aliran fluida:



Laminar: umumnya kecepatan rendah; Turbulent: umumnya kecepatan tinggi

Kapsul menghasilkan simpangan lebih besar dibanding diafragma

Sensitif terhadap getaran dan percepatan, dan memiliki respon dinamis yang rendah

Sensor tekanan dengan kapsul diafragma

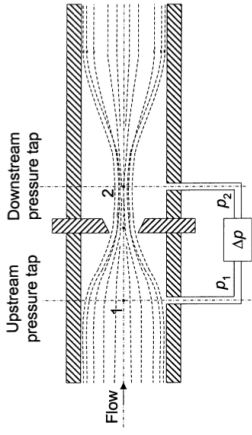


wikipedia.org



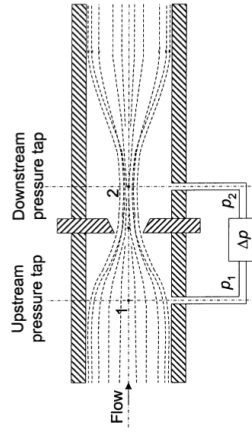
directindustry.com

3) Sensor Laju dan Kecepatan Aliran

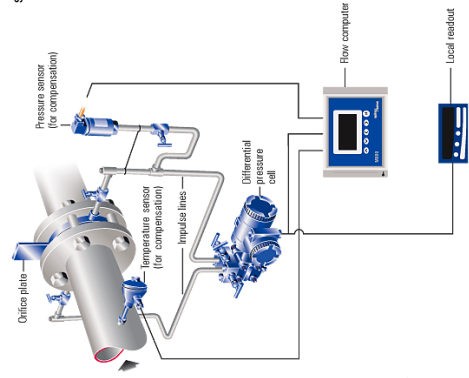


Hukum Bernoulli:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$



$$\text{Jika } h_1 = h_2 : \quad v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]}}$$

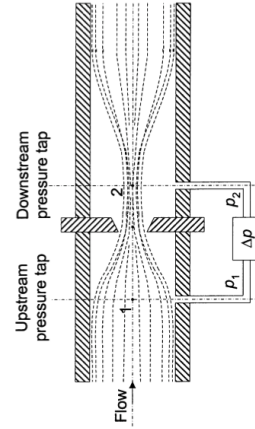
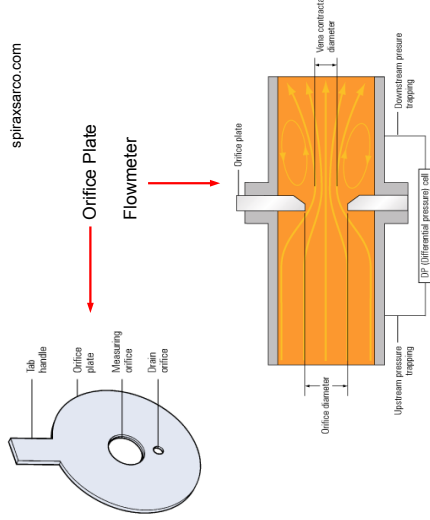


Instalasi Orifice Plate Flowmeter

Ide dasar pengukuran kecepatan aliran:
(via Hukum Bernoulli)

→ Letakkan penghalang pada fluida yang mengalir dalam pipa

→ tentukan penurunan tekanannya



Prinsip kekekalan massa: $Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$

Differential pressure

Hukum Bernoulli

$$p + \rho g h + \frac{\rho v^2}{2} = \text{constant}$$

Kecepatan aliran

Tekanan statis

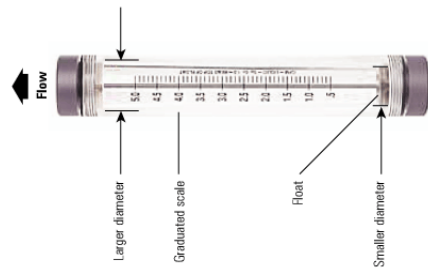
Rapat fluida (incompressible)

Percepatan gravitasi

Tinggi terhadap permukaan acuan



Daniel Bernoulli
(1700 – 1782)
Dutch-Swiss Mathematician



Rotameter harus digunakan pada kanal vertikal

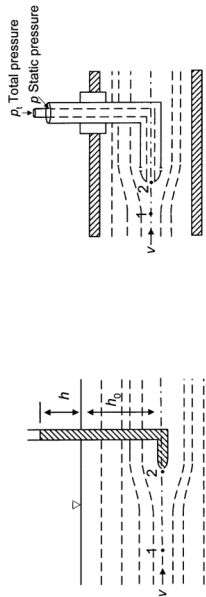
Variable area flowmeter (rotameter):

- juga menerapkan Hukum Bernoulli dan prinsip kekekalan massa
- perbedaan tekanan dibuat konstan, kecepatan aliran terkait dengan luasan yang dilewati aliran

Kelemahan Orifice Plate:

- Hilangnya sebagian tekanan (*loss of pressure*) → tidak dapat mengukur fluktuasi aliran
- dapat diganti dengan flow nozzle dan tabung venturi

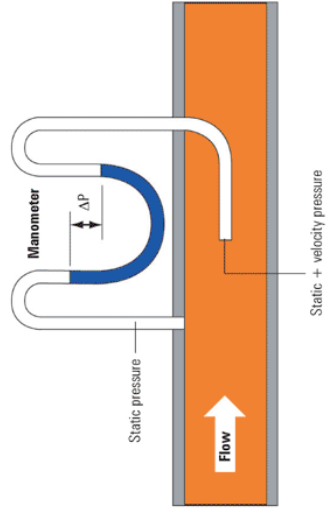
Tabung Pitot



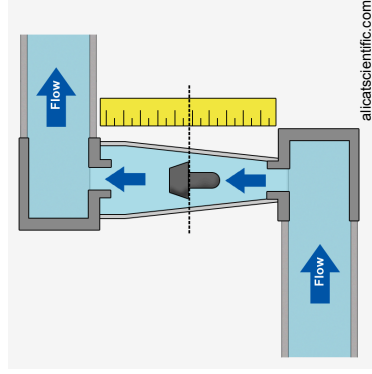
$$v = \sqrt{2gh}$$

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}}$$

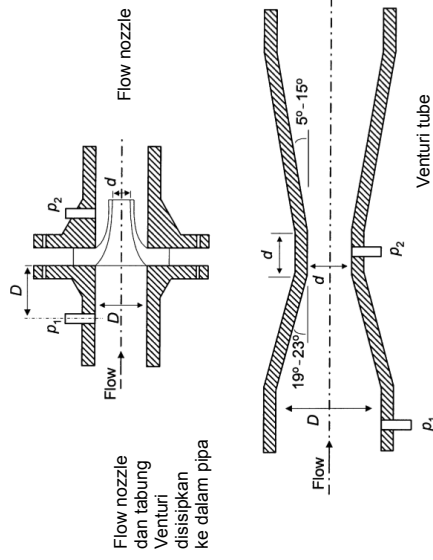
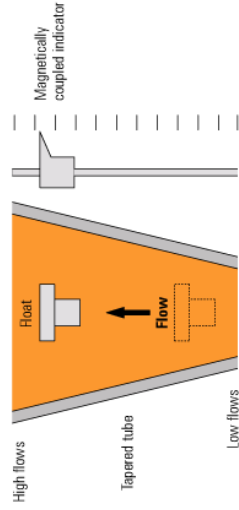
Tabung Pitot



Rotameter

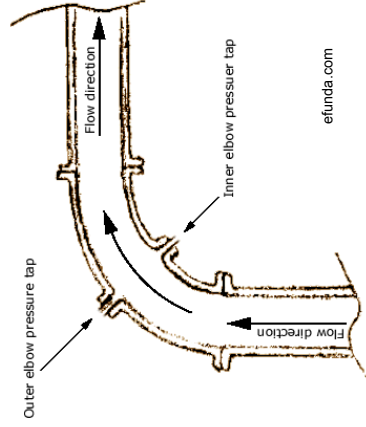


Rotameter



Flow nozzle dan tabung Venturi disisipkan ke dalam pipa

Elbow Flowmeter

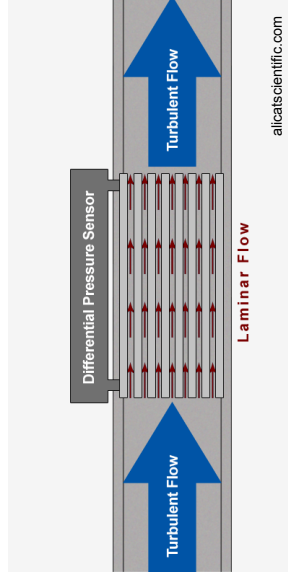




Henri Pitot
(1695 - 1771)
French Engineer



Laminar flowmeter



allicatscientific.com

Laminar flowmeter



directindustry.com

Laminar flowmeter → hukum Poiseuille:

Laju aliran volumetrik ~ penurunan tekanan

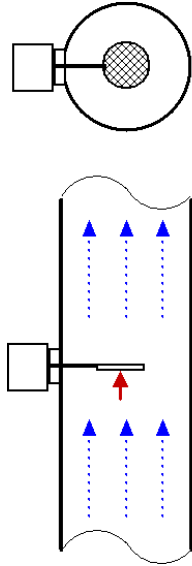
$$\Delta p = Q \frac{8 \eta L}{\pi r^4}$$

Panjang tabung
Viskositas fluida
Jari-jari tabung



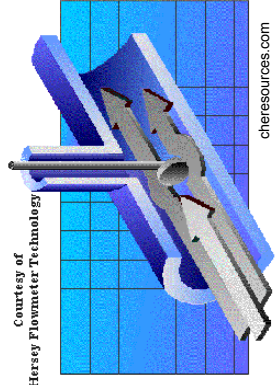
Jean Louis Marie Poiseuille
(1797 – 1869)
French physician & physiologist

Target Flowmeter



www.EngineeringToolBox.com

Target Flowmeter



Courtesy of Hersey Flowmeter Technology

chresources.com

$$F = \left(\frac{v^2}{2g} \right) \rho C_d A$$

where :
v = velocity
ρ = fluid density
C_d = disc friction coefficient
A = disc area

Positive Displacement Flowmeter



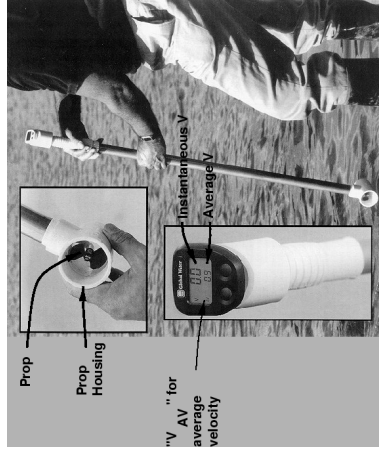
Turbine Flowmeter



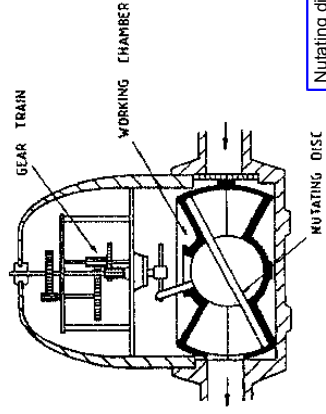
Target Flowmeter



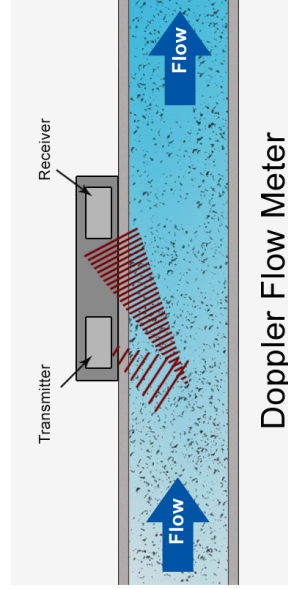
Impeller Flowmeter



Positive Displacement Flowmeter



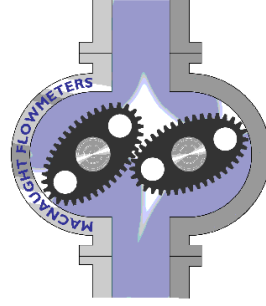
Ultrasound: Doppler



Doppler Flow Meter

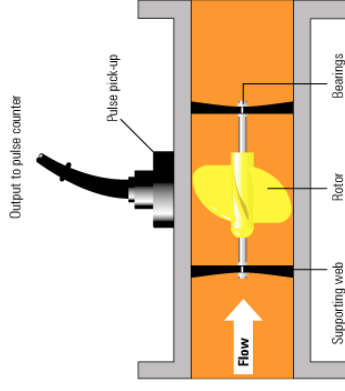
allcatscientific.com

Positive Displacement Flowmeter



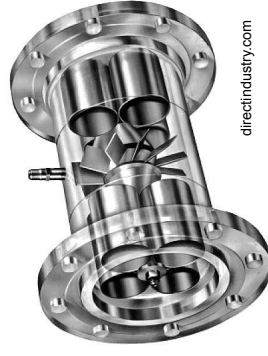
Sliding vane method

Turbine Flowmeter



spiraxsarco.com

Turbine Flowmeter



directindustry.com

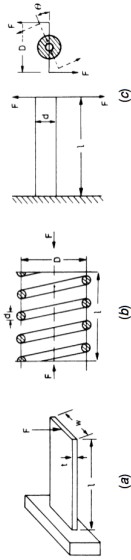
Gaya → Strain Gage → Sinyal listrik

Load Cell



omega.com

Umumnya *load cell* merupakan sistem orde dua teredam



Element	Deflection	Maximal Stress
Cantilever	$x = \frac{4Fl^3}{Ew^3} = \frac{3Elx}{w^3}$	$\sigma_M = \frac{6Fl}{wt^2} = \frac{3Elx}{2l^2}$
Helical spring	$x = \frac{8FvD^3}{Gd^4} = \frac{\pi n D^2 \tau}{Gdk_1}$	$\tau_M = \frac{8k_1 DF}{\pi d^3} = \frac{Gdk_1 x}{\pi n D^2}$
Torsion bar	$\theta = \frac{32FDl}{\pi d^4} = \frac{2\tau l}{G}$	$\tau_M = \frac{16FD}{\pi d^3} = \frac{dG\theta}{2l}$

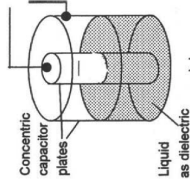
E = modulus Young, G = modulus torsi,
 k = faktor tegangan, n = banyaknya putaran

Tekanan cairan sebanding dengan tinggi permukaan

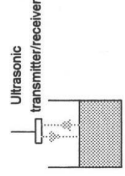
$$h = \frac{\Delta p}{\rho g}$$



berbasis konduktivitas

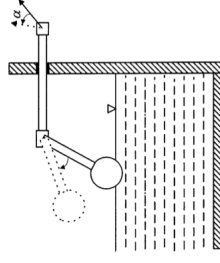


berbasis kapasitansi

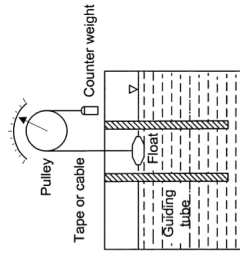


gelombang ultrasonik

4) Sensor Level

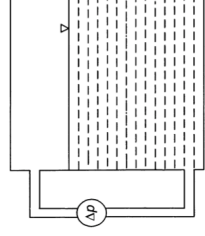


(a)

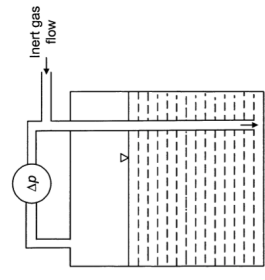


(b)

Berbasis pengapung



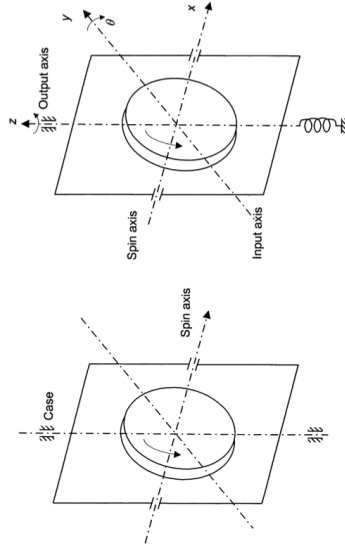
(c)



(d)

Berbasis beda tekanan

Pengukuran kecepatan sudut → giroskop



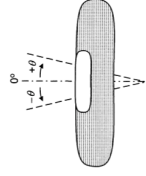
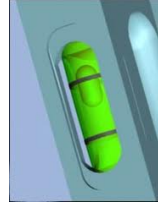
Giroskop mikro → menyensor rotasi dari efek Coriolis

= percepatan semu yang muncul ketika benda bergerak menyimpang akibat sistem yang berotasi

Inklinometer → mengukur arah posisi terhadap sumbu acuan

Jika sumbu acuan = gravitasi (sumbu vertikal) → **inklinometer = akselerometer**

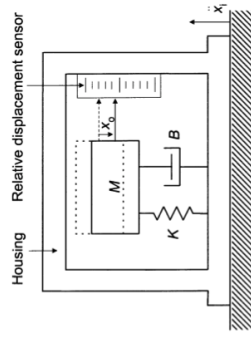
Inklinometer sederhana → waterpass



7) Sensor Kecepatan

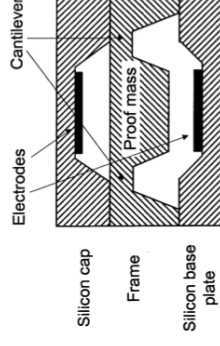
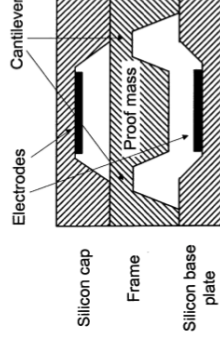
6) Sensor Percepatan (akselerasi) & Kemiringan (inklinasi)

Sensor dasar untuk akselerasi adalah sistem pegas+massa



Sinyal output: **pergeseran atau strain**

Sinyal output akselerometer dapat juga dalam bentuk perubahan kapasitansi → **akselerometer elektronik**

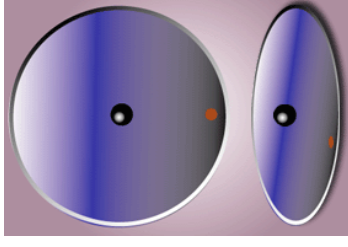


Micro-machined Gyroscope



Gaspard-Gustave de Coriolis
(1792 – 1843)
French mathematician

Efek Coriolis



wikipedia.org



Piezoelectric
velocity sensor



Linear velocity transducer

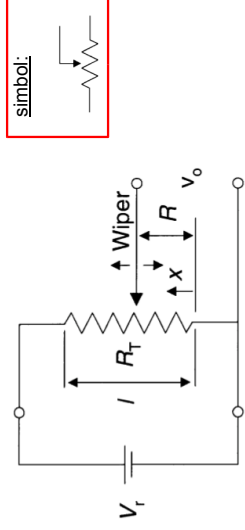
Sensor & Transduser (SFM-332)

[Sensor Resistif]

Sensor resistif

= sensor yang berdasar pada variasi resistansi listrik

[2.1] Potensiometer



Potensiometer
= device resistif dengan kontak geser linear atau rotari

Nilai resistansi antara kontak dengan ujung bawah:

$$R = \frac{\rho}{A} x = \frac{\rho l}{A} \alpha = R_T \alpha$$

Nilai resistansi antara kontak dengan ujung bawah:

$$R = \frac{\rho}{A} x = \frac{\rho l}{A} \alpha$$

Diagram showing the breakdown of the equation:

- ρ is labeled as resistivitas
- l is labeled as panjang
- A is labeled as tampang lintang
- α is labeled as fraksi panjang
- x is labeled as jarak dari ujung bawah

$$R = \frac{\rho}{A} x = \frac{\rho l}{A} \alpha$$

Potensiometer merupakan sistem orde ke-nol

$$R = \frac{\rho}{A} x = \frac{\rho l}{A} \alpha$$

Resistansi sebanding dengan jarak geser wiper
Asumsi: resistansi seragam sepanjang l
→ namun kenyataannya resistansi tidak sepenuhnya seragam

resistansi tidak seragam sempurna
→ linearitas potensiometer terbatas

Akibat adanya *self-heating* pada potensiometer, untuk daya sebesar P_r , besar tegangan maksimal V_r adalah

$$V_r \leq \sqrt{P R_T}$$

Ketika potensiometer dikenai tegangan bolak-balik, induktansi dan kapasitansi seharusnya tidak signifikan

→ untuk nilai R_T yang kecil, induktansi menjadi signifikan

Validitas persamaan 2.1 juga dibatasi oleh gesekan dan inersia dari wiper karena menambah beban mekanis pada sistem yang diukur

→ diperlukan untuk mendapat kontak yang bagus

Noise pada kontak wiper juga membatasi resolusi, yang meningkat akibat debu, kelembapan, oksidasi dan aus

Kecocokan antara watak transfer teoritis dengan kondisi sebenarnya disebut **konformitas (linearitas)**

Asumsi kedua:
pergeseran kontak menghasilkan variasi resistansi yang halus
→ resolusi tak hingga

Agar persamaan (2.1) valid, ketika potensiometer dikenai tegangan bolak-balik, induktansi dan kapasitansi seharusnya tidak signifikan

Ketika potensiometer dikenai tegangan bolak-balik, induktansi dan kapasitansi seharusnya tidak signifikan

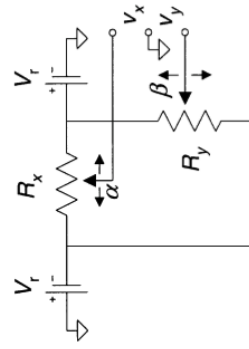
→ untuk nilai R_T yang besar, kapasitansi menjadi signifikan

Karena resistansi dipengaruhi suhu, persamaan (2.1) hanya berlaku jika perubahan resistansi akibat suhu bersifat seragam

Dual potentiometer dengan joystick bergerak pada 4 arah: gerak arah x menentukan R_x dan gerak arah y menentukan R_y



Dual potentiometer dengan joystick



$$v_x = V_T(1 - 2\alpha)$$

$$v_y = V_T(1 - 2\beta)$$

Impedansi output potentiometer linear akan bergantung posisi wiper

$$R_o = \frac{R_T \alpha R_T (1 - \alpha)}{R_T \alpha + R_T (1 - \alpha)} = R_T \alpha (1 - \alpha)$$

Tegangan keluaran akan bergantung pada tegangan masukan dan posisi wiper

$$v_o = V_r \frac{R_T \alpha}{R_T} = V_r \alpha$$

Pada beberapa model potentiometer, outputnya tidak linear terhadap input

→ contoh: output berbentuk fungsi trigonometrik (sin/cos)

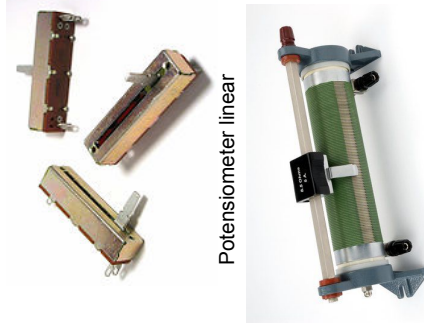


Nonlinear potentiometer

Model potentiometer yang tersedia: pergeseran linear dan putaran

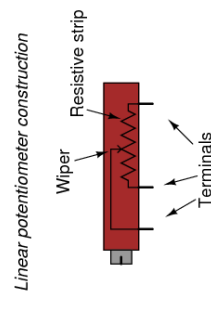
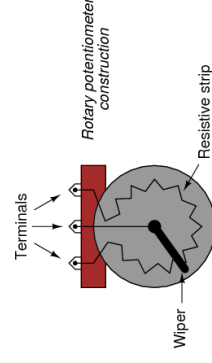


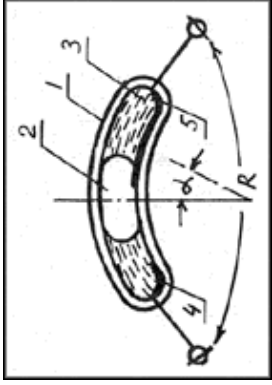
Potensiometer Putar



Potensiometer linear

SCIENCEPHOTO LIBRARY

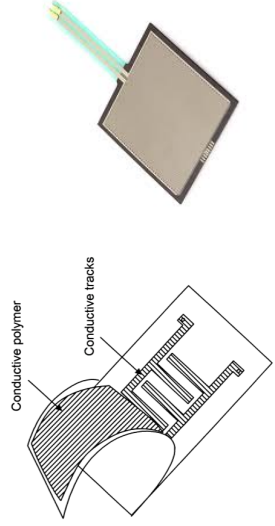




- 1) tabung lengkung
- 2) gelembung udara
- 3) cairan elektrolit
- 4) & 5) elektroda

Force-Sensitive Resistor (FSR)

Lapisan polimer konduktif yang konduktansinya sebanding dengan gaya yang dikenakan



Konfigurasi lain:

Elemen resistif berbahan dasar lapisan karbon

→ resolusi tinggi, tahan lama, namun koefisien suhu tinggi

Potensiometer terdiri atas:

- elemen resistif
- wiper
- batang aktuator (*driving rod*)
- bearing
- housing

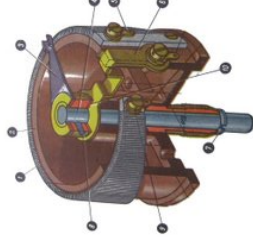


TABLE 2.1 Specifications for Linear and Rotary Potentiometers

Parameter	Linear	Rotary
Input range	2 mm to 8 m	10° to 60° turns
Linearity	0.002% FSO to 0.1% FSO	2° to 0.2°
Resolution	50 μ m	3 Hz
Maximal frequency		0.1 W to 50 W
Power rating		20 Ω to 220 k Ω
Total resistance		$20 \times 10^{-6}^\circ\text{C}$ to $1000 \times 10^{-6}^\circ\text{C}$
Temperature coefficient		Up to 10^8 cycles
Life		

Potensiometer elektrolit

digunakan dalam pengukuran kemiringan

→ tegangan output sebanding sudut kemiringan

Konfigurasi umum untuk elemen resistif:

Kabel dililitkan pada bahan insulator

→ bahan kabel: nikel-krom, nikel-tembaga, alloy logam

→ induktansi tinggi, resolusi rendah, namun koefisien suhu kecil

Diperoleh Gage Factor:

$$G = \frac{\Delta R / R_0}{\epsilon}$$

Untuk bahan semikonduktor bernilai antara 40 ~ 200

Ketika semikonduktor dikenai tekanan mekanis, selain perubahan dimensi, muncul perubahan banyaknya carrier muatan dan mobilitas reratanya

Perubahan resistivitas akibat tekanan lebih mendominasi dibandingkan perubahan dimensi

Tekanan mekanis
→ perpanjangan longitudinal
→ Amplitudo getaran kekisi meningkat
→ Mobilitas elektron mengecil
→ Resistivitas membesar



1856:
ditemukan oleh Lord Kelvin
pada konduktor
1954:
ditemukan oleh C.S. Smith
pada Silikon dan Germanium

William Thomson / Lord Kelvin
(1824 – 1907)
Fisikawan Inggris

Dari:

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

Rasio Poisson:

$$\nu = - \frac{dt/t}{dl/l}$$

Hukum Hooke:

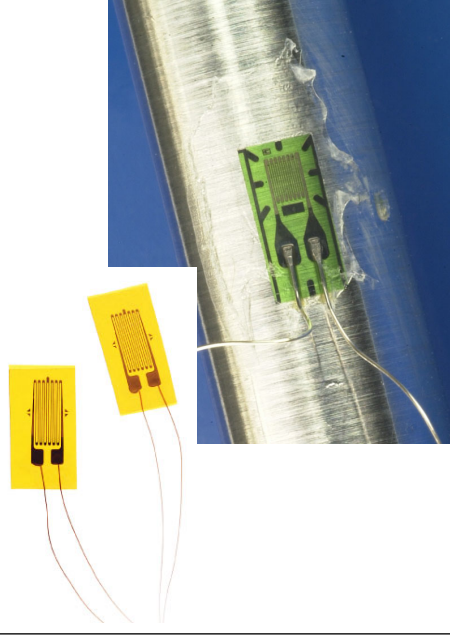
$$\sigma = \frac{F}{A} = E\epsilon = E \frac{dl}{l}$$

Hukum Bridgman:

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$$

Konstanta Bridgman

[2.2] Strain Gage



Strain Gage

→ didasarkan pada variasi resistansi dari konduktor/semikonduktor ketika dikenai tegangan mekanis

→ efek piezoresistif

Batasan Strain Gage:

Pengukuran akan valid jika seluruh tekanan ditransmisikan pada gage

→ **direkatkan pada bahan perekat elastis yang stabil terhadap suhu dan waktu**

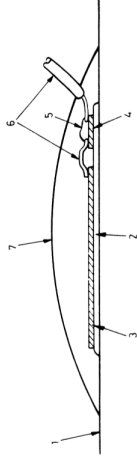
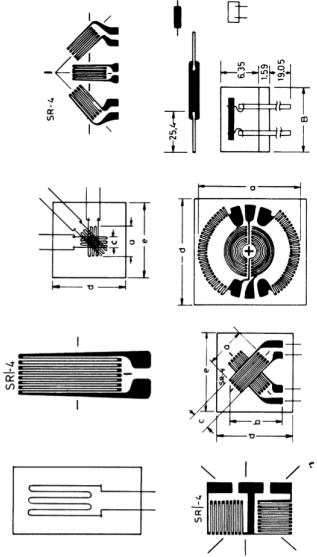


Figure 2.8 Installation of a foil strain gage (from BLH Electronics): 1, substrate material; 2, adhesive; 3, strain gage; 4, solder terminals; 5, lead wires; 6, lead wires; 7, environmental barrier.

Desain strain gage:



Semikonduktor dengan jumlah carrier banyak memberikan gage factor yang kecil, dan kurang sensitif terhadap suhu

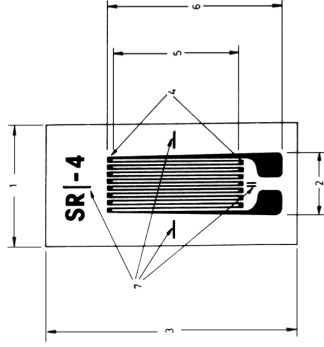


Figure 2.7 Parameters for a foil strain gage (from BLH Electronics): 1, matrix width; 2, grid width; 3, matrix length (carrier); 4, end loops; 5, active grid length; 6, overall gage length; 7, alignment marks. Typical thicknesses are 3.8 μm and 5 μm, depending on material type.

batasan Strain Gage:

Tekanan yang dikenakan tidak boleh melebihi batas elastisitas gage

→ **strain tidak boleh melebihi 4% panjang gage**

Besarnya efek piezoresistif bergantung pada: jenis semikonduktor, kerapatan carrier dan arah kekisi kristal terhadap tekanan

jika elektron mengalir sepanjang sumbu tekanan, perubahan resistivitas sebanding dengan tekanan

$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_L \sigma$$

koefisien piezoresistif longitudinal

Semikonduktor dengan jumlah carrier sedikit memberikan gage factor yang besar, namun sensitif terhadap suhu

TABLE 2.2 Typical Characteristics of Metal and Semiconductor Strain Gages

Parameter	Metal	Semiconductor
Measurement range	0.1 μe to 50,000 μe	0.001 μe to 3000 μe
Gage factor	1.8 to 4.5	40 to 200
Nominal resistance, Ω	120, 250, 350, 600, ..., 5000	1000 to 5000
Resistance tolerance	0.1% to 0.35%	1% to 2%
Active grid length, mm	0.4 to 150	1 to 5
	Standard: 3 to 10	

[2.3] Resistive Temperature Detector (RTD)

RTD = detektor suhu berdasar pada variasi resistansi listrik

→ umumnya menggunakan platina (PRT = platinum resistance thermometer)

Interferensi lain pada strain gage: **ggl termal**

→ pada sambungan antar logam yang beda

→ jika gage dikenai tegangan DC, sambungan logam memberi tegangan tambahan pada tegangan akibat strain

Strain gage harus berukuran kecil agar dapat mengukur strain di sebuah titik

Ketika mengukur getaran, panjang gelombangnya harus lebih besar dari ukuran gage

Strain gage dibuat dari logam campuran atau bahan semikonduktor (Si atau Ge)

Suhu mempengaruhi strain gage:

→ mempengaruhi resistivitas bahan, ukuran, dan modulus Young

Suhu mempengaruhi strain gage:

→ menyebabkan muncul strain meskipun belum dikenai tekanan
→ dikompensasi dengan **dummy gage**

Pengukuran resistansi strain gage memerlukan dilewatkannya arus listrik
→ **menyebabkan heating**

→ arus max 25 mA jika bahan dasarnya konduktor panas yang baik dan 5 mA jika isolator panas

RTD bersifat sebagai sistem orde pertama karena resistor memiliki kapasitas panas

→ untuk sensor yang diberi pelindung menjadi sistem orde kedua

Suhu naik

→ Gataran kekisi meningkat

→ Dispersi elektron membesar
Kecepatan rerata elektron mengecil

→ Resistansi logam membesar

Kelemahan sensor RTD:

Sulit mengukur suhu di dekat suhu leleh konduktor

Self-heating akibat rangkaian pengukur harus dihindari

→ berakibat suhu sensor lebih tinggi dari suhu sekitar

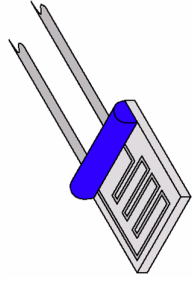
Resistansi naik ketika suhu meningkat

Secara matematis:

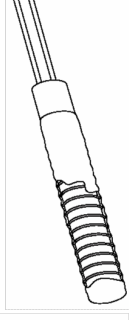
$$R = R_0 [1 + \alpha_1(T - T_0) + \alpha_2(T - T_0)^2 + \dots + \alpha_n(T - T_0)^n]$$

→ Hambatan saat T_0

Resistansi berubah karena perubahan resistivitas dan perubahan ukuran akibat suhu



Tipe elemen lapisan tipis



Tipe elemen liitan

Thin-film platinum thermometer



Termometer platina

→ diajukan pertama kali oleh William Siemens pada 1871

→ probe platina memberikan output yang stabil dan akurat



TABLE 2.3 Specifications for Some Different Resistance Temperature Detectors

Parameter	Platinum	Copper	Nickel	Molybdenum
Span, °C	-200 to +850	-200 to +260	-80 to +320	-200 to +200
α at 0°C, (Ω/Ω)/K	0.00385	0.00427	0.00672	0.003786
R at 0°C, Ω	25, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000	10 (20 °C)	50, 100, 120	100, 200, 500, 1000, 2000
Resistivity at 20 °C, μΩ · m	10.6	1.673	6.844	5.7

*Temperature coefficients depend on metal purity. For 99.999% platinum, $\alpha = 0.00395/°C$.

Aplikasi thermometer platina:

- Kontrol proses termal pada industri kimia
- Kontrol emisi gas buang pada mobil
- Kontrol panas pada oven dan heater bangunan
- Pengukur suhu jalan (dipasang di bumper mobil)
- Pengukur kecepatan fluida

[2.4] Thermistor

Keunggulan RTD adalah:

- sensitivitasnya tinggi, *repeatability* tinggi,
- stabil dan akurat dalam waktu lama (untuk platina) dan murah (untuk tembaga dan nikel)

Untuk logam sebagai probe RTD, kaitan suhu dengan hambatan adalah (dalam batas linear):

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Koefisien suhu resistansi (TCR)

Koefisien suhu resistansi α dihitung dari nilai hambatan pada dua suhu referensi

Misal antara 0° C dan 100° C:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{(100^\circ\text{C})R_0}$$

→ α disebut juga sebagai **sensitivitas relatif**

Kemampuan mendisipasikan panas pada konduktor diberikan oleh tetapan/faktor disipasi panas δ (*heat dissipation constant/factor*)

$$\Delta T = \frac{P_D}{\delta} = \frac{I^2 R}{\delta}$$

Kemampuan mendisipasikan panas pada konduktor diberikan oleh tetapan/faktor disipasi panas δ (*heat dissipation constant/factor*)

daya disipasi

$$\Delta T = \frac{P_D}{\delta} = \frac{I^2 R}{\delta}$$

selisih suhu

tetapan disipasi

Strain mekanis juga mempengaruhi pengukuran suhu dengan RTD karena mengubah nilai hambatan

→ secara tidak sengaja terjadi pada pengukuran suhu permukaan dengan sensor yang diikat

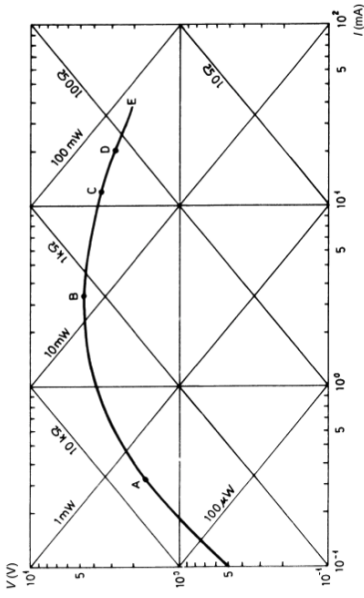


Figure 2.16 Voltage-current characteristic for a thermistor in still air at 25 °C.

Daya listrik P akibat self-heating setara dengan laju hilang panas (*heat loss*) ditambah laju akumulasi panas

$$P = V_T \times I_T = I_T^2 R_T = \delta(T - T_a) + C \frac{dT}{dt}$$

konstanta disipasi thermistor

kapasitas panas

suhu sekitar

Untuk nilai P yang tetap, suhu thermistor berubah terhadap waktu menurut persamaan:

$$T = T_a + \frac{P}{\delta} \left(1 - e^{-(\delta/C)t} \right)$$

Solusi untuk model dengan tiga parameter:

$$R_T = \exp \left(\sqrt[3]{-\frac{m}{2} + \sqrt{\frac{m^2}{4} + \frac{n^2}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{m}{2} - \sqrt{\frac{m^2}{4} + \frac{n^2}{27}}} \right)$$

dengan

$$m = (a - 1/T)/c \text{ dan } n = b/c$$

Penerapan thermistor lainnya memanfaatkan relasi antara arus listrik dengan beda tegangan pada thermistor

Pada arus lemah, beda tegangan berbanding lurus dengan kuat arus

Pada arus tinggi, thermistor mengalami *self-heating* sehingga hambatan dan beda tegangan mengecil dengan membesarnya kuat arus

Nilai B dapat ditentukan dari hambatan thermistor NTC pada dua suhu acuan T_1 dan T_2

$$B = \frac{\ln(R_2/R_1)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$$

Model matematis dengan dua parameter memberikan keakuratan hingga 0,3° C untuk range 50° C

Model dengan tiga parameter memberi keakuratan hingga 0,01° C untuk range 100° C

Model dengan tiga parameter:

$$R_T = e^{(A+B/T+C/T^3)}$$

atau:

$$\frac{1}{T} = a + b \ln R_T + c(\ln R_T)^3$$

Kelemahan thermistor:

Thermistor kurang stabil dibanding RTD

→ untuk menambah kestabilan, thermistor umumnya diberi pelindung gelas

Keunggulan thermistor:

Sensitivitas tinggi, sehingga untuk pengukuran suhu diperoleh sensor dengan resolusi tinggi dan respon cepat

Ketika thermistor disambung pada rangkaian, hambatan gabungannya menjadi:

$$R_p = \frac{RR_T}{R + R_T}$$

dengan sensitivitas:

$$\frac{dR_p}{dT} = \frac{R^2}{(R_T + R)^2} \frac{dR_T}{dT}$$

tidak linear!

Jika konstanta disipasi bernilai tetap, thermistor sensitif terhadap daya masukan

→ dapat digunakan untuk kontrol daya dan tegangan

Untuk *silistor* (tempistor)
= thermistor berbasis silikon yang di-doping

mematuhi model matematis:

$$R_T = R_{25} \left(\frac{273.15 \text{ K} + T}{298.15 \text{ K}} \right)^{2.3}$$

Sifat dinamis dari thermistor:

Sebagai sistem orde satu jika tanpa pelindung

Sebagai sistem orde dua jika diberi pelindung

Untuk keadaan steady-state, derivatif terhadap suhu bernilai nol, sehingga:

$$I_T^2 R_T = \delta(T - T_a) = \frac{V_T^2}{R_T}$$

maka:

$$V_T^2 = \delta(T - T_a) R_0 e^{B(1/T - 1/T_0)}$$

Jika self-heating diabaikan, maka:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\delta}{C} (T - T_a)$$

dengan solusi:

$$T = T_a + (T_i - T_a) e^{-t/\tau}$$

$\tau = \delta/C$ adalah konstanta waktu thermal

Pada zona self-heating, thermistor sensitif terhadap sembarang efek yang mempengaruhi disipasi panas

→ dapat digunakan untuk mengukur aliran, ketinggian permukaan (level), dan konduktivitas panas

Cara menentukan nilai R :

Ambil 3 titik pada kurva hambatan-suhu yang menyentuh garis lurus

→ persamaan (2.41), (2.42) dan (2.43)

Dari model untuk thermistor diperoleh koefisien suhu hambatan (TCR):

$$\frac{dR_p/dT}{R_p} = -\frac{B}{T^2} \frac{1}{1 + R_T/R}$$

Umumnya ditambahkan resistor R untuk meningkatkan linearitas pada range pengukuran

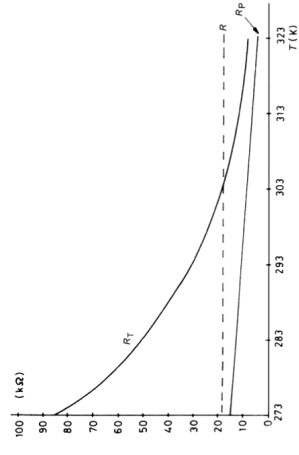
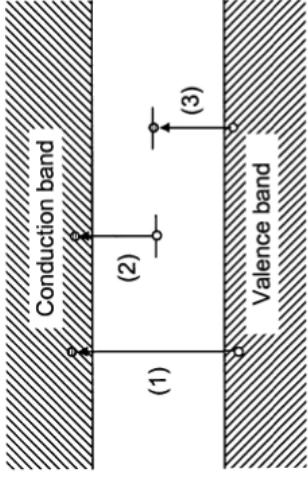


Figure 2.22 Resistance-temperature characteristic of an NTC thermistor shunted by a resistor R .



Jika radiasi datang mampu mengeksitasi elektron ke pita yang lain tanpa melewati ambang batas untuk lepas dari bahan → efek *fotolistrik internal*

→ jika melebihi: efek *fotolistrik eksternal*

Semakin besar iluminasi (penyinaran), semakin besar konduktivitas

LDR dibungkus dengan plastik transparan



Photoconductivity diamati pertama pada selenium (Se) pada 1873 oleh Willoughby Smith

Konduktivitas listrik bahan dipengaruhi oleh banyaknya pembawa muatan pada pita konduksi

→ energi yang diperlukan untuk memindah elektron dari pita valensi ke pita konduksi dapat diberikan oleh radiasi optis ($E = hf$)

Sensor & Transduser (SFM-332)

[Sensor Resistif] bagian 2

[2.6] Light-Dependent Resistor (LDR)

LDR (= photoresistor, photoconductor)

→ sensor yang memanfaatkan variasi hambatan listrik pada bahan semikonduktor ketika dikenai radiasi optis (radiasi EM pada panjang gelombang 1 mm ~ 10 nm)

Penggunaan LDR:

Aplikasi kontrol → butuh LDR dengan gradien besar pada grafik R vs E_v

Aplikasi pengukuran → butuh LDR dengan gradien kecil pada grafik R vs E_v

Aplikasi kontrol:

Kontrol brightness & contrast pada TV
Kontrol diafragma pada kamera
Switch lampu jalan
Detektor api
etc.

Aplikasi pengukuran:

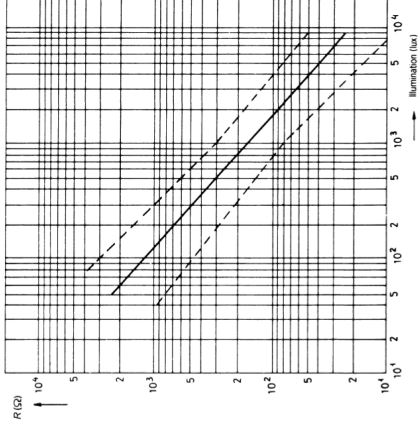
Detektor posisi dan kehadiran
Detektor asap
Card reader
Alarm pencuri
Densitometer (pengukur kerapatan)
etc.

LDR juga sensitif terhadap suhu

→ suhu menyebabkan eksitasi elektron-hole

LDR merespon lebih lambat pada suhu rendah

LDR umumnya berbahan CdS, PbS, PbSe
→ paling banyak berbahan CdS



: Resistance-illumination characteristic for a CdS photoconductor

Kaitan antara hambatan R photoconductor dengan iluminasi E_v bersifat nonlinear

$$R = A \times E_v^{-\alpha}$$

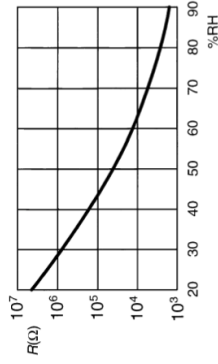
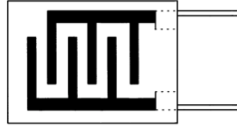
→ A dan α bergantung pada bahan

Waktu tanggap (*respon-time*) LDR bergantung pada:

bahan,
tingkat iluminasi,
sejarah iluminasi,
suhu sekitar

Kaitan antara kelembaban relatif dengan hambatan pada sensor berbahan polimer bersifat tidak linear, dan bergantung suhu

→ semakin tinggi suhu, hambatan semakin kecil



Insulator listrik menunjukkan penurunan resistivitas ketika kandungan airnya meningkat

→ sangat tampak jika ditambahkan bahan hygroscopic seperti LiCl

Pengukuran variasi hambatan terhadap kandungan air menghasilkan hygrometer resistif

→ dikembangkan pertama tahun 1938 oleh F. Dunmore

Penggunaan sensor hygrometer:

- HVAC (heat, ventilation, air conditioner)
- Kontrol kelembaban dan dryer pada industri kain/kertas
- Monitoring kelembaban lingkungan
- Alat kedokteran (mesin anastesi, ventilator, inkubator bayi)
- Kontrol kemasan makanan
- Kontrol produksi farmasetika

Tiga tipe dasar sensor kelembaban:

- Garam (LiCl, BaF₂, P₂O₅)
- Polimer konduktif
- Permukaan yang diolah

[2.7] Hygrometer Resistif

Kelembaban (*humidity*)
→ banyaknya kandungan uap air pada suatu gas

Kelembapan (*moisture*)
→ banyaknya air yang diserap oleh cairan atau bahan padat

Kelembaban mutlak = massa uap air terkandung dalam suatu volume gas

Kelembaban relatif (RH = relative humidity) = tekanan parsial uap air terhadap tekanan uap air yang cukup untuk membuat gas tersaturasi