

Bab 1

Sensor dan Transduser

Tujuan Pembelajaran Umum

Setelah mempelajari bab ini diharapkan mahasiswa memahami pengertian sensor dan transduser dan penggunaannya dalam sistem kendali.

Tujuan Pembelajaran Khusus

Setelah mempelajari topik per topik dalam bab ini, mahasiswa diharapkan :

- Dapat menyebutkan definisi dan perbedaan dari sensor, transduser dan alat ukur
- Mampu menyebutkan persyaratan umum dalam memilih sensor dan transduser
- Dapat menerangkan beberapa jenis sensor dan transduser yang ada di industri
- Mengerti tentang klasifikasi sensor dan transduser secara umum.

Pendahuluan

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi dari masa ke masa berkembang cepat terutama dibidang otomasi industri. Perkembangan ini tampak jelas di industri pemabrikan, dimana sebelumnya banyak pekerjaan menggunakan tangan manusia, kemudian beralih menggunakan mesin, berikutnya dengan *electro-mechanic* (semi otomatis) dan sekarang sudah menggunakan *robotic* (*full automatic*) seperti penggunaan *Flexible Manufacturing Systems (FMS)* dan *Computerized Integrated Manufacture (CIM)* dan sebagainya.

Model apapun yang digunakan dalam sistem otomasi pemabrikan sangat tergantung kepada keandalan sistem kendali yang dipakai. Hasil penelitian menunjukkan secanggih apapun sistem kendali yang dipakai akan sangat tergantung kepada sensor maupun transduser yang digunakan..

Sensor dan transduser merupakan peralatan atau komponen yang mempunyai peranan penting dalam sebuah sistem pengaturan otomatis. Ketepatan dan kesesuaian dalam memilih sebuah **sensor** akan sangat menentukan kinerja dari sistem pengaturan secara otomatis.

Besaran masukan pada kebanyakan sistem kendali adalah bukan besaran listrik, seperti besaran fisika, kimia, mekanis dan sebagainya. Untuk memakaikan besaran

listrik pada sistem pengukuran, atau sistem manipulasi atau sistem pengontrolan, maka biasanya besaran yang bukan listrik diubah terlebih dahulu menjadi suatu sinyal listrik melalui sebuah alat yang disebut **transducer**

Sebelum lebih jauh kita mempelajari sensor dan transduser ada sebuah alat lagi yang selalu melengkapi dan mengiringi keberadaan sensor dan transduser dalam sebuah sistem pengukuran, atau sistem manipulasi, maupun sistem pengontrolan yaitu yang disebut alat ukur.

1.1. Definisi-definisi

D Sharon, dkk (1982), mengatakan **sensor** adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi gejala-gejala atau sinyal-sinyal yang berasal dari perubahan suatu energi seperti energi listrik, energi fisika, energi kimia, energi biologi, energi mekanik dan sebagainya..

Contoh; Camera sebagai sensor penglihatan, telinga sebagai sensor pendengaran, kulit sebagai sensor peraba, LDR (*light dependent resistance*) sebagai sensor cahaya, dan lainnya.

William D.C, (1993), mengatakan **transduser** adalah sebuah alat yang bila digerakan oleh suatu energi di dalam sebuah sistem transmisi, akan menyalurkan energi tersebut dalam bentuk yang sama atau dalam bentuk yang berlainan ke sistem transmisi berikutnya". Transmisi energi ini bisa berupa listrik, mekanik, kimia, optic (radiasi) atau thermal (panas).

Contoh; **generator** adalah transduser yang merubah energi mekanik menjadi energi listrik, **motor** adalah transduser yang merubah energi listrik menjadi **energi mekanik**, dan sebagainya.

William D.C, (1993), mengatakan **alat ukur** adalah sesuatu alat yang berfungsi memberikan batasan nilai atau harga tertentu dari gejala-gejala atau sinyal yang berasal dari perubahan suatu energi.

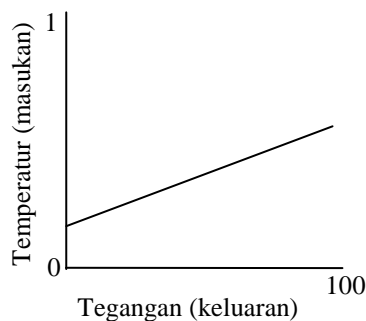
Contoh: voltmeter, ampermeter untuk sinyal listrik; tachometer, speedometer untuk kecepatan gerak mekanik, lux-meter untuk intensitas cahaya, dan sebagainya.

1.2. Peryaratan Umum Sensor dan Transduser

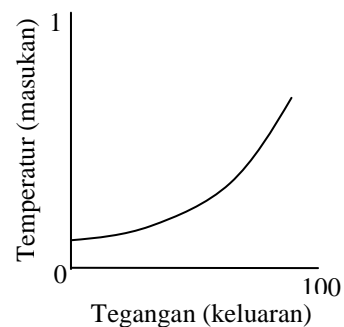
Dalam memilih peralatan sensor dan transduser yang tepat dan sesuai dengan sistem yang akan disensor maka perlu diperhatikan persyaratan umum sensor berikut ini : (D Sharon, dkk, 1982)

a. Linearitas

Ada banyak sensor yang menghasilkan sinyal keluaran yang berubah secara kontinyu sebagai tanggapan terhadap masukan yang berubah secara kontinyu. Sebagai contoh, sebuah sensor panas dapat menghasilkan tegangan sesuai dengan panas yang dirasakannya. Dalam kasus seperti ini, biasanya dapat diketahui secara tepat bagaimana perubahan keluaran dibandingkan dengan masukannya berupa sebuah grafik. Gambar 1.1 memperlihatkan hubungan dari dua buah sensor panas yang berbeda. Garis lurus pada gambar 1.1(a). memperlihatkan tanggapan linier, sedangkan pada gambar 1.1(b). adalah tanggapan non-linier.



(a) Tangapan linier



(b) Tangapan non linier

Gambar 1.1. Keluaran dari transduser panas (D Sharon dkk, 1982),

b. Sensitivitas

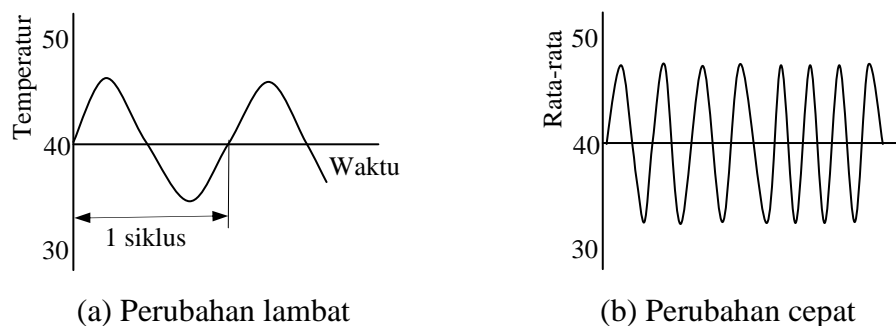
Sensitivitas akan menunjukkan seberapa jauh kepekaan sensor terhadap kuantitas yang diukur. Sensitivitas sering juga dinyatakan dengan bilangan yang menunjukkan “perubahan keluaran dibandingkan unit perubahan masukan”. Beberapa sensor panas dapat memiliki kepekaan yang dinyatakan dengan “satu volt per derajat”, yang berarti perubahan satu derajat pada masukan akan menghasilkan perubahan satu volt pada keluarannya. Sensor panas lainnya dapat saja memiliki kepekaan “dua volt per derajat”, yang berarti

memiliki kepekaan dua kali dari sensor yang pertama. Linieritas sensor juga mempengaruhi sensitivitas dari sensor. Apabila tanggapannya linier, maka sensitivitasnya juga akan sama untuk jangkauan pengukuran keseluruhan. Sensor dengan tanggapan pada gambar 1.1(b) akan lebih peka pada temperatur yang tinggi dari pada temperatur yang rendah.

c. Tanggapan Waktu

Tanggapan waktu pada sensor menunjukkan **seberapa cepat tanggapannya terhadap perubahan masukan**. Sebagai contoh, instrumen dengan tanggapan frekuensi yang jelek adalah sebuah **termometer merkuri**. Masukannya adalah temperatur dan keluarannya adalah posisi merkuri. Misalkan perubahan temperatur terjadi sedikit demi sedikit dan kontinyu terhadap waktu, seperti tampak pada gambar 1.2(a).

Frekuensi adalah jumlah siklus dalam satu detik dan diberikan dalam satuan hertz (Hz). { 1 hertz berarti 1 siklus per detik, 1 kilohertz berarti 1000 siklus per detik}. Pada frekuensi rendah, yaitu pada saat temperatur berubah secara lambat, termometer akan mengikuti perubahan tersebut dengan “setia”. Tetapi apabila perubahan temperatur sangat cepat lihat gambar 1.2(b) maka tidak diharapkan akan melihat perubahan besar pada termometer merkuri, karena ia bersifat lamban dan hanya akan menunjukkan temperatur rata-rata.



Gambar 1.2 Temperatur berubah secara kontinyu (D. Sharon, dkk, 1982)

Ada bermacam cara untuk menyatakan tanggapan frekuensi sebuah sensor. Misalnya “satu milivolt pada 500 hertz”. Tanggapan frekuensi dapat pula dinyatakan dengan “*decibel (db)*”, yaitu untuk membandingkan daya keluaran pada frekuensi tertentu dengan daya keluaran pada frekuensi referensi.

Yayan I.B, (1998), mengatakan ketentuan lain yang perlu diperhatikan dalam memilih sensor yang tepat adalah dengan mengajukan beberapa pertanyaan berikut ini:

- a. Apakah **ukuran fisik sensor** cukup memenuhi untuk dipasang pada tempat yang diperlukan?
- b. Apakah ia cukup **akurat?**
- c. Apakah ia bekerja pada **jangkauan** yang sesuai?
- d. Apakah ia akan mempengaruhi kuantitas yang sedang diukur?.

Sebagai contoh, bila sebuah sensor panas yang besar dicelupkan kedalam jumlah air yang kecil, malah menimbulkan efek memanaskan air tersebut, bukan menyensornya.

- e. Apakah ia **tidak mudah rusak** dalam pemakaiannya?.
- f. Apakah ia dapat menyesuaikan diri dengan lingkungannya?
- g. Apakah biayanya terlalu mahal?

1.3. Jenis Sensor dan Transduser

Perkembangan sensor dan transduser sangat cepat sesuai kemajuan teknologi otomasi, semakin kompleks suatu sistem otomasi dibangun maka semakin banyak jenis sensor yang digunakan.

Robotik adalah sebagai contoh penerapan sistem otomasi yang kompleks, disini sensor yang digunakan dapat dikategorikan menjadi dua jenis sensor yaitu: (D Sharon, dkk, 1982)

- a. **Internal sensor**, yaitu sensor yang dipasang di dalam bodi robot.

Sensor internal diperlukan untuk mengamati posisi, kecepatan, dan akselerasi berbagai sambungan mekanik pada robot, dan merupakan bagian dari mekanisme servo.

- b. **External sensor**, yaitu sensor yang dipasang diluar bodi robot.

Sensor eksternal diperlukan karena dua macam alasan yaitu:

- 1) Untuk keamanan dan
- 2) Untuk penuntun.

Yang dimaksud untuk keamanan” adalah termasuk keamanan robot, yaitu perlindungan terhadap robot dari kerusakan yang ditimbulkannya sendiri, serta

keamanan untuk peralatan, komponen, dan orang-orang dilingkungan dimana robot tersebut digunakan. Berikut ini adalah dua contoh sederhana untuk mengilustrasikan kasus diatas.

Contoh pertama: andaikan sebuah robot bergerak keposisinya yang baru dan ia menemui suatu halangan, yang dapat berupa mesin lain misalnya. Apabila robot tidak memiliki sensor yang mampu mendeteksi halangan tersebut, baik sebelum atau setelah terjadi kontak, maka akibatnya akan terjadi kerusakan.

Contoh kedua: sensor untuk keamanan diilustrasikan dengan problem robot dalam mengambil sebuah telur. Apabila pada robot dipasang pencengkram mekanik (*gripper*), maka sensor harus dapat mengukur seberapa besar tenaga yang tepat untuk mengambil telur tersebut. Tenaga yang terlalu besar akan menyebabkan pecahnya telur, sedangkan apabila terlalu kecil telur akan jatuh terlepas.

Kini bagaimana dengan sensor untuk penuntun atau pemandu?. Katogori ini sangatlah luas, tetapi contoh berikut akan memberikan pertimbangan.

Contoh pertama: komponen yang terletak diatas ban berjalan tiba di depan robot yang diprogram untuk menyemprotnya. Apa yang akan terjadi bila sebuah komponen hilang atau dalam posisi yang salah?. Robot tentunya harus memiliki sensor yang dapat mendeteksi ada tidaknya komponen, karena bila tidak ia akan menyemprot tempat yang kosong. Meskipun tidak terjadi kerusakan, tetapi hal ini bukanlah sesuatu yang diharapkan terjadi pada suatu pabrik.

Contoh kedua: sensor untuk penuntun diharapkan cukup canggih dalam **pengelasan.** Untuk melakukan operasi dengan baik, robot haruslah menggerakkan tangkai las sepanjang garis las yang telah ditentukan, dan juga bergerak dengan kecepatan yang tetap serta mempertahankan suatu jarak tertentu dengan permukaannya.

Sesuai dengan fungsi sensor sebagai pendeteksi sinyal dan meng-informasikan sinyal tersebut ke sistem berikutnya, maka peranan dan fungsi sensor akan dilanjutkan oleh transduser. Karena keterkaitan antara sensor dan transduser begitu erat maka pemilihan transduser yang tepat dan sesuai juga perlu diperhatikan.

1.4. Klasifikasi Sensor

Secara umum berdasarkan fungsi dan penggunaannya sensor dapat dikelompokkan menjadi 3 bagian yaitu:

- a. sensor thermal (panas)
- b. sensor mekanis
- c. sensor optik (cahaya)

Sensor **thermal** adalah sensor yang digunakan untuk mendeteksi gejala perubahan panas/temperature/suhu pada suatu dimensi benda atau dimensi ruang tertentu.

Contohnya; **bimetal**, *termistor*, *termokopel*, *RTD*, *photo transistor*, *photo dioda*, *photo multiplier*, *photovoltaik*, *infrared pyrometer*, *hygrometer*, dsb.

Sensor **mekanis** adalah sensor yang mendeteksi perubahan gerak mekanis, seperti perpindahan atau pergeseran atau **posisi**, gerak lurus dan melingkar, tekanan, aliran, level dsb.

Contoh; *strain gage*, *linear variable deferential transformer (LVDT)*, *proximity*, *potensiometer*, *load cell*, *bourdon tube*, dsb.

Sensor **optic** atau cahaya adalah sensor yang mendeteksi perubahan cahaya dari sumber cahaya, pantulan cahaya ataupun bias cahaya yang mengenai benda atau ruangan.

Contoh; *photo cell*, *photo transistor*, *photo diode*, *photo voltaic*, *photo multiplier*, *pyrometer optic*, dsb.

1.5. Klasifikasi Transduser (William D.C, 1993)

- a. **Self generating transduser** (transduser pembangkit sendiri)

Self generating transduser adalah transduser yang hanya memerlukan satu sumber energi.

Contoh: *piezo electric*, *termocouple*, *photovoltaic*, *termistor*, dsb.

Ciri transduser ini adalah dihasilkannya suatu energi listrik dari transduser secara langsung. Dalam hal ini **transduser berperan sebagai sumber tegangan.**

- b. **External power transduser** (transduser daya dari luar)

External power transduser adalah **transduser yang memerlukan sejumlah energi dari luar untuk menghasilkan suatu keluaran.**

Contoh: RTD (*resistance thermal detector*), Starin gauge, LVDT (*linier variable differential transformer*), Potensiometer, NTC, dsb.

Tabel berikut menyajikan prinsip kerja serta pemakaian transduser berdasarkan sifat kelistrikannya.

Tabel 1. Kelompok Transduser

| Parameter listrik dan kelas transduser | Prinsip kerja dan sifat alat | Pemakaian alat |
|---|---|---|
| Transduser Pasif | | |
| Potensiometer | Perubahan nilai tahanan karena posisi kontak bergeser | Tekanan, pergeseran/posisi |
| Strain gage | Perubahan nilai tahanan akibat perubahan panjang kawat oleh tekanan dari luar | Gaya, torsi, posisi |
| Transformator selisih (LVDT) | Tegangan selisih dua kumparan primer akibat pergeseran inti trafo | Tekanan, gaya, pergeseran |
| Gage arus pusing | Perubahan induktansi kumparan akibat perubahan jarak plat | Pergeseran, ketebalan |
| Transduser Aktif | | |
| Sel fotoemisif | Emisi elektron akibat radiasi yang masuk pada permukaan fotoemisif | Cahaya dan radiasi |
| Photomultiplier | Emisi elektron sekunder akibat radiasi yang masuk ke katoda sensitif cahaya | Cahaya, radiasi dan relay sensitif cahaya |
| Termokopel | Pembangkitan ggl pada titik sambung dua logam yang berbeda akibat dipanasi | Temperatur, aliran panas, radiasi |
| Generator kumparan putar (tachogenerator) | Perputaran sebuah kumparan di dalam medan magnet yang membangkitkan tegangan | Kecepatan, getaran |
| Piezoelektrik | Pembangkitan ggl bahan kristal piezo akibat gaya dari luar | Suara, getaran, percepatan, tekanan |
| Sel foto tegangan | Terbangkitnya tegangan pada sel foto akibat rangsangan energi dari luar | Cahaya matahari |
| Termometer tahanan (RTD) | Perubahan nilai tahanan kawat akibat perubahan temperatur | Temperatur, panas |
| Hygrometer tahanan | Tahanan sebuah strip konduktif berubah terhadap kandungan uap air | Kelembaban relatif |
| Termistor (NTC) | Penurunan nilai tahanan logam akibat kenaikan temperatur | Temperatur |

| | | |
|-----------------------|---|--------------------------------------|
| Mikropon kapasitor | Tekanan suara mengubah nilai kapasitansi dua buah plat | Suara, musik,derau |
| Pengukuran reluktansi | Reluktansi rangkaian magnetik diubah dengan mengubah posisi inti besi sebuah kumparan | Tekanan, pergeseran, getaran, posisi |

Sumber: William D.C, (1993)

Contoh Soal :

1. Apa saja peranan dan fungsi sensor dalam sistem kendali industri ?
2. Sebutkan syarat-syarat dalam memilih sensor yang baik ?
3. Sebutkan beberapa jenis sensor yang ada pada sebuah robotik ?

Jawaban :

1. Sensor berperan untuk mendeteksi gejala perubahan informasi sinyal dalam sistem kontrol, dan berfungsi sebagai umpan balik pada sebuah sistem kendali otomatis.
2. Syarat sebuah sensor adalah linearitas, sensitivitas dan respon time
3. Jenis sensor pada robotik adalah: internal sensor dan eksternal sensor

Latihan :

1. Apa yang dimaksud dengan sensor, transduser dan alat ukur
2. Jelaskan perbedaan ketiganya.
3. Persyaratan umum sensor dan transduser adalah linearitas, sensitivitas dan tanggapan respon. Jelaskan maksud dari masing-masing syarat tersebut.
4. Jelaskan perbedaan antara transduser aktif dan transduser pasif.

Rangkuman :

Bab 1 ini menjelaskan tentang; definisi-definisi, persyaratan, jenis-jenis dan klasifikasi sensor dan transduser.

Review :

1. Jelaskan dengan gambar yang dimaksud dengan tanggapan linear dan non linear ?
2. Adakah ketentuan lain yang harus diketahui dalam memilih sensor dan transduser
3. Apa fungsi dan kegunaan *external sensor* pada sebuah robot ?
4. Sebutkan beberapa buah transduser aktif dan transduser pasif yang anda ketahui ?

Bab 2

Sensor Thermal

Tujuan Pembelajaran Umum

Setelah mempelajari bab ini mahasiswa diharapkan memiliki pengetahuan tentang sensor thermal yang banyak digunakan pada sistem pengontrolan di industri

Tujuan Pembelajaran Khusus

Setelah mempelajari topik per topik pada bab ini mahasiswa diharapkan :

1. Mengerti peranan dan fungsi sensor thermal dalam sistem pengaturan otomasi
2. Mengerti tentang bimetal sebagai sensor thermal

3. Mengerti tentang termistor sebagai sensor thermal
4. Mengerti tentang RTD sebagai sensor thermal
5. Mengerti tentang Termokopel sebagai sensor thermal
6. Mengerti tentang Dioda (IC Hybrid) sebagai sensor thermal
7. Mengerti tentang *Infrared Pyrometer* sebagai sensor thermal

Pendahuluan

AC. Srivastava, (1987), mengatakan temperatur merupakan salah satu dari empat besaran dasar yang diakui oleh Sistem Pengukuran Internasional (*The International Measuring System*). Lord Kelvin pada tahun 1848 mengusulkan skala temperature termodinamika pada suatu titik tetap *triple point*, dimana fase padat, cair dan uap berada bersama dalam equilibrium, angka ini adalah 273,16 °K (derajat Kelvin) yang juga merupakan titik es. Skala lain adalah Celcius, Fahrenheit dan Rankine dengan hubungan sebagai berikut:

$$^{\circ}\text{F} = 9/5 ^{\circ}\text{C} + 32 \text{ atau}$$

$$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F}-32) \text{ atau}$$

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,69$$

Yayan I.B, (1998), mengatakan temperatur adalah kondisi penting dari suatu substrat. Sedangkan “panas adalah salah satu bentuk energi yang diasosiasikan dengan aktifitas molekul-molekul dari suatu substrat”. Partikel dari suatu substrat diasumsikan selalu bergerak. Pergerakan partikel inilah yang kemudian dirasakan sebagai panas. Sedangkan temperatur adalah ukuran perbandingan dari panas tersebut.

Pergerakan partikel substrat dapat terjadi pada tiga dimensi benda yaitu:

1. Benda padat,
2. Benda cair dan
3. Benda gas (udara)

Aliran kalor substrat pada dimensi padat, cair dan gas dapat terjadi secara :

1. **Konduksi**, yaitu pengaliran panas melalui benda padat (penghantar) secara kontak langsung
2. **Konveksi**, yaitu pengaliran panas melalui media cair secara kontak langsung
3. **Radiasi**, yaitu pengaliran panas melalui media udara/gas secara kontak tidak langsung

Pada aplikasi pendeteksian atau pengukuran tertentu, dapat dipilih salah satu tipe sensor dengan pertimbangan :

1. Penampilan (*Performance*)
2. Keandalan (*Reliable*) dan
3. Faktor ekonomis (*Economic*)

Pemilihan Jenis Sensor Suhu

Hal-hal yang perlu diperhatikan sehubungan dengan pemilihan jenis sensor suhu adalah: (Yayan I.B, 1998)

1. Level suhu maksimum dan minimum dari suatu substrat yang diukur.
2. Jangkauan (*range*) maksimum pengukuran
3. Konduktivitas kalor dari substrat
4. Respon waktu perubahan suhu dari substrat
5. Linieritas sensor
6. Jangkauan temperatur kerja

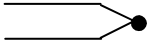

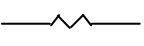


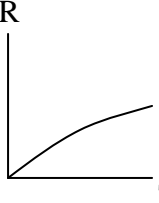

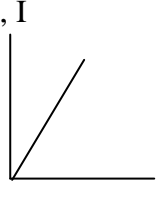
Selain dari ketentuan diatas, perlu juga diperhatikan aspek fisik dan kimia dari sensor seperti ketahanan terhadap **korosi** (karat), **ketahanan terhadap guncangan**, **pengkabelan (instalasi)**, **keamanan** dan lain-lain.

Tempertur Kerja Sensor

Setiap sensor suhu memiliki temperatur kerja yang berbeda, untuk pengukuran suhu disekitar kamar yaitu antara **-35°C sampai 150°C**, dapat dipilih sensor **NTC, PTC**, transistor, dioda dan IC hibrid. Untuk suhu menengah yaitu antara 150°C sampai 700°C, dapat dipilih **thermocouple dan RTD**. Untuk suhu yang lebih tinggi sampai 1500°C, tidak memungkinkan lagi dipergunakan sensor-sensor kontak langsung, maka teknis pengukurannya dilakukan menggunakan **cara radiasi**. Untuk pengukuran suhu pada daerah sangat dingin dibawah $65^{\circ}\text{K} = -208^{\circ}\text{C}$ ($0^{\circ}\text{C} = 273,16^{\circ}\text{K}$) dapat digunakan **resistor karbon** biasa karena pada suhu ini karbon berlaku seperti semikonduktor. Untuk suhu antara 65°K sampai -35°C dapat digunakan **kristal silikon** dengan kemurnian tinggi sebagai sensor.

Gambar 2.1. berikut memperlihatkan karakteristik dari beberapa jenis sensor suhu yang ada.

| | | | | |
|--|--------------|-----|------------|-----------|
| | Thermocouple | RTD | Thermistor | IC Sensor |
|--|--------------|-----|------------|-----------|

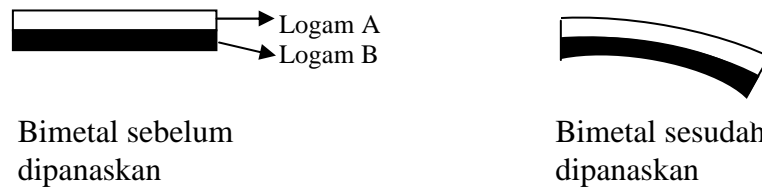
| | | | | |
|---------------|---|--|---|---|
| |  |  |  |  |
| |  |  |  |  |
| Advantages | <ul style="list-style-type: none"> - self powered - simple - rugged - inexpensive - wide variety - wide temperature range | <ul style="list-style-type: none"> - most stable - most accurate - more linear than thermocouple | <ul style="list-style-type: none"> - high output - fast - two-wire ohms measurement | <ul style="list-style-type: none"> - most linear - highest output - inexpensive |
| Disadvantages | <ul style="list-style-type: none"> - non linear - low voltage - reference required - least stable - least sensitive | <ul style="list-style-type: none"> - expensive - power supply required - small ΔR - low absolute resistance - self heating | <ul style="list-style-type: none"> - non linear - limited temperature range - fragile - power supply required - self heating | <ul style="list-style-type: none"> - $T < 200^\circ\text{C}$ - power supply required - slow - self heating - limited configuration |

Gambar 2.1. Karakteristik sensor temperature (Schuller, Mc.Name, 1986)

2.1. Bimetal

Bimetal adalah sensor temperatur yang sangat populer digunakan karena kesederhanaan yang dimilikinya. **Bimetal biasa dijumpai pada alat strika listrik dan lampu kelap-kelip (dimmer).** **Bimetal adalah sensor suhu yang terbuat dari dua buah lempengan logam yang berbeda koefisien muainya (α) yang direkatkan menjadi satu.**

Bila suatu logam dipanaskan maka akan terjadi pemuaian, besarnya pemuaian tergantung dari jenis logam dan tingginya temperatur kerja logam tersebut. Bila dua lempeng logam saling direkatkan dan dipanaskan, maka logam yang memiliki koefisien muai lebih tinggi akan memuai lebih panjang sedangkan yang memiliki koefisien muai lebih rendah memuai lebih pendek. Oleh karena perbedaan reaksi muai tersebut maka bimetal akan melengkung kearah logam yang muainya lebih rendah. Dalam aplikasinya bimetal dapat dibentuk menjadi saklar **Normally Closed (NC)** atau **Normally Open (NO)**.



Gambar 2.2. Kontruksi Bimetal (Yayan I.B, 1998)

Disini berlaku rumus pengukuran temperature **dwi-logam** yaitu :

$$\rho = \frac{t[3(1+m)^2 + (1+mm)(m^2 + 1/mn)]}{6(\alpha_A + \alpha_B)(T_2 - T_1)(1+m)^2} \quad (2.1)$$

dan dalam praktek $t_B/t_A = 1$ dan $(n+1).n = 2$, sehingga;

$$\rho = \frac{2t}{3(\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1)} \quad (2.2)$$

di mana ρ = radius kelengkungan

t = tebal jalur total

n = perbandingan modulus elastis, E_B/E_A

m = perbandingan tebal, t_B/t_A

$T_2 - T_1$ = kenaikan temperature

α_A, α_B = koefisien muai panas logam A dan logam B

2.2. Termistor

Termistor atau **tahanan thermal** adalah alat semikonduktor yang berkelakuan sebagai tahanan dengan koefisien tahanan temperatur yang tinggi, yang biasanya **negatif**. Umumnya tahanan termistor pada temperatur ruang dapat berkurang 6% untuk setiap **kenaikan temperatur sebesar 1°C**. **Kepekaan yang tinggi** terhadap perubahan temperatur ini membuat termistor sangat sesuai untuk pengukuran, pengontrolan dan kompensasi temperatur secara presisi.

Termistor terbuat dari campuran oksida-oksida logam yang diendapkan seperti: mangan (Mn), nikel (Ni), cobalt (Co), tembaga (Cu), besi (Fe) dan uranium (U). Rangkuman tahanannya adalah dari **0,5 Ω sampai 75 Ω** dan tersedia dalam berbagai bentuk dan ukuran. Ukuran paling kecil berbentuk mani-manik (*beads*) dengan diameter 0,15 mm sampai 1,25 mm, bentuk piringan (*disk*) atau cincin (*washer*) dengan ukuran

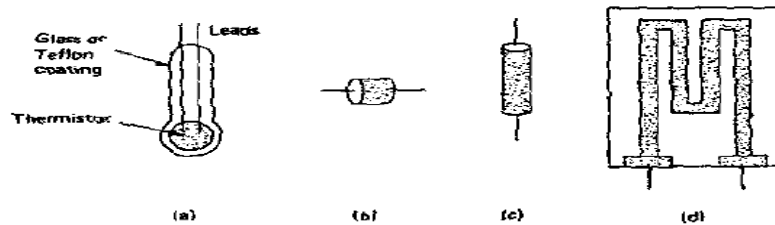
2,5 mm sampai 25 mm. Cincin-cincin dapat ditumpukan dan di tempatkan secara seri atau paralel guna memperbesar disipasi daya.

Dalam operasinya termistor memanfaatkan perubahan resistivitas terhadap temperatur, dan umumnya nilai tahanannya turun terhadap temperatur secara eksponensial untuk jenis NTC (*Negative Thermal Coeffisien*)

$$R_T = R_A e^{\beta/T} \quad (2.3)$$

Koefisien temperatur α didefinisikan pada temperature tertentu, misalnya 25°C sbb.:

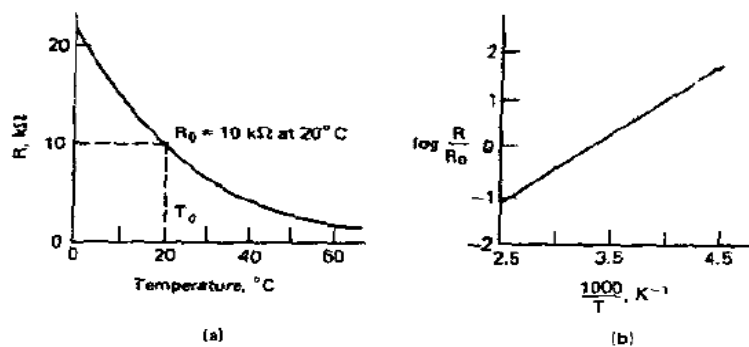
$$\alpha = \frac{\Delta R_T / R_T}{\Delta T} \quad (2.4)$$



Gambar 2.3 . Konfigurasi Thermistor: (a) coated-bead
(b) disk (c) dioda case dan (d) thin-film

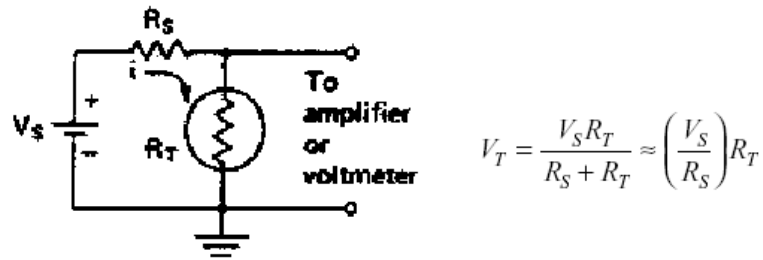
Teknik Kompensasi Termistor:

Karakteristik termistor berikut memperlihatkan hubungan antara temperatur dan resistansi seperti tampak pada gambar 2.4



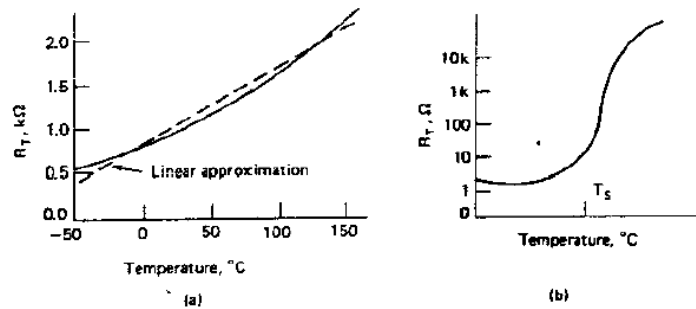
Gambar 2.4. Grafik Termistor resistansi vs temperatur:
(a) logaritmik (b) skala linier

Untuk pengontrolan perlu mengubah tahanan menjadi tegangan, berikut rangkaian dasar untuk mengubah resistansi menjadi tegangan.



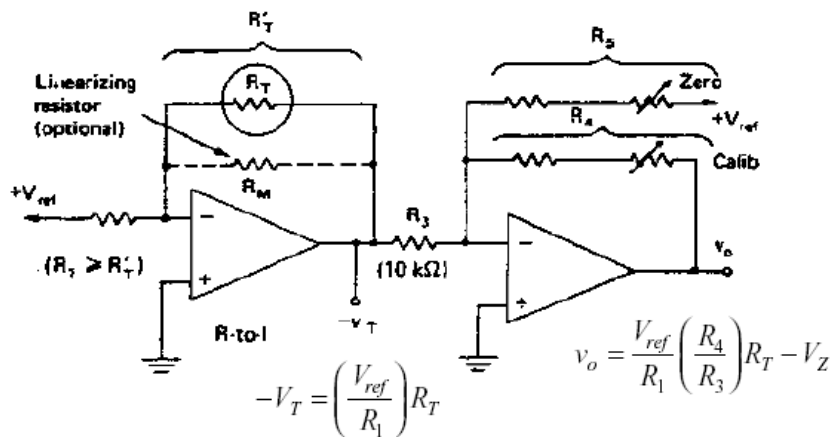
Gambar 2.5. Rangkaian uji termistor sebagai pembagi tegangan

Thermistor dengan koefisien positif (PTC, tidak baku)

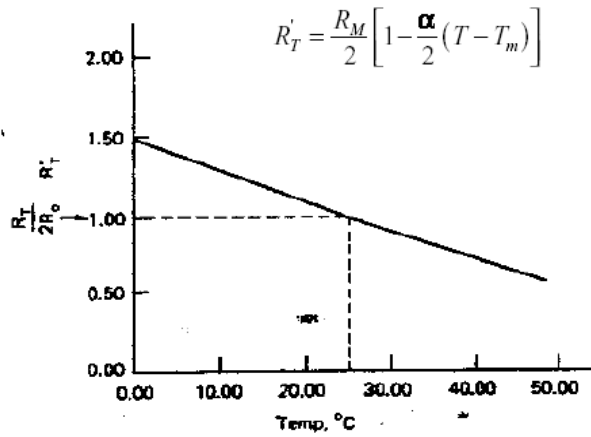
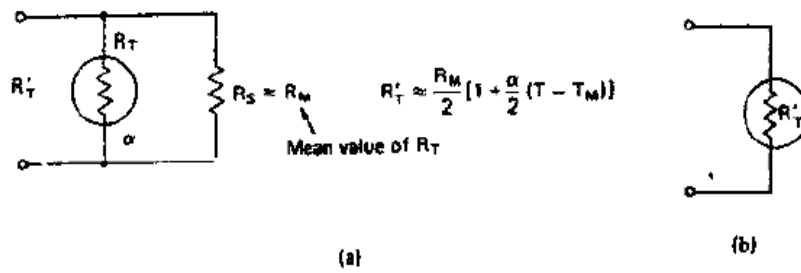


Gambar 2.6. Termistor jenis PTC: (a) linier (b) switching

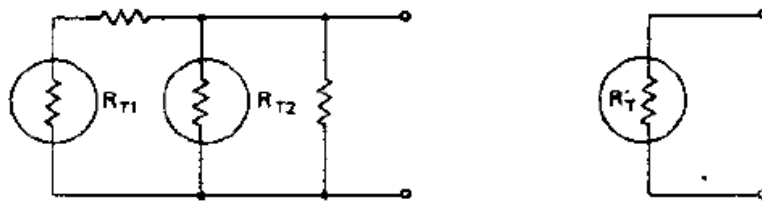
Cara lain untuk mengubah resistansi menjadi tegangan adalah dengan teknik linearisasi.



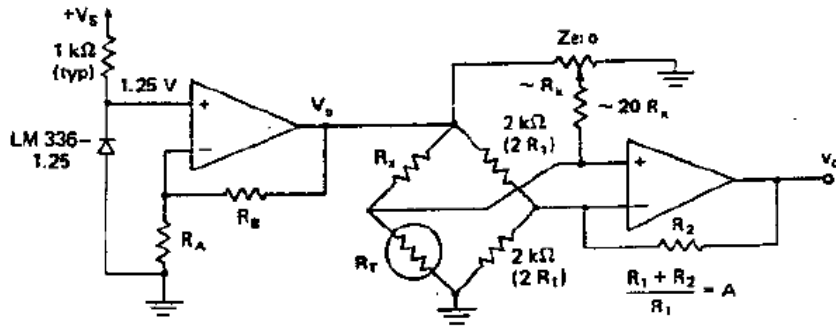
Daerah resistansi mendekati linier



Untuk teknik kompensasi temperatur menggunakan rangkaian penguat jembatan lebih baik digunakan untuk jenis sensor resistansi karena rangkaian jembatan dapat diatur titik kesetimbangannya.



*Gambar 2.7. Dua buah Termistor Linier:
(a) Rangkaian sebenarnya (b) Rangkaian Ekuivalen*



Gambar 2.8. Rangkaian penguat jembatan untuk resistansi sensor

Nilai tegangan outputnya adalah:

$$v_o \approx \frac{R_a + 2 R_b}{R_a} \frac{V_b}{4} \frac{\Delta R}{R_x}$$

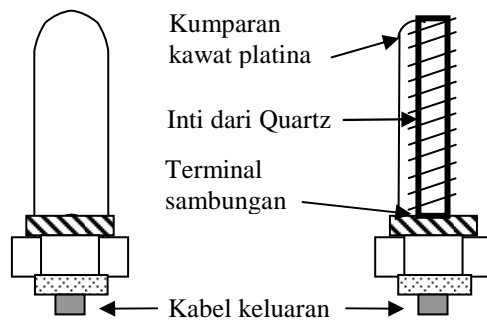
atau rumus lain untuk tegangan output

$$V_o = S_T \Delta T \quad S_T = A \frac{V_b}{4}$$

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad v_o = A \frac{V_b}{4} \left[\delta - \frac{\delta^2}{2} + \frac{\delta^3}{4} \right]$$

2.3. Resistance Thermal Detector (RTD)

RTD adalah salah satu dari beberapa jenis sensor suhu yang sering digunakan. RTD dibuat dari bahan kawat tahan korosi, kawat tersebut dililitkan pada bahan keramik isolator. Bahan tersebut antara lain; platina, emas, perak, nikel dan tembaga, dan yang terbaik adalah bahan platina karena dapat digunakan menyensor suhu sampai 1500° C. Tembaga dapat digunakan untuk sensor suhu yang lebih rendah dan lebih murah, tetapi tembaga mudah terserang korosi.



Gambar 2.9. Konstruksi RTD

RTD memiliki keunggulan dibanding termokopel yaitu:

1. Tidak diperlukan suhu referensi
2. Sensitivitasnya cukup tinggi, yaitu dapat dilakukan dengan cara mem-perpanjang kawat yang digunakan dan memperbesar tegangan eksitasi.
3. Tegangan output yang dihasilkan 500 kali lebih besar dari termokopel
4. Dapat digunakan kawat penghantar yang lebih panjang karena noise tidak jadi masalah
5. Tegangan keluaran yang tinggi, maka bagian elektronik pengolah sinyal menjadi sederhana dan murah.

Resistance Thermal Detector (RTD) perubahan tahanannya lebih linear terhadap temperatur uji tetapi koefisien lebih rendah dari thermistor dan model matematis linier adalah:

$$R_T = R_0(1 + \alpha\Delta t)$$

dimana : R_0 = tahanan konduktor pada temperature awal (biasanya 0°C)

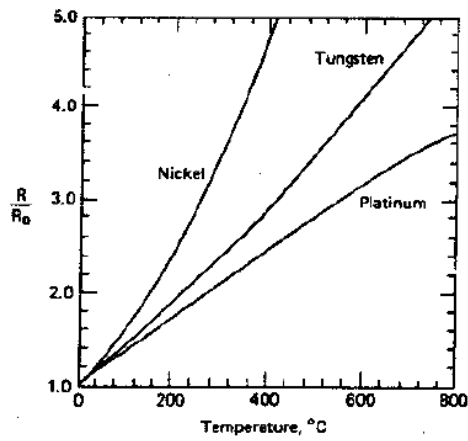
R_T = tahanan konduktor pada temperatur $t^\circ\text{C}$

α = koefisien temperatur tahanan

Δt = selisih antara temperatur kerja dengan temperatur awal

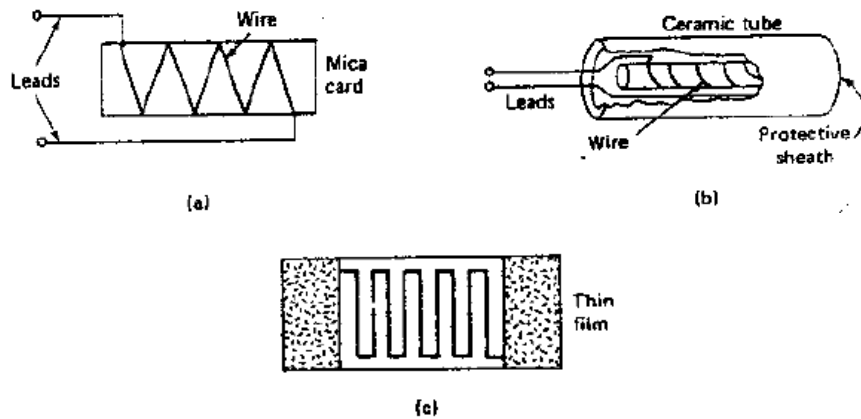
Sedangkan model matematis nonlinier kuadratik adalah:

$$R_T = R_0(1 + AT - BT^2)$$



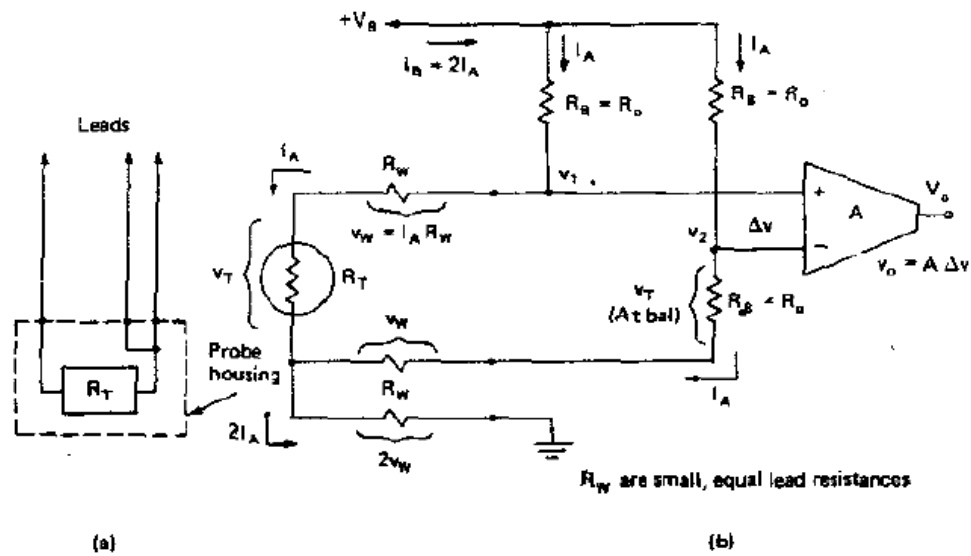
Gambar 2.10. Resistansi versus Temperatur untuk variasi RTD metal

Bentuk lain dari Konstruksi RTD



Gambar 2.11. Jenis RTD: (a) Wire (b) Ceramic Tube (c) Thin Film

Rangkaian Penguat untuk three-wire RTD

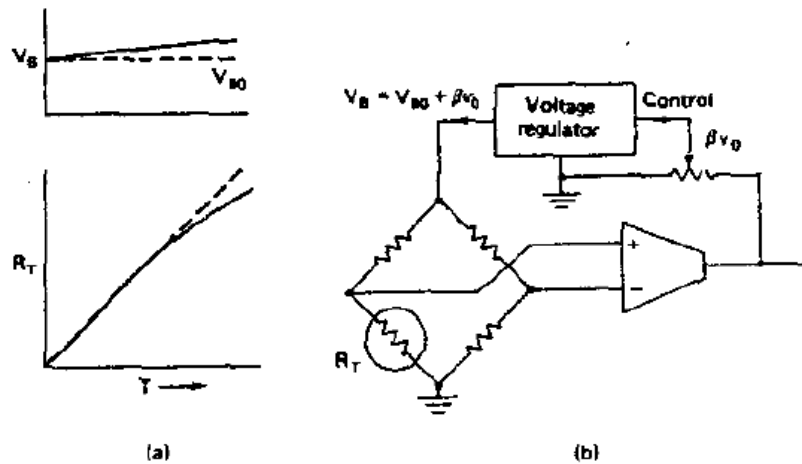


Gambar 2.12. (a) Three Wire RTD (b) Rangkaian Penguat

Ekspansi Daerah Linier

Ekspansi daerah linear dapat dilakukan dengan dua cara yaitu:

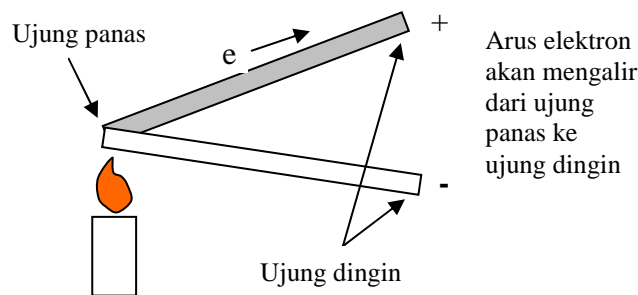
1. Menggunakan tegangan referensi untuk kompensasi nonlinieritas
2. Melakukan kompensasi dengan umpan balik positif



Gambar 2.13. Kompensasi non linier (a) Respon RTD non linier; (b) Blok diagram rangkaian koreksi

2.4. Termokopel

Pembuatan termokopel didasarkan atas sifat thermal bahan logam. Jika sebuah batang logam dipanaskan pada salah satu ujungnya maka pada ujung tersebut elektron-elektron dalam logam akan bergerak semakin aktif dan akan menempati ruang yang semakin luas, elektron-elektron saling desak dan bergerak ke arah ujung batang yang tidak dipanaskan. Dengan demikian pada ujung batang yang dipanaskan akan terjadi muatan positif.



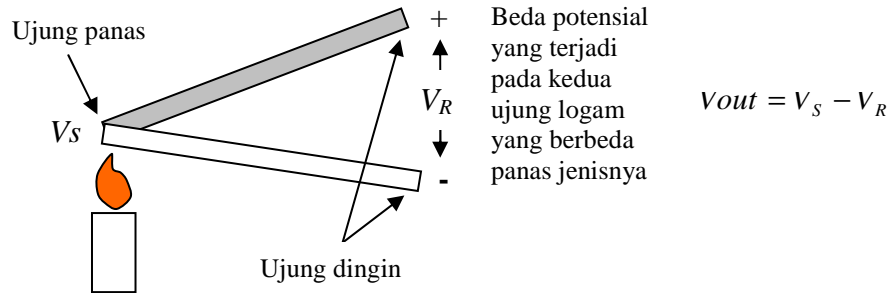
Gambar 2.14. Arah gerak electron jika logam dipanaskan

Kerapatan electron untuk setiap bahan logam berbeda tergantung dari jenis logam. Jika dua batang logam disatukan salah satu ujungnya, dan kemudian dipanaskan, maka elektron dari batang logam yang memiliki kepadatan tinggi akan bergerak ke batang yang kepadatan elektronnya rendah, dengan demikian terjadilah perbedaan tegangan diantara ujung kedua batang logam yang tidak disatukan atau dipanaskan. Besarnya termolistrik atau *gem* (gaya *electromagnet*) yang dihasilkan menurut T.J Seeback (1821) yang menemukan hubungan perbedaan panas (T_1 dan T_2) dengan gaya gerak listrik yang dihasilkan E , Peltir (1834), menemukan gejala panas yang mengalir dan panas yang diserap pada titik *hot-juction* dan *cold-juction*, dan Sir William Thomson, menemukan arah arus mengalir dari titik panas ke titik dingin dan sebaliknya, sehingga ketiganya menghasilkan rumus sbb:

$$E = \underbrace{C_1(T_1 - T_2)}_{\text{Efek Peltier}} + \underbrace{C_2(T_1^2 - T_2^2)}_{\text{Efek Thomson}} \quad (\dots)$$

$$\text{atau } E = 37,5(T_1 - T_2) - 0,045(T_1^2 - T_2^2) \quad (\dots)$$

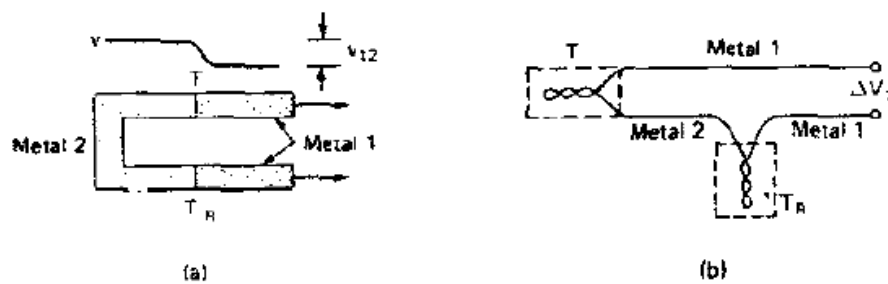
di mana 37,5 dan 0,045 merupakan dua konstanta C_1 dan C_2 untuk termokopel tembaga/konstanta.



Gambar 2.15. Beda potensial pada Termokopel

Bila ujung logam yang tidak dipanaskan dihubungkan singkat, perambatan panas dari ujung panas ke ujung dingin akan semakin cepat. Sebaliknya bila suatu termokopel diberi tegangan listrik DC, maka diujung sambungan terjadi panas atau menjadi dingin tergantung polaritas bahan (deret Volta) dan polaritas tegangan sumber. Dari prinsip ini memungkinkan membuat termokopel menjadi pendingin.

Thermocouple sebagai sensor temperatur memanfaatkan beda *workfunction* dua bahan metal

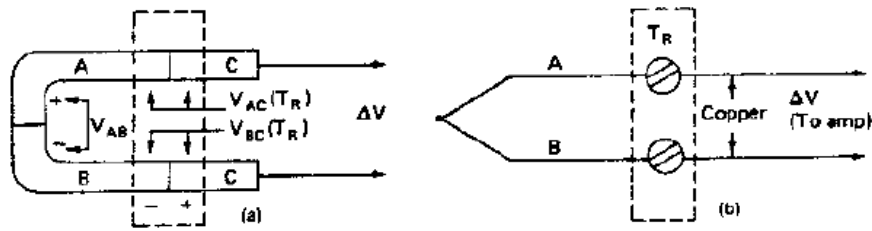


Gambar 2.16. Hubungan Termokopel (a) titik beda potensial
(b) daerah pengukuran dan titik referensi

Pengaruh sifat thermocouple pada *wiring*

$$\Delta V = V_{AB}(T) + V_{CA}(T_R) + V_{BC}(T_R)$$

$$\Delta V = V_{AB}(T) - V_{BA}(T_R)$$

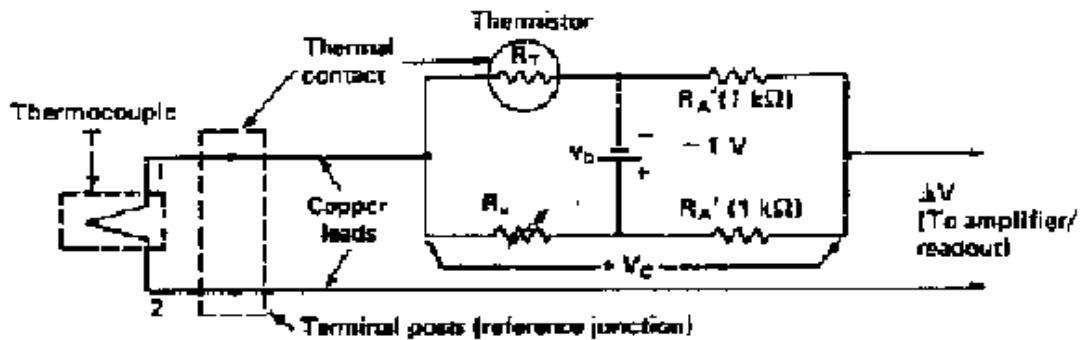


Gambar 2.17. Tegangan referensi pada titik sambungan:
 (a) Jumlah tegangan tiga buah metal (b) Blok titik sambungan

Sehingga diperoleh rumus perbedaan tegangan :

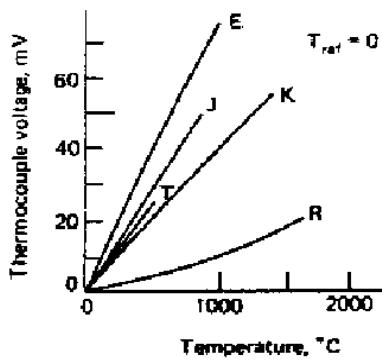
$$\Delta V = V_T^o - V_J^o$$

Rangkaian kompensasi untuk Thermocouple diperlihatkan oleh gambar 2.18



Gambar 2.18. Rangkaian penguat tegangan junction termokopel

Perilaku beberapa jenis thermocouple diperlihatkan oleh gambar 2.19



- tipe E (chromel-konstanta)
- tipe J (besi-konstanta)
- tipe T (tembaga-Konstanta)
- tipe K (chromel-alumel)
- tipe R atau S (platina-pt/rodium)

Gambar 2.19. Karakteristik beberapa tipe termokopel



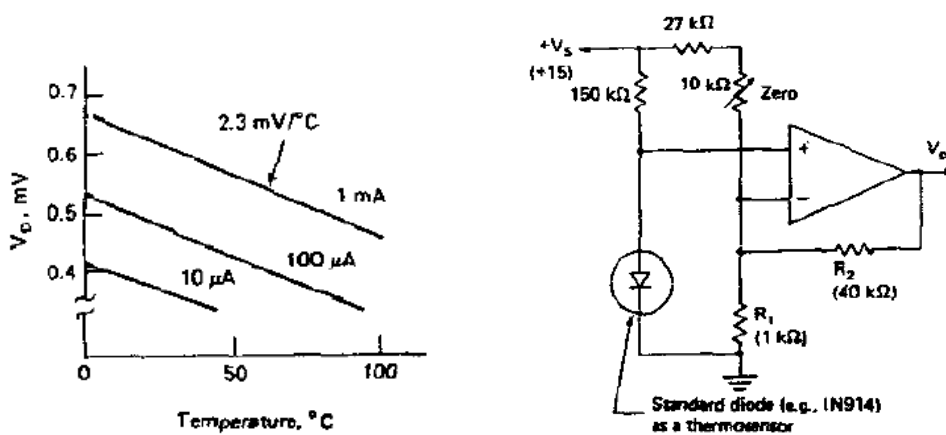
2.5. Dioda sebagai Sensor Temperatur

Dioda dapat pula digunakan sebagai sensor temperatur yaitu dengan memanfaatkan sifat tegangan *junction*

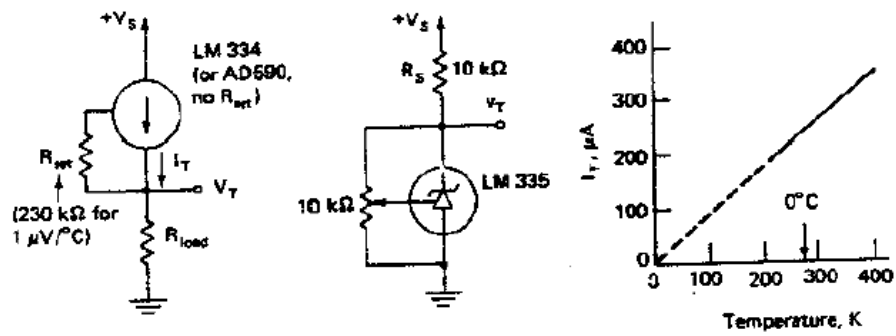
$$I_D = I_S \exp\left(\frac{V_D}{nV_T}\right)$$

Dimanfaatkan juga pada sensor temperatur rangkaian terintegrasi (memiliki rangkaian penguat dan kompensasi dalam chip yang sama).

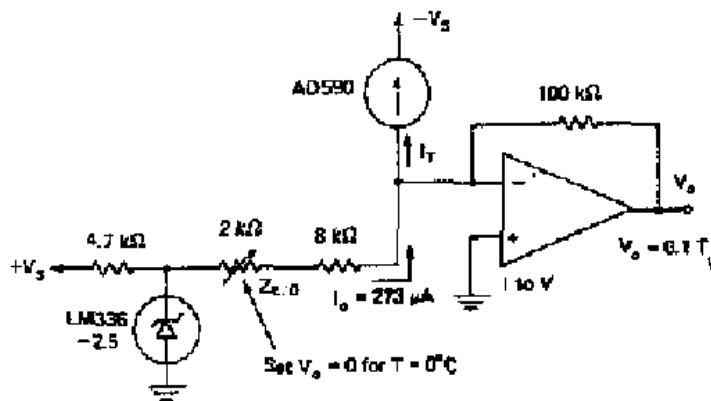
Contoh rangkaian dengan dioda sebagai sensor temperature



Contoh rangkaian dengan IC sensor



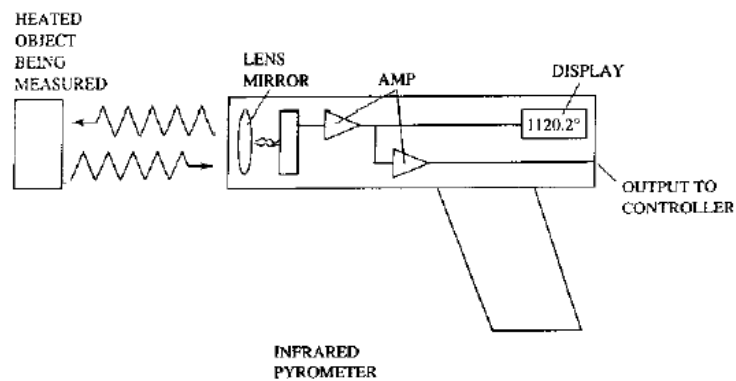
Rangkaian alternatif untuk mengubah arus menjadi tegangan pada IC sensor temperature



Gambar 2.20. Rangkaian peubah arus ke tegangan untuk IC termo sensor

2.6. Infrared Pyrometer

Sensor inframerah dapat pula digunakan untuk sensor temperatur



Gambar 2.21. Infrared Pyrometer sebagai sensor temperatur

Memfaatkan perubahan panas antara cahaya yang dipancarkan dengan diterima yang diterima pyrometer terhadap objek yang di deteksi.

Contoh Soal

1. Sebutkan beberapa macam jenis sensor thermal yang anda ketahui
2. Jelaskan cara kerja sensor bimetal dan contoh pemakaiannya.
3. Ada berapa jenis sensor termistor yang anda ketahui
4. Jelaskan cara operasi sensor termokopel dalam sistem pengukuran

Jawaban Soal

1. Jenis-jenis sensor thermal antara lain : bimetal, termistor, RTD, Termokopel, IC Hybrid, Infrared pyrometer.
2. Sensor bimetal terdiri dari dua lempengan logam yang berbeda panas jenisnya dan disatukan. Bimetal bekerja apabila didekatkan dengan sumber panas yang terkondisi, maka bimetal akan membengkok kearah bahan logam yang panas jenisnya lebih rendah.
3. Jenis termistor ada 3 macam antara lain : coated-bead, disk, dioda case dan thin-film
4. Termokopel terdiri dari dua buah logam yang berbeda panas jenisnya yang salah satu ujungnya disatukan. Bila ujung yang disatukan di panaskan maka sisi ujung lainnya akan menghasilkan tegangan yang dapat di ukur.

Latihan

1. Sebutkan ada berapa macam cara kalor subtract dapat mengalir dalam media padat, cair dan gas.
2. Sebutkan batas temperatur operasi kerja dari sensor thermal yang anda ketahui
3. Sebutkan keunggulan sensor suhu jenis RTD dari pada sensor termokopel.

Rangkuman

Pada bab 2 ini dipelajari tentang; definisi-definisi, persyaratan, jenis-jenis dan contoh sensor thermal yang banyak ditemui di industri, labor.

Review

1. Gambarkan konstruksi dari sensor bimetal, termokopel dan termistor
2. Kenapa sensor RTD lebih diunggulkan pemakaiannya dari pada sensor thermal jenis lainnya.
3. Untuk mendeteksi suhu kerja dibawah nol derajat, sensor jenis mana yang paling tepat digunakan.
4. Jelaskan cara kerja sensor infrared pyrometer

Bab 3

Sensor Mechanics

Tujuan Umum

Setelah mahasiswa mempelajari bab ini, diharapkan dapat memahami fungsi dan peranan sensor mekanik dalam teknik pengukuran dan pengontrolan sistem di dunia nyata dengan baik.

Tujuan Khusus

Setelah mempelajari topik demi topik dalam bab ini maka diharapkan mahasiswa dapat :

1. Mengerti tentang macam-macam dan fungsi dari **sensor posisi** dengan baik.
2. Mengerti tentang jenis, fungsi dan kegunaan dari **sensor kecepatan** dalam sistem kendali berumpan balik dengan baik
3. Mengerti jenis-jenis dan penerapan dari **sensor tekanan** dalam sistem pengaturan berumpan balik dengan baik
4. Mengerti macam, fungsi dan kegunaan dari **sensor aliran fluida** dengan baik
5. Mengerti tentang macam, fungsi dan penerapan **sensor level** dalam sistem otomasi industri dengan baik

Pendahuluan

Pergerakan mekanis adalah tindakan yang paling banyak dijumpai dalam kehidupan sehari-hari, seperti perpindahan suatu benda dari suatu posisi ke posisi lain, kecepatan mobil di jalan raya, dongkrak mobil yang dapat mengangkat mobil seberat 10 ton, debit air didalam pipa pesat, tinggi permukaan air dalam tanki.

Semua gerak mekanis tersebut pada intinya hanya terdiri dari tiga macam, yaitu **gerak lurus, gerak melingkar dan gerak memuntir**. Gerak mekanis disebabkan oleh adanya **gaya aksi yang dapat menimbulkan gaya reaksi**. Banyak cara dilakukan untuk mengetahui atau mengukur gerak mekanis misalnya **mengukur jarak atau posisi** dengan

meter, mengukur kecepatan dengan tachometer, mengukur debit air dengan rotameter dsb. Tetapi jika ditemui gerakan mekanis yang berada dalam suatu sistem yang kompleks maka diperlukan sebuah sensor untuk mendeteksi atau menginformasikan nilai yang akan diukur. Berikut akan dijabarkan beberapa jenis sensor mekanis yang sering dijumpai di dalam kehidupan sehari-hari.

3.1. Sensor Posisi

Pengukuran posisi dapat dilakukan dengan cara analog dan digital. Untuk pergeseran yang tidak terlalu jauh pengukuran dapat dilakukan menggunakan cara-cara analog, sedangkan untuk jarak pergeseran yang lebih panjang lebih baik digunakan cara digital.

Hasil sensor posisi atau perpindahan dapat digunakan untuk mengukur perpindahan linier atau angular. Teknis perlakuan sensor dapat dilakukan dengan cara terhubung langsung (kontak) dan tidak terhubung langsung (tanpa kontak).

3.1.1. Strain gauge (SG)

Strain gauge dapat dijadikan sebagai sensor posisi. SG dalam operasinya memanfaatkan perubahan resistansi sehingganya dapat digunakan untuk mengukur perpindahan yang sangat kecil akibat pembengkokan (*tensile stress*) atau peregangan (*tensile strain*). Definisi elastisitas (ϵ) strain gauge adalah perbandingan perubahan panjang (ΔL) terhadap panjang semula (L) yaitu:

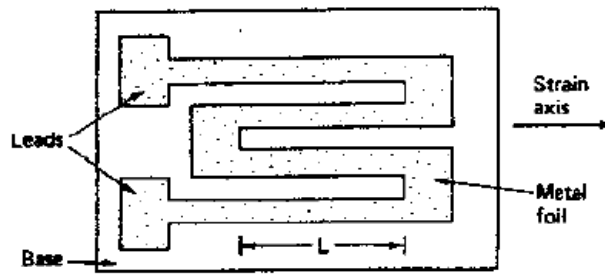
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

atau perbandingan perubahan resistansi (ΔR) terhadap resistansi semula (R) sama dengan faktor gage (G_f) dikali elastisitas strain gage (ϵ):

$$\frac{\Delta R}{R} = G_f \epsilon$$

Secara konstruksi SG terbuat dari bahan metal tipis (foil) yang diletakkan diatas kertas. Untuk proses pendeteksian SG ditempelkan dengan benda uji dengan dua cara yaitu:

1. Arah perapatan/peregangan dibuat sepanjang mungkin (axial)
2. Arah tegak lurus perapatan/peregangan dibuat sependek mungkin (lateral)



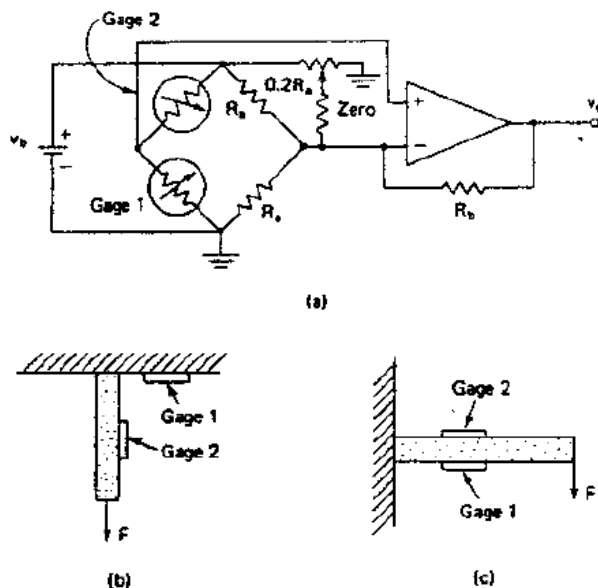
Gambar 3.1. Bentuk fisik strain gauge

Faktor gauge (G_f) merupakan tingkat elastisitas bahan metal dari SG.

- metal incompressible $G_f = 2$
- piezoresistif $G_f = 30$
- piezoresistif sensor digunakan pada IC sensor tekanan

Untuk melakukan sensor pada benda uji maka rangkaian dan penempatan SG adalah

- disusun dalam rangkaian jembatan
- dua strain gauge digunakan berdekatan, satu untuk peregangan/perapatan, satu untuk kompensasi temperatur pada posisi yang tidak terpengaruh peregangan/perapatan
- respons frekuensi ditentukan masa tempat strain gauge ditempatkan

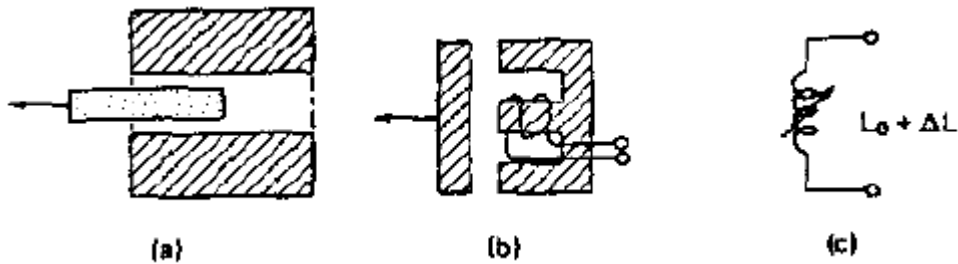


Gambar 3.2. Pemasangan strain gauge: (a) rangkaian jembatan (b) gage 1 dan gage 2 posisi 90 (c) gage 1 dan gage 2 posisi sejajar

3.1.2. Sensor Induktif dan Elektromagnet

Sensor induktif memanfaatkan perubahan induktansi

- sebagai akibat pergerakan inti feromagnetik dalam koil
- akibat bahan feromagnetik yang mendekat



Gambar 3.3. Sensor posisi: (a) Inti bergeser datar (b) Inti I bergser berputar, (c) Rangkaian variable induktansi

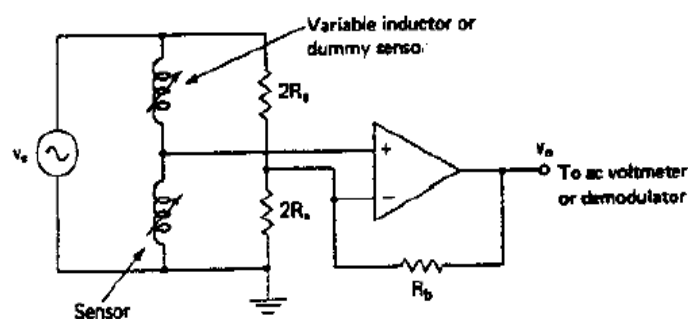
Rangkaian pembaca perubahan induktansi

- dua induktor disusun dalam rangkaian jembatan, satu sebagai *dummy*
- tegangan bias jembatan berupa sinyal ac
- perubahan induktansi dikonversikan secara linier menjadi perubahan tegangan

$$V_o = \frac{V_b R_b}{4 R_a} K_L x$$

K_L = sensitivitas induktansi terhadap posisi

- output tegangan ac diubah menjadi dc atau dibaca menggunakan detektor fasa

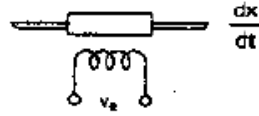


Gambar 3.4. Rangkaian uji sensor posisi induktif

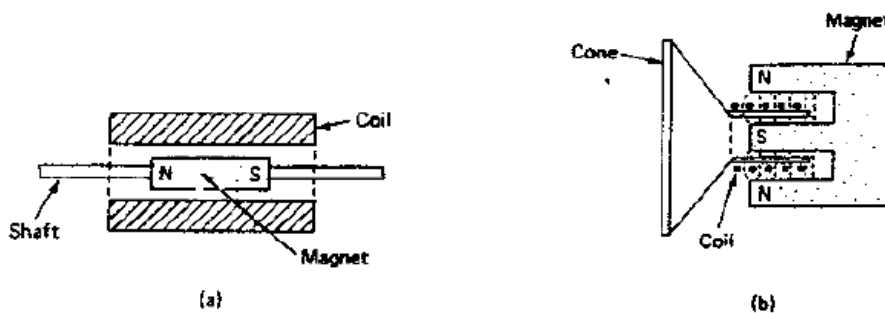
Sensor elektromagnetik memanfaatkan terbangkitkannya gaya emf oleh pada koil yang mengalami perubahan medan magnet

- output tegangan sebanding dengan kecepatan perubahan posisi koil terhadap sumber magnet

$$v_e = K_M \frac{dx}{dt}$$



- perubahan medan magnet diperoleh dengan pergerakan sumber medan magnet atau pergerakan koilnya (seperti pada mikrofon dan loudspeaker)



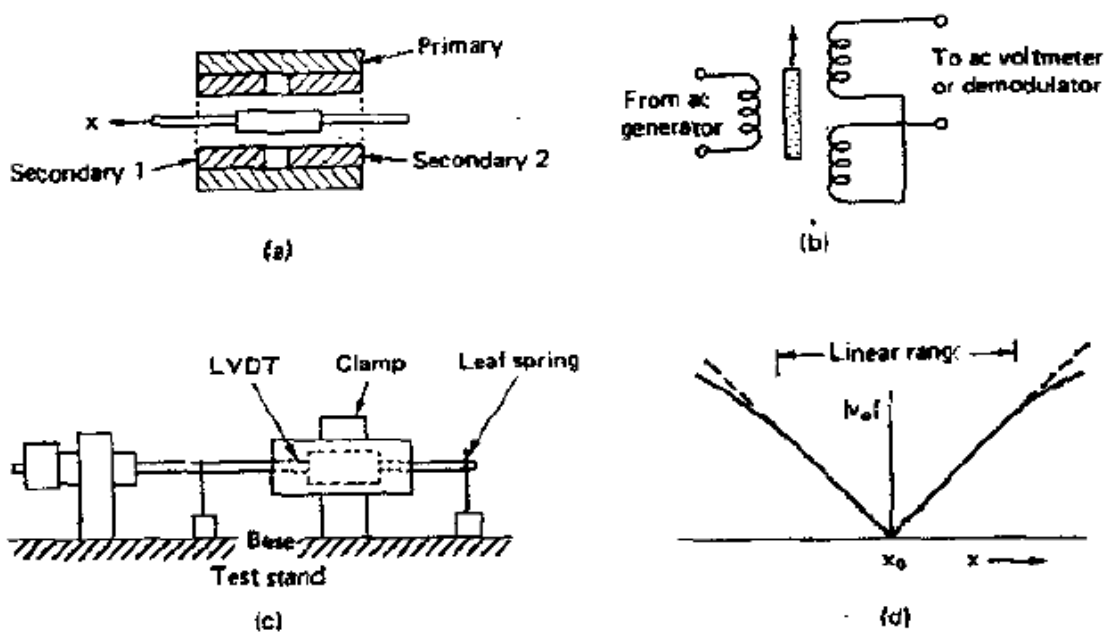
Gambar 3.5. Pemakaian sensor posisi: (a) pada microphone, (b) pada loudspeaker

3.1.3. Linier Variable Differential Transformer (LVDT)

- memanfaatkan perubahan induksi magnet dari kumparan primer ke dua kumparan sekunder
- dalam keadaan setimbang, inti magnet terletak ditengah dan kedua kumparan sekunder menerima fluks yang sama
- dalam keadaan tidak setimbang, fluks pada satu kumparan naik dan yang lainnya turun
- tegangan yang dihasilkan pada sekunder sebanding dengan perubahan posisi inti magnetic

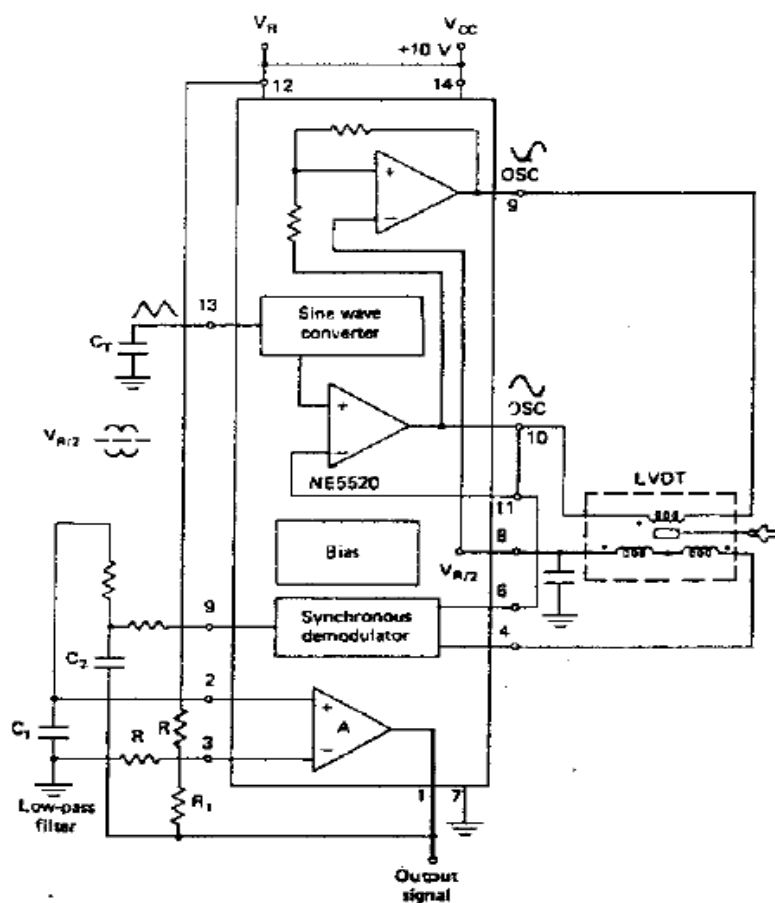
$$v_o = v_e K x$$

- hubungan linier bila inti masih disekitar posisi kesetimbangan



Gambar 3.6. LVDT sebagai sensor posisi: (a) konstruksi LVDT, (b) Rangkaian listrik, (c) rangkaian uji LVDT, (d) Karakteristik LVDT

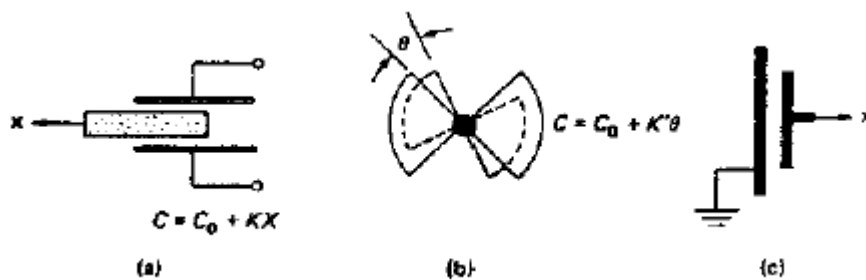
– rangkaian detektor sensitif fasa pembaca perpindahan dengan LVDT



Gambar 3.7. Rangkaian uji elektronik LVDT

3.1.4. Transduser Kapasitif

- memanfaatkan perubahan kapasitansi
 - akibat perubahan posisi bahan dielektrik diantara kedua keping
 - akibat pergeseran posisi salah satu keping dan luas keping yang berhadapan langsung
 - akibat penambahan jarak antara kedua keping



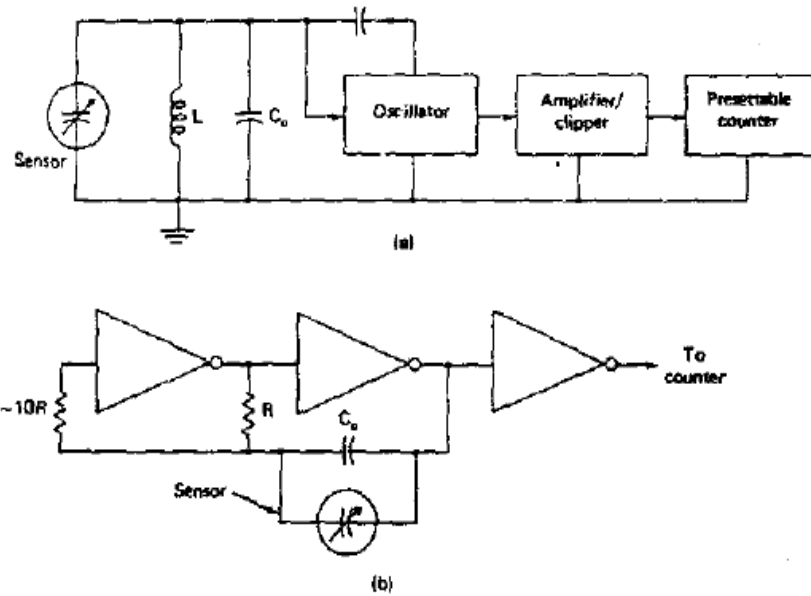
Gambar 3.8. Sensor posisi kapasitif: (a) pergeseran media mendatar, (b) pergeseran berputar, (c) pergeseran jarak plat

- nilai kapasitansi berbanding lurus dengan area dan berbanding terbalik dengan jarak

$$C = 0,0885 \frac{A}{d} k$$

- cukup sensitif tetapi linieritas buruk
- rangkaian jembatan seperti pada sensor induktif dapat digunakan dengan kapasitor dihubungkan paralel dengan resistansi (tinggi) untuk memberi jalur DC untuk input opamp
- alternatif kedua mengubah perubahan kapasitansi menjadi perubahan frekuensi osilator
 - frekuensi tengah 1 - 10 MHz
 - perubahan frekuensi untuk perubahan kapasitansi cukup kecil dibandingkan kapasitansi C_0

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{-\Delta C}{2C}$$

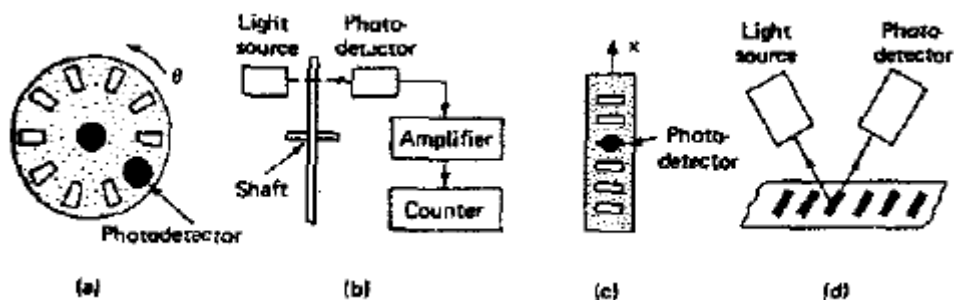


Gambar 3.9. Pemakaian sensor posisi pada rangkaian elektronik: (a) kapasitansi menjadi frekuensi, (b) kapasitansi menjadi pulsa

- Solusi rangkaian murah dengan osilator relaksasi dual inverter CMOS

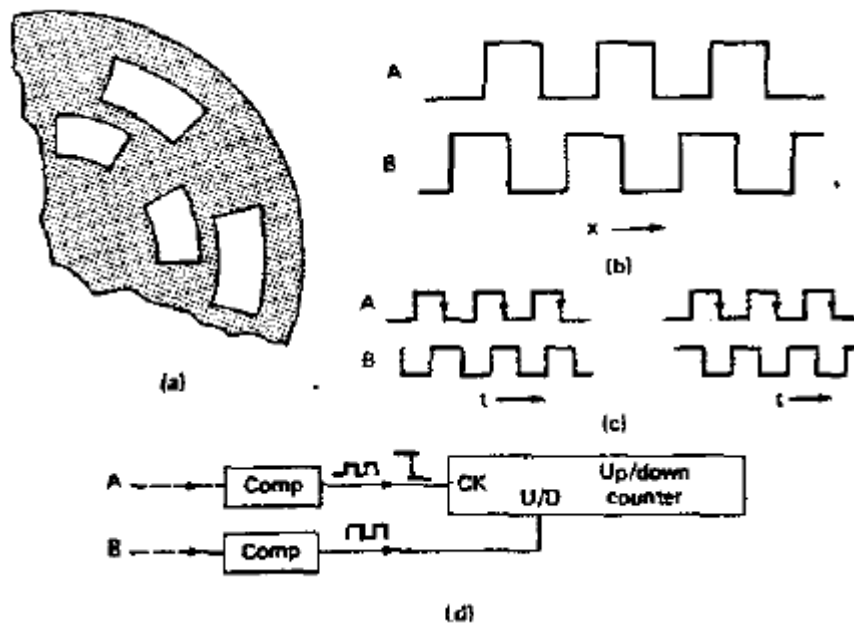
3.1.5. Transduser perpindahan digital optis

- mendeteksi posisi melalui kode oleh pemantul atau peluru transmisi cahaya ke detektor foto
- perpindahan (relatif) diukur berupa pulse train dengan frekuensi yang sebanding kecepatan pergerakan



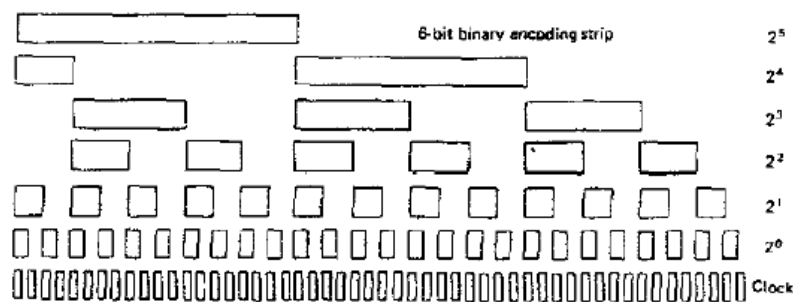
Gambar 3.10. Sensor posisi digital optis: (a) dan (b) perpindahan berputar, TX-RX sejajar, (c) dan (d) perpindahan mendatar, TX-RX membentuk sudut.

- deteksi arah gerakan memanfaatkan dua sinyal dengan saat pulsa naik berbeda



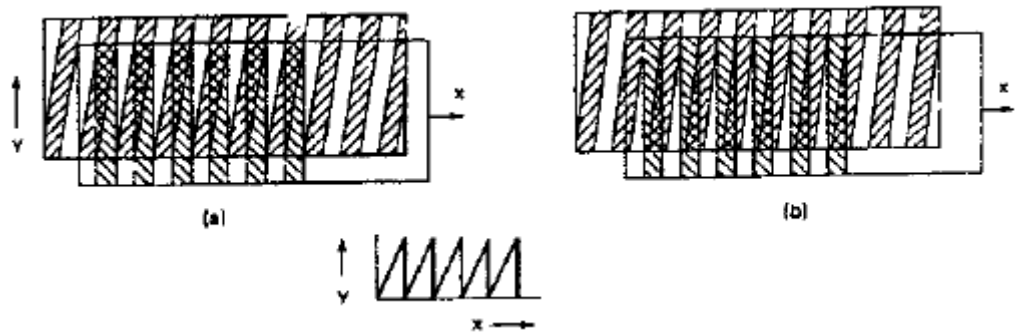
Gambar 3.11. Rangkaian uji untuk menentukan arah gerakan/posisi

- posisi mutlak dideteksi menggunakan kode bilangan digital
 - untuk deteksi perubahan yang ekstrim satu kode digunakan sebagai sinyal clock
 - alternatif lain memanfaatkan kode yang hanya mengijinkan satu perubahan seperti pada kode Gray
 - kode angular lebih baik dari pada kode linier akibat arah ekspansi thermal pada pelat kode



Gambar 3.12. Pulsa clock yang dihasilkan berdasarkan bilangan biner

- pengukuran perpindahan posisi yang kecil dapat dilakukan dengan pola Moire
 - pola garis tegak dan miring memperkuat (ukuran) pergeseran arah x ke pola garis pada arah y
 - perubahan dibaca dengan cara optis

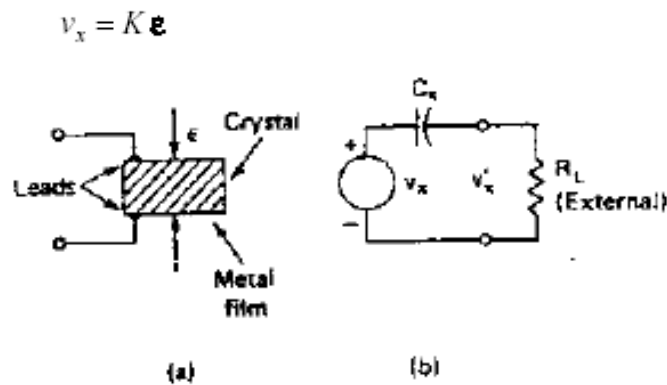


Gambar 3.13. Perubahan posisi kecil menggunakan cara Moire

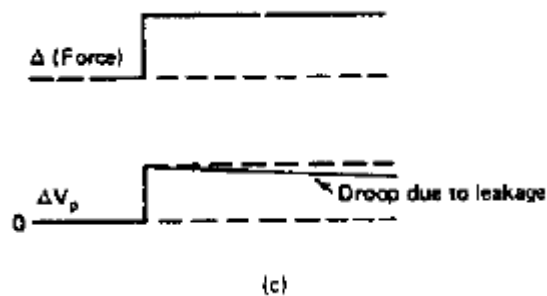
3.1.6. Transduser Piezoelectric

Transduser Piezoelectric berkerja memanfaatkan tegangan yang terbentuk saat kristal mengalami pemampatan

- ion positif dan negatif terpisah akibat struktur kristal asimetris
- bahan kristal: kuarsa dan barium titanat, elektret polivilidin florida
- bentuk respons



Gambar 3.14. Transduser Piezoelektrik: (a) konstruksi PE, (b) rangkaian ekivalen PE



Gambar 3.15. Respons Tegangan PE

Rangkaian pembaca tegangan pada piezoelektrik sensor

- kristal bukan konduktor (tidak mengukur DC, rangkaian ekivalen) gunakan rangkaian Op-Amp dengan impedansi input tinggi (FET, untuk frekuensi rendah)
- bila respons yang diukur dekat dengan frekuensi resonansi kristal, ukur muatan sebagai ganti tegangan

$$Q_x = K_{qe} \epsilon$$

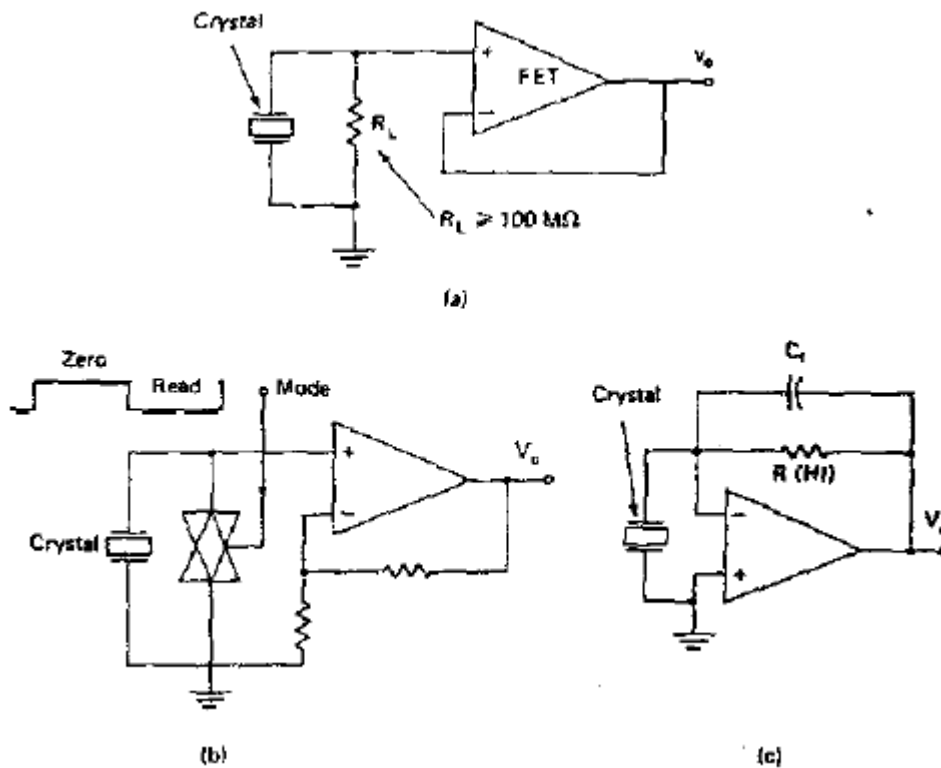
di mana Q_x = muatan listrik kristal (coulomb)

K_{qe} = konstanta kristal (coul/cm)

ϵ = gaya tekan (Newton)

- Gambar (a) R tinggi untuk alur DC, (b) saklar untuk mengukur tegangan strain saat ON dan OFF dan (c) mengukur muatan, tegangan (V_o) yang dihasilkan adalah :

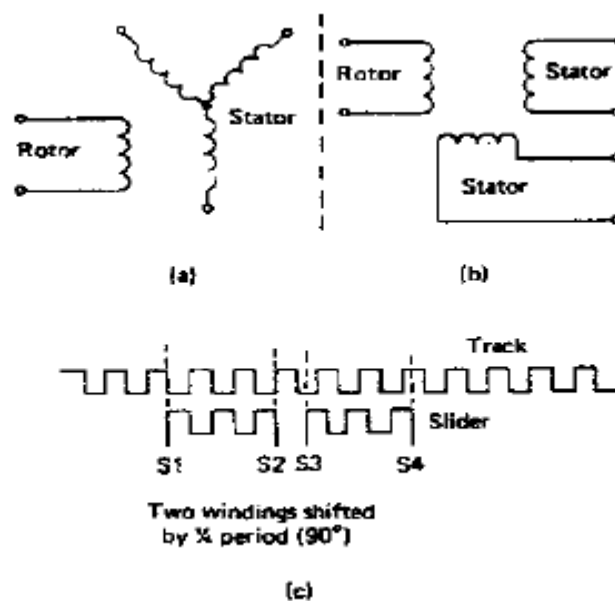
$$V_o = \frac{Q_x}{C_f} = \left(\frac{K_{qe}}{C_f} \right) \epsilon = K_{\mu e} \left(\frac{C_x}{C_f} \right)$$



Gambar 3.16. Rangkaian pembacaan tegangan kristal

3.1.7. Transduser Resolver dan Inductosyn

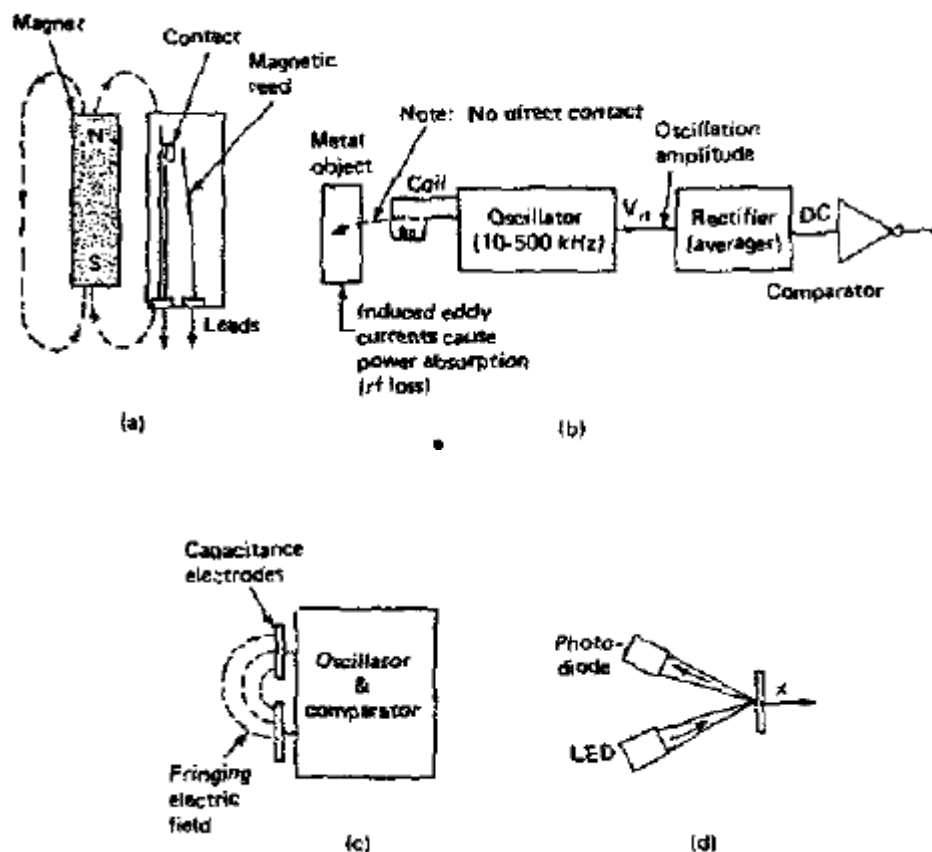
- berupa pasangan motor-generator: resolver dan transmiter digunakan untuk mengukur sudut pada sebuah gerakan rotasi
- kumparan stator sebagai penerima ditempatkan pada sudut yang berbeda
 - 3 stator: syncho
 - 2 stator: resolver
- versi linier (inductosyn) perbedaan sudut 90 derajat diperoleh dengan perbedaan 1/4 gulungan



Gambar 3.17. Konstruksi Resolver - Inductosyn dan sinyal yang dihasilkan

3.1.8. Detektor Proximity

- (a) saklar reed yang memanfaatkan saklar yang terhubung atau terlepas berdasarkan medan magnet
- (b) RF-loss akibat adanya bahan metal yang menyerap medan magnet (frekuensi 40-200 kHz) yang mengakibatkan detector RF turun akibat pembebanan rangkaian resonansi LC pada osilator
- (c) Detector kapasitansi mengamati perubahan kapasitansi oleh bahan nonkonduktor
- (d) pancaran cahaya terfokus

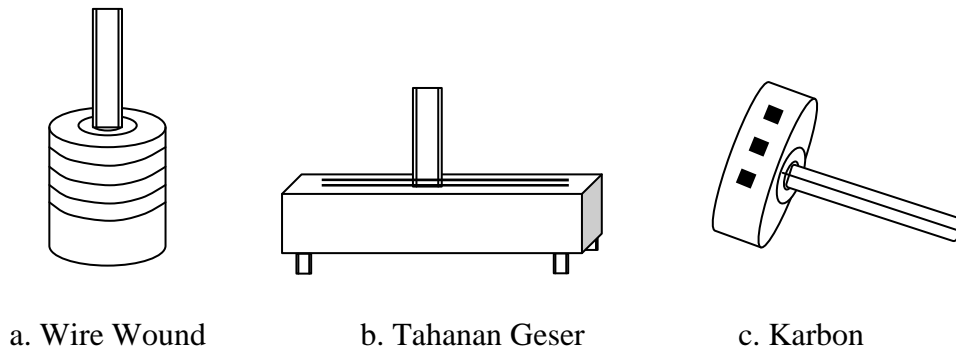


Gambar 3.18. Beberapa sensor proximity

3.1.8. Potensiometer

Potensiometer yang tersedia di pasaran terdiri dari beberapa jenis, yaitu: potensiometer karbon, potensiometer wire wound dan potensiometer metal film.

1. Potensiometer karbon adalah potensiometer yang terbuat dari bahan karbon harganya cukup murah akan tetapi kepresisian potensiometer ini sangat rendah biasanya harga resistansi akan sangat mudah berubah akibat pergeseran kontak.
2. Potensiometer gulungan kawat (wire wound) adalah potensiometer yang menggunakan gulungan kawat nikelin yang sangat kecil ukuran penampangnya. Ketelitian dari potensiometer jenis ini tergantung dari ukuran kawat yang digunakan serta kerapihan penggulangannya.
3. Metal film adalah potensiometer yang menggunakan bahan metal yang dilapiskan ke bahan isolator



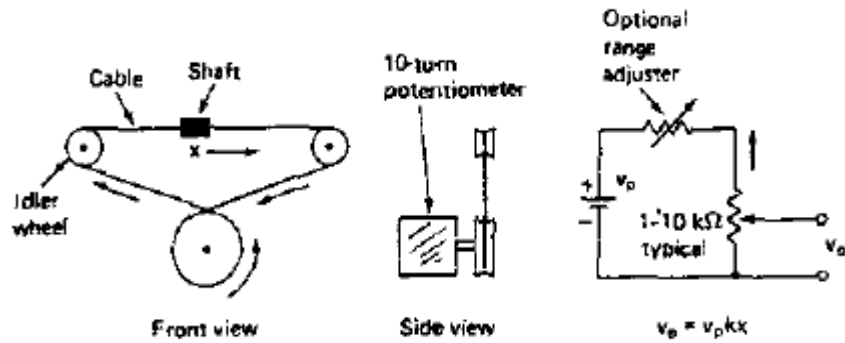
Gambar 3.19. Macam Potensiometer

Potensiometer karbon dan metal film jarang digunakan untuk kontrol industri karena cepat aus. Potensiometer wire wound adalah potensiometer yang menggunakan kawat halus yang dililit pada batang metal. Ketelitian potensiometer tergantung dari ukuran kawat. Kawat yang digunakan biasanya adalah kawat nikelin.

Penggunaan potensiometer untuk pengontrolan posisi cukup praktis karena hanya membutuhkan satu tegangan eksitasi dan biasanya tidak membutuhkan pengolahan sinyal yang rumit. Kelemahan penggunaan potensiometer terutama adalah:

1. Cepat aus akibat gesekan
2. Sering timbul noise terutama saat pergantian posisi dan saat terjadi lepas kontak
3. Mudah terserang korosi
4. Peka terhadap pengotor

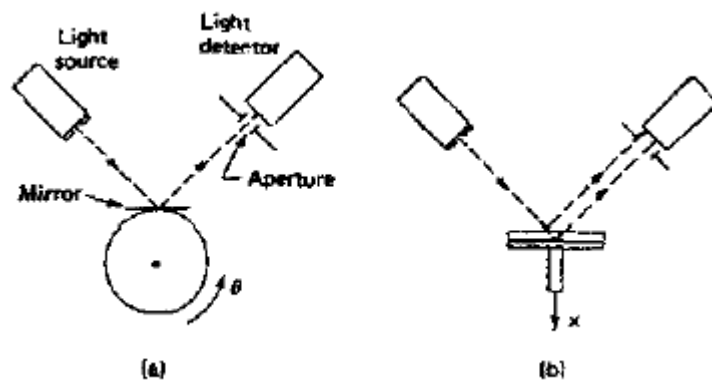
Potensiometer linier adalah potensiometer yang perubahan tahanannya sangat halus dengan jumlah putaran sampai sepuluh kali putaran (multi turn). Untuk keperluan sensor posisi potensiometer linier memanfaatkan perubahan resistansi, diperlukan proteksi apabila jangkauan ukurnya melebihi rating, linearitas yang tinggi hasilnya mudah dibaca tetapi hati-hati dengan friksi dan backlash yang ditimbulkan, resolusinya terbatas yaitu 0,2 – 0,5%



Gambar 3.20. Rangkaian uji Potensiometer

3.1.9. Optical lever displacement detektor

- memanfaatkan pemantulan berkas cahaya dari sumber ke detektor
- linieritas hanya baik untuk perpindahan yang kecil



Gambar 3.21. Optical Lever Displacement Detector



3.2. Sensor Kecepatan (*Motion Sensor*)

Pengukuran kecepatan dapat dilakukan dengan cara analog dan cara digital. Secara umum pengukuran kecepatan terbagi dua cara yaitu: **cara angular** dan **cara translasi**. Untuk mengukur kecepatan translasi dapat diturunkan dari cara pengukuran angular. Yang dimaksud dengan pengukuran angular adalah pengukuran kecepatan **rotasi (berputar)**, sedangkan pengukuran kecepatan translasi adalah kecepatan gerak lurus beraturan dan kecepatan gerak lurus tidak beraturan.

3.2.1. Tacho Generator

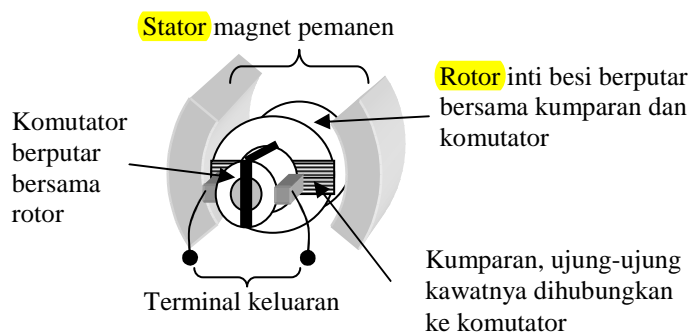
Sensor yang sering digunakan untuk sensor kecepatan angular adalah **tacho generator**. Tacho generator adalah sebuah generator kecil yang membangkitkan tegangan DC ataupun tegangan AC. Dari segi eksitasi tacho generator dapat dibangkitkan dengan eksitasi dari luar atau **imbas elektromagnet** dari magnet permanent.

Tacho generator DC dapat membangkitkan tegangan DC yang langsung dapat menghasilkan informasi kecepatan, sensitivitas tacho generator DC cukup baik terutama pada daerah kecepatan tinggi. Tacho generator DC yang bermutu tinggi memiliki kutub-kutub magnet yang banyak sehingga dapat menghasilkan tegangan DC dengan riak gelombang yang berfrekuensi tinggi sehingga mudah diratakan. Keuntungan utama dari tacho generator ini adalah diperolehnya informasi dari **arah putaran**. Sedangkan kelemahannya adalah :

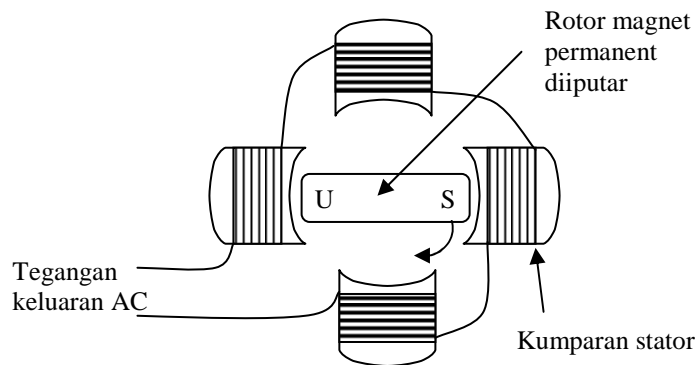
1. Sikat komutator mudah habis
2. Jika digunakan pada daerah bertemperatur tinggi, maka magnet permanent akan mengalami kelelahan, untuk kasus ini, tacho generator sering dikalibrasi.
3. Peka terhadap debu dan korosi

Tacho generator AC berupa generator sinkron, magnet permanent diletakkan dibagian tengah yang berfungsi sebagai rotor. Sedangkan **statornya** berbentuk kumparan besi lunak. Ketika rotor berputar dihasilkan tegangan induksi di bagian statornya. Tipe lain dari tacho generator AC adalah tipe induksi, rotor dibuat bergerigi, stator berupa gulungan kawat berinti besi. Medan magnet permanent dipasang bersamaan di stator. Ketika rotor berputar, terjadi perubahan medan magnet pada gigi yang kemudian mengimbas ke gulungan stator.

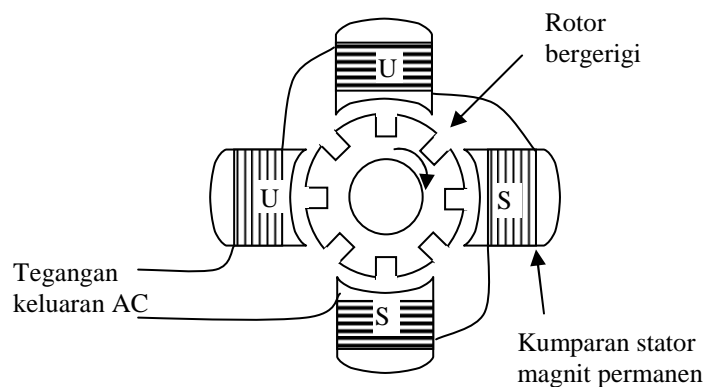
Kelebihan utama dari tacho generator AC adalah relatif tahan terhadap korosi dan debu, sedangkan kelemahannya adalah **tidak memberikan informasi arah gerak**.



Gambar 3.22. Kontruksi Tacho **Generator DC**



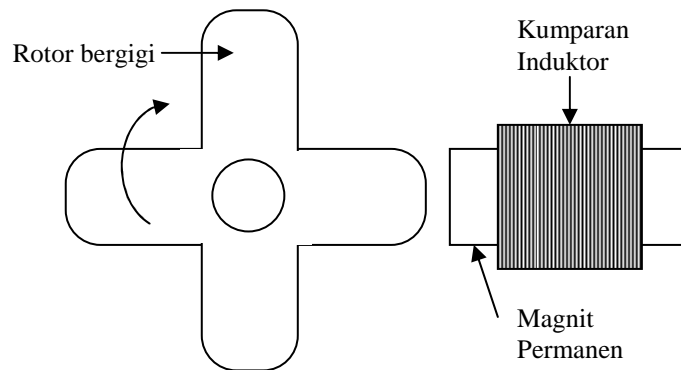
Gambar 3.23. Kontruksi Tacho **Generator AC**



Gambar 3.24. Kontruksi Tacho Generator AC dengan rotor bergerigi

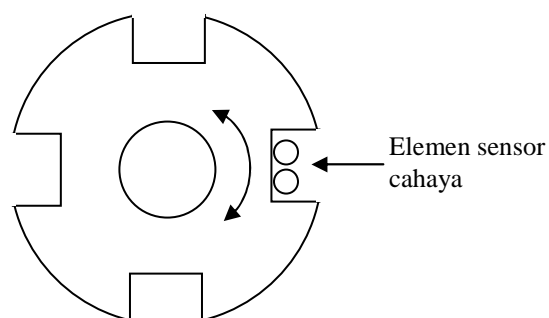
3.2.2. Pengukuran Kecepatan Cara Digital.

Pengukuran kecepatan cara digital dapat dilakukan dengan cara **induktif**, **kapasitif** dan **optik**. Pengukuran dengan cara induksi dilakukan menggunakan rotor bergerigi, stator dibuat dari kumparan yang dililitkan pada magnet permanen. Keluaran dari sensor ini berupa pulsa-pulsa tegangan. Penggunaan cara ini cukup **sederhana**, sangat praktis tanpa memerlukan kopling mekanik yang rumit, serta memiliki **kehandalan** yang tinggi, tetapi **kelemahannya** tidak dapat digunakan untuk mengukur kecepatan rendah dan tidak dapat menampilkan arah putaran.



Gambar 3.25. Sensor Kecepatan Digital Tipe **Induktor**

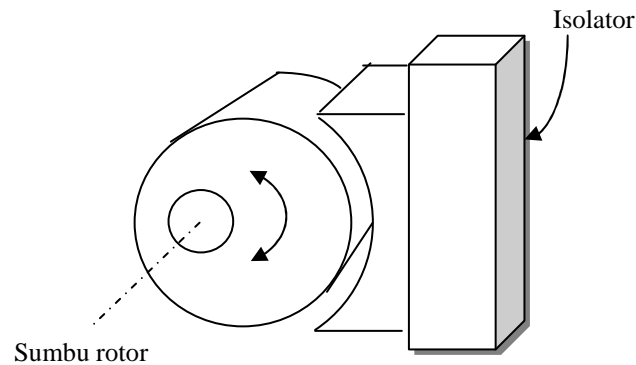
Tipe lain sensor kecepatan adalah cara **Optik**. Rotor dibuat dari bahan metal atau plastik gelap, rotor dibuat berlubang untuk memberi tanda kepada sensor cahaya. Bila diinginkan informasi arah kecepatan, digunakan dua buah sensor yang dipasang berdekatan. **Informasi arah gerak dapat diperoleh dengan cara mendeteksi sensor mana yang lebih dahulu mendapat sinar (aktif)**. Sensor cahaya sangat peka terhadap pengotor **debu**, olej karena itu keseluruhan bagian sensor (stator dan rotor) harus diletakkan pada kemasan tertutup. Kelebihan sensor ini memiliki linearitas yang sangat tinggi untuk daerah jangkauan yang sangat luas. Kelemahannya adalah masih diperlukan adanya kopling mekanik dengan sistem yang di sensor.



Gambar 3.26. Sensor Kecepatan Cara **Optik**

Sensor kecepatan digital lain adalah menggunakan **kapsitf**, yaitu rotor dibuat dari bahan metal, bentuknya bulat. Rotor berputar dengan poros tidak sepusat atau bergeser kepinggir sedikit. Stator dibuat dari bahan metal dipasang dengan melengkung

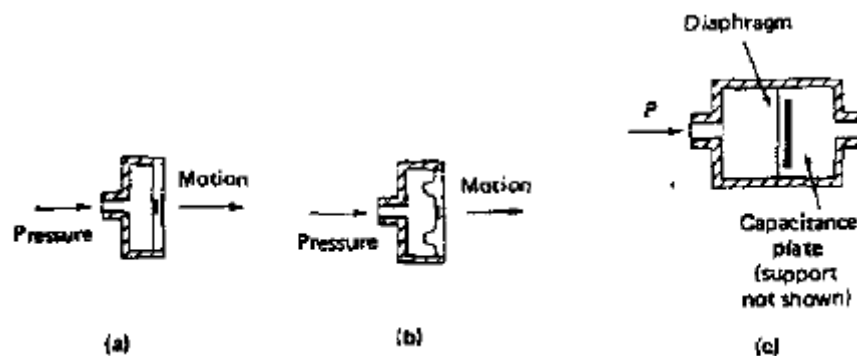
untuk memperbesar sensitivitas dari sensor. Ketika rotor diputar maka akan terjadi perubahan kapasitansi diantara rotor dan stator karena putaran rotor tidak simetris. Penerapan dari sensor ini terutama jika diperlukan pemasangan sensor kecepatan yang berada dilingkungan fluida.



Gambar 3.27. Sensor Kecepatan Cara Kapasitansi.

3.3. Sensor Tekanan (Pressure Sensor)

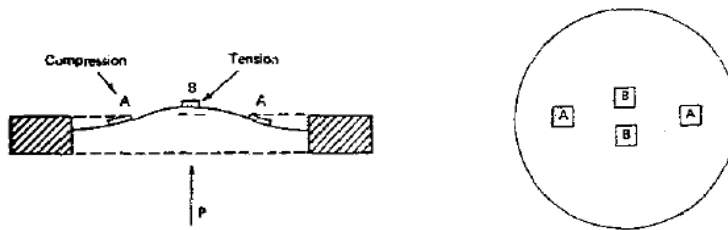
- Transduser tekanan dan gaya (load cell)
 - terdiri dari bahan elastis dan sensor perpindahan (displacement)
 - besaran ukur (i) strain atau (ii) displacement
 - pengelompokan: tipe *absolute gauge* dan diferensial



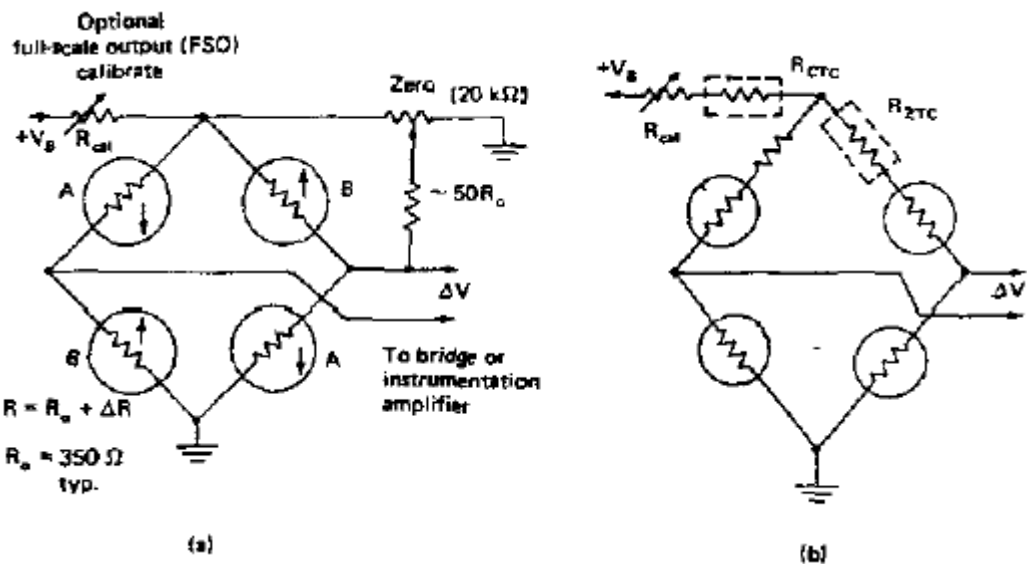
Gambar 3.28. Sensor tekanan diafragma: diafragma tipe datar, (b) diafragma bergelombang, (c) media kapasitansi

- sensor tekanan dengan diafragma **reliable**, sukar dibuat, reproducible
 - besaran ukur strain dengan strain gauge atau displacement dengan kapasitansi
 - pengukuran dengan kapasitansi dalam rangkaian jembatan sangat sensitif dan mahal

– Penempatan dan rangkaian sensor



- rangkaian jembatan untuk kompensasi temperatur
- resistor sensitif temperatur baik dalam jembatan maupun pada regulator tegangan

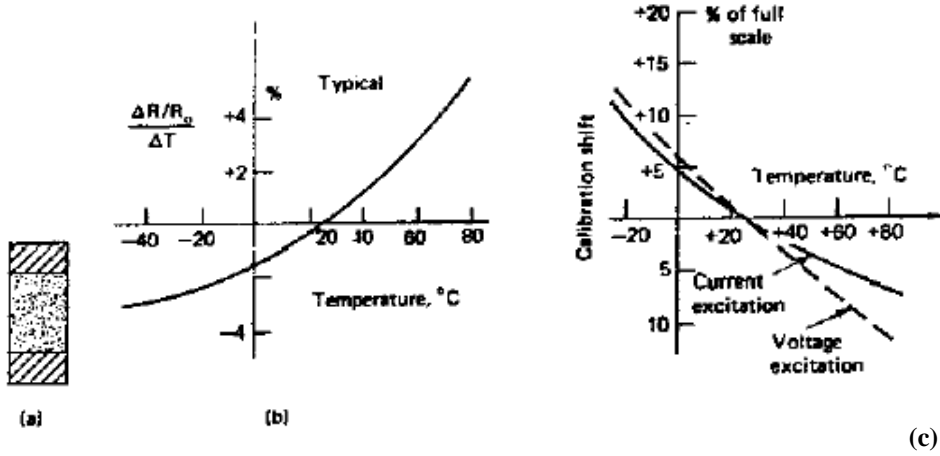


Gambar 3.29. Rangkaian uji sensor tekanan strain gauge: (a) rangkaian jembatan tanpa kompensator, (b) rangkaian jembatan dengan kompensator

3.3.1. Transduser Tekanan silikon

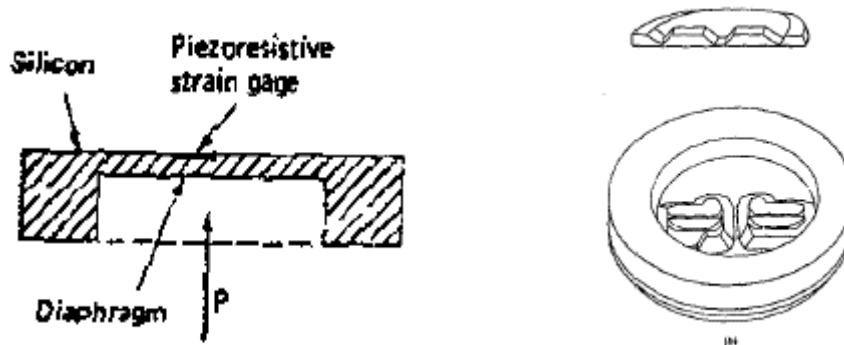
- memanfaatkan silikon sebagai bahan strain ukur dan diafragma, rangkaian bisa terintegrasi
- lebih sensitif dari metal karena strain (displacement) dan sifat piezoresistif muncul bersamaan
- selalu menggunakan 4 gauge dalam jembatan, masalah yang dihadapi
 - gauge tidak identik
 - sangat sensitif terhadap temperatur
- alternatif solusi:
 - eksitasi arus

- kompensasi tegangan jembatan
- kompensasi penguatan amplifier



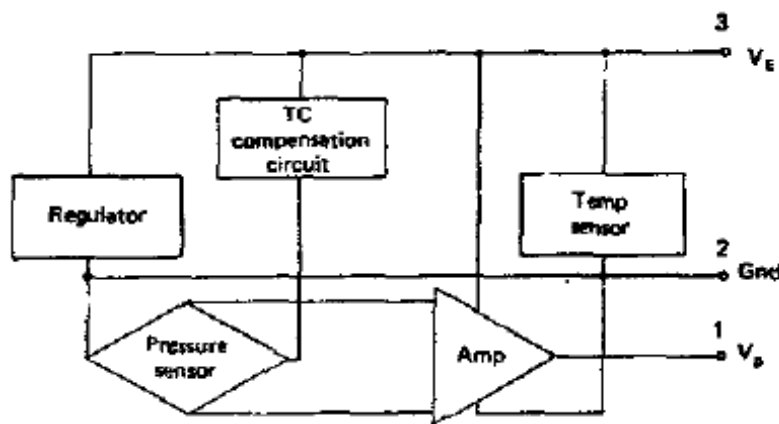
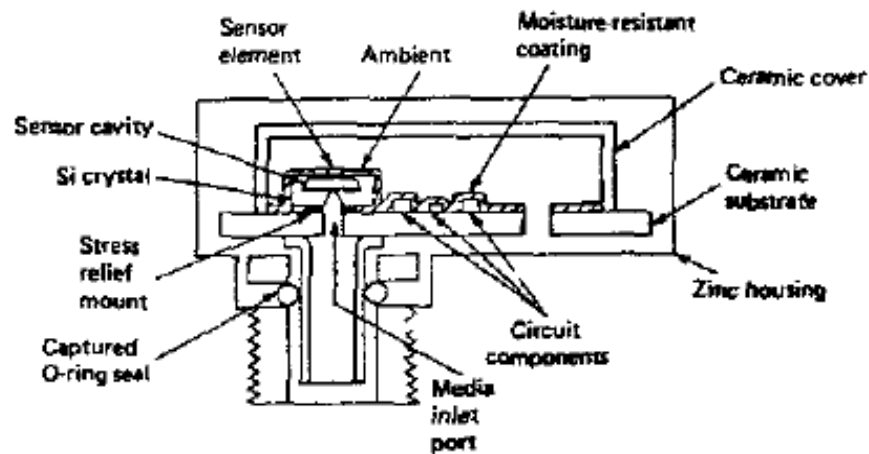
Gambar 3.30. Strain gage piezoresistif: (a) fisik peizoresistif strain gage, (b) karakteristik peizoresistif sg, (c) respon temperatur pada konfigurasi jembatan

- konstruksi sensor tekanan silikon
 - diafragma dengan proses etsa
 - strain gauge dengan difusi dopan



Gambar 3.31. Sensor tekanan jenis diafragma silikon: (a) diafragma datar, (b) diafragma melingkar lebih sensitif

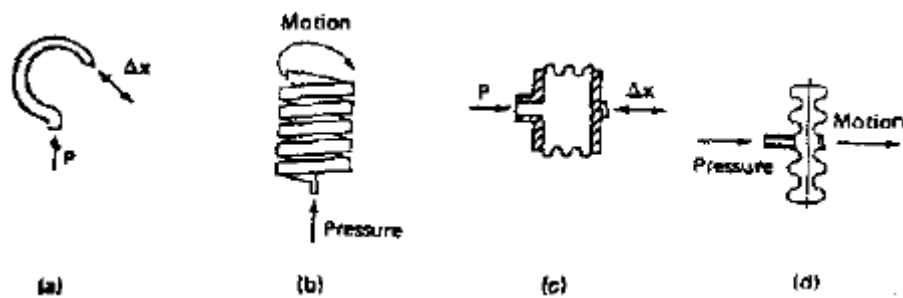
- konstruksi paket sensor tekanan silikon dengan rangkaian kompensasi dan penguat



Gambar 3.32. Sensor tekanan semikonduktor: (a) konstruksi sensor, (b) blok diagram rangkaian sensor

3.3.2. Sensor Tekanan Tipe Bourdon dan Bellow

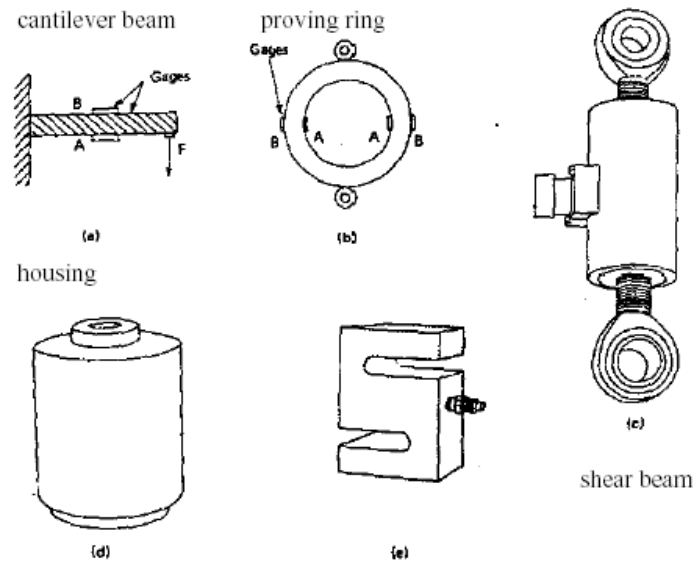
- besaran ukur perpindahan (displacement) memanfaatkan LVDT, sensor reluktansi-variabel, potensiometer
- konversi tekanan ke perpindahan menggunakan tabung Bourdon atau Bellows



Gambar 3.33. Sensor tekanan tipe lain: (a) dan (b) tipe Bourdon, (c) dan (d) tipe bellow

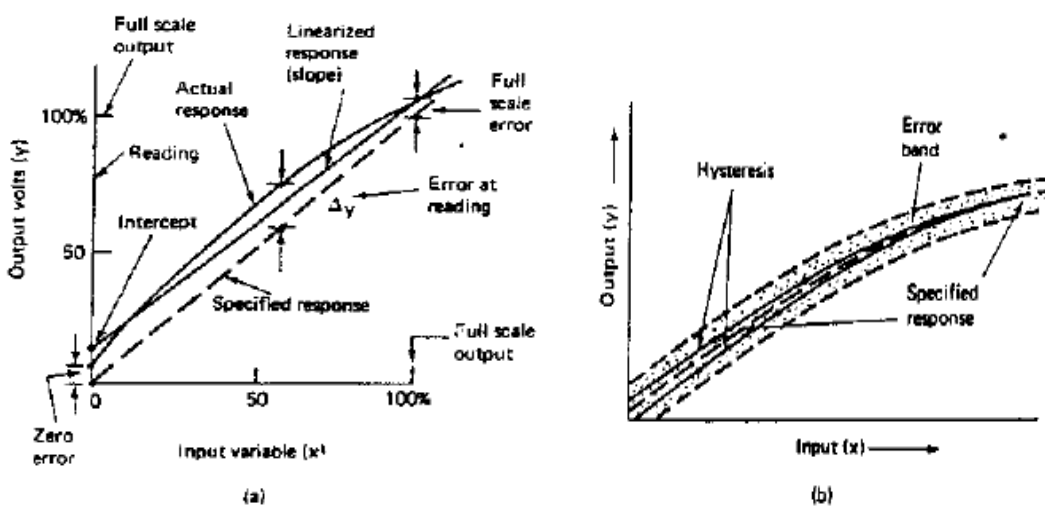
3.3.3. Load cell

- cara kerja mirip dengan sensor tekanan yaitu mengubah gaya menjadi perpindahan
- menggunakan rangkaian jembatan untuk pembacaan, kalibrasi dan kompensasi temperatur
- alternatif lain menggunakan **kristal piezoelektrik** untuk mengukur perubahan gaya
- konfigurasi load cell



Gambar 3.34. Beberapa Contoh Konfigurasi Load Cell

- Spesifikasi Error dan Nonlinearitas pada Sensor



Gambar 3.35. Respon sensor secara umum
 (a) Simpangan dari garis linear (b) Bentuk sinyal terdefinisi

3.4. Sensor Aliran Fluida (*Flow Sensor*)

Pengukuran aliran mulai dikenal sejak tahun 1732 ketika Henry Pitot mengukur jumlah fluida yang mengalir. Dalam pengukuran fluida perlu ditentukan besaran dan vektor kecepatan aliran pada suatu titik dalam fluida dan bagaimana fluida tersebut berubah dari titik ke titik.

Pengukuran atau penyensoran aliran fluida dapat digolongkan sebagai berikut:

1. Pengukuran kuantitas

Pengukuran ini memberikan petunjuk yang sebanding dengan kuantitas total yang telah mengalir dalam waktu tertentu. Fluida mengalir melewati elemen primer secara berturut-turut dalam kuantitas yang kurang lebih terisolasi dengan secara bergantian mengisi dan mengosongkan bejana pengukur yang diketahui kapasitasnya.

Pengukuran kuantitas diklasifikasikan menurut :

- a. Pengukur gravimetri atau pengukuran berat
- b. Pengukur volumetri untuk cairan
- c. Pengukur volumetri untuk gas

2. Pengukuran laju aliran

Laju aliran Q merupakan fungsi luas pipa A dan kecepatan V dari cairan yang mengalir lewat pipa, yakni:

$$Q = A.V$$

tetapi dalam praktek, kecepatan tidak merata, lebih besar di pusat. Jadi kecepatan terukur rata-rata dari cairan atau gas dapat berbeda dari kecepatan rata-rata sebenarnya. Gejala ini dapat dikoreksi sebagai berikut:

$$Q = K.A.V$$

di mana K adalah konstanta untuk pipa tertentu dan menggambarkan hubungan antara kecepatan rata-rata sebenarnya dan kecepatan terukur. Nilai konstantaini bisa didapatkan melalui eksperimen.

Pengukuran laju aliran digunakan untuk mengukur kecepatan cairan atau gas yang mengalir melalui pipa. Pengukuran ini dikelompokkan lagi menurut jenis bahan yang diukur, cairan atau gas, dan menurut sifat-sifat elemen primer sebagai berikut:

- a. Pengukuran laju aliran untuk cairan:
 - 1) jenis baling-baling defleksi

- 2) jenis baling-baling rotasi
 - 3) jenis baling-baling heliks
 - 4) jenis turbin
 - 5) pengukur kombinasi
 - 6) pengukur aliran magnetis
 - 7) pengukur aliran ultrasonic
 - 8) pengukur aliran kisaran (*vorteks*)
 - 9) pengukur pusaran (*swirl*)
- b. Pengukuran laju aliran gas
- 1) jenis baling-baling defleksi
 - 2) jenis baling-baling rotasi
 - 3) jenis termal
3. Pengukuran metoda diferensial tekanan

Jenis pengukur aliran yang paling luas digunakan adalah pengukuran tekanan diferensial. Pada prinsipnya beda luas penampang melintang dari aliran dikurangi dengan yang mengakibatkan naiknya kecepatan, sehingga menaikkan pula energi gerakan atau energi kinetis. Karena energi tidak bisa diciptakan atau dihilangkan (Hukum perpindahan energi), maka kenaikan energi kinetis ini diperoleh dari energi tekanan yang berubah..

Lebih jelasnya, apabila fluida bergerak melewati penghantar (pipa) yang seragam dengan kecepatan rendah, maka gerakan partikel masing-masing umumnya sejajar disepanjang garis dinding pipa. Kalau laju aliran meningkat, titik puncak dicapai apabila gerakan partikel menjadi lebih acak dan kompleks.

Kecepatan kira-kira di mana perubahan ini terjadi dinamakan kecepatan kritis dan aliran pada tingkat kelajuan yang lebih tinggi dinamakan *turbulen* dan pada tingkat kelajuan lebih rendah dinamakan *laminer*.

Kecepatan kritis dinamakan juga angka Reynold, dituliskan tanpa dimensi:

$$R_D = \frac{D\rho V}{\mu}$$

di mana : D = dimensi penampang arus fluida, biasanya diameter

ρ = kerapatan fluida

V = kecepatan fluida

μ = kecepatan absolut fluida

Batas kecepatan kritis untuk pipa biasanya berada diantara 2000 dan 2300.

Pengukuran aliran metoda ini dapat dilakukan dengan banyak cara misalnya: menggunakan pipa venturi, pipa pitot, orifice plat (lubang sempit), turbine flow meter, rotameter, cara thermal, menggunakan bahan radio aktif, elektromagnetik, ultrasonic dan flowmeter gyro. Cara lain dapat dikembangkan sendiri sesuai dengan kebutuhan proses. Yang dibahas dalam buku ini adalah sensor laju aliran berdasarkan perbedaan tekanan.

3.4.1. Sensor Aliran Berdasarkan Perbedaan Tekanan

Metoda ini berdasarkan Hukum Bernoulli yang menyatakan hubungan :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

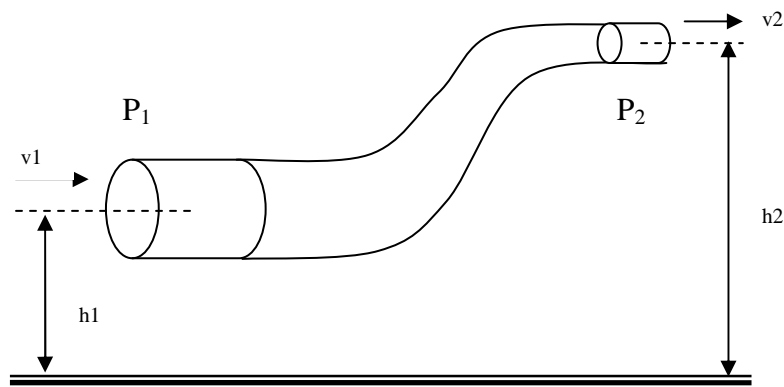
dimana: P = tekanan fluida

ρ = masa jenis fluida

v = kecepatan fluida

g = gravitasi bumi

h = tinggi fluida (elevasi)



Gambar 3.36. Hukum Kontinuitas

Jika h_1 dan h_2 dibuat sama tingginya maka

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \text{atau} \quad \frac{1}{2} \rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) = P_2 - P_1$$

Perhatian : Rumus diatas hanya berlaku untuk aliran *Laminer*, yaitu aliran yang memenuhi prinsip kontinuitas.

Pipa pitot, orifice plate, pipa venturi dan flow Nozzle menggunakan hukum Bernoulli diatas. Prinsip dasarnya adalah membentuk sedikit perubahan kecepatan dari aliran fluida sehingga diperoleh perubahan tekanan yang dapat diamati. Perubahan kecepatan aliran fluida dapat dilakukan dengan mengubah diameter pipa, hubungan ini diperoleh dari Hukum kontinuitas aliran fluida.

Perhatikan rumus berikut: $A_1 \cdot D_1 = A_2 \cdot D_2$, di mana : A = luas penampang pipa, B = debit fluida

Karena debit fluida berhubungan langsung dengan kecepatan fluida, maka jelas kecepatan fluida dapat diubah dengan cara mengubah diameter pipa.

3.4.1.1. Orifice Plate

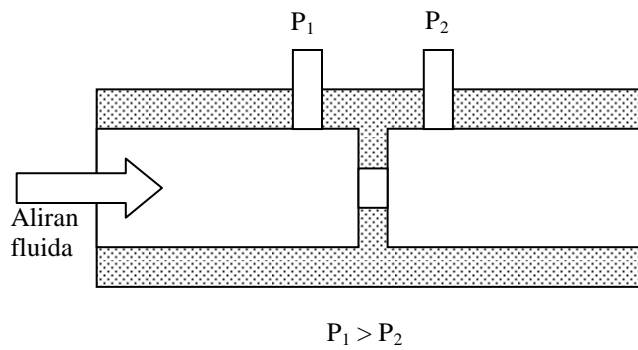
Alat ukur terdiri dari pipa dimana dibagian dalamnya diberi pelat berlubang lebih kecil dari ukuran diameter pipa. Sensor tekanan diletakan disisi pelat bagian inlet (P_1) dan satu lagi dibagian sisi pelat bagian outlet (P_2). Jika terjadi aliran dari inlet ke outlet, maka tekanan P_1 akan lebih besar dari tekanan outlet P_2 .

Keuntungan utama dari Orifice plate ini adalah dari :

1. Konstruksi sederhana
2. Ukuran pipa dapat dibuat persis sama dengan ukuran pipa sambungan.
3. Harga pembuatan alat cukup murah
4. Output cukup besar

Kerugian menggunakan cara ini adalah :

1. Jika terdapat bagian padat dari aliran fluida, maka padat bagian tersebut akan terkumpul pada bagian pelat disisi inlet.
2. Jangkauan pengukuran sangat rendah
3. Dimungkinkan terjadinya aliran *Turbulen* sehingga menyebabkan kesalahan pengukuran jadi besar karena tidak mengikuti prinsip aliran *Laminer*.
4. Tidak memungkinkan bila digunakan untuk mengukur aliran fluida yang bertekanan rendah.



Gambar 3.37. Orifice Plate

Jumlah fluida yang mengalir per satuan waktu (m³/dt) adalah :

$$Q = KA_2 \sqrt{\frac{2g}{\rho}} \sqrt{P_1 - P_2}$$

di mana : Q = jumlah fluida yang mengalir (m³/dt)

K = konstanta pipa

A₂ = luas penampang pipa sempit

P = tekanan fluida pada pipa 1 dan 2

ρ = masa jenis fluida

g = gravitasi bumi

Rumus ini juga berlaku untuk pipa venturi

3.4.1.2. Pipa Venturi

Bentuk lain dari pengukuran aliran dengan beda tekanan adalah pipa venturi. Pada pipa venturi, pemercepat aliran fluida dilakukan dengan cara membentuk corong sehingga aliran masih dapat dijaga agar tetap laminar. Sensor tekana pertama (P₁) diletakkan pada sudut tekanan pertama dan sensor tekanan kedua diletakkan pada bagian yang plaing menjorok ke tengah. Pipa venturi biasa dipergunakan untuk mengukur aliran cairan.

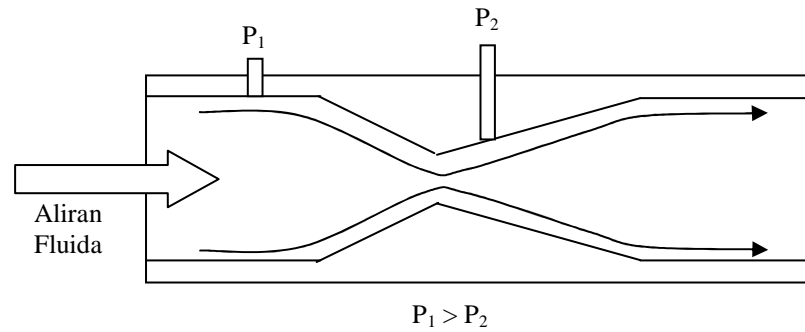
Keuntungan dari pipa venturi adalah:

1. Partikel padatan masih melewati alat ukur
2. Kapasitas aliran cukup besar
3. Pengukuran tekana lebih baik dibandingkan orifice plate.

4. Tahan terhadap gesekan fluida.

Kerugiannya adalah:

1. Ukuran menjadi lebih besar
2. Lebih mahal dari orifice plate
3. Beda tekanan yang ditimbulkan menjadi lebih kecil dari orifice plate.

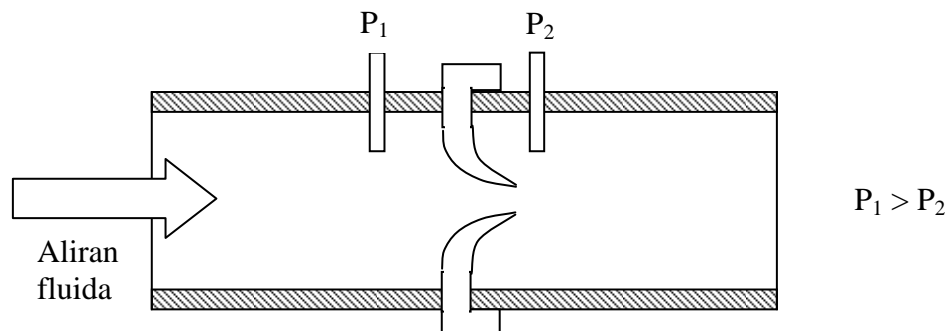


Gambar 3.38. Pipa Venturi

3.4.1.3. Flow Nozzle

Typical Flow Nozzle menggunakan sebuah corong yang diletakkan diantara sambungan pipa sensor tekanan P_1 dibagian inlet dan P_2 dibagian outlet. Tekanan P_2 lebih kecil dibandingkan P_1 . Sensor jenis ini memiliki keunggulan dibanding venturure dan orifice plate yaitu:

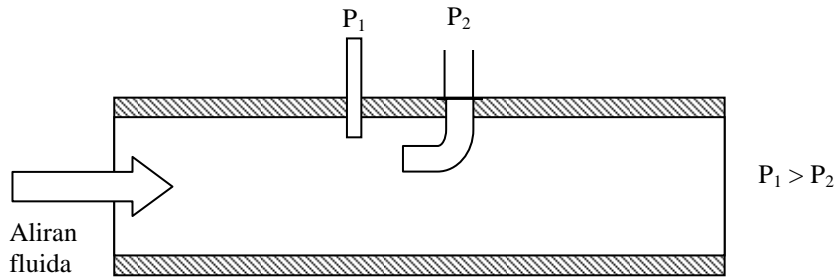
1. Masih dapat melewati padatan
2. Kapasitas aliran cukup besar
3. Mudah dalam pemasangan
4. Tahan terhadap gesekan fluida
5. Beda tekanan yang diperoleh lebih besar daripada pipa venturi
6. Hasil beda tekanan cukup baik karena aliran masih laminar



Gambar 3.39. Flow Nozzle

3.4.1.4. Pipa Pitot

Konstruksi pipa ini adalah berupa pipa biasa sedang di bagian tengah pipa diselipkan pipa kecil yang dibengkokkan ke arah inlet. Jenis pipa ini jarang dipergunakan di industri karena dengan adanya pipa kecil di bagian tengah akan menyebabkan benturan yang sangat kuat terhadap aliran fluida. Alat ini hanya dipergunakan untuk mengukur aliran fluida yang sangat lambat.



Gambar 3.40. Pipa Pitot

3.4.1.5. Rotameter

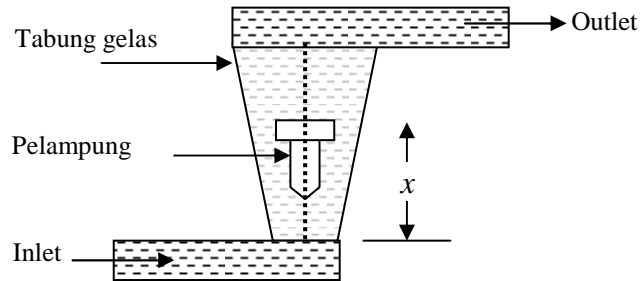
Rotameter terdiri dari tabung vertikal dengan lubang gerak di mana kedudukan pelampung dianggap vertical sesuai dengan laju aliran melalui tabung (Gambar 3.41). Untuk laju aliran yang diketahui, pelampung tetap *stasioner* karena gaya vertical dari tekanan diferensial, gravitasi, kekentalan, dan gaya-apung akan berimbang. Jadi kemampuan menyeimbangkan diri dari pelampung yang digantung dengan kawat dan tergantung pada luas dapat ditentukan. Gaya kebawah (gravitasi dikurangi gaya apung) adalah konstan dan demikian pula gaya keatas (penurunan tekanan dikalikan luas pelampung) juga harus konstan. Dengan mengasumsikan aliran non kompresif, hasilnya

$$Q = \frac{C(A_t - A_f)}{\sqrt{1 - [A_t - A_f] / A_t}} \sqrt{2gV_t \left(\frac{W_f - W_{ff}}{A_f - W_{ff}} \right)}$$

atau $Q = K(A_t - A_f); C$ dan $[(A_t - A_f)A_t]^2$ jauh lebih kecil adalah sebagai berikut:

- Di mana, Q = laju aliran volume
 C = koefisien pengosongan
 A_t = luas tabung
 A_f = luas pelampung

V_f = volume pelampung
 W_f = berat jenis pelampung
 W_{ff} = berat jenis fluida yang mengalir



Gambar 3.41. Rotameter

Pelampung dapat dibuat dari berbagai bahan untuk mendapatkan beda kerapatan yang diperlukan ($W_f - W_{ff}$) untuk mengukur cairan atau gas tertentu. Tabung sering dibuat dari gelas berkekuatan tinggi sehingga dapat dilakukan pengamatan langsung terhadap kedudukan pelampung.

3.4.2. Cara-cara Thermal

Cara-cara thermal biasanya dipergunakan untuk mengukur aliran udara. Pengukuran dengan menggunakan **carathermal** dapat dilakukan dengan cara-cara :

- **Anemometer kawat panas**
- **Teknik perambatan panas**
- **Teknik penggetaran**

3.4.2.1. Anemometer Kawat Panas

Metoda ini cukup sederhana yaitu dengan menggunakan kawat yang dipanaskan oleh aliran listrik, arus yang mengalir pada kawat dibuat tetap konstan menggunakan sumber arus konstan. Jika ada aliran udara, maka kawat akan mendingin (seperti kita meniup lilin) **dengan mendinginnya kawat, maka resistansi kawat menurun**. Karena dipergunakan **sumber arus konstan**, maka kita dapat menyensor tegangan pada ujung-ujung kawat. Sensor jenis ini memiliki sensitivitas sangat baik untuk menyensor aliran gas yang lambat. Namun sayangnya penginstalasian keseluruhan sensor tergolong sulit.

Disini berlaku rumus :

$$I^2 R_w = K_c h_c A (T_w - T_t)$$

di mana : I = arus kawat

Rw = resistansi kawat

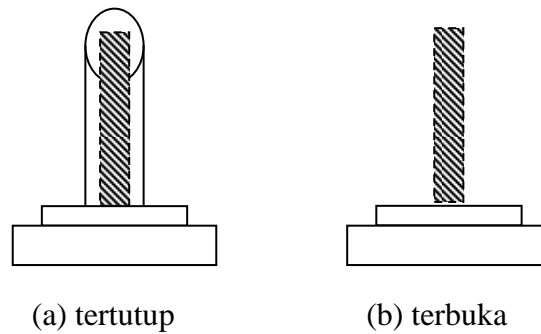
Kc = faktor konversi, panas ke daya listrik

Tw = temperatur kawat

Tt = temperatur fluida yang mengalir

Hc = koefisien film (pelapis) dari perpindahan panas

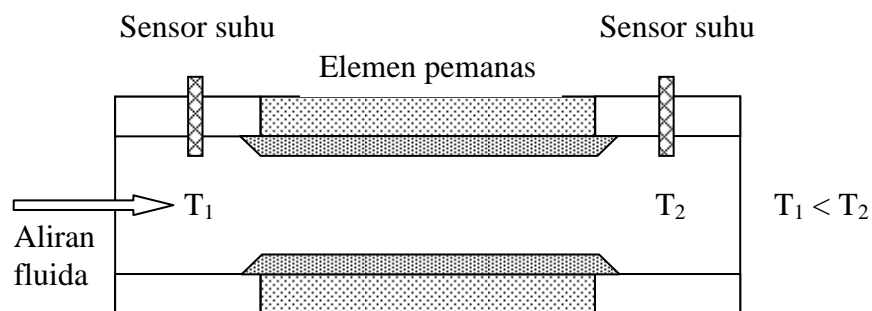
A = luas perpindahan panas



Gambar 3.42. Kontruksi Anemometer Kawat Panas

3.4.2.2. Perambatan Panas

Pada teknik perambatan panas, pemanas dipasang pada bagian luar pipa, pipa tersebut terbuat dari bahan logam. Di kiri dan kanan pemanas, dipasang bahan isolator panas, dan pada isolator ini dipasang sensor suhu. **Bila udaramengalir dari kiri ke kanan, maka suhu disebelah kiri akan terasa lebih dingin dibanding suhu sebelah kanan.**



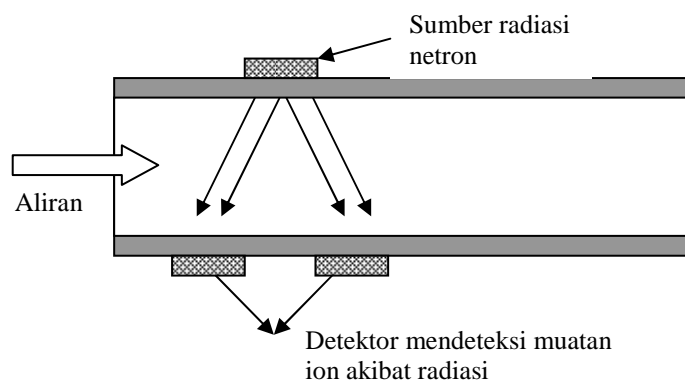
Gambar 3.43. Flowmeter Rambatan Panas

Sensor suhu yang digunakan dapat berupa sensor resistif tetapi yang biasa terpasang adalah thermokopel karena memiliki respon suhu yang cepat. Sensor aliran perambatan panas tipe lama, memanaskan seluruh bagian dari saluran udara, sehingga dibutuhkan pemanas sampai puluhan kilowatt, untuk mengurangi daya panas tersebut digunakan tipe baru dengan membelokkan sebagian kecil udara kedalam sensor.

3.4.3. Flowmeter Radio Aktif

Teknik pengukuran aliran dengan radio aktif adalah dengan menembakkan partikel neutron dari sebuah pemancar radio aktif. Pada jarak tertentu ke arah outlet, dipasang detector. Bila terjadi aliran, maka akan terdeteksi adanya partikel radio aktif, jumlah partikel yang terdeteksi pada selang tertentu akan sebanding dengan kecepatan aliran fluida.

Teknik lain yang masih menggunakan teknik radio aktif adalah dengan cara mencampurkan bahan radio aktif kedalam fluida kemudian pada bagian-bagian tertentu dipasang detector. Teknik ini dilakukan bila terjadi kesulitan mengukur misalnya karena bahan aliran terdiri dari zat yang berada pada berbagai fase. Teknik radio aktif ini juga biasa dipergunakan pada pengobatan yaitu mencari posisi pembuluh darah yang macet bagi penderita kelumpuhan.

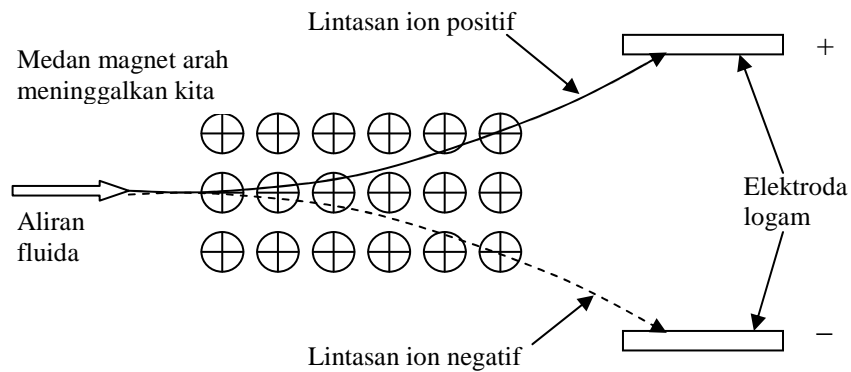


Gambar 3.44. Flowmeter Cara Radiasi Nuklir

3.4.4. Flowmeter Elektromagnetis

Flowmeter jenis ini biasa digunakan untuk mengukur aliran cairan **elektrolit**. Flowmeter ini menggunakan prinsip **Efek Hall**, dua buah gulungan kawat tembaga dengan inti besi dipasang pada pipa agar membangkitkan medan magnetik. Dua buah elektroda dipasang pada bagian dalam pipa dengan posisi tegak lurus arus medan magnet dan tegak lurus terhadap aliran fluida.

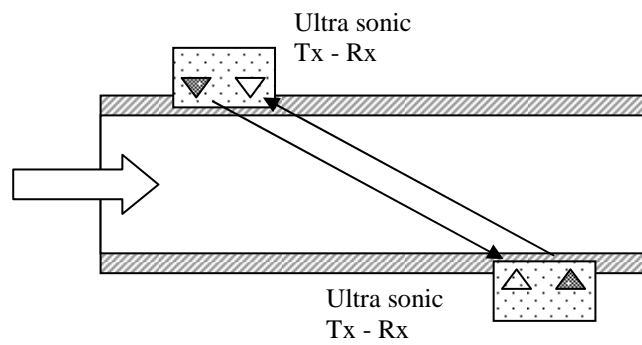
Bila terjadi aliran fluida, maka ion-ion positif dan ion-ion negatif membelok ke arah elektroda. Dengan demikian terjadi beda tegangan pada elektroda-elektrodanya. Untuk menghindari adanya elektrolisa terhadap larutan, dapat digunakan arus AC sebagai pembangkit medan magnet.



Gambar 3.45. Prinsip Pengukuran Aliran menggunakan Efek Hall

3.4.5. Flowmeter Ultrasonic

Flowmeter ini menggunakan Azas Doppler. Dua pasang ultrasonic transduser dipasang pada posisi diagonal dari pipa, keduanya dipasang dibagian tepi dari pipa, untuk menghindari kerusakan sensor dan transmitter, permukaan sensor dihalangi oleh membran. Perbedaan lintasan terjadi karena adanya aliran fluida yang menyebabkan perubahan **phase** pada sinyal yang diterima sensor ultrasonic



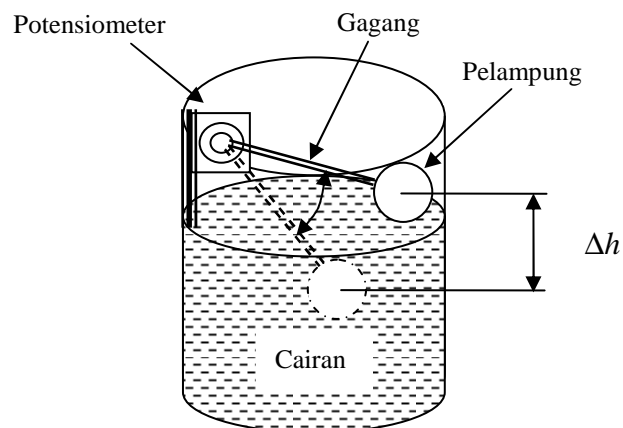
Gambar 3.46. Sensor Aliran Fluida Menggunakan Ultrasonic

3.5. Sensor Level

Pengukuran level dapat dilakukan dengan bermacam cara antara lain dengan: pelampung atau displacer, gelombang udara, resistansi, kapasitif, ultra sonic, optic, thermal, tekanan, sensor permukaan dan radiasi. Pemilihan sensor yang tepat tergantung pada situasi dan kondisi sistem yang akan di sensor.

3.5.1. Menggunakan Pelampung

Cara yang paling sederhana dalam penyensor level cairan adalah dengan menggunakan pelampung yang diberi gagang. Pembacaan dapat dilakukan dengan memasang sensor posisi misalnya **potensiometer** pada bagian engsel gagang pelampung. Cara ini cukup baik diterapkan untuk tanki-tanki air yang tidak terlalu tinggi.

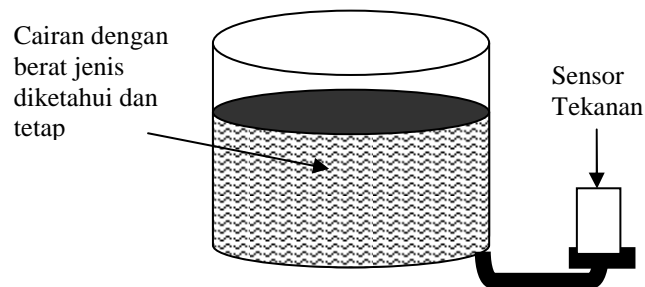


Gambar 3.47. Sensor Level Menggunakan Pelampung

3.5.2. Menggunakan Tekanan

Untuk mengukur level cairan dapat pula dilakukan menggunakan sensor tekanan yang dipasang di bagian dasar dari tabung. Cara ini cukup praktis, akan tetapi ketelitiannya sangat tergantung dari berat jenis dan suhu cairan sehingga kemungkinan kesalahan pembacaan cukup besar.

Sedikit modifikasi dari cara diatas adalah dengan cara mencelupkan pipa berisi udara kedalam cairan. Tekanan udara didalam tabung diukur menggunakan sensor tekanan, cara ini memanfaatkan hukum Pascal. Kesalahan akibat perubahan berat jenis cairan dan suhu tetap tidak dapat diatasi.



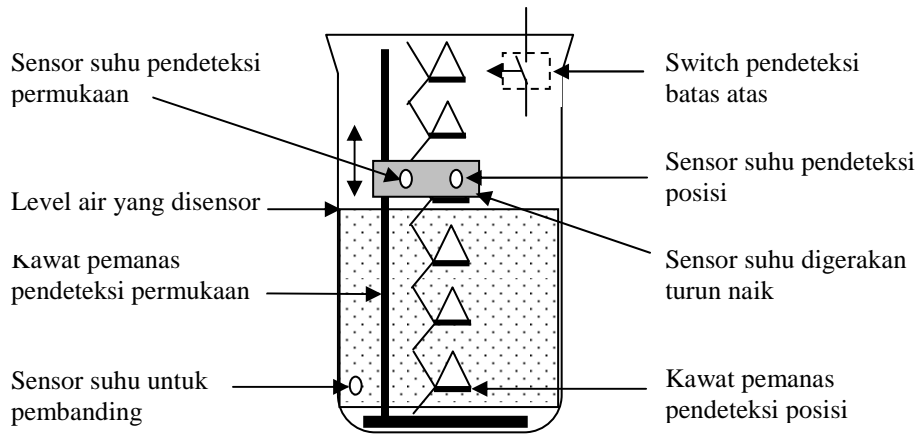
Gambar 3.48. Sensor Level Menggunakan Sensor Tekanan

3.5.3. Menggunakan Cara Thermal

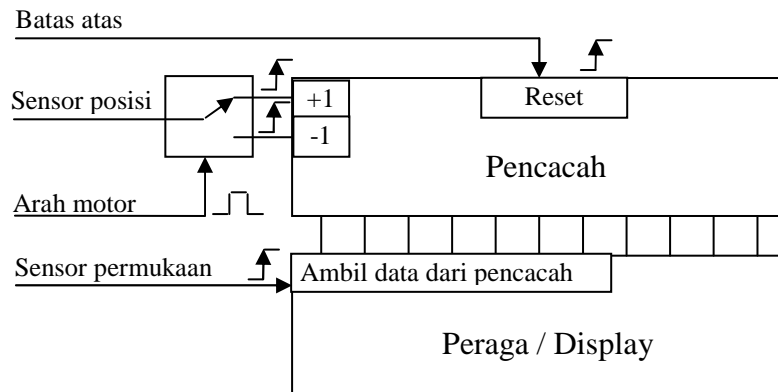
Teknik ini didasarkan pada fakta penyerapan kalor oleh cairan lebih tinggi dibandingkan penyerapan kalor oleh uapnya, sehingga bagian yang tercelup akan lebih dingin dibandingkan bagian yang tidak tercelup. Kontruksi dasar sensor adalah terdiri dari sebuah elemen pemanas dibentuk berliku-liku dan sebuah pemanas lain dibentuk tetap lurus. Dua buah sensor diletakkan berhadapan dengan bagian tegakdari pemanas, sebuah sensor tambahan harus diletakkan selalu berada dalam cairan yang berfungsi untuk pembanding. Kedua sensor yang berhadapan dengan pemanas digerakkan oleh sebuah aktuator secara perlahan-lahan dengan perintah naik atau turun secara bertahap. Mula-mula sensor diletakkan pada bagian paling atas, selanjutnya sensor suhu digerakkan ke bawah perlahan-lahan, setiap terdeteksi adanya perubahan suhu pada sensor yang berhadapan pada pemanas berliku, maka dilakukan penambahan

pencacahan terhadap pencacah elektronik. Pada saat sensor yang berhadapan dengan pemanas lurus mendeteksi adanya perubahan dari panas ke dingin, maka hasil pencacahan ditampilkan pada peraga.

Sensor level cairan dengan cara thermal ini biasanya digunakan pada tanki-tanki boiler, karena selain sebagai sensor level cairan, juga dapat dipergunakan untuk mendeteksi gradien perubahan suhu dalam cairan.



Gambar 3.49. Teknik Penyensoran Level Cairan Cara Thermal



Gambar 3.50. Blok Diagram Pengolahan dan Pendisplayan Sensor Level Menggunakan Cara Thermal

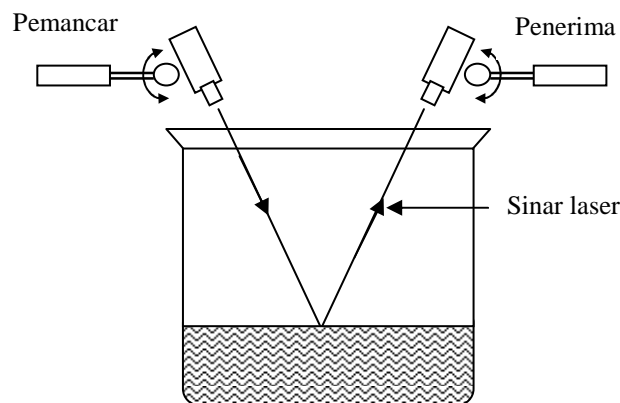
3.5.4. Menggunakan Cara Optik

Pengukuran level menggunakan optic didasarkan atas sifat pantulan permukaan atau pembiasan sinar dari cairan yang disensor. Ada beberapa cara yang dapat digunakan untuk penyensoran menggunakan optic yaitu:

1. Menggunakan sinar laser
2. Menggunakan prisma
3. Menggunakan fiber optik

3.5.4.1. Menggunakan Sinar Laser

Sinar laser dari sebuah sumber sinar diarahkan ke permukaan cairan, kemudian pantulannya dideteksi menggunakan detector sinar laser. Posisi pemancar dan detector sinar laser harus berada pada bidang yang sama. Detektor dan sumber sinar laser diputar. Detektor diarahkan agar selalu berada pada posisi menerima sinar. Jika sinar yang datang diterima oleh detektor, maka level permukaan cairan dapat diketahui dengan menghitung posisi-posisi sudut dari sudut detektor dan sudut pemancar.

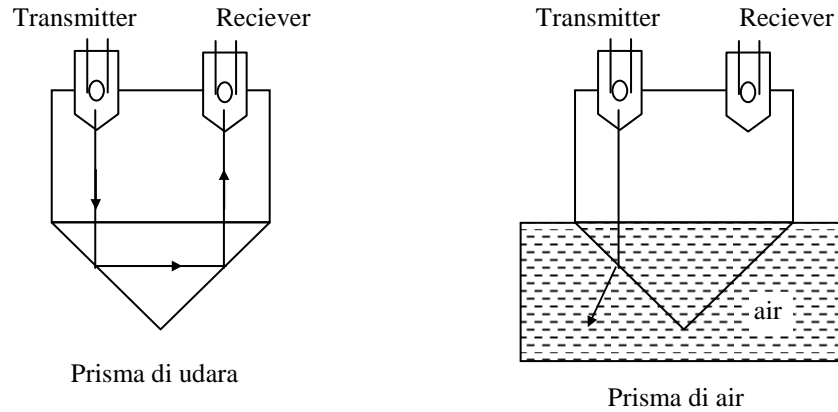


Gambar 3.51. Sensor Level menggunakan Sinar Laser

3.5.4.2. Menggunakan Prisma

Teknik ini memanfaatkan harga yang berdekatan antara index bias air dengan index bias gelas. Sifat pantulan dari permukaan prisma akan menurun bila prisma dicelupkan kedalam air. Prisma yang digunakan adalah prisma bersudut 45 dan 90 derajat. Sinar diarahkan ke prisma, bila prisma ditempatkan di udara, sinar akan dipantulkan kembali setelah melewati permukaan bawah prisma. Jika prisma ditempatkan di air, maka sinar yang dikirim tidak dipantulkan akan tetapi dibiaskan oleh

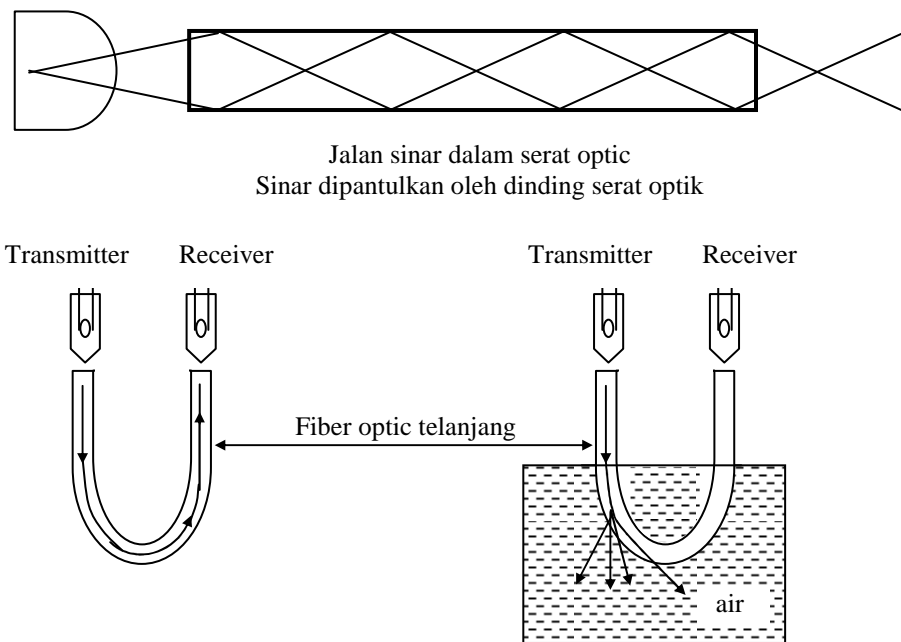
air, Dengan demikian prisma ini dapat digunakan sebagai pengganti pelampung. Keuntungan yang diperoleh ialah dapat mereduksi ukuran sensor.



Gambar 3.52. Sensor Level menggunakan Prisma

3.5.4.3. Menggunakan Fiber Optik

Teknik ini tidak jauh berbeda dengan teknik penyensoran permukaan air menggunakan prisma, yaitu menggunakan prinsip pemantulan dan pembiasan sinar. Jika fiber optic diletakan di udara, sinar yang dimasukan ke fiber optic dipantulkan oleh dinding fiber optic, sedangkan bila fiber optic telanjang dimasukan ke air, maka dinding fiber optic tidak lagi memantulkan sinar



Gambar 3.53. Sensor Level menggunakan Serat Optik

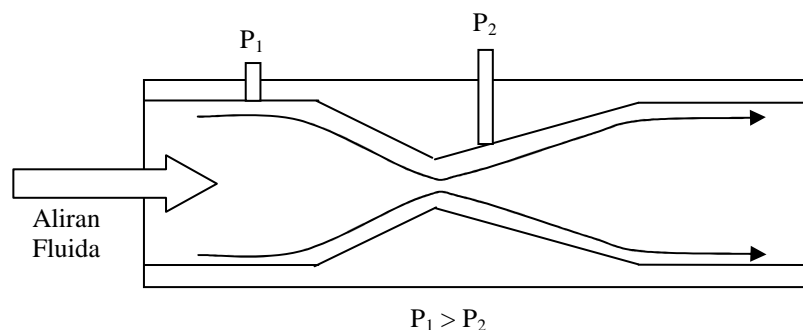


Contoh Soal:

1. Sebutkan beberapa macam sensor mekanik yang anda ketahui
2. Jelaskan cara kerja strain gauge yang digunakan sebagai sensor posisi
3. Ada berapa macam tachogenerator yang dapat digunakan sebagai sensor kecepatan
4. Sebutkan beberapa jenis sensor tekanan yang anda ketahui
5. Pipa venturi dapat digunakan sebagai sensor aliran bagaimana caranya
6. Ada berapa cara dapat dilakukan untuk penyensoran level cairan.

Jawab:

1. Sensor mekanik antara lain: sensor posisi, sensor kecepatan, sensor tekanan, sensor aliran dan sensor level
2. Strain gauge adalah sensor posisi yang terbuat dari elemen kawat tahanan. Bekerja berdasarkan perubahan panjang dari kawat tahanan akibat tekanan atau regangan. Perubahan panjang menyebabkan perubahan nilai tahanan yang dimanfaatkan sebagai sensor.
3. Tachogenerator berfungsi sebagai sensor kecepatan ada 3 macam yaitu: tg DC, tg AC dan tg AC bergerigi
4. Sensor tekanan adalah: 1] Transduser Tekanan silicon, 2] Sensor Tekanan Tipe Bourdon dan Bellow dan 3] Load cell
5. Cara kerja pipa venturi sebagai sensor aliran berdasarkan perbedaan tekanan P_1 dan P_2 yang dipasang pada pipa.



6. Ada 4 cara yaitu : menggunakan pelampung, tekanan, thermal dan optik

Latihan:

1. Jelaskan cara kerja LVDT yang digunakan sebagai sensor posisi.
2. Rancanglah sebuah sistem kontrol level cairan yang menggunakan potensiometer sebagai sensor.
3. Dapatkah sensor ultrasonic digunakan untuk mengukur kedalaman laut? Jelaskan

Kegiatan :

- Diskusi kelompok yaitu merancang sistem kendali dengan memanfaatkan sensor posisi, sensor thermal, sensor mekanik dan sensor aliran fluida. Buat laporkan hasil diskusi kelompok masing-masing.

Rangkuman.

Pada bab ini mempelajari tentang sensor posisi, sensor kecepatan, sensor tekanan, sensor aliran fluida dan sensor level yang banyak ditemui dalam kehidupan nyata dilapangan atau industri.

Review :

1. Sebutkan contoh-contoh dari sensor posisi atau displacement.
2. Sebutkan beberapa contoh sensor kecepatan
3. Jelaskan salah satu prinsip operasi dari sensor tekanan
4. Sensor mana yang tepat dan sesuai digunakan sebagai pengontrol aliran fluida laminer
5. Apakah sinar LASER dapat digunakan sebagai sensor level ? Jelaskan.

Bab 4

Sensor Cahaya

Tujuan Umum

Setelah selesai mempelajari bab ini mahasiswa diharapkan dapat mengetahui tentang spektrum warna gelombang elektromagnetis dan memanfaatkannya untuk sistem pengontrolan berbagai plant industr dengan baik

Tujuan Khusus

Setelah mempelajari topik demi topik dalam bab ini mahasiswa mengerti tentang :

1. Karakteristik divais elektrooptis dengan baik
2. Berbagai jenis sensor cahaya dan memanfaatkannya untuk keperluan kontrol industri dengan baik.
3. Rangkaian-rangkaian aplikasi sensor cahaya untuk teknik pengukuran, pengontrolan dan teknik kompensasi dengan baik.

Pendahuluan

Elemen-elemen sensitive cahaya merupakan alat terandalkan untuk mendeteksi energi cahaya. Alat ini melebihi sensitivitas mata manusia terhadap semua spectrum warna dan juga bekerja dalam daerah-daerah ultraviolet dan infra merah.

Energi cahaya bila diolah dengan cara yang tepat akan dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk teknik pengukuran, teknik pengontrolan dan teknik kompensasi.

Penggunaan praktis alat sensitif cahaya ditemukan dalam berbagai pemakaian teknik seperti halnya :

- Tabung cahaya atau fototabung vakum (*vaccum type phototubes*), paling menguntungkan digunakan dalam pemakaian yang memerlukan pengamatan pulsa cahaya yang waktunya singkat, atau cahaya yang dimodulasi pada frekuensi yang relative tinggi.
- Tabung cahaya gas (*gas type phototubes*), digunakan dalam industri gambar hidup sebagai pengindra suara pada film.

- **Tabung cahaya pengali atau pemfotodarap** (*multiplier phototubes*), dengan kemampuan penguatan yang sangat tinggi, sangat banyak digunakan pada pengukuran fotoelektrik dan alat-alat kontrol dan juga sebagai alat cacah kelipan (*scintillation counter*).
- **Sel-sel fotokonduktif** (*photoconductive cell*), juga disebut tahanan cahaya (*photo resistor*) atau tahanan yang bergantung cahaya (*LDR-light dependent resistor*), dipakai luas dalam industri dan penerapan pengontrolan di laboratorium.
- **Sel-sel foto tegangan** (*photovoltaic cells*), adalah alat semikonduktor untuk mengubah energi radiasi daya listrik. Contoh yang sangat baik adalah sel matahari (*solar cell*) yang digunakan dalam teknik ruang angkasa.

4.1. Divais Elektrooptis

Cahaya merupakan gelombang elektromagnetis (EM) yang memiliki **spectrum warna yang berbeda satu sama lain**. Setiap **warna dalam spectrum mempunyai energi, frekuensi dan panjang gelombang** yang berbeda. Hubungan spektrum optis dan energi dapat dilihat pada formula dan gambar berikut.

Energi photon (E_p) setiap warna dalam spektrum cahaya nilainya adalah:

$$W_p = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Dimana :

W_p = energi photon (eV)

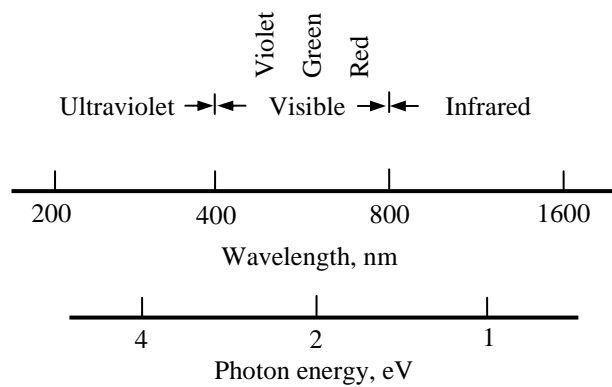
h = konstanta **Planck**'s ($6,63 \times 10^{-34}$ J-s)

c = kecepatan cahaya, Electro Magnetic ($2,998 \times 10^8$ m/s)

λ = panjang gelombang (m)

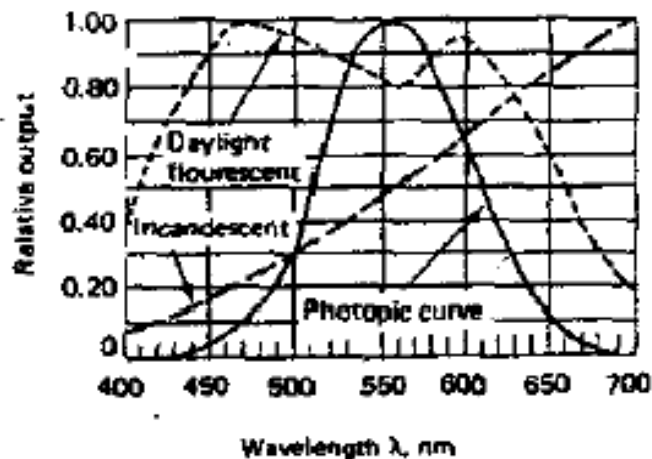
f = frekuensi (Hz)

Frekuensi foton bergantung pada energi yang dilepas atau diterima saat elektron berpindah tingkat energinya. Spektrum gelombang optis diperlihatkan pada gambar berikut, spektrum warna cahaya terdiri dari *ultra violet* dengan panjang gelombang 200 sampai 400 **nanometer** (nm), **visible** adalah spektrum warna cahaya yang dapat dilihat oleh mata dengan panjang gelombang **400 sampai 800 nm** yaitu warna violet, hijau dan merah, sedangkan spektrum warna **infrared** mulai dari **800 sampai 1600 nm** adalah warna cahaya dengan frekuensi terpendek.



Gambar 4.1. Spektrum Gelombang EM

Densitas daya spektral cahaya adalah:



Gambar 4.2. Kurva Output Sinyal Optis

Sumber-sumber energi **photon:**

Bahan-bahan yang dapat dijadikan sumber energi selain mata hari adalah antara lain:

- **Incandescent Lamp** yaitu lampu yang menghasilkan energi cahaya dari pijaran filament bertekanan tinggi, misalnya lampu mobil, lampu spot light, lampu flashlight.
- **Energi Atom**, yaitu memanfaatkan loncatan atom dari valensi energi 1 ke level energi berikutnya.
- **Fluorescence**, yaitu sumber cahaya yang berasal dari perpendaran bahan fluorescence yang terkena cahaya tajam. Seperti Layar **Oscilloskop**

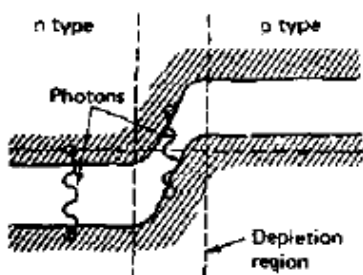
- Sinar LASER adalah sumber energi mutakhir yang dimanfaatkan untuk sebagai cahaya dengan kelebihanannya antara lain : *monochromatic* (cahaya tunggal atau membentuk garis lurus), *coherent* (cahaya seragam dari sumber sampai ke beban sama), dan *divergence* (simpangan sangat kecil yaitu 0,001 radians).

4.2. Photo Semikonduktor

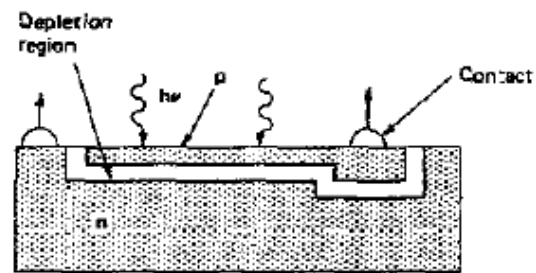
Divais photo semikonduktor memanfaatkan efek kuantum pada *junction*, energi yang diterima oleh elektron yang memungkinkan elektron pindah dari *ban valensi ke ban konduksi pada kondisi bias mundur*.

Bahan semikonduktor seperti Germanium (Ge) dan Silikon (Si) mempunyai 4 buah electron valensi, masing-masing electron dalam atom saling terikat sehingga electron valensi genap menjadi 8 untuk setiap atom, itulah sebabnya kristal silicon memiliki konduktivitas listrik yang rendah, karena setiap electron terikan oleh atom-atom yang berada disekelilingnya. Untuk membentuk semikonduktor tipe P pada bahan tersebut disisipkan pengotor dari unsure golongan III, sehingga bahan tersebut menjadi lebih bermuatan positif, karena terjadi kekosongan electron pada struktur kristalnya.

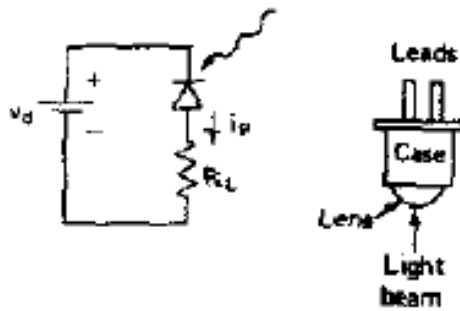
Bila semikonduktor jenis N disinari cahaya, maka elektron yang tidak terikat pada struktur kristal akan mudah lepas. Kemudian bila dihubungkan semikonduktor jenis P dan jenis N dan kemudian disinari cahaya, maka akan terjadi beda tegangan diantara kedua bahan tersebut. Beda potensial pada bahan ilikon umumnya berkisar antara 0,6 volt sampai 0,8 volt.



(a)



(b)

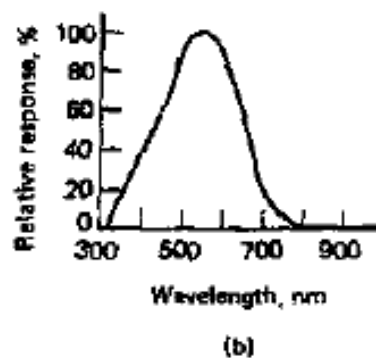
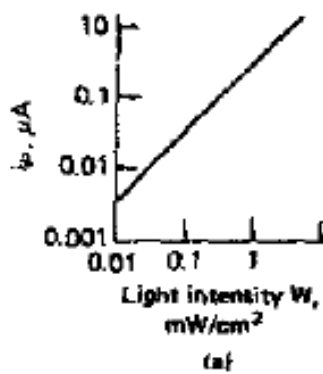


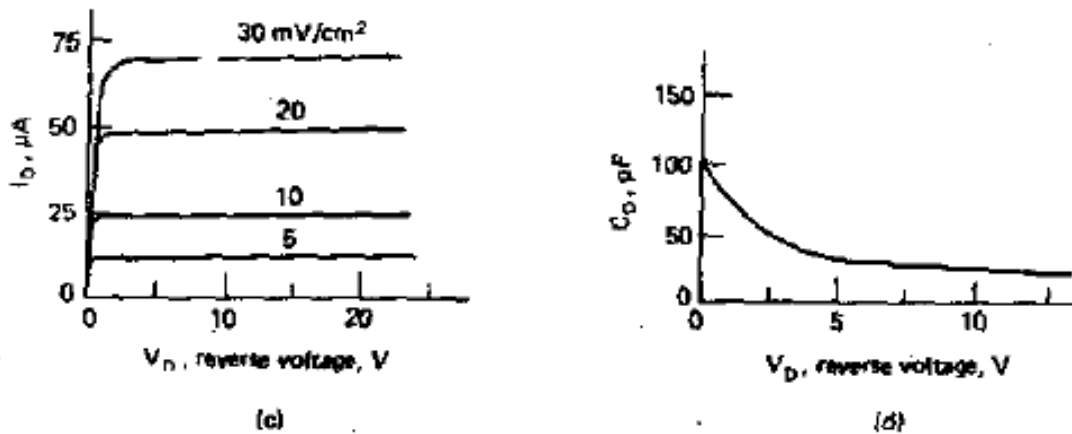
(c)

Gambar 4.3. Konstruksi Dioda Foto (a) junction harus dekat permukaan (b) lensa untuk memfokuskan cahaya (c) rangkaian dioda foto

Ada beberapa karakteristik dioda foto yang perlu diketahui antara lain:

- Arus bergantung linier pada intensitas cahaya
- Respons frekuensi bergantung pada bahan (Si 900nm, GaAs 1500nm, Ge 2000nm)
- Digunakan sebagai sumber arus
- Junction capacitance turun menurut tegangan bias mundurnya
- Junction capacitance menentukan respons frekuensi arus yang diperoleh

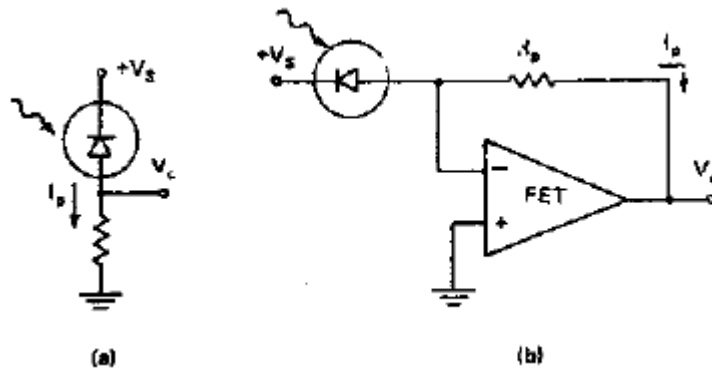




Gambar 4.4. Karakteristik Dioda Foto (a) intensitas cahaya (b) panjang gelombang (c) reverse voltage vs arus dan (d) reverse voltage vs kapasitansi

• Rangkaian pengubah arus ke tegangan

Untuk mendapatkan perubahan arus ke tegangan yang dapat dimanfaatkan maka dapat dibuat gambar rangkaian seperti berikut yaitu dengan memasang resistor dan op-amp jenis *field effect transistor*.



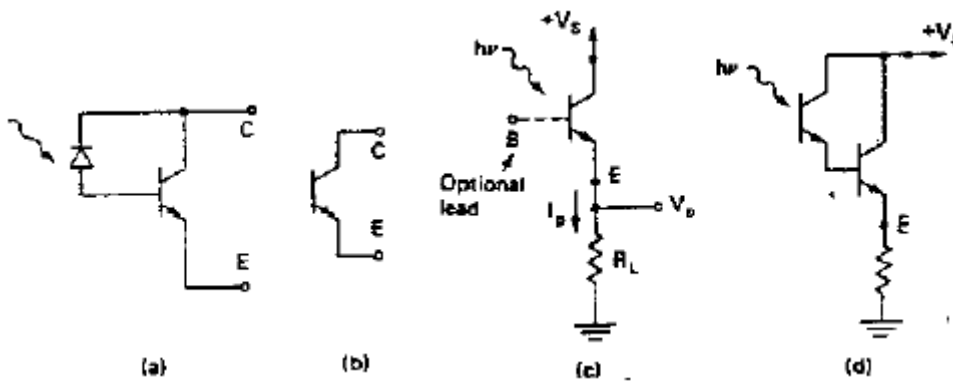
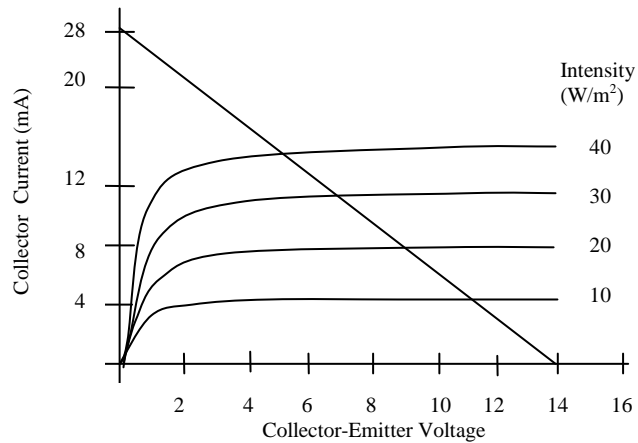
Gambar 4.5. Rangkaian pengubah arus ke tegangan

4.3. Photo Transistor

Sama halnya dioda foto, maka transistor foto juga dapat dibuat sebagai sensor cahaya. Teknis yang baik adalah dengan menggabungkan dioda foto dengan transistor foto dalam satu rangkain.

- Karakteristik transistor foto yaitu hubungan arus, tegangan dan intensitas foto
- Kombinasi dioda foto dan transistor dalam satu chip

- Transistor sebagai penguat arus
- Linieritas dan respons frekuensi tidak sebaik dioda foto

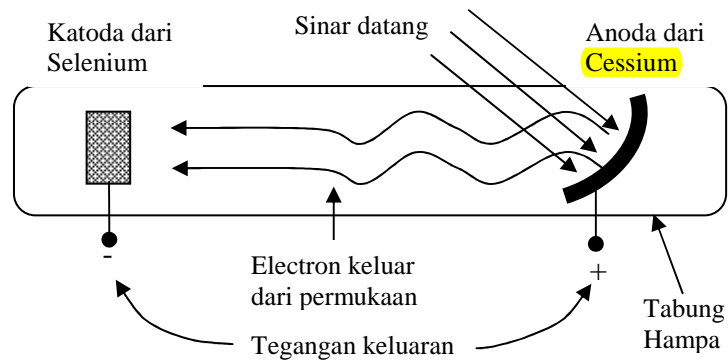


Gambar 4.6. Karakteristik transistor foto, (a) sampai (d) rangkaian uji transistor foto

4.4. Sel Photovoltaik

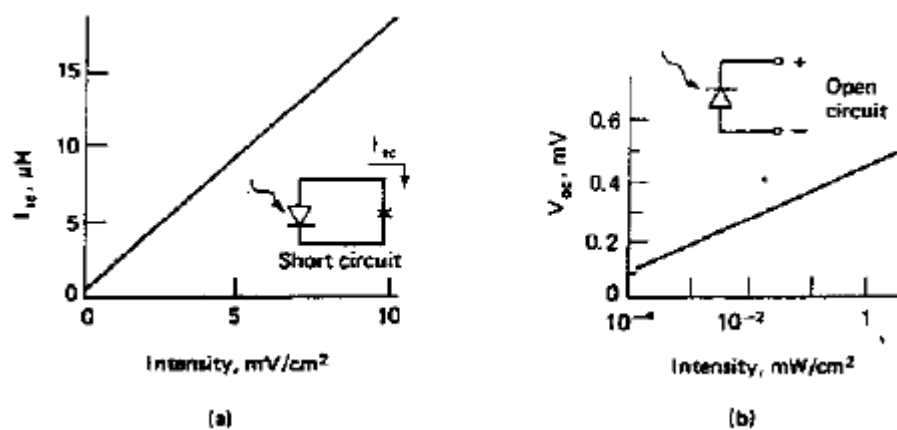
Efek sel photovoltaik terjadi akibat lepasnya elektron yang disebabkan adanya cahaya yang mengenai logam. Logam-logam yang tergolong golongan 1 pada sistem periodik unsur-unsur seperti **Lithium, Natrium, Kalium, dan Cesium** sangat mudah melepaskan elektron valensinya. Selain karena reaksi redoks, elektron valensi logam-logam tersebut juga mudah lepas oleh adanya cahaya yang mengenai permukaan logam tersebut. **Diantara logam-logam diatas Cesium adalah logam yang paling mudah melepaskan elektronnya, sehingga lazim digunakan sebagai foto detektor.**

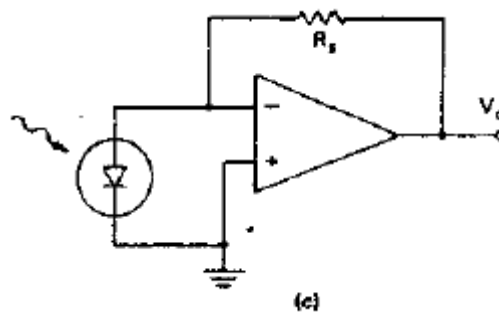
Tegangan yang dihasilkan oleh sensor foto voltaik adalah sebanding dengan frekuensi gelombang cahaya (sesuai konstanta Plank $E = h.f$). Semakin kearah warna cahaya biru, makin tinggi tegangan yang dihasilkan. Tingginya intensitas listrik akan berpengaruh terhadap arus listrik. Bila foto voltaik diberi beban maka arus listrik dapat dihasilkan adalah tergantung dari intensitas cahaya yang mengenai permukaan semikonduktor.



Gambar 4.7. Pembangkitan tegangan pada Foto volatik

Berikut karakteristik dari foto voltaik berdasarkan hubungan antara intensitas cahaya dengan arus dan tegangan yang dihasilkan.

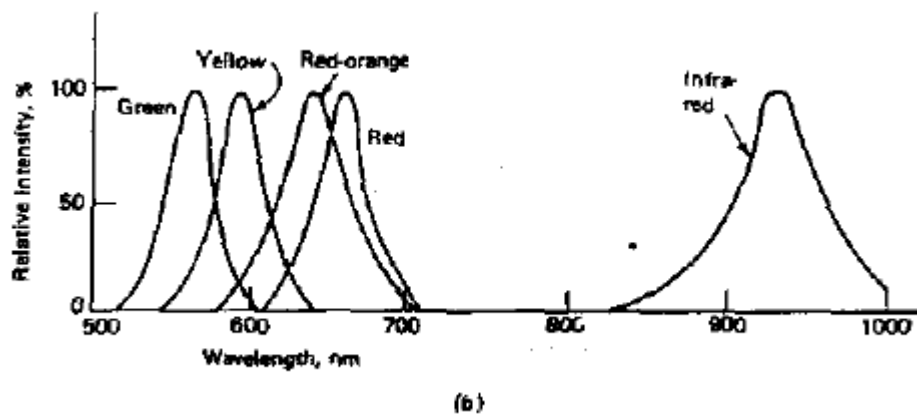
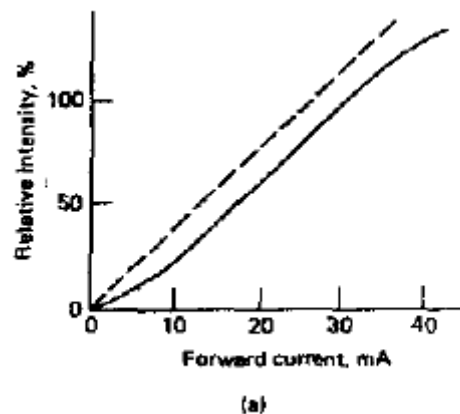


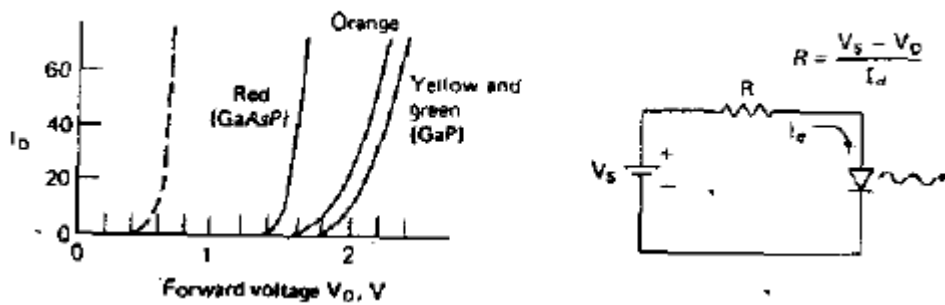


Gambar 4.8. (a) & (b) Karakteristik Intensitas vs Arus dan Tegangan dan (c) Rangkaian penguat tegangan.

4.5. Light Emitting Diode (LED)

- Prinsip kerja kebalikan dari dioda foto
- Warna (panjang gelombang) ditentukan oleh band-gap
- Intensitas cahaya hasil berbanding lurus dengan arus
- Non linieritas tampak pada arus rendah dan tinggi
- Pemanasan sendiri (*self heating*) menurunkan efisiensi pada arus tinggi





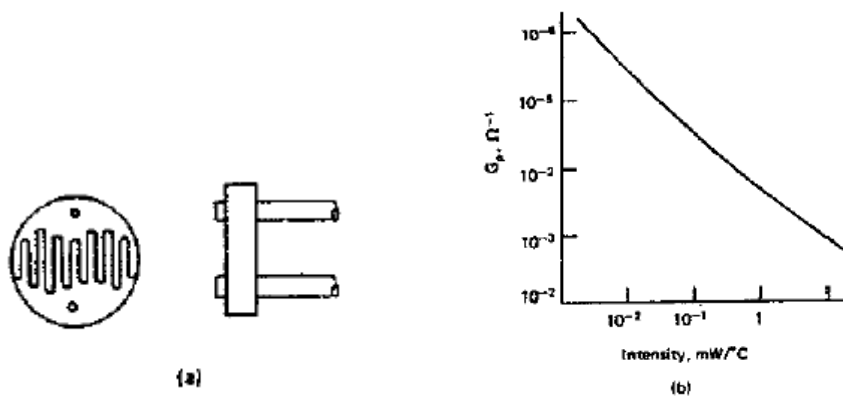
Gambar 4.9. Karakteristik LED

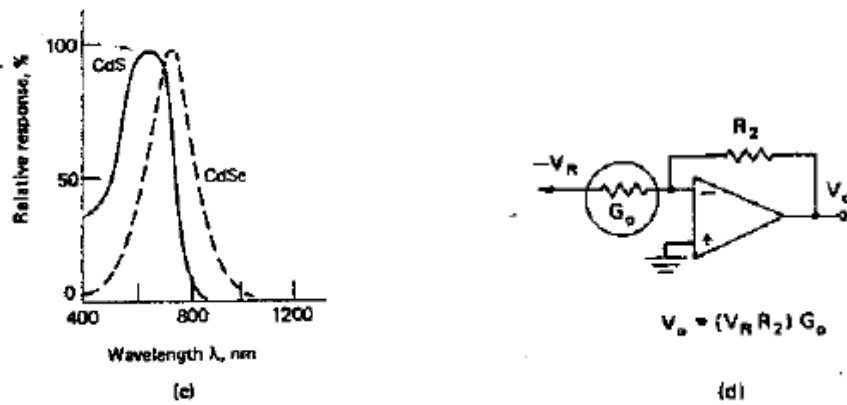
• **Karakteristik Arus Tegangan**

- Mirip dengan dioda biasa
- Cahaya biru nampak pada tegangan 1,4 – 2,7 volt
- Tegangan *threshold* dan energi foton naik menurut energi band-gap
- Junction mengalami kerusakan pada tegangan 3 volt
- Gunakan resistor seri untuk membatasi arus/tegangan

4.6. Photosel

- **Konduktansi** sebagai fungsi intensitas cahaya masuk
- **Resistansi** berkisar dari 10MW (gelap) hingga 10W (terang)
- Waktu respons lambat hingga 10ms
- Sensitivitas dan stabilitas tidak sebaik dioda foto
- Untuk ukuran besar lebih murah dari sel fotovoltaik
- Digunakan karena **biaya murah**

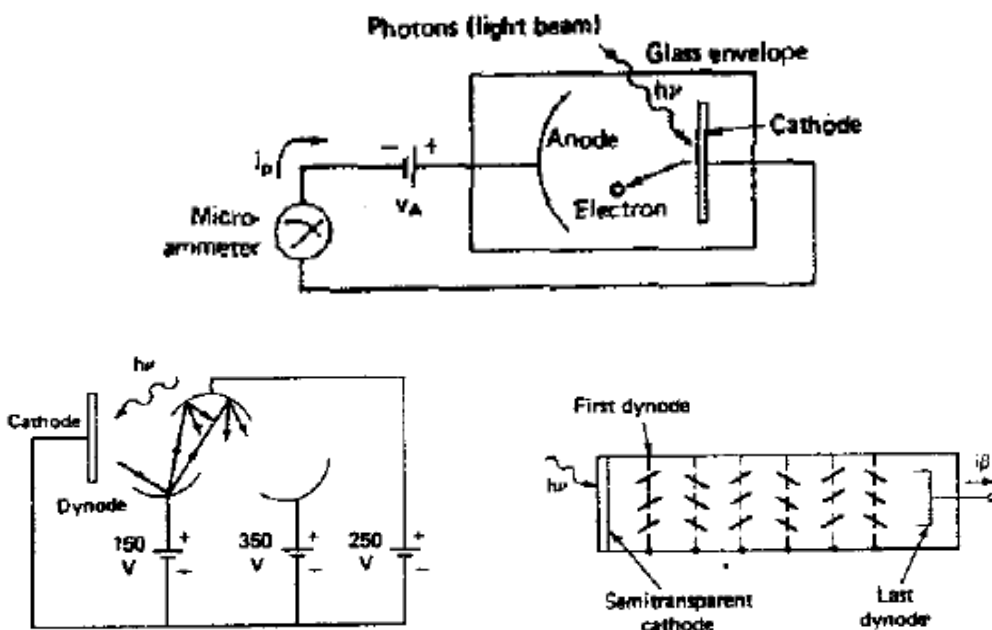




Gambar 4.10. Konstruksi dan Karakteristik Fotosel

4.7. Photomultiplier

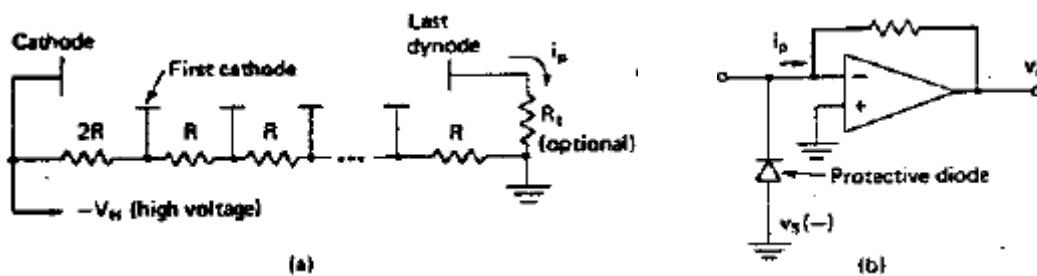
- Memanfaatkan efek fotoelektrik
- Foton dengan energi lebih tinggi dari *workfunction* melepaskan elektron dari permukaan katoda
- Elektron dikumpulkan (dipercepat) oleh anoda dengan tegangan (tinggi)
- Multiplikasi arus (elektron) diperoleh dengan dynode bertingkat
- Katoda dibuat dari bahan semi transparan



Gambar 4.11. Konstruksi Photomultiplier

- **Rangkaian untuk Photomultiplier**

- Perbedaan tegangan (tinggi) tegangan katoda (negatif) dan dynode(positif)
- Beban resistor terhubung pada dynoda
- Common (ground) dihubungkan dengan terminal tegangan positif catu daya
- Rangkaian koverter arus-tegangan dapat digunakan
- Dioda ditempatkan sebagai *surge protection*



Gambar 4.12. Rangkaian Ekuivalen dan uji Photomultiplier

- **Pemanfaatan**

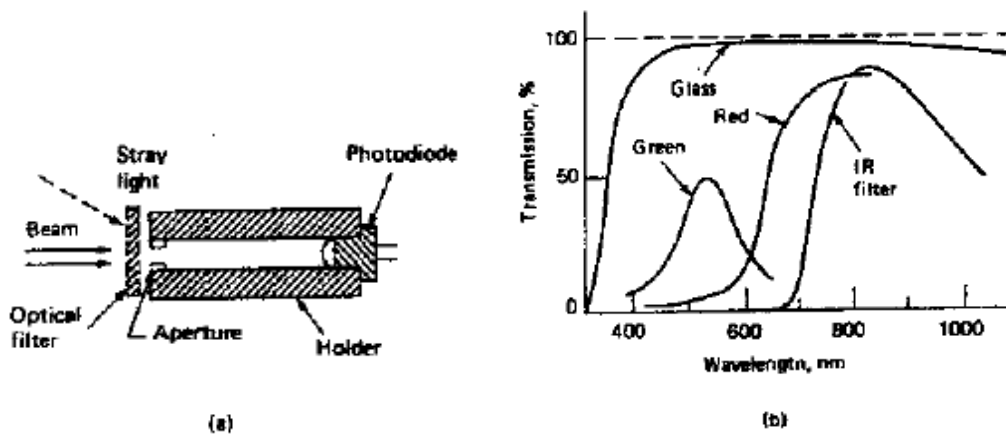
- Sangat sensitif, dapat digunakan sebagai penghitung pulsa
- Pada beban resistansi rendah 50-1000 W, lebar pulsa tipikal 5-50 ns
- Gunakan peak detektor untuk mengukur tingkat energi

- **Kerugian**

- Mudah rusak bila terekspos pada cahaya berlebih (terlalu sensitif)
- Perlu catu tegangan tinggi
- Mahal

4.8. Lensa Dioda Photo

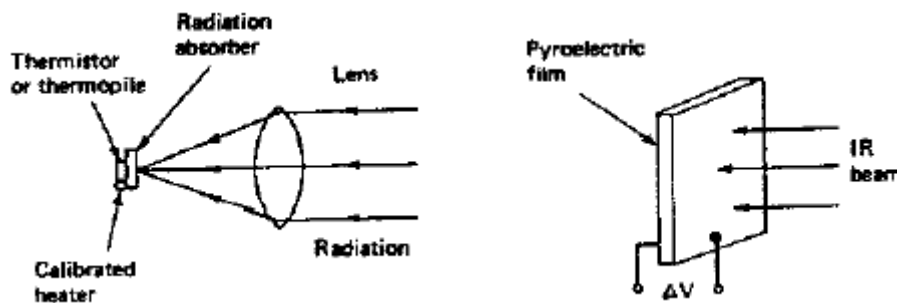
- Lensa dimanfaatkan untuk **memfokuskan** atau menyebarkan cahaya
- Lensa detektor cahaya sebaiknya ditempatkan dalam selonsong dengan filter sehingga hanya menerima cahaya pada satu arah dan panjang gelombang tertentu saja (misal menghindari cahaya lampu TL dan sinar matahari)
- Gunakan modulasi bila interferensi tinggi dan tidak diperlukan sensitivitas tinggi



Gambar 4.13. Kontruksi dan karakteristik lensa dioda foto

4.9. Pyrometer Optis dan Detektor Radiasi Thermal

- Salah satu sensor radiasi elektro magnetik: **flowmeter**
- Radiasi dikumpulkan dengan lensa untuk diserap pada bahan penyerap radiasi
- Energi yang terserap menyebabkan pemanasan pada bahan yang kemudian diukur temperaturnya menggunakan **thermistor, termokopel** dsb
- Sensitivitas dan respons waktu buruk, akurasi baik karena mudah dikalibrasi (dengan pembanding panas standar dari resistor)
- Lensa dapat digantikan dengan cermin

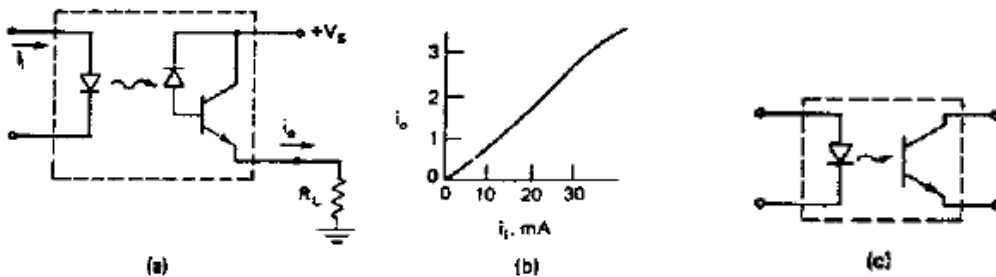


Gambar 4.14. Instalasi Pyroelektrik

- Detektor sejenis: film **pyroelektrik**
- Dari bahan sejenis piezoelektrik yang **menghasilkan tegangan akibat pemanasan**
- Hanya ber-respons pada perubahan bukan DC
- **Pirometer optik dapat digunakan untuk mengukur atau mendeteksi total radiation dan monochromatic radiation.**

4.10. Isolasi Optis dan Transmitter-Receiver serat optik

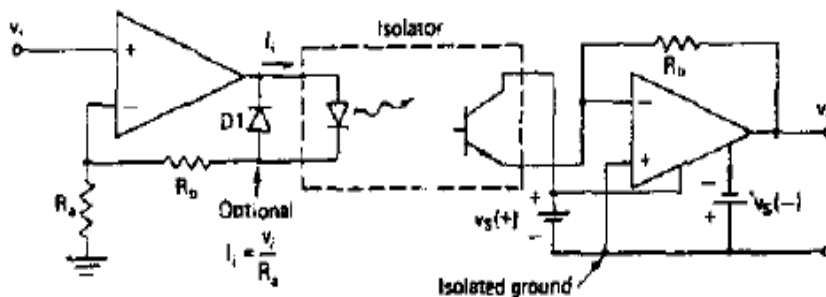
- Cahaya dari LED dan diterima oleh dioda foto digunakan sebagai pembawa informasi menggantikan arus listrik
- Keuntungan: isolasi listrik antara dua rangkaian (tegangan tembus hingga 3kV)
- Dimanfaatkan untuk *safety* dan pada rangkaian berbeda ground
- Hubungan input-output cukup linier, respons frekuensi hingga di atas 1 MHz

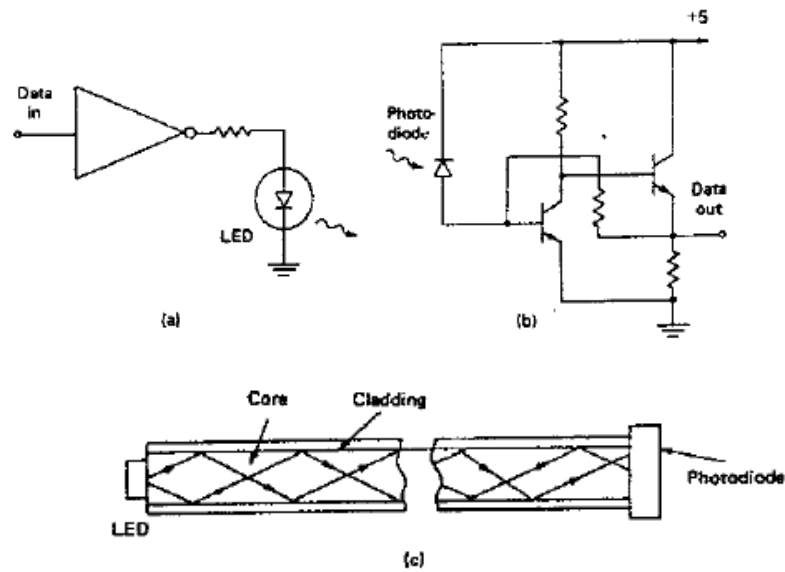


Gambar 4.15. Kontruksi dan karakteristik lensa dioda foto

• Rangkaian untuk isolasi elektrik

- Driver: konverter tegangan ke arus, receiver: konverter arus ke tegangan
- Hanya sinyal positif yang ditransmisikan
- Dioda dan resistor digunakan untuk membatasi arus
- Penguatan keseluruhan bergantung temperatur (tidak ada umpan balik)
- Untuk komunikasi dengan serat optik media antara LED dan dioda foto dihubungkan dengan serat optik

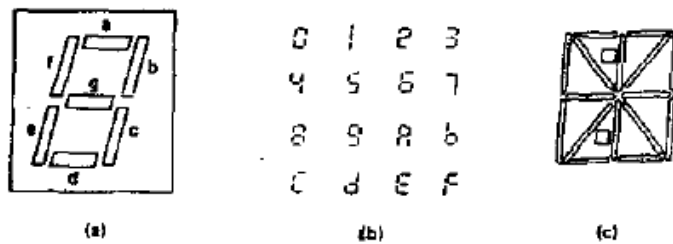


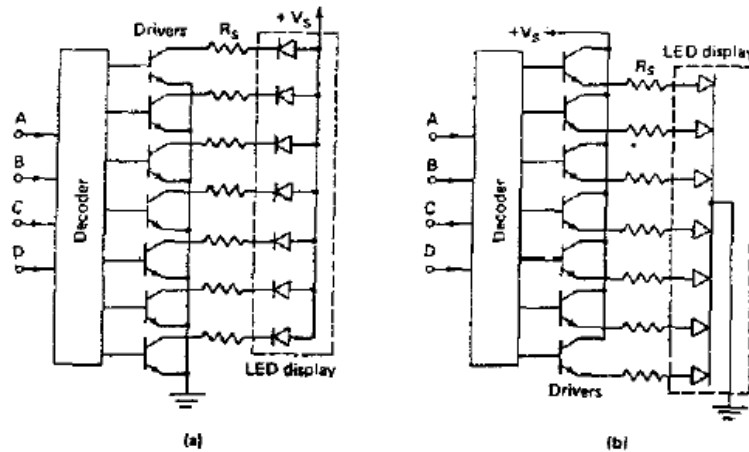


Gambar 4.16. Rangkaian isolasi elektrik menggunakan serat optik

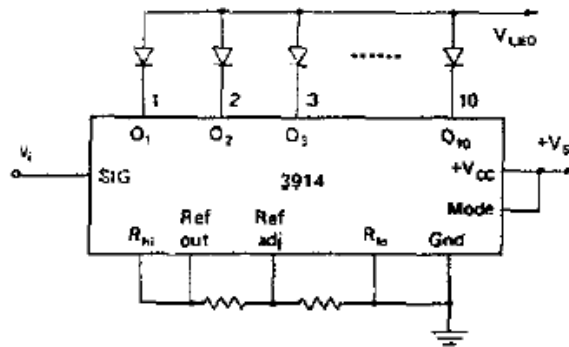
4.11. Display Digital dengan LED

- Paling umum berupa peraga 7 segmen dan peraga heksadesimal , masing-masing segmen dibuat dari LED
- Hubungan antar segmen tersedai dalam anoda atau katoda bersama (common anode atau common cathode)
- Resistor digunakan sebagai pembatas arus 100-470 W
- Tersedia pula dengan dekoder terintegrasi





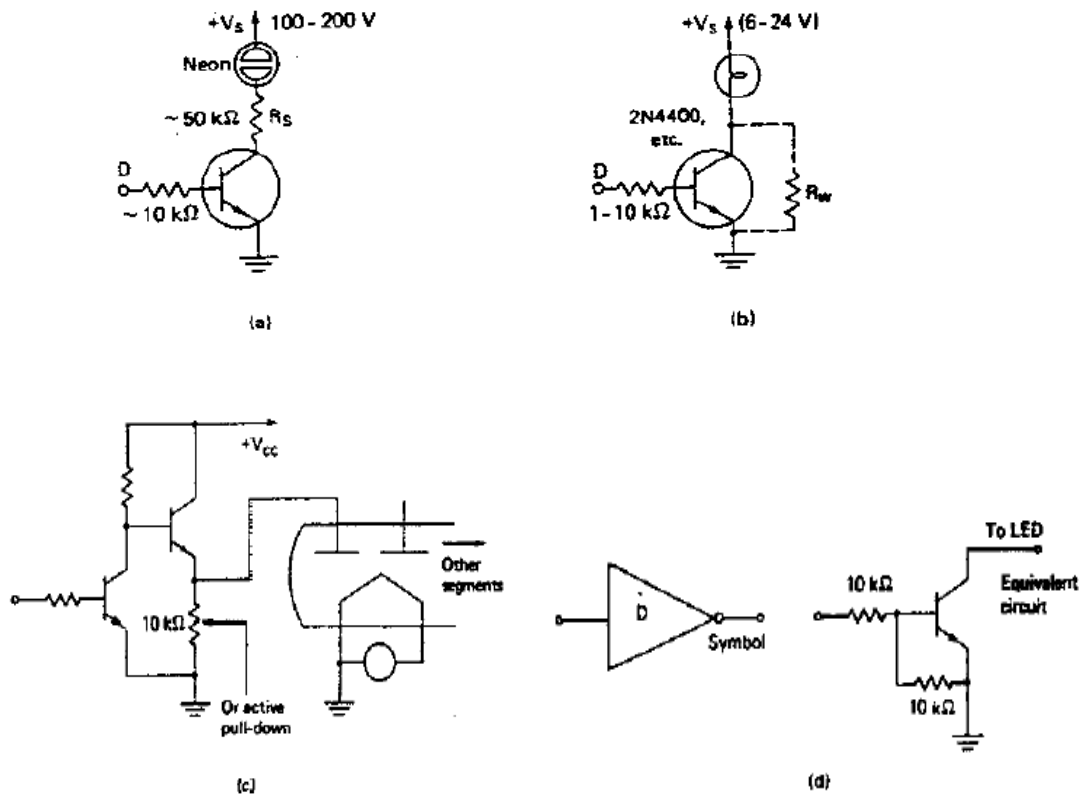
Gambar 4.17. Seven segment dan rangkaian uji



Gambar 4.18. LED bar display pengganti VU meter pada amplifier

• Peraga Arus dan Tegangan Tinggi

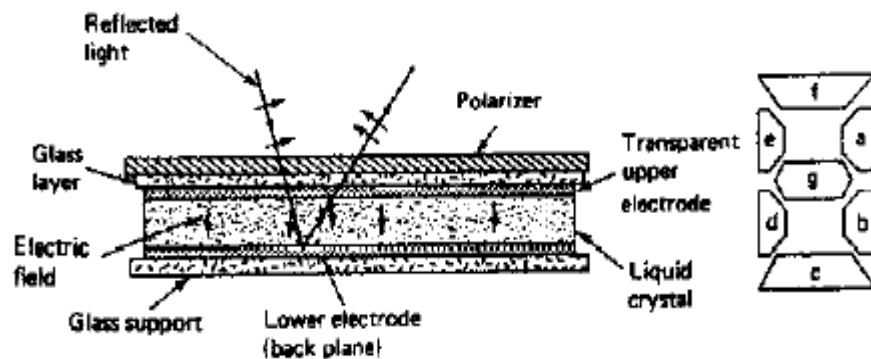
- Peraga 7 segmen berupa gas discharge, neon atau lampu pijar
- Cara penggunaan mirip dengan peraga 7 segmen LED tetapi tegangan yang digunakan tinggi
- Untuk neon dan lampu pijar dapat digunakan transistor dan resistor untuk membatasi arusnya
- Untuk lampu pijar arus kecil diberikan pada saat off untuk mengurangi daya penyalan yang tinggi
- Vacuum fluorescent display (VFD) menggunakan tegangan 15-35 volt di atas tegangan filament
- Untuk LED dengan arus tinggi dapat digunakan driver *open collector* yang umumnya berupa *current sink*



Gambar 4.19. Seven segment neon menggunakan tegangan tinggi

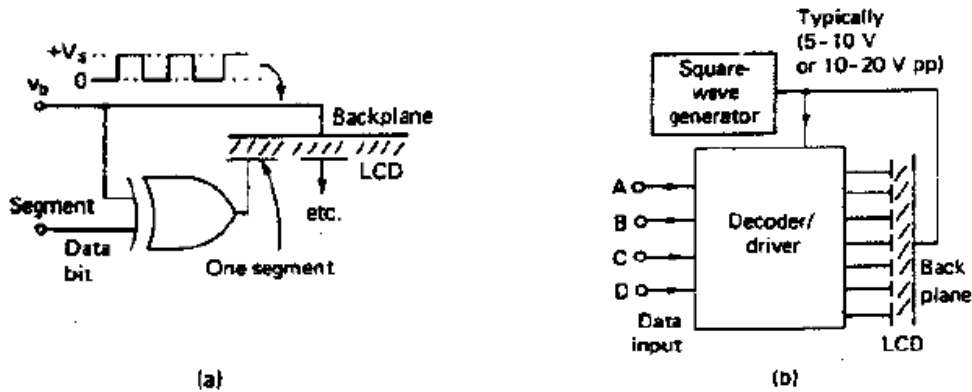
4.12. Liquid Crystal Display (LCD)

- Menggunakan molekul asimetrik dalam cairan organic transparan
- Orientasi molekul diatur dengan medan listrik eksternal
- *Polarizer* membatasi cahaya lewat hanya untuk polarisasi optik tertentu saja, cahaya ini dapat kembali lolos setelah dipantulkan bila polarisasinya tidak berubah
- Medan listrik pada *liquid crystal* mengubah polarisasi 90° , sehingga pantulan tidak dapat melewati *polarizer* (tampak gelap).



Gambar 4.20. Kontruksi Liquid Crystal Display (LCD)

- Tegangan pembentuk medan listrik dibuat intermiten untuk memperpanjang umur pemakaian



Gambar 4.21. Rangkaian uji Liquid Crystal Display (LCD)

Contoh Soal

1. Sebuah sumber gelombang mikro menghasilkan pulsa radiasi 1 GHz dan total energi 1 Joule. Tentukan berapa energi per photon dihasilkan, dan jumlah photon dalam pulsa.

Jawab:

(a) Energi per photon : $W_p = h \cdot f$ (J)
 $W_p = (6,63 \times 10^{-34} \text{ J/s}) (10^9/\text{s})$
 $= 6,63 \times 10^{-25} \text{ J}$

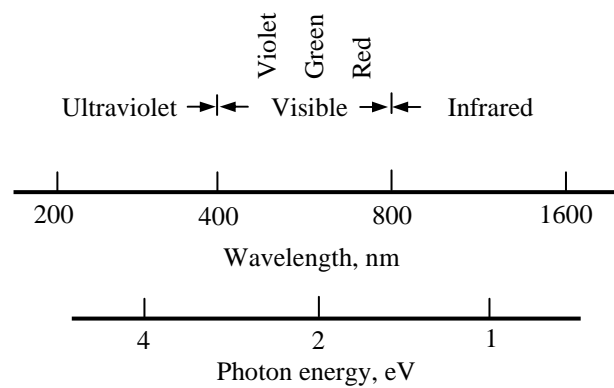
(b) Jumlah photon : $N = \frac{W}{W_p}$

$$N = \frac{1\text{J}}{6.63 \times 10^{-25} \text{ J / photon}} = 1,5 \times 10^{24} \text{ photons}$$

2. Apa yang dimaksud dengan spektrum warna yang visible.

Jawab:

Spektrum warna gelombang EM (cahaya) yang visible adalah spektrum warna cahaya yang dapat dilihat oleh mata biasa, warna ini berada pada daerah panjang gelombang (λ) = 500 nm dengan energi photon 2,48 eV.



3. Sebutkan beberapa buah contoh sensor cahaya yang anda ketahui

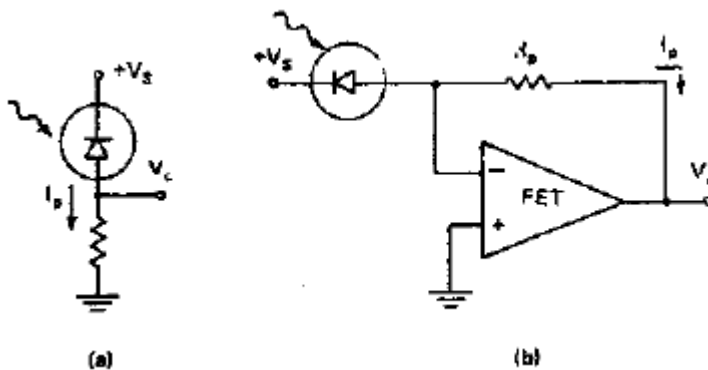
Jawab:

Sensor cahaya antara lain: Dioda foto, transistor foto, foto cell, photovolatik, photo multiplier, LED, LDR, pirometer optik

4. Bagaimana merubah arus menjadi tegangan pada sensor dioda foto

Jawab:

Rangkaian untuk merubah arus menjadi tegangan pada dioda foto adalah:



$$V_o = \frac{R_2}{R_1} \times V_s$$

5. Apa kekurangan yang ada pada photomultiplier

Jawab:

- Kerugian
 - Mudah rusak bila terekspos pada cahaya berlebih (terlalu sensitif)
 - Perlu catu tegangan tinggi
 - Mahal

Latihan

1. Apa kelebihan foto transistor dibandingkan foto dioda, jelaskan
2. Bagaimana proses perubahan energi cahaya menjadi energi listrik pada photomultiplier, jelaskan
3. Apa yang dimaksud dengan pirometer optik
4. Apakah fiber optic dapat digunakan sebagai saluran energi photon dari sumber ke beban, jelaskan

Kegiatan

Diskusikan bersama kelompok masing untuk merancang suatu sistem kendali menggunakan photon energi sebagai input kendali. Selanjutnya buat laoprannya.

Rangkuman

Pada bab sensor cahaya ini dipelajari tentang; divais elektrooptis, Dioda Foto, Transistor Foto, Sel Fotovoltaik, Light Emitting Diode (LED), Fotosel Semikonduktor, Photomultiplier, Lensa Dioda Foto, Pirometer Optis dan Detektor Radiasi Thermal, Isolasi Optis dan Transmitter-Receiver Serat Optik, Display Digital dengan LED, Liquid Crystal Display (LCD) dengan contoh-contoh rangkaiannya.

Review

1. Sebutkan spektrum warna cahaya yang anda ketahui
2. Satu spectrum warna cahaya memiliki apa saja
3. Apa sebabnya bahan semikonduktor dapat dijadikan sebagai bahan dasar sensor cahaya seperti dioda, transistor dsb.
4. Apa kelebihan pirometer optik digunakan sebagai sensor cahaya
5. Apa saja yang dapat dijadikan sebagai sumber-sumber cahaya untuk pengukuran, pengontrolan dan teknik kompensasi