



## Bab 1

# Konsep Dasar Sistem Pengukuran

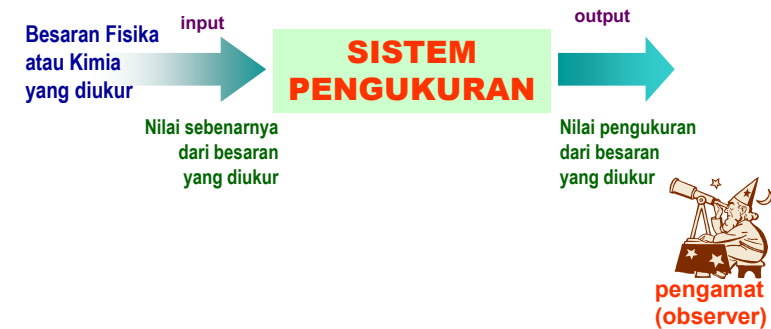
Disusun oleh:

Dr. Ir. Yeffry Handoko Putra, M.T

## Konsep Dasar Sistem Pengukuran

### • Sistem Pengukuran

- Memberikan hasil pengamatan berupa nilai **numerik** yang merepresentasikan kuantitas dari variabel atau besaran yang diukur



## Konsep Dasar Sistem Pengukuran

### Variabel Fisik Umum

(Common Physical Variables)

- Motion: Panjang, Kecepatan, Percepatan, Jerk
- Waktu
- Massa, Gaya, Torsi, Daya dan Energi
- Temperatur
- Tekanan
- Level
- Cahaya
- Frekuensi
- dsb

### Variabel Sinyal

(Typical Signal Variables)

- Tegangan (analog, pulsa, PWM)
- Arus
- Intensitas Cahaya
- Frekuensi
- Gaya
- defleksi
- Tekanan



## Contoh : Variabel-2 Fisika pada berbagai tempat

### • Rumah

- Temperatur dalam ruang, lemari es, oven dsb
- Aliran air dalam pipa
- Daya listrik
- dsb

### • Mobil / Motor

- Putaran Mesin
- Kecepatan Kendaraan
- dsb

### • Pesawat terbang

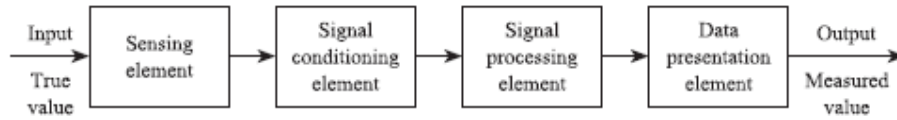
- Ketinggian terbang pesawat
- Kecepatan gerak pesawat
- Arah gerak
- Tekanan udara (luar & dalam kabin)
- Temperatur udara (luar & dalam kabin)
- dsb

### • Industri

- Temperatur (reaktor, kolom distilasi, tungku pemanas dsb)
- Aliran fluida
  - Aliran BBM
  - Aliran Material Proses
  - dsb
- Tekanan pada reaktor, pipa, tangki dsb
- Ketinggian cairan dalam tangki, reaktor, drum dsb
- Putaran pada motor listrik
- Getaran pada berbagai perangkat mesin
- dsb

# Struktur Sistem Pengukuran

*Mengukur = konversi energi dan variabel*



- Thermocouple where millivolt e.m.f. depends on temperature
- Strain gauge where resistance depends on mechanical strain
- Orifice plate where pressure drop depends on flow rate.

- Deflection bridge which converts an impedance change into a voltage change
- Amplifier which amplifies millivolts to volts
- Oscillator which converts an impedance change into a variable frequency voltage

- Analogue-to-digital converter (ADC) which converts a voltage into a digital form for input to a computer
- Computer which calculates the measured value of the variable from the incoming digital data. Typical calculations are:
  - Computation of total mass of product gas from flow rate and density data
  - Integration of chromatograph peaks to give the composition of a gas stream
  - Correction for sensing element non-linearity

- Simple pointer-scale indicator
- Chart recorder
- Alphanumeric display
- Visual display unit (VDU).

4

Konsep Dasar . . . . .

## • Sensing Elemen

- elemen yang merasakan (to sense) variabel yang diukur, pada umumnya sensor mengambil daya dari medium. Variabel yang diukur dapat berupa variabel listrik, termal, mekanik dsb
- Pada umumnya sensor adalah juga transduser, karena sensor mengubah variabel pengukuran menjadi variabel sinyal (to transduce: mengubah)

## ■ Contoh

- ▶ **Sensor Temperatur**
  - Thermocouple
  - PT 100
- ▶ **Sensor Gaya & Tekanan**
  - Membran
  - Piezoelectric
  - Strain Gauge
- ▶ **Sensor Posisi**
  - LVDT
  - Potentiometer
- ▶ dsb

Conductivity Sensor



PT-100

Thermocouple

## SENSOR

### • Sensor AKTIF

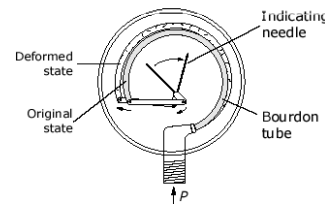
- Sensor di mana energi outputnya tidak seluruhnya berasal dari daya input yang diambil oleh sensor. Sensor Aktif perlu sumber daya lain untuk mendisplaykan data
- Contoh : sensor / transduser ultrasonic, sonar dsb

Ultrasonic Sensor



### • Sensor PASIF

- Sensor yang outputnya berasal dari daya input. Sensor Pasif tidak memerlukan suatu sumber daya lain, selain daya input dari medium pengukuran
- Contoh : Thermocouple, Tabung BOURDON dsb



<http://www.efunda.com>

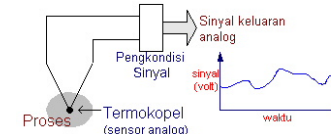
6

## • Sensor ANALOG

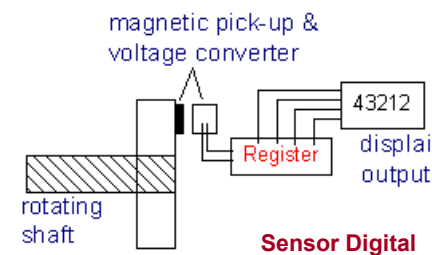
- Sensor yang mendeteksi variabel analog (kontinu) dan outputnya juga sinyal analog
- Contoh : Termokopel

## • Sensor DIGITAL

- Sensor yang mendeteksi variabel digital, dan outputnya juga sinyal digital
- Contoh : turbin flowmeter yang mendeteksi putaran as



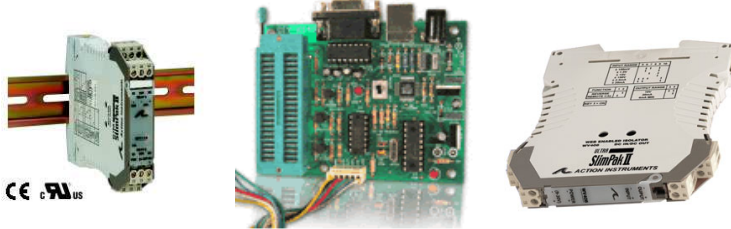
Sensor Analog



Sensor Digital

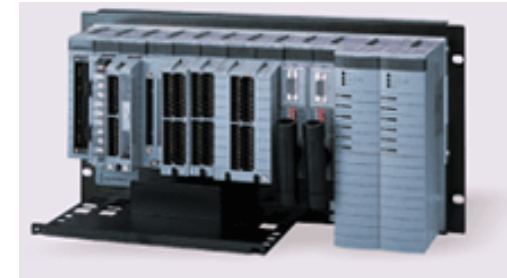
## • Signal Conditioner / Pengkondisi Sinyal

- Merupakan elemen memanipulasi atau mengkondisikan output sensor sehingga menjadi sinyal yang dapat diproses selanjutnya
  - Filter :
    - Low Pass Filter, High Pass Filter, Band Pass Filter dsb
  - Amplifier
    - Instrument Ampifier, Differential Amplifier dsb
    - Voltage Follower/Matching



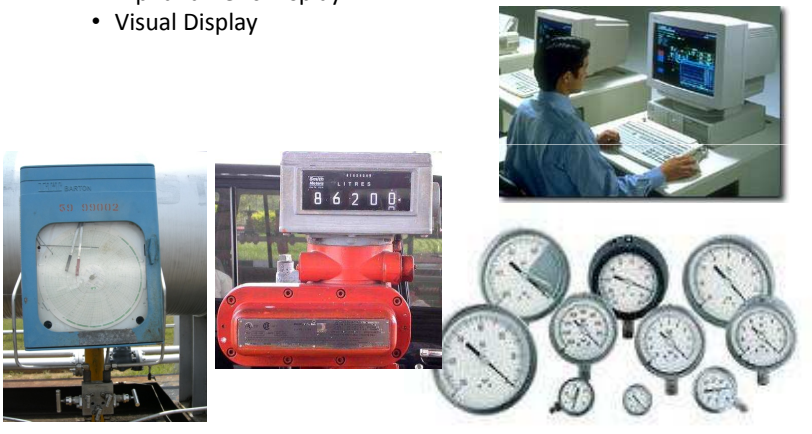
## • Signal Processing

- Elemen mengubah sinyal menjadi bentuk sinyal lain yang sesuai dengan kebutuhan proses berikutnya
  - Analog – to – Digital Converters dan Computer atau Microcomputer,
  - pneumatic to electric transducer, hidraulic to electric transducer, dsb
  - Voltage to Frequency



## • Data Presentation Element (Display)

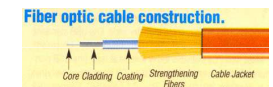
- Elemen untuk mengkomunikasikan data pengukuran ke operator
  - Chart recorder
  - Alphanumeric Display
  - Visual Display



## Elemen Tambahan

### TRANSMISI SINYAL (Signal Transmission)

- Mengirim sinyal dari satu elemen ke elemen lainnya pada sistem pengukuran
  - Pipa sebagai media transmisi sinyal pneumatik
  - Pulley sebagai media transmisi sinyal mekanik
  - Kabel sebagai media transmisi sinyal listrik
  - Gelombang elektromagnetik sebagai media transmisi sinyal elektromagnetik
  - Serat optik sebagai media transmisi sinyal optik



### DATA STORAGE

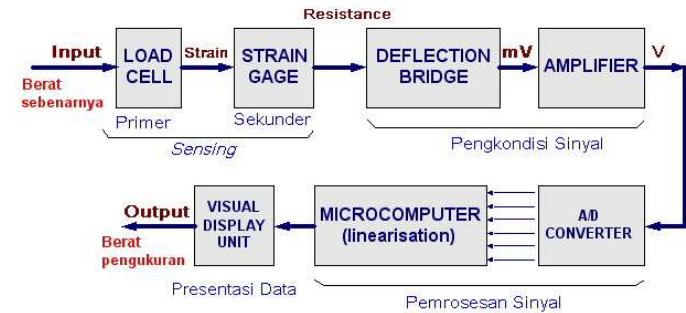
- Data logging ; sistem penyimpanan data portable
- Database computer system

## Konsep Dasar . . . . .

- Instrumen ukur sederhana mempunyai rantai komponen fungsional pendek, dan instrumen ukur kompleks rantai komponen fungsionalnya semakin panjang.
- Pada suatu instrumen ukur tidak selalu harus ada semua komponen fungsional secara lengkap.
- Pada instrumen ukur **minimum** harus ada
  - komponen yang berfungsi sebagai **sensor** (yang menghubungkan medium & alat ukur)
  - komponen yg berfungsi sebagai '**elemen presentasi**' (komponen yang menghubungkan antara alat ukur & operator)

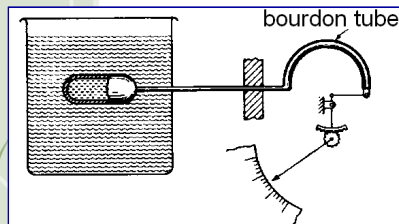
12

## Contoh : Sistem Pengukuran Berat

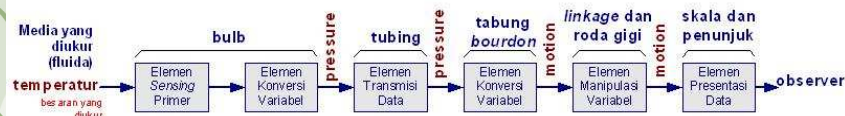


13

## Contoh : Pressure Thermometer



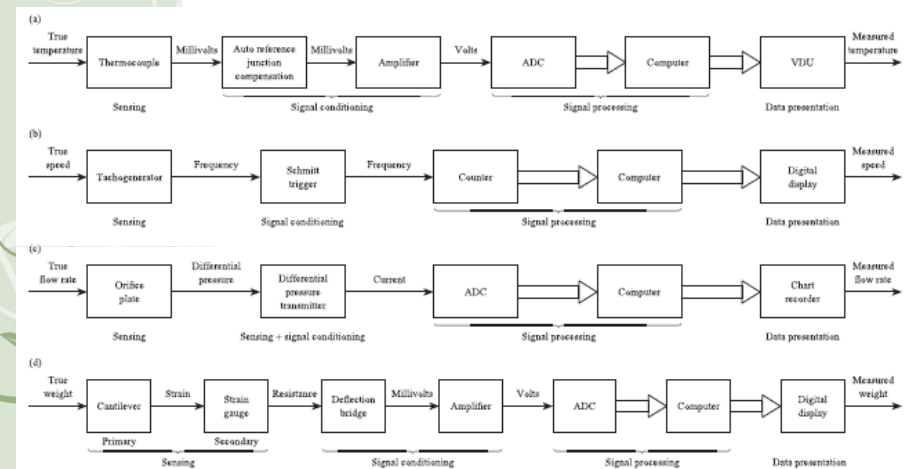
Perbedaan temperatur medium dan fluida dalam **bulb** termo-meter menyebabkan aliran kalor ke dalam **bulb** dan mengubah volume fluida. Hal ini menyebabkan tekanan fluida dalam **bulb** berubah.



Catatan : diskusikan contoh-contoh sistem pengukuran lainnya

14

## Contoh Sistem Pengukuran



15

## Contoh : Thermometer Hg & Voltmeter

| Fungsi              | Thermometer Hg                          | Voltmeter           |
|---------------------|---|---------------------|
| Sensor & Transduser | Bola kaca berisi air raksa              | Arus coil stator    |
| Pengkondisi Sinyal  | Nosel antara bola kaca dan pipa kapiler | Pegas lingkar rotor |
| Pengolah Sinyal     | Tidak ada                               | Sistem rodagigi     |
| Displai             | Skala pada gelas termometer             | Jarum dan skala     |

## Metoda Dalam Mengukur

### Pengukuran Langsung dan Tidak Langsung

#### • Pengukuran Langsung

- Pengukuran besaran fisika dengan menggunakan suatu referensi nilai dengan jenis yang sama
  - Pengukuran panjang dengan menggunakan penggaris
  - Pengukuran resistansi suatu resistor dengan menggunakan rangkaian jembatan Wheatstone



#### • Pengukuran Tidak Langsung

- Pengukuran besaran fisika dengan cara mengukur besaran fisika lainnya yang memiliki hubungan tetap dengan besaran yang diukur
  - Pengukuran temperatur dengan menggunakan **Thermocouple**
  - Pengukuran laju aliran fluida dengan menggunakan prinsip beda tekanan
- Jumlah variabel yang sangat banyak dan melibatkan berbagai hukum-2 fisika, mengakibatkan pada umumnya pengukuran di industri adalah pengukuran tidak langsung



17

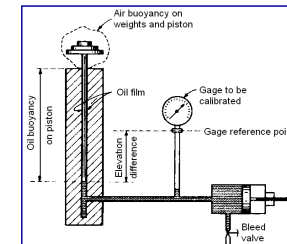
### Tahapan konversi vs kehandalan

- Sebagian besar instrumen pengukur adalah alat ukur *tidak langsung*, dimana konversi dari satu bentuk variabel fisika ke variabel lainnya dapat terjadi beberapa kali.
- Instrumen pengukur dengan tahapan konversi yang semakin banyak, performansi dan keandalannya semakin rendah.

18

### Kalibrasi

- Untuk menjaga performansi alat ukur harus dilakukan kalibrasi.
- Kalibrator atau Instrumen standar pada umumnya adalah alat ukur langsung atau rantai konversinya pendek
  - Contoh : Kalibrator Tekanan (*Dead Weight Piston Gage*)
- Titik Nol dan Proses linieritas



#### kalibrator tekanan:

*dead-weight-piston-gage* berdasar prinsip manometer, yaitu membandingkan secara langsung tekanan fluida dengan gaya berat massa standar

19

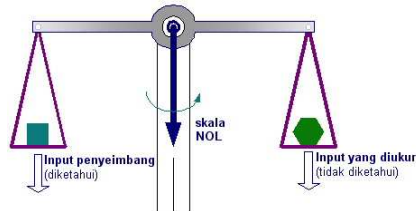


# Metoda Dalam Mengukur

## Metoda DEFLEKSI dan NOL

### • Metoda NOL

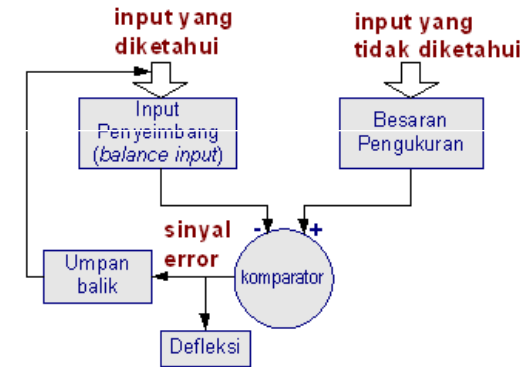
- Pengukuran dengan cara membandingkan besaran yang diukur dengan besaran sejenis sebagai pembanding yang diketahui
- Contoh :
  - Pengukuran berat dengan Timbangan,
  - Pengukuran Tegangan listrik dengan Potensiometer
  - Pengukuran resistansi resistor dengan rangkaian jembatan **Wheatstone**
  - dsb



20

## Metoda Dalam Mengukur

### Diagram pengukuran dengan metoda NOL



21

# Metoda Dalam Mengukur

## Metoda DEFLEKSI dan NOL

### • Metoda DEFLEKSI

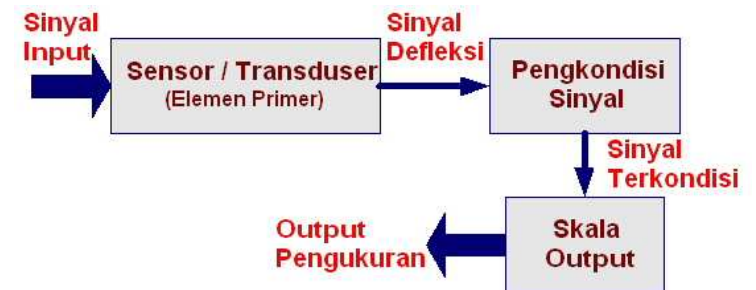
- Pengukuran dimana secara langsung men-transformasikan besaran yang diukur menjadi nilai pengukuran
- Contoh :
  - Pengukuran tekanan dengan tabung **BOURDON**
  - Pengukuran besaran listrik spt Tegangan dan Arus dengan menggunakan Multimeter analog
  - dsb



22

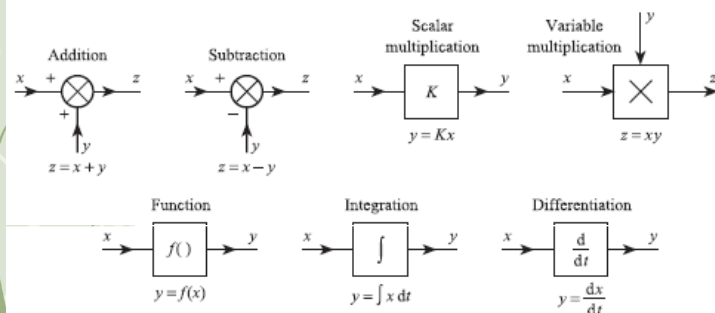
## Metoda Defleksi

### Diagram pengukuran dengan metoda DEFLEKSI



23

## Blok Diagram



24

## Konversi Satuan

|                | <b>MKS</b>                     | <b>CGS</b>              | <b>British</b>                                 |
|----------------|--------------------------------|-------------------------|--|
| <b>Panjang</b> | meter (m)                      | 100 cm                  | 3,28 ft  |
| <b>Massa</b>   | kilogram (kg)                  | 1000 gram               | 2,2 lbm  |
| <b>Gaya</b>    | newton                         | $10^5$ dyne             | 2,2 lbf  |
| <b>Tekanan</b> | newton/m <sup>2</sup> (Pascal) | 10 dyne/cm <sup>2</sup> | $1,4 \times 10^{-3}$ lbf/in <sup>2</sup> (psi) |
| <b>Suhu</b>    | ° Celcius (° C)                | ° Celcius (°C)          | $(5/9^\circ\text{C} + 32) ^\circ\text{F}$      |

## Satuan Dalam Pengukuran

- Satuan '**International System (SI)**' atau '**metric**'
  - Panjang : [meter (m)]
  - Berat : [kilogram (kg)]
  - Waktu : [second (sec)] atau [detik (dt)]
- Satuan '**British**' menggunakan satuan
  - Panjang : [feet (ft)] atau [inch (in)]
  - Berat : [pounds (lb)]
  - Waktu : [second (sec)] atau [detik (dt)]

26

## Examples of SI derived units expressed in terms of base units

| Quantity                               | SI unit                  |                    |
|--|--------------------------|--------------------|
|  | Name                     | Symbol             |
| area                                   | square metre             | m <sup>2</sup>     |
| volume                                 | cubic metre              | m <sup>3</sup>     |
| speed, velocity                        | metre per second         | m/s                |
| acceleration                           | metre per second squared | m/s <sup>2</sup>   |
| wave number                            | 1 per metre              | m <sup>-1</sup>    |
| density, mass density                  | kilogram per cubic metre | kg/m <sup>3</sup>  |
| specific volume                        | cubic metre per kilogram | m <sup>3</sup> /kg |
| current density                        | ampere per square metre  | A/m <sup>2</sup>   |
| magnetic field strength                | ampere per metre         | A/m                |
| concentration (of amount of substance) | mole per cubic metre     | mol/m <sup>3</sup> |
| luminance                              | candela per square metre | cd/m <sup>2</sup>  |

27

## SI derived units with special names

| Quantity  | SI unit        |                    |                                    |  |
|---|----------------|--------------------|------------------------------------|--|
|   | Name           | Symbol             | Expression in terms of other units | Expression <sup>a</sup> in terms of SI base units                                |
| plane angle <sup>b</sup>                                      | radian         | rad                |                                    | $\text{m} \cdot \text{m}^{-1} = 1$   |
| solid angle <sup>b</sup>                                      | steradian      | sr                 |                                    | $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = 1$   |
| frequency   | hertz          | Hz                 |                                    | $\text{s}^{-1}$  |
| force   | newton         | N                  |                                    | $\text{m kg s}^{-2}$   |
| pressure, stress  | pascal         | Pa                 | $\text{N/m}^2$                     | $\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}$   |
| energy, work quantity of heat                                 | joule          | J                  | $\text{N m}$                       | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$  |
| power, radiant flux   | watt           | W                  | $\text{J/s}$                       | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-3}$  |
| electric charge, quantity of electricity                      | coulomb        | C                  |                                    | $\text{s A}$   |
| electric potential, potential difference, electromotive force | volt           | V                  | $\text{W/A}$                       | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$                                      |
| capacitance   | farad          | F                  | $\text{C/V}$                       | $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$                             |
| electric resistance   | ohm            | $\Omega$           | $\text{V/A}$                       | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-3} \text{A}^{-2}$                                      |
| electric conductance  | siemens        | S                  | $\text{A/V}$                       | $\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$                             |
| magnetic flux   | weber          | Wb                 | $\text{V s}$                       | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$                                      |
| magnetic flux density   | tesla          | T                  | $\text{Wb/m}^2$                    | $\text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}$   |
| inductance  | henry          | H                  | $\text{Wb/A}$                      | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$                                      |
| Celsius temperature   | degree Celsius | $^{\circ}\text{C}$ |                                    | K  |
| luminous flux   | lumen          | lm                 | $\text{cd sr}$                     | $\text{cd} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = \text{cd}$                     |
| illuminance   | lux            | lx                 | $\text{lm/m}^2$                    | $\text{cd} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-4} = \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ |
| activity (of a radionuclide)                                  | becquerel      | Bq                 |                                    | $\text{s}^{-1}$  |
| absorbed dose, specific energy imparted, kerma                | gray           | Gy                 | $\text{J/kg}$                      | $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$   |
| dose equivalent   | sievert        | Sv                 | $\text{J/kg}$                      | $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$   |

28

## Bab 1 Konsep Dasar

| Quantity                                 | SI unit                   |                    |   |
|--|---------------------------|--------------------|---|
|  | Name                      | Symbol             | Expression in terms of SI base units                        |
| dynamic viscosity                        | pascal second             | Pa s               | $\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-1}$                            |
| moment of force                          | newton metre              | N m                | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$                               |
| surface tension                          | newton per metre          | N/m                | $\text{kg s}^{-2}$  |
| heat flux density, irradiance            | watt per square metre     | $\text{W/m}^2$     | $\text{kg s}^{-3}$  |
| heat capacity, entropy                   | joule per kelvin          | J/K                | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$                 |
| specific heat capacity, specific entropy | joule per kilogram kelvin | $\text{J/(kg K)}$  | $\text{m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$                    |
| specific energy                          | joule per kilogram        | $\text{J/kg}$      | $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$                                  |
| thermal conductivity                     | watt per metre kelvin     | $\text{W/(m K)}$   | $\text{m kg s}^{-3} \text{K}^{-1}$                          |
| energy density                           | joule per cubic metre     | $\text{J/m}^3$     | $\text{m}^{-1} \text{kg s}^{-2}$                            |
| electric field strength                  | volt per metre            | V/m                | $\text{m kg s}^{-3} \text{A}^{-1}$                          |
| electric charge density                  | coulomb per cubic metre   | $\text{C/m}^3$     | $\text{m}^{-3} \text{s A}$                                  |
| electric flux density                    | coulomb per square metre  | $\text{C/m}^2$     | $\text{m}^{-2} \text{s A}$                                  |
| permittivity                             | farad per metre           | F/m                | $\text{m}^{-3} \text{kg}^{-1} \text{s}^4 \text{A}^2$        |
| permeability                             | henry per metre           | H/m                | $\text{m kg s}^{-2} \text{A}^{-2}$                          |
| molar energy                             | joule per mole            | J/mol              | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{mol}^{-1}$               |
| molar entropy, molar heat capacity       | joule per mole kelvin     | $\text{J/(mol K)}$ | $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$ |
| exposure (X and $\gamma$ rays)           | coulomb per kilogram      | C/kg               | $\text{kg}^{-1} \text{s A}$                                 |
| absorbed dose rate                       | gray per second           | Gy/s               | $\text{m}^2 \text{s}^{-3}$                                  |

29

# ELEMEN SENSOR



30

## Bab 1 Konsep Dasar

# Elemen Sensor

## • Domain elemen sensor

- material
- energi

- **Material**
  - Silicon
  - Plastik
  - Metal
  - Keramik
  - Glass
  - Biological substance

## ■ Energi

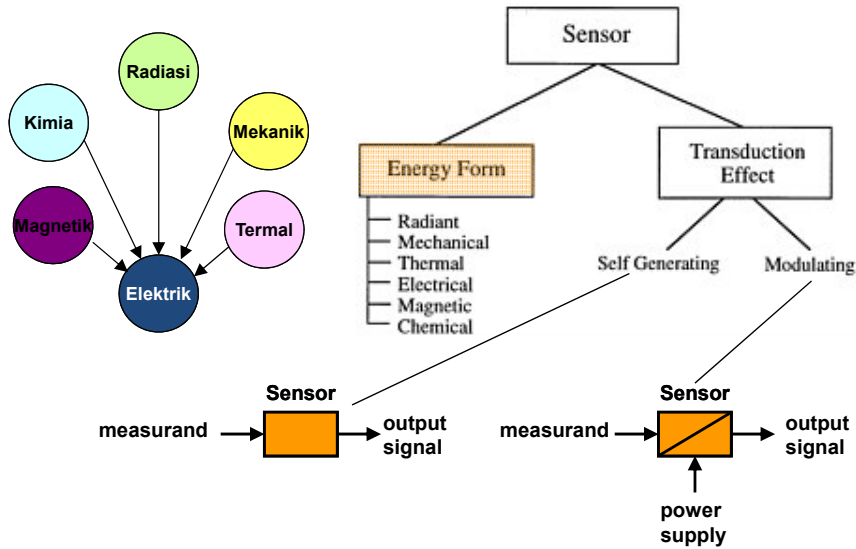
- ▶ Elektrik
- ▶ Magnetik
- ▶ Termal
- ▶ Akustik
- ▶ Optik

(lihat pembahasan prinsip transduksi)

31

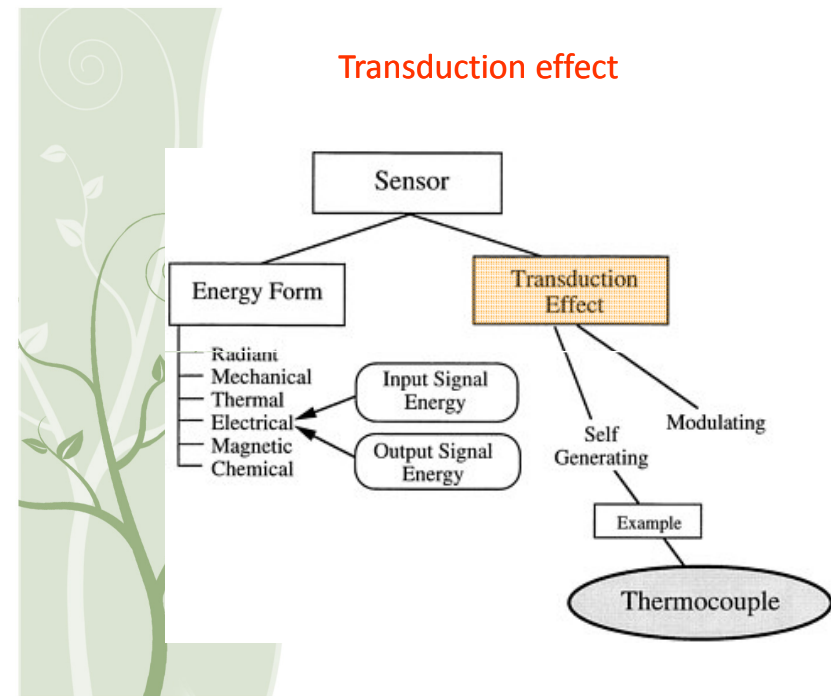


## Stimulus



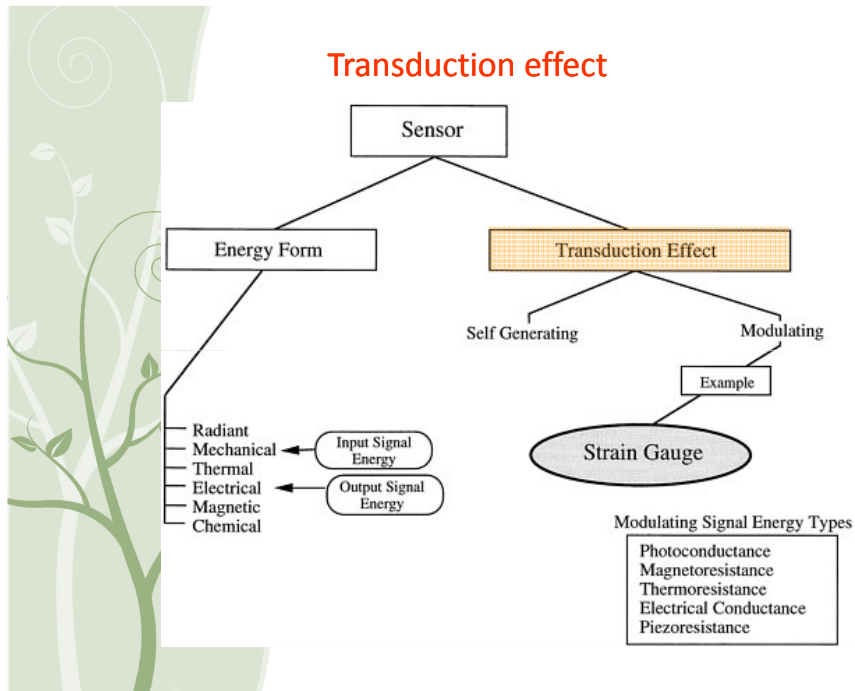
32

## Transduction effect



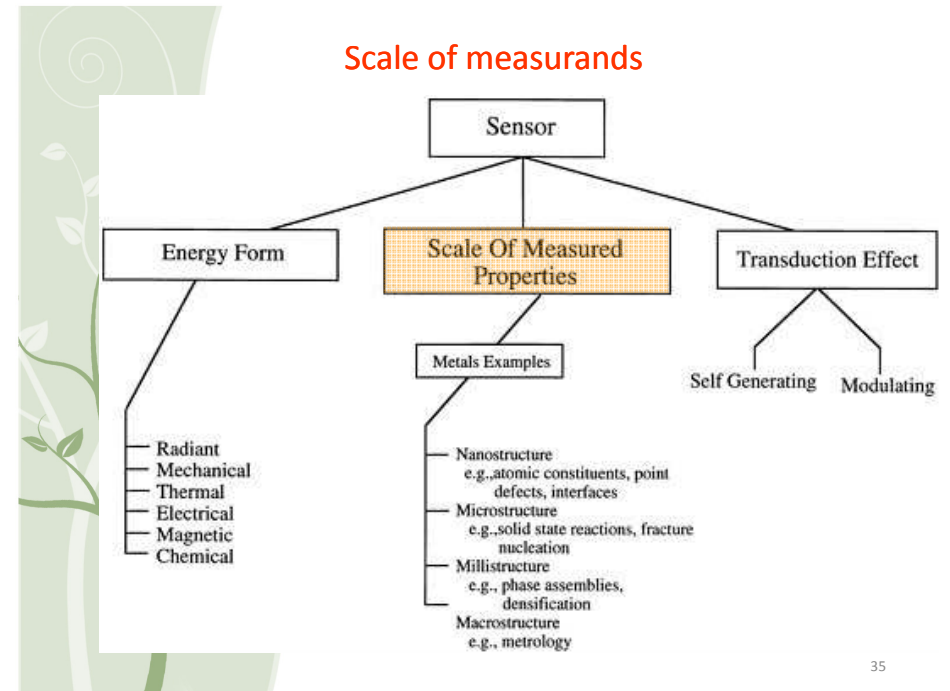
33

## Transduction effect



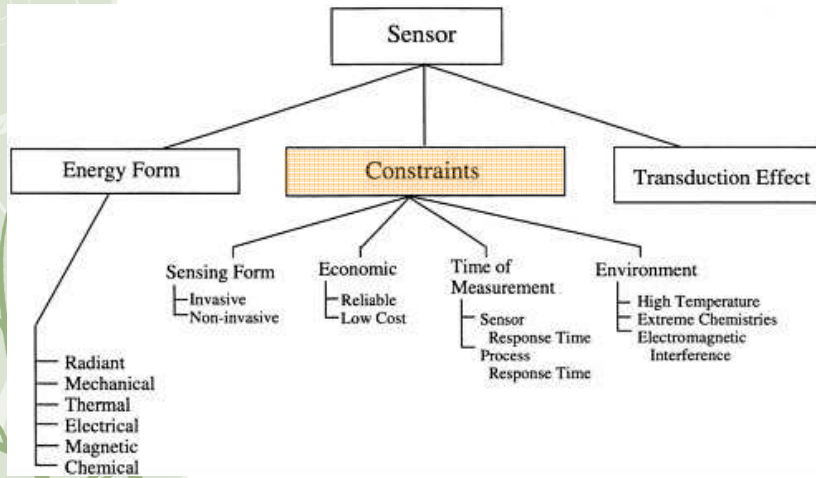
34

## Scale of measurands



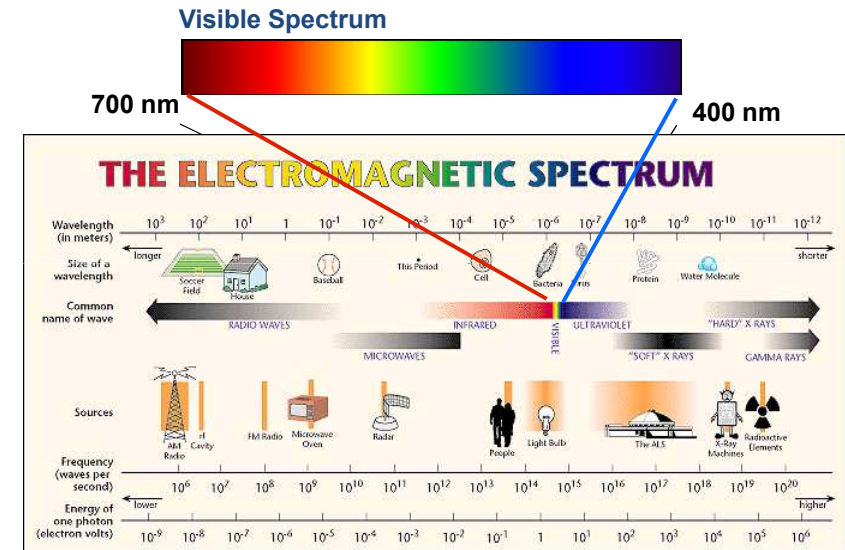
35

## Sensing constraints



36

## Radiant Sensors → Electromagnetic Spectrum



37

## Radiant Sensors → Electromagnetic Spectrum

### Light Sensors

- Photodiodes
- Phototransistor
- Photoresistors
- Cooled Detectors
- Thermal Detectors
  - Goly Cells
  - Thermopile Sensors
  - Pyroelectric Sensors
  - Bolometers
  - Active Far-Infrared Sensors
  - Gas Flame Detectors



### Radiation Sensors

- Scintillating Detectors
- Ionization Detectors
  - Ionization Chambers
  - Proportional Chambers
  - Geiger-Müller Counters
  - Semiconductor Detectors



38

## Mechanical Sensors

### Occupancy and Motion Detectors

- Ultrasonic Sensors
- Microwave Motion Detectors
- Capacitive Occupancy Detectors
- Triboelectric Detectors
- Optoelectronic Motion Detectors
  - Visible and Near-Infrared Light Motion Detectors & Far-IR Motion Detectors

### Position, Displacement, and Level

- Potentiometric Sensors
- Gravitational Sensors
- Capacitive Sensors
- Inductive and Magnetic Sensors
  - LVDT and RVDT
  - Eddy Current Sensors & Transverse Inductive Sensor
  - Hall Effect Sensors & Magnetoresistive Sensors
- Optical Sensors
  - Optical Bridge & Proximity Detector with Polarized Light
  - Fiber-Optic Sensors & Fabry-Perot Sensors
  - Grating Sensors & Linear Optical Sensors (PSD)
- Ultrasonic Sensors
- Radar Sensors : Micropower Impulse Radar & Ground-Penetrating Radar
- Thickness and Level Sensors : Ablation & Thin-Film & Liquid-Level Sensors

39

## Mechanical Sensors

### Velocity and Acceleration

- Capacitive Accelerometers
- Piezoresistive Accelerometers
- Piezoelectric Accelerometers
- Thermal Accelerometers
  - Heated-Plate Accelerometer
  - Heated-Gas Accelerometer
- Gyroscopes
  - Rotor Gyroscope
  - Monolithic Silicon Gyroscopes
  - Optical Gyroscopes

### Force, Strain, and Tactile Sensors

- Strain Gauges
- Tactile Sensors .
- Piezoelectric Force Sensors

### Pressure Sensors

- Mercury Pressure Sensor
- Piezoresistive Sensors
- Capacitive Sensors .
- VRP Sensors
- Optoelectronic Sensors
- Vacuum Sensors
  - Pirani Gauge
  - Ionization Gauges
  - Gas Drag Gauge

40

## Mechanical Sensors

### Flow Sensors

- Thermal Transport Sensors
- Ultrasonic Sensors
- Electromagnetic Sensors
- Microflow Sensors
- Breeze Sensor
- Coriolis Mass Flow Sensors
- Drag Force Flow Sensors

### Acoustic Sensors

- Resistive Microphones
- Condenser Microphones
- Fiber-Optic Microphone
- Piezoelectric Microphones
- Electret Microphones
- Solid-State Acoustic Detectors

41

## Temperature Sensors

- Thermoresistive Sensors
  - Resistance Temperature
  - Silicon Resistive Sensors
- Thermistors
  - NTC Thermistors
  - Self-Heating Effect in NTC Thermistors
  - PTC Thermistors
- Thermoelectric Contact Sensors
- Semiconductor P-N Junction Sensors
- Optical Temperature Sensors
  - Fluoroptic Sensors
  - Interferometric Sensors
  - Thermochromic Solution Sensor
- Acoustic Temperature Sensor
- Piezoelectric Temperature Sensors

42

## Magnetic Sensors

### Direct Sensors

- Metal-Oxide Chemical Sensors
- ChemFET
- Electrochemical Sensors
- Potentiometric Sensors
- Conductometric Sensors
- Amperometric Sensors
- Enhanced Catalytic Gas Sensors
- Elastomer Chemiresistors

### Complex Sensors

- Thermal Sensors
- Pellister Catalytic Sensors
- Optical Chemical Sensors
- Mass Detector
- Biochemical Sensors
- Enzyme Sensors

### Humidity and Moisture Sensors

- Capacitive Sensors
- Electrical Conductivity Sensors
- Thermal Conductivity Sensor
- Optical Hygrometer
- Oscillating Hygrometer

43

# Chemical Sensors

## Direct Sensors

- Metal-Oxide Chemical Sensors
- ChemFET
- Electrochemical Sensors
- Potentiometric Sensors
- Conductometric Sensors
- Amperometric Sensors
- Enhanced Catalytic Gas Sensors
- Elastomer Chemiresistors

## Complex Sensors

- Thermal Sensors
- Pellister Catalytic Sensors
- Optical Chemical Sensors
- Mass Detector
- Biochemical Sensors
- Enzyme Sensors

## Humidity and Moisture Sensors

- Capacitive Sensors
- Electrical Conductivity Sensors
- Thermal Conductivity Sensor
- Optical Hygrometer
- Oscillating Hygrometer