



REPUBLIK INDONESIA  
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA

# SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC00202046860, 6 November 2020

**Pencipta**

Nama : **Dr. Sri Ratna Sulistiyanti, Dr. Eng. Sri Purwiyanti, Ph.D. dkk**

Alamat : Perumahan Rajabasa Indah, Jl. Cancer, Bandar Lampung, LAMPUNG, 35144

Kewarganegaraan : Indonesia

**Pemegang Hak Cipta**

Nama : **Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Lampung**

Alamat : Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Gedungmeneng, Bandar Lampung, LAMPUNG, 35145

Kewarganegaraan : Indonesia

Jenis Ciptaan : **Buku**

Judul Ciptaan : **SENSOR Dan PRINSIP KERJANYA**

Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia : 30 Juli 2020, di Bandar Lampung

Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak Ciptaan tersebut pertama kali dilakukan Pengumuman.

Nomor pencatatan : 000214276

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.  
Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.



a.n. MENTERI HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA  
DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL

Dr. Freddy Harris, S.H., LL.M., ACCS.  
NIP. 196611181994031001

**LAMPIRAN PENCIPTA**

No	Nama	Alamat
1	Dr. Sri Ratna Sulistiyanti	Perumahan Rajabasa Indah, Jl. Cancer
2	Dr. Eng. Sri Purwiyanti, Ph.D.	Kav. DKI Blok 91
3	Gurum Ahmad Pauzl. M.T.	Jl. Inpres Way Wo



# SENSOR & PRINSIP KERJANYA



**Sri Ratna Sulistiyanti**, dilahirkan di Magelang, Jawa Tengah, 21 Oktober 1965. Ia menyelesaikan S-1 dari Jurusan Teknik Nuklir, Universitas Gadjah Mada (1989), meraih gelar Magister Teknik dari Jurusan Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada (2000), dan Gelar Doktor Teknik Elektro, Universitas Gadjah Mada (2011). Ia bekerja sebagai Dosen di Jurusan Teknik Fisika, FTI-ITS (1989-1991), Dosen Jurusan Teknik Mesin, Universitas Bandar Lampung (1993-1995). Sejak tahun 1995 hingga sekarang, ia aktif mengajar di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, mengampu mata kuliah Perancangan Sistem Otomatis, Sensor dan Transduser, Teknologi Sensor dan Aktuator.



**Sri Purwiyanti** lahir di Jakarta tanggal 4 Oktober 1973. Menjalani studi sampai jenjang S1 di Jakarta pada tahun 1996 di bidang elektronika. Gelar M.T didapatkan dari Pascasarjana Universitas Gajahmada jurusan Teknik Elektro pada tahun 2000. Program doktoral dijalani melalui program double degree pada Universitas Indonesia dan Shizuoka University, selesai tahun 2015 dengan peminatan sensor divais dan nanoelektronika.



**Gurum Ahmad Pauzi**, lahir di Air Naningan Kab. Tanggamus, 10 Oktober 1980. Menyelesaikan studi S1 di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung dengan bidang Keahlian Fisika Instrumentasi (1998-2003), melanjutkan Studi S2 di Program studi Instrumentasi dan Kontrol FTI ITB (2008-2010). Aktif mengajar pada jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung berbagai matakuliah, yaitu Elektronika Dasar, Mikrokontroler, Antarmuka Komputer, dan Sistem Akuisisi data, Sistem transmisi data, Sistem Pengaturan, Sistem Kontrol Otomatis, dan Sensor dan transduser.

Sensor merupakan salah satu bagian penting dalam suatu sistem instrumentasi. Hal penting yang dipelajari dalam topik ini adalah Sensor dan Transduser, Sensor Berprinsip Kapasitif, Sensor Menggunakan Prinsip Magnetik, Sensor Berprinsip Hambatan, dan Sensor Berprinsip Piezoelektrik.

Buku ini disusun dengan pendekatan konsep sederhana tentang sensor; dan dapat digunakan untuk mendukung perkuliahan Pengembangan dan Penerapan Sensor; Teknologi Sensor dan Aktuator, Sensor dan Transduser, dan bagi masyarakat yang ingin mempelajari secara cepat.



penerbit pusaka  
pusakamedia@gmail.com  
@pusaka\_media



SENSOR DAN PRINSIP KERJANYA

Sri Ratna Sulistiyanti | Sri Purwiyanti | Gurum Ahmad Pauzi



Sri Ratna Sulistiyanti  
Sri Purwiyanti  
Gurum Ahmad Pauzi

# SENSOR DAN PRINSIP KERJANYA

Hak cipta pada penulis  
Hak penerbitan pada penerbit  
Tidak boleh diproduksi sebagian atau seluruhnya dalam bentuk apapun  
Tanpa izin tertulis dari pengarang dan/atau penerbit

**Kutipan Pasal 72 :**  
Sanksi pelanggaran Undang-undang Hak Cipta (UU No. 10 Tahun 2012)

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal (49) ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu Ciptaan atau hasil barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

# SENSOR DAN PRINSIP KERJANYA

Sri Ratna Sulistiyanti  
Sri Purwiyanti  
Gurum Ahmad Pauzi



PUSAKA MEDIA

Perpustakaan Nasional RI:  
Katalog Dalam Terbitan (KDT)

**SENSOR DAN PRINSIP KERJANYA**

**Penulis:**

Sri Ratna Sulistiyanti  
Sri Purwiyanti  
Gurum Ahmad Pauzi

**Desain Cover & Layout**

PusakaMedia Design

x + 88 hal : 15,5 x 23 cm  
Cetakan, Juli 2020

**ISBN: 978-623-6569-12-2**

Penerbit

**PUSAKA MEDIA**

**Anggota IKAPI**

**No. 008/LPU/2020**

**Alamat**

Jl. Endro Suratmin, Pandawa Raya. No. 100  
Korpri Jaya Sukarame Bandarlampung  
082282148711

email : [cspusakamedia@yahoo.com](mailto:cspusakamedia@yahoo.com)

Website : [www.pusakamedia.com](http://www.pusakamedia.com)

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian  
atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit

# PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat, karunia, kekuatan juga kesabaran kepada penulis sehingga buku Sensor dan Prinsip Kerjanya dapat diselesaikan dengan baik.

Buku ini disusun untuk membantu mahasiswa dalam mempelajari, memahami, dan mengembangkan kajian-kajian dalam masalah perancangan sistem instrumentasi maupun dibidang otomasi. Dalam penyajiannya, penulis berusaha menjelaskan dan membahas setiap topik bahasan, sehingga setiap aspek tidak terkonsentrasi pada satu sensor, akan tetapi juga secara terintegrasi.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Prof. Dr. Ahmad Saudi Samosir, S.T., M.T. yang telah memberikan masukan materi hingga terselesaikannya buku ini.
2. Semua pihak yang terlibat dan tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Semoga buku ini bermanfaat bagi kita semua, aamiin yaa robbal'alamin.

Bandar Lampung, 30 Juni 2020

Tim Penulis

# DAFTAR ISI

<b>PRAKATA</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	viii
<b>BAB I. SENSOR DAN TRANSDUSER</b> .....	1
1.1 Pengukuran Variabel Fisika .....	1
1.2 Pengamatan Tidak Langsung .....	2
1.3 Pengertian Sensor dan Transduser .....	3
1.4 Klasifikasi Sensor dan Transduser .....	6
<b>BAB II. SENSOR BERPRINSIP KAPASITIF</b> .....	10
2.1 Pendahuluan .....	10
2.2 Muatan, medan, dan Potensial Listrik.....	11
2.3 Kapasitansi.....	19
2.3.1 Kapasitor .....	21
2.3.2 Konstanta Dielektrik.....	23
<b>BAB III. SENSOR MENGGUNAKAN PRINSIP MAGNETIK</b> .....	28
3.1 Magnet .....	28
3.2 Hukum Faraday .....	31
3.3 Magnet Permanen .....	34
3.4 Coil dan Solenoid .....	36
3.5 Induksi .....	37
3.5.1 Hukum Lenz .....	43
3.5.2 Arus Eddy.....	43

<b>BAB IV. SENSOR BERPRINSIP HAMBATAN .....</b>	<b>45</b>
4.1 Pengertian Hambatan .....	45
4.2 Tahanan Spesifik .....	48
4.3 Sensitivitas Suhu Resistor .....	50
4.4 Sensitivitas Regangan Resistor .....	53
4.1 Sensitivitas Kelembaban Resistor .....	55
<b>BAB V. SENSOR DENGAN PRINSIP PIEZOELEKTRIK.....</b>	<b>57</b>
5.1 Efek piezoelektrik .....	57
5.2 Bahan Piezoelektrik Keramik .....	61
5.3 Film Piezoelektrik Polimer .....	66
5.4 Efek Piroelektrik.....	68
5.5 Gelombang Suara.....	76
<b>Daftar Pustaka .....</b>	<b>81</b>

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Load cell (sensor berat)(sumber: Indiamart.com)...	4
Gambar 1. 2.	Ilustrasi sensor dan transducer .....	5
Gambar 1. 3	Sensor kompleks pdalam endeteksiian gerak obyek dengan fiber optik.....	5
Gambar 1. 4	Klasifikasi sensor Pasif dan Aktif (sumber <a href="http://elektronika-dasar.web.id/teori-sensor-dan-transduser-elektronika">http://elektronika-dasar.web.id/teori-sensor-dan-transduser-elektronika</a> ).....	5
Gambar 1. 5	Sensor Cahaya .....	5
Gambar 1. 6	Piezoelectric .....	5
Gambar 1. 7	Sensor LVDT mendeteksi perubahan kecepatan aliran venturi.....	5
Gambar 1. 8	Kapasitansi sensor .....	9
Gambar 2. 1	Muatan uji positif di sekitar objek bermuatan (a) dan medan listrik benda bulat (b).....	13
Gambar 2. 2	Medan listrik di sekitar garis tak terbatas (a) dan lembaran tak terbatas dekat (b). Konduktor menunjuk konsentris medan listrik (c).....	15
Gambar 2. 3	Dipol listrik (a); dipol listrik di medan listrik dikenakan gaya rotasi (b).....	17
Gambar 2.4	Muatan listrik dan tegangan mendefinisikan kapasitansi antara dua benda (a); kapasitor pelat paralel (b).....	20
Gambar 2. 5	Kapasitor silinder (a); sensor perpindahan kapasitif (b).....	22
Gambar 2. 6	Polarisasi dielektrik. Dipol berorientasi acak tanpa medan listrik eksternal (a); dipol sejajar dengan medan listrik (b).....	23
Gambar 2. 7	Konstanta air dielektrik sebagai fungsi suhu .....	25

Gambar 2. 8	Sensor level air kapasitif (a); kapasitansi sebagai fungsi level air (b) (dimensi sensor adalah $a = 10$ mm, $b = 12$ mm, $H = 200$ mm, cairan air) .....	26
Gambar 2. 9	Fungsi transfer sensor kelembaban relatif kapasitif.....	27
Gambar 3. 1	Uji magnet dalam bidang magnet (a); jarum kompas berputar sesuai dengan arah arus listrik (b).....	29
Gambar 3. 2	Arus listrik menghasilkan medan magnet melingkar di sekitar konduktor.....	30
Gambar 3. 3.	perpindahan elektron menetapkan medan magnet (a); superposisi vektor bidang menghasilkan medan magnet gabungan magnet (b).....	31
Gambar 3. 4	Muatan positif yang diproyeksikan melalui medan magnet mengalami gaya samping (a); gerakan spiral muatan listrik dalam medan magnet (b); magnetoresistor (c), dan ketergantungan resistensi pada medan magnet dan arus (d).....	36
Gambar 3. 5	Solenoid atau koil.....	
Gambar 3. 6	Contoh sensor dengan koil. Koil geometri yang berubah (a), solenoid dengan inti bergerak (b), dua koil bergerak (c), dan koil induktansi timbal balik variabel variabel (d).....	42
Gambar 4. 1	Tegangan melintasi bahan yang memproduksi arus listrik.....	46
Gambar 4. 2	Resistivitas spesifik tungsten sebagai fungsi temperatur .....	50
Gambar 4. 3	Karakteristik suhu-tahan untuk dua termistor dan Pt RTD ( $R_0 = 1$ k); catat suhu referensi yang berbeda untuk termistor ( $t_0 = 25$ C) dan RTD ( $t_0 = 0$ C) .....	52
Gambar 4. 4	Strain mengubah geometri konduktor dan ketahanannya.....	54
Gambar 4. 5	Hygristor design (a) and its transfer function (b).....	56
Gambar 5. 1	Efek Piezoelectric dalam kristal kuarsa.....	57



# BAB I.

## SENSOR DAN TRANSDUSER

### 1.1 Pengukuran Variabel Fisika

Pengukuran adalah proses untuk mendapatkan data terhadap karakteristik serta perilaku suatu obyek, dimana data yang diamati sesuai dapat disepadankan dengan ukur standar yang berlaku disuatu daerah atau terstandar secara nasional dan internasional. Pengukuran dapat dilakukan terhadap berbagai fisika dalam bidang-bidang eksakta, selama dimensi variabel tersebut dapat diukur dengan alat ukur terstandar tersebut maka variabel tersebut dikatakan sebagai variabel fisika.

Variabel fisika suatu obyek yang statis ataupun dinamis dapat dinyatakan dalam Satuan Internasional (SI) baik Satuan Pokok dan Satuan Turunan satuan pokok.

**Tabel 1. Satuan Pokok**

<b>Nama Satuan</b>	<b>Simbol Satuan</b>	<b>Nama Besaran</b>
Meter	<b>m</b>	Panjang
Kilogram	<b>kg</b>	Massa
Sekon	<b>s</b>	Waktu
Ampere	<b>A</b>	Arus Listrik
Kelvin	<b>K</b>	Temperatur Termodinamik
Mol	<b>mol</b>	Jumlah Zat
Candela	<b>cd</b>	Intensitas Cahaya

**Tabel 2. Satuan Turunan**

Besaran Turunan	Nama Satuan	Simbol	Dalam Satuan Dasar
Luas	meter persegi	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
Volume	meter kubik	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Kecepatan	meter per sekon	m/s	m/s
Percepatan	meter per sekon Persegi	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
Massa jenis	kilogram per meter kubik	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Gaya	newton	N	kg.m/s <sup>2</sup>
Energi dan usaha	joule	J	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Daya	watt	W	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
Tekanan	pascal	Pa	kg/(m.s <sup>3</sup> )
Frekuensi	hertz	Hz	s <sup>-1</sup> (s pangkat min satu)
Muatan listrik	coulomb	C	A. s
Potensial listrik	volt	V	kg.m <sup>2</sup> /(A.s <sup>3</sup> )
Hambatan listrik	ohm	Ω	kg.m <sup>2</sup> /(A <sup>2</sup> .s <sup>3</sup> )
Kapasitansi	farad	F	A <sup>2</sup> .s <sup>2</sup> /kg.m <sup>2</sup>
Medan magnetik	tesla	T	kg/(A.s <sup>2</sup> )
Fluks magnetik	weber	Wb	kg.m <sup>2</sup> /(A <sup>2</sup> .s <sup>2</sup> )
Induktansi	henry	H	kg.m <sup>2</sup> /(A <sup>2</sup> .s <sup>2</sup> )

## 1.2 Pengamatan Tidak Langsung

Kebutuhan terhadap variabel data suatu obyek kadang tidak dapat dilakukan secara langsung disebabkan berbagai sebab. Hal ini sangat berkaitan dengan keselamatan, waktu, energi dan muatan yang harus dikeluarkan serta upaya menghindari perbedaan persepsi terhadap hasil pengukuran. Seperti pada pengamatan menggunakan panca indra manusia (mata, pendengaran, sentuhan,

rasa pengecap, atau penciuman) karena tidak semua orang memiliki persepsi yang sama terhadap suatu kejadian. Pengukuran pada tempat yang sangat sensitif, dan beresiko maka hal ini tentu sangat berbahaya jika dilakukan dari dekat. Beresiko bisa disebabkan oleh faktor ruang dan tempat pengamatan, variabel ukur yang sangat besar (misalnya tegangan tinggi), jarak tempuh yang jauh, serta posisi yang sulit dijangkau. Pengukuran seperti ini memerlukan alat tertentu yang disebut sebagai instrumentasi pengukuran. Dengan melakukan modifikasi lanjutan maka data pengamatan sudah diterima dalam bentuk tampilan nilai yang terkuantisasi.

Secara umum sistem instrumentasi dikaitkan dengan listrik dan perangkat elektronik, sehingga dikenal sebagai instrumentasi elektronik. Pemanfaatannya tidak hanya pada proses pengukuran laboratorium, pengamatan medan, namun menjadi penting dalam dunia industri. Pada proses di industri diperlukan sistem instrumentasi elektronis untuk melakukan pengendalian terukur terhadap mesin industri. Hal ini bertujuan untuk menjamin agar kualitas hasil produksi akan selalu sama. Variabel yang masuk ke dalam sistem instrumentasi bukan selalu besaran listrik. Namun besaran lain, seperti mekanik, kima, dan proses fisis. Sehingga diperlukan pengubahan besaran tersebut menjadi besaran listrik. Diperlukan perangkat pengubah (*converter*) untuk mengubah yaitu berupa **transduser dan sensor**.

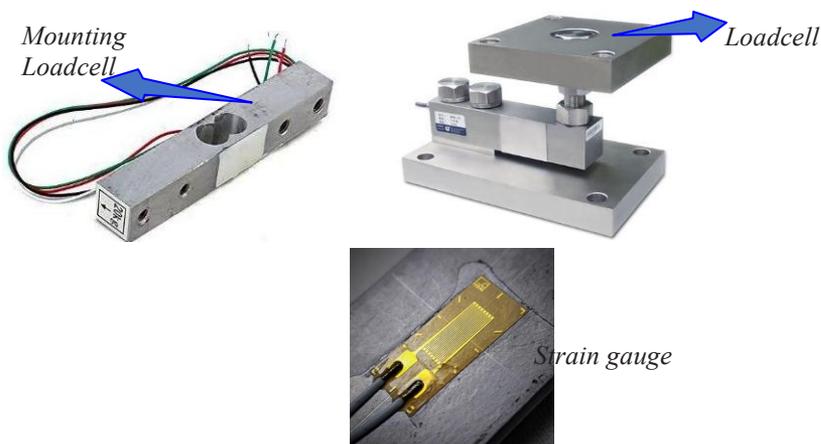
### 1.3 Pengertian Sensor dan Transduser

Sensor adalah sesuatu yang digunakan untuk merasakan adanya perubahan variabel fisika atau kimia. Besaran fisika meliputi Besaran pokok dan satuan turunan sedangkan besaran kimia biasanya melibatkan beberapa reaksi kimia. Contoh sensor kimia adalah sensor pH, sensor Oksigen, sensor ledakan, dan sensor gas. Sedangkan transduser adalah komponen atau material yang mengubah besaran fisika atau kimia tersebut menjadi besaran lain seperti listrik, mekanik, akustik, kimia dan lain-lain.

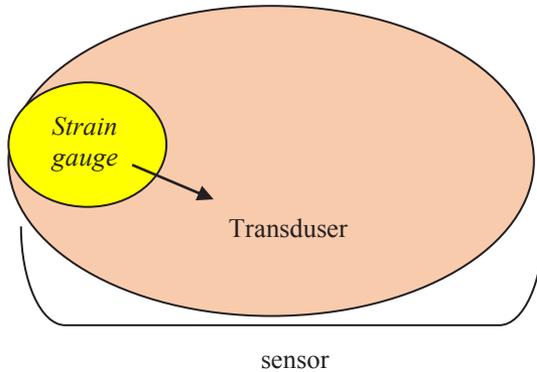
Pada Gambar 1.1, bagian yang dapat merasakan (*sense*) adanya perubahan tekanan akibat beban yang diletakkan di bagian atas adalah batang besi, bagian yang mengubah tekanan yang

menyebabkan pembengkokan besi adalah strain gauge yang ikut merenggang karena media tempatnya menempel membengkok. Sehingga sensor berat adalah loadcell dan transduser listrik adalah strain gauge itu sendiri.

Secara konsep, sensor adalah perangkat yang berfungsi sebagai konverter dari efek nonelektrik seperti efek fisika dan kimia menjadi sinyal listrik. Seringkali diperlukan beberapa langkah untuk melakukan transformasi variabel fisika dengan satuan yang berbeda sebelum sinyal keluaran dengan satuan listrik dapat dihasilkan. Langkah-langkah ini melibatkan perubahan dalam jenis energi atau sifat fisik bahan, di mana pada bagian terakhir (output) harus menghasilkan sinyal listrik ke format yang diinginkan.

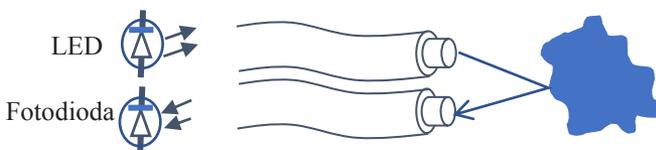


**Gambar 1. 1 Load cell (sensor berat)**  
**(sumber: Indiamart.com)**



**Gambar 1. 2. Ilustrasi sensor dan transducer**

Berdasarkan proses perubahan sinyal, secara umumnya ada dua jenis sensor: Jenis sensor langsung dan kompleks. **Sensor langsung** adalah sensor yang secara langsung dapat mengubah stimulasi nonelektrik menjadi sinyal keluaran listrik. **Sedangkan sensor kompleks** melibatkan banyak rangsangan dan tidak dapat secara langsung dikonversi menjadi listrik, sehingga beberapa langkah konversi diperlukan. Misalnya, pendeteksian perpindahan objek pada kondisi dengan pencahayaan yang buram, maka salah satu pemanfaatan yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan sensor serat optik. Dalam sistem serat optik, cahaya berasal dari sinar lampu pilot (sinyal eksitasi) yang dihasilkan oleh dioda pemancar cahaya (LED), kemudian fluks cahaya memasuki serat optik dan merambat melaluinya hingga keluar menuju objek. Sinar tersebut kemudian dipantulkan oleh permukaan obyek tersebut. Fluks cahaya yang dipantulkan oleh obyek kemudian akan memasuki serat optik penerima dan merambat ke arah fotodioda yang akan mendeteksi dan menghasilkan arus listrik yang mewakili jarak dari ujung optik serat ke objek tersebut.



**Gambar 1. 3 Sensor kompleks dalam pendeteksian gerak obyek dengan fiber optik**

Sensor semacam itu melibatkan transformasi arus listrik menjadi foton, foton melalui beberapa media pembiasan (serat optik), refleksi dari objek, propagasi lagi melalui serat, dan konversi kembali menjadi arus listrik. Karena itu, proses penginderaan seperti itu meliputi dua langkah konversi energi dan juga manipulasi cahaya.

Terdapat beberapa efek fisik yang menghasilkan pembangkitan sinyal listrik secara langsung sebagai respons terhadap pengaruh nonelektrik, yaitu digunakan dalam sensor langsung. Contohnya adalah efek *thermoelectric* (Seebeck), piezoelektrik, dan efek foto. Namun jika konversi energi lain yang tidak menghasilkan output listrik dilakukan oleh perangkat yang dikenal sebagai **transduser**.

Dalam bagian ini, kita akan mempelajari berbagai efek fisik yang dapat digunakan untuk konversi stimulus secara langsung menjadi sinyal listrik. Karena semua efek seperti itu didasarkan pada prinsip-prinsip dasar fisika, dan pertama-tama kita harus memahami prinsip-prinsip tersebut secara baik. Beberapa konsep yang akan kita pelajari adalah konsep Kapasitansi dan kapasitor, Magnet dan hukum penyertanya seperti Hukum Faraday, Magnet permanen dan coil, Induksi, Hambatan, Efek piezoelektrik, gelombang suara dan ultrasonik. Pada bab ini kita akan mengkhususkan secara mendalam tentang konsep kapasitansi, dan sensor, medan listrik, serta potensial listrik.

#### **1.4 Klasifikasi Sensor dan Transduser**

Klasifikasi sensor dan Transduser dibedakan sesuai dengan aktifitas yang konversi sinyal dari besaran sinyal bukan listrik (*non electric signal value*) ke besaran sinyal listrik (*electric signal value*) yaitu: sensor aktif (*active sensor*) dan sensor pasif (*passive sensor*).

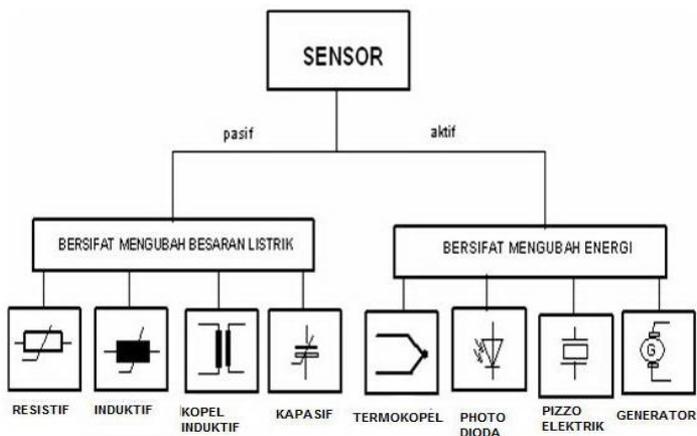
#### **Sensor dan Transduser Pasif**

Merupakan suatu sensor dan transduser yang dapat mengubah langsung dari energi bukan listrik (seperti: energi mekanis, energi termis, energi cahaya atau energi kimia) menjadi energi listrik. Sensor dan transduser ini biasanya dikemas dalam satu kemasan

yang terdiri dari elemen sebagai detektor, dan piranti pengubah dari energi dengan besaran bukan listrik menjadi energi besaran listrik.

### Sensor dan Tranduser Aktif

Merupakan suatu sensor dan tranduser yang dapat mengubah langsung dari energi bukan listrik (misal: energi mekanis, energi thermis, energi cahaya atau energi kimia) menjadi energi listrik bekerja atas asas pengendalian tenaga. Sensor dan tranduser aktif memerlukan bantuan tenaga dari luar



**Gambar 1. 4. Klasifikasi sensor Pasif dan Aktif**  
(sumber <http://elektronika-dasar.web.id/teori-sensor-dan-transduser-elektronika>)

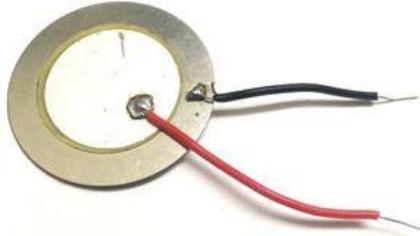
Prinsip kerja sensor:

1. Prinsip Fotovoltaic besaran yang diindera adalah cahaya (foto). Cahaya yang mengenai sensor kemudian diubah menjadi tegangan (volt) antara dua bahan.



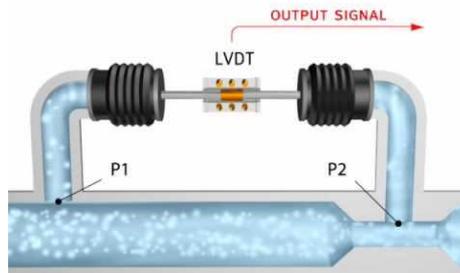
**Gambar 1. 5 Sensor Cahaya**

- Prinsip Piezoelektris besaran yang diindera menyebabkan perubahan tegangan  $V$  dan muatan  $Q$  yang ditimbulkan oleh sejenis kristal.



**Gambar 1. 6 Piezoelectric**

- Prinsip Elektromagnetik. Variable yang mengenai sistem diindera berdasarkan perubahan fluks magnetis yang kemudian mempengaruhi perubahan tegangan.



**Gambar 1. 7 Sensor LVDT mendeteksi perubahan kecepatan aliran venturi**

- Prinsip Kapasitif. Pendeteksian perubahan besaran dengan perubahan pada nilai kapasitansi.
- Prinsip Induktif. Deteksi perubahan nilai besaran yang berdasarkan perubahan induktif.



**Gambar 1. 8 Kapasitansi sensor**

6. Prinsip Fotokonduktif. Perubahan besaran yang dideteksi dengan mengamati perubahan konduktifitas atau hambatan bahan semi konduktor ketika terkena cahaya.
7. Prinsip Reluktif. Perubahan variable dideteksi dengan mengamati besarnya tegangan AC sebagai akibat perubahan reluktan diantara dua komponen.
8. Prinsip Potensiometer besaran yang dideteksi diubah menjadi perubahan kedudukan kontak geser pada suatu elemen hambatan (potensiometer).
9. Prinsip Resistif dengan mengamati perubahan hambatan suatu elemen.
10. Prinsip Termoelektris dengan mengamati perubahan suhu dan transduser bekerja atas dasar efek Seeback, efek Thomson atau efek Peltier.

## BAB II.

# SENSOR BERPRINSIP KAPASITIF

### 2.1 Pendahuluan

Sensor yang berprinsip kapasitif merupakan sensor elektronika yang bekerja berdasarkan perubahan kapasitansi yang dialami oleh sistem kapasitif. Pendeteksian dilakukan berdasarkan terjadinya perubahan muatan energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor yang disebabkan oleh perubahan jarak lempeng, perubahan luas penampang, perubahan volume dielektrik sensor kapasitif tersebut dan pengaruh eksternal yang merimbas perubahan perilaku kapasitif pada sensor.

Dengan memanfaatkan sifat kapasitif tersebut, maka sensor kapasitif yang dimanfaatkan dalam proses pengukuran antara lain:

- Jika luas permukaan dan dielektrik (udara) dalam dijaga konstan, maka perubahan nilai kapasitansi ditentukan oleh jarak antara kedua lempeng logam.
- Jika luas permukaan dan jarak kedua lempeng logam dijaga konstan dan volume dielektrik dapat dipengaruhi maka perubahan kapasitansi ditentukan oleh volume atau ketinggian cairan elektrolit yang diberikan.
- Jika jarak dan dielektrik dijaga konstan, maka perubahan kapasitansi ditentukan oleh luas permukaan kedua lempeng logam yang saling berdekatan.

## 2.2 Muatan, medan, dan Potensial Listrik

Terdapat fenomena yang cukup familiar di beberapa daerah yaitu pada daerah dengan iklim kering, yaitu munculnya percikan listrik dikarenakan gesekan ketika seseorang berjalan melalui karpet. Efek ini adalah hasil dari apa yang disebut **efek triboelektrik** yang merupakan proses perpindahan muatan listrik karena adanya gerakan benda, gesekan antara serat pakaian, turbulensi udara, listrik atmosfer, dan lain sebagainya. Terdapat dua jenis muatan; yaitu muatan yang berpindah dan muatan tidak berpindah. Benjamin Franklin (1706-1790), di antara pencapaian-pencapaiannya yang luar biasa, adalah ahli fisika Amerika pertama. Dia menyebutkan satu muatan negatif dan yang lainnya positif. Dia membuat percobaan elegan dengan layang-layang terbang dalam badai petir untuk membuktikan bahwa listrik atmosfer adalah jenis yang sama seperti yang dihasilkan oleh gesekan. Dalam melakukan percobaan, Franklin sangat beruntung, karena beberapa orang Eropa yang mencoba mengulangi pengujiannya terluka parah oleh petir dan memakan korban (kematian).

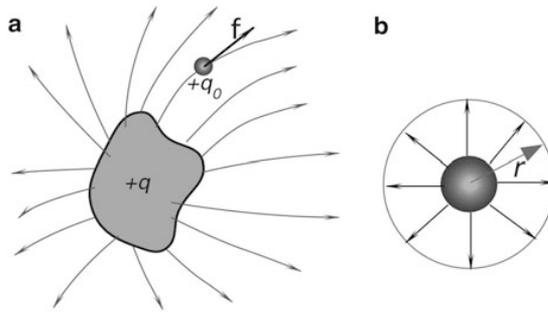
Efek triboelektrik adalah hasil dari redistribusi muatan mekanis. Misalnya, menggosok batang kaca dengan strip sutra dari elektron dari permukaan batang, sehingga meninggalkan banyak muatan positif, yaitu, memberi muatan positif pada batang itu. Perlu dicatat bahwa muatan listrik tidak diciptakan atau dihancurkan namun hanya dipindahkan. Muatan listrik hanya dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat lain. Memberi muatan negatif berarti mengambil elektron dari satu objek dan menempatkannya ke objek lain (mengisinya secara negatif). Objek, yang kehilangan sejumlah elektron, dikatakan mendapatkan muatan positif.

Efek triboelektrik mempengaruhi jumlah elektron yang sangat kecil dibandingkan dengan total muatan elektronik dalam suatu objek. Jumlah sebenarnya muatan dalam objek apa pun sangat besar. Untuk mengilustrasikan hal ini, mari kita perhatikan jumlah total elektron dalam koin tembaga yang memiliki berat 3,1 g. Oleh karena itu, dapat ditunjukkan bahwa jumlah total atom di dalamnya adalah sekitar  $2,9 \cdot 10^{22}$ . Atom tembaga memiliki muatan positif dan

negatif  $4,6 \cdot 10^{-18}$  C, muatan elektronik yang sama namun polaritas yang berlawanan. Muatan gabungan semua elektron dalam satu koin adalah  $q = (4,6 \cdot 10^{-18} \text{ C/atom}) (2,9 \cdot 10^{22} \text{ atom}) = 1,3 \cdot 10^5 \text{ C}$ , muatan yang sangat besar. Muatan elektronik ini dari satu koin tembaga tunggal dapat menghasilkan arus yang cukup 0,91 A untuk mengoperasikan bola lampu 100 W selama 40 jam.

Sehubungan dengan muatan listrik, ada tiga jenis bahan: konduktor, isolator, dan semikonduktor. Dalam konduktor, muatan listrik (elektron) bebas bergerak melalui materi, sedangkan pada isolator tidak. Meskipun tidak ada isolator sempurna, kemampuan mengisolasi kuarsa leburan adalah sekitar  $10^{25}$  kali lebih besar dari tembaga, sehingga untuk tujuan praktis banyak bahan dianggap isolator sempurna. Semikonduktor adalah perantara antara konduktor dan isolator dalam kemampuannya menghantarkan listrik. Di antara unsur-unsurnya, silikon dan germanium adalah contoh yang terkenal. Dalam semikonduktor, konduktivitas listrik dapat sangat meningkat dengan menambahkan sejumlah kecil elemen lain, jejak arsenik atau boron sering ditambahkan ke silikon untuk tujuan ini. Untuk teknologi sensor, semikonduktor adalah bahan yang sangat menarik karena kemampuannya untuk menghantarkan listrik dapat dimanipulasi dengan menerapkan input eksternal, seperti medan listrik dan medan magnet dan cahaya.

Gambar 2.1a menunjukkan sebuah objek yang membawa muatan listrik positif  $q$ . Jika muatan uji listrik positif kecil  $q_0$  diposisikan di sekitar objek yang diisi, itu akan mengalami gaya listrik yang tolak menolak. Jika kita menempatkan muatan negatif pada objek, itu akan menarik muatan uji. Dalam bentuk vektor, 4 gaya mendorong mundur (atau menarik) ditunjukkan sebagai  $f$ . Fakta bahwa muatan uji dikenakan gaya tanpa kontak fisik antara muatan berarti bahwa volume ruang yang ditempati oleh muatan uji dapat dicirikan oleh medan listrik yang disebut.



**Gambar 2.1 Muatan uji positif di sekitar objek bermuatan (a) dan medan listrik benda bulat (b)**

Bidang listrik di setiap titik didefinisikan melalui gaya sebagai

$$E = \frac{f}{q_0} \quad (2.1)$$

Di sini  $E$  adalah vektor dari arah yang sama dengan  $f$  karena  $q_0$  adalah skalar. Persamaan (2.1) menyatakan medan listrik sebagai gaya yang dibagi dengan properti muatan uji. Muatan uji harus sangat kecil agar tidak mengganggu medan listrik. Idealnya, ukurannya harus sangat kecil, karena muatan diukur, kita tidak dapat merenungkan muatan uji gratis yang besarnya lebih kecil daripada muatan elektronik:  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Bidang tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.1a oleh garis-garis medan, yang di setiap titik ruang bersinggungan dengan vektor gaya. Berdasarkan definisi, garis medan listrik dimulai pada objek positif dan berakhir pada objek negatif. Kepadatan garis medan listrik menunjukkan besarnya medan listrik  $E$  dalam volume ruang tertentu.

Bagi seorang fisikawan, medan adalah apa pun yang memiliki kuantitas fisik yang dapat diamati untuk semua poin dalam wilayah pengamatan tertentu. Contohnya adalah bidang tekanan, bidang suhu, bidang listrik, dan medan magnet. Variabel medan ini dapat berupa skalar (misalnya, bidang suhu) atau vektor (misalnya, bidang gravitasi di sekitar bumi). Variabel medan mungkin atau tidak mungkin berubah seiring waktu. Bidang vektor dapat dicirikan oleh

distribusi vektor, yang membentuk apa yang disebut fluks (disimbolkan  $\Phi$ ). Flux adalah deskripsi yang mudah dari banyak medan seperti listrik, magnetik, termal, dan lain-lain yang menembus suatu luasan. Kata flux berasal dari kata Latin *flouere* (untuk mengalir). Analogi fluks yang lazim adalah bidang aliran fluida stasioner (seragam) dengan karakteristik vektor aliran konstan  $\mathbf{v}$ , kecepatan konstan fluida pada titik tertentu. Dalam kasus bidang listrik, tidak ada yang mengalir secara formal. Jika kita menggunakan  $E$  - vektor yang mewakili bidang listrik - garis medan membentuk fluks. Jika kita membayangkan permukaan tertutup hipotetis (permukaan Gaussian)  $S$ , hubungan antara muatan  $q$  dan flux dapat ditetapkan sebagai

$$\epsilon_0 \Phi_E = q \quad (2. 2)$$

dimana  $\epsilon_0 = 8.8541878 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$  adalah konstanta permitivitas vakum. Dengan mengintegrasikan fluks di atas permukaan, maka akan diperoleh persamaan:

$$\epsilon_0 \oint E ds = q \quad (2. 3)$$

di mana integralnya sama dengan  $\Phi_E$ . Dalam persamaan di atas, yang dikenal sebagai hukum Gauss, muatan  $q$  adalah muatan bersih yang dikelilingi oleh permukaan Gaussian. Jika permukaan membungkus muatan yang sama dan berlawanan, fluks bersih  $\Phi_E$  adalah nol. Muatan di luar permukaan tidak memberikan kontribusi pada nilai  $q$ , juga lokasi persis muatan di dalam tidak mempengaruhi nilai ini. Hukum Gauss dapat digunakan untuk membuat prediksi penting, yaitu: Muatan tepat pada konduktor berinsulasi berada dalam kesetimbangan, seluruhnya pada permukaan luarnya. Hipotesis ini terbukti benar bahkan sebelum hukum Gauss atau hukum Coulomb diajukan. Hukum Coulomb sendiri dapat diturunkan dari Hukum Gauss. Ini menyatakan bahwa gaya yang bekerja pada muatan uji berbanding terbalik dengan jarak kuadrat dari muatan

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \quad (2.4)$$

Hasil lain dari hukum Gauss adalah bahwa medan listrik di luar distribusi muatan simetris bola, Gambar 2.1b, diarahkan secara radial dan memiliki magnitudo (perhatikan bahwa magnitudo bukan vektor)

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (2.5)$$

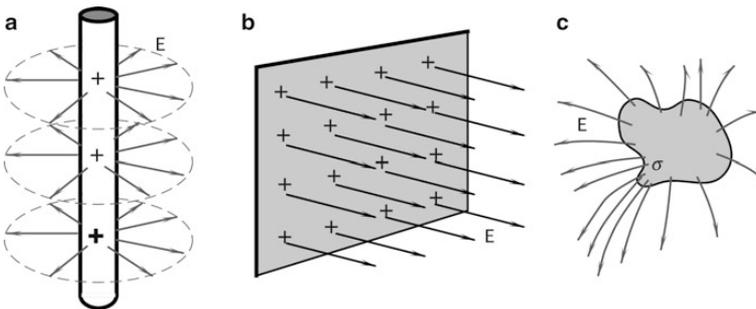
di mana  $r$  adalah jarak dari pusat bola.

Demikian pula, medan listrik di dalam lingkup muatan seragam  $q$  diarahkan secara radial dan memiliki magnitudo

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (2.6)$$

di mana  $R$  adalah radius bola dan  $r$  adalah jarak dari pusat bola. Perlu dicatat bahwa medan listrik di pusat bola ( $r = 0$ ) sama dengan nol. Jika muatan listrik didistribusikan sepanjang garis tak terbatas (atau, untuk tujuan praktis, panjang) (Gambar. 2.2a), bidang listrik diarahkan secara tegak lurus ke saluran dan memiliki magnitudo

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.7)$$



**Gambar 2. 2 Medan listrik di sekitar garis tak terbatas (a) dan lembaran tak terbatas dekat (b). Konduktor menunjuk konsentris medan listrik (c)**

di mana  $r$  adalah jarak dari garis dan  $\lambda$  adalah kerapatan muatan linier (muatan per satuan panjang).

Bidang listrik dihasilkan dari lembar muatan tidak terbatas, Gambar 2.2b tegak lurus terhadap bidang lembaran dan memiliki magnitudo

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (2.8)$$

di mana  $\sigma$  adalah kerapatan muatan permukaan (muatan per satuan luas). Namun, untuk objek konduktif yang terisolasi, medan listrik dua kali lebih kuat

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (2.9)$$

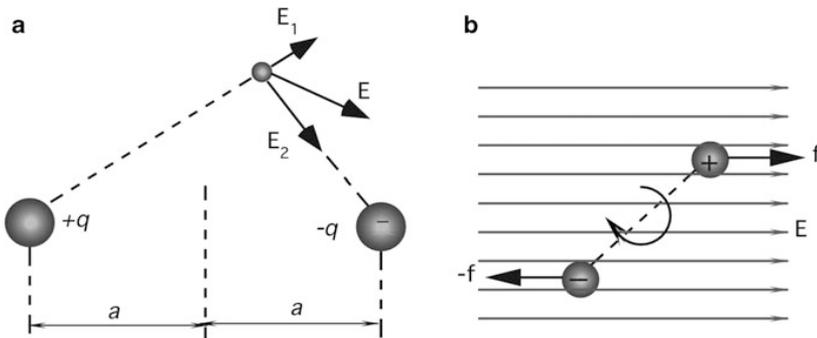
Perbedaan yang jelas antara medan listrik adalah hasil dari geometri yang berbeda – yang pertama adalah lembaran yang tidak terbatas dan yang terakhir adalah objek yang bentuknya sewenang-wenang. Konsekuensi yang sangat penting dari hukum Gauss adalah bahwa muatan listrik hanya didistribusikan di permukaan luar. Ini adalah hasil dari kekuatan memukul mundur antara tuduhan dengan tanda yang sama – semua tuduhan mencoba untuk bergerak sejauh mungkin dari satu sama lain. Satu-satunya cara untuk melakukan ini adalah untuk pindah ke tempat yang paling jauh di dalam materi, yang merupakan permukaan luar. Dari semua tempat di permukaan luar, tempat yang paling disukai adalah daerah dengan kelengkungan tertinggi. Inilah sebabnya mengapa konduktor runcing adalah konsentrator terbaik dari medan listrik pada Gambar 2.2c. Alat ilmiah dan rekayasa yang sangat berguna yang didasarkan pada efek ini adalah sangkar Faraday – ruangan yang seluruhnya ditutupi oleh lembaran konduktif yang di grounding atau jaring logam. Tidak peduli seberapa kuat medan listrik eksternal, pada dasarnya akan nol di dalam sangkar. Ini membuat pesawat logam, mobil, dan kapal menjadi pelindung terbaik selama badai petir karena mereka bertindak sebagai sangkar Faraday virtual. Namun harus diingat bahwa sangkar Faraday, yang merupakan pelindung sempurna terhadap medan listrik, tidak banyak berguna untuk melindungi terhadap medan magnet, kecuali ia terbuat dari bahan feromagnetik tebal.

Dipol listrik adalah kombinasi dari dua muatan yang berlawanan, yang ditempatkan pada jarak  $2a$  terpisah, Gambar 2.3a. Setiap muatan akan bekerja pada muatan uji dengan gaya yang mendefinisikan medan listrik  $E_1$  dan  $E_2$  yang dihasilkan oleh muatan individual. Bidang listrik gabungan dari dipol,  $E$ , adalah jumlah vektor dari dua bidang. Besarnya medan adalah

$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2aq}{r^3} \quad (2.10)$$

di mana  $r$  adalah jarak dari pusat dipol. Sifat-sifat penting dari distribusi muatan adalah besarnya muatan  $q$  dan pemisahan  $2a$ . Dalam rumus (4.10) muatan dan jarak dimasukkan hanya sebagai produk. Ini berarti bahwa, jika kita mengukur  $E$  pada berbagai jarak dari dipol listrik (dengan asumsi jarak itu jauh lebih panjang dari  $a$ ), kita tidak pernah dapat menyimpulkan  $q$  dan  $2a$  secara terpisah, tetapi hanya produk  $2aq$ . Misalnya, jika  $q$  digandakan dan  $a$  dipotong menjadi dua, medan listrik tidak akan berubah. Produk  $2aq$  disebut momen dipol listrik hal. Jadi, Persamaan (2.10) dapat ditulis ulang sebagai

$$f = \frac{1}{4\epsilon_0} \frac{p}{r^3} \quad (2.11)$$



**Gambar 2. 3 Dipol listrik (a); dipol listrik di medan listrik dikenakan gaya rotasi (b)**

Posisi spasial dipol dapat ditentukan oleh momennya dalam bentuk vektor:  $p$ . Tidak semua bahan memiliki momen dipol; gas seperti metana, asetilena, etilena, karbon dioksida, dan banyak lainnya tidak memiliki momen dipol. Di sisi lain, karbon monoksida

memiliki momen dipol lemah ( $0,37 \cdot 10^{-30}$  Cm) dan air memiliki momen dipol kuat ( $6,17 \cdot 10^{-30}$  Cm).

Dipol ditemukan dalam bahan kristal dan membentuk dasar untuk sensor seperti detektor piezo dan piroelektrik. Biasanya, dipol adalah bagian dari kristal, yang mendefinisikan orientasi awalnya. Ketika dipol ditempatkan di medan listrik, ia akan mengalami gaya rotasi: Gambar 2.3b. Medan listrik, jika cukup kuat, akan meluruskan dipol di sepanjang garisnya. Torsi yang bekerja pada dipol dalam bentuk vektor adalah

$$\tau = pE \quad (2.12)$$

Usaha yang harus dilakukan oleh agen eksternal untuk mengubah orientasi dipol listrik di medan listrik eksternal. Usaha ini disimpan sebagai energi potensial  $U$  dalam sistem yang terdiri dari dipol dan pengaturan yang digunakan untuk mengatur bidang eksternal. Dalam bentuk vektor, energi potensial ini adalah

$$U = -pE \quad (2.13)$$

Suatu proses orientasi dipol disebut *poling*. Orientasi listrik harus cukup kuat untuk mengatasi gaya penahan pada struktur kristal material. Untuk memudahkan proses ini, bahan selama *poling* dipanaskan untuk meningkatkan mobilitas struktur molekulnya. *Poling* keramik atau polimer kristal digunakan dalam pembuatan bahan piezo dan piroelektrik.

Medan listrik di sekitar objek yang diisi dapat dijelaskan tidak hanya oleh vektor  $\mathbf{E}$ , tetapi dengan kuantitas skalar, potensial listrik  $V$ . Kedua kuantitas terkait erat. Potensial listrik jarang digunakan sebagai deskripsi medan listrik pada titik ruang tertentu, namun, beda potensial (voltase) antara dua titik adalah kuantitas paling umum yang digunakan dalam praktik teknik elektro. Untuk memperoleh nilai tegangan antara dua titik arbitrer, kita dapat menggunakan teknik yang sama seperti di atas untuk muatan uji positif kecil  $q_0$ . Jika muatan listrik diposisikan pada titik A, ia tetap dalam kesetimbangan berada di bawah pengaruh gaya  $q_0E$ . Secara teori, itu bisa tetap ada dalam waktu yang lama. Sekarang, jika kita mencoba memindahkannya ke titik B lainnya, kita harus bekerja melawan medan listrik. Usaha  $-W_{AB}$ , yang dilakukan terhadap medan

(itulah sebabnya ia memiliki tanda negatif) untuk memindahkan muatan dari A ke B mendefinisikan tegangan antara dua titik ini

$$V_B - V_A = -\frac{W_{AB}}{q_0} \quad (2.14)$$

Sejalan dengan itu, potensial listrik pada titik B lebih kecil dari pada titik A. Unit SI untuk tegangan adalah  $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ . Untuk kenyamanan, titik A dipilih sangat jauh dari semua muatan (secara teoritis pada jarak tak terbatas) dan potensi listrik pada titik tersebut dianggap nol. Ini memungkinkan kita untuk menentukan potensial listrik pada titik lain mana pun

$$V = -\frac{W}{q_0} \quad (2.15)$$

Persamaan ini memberi tahu kita bahwa potensial di dekat muatan positif adalah positif, karena memindahkan muatan uji positif dari ke titik di dalam medan listrik, harus dilakukan terhadap gaya mendorong mundur. Ini akan membatalkan tanda negatif pada Persamaan (2.15). Perlu dicatat bahwa perbedaan potensial antara dua titik yang independen pada jalur di mana muatan uji bergerak. Ini hanyalah deskripsi perbedaan medan listrik antara kedua titik. Jika kita melakukan perjalanan melalui medan listrik sepanjang garis lurus dan mengukur  $V$  saat kita berjalan, laju perubahan  $V$  dengan jarak  $l$  yang kita amati adalah komponen  $E$  dalam arah itu

$$El = -\frac{dV}{dl} \quad (2.16)$$

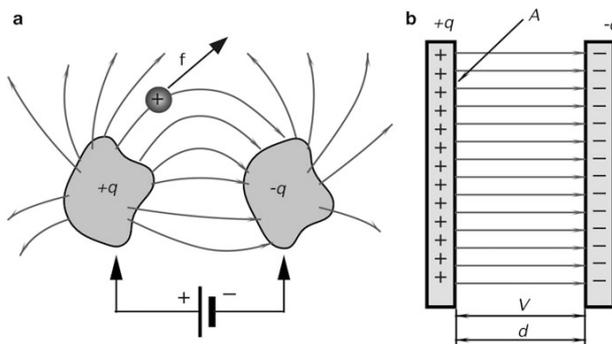
Tanda minus memberitahu kita bahwa  $E$  menunjuk ke arah penurunan  $V$ . Seperti berikut dari Persamaan (2.16), unit yang sesuai untuk bidang listrik adalah volt/meter (V/m).

### 2.3 Kapasitansi

Mari kita ambil dua objek konduktif terisolasi dengan bentuk (pelat) acak dan sambungkan ke kutub baterai yang berlawanan, Gambar 2.4a. Piring akan menerima jumlah yang sama dari muatan yang berlawanan, yaitu, pelat bermuatan negatif akan menerima elektron tambahan sementara akan ada kekurangan elektron dalam pelat bermuatan positif. Sekarang, mari kita lepaskan baterai. Jika pelat benar-benar terisolasi dan ada dalam ruang hampa, plat tersebut secara teoritis akan tetap terisi muatan dalam waktu yang lama. Kombinasi pelat, yang dapat menahan muatan listrik, disebut

kapasitor. Jika muatan uji listrik positif kecil,  $q_0$ , diposisikan di antara objek yang diisi, itu akan dikenakan gaya listrik dari plat positif ke negatif. Plat positif akan mendorong muatan tes positif, dan negatif akan menariknya, sehingga menghasilkan gaya push-pull gabungan. Bergantung pada posisi muatan uji antara benda-benda yang bermuatan berlawanan, gaya akan memiliki besaran dan arah tertentu yang dicirikan oleh vektor  $f$ .

Kapasitor dapat dicirikan oleh  $q$ , besarnya muatan pada salah satu konduktor, ditunjukkan pada Gambar 2.4a, dan oleh  $V$ , perbedaan potensial positif antara konduktor. Perlu dicatat bahwa  $q$  bukan muatan bersih pada kapasitor. Lebih lanjut,  $V$  bukanlah potensial dari kedua lempeng, tetapi perbedaan potensial di antara keduanya. Rasio muatan ke tegangan adalah konstan untuk setiap kapasitor:



**Gambar 2. 4 Muatan listrik dan tegangan mendefinisikan kapasitansi antara dua benda (a); kapasitor pelat paralel (b)**

$$\frac{q}{V} = C \quad (2. 17)$$

Rasio ini konstan,  $C$  disebut kapasitansi kapasitor. Nilainya tergantung pada bentuk dan posisi relatif pelat. Rasionya,  $C$ , juga tergantung pada medium di mana pelat-pelat itu diletakkan. Perhatikan, bahwa  $C$  selalu positif karena kita menggunakan tanda yang sama untuk  $q$  dan  $V$ . Satuan SI untuk kapasitansi adalah  $1 \text{ F} = 1$

C/V yang diwakili oleh singkatan F. Farad adalah kapasitansi yang sangat besar, oleh karena itu, dalam praktiknya submultiples dari farad umumnya digunakan:

1 picofarad (pF)  $10^{-12}$  F

1 nanofarad (nF)  $10^{-9}$  F

1 mikrofaraad ( $\mu$ F)  $10^{-6}$  F

Ketika dihubungkan ke sirkuit elektronik, kapasitansi dapat direpresentasikan sebagai resistansi kompleks Z.

$$Z_c = \frac{V}{i} = -\frac{1}{j\omega C} \quad (2.18)$$

Dimana  $j = \sqrt{-1}$  dan i adalah arus sinusoidal yang memiliki frekuensi  $\omega$ , artinya bahwa hambatan kompleks kapasitor turun pada frekuensi yang lebih tinggi. Ini disebut hukum Ohm untuk kapasitor. Tanda minus dan argumen kompleks menunjukkan bahwa tegangan melintasi kapasitor tertinggal  $90^\circ$  di belakang arus.

Kapasitansi adalah fenomena fisik yang sangat berguna dalam kotak peralatan perancang sensor. Memanipulasi kapasitansi, menurut Persamaan. (4.18), memungkinkan konversi langsung dari stimulus input menjadi tegangan atau arus listrik. Sensor kapasitif dapat berhasil digunakan untuk mengukur jarak, luas, volume, tekanan, gaya, komposisi kimia, dll. Latar belakang berikut menetapkan sifat dasar kapasitor dan memberikan beberapa formula yang berguna.

### 2.3.1 Kapasitor

Gambar 2.4b menunjukkan kapasitor pelat paralel di mana konduktor berbentuk dua bidang pelat paralel bidang A yang dipisahkan oleh jarak d. Jika d jauh lebih kecil dari dimensi pelat, medan listrik antara pelat akan seragam, yang berarti bahwa garis medan (garis gaya f) akan sejajar dan berjarak secara merata. Hukum elektromagnetisme mensyaratkan bahwa ada "pinggiran" dari garis-garis di tepi lempeng, tetapi untuk yang cukup kecil kita dapat mengabaikannya untuk tujuan kita saat ini.

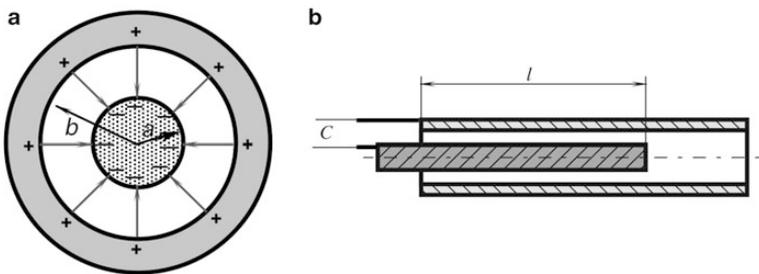
Untuk menghitung kapasitansi, kita harus menghubungkan V (perbedaan potensial antara pelat) ke q, yang dibebankan pada kapasitor seperti pada Persamaan (2.17):

$$C = \frac{q}{V} \quad (2.19)$$

Atau, kapasitansi kapasitor rata-rata dalam ruang hampa udara dapat ditemukan

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \tag{2.20}$$

Hal ini dapat dibuat pernyataan bahwa untuk membuat sensor kapasitif diperlukan kapasitor yang buruk; dan secara tradisional semua komponen elektronik dibuat sesensitif mungkin untuk setiap pengaruh lingkungan. Namun, untuk membuat sebuah sensor salah satu parameter kapasitor harus “rusak”. Jadi kapasitansi akan berubah di bawah pengaruh eksternal. Dalam sensor kapasitif, kapasitansi dimodulasi (dimodifikasi) oleh stimulus eksternal atau oleh sinyal dari transduser menengah.



**Gambar 2.5 Kapasitor silinder (a); sensor perpindahan kapasitif (b)**

Jadi, untuk memvariasikan kapasitansi, stimulus perlu mengubah salah satu parameter yang menentukan kapasitansi. Parameter ini untuk kapasitor plat datar dibuat oleh formula utama (2.20). Ini menunjukkan hubungan antara area pelat dan jarak antara pelat. Memvariasikan salah satunya akan mengubah kapasitansi yang menurut Persamaan (2.19) memengaruhi tegangan  $V$  yang pada gilirannya dapat diukur dengan cukup akurat oleh sirkuit yang sesuai. Perlu dicatat bahwa Persamaan (2.20) hanya berlaku untuk kapasitor dari jenis pelat paralel dengan tidak ada apa pun di antara pelat. Perubahan geometri akan membutuhkan formula yang berbeda. Rasio  $A$ ,  $A/d$ , dapat disebut faktor geometri untuk kapasitor pelat paralel.

Kapasitor silinder yang ditunjukkan pada Gambar 2.5a terdiri dari dua silinder koaksial jari-jari  $a$  dan  $b$ , dan panjang  $l$ . Untuk kasus

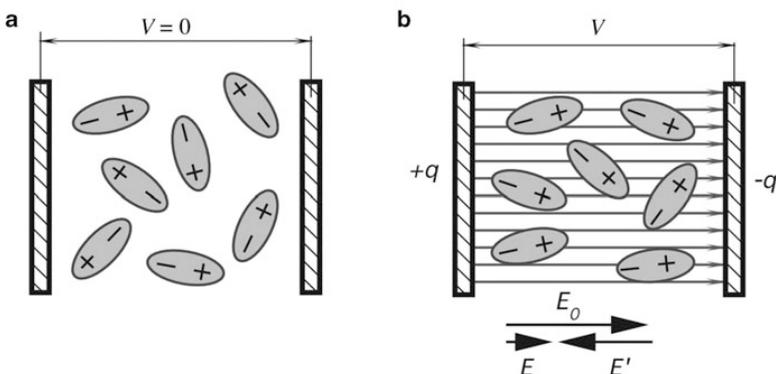
ketika lb kita dapat mengabaikan efek fringing dan menghitung kapasitansi dari rumus berikut:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{b}{a}} \quad (2.21)$$

Dalam rumus ini  $l$  memiliki arti panjang konduktor yang tumpang tindih (Gambar 2.5b) dan  $2\pi l (\ln b/a)$  dapat disebut faktor geometri untuk kapasitor koaksial. Sensor perpindahan yang berguna dapat dibangun dengan kapasitor seperti itu jika konduktor dalam dapat dibuat bergerak masuk dan keluar dari konduktor luar. Menurut Persamaan (2.21), kapasitas sensor tersebut dalam hubungan linier dengan perpindahan,  $l$ . Namun perlu dicatat bahwa sensor perpindahan kapasitif silinder bukan perangkat yang sangat praktis, karena secara teknologi menantang untuk membuat struktur koaksial dengan menggunakan teknologi MEMS.

### 2.3.2 Konstanta Dielektrik

Persamaan (2.20) berlaku untuk kapasitor pelat paralel dengan pelatnya dalam ruang hampa (atau udara, untuk tujuan paling praktis). Pada tahun 1837, Michael Faraday pertama kali menyelidiki efek mengisi ruang antara pelat dengan dielektrik. Dia telah menemukan bahwa efek pengisian adalah untuk meningkatkan kapasitansi perangkat oleh faktor  $\kappa$ , yang dikenal sebagai konstanta dielektrik material.



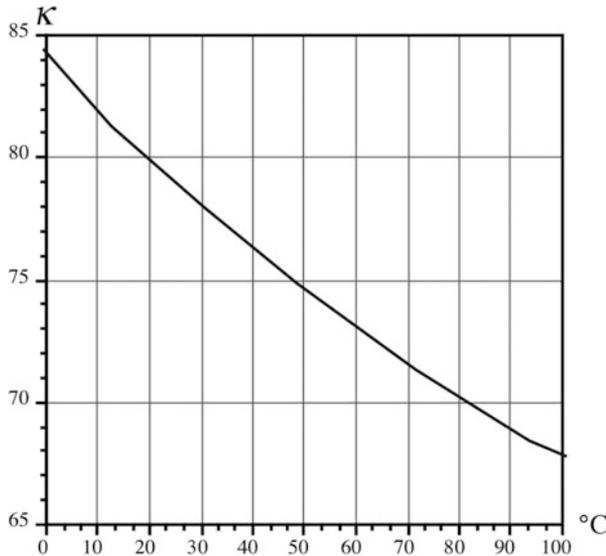
**Gambar 2. 6** Polarisasi dielektrik. Dipol berorientasi acak tanpa medan listrik eksternal (a); dipol sejajar dengan medan listrik (b)

Peningkatan kapasitansi karena kehadiran dielektrik adalah hasil dari polarisasi molekuler. Dalam beberapa dielektrik (misalnya, dalam air), molekul memiliki momen dipol permanen, sementara di dielektrik lain, molekul menjadi terpolarisasi hanya ketika medan listrik eksternal diterapkan (induksi). Dalam kedua kasus, baik dipol listrik permanen atau yang diperoleh dengan induksi cenderung menyelaraskan molekul dengan bidang listrik eksternal. Proses ini disebut polarisasi dielektrik. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2.6a yang menunjukkan dipol permanen sebelum dan pada Gambar 2.6b setelah medan listrik eksternal diterapkan ke kapasitor. Dalam kasus sebelumnya, tidak ada medan listrik antara pelat kapasitor dan semua dipol berorientasi secara acak. Setelah kapasitor diisi, dipol akan sejajar dengan garis medan listrik, namun, agitasi termal akan mencegah penyelarasan total. Setiap dipol membentuk medan listriknya sendiri yang sebagian besar diarahkan dengan medan listrik eksternal,  $E_0$ . Karena efek gabungan dari sejumlah besar dipol ( $E_0$ ), serat listrik pada kapasitor menjadi lebih lemah ( $E = E_0 + E_0$ ), di mana bidang itu,  $E_0$ , akan berada dalam kapasitor tanpa dielektrik.

Medan listrik yang berkurang menyebabkan voltase yang lebih kecil melintasi kapasitor:  $V = V_0/\kappa$ . Mengganti menjadi Persamaan (2.19) kita sampai pada ekspresi untuk kapasitor dengan dielektrik. Dalam bentuk yang lebih umum, kapasitansi antara dua objek dalam bentuk apa pun dapat diekspresikan melalui faktor geometri,  $G$

$$C = \epsilon_0 \kappa G \quad (2.22)$$

di mana  $G$  tergantung pada bentuk benda dan pemisahannya. Jadi, Persamaan (2.22) menyatakan bahwa kapasitansi juga dapat dimodulasi dengan memvariasikan geometri dan konstanta dielektrik,  $\kappa$ . Karena konstanta dielektrik tergantung pada bahan, suhu, dan kadar air/kelembaban semua variabel ini dapat digunakan dalam sensor kapasitif sebagai input untuk memodulasi kapasitansi.



**Gambar 2. 7 Konstanta air dielektrik sebagai fungsi suhu**

Konstanta dielektrik harus ditentukan untuk frekuensi dan suhu pengujian. Beberapa dielektrik memiliki konstanta dielektrik yang sangat seragam pada rentang frekuensi yang luas (misalnya, polietilen), sementara yang lain menampilkan ketergantungan frekuensi negatif yang kuat, yaitu, konstanta dielektrik berkurang dengan frekuensi. Ketergantungan suhu juga negatif. Gambar 2.7 mengilustrasikan  $\kappa$  untuk air sebagai fungsi temperatur.

Untuk menggambarkan bagaimana kapasitansi dapat digunakan dalam penginderaan, pertimbangkan sensor ketinggian air kapasitif, Gambar. 2.8a. Sensor ini dibuat dalam bentuk kapasitor koaksial di mana permukaan setiap konduktor (elektroda) dilapisi dengan lapisan isolasi tipis untuk mencegah korsleting listrik melalui air. Isolator adalah dielektrik, yang kami abaikan dalam analisis berikut karena tidak berubah dalam proses pengukuran. Sensor koaksial direndam dalam tangki air sehingga air dapat mengisi di antara elektroda kapasitif. Ketika ketinggian air meningkat, air mengisi semakin banyak ruang di antara konduktor sensor, sehingga mengubah konstanta dielektrik rata-rata antara konduktor dan menurut Persamaan (2.24) selanjutnya mengubah kapasitansi sensor. Total kapasitansi sensor koaksial (Pers. 2.23).

$$C_h = C_1 + C_2 = \epsilon_0 G_1 + \epsilon_0 G_2 \quad (2.23)$$

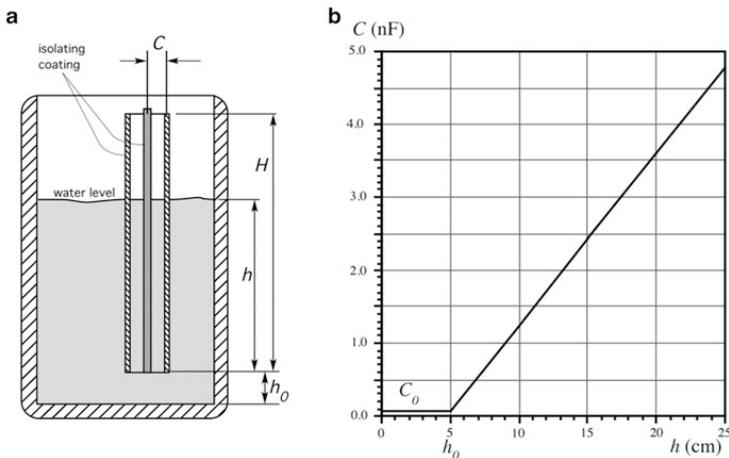
di mana  $C_1$  adalah kapasitansi dari bagian yang bebas air dari sensor dan  $C_2$  adalah kapasitansi dari bagian yang diisi air. Faktor geometri yang sesuai ditunjuk  $G_1$  dan  $G_2$ .

Dari Pers. (2.21) dan (2.23), total kapasitansi sensor dapat diperoleh dengan Pers. 2.24, yaitu:

$$C_h = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{b}{a}} [H + h(\kappa_w - 1)] \quad (2.24)$$

di mana  $h$  adalah ketinggian bagian yang diisi air dari sensor dan  $\kappa_w$  adalah konstanta dielektrik air pada suhu kalibrasi. Jika air berada pada atau di bawah level  $h_0$ , kapasitansi tetap konstan karena  $h = 0$  dan tidak ada air di antara elektroda sensor.

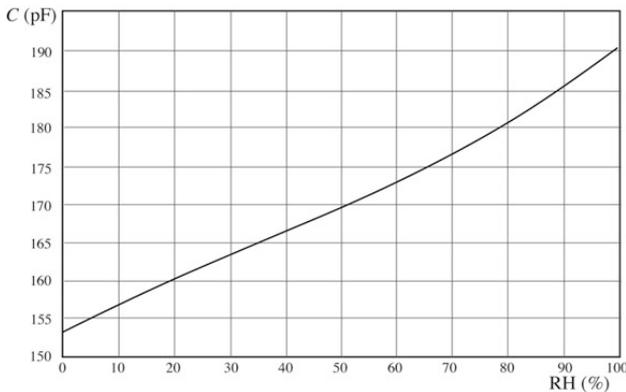
$$C_{\min} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{b}{a}} \quad (2.25)$$



**Gambar 2. 8 Sensor level air kapasitif (a); kapasitansi sebagai fungsi level air (b) (dimensi sensor adalah  $a = 10 \text{ mm}$ ,  $b = 12 \text{ mm}$ ,  $H = 200 \text{ mm}$ , cairan air)**

Gambar 2.8b menunjukkan ketergantungan level-kapasitansi air. Ini adalah garis lurus dari level  $h_0$ . Karena konstanta dielektrik air bergantung pada suhu (Gambar. 2.7) sensor ketinggian air ini harus dikombinasikan dengan sensor suhu (thermistor atau RTD) yang memonitor suhu air untuk mengkompensasi fungsi alih pengkondisi sinyal elektrik.

misalnya, termistor atau RTD yang akan memonitor suhu air sebagai kompensasi fungsi transfer oleh pengkondisi sinyal elektronik. Kemiringan fungsi transfer Persamaan 2.24 tergantung pada jenis cairan. Sebagai contoh, jika alih-alih air sensor mengukur tingkat minyak transformator, itu diharapkan sekitar 22 kali lebih sensitif karena  $\kappa$  untuk minyak jauh lebih kecil daripada untuk air.



**Gambar 2. 9 Fungsi transfer sensor kelembaban relatif kapasitif**

Contoh lain dari sensor kapasitif adalah sensor kelembaban. Pada sensor semacam itu, pengisian dielektrik antara pelat kapasitor dibuat dari bahan yang higroskopis, yaitu dapat menyerap molekul air. Konstanta dielektrik material bervariasi dengan jumlah kelembaban yang diserap. Menurut Persamaan. (2.24), ini mengubah kapasitansi yang dapat diukur dan dikonversi ke nilai kelembaban relatif. Gambar 2.9 mengilustrasikan ketergantungan antara kapasitansi dan kelembaban relatif dari sensor tersebut. Ketergantungan tidak linear sempurna tetapi ini biasanya dapat diurus selama pemrosesan sinyal.

## BAB III.

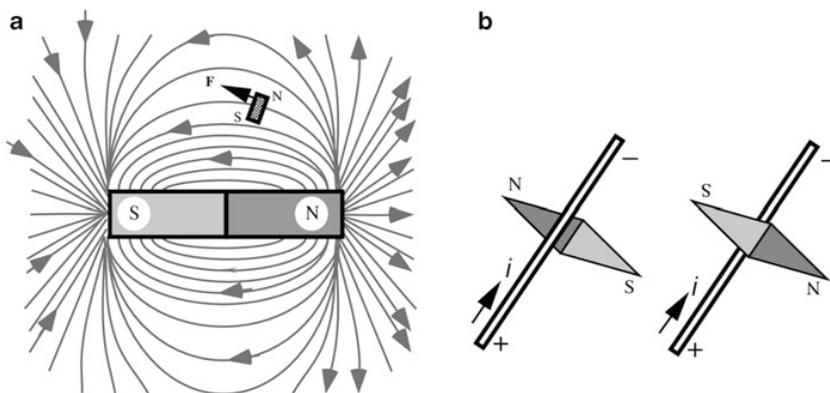
# SENSOR MENGGUNAKAN PRINSIP MAGNETIK

### 3.1 Magnet

Sifat magnetik ditemukan pada zaman prasejarah dalam spesimen tertentu dari mineral bijih besi yang dikenal sebagai magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Ditemukan juga bahwa potongan-potongan besi lunak yang bergesekan dengan bahan magnetik memperoleh sifat yang sama dengan bertindak sebagai magnet, yaitu menarik magnet dan potongan-potongan besi lainnya. Studi komprehensif pertama tentang magnetisme dilakukan oleh William Gilbert. Kontribusi terbesarnya adalah kesimpulannya bahwa bumi bertindak sebagai magnet besar. Kata magnetisme sendiri berasal dari distrik Magnesia di Asia Kecil, yang merupakan salah satu tempat di mana batu magnet ditemukan.

Ada kesamaan kuat antara listrik dan magnet. Satu manifestasi yang berbeda dari magnet adalah bahwa magnet merupakan batang bermuatan yang memiliki dua ujung, yang memiliki sifat berlawanan. Dalam magnet, ujung-ujung ini disebut kutub S (selatan) dan U (utara) dianalogikan sama halnya dengan kutub planet Bumi. Berlawanan dengan muatan listrik, kutub magnet selalu berpasangan. Ini dibuktikan dengan memecah magnet menjadi sejumlah bagian yang kecil. Setiap bagian, tidak peduli seberapa kecil, akan memiliki kutub utara dan kutub selatan. Ini menunjukkan bahwa penyebab gaya dikaitkan dengan atom yang memiliki elektron dengan arah putar evolusi elektron yang seragam yang selalu ada dalam setiap bagian.

Jika kita menempatkan kutub magnet di ruang tertentu, ruang di kutub itu tampaknya telah diubah dari sebelumnya. Untuk menunjukkan ini, bawa ke ruang itu sepotong besi. Sekarang, ia akan mengalami gaya yang tidak akan dialami jika magnet dilepas. Ruang yang diubah ini disebut medan magnet. Bidang itu dianggap mengerahkan kekuatan pada benda magnetik apa pun yang dibawa ke sekitar magnet. Jika tubuh magnetik itu adalah magnet batang kecil atau jarum magnet, medan magnet akan ditemukan memiliki arah. Berdasarkan definisi, arah medan ini pada titik mana pun diberikan oleh arah gaya yang diberikan pada kutub utara satuan kecil. Arah dari garis medan magnet adalah dengan definisi dari kutub utara ke selatan. Gambar 3.1a menunjukkan arah medan dengan panah. Sebuah magnet uji kecil tertarik ke arah vektor gaya  $F$ . Secara alami, tentang gaya yang sama tetapi dari arah yang berlawanan diberikan pada kutub selatan magnet uji.



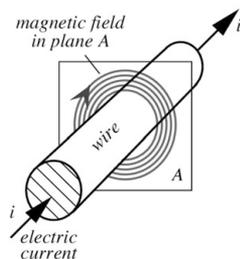
**Gambar 3. 1 Uji magnet dalam bidang magnet (a); jarum kompas berputar sesuai dengan arah arus listrik (b)**

Deskripsi medan magnet di atas dibuat untuk magnet permanen. Namun, medan magnet tidak mengubah sifatnya jika diproduksi oleh perangkat yang berbeda seperti halnya pada arus listrik yang melewati konduktor. Adalah Hans Christianian Oersted (Ørsted), seorang profesor fisika Denmark, yang pada tahun 1820 menemukan bahwa medan magnet bisa dimunculkan walau tidak

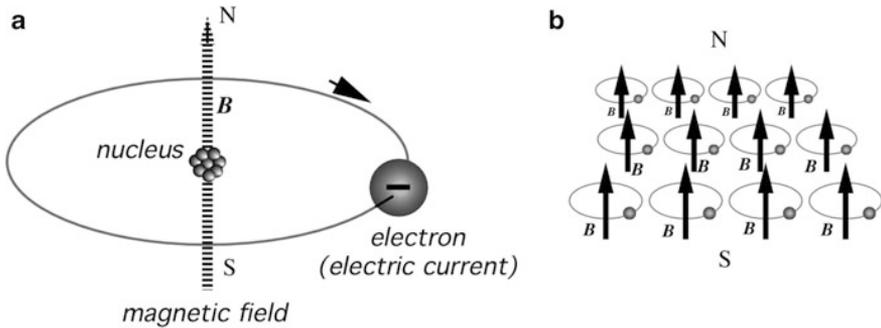
ada magnet sama sekali. Dalam serangkaian percobaan di mana ia menggunakan tumpukan baterai yang luar biasa besar untuk menghasilkan arus yang besar, dan secara kebetulan ia memperhatikan bahwa kompas yang dekat di sekitarnya berperilaku aneh.

Penyelidikan lebih lanjut menunjukkan bahwa jarum kompas selalu mengorientasikan dirinya pada sudut kanan ke kawat pembawa arus dan bahwa jarum kompas berbalik arah jika salah satu arus dibalik, atau kompas diubah dari posisi di bawah kawat ke yang di atas (Gambar. 3.1b). Muatan listrik stasioner tidak berpengaruh pada kompas magnetik (dalam percobaan ini, jarum kompas digunakan sebagai magnet uji kecil). Jelas bahwa muatan listrik yang bergerak adalah penyebab medan magnet. Dapat ditunjukkan bahwa garis medan magnet di sekitar kawat melingkar dan arahnya bergantung pada arah arus listrik, yaitu elektron yang bergerak (Gambar. 3.2). Di atas dan di bawah kawat, garis medan magnet diarahkan ke arah yang berlawanan. Itulah sebabnya jarum kompas berputar ketika ditempatkan di bawah kawat.

Sifat dasar magnet adalah Bergeraknya muatan listrik (arus) pada dasarnya menghasilkan medan magnet. Mengetahui hal ini, Albert Einstein datang dengan penjelasan tentang sifat magnet permanen. Sebuah model sederhana dari proses originasi medan magnet ditunjukkan pada Gambar 3.3a.



**Gambar 3.2** Arus listrik menghasilkan medan magnet melingkar di sekitar konduktor



**Gambar 3. 3. Perpindahan elektron menetapkan medan magnet (a); superposisi vektor bidang menghasilkan medan magnet gabungan magnet (b)**

Sebuah elektron terus menerus berputar dalam gerakan eddy di sekitar atom. Gerakan elektron merupakan arus listrik melingkar di sekitar inti atom. Arus itu adalah penyebab medan magnet kecil. Dengan kata lain, elektron yang berputar membentuk magnet permanen dari dimensi atom. Sekarang, mari kita bayangkan bahwa banyak dari magnet atom tersebut disejajarkan dengan cara yang terorganisir (Gambar. 3.3b), sehingga medan magnetnya bertambah. Proses magnetisasi kemudian menjadi sangat jelas bahwa tidak ada yang ditambahkan atau dihilangkan dari materi, hanya orientasi atom yang dibuat. Magnet atom dapat disimpan dalam posisi sejajar dalam beberapa bahan yang memiliki komposisi kimia yang sesuai dan struktur kristal. Bahan semacam itu disebut feromagnetik.

### 3.2 Hukum Faraday

Michael Faraday merenungkan pertanyaan, “Jika arus listrik mampu menghasilkan magnet, mungkinkah magnetisme dapat digunakan untuk menghasilkan listrik?” Butuh waktu 9 atau 10 tahun untuk menemukan caranya. Jika muatan listrik dipindahkan melintasi medan magnet, gaya pemindahan bekerja pada muatan itu. Harus ditekankan bahwa tidak penting apa yang benar-benar bergerak baik muatan atau sumber medan magnet. Yang penting adalah perpindahan relatif dari mereka. Penemuan bahwa muatan

listrik yang bergerak dapat didefleksikan sebagai akibat interaksinya dengan medan magnet adalah dasar dalam teori elektromagnetik. Muatan listrik yang berubah menghasilkan generasi bidang listrik, yang, pada gilirannya, menyebabkan perbedaan tegangan pada bahan konduksi, sehingga menghasilkan arus listrik.

Intensitas medan magnet pada titik tertentu ditentukan oleh vektor  $B$  yang bersinggungan dengan garis medan magnet pada titik itu. Untuk representasi visual yang lebih baik, jumlah garis medan per unit luas penampang (tegak lurus terhadap garis) sebanding dengan besarnya  $B$ . Jika garis berdekatan,  $B$  besar dan di mana mereka berjauhan,  $B$  kecil.

Fluks medan magnet dapat didefinisikan sebagai

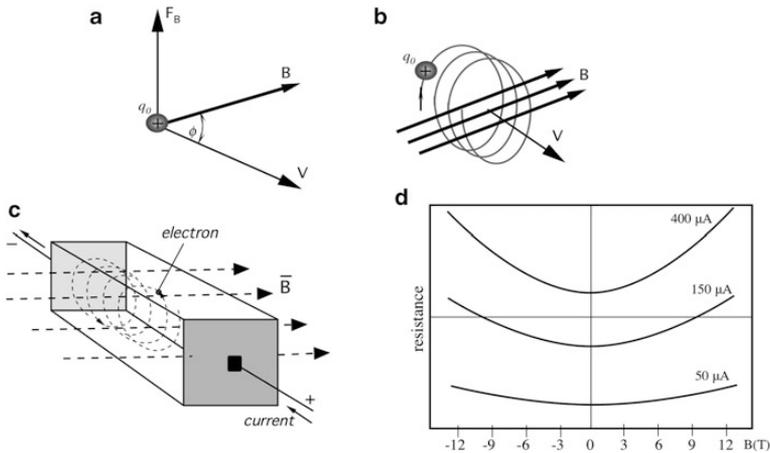
$$\Phi_B = \oint B \, ds \quad (3.1)$$

di mana integral diambil di atas permukaan sehingga  $F_B$  dapat didefinisikan.

Untuk mendefinisikan vektor medan magnet  $B$  kita menggunakan prosedur laboratorium di mana muatan listrik positif  $q_0$  digunakan sebagai objek uji. Muatan diproyeksikan melalui medan magnet dengan kecepatan  $v$ . Gaya samping yang mencerminkan  $F_B$  bekerja pada muatan (Gambar. 3.4a). Dengan "menyamping" kami maksudkan bahwa  $F_B$  berada pada sudut kanan ke  $v$ . Sangat menarik untuk dicatat bahwa vektor  $v$  mengubah arahnya saat bergerak melalui medan magnet. Ini menghasilkan gerakan spiral dan bukan parabola pada muatan (Gambar. 3.4b). Gerakan spiral adalah penyebab efek magnetoresistif, yang membentuk dasar untuk sensor magnetoresistif. Sebuah magnetoresistor ditunjukkan pada Gambar 3.4c ditempatkan di medan magnet  $B$  dan disuplai dengan arus listrik konstan. Jalur elektron yang berputar-putar mencerminkan perubahan resistansi (Gambar. 3.4c), jadi untuk arus yang diketahui, tegangan melintasi resistor mewakili kekuatan medan magnet. Alasan mengapa hambatan naik adalah jalur yang lebih panjang bagi elektron untuk melakukan perjalanan di dalam materi, sehingga mengalami resistensi yang lebih tinggi untuk perjalanan mereka.

Gaya pemindahan  $F_B$  sebanding dengan muatan, kecepatan, dan medan magnet

$$F_B = q_0 v B \quad (3.2)$$



**Gambar 3.4 Muatan positif yang diproyeksikan melalui medan magnet mengalami gaya samping (a); gerakan spiral muatan listrik dalam medan magnet (b); magnetoresistor (c), dan ketergantungan resistensi pada medan magnet dan arus (d)**

Vektor  $F_B$  selalu pada sudut kanan ke bidang yang dibentuk oleh  $v$  dan  $B$  dan dengan demikian selalu pada sudut kanan ke  $v$  dan ke  $B$ ; itulah mengapa itu disebut gaya samping. Besarnya gaya pemindahan magnetik, menurut aturan untuk produk vektor, adalah

$$F_B = q_0 v B \sin \phi \quad (3.3)$$

di mana  $\phi$  adalah sudut antara vektor  $v$  dan  $B$ . Gaya magnet menghilang jika  $v$  sejajar dengan  $B$ . Persamaan di atas (3.3) digunakan untuk mendefinisikan medan magnet dalam hal muatan yang terdefleksikan, kecepatannya, dan gaya pendefleksian. Oleh karena itu, unit  $B$  adalah  $(N/C)/(m/s)$ . Dalam Sistem SI nama yang diberikan adalah tesla (disingkat T). Karena coulomb/detik adalah ampere, kita memiliki  $1 T = 1 N/(Am)$ . Unit yang lebih tua sedangkan

untuk saat ini gauss banyak digunakan. Dimana hubungan tesla dan gauss dapat diketahui dengan:

$$1T = 10^4 G$$

### 3.3 Magnet Permanen

Magnet permanen adalah komponen yang berguna untuk membuat sensor magnetik untuk mendeteksi gerakan, perpindahan, posisi, kedekatan, dll. Pemilihan magnet permanen untuk aplikasi tertentu, maka karakteristik berikut ini harus dipertimbangkan:

- Induktansi residual (B) dalam gauss atau milli-tesla (mT) yaitu seberapa kuat magnetnya?
- Gaya koersif (H) di oersted ( $O_e$ ) atau kA/m; seberapa baik magnet akan menahan gaya demagnetisasi eksternal? Sebagai perbandingan,  $1 O_e = 0,08 \text{ kA/m}$ .
- Produk energi maksimum, MEP, ( $BH_{\max}$ ) adalah gauss-oersteds kali  $10^6$  atau kJ/m<sup>3</sup>. Jutaan gauss-oersted sering diindikasikan sebagai MGO<sub>e</sub> (mega-gauss-oersted). Sebagai perbandingan,  $1MGO_e = 7.96 \text{ kJ/m}^3$ . Magnet yang kuat juga sangat kuat tahan terhadap kekuatan demagnetisasi memiliki MEP yang tinggi. Magnet dengan MEP lebih tinggi lebih baik, lebih kuat, dan lebih mahal.
- Koefisien suhu dalam %/C menunjukkan berapa banyak perubahan B dengan suhu?

Magnet diproduksi dari paduan khusus, misalnya paduan tanah jarang (*rare earth*) (mis., Samarium) -kobal. Ini adalah magnet terbaik, namun terlalu keras untuk pengerjaan mesin, dan harus digiling jika perlu dibentuk. MEP maksimum mereka adalah sekitar  $16.10^6$  atau  $16MGO_e$ . Paduan populer lainnya adalah Alnico, yang mengandung aluminium, nikel, kobalt, besi, dan beberapa aditif. Magnet ini dapat dicetak, atau disinter dengan menekan serbuk logam dalam cetakan dan memanaskannya. Alnico Sinter sangat cocok untuk produksi massal. Magnet keramik mengandung barium atau strontium ferrite (atau elemen lain dari kelompok itu) dalam matriks bahan keramik yang dipadatkan dan disinter. Mereka adalah konduktor panas dan listrik yang buruk, tidak aktif secara kimia, dan memiliki nilai H yang tinggi.

Paduan lain untuk pembuatan magnet adalah Cunife, yang mengandung tembaga, nikel, dan besi. Itu dapat dicap, digeser, ditarik, atau digulung menjadi bentuk akhir. MEP-nya sekitar  $1,4 \cdot 10^6$ . Magnet besi-krom cukup lunak untuk menjalani pemesinan sebelum perlakuan *penuaan* akhir untuk mengeraskannya. MEP maksimum mereka adalah  $5,25 \cdot 10^6$ . Magnet plastik dan karet terdiri dari barium atau strontium ferrite dalam bahan matriks plastik. Mereka sangat murah dan dapat dibuat dalam berbagai bentuk. MEP maksimum mereka adalah sekitar  $1,2 \cdot 10^6$ .

Magnet neodmium (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo), sejenis magnet tanah jarang, adalah magnet permanen yang terbuat dari paduan neodmium, besi, dan boron untuk membentuk struktur kristal tetragonal  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Bahan ini saat ini merupakan jenis magnet permanen terkuat. Dalam praktiknya, sifat magnetik magnet Neodmium bergantung pada komposisi paduan, struktur mikro, dan teknik pembuatan yang digunakan. Magnet Neodmium memiliki koersivitas dan produk energi yang jauh lebih tinggi, tetapi suhu Curie lebih rendah daripada magnet jenis lainnya.

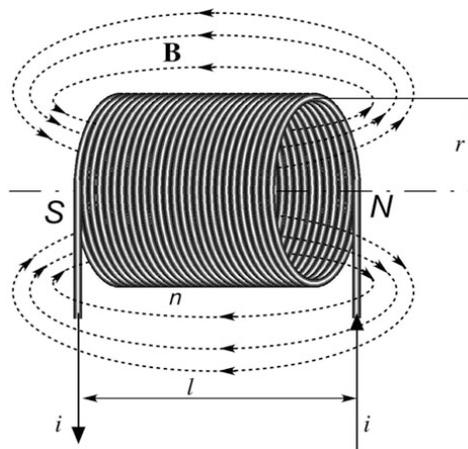
Pada 1990-an ditemukan bahwa molekul tertentu yang mengandung ion logam paramagnetik mampu menyimpan momen magnetik pada suhu yang sangat rendah. Sebenarnya, magnet-magnet ini adalah molekul besar dengan sifat magnetik yang kuat. Magnet semacam itu disebut magnet molekul tunggal (SMM). Kebanyakan SMM mengandung mangan, tetapi juga dapat ditemukan dengan vanadium, besi, nikel, dan kobalt cluster.

Keuntungan SMM termasuk induktansi residu yang kuat, kelarutan dalam pelarut organik, dan dimensi subnanoscale. Baru-baru ini telah ditemukan bahwa beberapa sistem rantai juga dapat menampilkan magnetisasi yang bertahan lama pada suhu yang relatif lebih tinggi. Sistem ini disebut magnet rantai-tunggal (SCM). Untuk memilih magnet permanen untuk aplikasi praktis, seseorang dapat menggunakan kalkulator magnet bermanfaat di Internet ([www.kjmagnetics.com/calculator.asp](http://www.kjmagnetics.com/calculator.asp)).

### 3.4 Coil dan Solenoid

Solenoida dan coil dibuat dalam bentuk lilitan kawat panjang di heliks dan membawa arus  $i$ . Solenoida dan kumparan adalah perangkat praktis untuk menghasilkan medan magnet. Solenoida sering digunakan sebagai aktuator untuk mengubah arus listrik menjadi gaya mekanik. Tetapi coil dan solenoid juga merupakan dasar bagi banyak sensor yang bias digunakan, terutama untuk mendeteksi pergerakan dan jarak. Kata solenoida berasal dari bahasa Yunani:  $\sigma\omega\lambda\eta\nu\alpha\varsigma$  (pipa) dan  $\epsilon\acute{\iota}\delta\omicron\varsigma$  (bentuk). Perbedaan antara coil dan solenoid adalah bahwa yang pertama mungkin memiliki bentuk lilitan, sedangkan yang terakhir adalah paket lilitan dalam bentuk silinder. Asumsi berikutnya adalah bahwa solenoida sangat panjang dibandingkan dengan diameternya. Medan magnet solenoida adalah jumlah vektor dari pengaturan medan oleh semua lilitan yang membentuk solenoida.

Jika sebuah kumparan memiliki lilitan dengan jarak yang lebar, medan magnet cenderung akan hilang diantara kabel. Pada titik-titik di dalam solenoid dan cukup jauh dari kabel, vektor magnetik  $B$  sejajar dengan sumbu solenoid. Dalam kasus tertentu pembatas kawat berdempetan sangat berdekatan yang ditunjukkan pada Gambar 3.5, solenoid pada dasarnya menjadi lembaran arus silinder. Jika kami menerapkan hukum Ampere pada lembaran saat ini, besarnya medan magnet di dalam solenoid menjadi



Gambar 3. 5 Solenoid atau coil

$$B = \mu_0 i_o n \quad (3.4)$$

di mana  $n$  adalah jumlah lilitan per satuan panjang dan  $i_o$  adalah arus melalui kawat solenoid. Meskipun, persamaan ini diturunkan untuk solenoid yang sangat panjang, ia cukup baik untuk solenoida aktual untuk titik-titik internal dekat pusat solenoid. Perlu dicatat bahwa  $B$  tidak tergantung pada diameter atau panjang solenoid dan bahwa  $B$  konstan di atas penampang solenoid. Karena diameter solenoida bukan bagian dari persamaan, beberapa lapisan belitan dapat digunakan untuk menghasilkan medan magnet dengan kekuatan yang lebih tinggi. Medan magnet di luar solenoid lebih lemah daripada di dalam.

### 3.5 Induksi

Pada tahun 1831, Michael Faraday di Inggris dan Joseph Henry di A.S. menemukan salah satu efek paling mendasar dari elektromagnetisme: kemampuan medan magnet yang bervariasi untuk menginduksi arus listrik dalam kawat. Medan magnet tidak spesifik dalam asal-usulnya, jadi tidak penting bagaimana medan itu diproduksi (baik dengan magnet permanen atau solenoida) efeknya sama. Arus listrik dihasilkan selama medan magnet berubah. Medan magnet stasioner tidak menghasilkan arus.

Hukum induksi Faraday mengatakan bahwa tegangan yang diinduksi, atau gaya gerak listrik, adalah sama dengan laju perubahan fluks magnet melalui sirkuit. Jika laju perubahan dalam  $\text{Wb/s}$ , mis. E.f. ( $\epsilon$ ) akan dalam volt:

$$\epsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.5)$$

Tanda minus adalah indikasi arah yang diinduksi oleh medan elektro magnetik. Jika berbagai fluks magnet diterapkan ke solenoid, mis. muncul di setiap lilitan dan semua ini harus ditambahkan. Jika koil dibuat sedemikian rupa karena setiap lilitan memiliki luas penampang yang sama, fluks yang melewati setiap lilitan akan sama, maka tegangan yang diinduksi adalah

$$V = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3.6)$$

dengan  $N$  adalah jumlah lilitan. Persamaan ini dapat ditulis ulang dalam bentuk yang menarik bagi perancang sensor atau insinyur.

$$V = -N \frac{d(BA)}{dt} \quad (3.7)$$

Persamaan tersebut berarti bahwa tegangan dalam sirkuit pick-up dapat dihasilkan baik dengan mengubah amplitudo medan magnet (B) atau mengubah area sirkuit (A). Dengan demikian, tegangan yang diinduksi tergantung pada:

- Memindahkan sumber medan magnet (magnet, koil, kawat, dll.) berkenaan dengan koil penerima.
- Arus yang bervariasi dalam koil atau kawat, yang menghasilkan medan magnet.
- Mengubah orientasi sumber magnet sehubungan dengan sirkuit pick-up.
- Mengubah geometri sirkuit pick-up, misalnya, dengan merentangkan atau meremasnya, atau mengubah jumlah belitan dalam koil.

Jika arus listrik melewati kumparan, yang terletak di dekat kumparan lain, menurut hukum Faraday, maka di koil kedua akan muncul arus listrik. Namun, medan magnet tidak hanya menembus kumparan kedua tetapi juga menembus kumparan pertama. Dengan demikian, induktansi diri atau dengan kata lain induktansi dari kumparan didefinisikan sebagai milik kumparan karena yang menentang perubahan arus yang mengalir melalui itu. Induktansi dicapai oleh kumparan karena self-induced emf yang dihasilkan dalam kumparan itu sendiri dengan mengubah arus yang mengalir melalui itu. Ini disebut self-induction dan tegangan yang dihasilkan disebut *self-induced e.m.f.* Hukum Faraday untuk bagian tengah solenoid adalah

$$v = - \frac{d(n\Phi_B)}{dt} \quad (3.8)$$

Angka dalam tanda kurung disebut hubungan fluks dan merupakan karakteristik penting dari perangkat. Untuk koil sederhana tanpa bahan magnet di sekitarnya, nilai ini sebanding dengan arus melalui koil

$$n\Phi_B = Li \quad (3.9)$$

di mana L adalah konstanta proporsionalitas, yang disebut induktansi koil. Lalu, Persamaan. (3.9) dapat ditulis ulang sebagai

$$v = -\frac{d(n\Phi_B)}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (3.10)$$

Dari persamaan ini kita dapat mendefinisikan induktansi sebagai

$$L = -\frac{v}{\frac{di}{dt}} \quad (3.11)$$

Jika tidak ada bahan magnetik yang diperkenalkan di sekitar induktor (perangkat yang memiliki induktansi), nilai ditentukan oleh Persamaan (3.8) hanya bergantung pada geometri perangkat. Unit SI untuk induktansi adalah volt · detik/ampere, yang dinamai sesuai dengan fisikawan Amerika Joseph Henry (1797–1878):

1H = 1 V s/A. Singkatan untuk henry adalah H.

Beberapa kesimpulan dapat ditarik dari Persamaan (3.7):

- Tegangan yang diinduksi sebanding dengan laju perubahan arus melalui induktor.
- Tegangan pada dasarnya nol untuk dc.
- Tegangan meningkat secara linear dengan laju perubahan saat ini.
- Polaritas tegangan berbeda untuk peningkatan dan penurunan arus yang mengalir dalam arah yang sama.
- Tegangan yang diinduksi selalu dalam arah yang menentang perubahan arus.

Seperti kapasitansi, induktansi dapat dihitung dari faktor geometri. Untuk kumpulan yang dikemas rapat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5, induktansi adalah

$$L = -\frac{n\Phi_B}{i} \quad (3.12)$$

Jika  $n$  adalah jumlah lilitan per satuan panjang, jumlah hubungan fluks dalam panjang koil,  $l$ , adalah

$$N\Phi_B = (nl)(BA) \quad (3.13)$$

di mana  $A$  adalah luas penampang koil. Untuk solenoid tanpa inti magnet,  $B = \mu ni$ , maka induktansi koil adalah:

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} = \mu_0 n^2 l A \quad (3.14)$$

Perlu dicatat bahwa  $lA$  adalah volume solenoid yang sering disebut sebagai faktor geometri.

Jika sebuah inti magnetik dimasukkan ke dalam ruang dalam solenoid, induktansi akan bergantung pada dua faktor tambahan: permeabilitas magnetik relatif,  $r$ , dari bahan inti, dan  $g$ , faktor geometri inti,  $g$ :

$$L = \mu_0 \mu_r n^2 g G \quad (3.15)$$

Perhatikan bahwa faktor  $g$  tergantung pada ukuran dan bentuk inti magnetik, kedalaman sisipannya, dan kedekatan dengan ujung solenoida. Poin lain yang harus dipertimbangkan adalah permeabilitas relatif  $\mu_r$  dari perubahan bahan feromagnetik dengan arus  $i$ , dengan demikian, Persamaan. (3.16) memerlukan koefisien koreksi  $\eta_i$  yang merupakan fungsi dari arus yang melewati koil solenoid yang memiliki inti magnetik (tanpa inti  $\mu_r = \eta_i = 1$ ):

$$L = \mu_0 \mu_r n^2 \eta_i g G \quad (3.16)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa induktansi  $L$  dapat dimodulasi oleh setiap faktor di sisi kanannya (kecuali  $\mu_0$  yang merupakan konstanta universal): jumlah putaran kumparan dapat bervariasi, semua dimensi kumparan dapat diubah, bentuk inti dan kedalaman penyisipan dapat diubah, dan bahkan bahan inti dapat dimodifikasi. Ini membuat sensor induktif sangat berguna dalam banyak aplikasi, misalnya untuk mengukur perpindahan untuk mendeteksi kekuatan, tekanan, posisi, dan variabel lainnya.

Ketika dihubungkan ke sirkuit elektronik, induktansi dapat direpresentasikan sebagai "Resistensi kompleks"

$$\frac{V}{i} = j\omega L \quad (3.17)$$

Dimana  $j = \sqrt{-1}$  dan  $i$  adalah arus sinusoidal yang memiliki frekuensi  $\omega = 2\pi f$ , artinya bahwa hambatan kompleks dari suatu induktor meningkat pada frekuensi yang lebih tinggi. Ini disebut hukum Ohm untuk induktor. Notasi kompleks menunjukkan bahwa arus tertinggal tegangan  $90^\circ$  dan dengan demikian koil disebut komponen reaktif.

Jika dua kumparan dibawa di sekitar satu sama lain dan satu kumparan dialiri arus listrik, medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan itu berinteraksi dengan elektron dalam kumparan kedua dan menginduksi di dalamnya medan elektromagnetik:

$$v_2 = -M_{21} \frac{di_1}{dt} \quad (3.18)$$

di mana  $M_{21}$  adalah koefisien induktansi timbal balik antara dua kumparan. Perhitungan induktansi timbal balik bukanlah latihan sederhana dan dalam banyak kasus praktis dapat lebih mudah dilakukan secara eksperimental. Namun demikian, untuk beberapa kombinasi yang relatif sederhana, induktansi bersama telah dihitung. Sebagai contoh, koil yang memiliki lilitan  $N$  yang ditempatkan di sekitar solenoid panjang, dengan  $n$  putaran per unit, induktansi timbal balik adalah

$$M = \mu_0 \pi R^2 n N \quad (3.19)$$

di mana  $R$  adalah diameter solenoida.

Jika dua kumparan dibawa di sekitar satu sama lain, induktansi timbal balik mereka dapat dinyatakan sebagai:

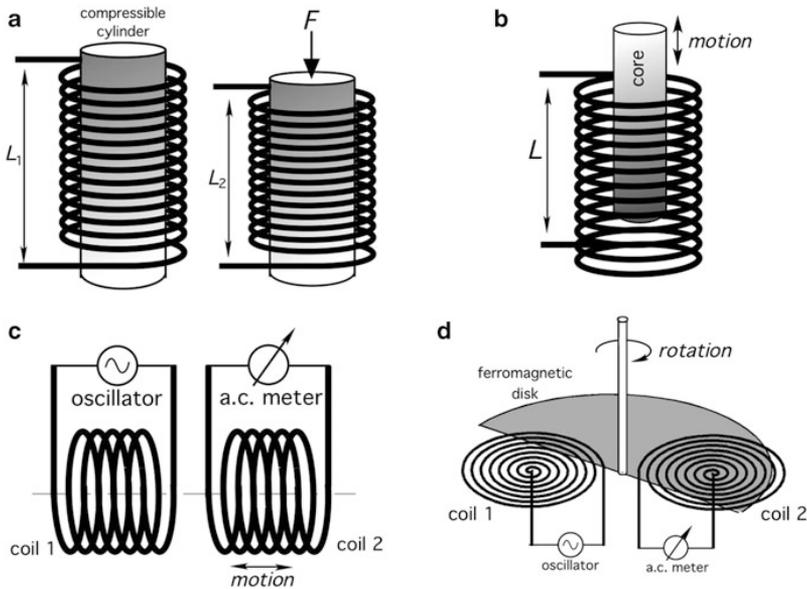
$$M_{12} = N_1 N_2 P_{21} \quad (3.20)$$

di mana  $N_1$  dan  $N_2$  adalah masing-masing jumlah lilitan di kumparan pertama dan kedua, sementara  $P_{21}$  adalah ruang permanen di mana fluks magnetik menjalar. Arti permanen mirip dengan hambatan listrik tetapi digunakan untuk fluks magnet. Ini sebanding dengan permeabilitas magnetik dari bahan kumparan-koil dan geometri, sehingga membentuk dasar untuk merancang banyak sensor yang berguna.

Cara lain yang berguna untuk mengekspresikan induktansi timbal balik adalah melalui induktivitas koil dan koefisien kopling  $0 \leq k \leq 1$

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (3.21)$$

Untuk menggambarkan bagaimana induktansi koil dan induktansi bersama dapat digunakan dalam sensor, Gambar 3.6 menunjukkan empat desain konseptual. Jika sebuah kumparan dililitkan di sekitar silinder lentur yang memiliki aksi pegas, menurut Persamaan. (3.15), geometri koil  $G$  dapat divariasikan dengan aplikasi ke inti gaya eksternal,  $F$ , Gambar 3.6a.



**Gambar 3. 6 Contoh sensor dengan koil.. Koil geometri yang berubah (a), solenoid dengan inti bergerak (b), dua koil bergerak (c), dan koil induktansi timbal balik variabel variabel (d)**

Ini menyebabkan perubahan induktansi koil,  $L$ . Jika koil merupakan bagian dari osilator LC elektronik, gaya yang diberikan,  $F$ , akan memodulasi frekuensi output. Solenoida mungkin ada di dalam inti feromagnetik yang dapat bergerak, Gambar 3.6b, yang ketika bergerak, menurut Persamaan. (3.16), akan memvariasikan faktor  $g$ , karena hanya sebagian inti yang ada di dalam solenoid memodulasi induktansi solenoid. Dengan demikian, semakin dalam inti yang dimasukkan, semakin tinggi nilai induktansi. Gambar 3.6c menunjukkan gulungan yang bisa saling bergerak. Koil kiri diumpankan oleh sinyal eksitasi dari osilator. Output coil akan menghasilkan a.c. tegangan sebanding dengan kumparan koil, karena perubahan  $P_{21}$  dalam Persamaan. (3.17) memodulasi induktansi timbal balik. Cara lain untuk memodulasi kopling koil diilustrasikan pada Gambar 3.6d, di mana dua koil dipasangkan melalui semidisk feromagnetik yang dapat diputar (berputar) - media kopling. Kopling adalah maksimum ketika area tumpang

tindih semidisk dengan kedua kumparan adalah yang terbesar, sedangkan kopling adalah yang terendah ketika tidak ada bahan feromagnetik diposisikan di atas kumparan.

### 3.5.1 Hukum Lenz

Dalam banyak aplikasi sensor yang melibatkan kopling induktif, orang harus selalu mempertimbangkan bahwa arus yang diinduksi dalam kumparan sekunder menghasilkan medan magnetnya sendiri yang bekerja mundur ke arah kumparan primer. Fenomena ini dikenal sebagai Lenz Law yang menyatakan: Arus induksi akan muncul sedemikian rupa sehingga menentang arus yang memproduksinya. Tanda minus pada Persamaan (3.5) menyatakan oposisi ini. Jadi, arus yang diinduksi cenderung untuk mengurangi arus yang berasal dari koil primer. Dapat dikatakan bahwa Hukum Lenz mirip dengan hukum gerak ketiga Newton (yaitu, untuk setiap tindakan selalu ada reaksi yang sama dan berlawanan). Hukum Lenz mengacu pada arus yang diinduksi, yang berarti bahwa ia berlaku hanya di sirkuit konduksi tertutup. Perhatikan bahwa fluks magnet yang berlawanan pada koil mengurangi induktansi. Hukum Lenz memiliki berbagai aplikasi yang sangat luas, termasuk pengereman elektromagnetik, kompor induksi, detektor logam, dan banyak lainnya.

### 3.5.2 Arus Eddy

Eddy current adalah fenomena listrik yang ditemukan pada tahun 1851 oleh fisikawan Perancis Le'on Foucault. Dengan demikian, arus ini kadang-kadang disebut arus Foucault. Ini muncul dalam dua kasus:

- (1) ketika sebuah konduktor terkena medan magnet yang berubah karena gerakan relatif dari sumber medan dan konduktor, dan
- (2) karena perubahan intensitas medan magnet. Efek-efek ini menyebabkan aliran elektron yang bersirkulasi, atau arus sirkular, dalam tubuh konduktor. Konduktor mungkin magnetis atau tidak.

Arus Eddy bersirkulasi di landasan yang tegak lurus terhadap fluks magnet. Jika mereka diinduksi oleh sebuah kumparan, mereka

biasanya berjalan sejajar dengan gulungan kumparan dan aliran terbatas pada area medan magnet penginduksi. Arus eddy berkonsentrasi di dekat permukaan yang berdekatan dengan koil eksitasi dan kekuatannya berkurang dengan jarak dari koil. Kerapatan arus eddy berkurang secara eksponensial dengan kedalaman. Fenomena ini dikenal sebagai efek kulit.

Pusaran arus yang bersirkulasi ini menciptakan medan magnet terinduksi yang menentang perubahan medan magnet asli karena hukum Lenz, sehingga menyebabkan gaya tolak atau seret antara konduktor dan magnet atau koil penginduksi. Semakin kuat medan magnet yang diterapkan, atau semakin besar konduktivitas listrik konduktor, atau semakin cepat bidang yang terkena konduktor terhadap perubahan, maka semakin besar arus yang dikembangkan dan semakin besar medan yang berlawanan.

Efek kulit muncul ketika arus eddy yang mengalir di benda uji pada kedalaman apa pun menghasilkan medan magnet yang menentang medan primer, sehingga mengurangi fluks magnet neto dan menyebabkan penurunan arus arus ketika kedalaman meningkat. Atau, arus eddy di dekat permukaan dapat dilihat sebagai pelindung medan magnet koil, sehingga melemahkan medan magnet pada kedalaman yang lebih besar dan mengurangi arus yang diinduksi.

## BAB IV.

# SENSOR BERPRINSIP HAMBATAN

### 4.1 Pengertian Hambatan

Dalam materi apa pun, elektron bergerak secara acak seperti gas dalam wadah tertutup. Tidak ada arah yang khusus dan konsentrasi elektron tersebar merata di bagian mana pun dari bahan yang seragam (dengan asumsi bahwa materi tersebut homogen). Mari kita ambil sebatang materi sembarang. Panjang bilah adalah  $l$ . Saat ujung batang dihubungkan ke baterai yang memiliki tegangan  $V$  (Gambar. 4.1), medan listrik  $E$  akan dipasang di dalam material. Mudah untuk menentukan kekuatan medan listrik

$$E = \frac{V}{l} \quad (4.1)$$

Misalnya, jika bilah memiliki panjang  $l = 1$  m dan baterai menghasilkan 1,5 V, medan listrik memiliki nilai 1,5 V/m. Bidang itu bekerja pada elektron bebas dan menggerakannya melawan arah medan itu. Dengan demikian, arus listrik mulai mengalir melalui material. Kita bisa membayangkan penampang material yang dilewati muatan listrik  $q$ . Laju aliran muatan listrik (satuan muatan per satuan waktu) disebut arus listrik

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (4.2)$$

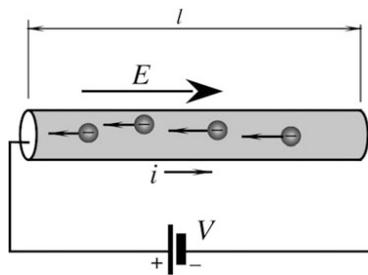
Unit SI dari arus adalah ampere (A):  $1 \text{ A} = 1 \text{ C}/1 \text{ s}$ . Dalam SI, ampere didefinisikan sebagai arus listrik yang dipertahankan dalam dua kabel paralel yang panjangnya tak tentu dipisahkan oleh 1 m di ruang bebas, yang menghasilkan gaya antara kedua kabel (karena medan magnetnya) sebesar  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$  untuk setiap meter panjangnya. Ampere adalah arus listrik yang cukup kuat. Dalam teknologi sensor, umumnya arus yang jauh lebih kecil digunakan, oleh karena itu, submultiples A sering digunakan:

1 milliampere (mA)	$10^{-3}$ A
1 microampere ( $\mu$ A)	$10^{-6}$ A
1 nanoampere (nA)	$10^{-9}$ A
1 picoampere (pA)	$10^{-12}$ A
1 femtoampere (fA)	$10^{-15}$ A

**Gambar 4. 1** Tegangan melintasi bahan yang memproduksi arus listrik

Tidak peduli apapun penampang materialnya, apakah itu homogen atau tidak, arus listrik melalui setiap penampang selalu sama untuk medan listrik tertentu. Mirip dengan aliran air melalui kombinasi pipa yang terhubung seri dengan diameter berbeda dimana laju alirannya sama di seluruh kombinasi pipa. Air mengalir lebih cepat di bagian yang sempit dan lebih lambat di bagian yang lebar, tetapi jumlah air yang melewati setiap penampang per unit waktu adalah konstan. Alasannya sangat sederhana dimana air di pipa tidak dikeringkan, atau diciptakan. Alasan yang sama berlaku untuk arus listrik.

Salah satu hukum dasar fisika adalah hukum kekekalan energi. Dalam kondisi tunak, muatan dalam suatu material tidak dibuat atau dihancurkan. Apa pun yang masuk harus keluar. Pada bagian ini, kami tidak mempertimbangkan penyimpanan muatan (kapasitor), dan semua bahan yang kami diskusikan dikatakan memiliki sifat resistif murni.



Mekanisme konduksi listrik dalam bentuk yang disederhanakan dapat dijelaskan sebagai berikut. Bahan konduktor, misalnya kawat tembaga, dapat dimodelkan sebagai kisi periodik semi-seperti semi-ion ion tembaga positif. Kesemuanya digabungkan bersama oleh gaya elektromagnetik yang kuat. Setiap

atom tembaga memiliki satu elektron konduksi, yang bebas bergerak di sekitar kisi. Ketika medan listrik  $E$  didirikan di dalam konduktor, gaya  $eE$  bekerja pada setiap elektron ( $e$  adalah muatan elektron). Elektron berakselerasi di bawah gaya dan bergerak. Namun, pergerakannya sangat singkat karena elektron bertabrakan dengan atom-atom tembaga di sekitarnya, yang secara konstan bergetar dengan intensitas yang ditentukan oleh suhu material.

Elektron mentransfer energi kinetiknya ke kisi dan sering ditangkap oleh ion positif. Ketika ditangkap, ia melepaskan elektron lain, yang terus bergerak di bidang listrik hingga, pada gilirannya, bertabrakan dengan bagian kisi berikutnya. Waktu rata-rata antar tabrakan ditetapkan sebagai  $\tau$ . Itu tergantung pada jenis bahan, struktur, dan kotoran. Misalnya, pada suhu kamar, elektron konduksi dalam tembaga murni bergerak di antara tumbukan untuk jarak rata-rata  $0,04 \mu\text{m}$  dengan  $\tau = 2,5 \cdot 10^{-14}$  s. Efeknya, elektron yang mengalir ke material di dekat sisi negatif baterai tidak sama dengan yang mengalir ke terminal positif. Namun, arus konstan atau aliran elektron dipertahankan di seluruh material.

Tumbukan elektron dengan atom material selanjutnya menambah agitasi atom dan, selanjutnya, menaikkan suhu material. Inilah sebabnya mengapa melewati arus listrik melalui bahan resistif menghasilkan apa yang disebut pembebasan panas Joule. Diputuskan secara sewenang-wenang untuk menentukan arah aliran arus bersama dengan arah medan listrik, yaitu ke arah yang berlawanan dari aliran elektronik. Oleh karena itu, arus listrik mengalir dari terminal positif ke negatif baterai sementara elektron benar-benar bergerak ke arah yang berlawanan. Sangat menarik untuk dicatat bahwa tidak seperti air yang mengalir melalui pipa, elektron pada awalnya tidak perlu "mengisi" konduktor sebelum mereka mulai mengalir keluar pada sisi positif. Elektron selalu ada dalam konduktor, sehingga sudah terisi. Karena listrik yang dipasangkan dalam sebuah konduktor merambat dengan kecepatan cahaya pada material konduktor, arus listrik muncul di semua bagian konduktor hampir secara instan.

## 4.2 Tahanan Spesifik

Jika kita membuat dua batang yang identik secara geometris dari bahan yang berbeda, katakanlah dari tembaga dan kaca, dan berikan tegangan yang sama kepada mereka, medan listrik pada batang akan sama, tetapi arus yang dihasilkan akan sangat berbeda. Suatu material dapat dicirikan oleh kemampuannya untuk melewatkan arus listrik. Ini disebut resistivitas dan material dikatakan memiliki hambatan listrik yang ditentukan oleh hukum Ohm, yang berarti bahwa rasio tegangan terhadap arus adalah konstan  $V/R = I$ , untuk resistansi murni (tidak ada induktansi atau kapasitansi), tegangan dan arus saling berhubungan satu sama lain, artinya mereka berubah secara bersamaan. Setiap bahan memiliki tahanan listrik<sup>7</sup> dan karenanya disebut resistor. Satuan SI resistansi adalah 1 ohm ( $\Omega$ ) = 1 V/1 A. Multiples dan submultiples lain dari  $\Omega$  adalah:

1 milliohm (m $\Omega$ )	$10^{-3} \Omega$
1 kilohm (k $\Omega$ )	$10^3 \Omega$
1 Megaohm (M $\Omega$ )	$10^6 \Omega$
1 Gigaohm (G $\Omega$ )	$10^9 \Omega$
1 Teraohm (T $\Omega$ )	$10^{12} \Omega$

Jika kita lagi membandingkan arus listrik dengan aliran air, tekanan melintasi garis pipa (katakanlah, dalam pascal) adalah analog dengan tegangan (V) di resistor, arus listrik (C/s) adalah analog dengan aliran air (l/s), dan hambatan listrik ( $\Omega$ ) sesuai dengan hambatan aliran air dalam pipa (tidak ada unit khusus). Jelas bahwa resistensi terhadap aliran air lebih kecil ketika pipa pendek, lebar, dan tidak memiliki penghalang. Ketika pipa memiliki, misalnya, filter dipasang di dalamnya, resistensi terhadap aliran air akan lebih tinggi.

Pertimbangkan tubuh manusia di mana aliran darah arteri dapat dibatasi oleh deposit kolesterol pada lapisan dalam arteri. Deposit ini meningkatkan resistensi aliran (disebut resistensi pembuluh darah). Tekanan darah arteri meningkat untuk mengimbangi peningkatan resistensi pembuluh darah, sehingga

jantung memompa lebih kuat. Jika tekanan arteri tidak dapat mengimbangi peningkatan resistensi pembuluh darah, kekuatan pemompaan jantung tidak lagi memadai untuk memberikan aliran darah yang diperlukan ke organ vital, termasuk jantung itu sendiri. Ini dapat menyebabkan serangan jantung atau komplikasi lainnya.

Hukum dasar yang mengatur desain sirkuit listrik disebut Hukum Kirchhoff, setelah fisikawan Jerman Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887). Hukum ini awalnya disusun dengan mempertimbangkan kesamaan dengan jaringan pipa ledeng, yang seperti telah kita lihat, analog dengan jaringan listrik, berlawanan dengan karakteristik perangkat. Tergantung pada keduanya: jenis bahan dan geometri resistor. Bahan itu sendiri dapat dicirikan oleh resistivitas spesifik,  $\rho$ , yang didefinisikan sebagai

$$\rho = \frac{E}{j} \quad (4.3)$$

di mana kerapatan arus  $j = i/a$  ( $a$  adalah luas penampang material). Satuan SI resistivitas adalah  $\Omega\text{m}$ . Cukup sering, kuantitas timbal balik digunakan, yang disebut konduktivitas,  $\sigma = 1/\rho$ . Unit SI konduktivitas adalah siemens yang memiliki dimensi  $[1/\Omega]$ . Kadang-kadang, siemens disebut mho yaitu "ohm" dieja terbalik. Tahanan spesifik suatu material dapat dinyatakan melalui waktu rata-rata antara tumbukan,  $\tau$ , muatan elektronik,  $e$ , massa elektron,  $m$ , dan sejumlah elektron konduksi per unit volume material,  $n$ :

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (4.4)$$

Untuk menemukan hambatan konduktor, rumus berikut ini sering digunakan:

$$R = \rho \frac{l}{a} \quad (4.5)$$

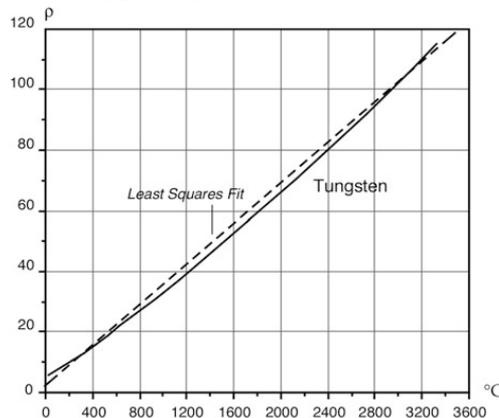
di mana  $a$  adalah luas penampang dan  $l$  adalah panjang konduktor. Rasio  $l/a$  disebut faktor geometri resistor. Persamaan (4.5) menetapkan hubungan mendasar antara resistensi dan parameternya. Dengan demikian, jika seseorang ingin merancang sensor resistif, ia harus menemukan cara untuk memodulasi baik resistivitas spesifik atau faktor geometri,  $l/a$ . Di bawah ini kami meninjau beberapa sensor resistif yang menggunakan modulasi variabel dalam Persamaan. (4.5) dan (4.2)

### 4.3 Sensitivitas Suhu Resistor

Pada kenyataannya, resistivitas spesifik suatu material tidak konstan. Ini agak berubah dengan suhu,  $t$ , dan dalam kisaran suhu yang relatif sempit dapat diperkirakan secara linear melalui sensitivitas termal (kemiringan)  $\alpha$ , yang merupakan koefisien suhu resistivitas (TCR).

$$\rho = \rho_0 \left( 1 + \alpha \frac{t-t_0}{t_0} \right) \quad (4.6)$$

di mana  $\rho_0$  adalah resistivitas spesifik pada suhu referensi  $t_0$  (umumnya  $t_0 = 0$  atau  $25$  C). Dalam rentang yang lebih luas, resistivitas adalah fungsi temperatur nonlinier. Untuk aplikasi non-presisi pada rentang suhu yang luas, resistivitas tungsten yang merupakan resistansi logam meningkat sebanding dengan suhu, maka filamen tungsten dalam bola lampu bertindak sebagai pengatur suhu sendiri, sehingga filamen tidak terbakar. Ketika suhu meningkat, hambatan naik, dan arus turun, menyebabkan suhu turun. Gambar 4.2 menunjukkan pemodelan resistivitas spesifik tungsten yang paling sesuai.



**Gambar 4. 2 Resistivitas spesifik tungsten sebagai fungsi temperatur**

Ketika akurasi yang lebih baik diperlukan, Persamaan linear (4.6) tidak dapat digunakan. Sebagai gantinya, polinomial orde tinggi dapat digunakan. Misalnya, pada rentang suhu yang lebih luas, resistivitas tungsten dapat ditemukan dari pendekatan orde kedua:

$$\rho = 4.45 + 0.0269t + 1.914 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (4.7)$$

di mana  $t$  adalah suhu di C dan  $\rho$  di  $\Omega$  m. Logam memiliki koefisien suhu positif (PTC)  $\alpha$ , sementara banyak semikonduktor dan oksida memiliki koefisien resistensi suhu negatif (NTC). Sebagai aturan, resistor NTC memiliki temperatur tinggi nonlinier. Ketika resistor konvensional digunakan dalam rangkaian elektronik, resistansi harus setepat (sebaik) mungkin. Sebuah resistor dikatakan "baik" bila memiliki  $\alpha = 10^{-5}$  atau bahkan lebih rendah. Namun, dalam teknologi penginderaan, sering diinginkan untuk memiliki resistor "buruk" yang koefisien suhunya  $\alpha$  tinggi dan dapat diprediksi. Sebuah  $\alpha$  yang baik memungkinkan pembuatan dua jenis sensor suhu: satu dikenal sebagai termistor (kontraksi kata termal dan resistor) dan yang lainnya adalah detektor suhu resistansi (RTD). RTD yang paling populer adalah sensor platinum (Pt) yang beroperasi pada rentang suhu yang luas hingga 600 C. Resistensi Pt RTD ditunjukkan pada Gambar 4.3. Garis lurus terbaik diberikan oleh Persamaan (4.8):

$$R = R_0(1 + 36.79 \cdot 10^{-4}t) \quad (4.8)$$

di mana resistansi kalibrasi  $R_0$  diukur pada 0 C,  $t$  berada di C dan  $R$  berada di  $\Omega$ . Sedikit ketidaklinearan pada kurva resistansi Pt, jika tidak dikoreksi, dapat menyebabkan kesalahan yang cukup besar pada kisaran suhu yang luas. Perkiraan yang lebih tepat resistensi Pt adalah polinomial orde kedua yang memberikan akurasi lebih baik daripada 0,01 C:

$$R = R_0(1 + 39.08 \cdot 10^{-4}t - 5.8 \cdot 10^{-7}t^2)\Omega \quad (4.9)$$

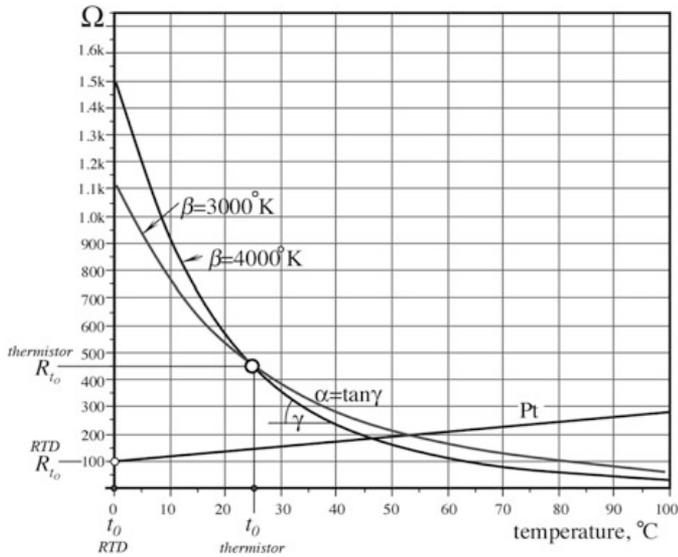
Perlu dicatat, bagaimanapun, bahwa koefisien dalam Persamaan (4.8 dan 4.9) agak tergantung pada kemurnian material dan teknologi manufaktur. Untuk membandingkan akurasi model linier dan linier termometer platinum, kami menggunakan contoh berikut. Jika sensor Pt RTD pada suhu referensi 0 C memiliki resistivitas  $R_0 = 100 \Omega$ , untuk +150 C perkiraan linier memberikan

$$R = 100(1 + 36,79 \cdot 10^{-4} \cdot 150) = 155.18\Omega \quad (4.10)$$

sementara dari pendekatan orde kedua

$$R = 100(1 + 39,08 \cdot 10^{-4} \cdot 150 - 5,8 \cdot 10^{-7} \cdot 150^2) = 157.32\Omega \quad (4.11)$$

Perbedaan antara keduanya adalah 2,13  $\Omega$ . Ini setara dengan kesalahan pada +150 C sekitar 5,8 C, yang berarti bahwa pendekatan linier memberikan pembacaan yang lebih rendah dengan kesalahan hampir 4%.



**Gambar 4. 3 Karakteristik suhu-tahanan untuk dua termistor dan Pt RTD ( $R_0 = 1\text{ k}$ ); catat suhu referensi yang berbeda untuk termistor ( $T_0 = 25\text{C}$ ) dan RTD ( $T_0 = 0\text{C}$ )**

Jenis lain dari sensor suhu resistif termasuk termistor yang merupakan resistor dengan koefisien temperatur besar, baik negatif (NTC), atau positif (PTC). Untuk pengukuran suhu biasanya digunakan NTC, sedangkan termistor PTC karena nonliniernya yang sangat tinggi digunakan untuk aplikasi di mana akurasi yang lebih rendah diperdagangkan untuk sensitivitas yang sangat tinggi di wilayah yang dipilih. Termistor adalah semikonduktor keramik yang biasanya terbuat dari oksida dari satu atau lebih logam berikut ini: nikel, mangan, kobalt, titanium, besi. Oksida dari logam lain kadang-kadang digunakan.

Tahanan termistor bervariasi dari sepersekian ohm hingga banyak Megohms. Termistor dapat diproduksi dalam bentuk cakram, tetesan, tabung, lipatan, atau film tipis yang diendapkan pada substrat keramik. Juga, pasta film tebal dapat dicetak pada substrat keramik untuk membentuk termistor film tebal. Juga resistensi semikonduktor (Ge dan Si) dapat dikontrol untuk membuat NTC atau PTC untuk membentuk RTD semikonduktif dan

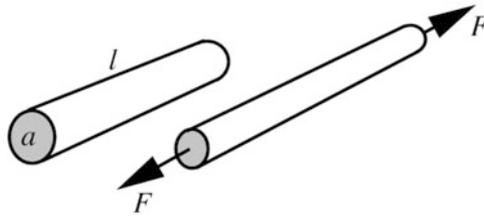
termistor. Yang paling populer dari perkiraan fungsi transfer termistor adalah bentuk eksponensial

$$R_t = R_0 e^{\beta \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \quad (4.12)$$

di mana  $T$  adalah suhu termistor,  $T_0$  adalah suhu kalibrasi,  $R_0$  adalah ketahanannya pada suhu kalibrasi  $T_0$ , dan  $\beta$  adalah suhu karakteristik bahan termistor. Semua suhu dan  $\beta$  berada di kelvin. Umumnya,  $\beta$  berkisar antara 2600 dan 4200K (nilainya dapat mencapai bahkan 6000K untuk termistor semikonduktif yang terbuat dari Germanium) dan untuk rentang suhu yang relatif sempit  $\beta$  dapat dianggap tidak tergantung suhu, yang membuat Persamaan. (4.12) perkiraan yang cukup baik. Ketika akurasi yang lebih tinggi diperlukan, perkiraan lain digunakan. Gambar 4.3 menunjukkan resistensi/dependensi suhu untuk dua termistor yang memiliki  $\beta = 3000$  dan  $4000$  K dan juga untuk RTD platinum. Sensor suhu platinum secara substansial kurang sensitif dan lebih linier dengan kemiringan positif, sedangkan termistor NYC adalah nonlinier dengan sensitivitas yang lebih tinggi dan kemiringan variabel negatif. Secara tradisional, dalam lembar data, termistor ditentukan pada suhu referensi  $t_0 = 25$  C ( $T_0 = 298,15$ K), sedangkan RTD ditentukan pada  $t_0 = 0$  C ( $T_0 = 273,15$ K).

#### 4.4 Sensitivitas Regangan Resistor

Hambatan listrik dari suatu material berubah ketika material tersebut mengalami deformasi mekanis. Strain adalah ukuran deformasi. Deformasi mekanik memodulasi baik resistivitas spesifik atau faktor geometri seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan. (4.13). Sensitivitas regangan resistor disebut piezoresistivitas dari kata Yunani  $\pi\epsilon\sigma\eta$  (tekanan). Seperti yang telah kita lihat sebelumnya, resistor "baik" lebih baik stabil, sementara resistor "buruk" memberi kita kesempatan untuk membuat sensor. Dalam hal ini, kita berbicara tentang sensor regangan yang dapat digunakan untuk mengukur regangan. Juga dapat berfungsi sebagai bagian dalam banyak sensor kompleks lainnya, seperti perpindahan, gaya, sensor tekanan, dll.



**Gambar 4. 4 Strain mengubah geometri konduktor dan ketahanannya**

Untuk mendeformasi sebuah resistor dan menyebabkan ketegangan, itu harus ditekan. Stres,  $\sigma$ , berkaitan dengan gaya sebagai

$$\sigma = \frac{F}{a} = E \frac{dl}{l} = Ee \quad (4. 13)$$

di mana E adalah modulus Young dari material, F adalah gaya yang diterapkan, dan a adalah luas penampang. Dalam persamaan ini, rasio  $dl/l = e$  adalah regangan yang merupakan deformasi bahan yang dinormalisasi.

Gambar 4.4 menunjukkan konduktor silindris (kawat) yang diregangkan oleh gaya yang diberikan F. Volume v material tetap konstan (tidak ada material yang ditambahkan atau dilepas), sementara panjangnya bertambah, dan luas penampang menjadi lebih kecil. Akibatnya, Persamaan. (4,13) dapat ditulis ulang sebagai

$$R = \frac{\rho}{v} l^2 \quad (4. 14)$$

Perhatikan bahwa rasionya adalah konstan untuk bahan dan desain yang diberikan. Setelah berdiferensiasi, kita dapat mendefinisikan sensitivitas resistor kawat sehubungan dengan perpanjangan:

$$\frac{dR}{dl} = 2 \frac{\rho}{v} l \quad (4. 15)$$

Dari persamaan ini mengikuti bahwa sensitivitas regangan kawat menjadi lebih tinggi untuk kabel yang lebih panjang dan lebih tipis dengan resistivitas spesifik yang tinggi. Resistansi inkremental yang dinormalisasi dari kawat tegang adalah fungsi linear dari regangan, e, dan dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{dR}{R} = S_e e \quad (4. 16)$$

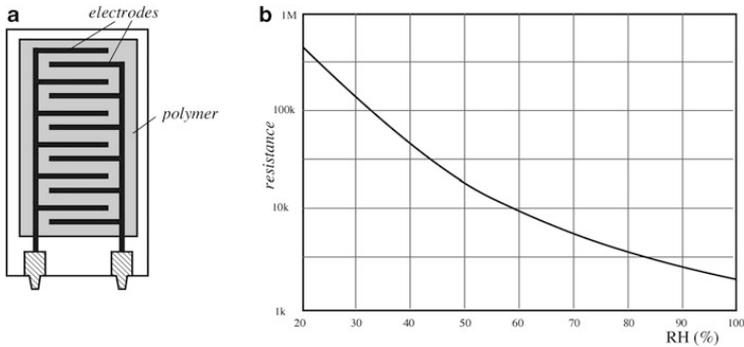
di mana  $S_e$  dikenal sebagai faktor pengukur atau sensitivitas elemen pengukur regangan. Untuk kabel logam berkisar dari 2 sampai 6. Ini jauh lebih tinggi untuk pengukur semikonduktor, di mana berada di antara 40 dan 200, karena dalam semikonduktor

faktor geometri memainkan peran yang jauh lebih kecil daripada perubahan dalam resistivitas spesifik karena deformasi kristal struktur material. Ketika bahan semikonduktor ditekan, resistivitasnya berubah tergantung pada jenis bahan dan konsentrasi doping. Namun, sensitivitas regangan dalam semikonduktor bergantung pada suhu yang memerlukan kompensasi yang tepat ketika digunakan pada rentang suhu yang luas.

#### **4.1 Sensitivitas Kelembaban Resistor**

Dengan memilih bahan untuk resistor, seseorang dapat mengontrol resistivitas spesifiknya dan kerentanannya terhadap faktor lingkungan. Salah satu faktor yang mungkin sangat mempengaruhi  $\rho$  adalah jumlah uap air yang dapat diserap oleh resistor. Resistor yang tergantung kelembaban dapat dibuat dari bahan higroskopis yang resistivitas spesifiknya sangat dipengaruhi oleh konsentrasi molekul air yang diserap. Ini adalah dasar untuk sensor kelembaban resistif yang disebut hygristors.

Hygristor resistif terdiri dari substrat keramik yang memiliki dua pola konduktif interdigitized elektroda (Gambar. 4.5a). Elektroda adalah konduktor di mana ruang di antara mereka ditutupi oleh gel semikonduktif higroskopis yang membentuk matriks untuk menanggulangi partikel konduktif. Struktur ini membentuk resistor antara dua elektroda. Gel biasanya dibuat dari hidroksietil selulosa, nonil fenil polietilen glikol eter, dan bahan organik lainnya dengan penambahan bubuk karbon. Gel digiling secara menyeluruh untuk menghasilkan campuran yang halus. Tipe lain dari hygristor dibuat dari film lithium chloride (LiCl) dan pengikat. Substrat yang dilapisi disembuhkan di bawah suhu dan kelembaban yang terkendali.



**Gambar 4.5** Disain Hygristor design (a) dan fungsi transferrnya (b).

Ketahanan lapisan berubah dengan kelembaban dalam cara nonlinier seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5b, yang harus diperhitungkan selama kalibrasi dan pemrosesan data. Waktu respons untuk banyak hygristors berkisar antara 10 hingga 30 detik. Itu bisa disingkat di udara yang bergerak. Kisaran resistensi bervariasi dari 1 kΩ hingga 100 MΩ.

Hygristor adalah sensor aktif, yaitu, mereka memerlukan sinyal eksitasi untuk menghasilkan output listrik. Penting untuk menggunakan hanya arus eksitasi AC simetris tanpa bias DC untuk mencegah polarisasi lapisan, jika tidak, sensor akan hancur.

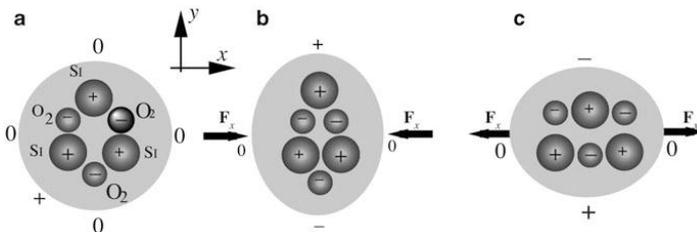
## BAB V.

# SENSOR DENGAN PRINSIP PIEZOELEKTRIK

### 5.1 Efek piezoelektrik

Efek piezoelektrik adalah pembangkitan muatan listrik oleh bahan kristal setelah mengalami tekanan, atau lebih tepatnya disebut sebagai distribusi ulang muatan listrik akibat tekangan. Efeknya ada pada kristal alami, seperti kuarsa (rumus kimia  $\text{SiO}_2$ ), keramik buatan manusia yang dipolarisasi (dibuat secara terpolarisasi) dan beberapa polimer, seperti PVDF. Dikatakan bahwa bahan piezoelektrik memiliki sifat feroelektrik. Nama itu diberikan oleh analogi dengan sifat feromagnetik, meskipun tidak ada zat besi di kebanyakan piezoelektrik. Tidak seperti piezoresistivitas yang dimanifestasikan oleh perubahan resistensi ketika ditekan, piezoelektrik dimanifestasikan dalam “penampilan” muatan listrik pada permukaan sebagai respons terhadap tekanan.

Curie bersaudara menemukan efek piezoelektrik di kuarsa pada tahun 1880, tetapi sangat sedikit penggunaan praktis dilakukan sampai 1917 ketika seorang Prancis lainnya, Profesor P. Langevin menggunakan lempengan kuarsa yang dipotong untuk menghasilkan dan mendeteksi gelombang suara dalam air. Karyanya menyebabkan perkembangan sonar.

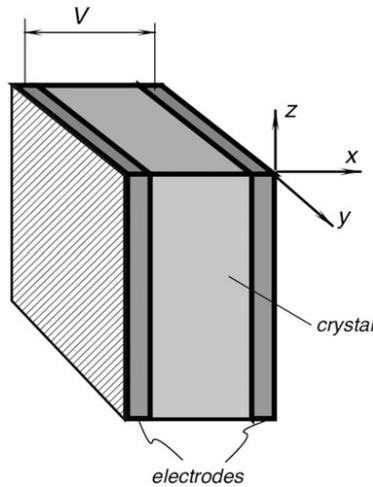


Gambar 5. 1 Efek Piezoelectric dalam Kristal kuarsa

Model efek piezoelektrik yang disederhanakan, namun cukup jelas diusulkan pada tahun 1927 oleh A. Meissner. Kristal kuarsa dimodelkan sebagai helix, Gambar 5.1a, dengan satu silikon, Si, dan dua oksigen, O<sub>2</sub>, atom bergantian di sekitar helix. Kristal kuarsa dipotong di sepanjang sumbu x, y, dan z, dengan demikian Gambar 5.1a adalah pandangan sepanjang sumbu z. Dalam sel kristal tunggal, ada tiga atom silikon dan enam atom oksigen. Oksigen sedang disatukan berpasangan. Setiap atom silikon membawa empat muatan positif dan sepasang atom oksigen membawa empat muatan negatif (dua per atom). Oleh karena itu sel kuarsa netral secara listrik di bawah kondisi tanpa tekanan. Ketika gaya eksternal, F<sub>x</sub>, diterapkan di sepanjang sumbu x, kisi heksagonal menjadi cacat. Gambar 5.1b menunjukkan gaya kompresi, yang menggeser atom dalam kristal sedemikian rupa sehingga muatan positif terbentuk di sisi atom silikon dan negatif di sisi pasangan oksigen. Dengan demikian, kristal mengembangkan ketidakseimbangan muatan listrik di sepanjang sumbu y. Jika kristal direntangkan di sepanjang sumbu x (Gambar. 5.1c), muatan polaritas yang berlawanan dibangun di sepanjang sumbu y, yang merupakan hasil dari deformasi yang berbeda. Model sederhana ini menggambarkan bahwa bahan kristal dapat mengembangkan muatan listrik pada permukaannya sebagai respons terhadap deformasi mekanis. Penjelasan serupa dapat diterapkan pada efek piroelektrik yang dibahas pada bagian lain.

Untuk mengambil muatan listrik, setidaknya dua elektroda konduktif harus diterapkan pada kristal di sisi yang berlawanan dari potongan (Gambar. 5.2). Akibatnya, sensor piezoelektrik menjadi kapasitor dengan bahan dielektrik di antara pelat logam, di mana dielektrik merupakan bahan kristal piezoelektrik. Dielektrik bertindak sebagai generator muatan listrik, menghasilkan tegangan V melintasi kapasitor. Meskipun muatan dalam dielektrik kristalin terbentuk di lokasi gaya akting, elektroda logam menyamakan muatan di sepanjang permukaannya sehingga kapasitor tidak sensitif secara selektif. Namun, jika elektroda dibentuk dengan pola yang kompleks (misalnya beberapa elektroda), dimungkinkan untuk menentukan lokasi pasti dari gaya yang diterapkan dengan

mengukur respons dari elektroda yang dipilih. Dapat dikatakan bahwa tekanan pada material mengisi kapasitor.



**Gambar 5.2 Sensor piezoelektrik dibentuk dengan mengaplikasikan elektroda bertegangan ke bahan kristal**

Sensor piezoelektrik adalah konverter langsung dari tekanan mekanis menjadi listrik. Efek piezoelektrik adalah fenomena fisik yang dapat dibalik. Ini berarti bahwa tegangan menghasilkan listrik, sedangkan tegangan yang diterapkan pada kristal menghasilkan regangan mekanis (deformasi material). Jadi bahan piezoelektrik dapat mengubah ketegangan menjadi listrik dan mengubah listrik menjadi ketegangan. Adalah mungkin dengan menempatkan beberapa elektroda pada kristal untuk menggunakan satu pasang elektroda untuk memberikan tegangan ke kristal dan menyebabkan regangan, dan pasangan elektroda lainnya untuk mengambil muatan yang dihasilkan dari regangan yang dikembangkan. Metode ini digunakan cukup luas dalam berbagai transduser dan perangkat piezoelektrik. Misalnya dalam osilator kristal. Besarnya efek piezoelektrik dalam bentuk yang disederhanakan dapat diwakili oleh vektor polarisasi:

$$P = P_{xx} + P_{yy} + P_{zz} \tag{5.1}$$

di mana  $x, y, z$  merujuk pada sistem ortogonal konvensional yang terkait dengan sumbu kristal. Dalam hal tekanan aksial,  $\sigma$ , kita dapat menulis

$$\begin{aligned} P_{xx} &= d_{11} \sigma_{xx} + d_{12} \sigma_{yy} + d_{13} \sigma_{zz}, \\ P_{yy} &= d_{21} \sigma_{xx} + d_{22} \sigma_{yy} + d_{23} \sigma_{zz}, \\ P_{zz} &= d_{31} \sigma_{xx} + d_{32} \sigma_{yy} + d_{33} \sigma_{zz}; \end{aligned} \quad (5.2)$$

di mana konstanta dmn adalah koefisien piezoelektrik di sepanjang sumbu ortogonal dari potongan kristal. Dimensi dari koefisien (koefisien ini adalah C/N (coulomb/newton)), yaitu, unit muatan per satuan gaya. Tergantung pada bahannya, semua koefisien d mungkin sangat berbeda dan untuk tujuan praktis bahan tersebut harus digunakan dengan arah dominan di mana koefisien adalah yang terbesar.

Muatan yang dihasilkan oleh kristal piezoelektrik sebanding dengan gaya yang diberikan. Misalnya, dalam arah  $x$  muatannya

$$Q_x = d_{11} F_x \quad (5.3)$$

Karena kristal dengan elektroda yang disimpan membentuk kapasitor yang memiliki kapasitansi,  $C$ , tegangan  $V$ , yang berkembang melintasi elektroda adalah:

$$V = \frac{Q_x}{C} = \frac{d_{11}}{C} F_x \quad (5.4)$$

Pada gilirannya, kapasitansi dapat diwakili oleh Persamaan. (5.5) melalui area permukaan elektroda,  $a$ , ketebalan kristal,  $l$ , dan  $\kappa$  (konstanta dielektrik):

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{a}{l} \quad (5.5)$$

Kemudian, tegangan output sensor adalah

$$V = \frac{d_{11}}{C} F_x = \frac{d_{11} l}{\kappa \epsilon_0 a} F_x \quad (5.6)$$

Rumus tersebut menunjukkan bahwa untuk mendapatkan tegangan output yang lebih tinggi, bahan piezoelektrik harus memiliki area elektroda yang lebih kecil tetapi dengan ketebalan yang lebih besar. Ini juga menunjukkan bahwa fungsi transfer gaya ke tegangan adalah linier. Tetapi harus diingat bahwa tegangan diwakili oleh Persamaan (5.6) adalah tegangan puncak transien yang cacat, karena sensor piezoelektrik adalah sensor arus bolak-balik yang

hanya merespons perubahan gaya tetapi tidak terhadap gaya konstan, seperti yang akan dijelaskan di bawah ini.

## 5.2 Bahan Piezoelektrik Keramik

Bahan keramik yang populer untuk sensor piezoelektrik adalah timbal zirkonium titanat (PZT) yang memiliki rumus  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ . Pembuatan sensor dimulai dengan oksida logam dengan kemurnian tinggi (oksida timbal, oksida zirkonium, titanium oksida, dll.) Dalam bentuk bubuk halus yang memiliki berbagai warna. Serbuk digiling sampai kekhususan, dan dicampur secara menyeluruh dalam proporsi yang benar secara kimia. Dalam suatu proses yang disebut "calining", campuran tersebut kemudian dihadapkan pada suhu yang tinggi, memungkinkan bahan untuk bereaksi membentuk bubuk, yang masing-masing butirannya memiliki komposisi kimia yang dekat dengan komposisi akhir yang diinginkan. Namun, pada tahap ini, butiran belum memiliki struktur kristal yang diinginkan.

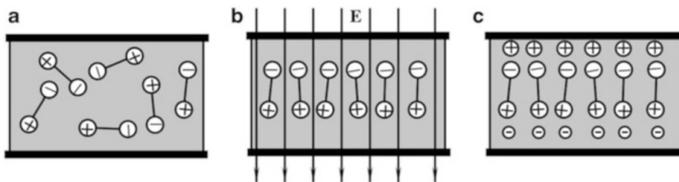
Langkah selanjutnya adalah mencampur serbuk yang dikalsinasi dengan bahan pengikat organik padat dan/atau cair (dimaksudkan untuk terbakar selama cincin) dan secara mekanis membentuk campuran tersebut menjadi "kue" yang mendekati bentuk elemen penginderaan akhir. Untuk membentuk "kue" dari bentuk yang diinginkan, beberapa metode dapat digunakan. Diantaranya adalah pengepresan (di bawah kekuatan piston bertenaga hidrolik), casting (menuangkan cairan kental ke dalam cetakan dan memungkinkan untuk mengeringkan), ekstrusi (pengepresan campuran melalui cetakan, atau sepasang gulungan untuk membentuk lembaran tipis), casting tape (tarik cairan kental ke sabuk bergerak yang halus).

Setelah "kue" terbentuk, mereka ditempatkan di tempat pembakaran dan terkena profil suhu yang sangat terkontrol. Setelah terbakar dari pengikat organik, bahan menyusut sekitar 15%. "Kue-kue" dipanaskan hingga cahaya merah dan dipertahankan pada keadaan itu untuk beberapa waktu, yang disebut "waktu rendam", di mana reaksi kimia terakhir terjadi.

Struktur kristal terbentuk ketika bahan didinginkan. Bergantung pada bahannya, keseluruhan film dapat memakan waktu 24 jam.

Ketika materialnya dingin, elektroda kontak diaplikasikan ke permukaannya. Ini dapat dilakukan dengan beberapa metode. Yang paling umum dari metode tersebut adalah: pelapisan perak pada perak (penyaringan sutra dari campuran kaca perak dan resapan), pelapisan tanpa listrik (deposisi kimia dalam bak khusus), dan sputtering (paparan uap logam dalam suatu sebagian vakum).

Crystalit (sel kristal) dalam material dapat dianggap dipol listrik. Dalam beberapa bahan, seperti kuarsa, sel-sel ini berorientasi secara alami di sepanjang sumbu kristal, Kristalinitas (sel kristal) dalam material dapat dianggap dipol listrik. Dalam beberapa bahan, seperti kuarsa, sel-sel ini berorientasi secara alami di sepanjang sumbu kristal, sehingga memberikan sensitivitas bahan terhadap stres. Dalam bahan lain, dipol berorientasi secara acak dan bahan-bahan perlu "dipoles" untuk memiliki sifat piezoelektrik.



Gambar 5. 3. Pengkutuban termal bahan piezo dan piroelektrik

Agar bahan kristal mempunyai sifat piezoelektrik, beberapa teknik poling dapat digunakan. Proses poling paling populer adalah thermal poling, yang mencakup langkah-langkah berikut:

1. Bahan kristal (keramik atau film polimer), yang memiliki dipol berorientasi acak, Gambar 5.3a, dipanaskan sedikit di bawah suhu Curie-nya. Dalam beberapa kasus (mis., Untuk film PVDF) material diregangkan (disaring) untuk memberi kristal orientasi dominan. Suhu tinggi menghasilkan agitasi dipol yang lebih kuat dan memungkinkan untuk mengarahkannya lebih mudah ke arah yang diinginkan.
2. Bahan ditempatkan di medan listrik yang kuat,  $E$ , seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.3b, di mana dipol sejajar di

sepanjang garis medan. Penyelarasan tidak total. Banyak dipol menyimpang dari arah medan cukup kuat, namun, orientasi dipolitik yang diprediksi secara statistik tetap dipertahankan.

3. Bahan didinginkan sementara medan listrik melintasi ketebalannya dipertahankan.
4. Bidang listrik dilepas dan proses poling selesai. Selama bahan kutub dipertahankan di bawah suhu Curie, polarisasi tetap permanen. Dipol tetap “membeku” ke arah, yang diberikan kepada mereka oleh medan listrik pada suhu tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3c.

Metode lain yang disebut corona discharge poling. Ini digunakan untuk memproduksi film polimer piezo/piroelektrik. Film dikenakan pelepasan korona dari elektroda pada beberapa juta volt per cm ketebalan film untuk 40-50 s [5, 6]. Polarisasi korona tidak rumit untuk dilakukan dan dapat dengan mudah diterapkan sebelum kerusakan listrik terjadi, membuat proses ini berguna pada suhu kamar.

Operasi terakhir meliputi pemotongan, pemesinan, dan penggilingan. Setelah elemen piezo (piro) disiapkan, ia dipasang ke rumah sensor, di mana elektroda-elektroda terikat ke terminal listrik dan/atau komponen elektronik lainnya.

Setelah poling, kristal tetap terpolarisasi secara permanen, dengan muatan listrik terbentuk di elektroda untuk waktu yang relatif singkat. Ada jumlah yang cukup pembawa muatan gratis, yang bergerak dalam pengaturan medan listrik di dalam material curah dan ada banyak ion bermuatan di udara sekitarnya. Pembawa muatan bergerak ke arah dipol kutub dan menetralkan muatannya seperti pada Gambar 5.3c. Oleh karena itu, setelah beberapa saat, bahan piezoelektrik yang dialiri listrik akan habis selama masih dalam kondisi mapan.

Ketika tegangan diterapkan, atau udara berhembus di dekat permukaannya, keadaan seimbang terdegradasi dan bahan piezoelektrik mengembangkan muatan listrik pada permukaan yang berlawanan. Jika tekanan dipertahankan, muatan lagi akan dinetralkan oleh kebocoran internal. Dengan demikian, sensor piezoelektrik hanya responsif terhadap tegangan yang berubah

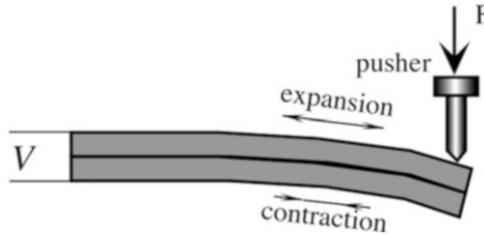
daripada tingkat yang stabil. Dengan kata lain, sensor piezoelektrik adalah perangkat ac, bukan dc.

Sensitivitas arah piezoelektrik (koefisien  $d$ ) bergantung pada suhu. Untuk beberapa bahan (kuarsa), sensitivitas turun dengan kemiringan sekitar  $0,016\%/C$ . Untuk yang lain (film dan keramik PVDF) pada suhu di bawah  $40\text{ C}$  mungkin turun, sementara pada suhu yang lebih tinggi meningkat dengan kenaikan suhu. Saat ini, bahan yang paling populer untuk sensor piezoelektrik fabrikasi adalah keramik [7-9]. Keramik feroelektrik yang paling awal adalah barium titanat, zat polikristalin yang memiliki formula kimia  $BaTiO_3$ . Stabilitas polarisasi permanen bergantung pada kekuatan koersif dipol. Dalam beberapa bahan, polarisasi dapat berkurang seiring waktu. Untuk meningkatkan stabilitas bahan kutub, pengotor telah dimasukkan ke dalam bahan dasar dengan gagasan bahwa polarisasi dapat "dikunci" ke posisi [4]. Sementara konstanta piezoelektrik berubah dengan suhu operasi, konstanta dielektrik,  $\kappa$ , menunjukkan ketergantungan yang sama. Jadi, menurut Persamaan (5.6), variasi dalam nilai-nilai ini cenderung saling menghapuskan ketika mereka dimasukkan ke dalam pembilang dan penyebut. Ini menghasilkan stabilitas tegangan output,  $V$ , yang lebih baik pada kisaran suhu yang luas.

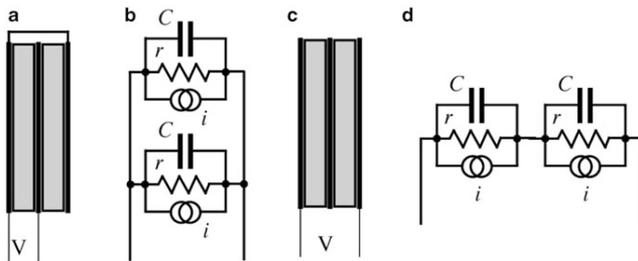
Elemen piezoelektrik dapat digunakan sebagai kristal tunggal, atau dalam bentuk multilayer di mana beberapa pelat material dilaminasi bersama. Ini harus dilakukan dengan elektroda yang ditempatkan di antara keduanya. Gambar 5.4 menunjukkan sensor gaya dua lapis.

Ketika gaya eksternal  $F$  diterapkan, bagian atas sensor mengembang sementara bagian bawah menekan. Jika lapisan dilaminasi dengan benar, ini menghasilkan sinyal keluaran ganda. Sensor ganda dapat memiliki koneksi paralel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5a, atau koneksi serial seperti pada Gambar 5.5c. Sirkuit ekuivalen listrik dari sensor piezoelektrik adalah koneksi paralel dari sumber arus yang diinduksi stres ( $i$ ), resistansi kebocoran ( $r$ ), dan kapasitansi ( $C$ ). Bergantung pada koneksi ekuivalen koneksi lapisan untuk sensor laminasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5b, d. Resistor kebocoran  $r$  sangat besar – orde  $10^{12}$ - $10^{14}$

$\Omega$ , artinya sensor memiliki impedansi keluaran yang sangat tinggi. Ini memerlukan sirkuit antarmuka khusus, seperti konverter tegangan ke tegangan atau arus ke tegangan, atau penguat tegangan dengan resistansi input yang sangat tinggi dan kapasitansi input yang sangat rendah.



**Gambar 5. 4 Dilaminasi sensor piezoelektrik dua lapis**



**Gambar 5. 5 Sensor piezoelektrik paralel (a) dan seri (c) dan sirkuit ekivalennya (b dan d)**

Karena silikon tidak memiliki sifat piezoelektrik, sifat tersebut dapat ditambahkan dengan menyimpan lapisan kristal bahan piezoelektrik. Tiga bahan yang paling populer adalah seng oksida (ZnO), aluminium nitrida (AlN), dan keramik PZT, pada dasarnya bahan yang sama digunakan untuk pembuatan sensor piezoelektrik diskrit seperti dijelaskan di atas.

Seng oksida selain sifat piezoelektrik juga piroelektrik. Itu adalah bahan pertama dan paling populer untuk pengembangan sensor akustik ultrasonik, perangkat gelombang akustik permukaan (Surface Acoustic Wave-SAW), keseimbangan mikro, dll. Salah satu keunggulannya adalah kemudahan etsa kimia dalam produksi

perangkat MEMS. Film tipis seng oksida biasanya disimpan pada silikon dengan menggunakan teknologi sputtering.

Aluminium nitride, AlN, adalah bahan piezoelektrik yang sangat baik karena kecepatan akustiknya yang tinggi dan ketahanannya dalam kelembaban dan suhu tinggi. Koefisien piezoelektriknya agak lebih rendah dari ZnO tetapi lebih tinggi dari bahan piezoelektrik film tipis lainnya, tidak termasuk keramik. Kecepatan akustik yang tinggi menjadikannya pilihan yang menarik dalam rentang frekuensi GHz. Biasanya, film tipis AlN dibuat dengan menggunakan teknologi deposisi uap kimia (CVD) atau teknologi epitaxy beam molekul reaktif (MBE). Namun, kelemahan menggunakan metode deposisi ini adalah perlunya suhu pemanasan tinggi (hingga 1300 C) dari substrat.

Film tipis PZT memiliki koefisien piezoelektrik yang lebih besar daripada ZnO atau AlN, dan juga koefisien piroelektrik yang tinggi, yang membuatnya menjadi kandidat yang baik untuk pembuatan detektor radiasi termal. Berbagai macam teknik pengendapan tersedia untuk PZT, di antaranya adalah penguapan berkas elektron [10], RF sputtering [11], deposisi berkas ion [12], pertumbuhan epitaxial oleh RF sputtering [13], magnetron sputtering [13], magnetron sputtering [10] 14], laser ablasi [15], dan sol-gel [16].

### **5.3 Film Piezoelektrik Polimer**

Pada tahun 1969, H. Kawai menemukan piezoelektrik yang kuat di PVDF (polyvinylidene fluoride) dan pada tahun 1975 perusahaan Jepang Pioneer, Ltd. mengembangkan produk komersial pertama dengan PVDF sebagai penguat suara dan earphone piezoelektrik [17]. PVDF adalah polimer semikristalin dengan tingkat kristalinitas sekitar 50% [18]. Seperti polimer semikristalin lainnya, PVDF terdiri dari struktur lamelar yang dicampur dengan daerah amorf. Struktur kimianya mengandung unit ulangan etena dua kali lipat berkadar  $CF_2-CH_2$ :



Berat molekul PVDF adalah sekitar  $10^5$ , yang sesuai dengan sekitar 2000 unit berulang. Film ini cukup transparan di daerah IR yang tampak dan dekat, dan tidak menyerap di bagian spektrum elektromagnetik inframerah menengah dan jauh.

Polimer meleleh di dekat 170 C. Densitasnya sekitar 1780 kg/m<sup>3</sup>. Bahan ini tahan lama dan fleksibel secara mekanis. PVDF tidak memiliki koefisien piezoelektrik yang lebih tinggi, atau bahkan setinggi bahan lainnya yang biasa digunakan, seperti BaTiO<sub>3</sub> atau PZT. Namun, ia memiliki kualitas unik untuk tidak terdepolarisasi saat mengalami medan listrik bolak-balik yang sangat tinggi. Ini berarti bahwa meskipun nilai d<sub>31</sub> dari PVDF adalah sekitar 10% dari PZT, regangan maksimum yang dapat diamati dalam PVDF akan sepuluh kali lebih besar daripada di PZT karena bidang maksimum yang diijinkan adalah seratus kali lebih besar untuk PVDF. Film ini menunjukkan stabilitas yang baik: ketika disimpan pada suhu 60 C, ia kehilangan sensitivitasnya sekitar 1-2% selama 6 bulan. Keuntungan lain dari film piezo dibandingkan piezoceramic adalah impedans akustiknya yang rendah, yang lebih dekat dengan air, jaringan manusia, dan bahan organik lainnya.

Sebagai contoh, impedansi akustik piezo film hanya 2,6 kali lipat dari air, sedangkan piezoceramics biasanya 11 kali lebih besar. Pencocokan impedansi dekat memungkinkan transduksi yang lebih efisien dari sinyal akustik dalam air dan jaringan.

Seperti beberapa bahan feroelektrik lainnya, PVDF juga piroelektrik, menghasilkan muatan listrik sebagai respons terhadap perubahan suhu. PVDF sangat menyerap energi inframerah dalam panjang gelombang 7-20 μm, yang mencakup spektrum panjang gelombang yang sama seperti panas dari tubuh manusia. Namun, meskipun film tersebut dapat menyerap radiasi termal, sebuah sensor piroelektrik memiliki film yang terjepit di antara dua elektroda logam tipis yang bisa sangat reflektif, sehingga tidak ada

radiasi inframerah yang dapat menembus elektroda dan diserap oleh film. Untuk mengatasi kesulitan ini, elektroda yang terpapar radiasi termal baik dilapisi dengan lapisan penyerap panas atau terbuat dari Nichrome – paduan logam yang memiliki daya serap inframerah tinggi. Ketika radiasi panas diserap, ia diubah menjadi panas yang dengan cepat merambat melalui film PVDF melalui konduksi termal.

Film PVDF membuat sensor gerak manusia yang berguna serta sensor piroelektrik untuk aplikasi yang lebih canggih seperti kamera vidicon untuk penglihatan malam dan sensor pelaporan sinar laser. Juga, ia memiliki berbagai aplikasi dalam robotika, kedokteran, prosthetics [19], dan bahkan dalam eksplorasi Ruang Angkasa untuk mendeteksi mikrometeorit. Kopolimer PVDF memungkinkan penggunaan pada suhu yang lebih tinggi (135 C) dan menawarkan bentuk sensor baru yang diinginkan, seperti silinder dan belahan bumi. Kabel piezoelektrik juga diproduksi menggunakan kopolimer.

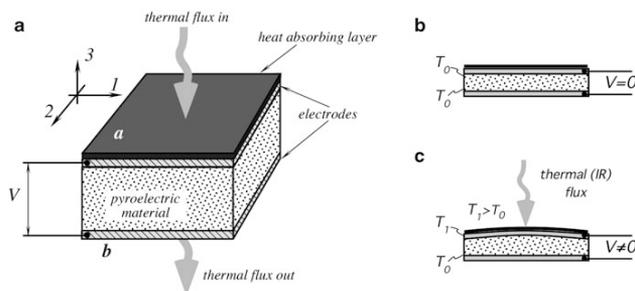
#### **5.4 Efek Piroelektrik**

Bahan piroelektrik adalah zat kristalin yang mampu menghasilkan muatan listrik sebagai respons terhadap aliran panas. Efek piroelektrik sangat erat kaitannya dengan efek piezoelektrik.

Seperti piezoelektrik, bahan piroelektrik digunakan dalam bentuk irisan keramik tipis atau film dengan muatan elektroda yang diendapkan pada sisi yang berlawanan, Gambar 5.6a. Sensor piroelektrik pada dasarnya adalah kapasitor yang dapat diisi daya secara elektrik oleh fluks termal. Meskipun tidak ada perbedaan asal usul panas - baik dari menghubungi permukaan yang hangat/dingin atau dengan menyerap radiasi termal, hasilnya tetap sama - muatan listrik dihasilkan.

Detektor tidak memerlukan bias listrik eksternal (sinyal eksitasi), sehingga merupakan konverter langsung dari aliran panas ke listrik. Ini hanya membutuhkan sirkuit antarmuka elektronik yang sesuai untuk mengukur muatan. Berlawanan dengan termoelektrik (termokopel) yang menghasilkan tegangan stabil ketika dua persimpangan logam yang berbeda ditahan pada suhu yang stabil tetapi berbeda, piroelektrik menghasilkan muatan hanya

sebagai respons terhadap perubahan suhu. Karena perubahan suhu pada dasarnya menyebabkan penyebaran panas, perangkat piroelektrik adalah detektor aliran panas daripada detektor panas. Ketika kristal piroelektrik terpapar ke aliran panas (misalnya, dari sumber radiasi inframerah atau dari menyentuh benda hangat atau dingin), suhu sisi yang terekspos meningkat dan sisi menjadi sumber atau wastafel panas yang merambat melalui bahan piroelektrik menuju atau dari sisi lawannya. Oleh karena itu, ada aliran panas dari kristal ke lingkungan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.6a.



**Gambar 5. 6 Sensor piroelektrik memiliki dua elektroda pada sisi berlawanan kristal (a). Radiasi termal diterapkan sepanjang sumbu 3 dari atas dan diserap oleh lapisan penyerap panas. Panas secara konduktif bergerak melalui bahan piroelektrik dan sebagian terpancar ke bawah dari sisi a. Sensor piroelektrik dalam kondisi netral (b); panas memperlus lapisan atas, menghasilkan muatan piezoelektrik (c).**

Kristal dianggap piroelektrik jika menunjukkan polarisasi spontan yang bergantung pada suhu. Dari 32 kelas kristal, 21 adalah non-simetris dan 10 di antaranya memiliki sifat piroelektrik. Di samping sifat piroelektrik, semua bahan ini juga menunjukkan sifat piezoelektrik – yaitu menghasilkan muatan listrik sebagai respons terhadap tekanan mekanis. Dengan demikian, ketika sensor piroelektrik dirancang, sangat penting untuk meminimalkan semua gangguan mekanis potensial.

Piroelektrik diamati untuk pertama kalinya dalam kristal turmalin pada abad kedelapan belas (beberapa mengklaim bahwa orang Yunani melihatnya 23 abad yang lalu). Kemudian, pada abad kesembilan belas, garam Rochelle digunakan untuk membuat sensor piroelektrik. Berbagai macam bahan tersedia setelah 1915: KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), ADP ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ),  $\text{BaTiO}_3$ , dan gabungan  $\text{PbTiO}_3$  dan  $\text{PbZrO}_3$  yang dikenal sebagai PZT. Saat ini, lebih dari 1000 bahan dengan polarisasi reversibel diketahui. Mereka disebut kristal feroelektrik. Yang paling penting di antara mereka adalah triglycine sulfat (TGS) dan lithium tantalate oxide ( $\text{LiTaO}_3$ ). Tahun 1969 H. Kawai menemukan piezoelektrik yang kuat dalam bahan plastik, polivinil fluoride (PVF) dan polyvinylidene fluoride (PVDF) [20]. Bahan-bahan ini juga memiliki sifat piroelektrik yang substansial.

Bahan piroelektrik dapat dianggap sebagai komposisi sejumlah besar kristal menit, di mana masing-masing berperilaku sebagai dipol listrik kecil. Semua dipol ini berorientasi secara acak. Di atas suhu tertentu, yang dikenal sebagai titik Curie, kristal tidak memiliki momen dipol. Pembuatan (poling) bahan piroelektrik mirip dengan piezoelektrik

Ada beberapa mekanisme dimana perubahan suhu akan menghasilkan piroelektrik. Perubahan suhu dapat menyebabkan pemendekan atau perpanjangan dipol individu. Ini juga dapat mempengaruhi keacakan orientasi dipol karena agitasi termal. Fenomena ini disebut piroelektrik primer. Ada juga piroelektrik sekunder yang, dalam cara yang disederhanakan, dapat digambarkan sebagai hasil dari efek piezoelektrik, yaitu, pengembangan regangan pada material akibat ekspansi termal. Gambar 5.6b. menunjukkan sensor piroelektrik yang suhu  $T_0$ -nya homogen di atas volumenya. Artinya, sensor menghasilkan tegangan nol melintasi elektroda. Sekarang, mari kita asumsikan bahwa panas diterapkan ke sisi atas sensor, Gambar 5.6c, dalam bentuk radiasi termal (inframerah). Radiasi diserap oleh lapisan penyerap panas (mis., Goldblack atau cat organik) dan menghangatkan sisi atas bahan piroelektrik. Sebagai hasil dari penyerapan panas, sisi atas menjadi lebih hangat (suhu hangat baru adalah  $T_1$ ) yang

menyebabkan sisi atas sensor melebar. Perluasan mengarah ke pelenturan (penegangan) bahan kristal, yang, pada gilirannya, menghasilkan tekanan dan perubahan dalam orientasi dipol. Menjadi piezoelektrik, bahan yang tertekan menghasilkan muatan listrik dari kutub yang berlawanan pada elektroda dan dengan demikian tegangan diamati di seluruh elektroda. Oleh karena itu, kita dapat menganggap piroelektrik sekunder sebagai urutan kejadian: radiasi termal (penyerapan panas), stres akibat termal (muatan listrik).

Mari kita menganalisis sifat bahan piroelektrik. Momen dipol,  $M$ , dari sensor piroelektrik massal adalah

$$M = \mu Ah \tag{5.8}$$

di mana  $\mu$  adalah momen dipol per volume satuan,  $A$  adalah area sensor dan  $h$  adalah ketebalan.  $Q_a$ , yang dapat diambil oleh elektroda, mengembangkan momen dipol di seluruh materi

$$M_o = Q_a \cdot h \tag{5.9}$$

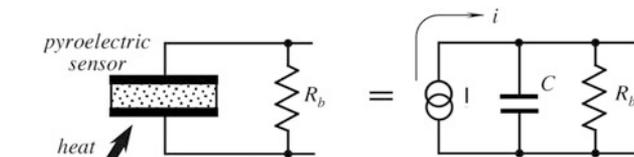
$M$  harus sama dengan  $M_o$ , sehingga

$$Q_a = \mu \cdot A \tag{5.10}$$

Karena suhu bervariasi, momen dipol juga berubah, menghasilkan muatan yang diinduksi. Penyerapan termal mungkin terkait dengan perubahan dipol, sehingga  $\mu$  harus dianggap sebagai fungsi dari kedua suhu,  $T_a$ , dan energi termal tambahan,  $\Delta W$ , diserap oleh bahan

$$\Delta Q_a = A \cdot \mu(T_a, \Delta W) \tag{5.11}$$

Gambar 5.7 menggambarkan detektor piroelektrik (elemen piroelektrik) yang terhubung ke resistor  $R_b$  yang mewakili resistansi kebocoran internal atau resistansi input gabungan dari rangkaian antarmuka, yang terhubung ke elemen. Sirkuit listrik yang setara dari sensor ditampilkan di sebelah kanan. Ini terdiri dari tiga komponen: sumber arus yang menghasilkan arus yang diinduksi panas,  $i$ , (ingat bahwa arus adalah pergerakan muatan listrik), kapasitansi sensor,  $C$ , dan resistansi kebocoran,  $R_b$ .



**Gambar 5. 7 Sensor piroelektrik dan sirkuit ekivalennya**

Sinyal keluaran dari sensor piroelektrik dapat diambil dalam bentuk muatan (arus) atau tegangan, tergantung pada aplikasinya. Menjadi kapasitor, perangkat piroelektrik dilepaskan ketika terhubung ke resistor,  $R_b$ . Arus listrik melalui resistor dan tegangan melintasi resistor mewakili muatan yang diinduksi oleh aliran panas. Hal ini dapat ditandai dengan dua koefisien piroelektrik [21].

$$P_Q = \frac{dP_s}{dT} \text{ Koefisien muatan pyroelectric} \quad (5.12)$$

$$P_V = \frac{dE}{dT} \text{ Koefisien tegangan pyroelectric} \quad (5.13)$$

di mana  $P_s$  adalah polarisasi spontan (yang merupakan cara lain untuk mengatakan: "muatan listrik"),  $E$  adalah kekuatan medan listrik, dan  $T$  adalah suhu dalam K. Kedua koefisien terkait dengan cara permitivitas listrik,  $\kappa$  dan listrik izin ruang bebas,  $\epsilon_0$

$$\frac{P_Q}{P_V} = \frac{dP_s}{dE} = \kappa \epsilon_0 \quad (5.14)$$

Polarisasi bergantung pada suhu dan, sebagai akibatnya, keduanya koefisien piroelektrik Persamaan. (5.12 dan 5.13) juga merupakan fungsi suhu.

Jika bahan piroelektrik terpapar ke sumber panas, suhunya naik sebesar  $\Delta T$  dan perubahan muatan dan tegangan yang sesuai dapat dijelaskan dengan persamaan berikut

$$\Delta Q = P_Q A \Delta T \quad (5.15)$$

$$\Delta V = P_V h \Delta T \quad (5.16)$$

Mengingat bahwa kapasitansi sensor dapat didefinisikan sebagai

$$C_e = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{h} \quad (5.17)$$

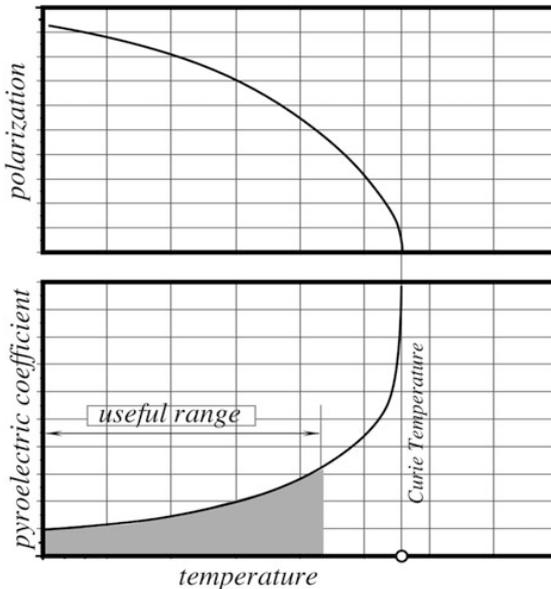
kemudian, dari Persamaan (5.15–5.17) artinya:

$$\Delta V = P_Q \frac{A}{C_e} \Delta T = P_Q \frac{\kappa \epsilon_0}{h} \Delta T \quad (5.18)$$

Dengan demikian, tegangan output puncak sebanding dengan kenaikan suhu sensor dan koefisien muatan piroelektrik dan berbanding terbalik dengan ketebalan elemen penginderaan.

Ketika elemen piroelektrik mengalami gradien termal, polarisasi (muatan listrik yang dikembangkan melintasi kristal) bervariasi sesuai dengan suhu kristal. Kurva suhu-polarisasi tipikal ditunjukkan pada Gambar 5.8. Koefisien piro-listrik tegangan,  $P_V$ , adalah kemiringan kurva polarisasi. Ini meningkat secara dramatis di dekat suhu Curie di mana polarisasi menghilang dan bahan secara

permanen kehilangan sifat piroelektriknya. Kurva menyiratkan bahwa sensitivitas sensor meningkat dengan suhu dengan mengorbankan nonlinier.



**Gambar 5. 8 Polarisasi kristal piroelektrik. Sensor harus disimpan dan dioperasikan di bawah suhu Curie**

Bahan piezo dan piroelektrik seperti litium-tantalit dan keramik terpolarisasi adalah bahan khas untuk menghasilkan sensor piroelektrik. Selama beberapa tahun terakhir, pengendapan film tipis piroelektrik telah secara intensif digunakan dalam teknologi MEMS. Terutama efektif adalah penggunaan timbal-titanat-oksida (PbTiO<sub>3</sub>) yang merupakan keramik feroelektrik yang memiliki koefisien piroelektrik yang tinggi dan suhu Curie yang tinggi sekitar 490 C. Bahan ini dapat dengan mudah disimpan pada substrat silikon oleh apa yang disebut sol Metode deposisi spin gel spin [22].

Gambar 5.9 menunjukkan diagram timing untuk sensor piroelektrik ketika dipaparkan pada fungsi step dari fluks termal. Terlihat bahwa muatan listrik mencapai nilai puncaknya hampir secara instan, dan kemudian meluruh dengan konstanta waktu termal,  $\tau T$ . Arti fisiknya adalah ini: suatu polarisasi yang diinduksi

secara termal terjadi pada awalnya di lapisan paling luar dari bahan kristal (hanya beberapa lapisan atom), yang suhunya hampir secara instan naik ke tingkat maksimum. Ini menciptakan gradien termal tertinggi di seluruh ketebalan material, yang mengarah ke polarisasi maksimum. Kemudian, panas merambat melalui bahan, diserap oleh massanya sebanding dengan kapasitas termal,  $C_T$ , sementara sebagian panas hilang ke lingkungan melalui resistensi termal,  $R_T$ . Ini mengurangi gradien awal yang menghasilkan muatan listrik. Konstanta waktu termal adalah produk dari kapasitas termal sensor dan ketahanan termal:

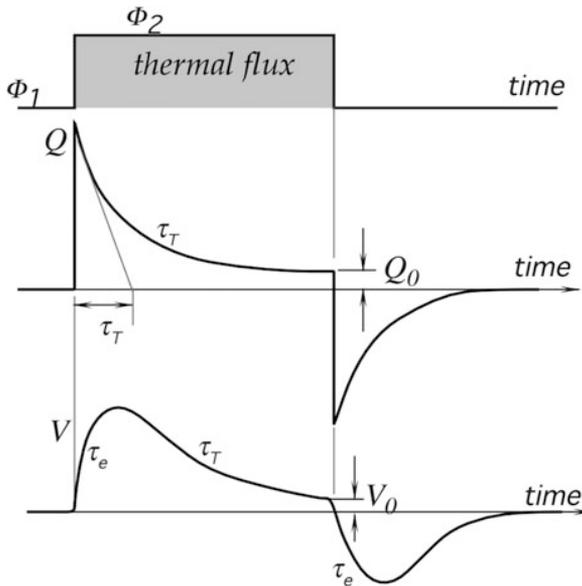
$$\tau_T = C_T R_T = c A h R_T \quad (5.19)$$

di mana  $c$  adalah panas spesifik dari elemen piroelektrik. Termal resistensi  $R_T$  adalah fungsi dari semua kerugian termal ke lingkungan melalui konveksi, konduksi, dan radiasi termal. Untuk aplikasi frekuensi rendah, diinginkan untuk menggunakan sensor dengan  $\tau_T$  sebesar praktis, sedangkan untuk aplikasi kecepatan tinggi (misalnya, untuk mengukur pulsa laser), konstanta waktu termal harus dikurangi secara dramatis. Untuk tujuan itu, bahan piroelektrik dapat dilaminasi dengan pendingin: sepotong aluminium atau tembaga.

Ketika sensor piroelektrik terpapar ke sumber panas, kami menganggap kapasitas termal sumbernya sangat besar (sumber panas tak terbatas), dan kapasitas termal sensor kecil. Oleh karena itu, suhu permukaan  $T_b$  target dapat dianggap konstan selama pengukuran, sedangkan suhu sensor  $T_s$  adalah fungsi waktu. Fungsi waktu itu tergantung pada sifat-sifat elemen penginderaan: kepadatannya, panas spesifik, dan ketebalan sesuai Persamaan (5.19). Jika fluks termal input memiliki bentuk fungsi langkah waktu dan sensor dipasang secara bebas di udara, arus keluaran dapat didekati oleh fungsi eksponensial, sehingga

$$i = i_0 e^{-\frac{t}{\tau_T}} \quad (5.20)$$

di mana  $i_0$  adalah arus puncak.



**Gambar 5. 9 Respons sensor piroelektrik ke fungsi step termal. Besaran muatan  $Q_0$  dan tegangan  $V_0$  diletakkan lebih tinggi untuk kejelasan**

Pada Gambar 5.9, selama sumber panas ada, muatan  $Q$  dan tegangan  $V$  tidak benar-benar kembali ke nol, tidak peduli berapa banyak waktu yang telah berlalu. Energi termal memasuki bahan piroelektrik dari sisi a (Gambar. 5.6), yang mengakibatkan kenaikan suhu material. Selanjutnya, respons sensor meluruh dengan konstanta waktu termal  $\tau_T$ . Namun, karena sisi lain dari b sensor menghadapi lingkungan yang lebih dingin, bagian dari energi panas meninggalkan sensor dan hilang ke sekelilingnya. Karena sisi a dan b menghadapi objek dari temperatur yang berbeda (satu adalah sumber panas dan lainnya adalah lingkungan), aliran panas kontinu ada melalui bahan piroelektrik dan ia mempertahankan tingkat polarisasi yang kontinu, walaupun kecil.

Dengan demikian, arus listrik yang dihasilkan oleh sensor piroelektrik memiliki bentuk yang sama dengan aliran termal melalui bahan penginderaan. Pengukuran yang akurat dapat menunjukkan bahwa selama panas terus mengalir, sensor piroelektrik

menghasilkan tegangan volt konstan yang besarnya sebanding dengan aliran panas, sehingga menjadikan perangkat sebagai sensor aliran panas. Tegangan output sangat tergantung pada kapasitansi elemen penginderaan dan resistansi input dari rangkaian antarmuka yang menentukan waktu kenaikan tegangan. Hal ini ditandai dengan konstanta waktu listrik  $\tau_e$  yang merupakan produk kapasitansi sensor dan resistansi input.

## 5.5 Gelombang Suara

Alternatif kompresi fisik dan ekspansi medium (padatan, cairan, dan gas) dengan frekuensi tertentu disebut gelombang suara. Isi medium terombang-ambing ke arah rambat gelombang, oleh karena itu gelombang ini disebut gelombang mekanis longitudinal. Suara nama dikaitkan dengan rentang pendengaran telinga manusia yang kira-kira dari 20 hingga 20.000 Hz. Gelombang mekanis longitudinal di bawah 20 Hz disebut infrasound dan di atas 20.000 Hz (20 kHz) USG. Jika klasifikasi itu dibuat oleh hewan lain, seperti anjing, kisaran gelombang suara pasti akan lebih luas karena anjing dapat mendengar hingga 45 kHz.

Deteksi infrasonik sangat menarik sehubungan dengan analisis struktur bangunan, prediksi gempa, dan sumber geometris besar lainnya. Ketika infrasonik memiliki kekuatan yang relatif kuat, hal itu dapat terjadi jika tidak didengar, setidaknya dirasakan oleh manusia, menghasilkan efek psikologis yang cukup menjengkelkan (panik, takut, dll.).

Gelombang suara dihasilkan oleh string bergetar (instrumen musik dawai), kolom udara bergetar (instrumen musik tiup), dan pelat bergetar (beberapa instrumen perkusi, pita suara, pengeras suara). Setiap kali suara diproduksi, udara secara alternatif dikompresi dan langka. Gangguan ini menyebar ke luar. Spektrum gelombang mungkin sangat berbeda – dari suara monokromatik sederhana dari metronom atau pipa organ, hingga suara biola multiharmonik jangkauan. Kebisingan akustik mungkin memiliki spektrum yang sangat luas. Ini mungkin dari distribusi kerapatan yang seragam atau mungkin "diwarnai" dengan harmonisa dominan di beberapa bagiannya.

Ketika media dikompresi, volumenya berubah dari  $V$  ke  $V - \Delta V$ . Rasio perubahan tekanan,  $\Delta p$ , terhadap perubahan relatif dalam volume disebut modulus elastisitas medium:

$$B = -\frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}} = \rho_0 v^2 \quad (5.21)$$

di mana  $\rho_0$  adalah densitas di luar zona kompresi dan  $v$  adalah kecepatan suara dalam medium. Maka kecepatan suara dapat didefinisikan sebagai

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}} \quad (5.22)$$

Oleh karena itu, kecepatan suara tergantung pada sifat elastis ( $B$ ) dan inersia ( $\rho_0$ ) medium. Karena kedua variabel adalah fungsi temperatur, kecepatan suara juga tergantung pada suhu. Fitur ini membentuk dasar untuk termometer akustik. Untuk padatan, kecepatan longitudinal dapat ditentukan melalui rasio modulus Young  $E$  dan Poisson  $\nu$ :

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho_0(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (5.23)$$

**Tabel 5.1. Karakteristik material dan kecepatan gelombang longitudinal di beberapa media.**

Material	Yield strength, $10^{10}$ dyne/cm <sup>2</sup>	Knoop hardness, kg/mm <sup>2</sup>	Young's modulus, $10^{12}$ dyne/cm <sup>2</sup>	Density, g/cm <sup>3</sup>	Thermal conductivity, W/cm <sup>2</sup> °C	Thermal expansion, $10^{-6}$ /°C
Diamond <sup>a</sup>	53	7000	10.35	3.5	20.0	1.0
SiC <sup>a</sup>	21	2480	7.0	3.2	3.5	3.3
TiC <sup>a</sup>	20	2470	4.97	4.9	3.3	6.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>a</sup>	15.4	2100	5.3	4.0	0.5	5.4
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> <sup>a</sup>	14	3486	3.85	3.1	0.19	0.8
Iron <sup>a</sup>	12.6	400	1.96	7.8	0.803	12.0
SiO <sub>2</sub> (fibers)	8.4	820	0.73	2.5	0.014	0.55
Si <sup>a</sup>	7.0	850	1.9	2.3	1.57	2.33
Steel (max. strength)	4.2	1500	2.1	7.9	0.97	12.0
W	4.0	485	4.1	19.3	1.78	4.5
Stainless steel	2.1	660	2.0	7.9	0.329	17.3
Mo	2.1	275	3.43	10.3	1.38	5.0
Al	0.17	130	0.70	2.7	2.36	25.0

Jika kita mempertimbangkan perambatan gelombang suara dalam tabung organ, masing-masing elemen volume kecil berosilasi tentang posisi keseimbangannya. Untuk nada harmonik murni, perpindahan partikel dari posisi kesetimbangan dapat diwakili oleh:

$$y = y_m \cos \frac{2\pi}{\lambda}(x - vt) \quad (5.24)$$

di mana  $x$  adalah posisi kesetimbangan suatu partikel dan  $y$  adalah perpindahan dari posisi kesetimbangan  $y_m$  yang merupakan amplitudo, dan  $\lambda$  adalah panjang gelombang. Dalam praktiknya, lebih mudah untuk menangani variasi tekanan dalam gelombang suara daripada dengan perpindahan partikel. Dapat ditunjukkan bahwa tekanan yang diberikan oleh gelombang suara adalah:

$$p = k\rho_0 v^2 y_m \sin(kx - \omega t) \quad (5.25)$$

di mana  $k = 2\pi/\lambda$  adalah bilangan gelombang,  $\omega$  adalah frekuensi sudut, dan istilah depan sebelum  $y_m$  mewakili amplitudo,  $p_m$ , dari tekanan suara. Oleh karena itu, gelombang suara dapat dianggap sebagai gelombang tekanan. Perlu dicatat bahwa  $\sin$  dan  $\cos$  dalam Persamaan. (5.24 dan 5.25) menunjukkan bahwa gelombang pemindahan  $90^\circ$  dari fase dengan gelombang tekanan.

Tekanan pada titik tertentu di media tidak konstan dan berubah terus menerus, dan perbedaan antara tekanan sesaat dan rata-rata disebut tekanan akustik  $P$ . Selama perambatan gelombang, partikel bergetar berosilasi di dekat posisi diam dengan kecepatan sesaat  $\xi$ . Rasio tekanan akustik dan kecepatan sesaat, disebut impedansi akustik:

$$Z = \frac{P}{\xi} \quad (5.26)$$

yang merupakan kuantitas kompleks yang ditandai dengan amplitudo dan fase. Untuk media yang diidealkan (tanpa kehilangan)  $Z$  adalah nyata dan terkait dengan kecepatan gelombang sebagai:

$$Z = \rho_0 v \quad (5.27)$$

Kita dapat mendefinisikan intensitas  $I$  dari gelombang suara sebagai daya yang ditransfer per area unit. Selain itu, dapat diekspresikan melalui impedansi akustik:

$$I = P\xi = \frac{P^2}{Z} \quad (5.28)$$

Adalah umum, bagaimanapun, untuk menentukan suara bukan oleh intensitas melainkan oleh parameter terkait  $\beta$ , disebut tingkat suara dan didefinisikan sehubungan dengan intensitas referensi  $I_0 = 10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>.

$$\beta = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (5. 29)$$

Besarnya  $I_0$  dipilih karena merupakan kemampuan terendah dari telinga manusia. Satuan  $\beta$  adalah desibel (dB), dinamai dari Alexander Graham Bell. Jika  $I = I_0$ ,  $\beta = 0$ .

Tingkat tekanan juga dapat dinyatakan dalam desibel sebagai:

$$P = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (5. 30)$$

**Tabel 5.2 Level suara direferensikan ke  $I_0$  pada 1000 Hz.**

Sound source	dB
Theoretical limit at 1 atm. pressure	194
Supersonic boom	160
Hydraulic press at 1 m	130
Threshold of pain	130
10 W Hi-Fi speakers at 3 m	110
Unmuffled motorcycle	110
Jet ski	100
Subway train at 5 m	100
Pneumatic drill at 3 m	90
Niagara Falls	85
Heavy traffic	80
Automobiles at 5 m	75
Vacuum cleaner	70
Conversation at 1 m	60
Accounting office	50
City street (no traffic)	30
Whisper at 1 m	20
Rustle of leaves	10
Threshold of hearing	0

Contoh beberapa level suara diberikan pada Tabel 5.2. Karena tanggapan seorang telinga manusia tidak sama pada semua frekuensi, level suara biasanya dirujuk  $I_0$  pada 1 kHz di mana telinga paling sensitif.

Karena suara adalah gelombang tekanan yang merambat, secara teoritis ia dapat diukur dengan sensor tekanan yang disesuaikan untuk media tempat gelombang merambat. Tekanan

suara dalam beberapa hal berbeda dari jenis tekanan lainnya (sebagian besar berdasarkan rentang frekuensi dan intensitas), sehingga sensor suara (akustik) harus memiliki seperangkat karakteristik khusus untuk konversi yang efisien dari tekanan osilasi menjadi sinyal listrik yang berguna. Beberapa karakteristik ini adalah sensitivitas, rentang frekuensi, dan arah.

## Daftar Pustaka

1. Halliday, D., et al. (1986). Fundamentals of physics (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
2. Crotzer, D., et al. (1993) Method for manufacturing hygriстора. U.S. Patent No. 5,273,777.
3. Meissner, A. (1927). Ü ber piezoelectrische Krystalle bei Hochfrequenz. Zeitschrift Technische Physik, 8(74).
4. Neubert, H. K. P. (1975). Instrument transducers. An introduction to their performance and design (2nd ed.). Oxford: Clarendon.
5. Radice, P. F. (1982). Corona discharge poling process. U.S. Patent No. 4,365,283.
6. Southgate, P. D. (1976). Room-temperature poling and morphology changes in pyroelectric polyvinylidene fluoride. Applied Physics Letters, 28, 250.
7. Jaffe, B., et al. (1971). Piezoelectric ceramics. London: Academic.
8. Mason, W. P. (1950). Piezoelectric crystals and their application to ultrasonic. New York: Van Nostrand.
9. Megaw, H. D. (1957). Ferroelectricity in crystals. London: Methuen.
10. Oikawa, A., et al. (1976). Preparation of  $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$  thin films by an electron beam evaporation technique. Applied Physics Letters, 29, 491.
11. Okada, A. (1977). Some electrical and optical properties of ferroelectric lead-zirconite-lead- titanate thin films. Journal of Applied Physics, 48, 2905.
12. Castelano, R. N., et al. (1979). Ion-beam deposition of thin films of ferroelectric lead-zirconite- titanate (PZT). Journal of Applied Physics, 50, 4406.

13. Adachi, H., et al. (1986). Ferroelectric (Pb, La) (Zr, Ti)O<sub>3</sub> epitaxial thin films on sapphire grown by RF-planar magnetron sputtering. *Journal of Applied Physics*, 60, 736.
14. Ogawa, T., et al. (1989). Preparation of ferroelectric thin films by RF sputtering. *Journal of Applied Physics*, 28, 11-14.
15. Roy, D., et al. (1991). Excimer laser ablated lead zirconite titanate thin films. *Journal of Applied Physics*, 69, 1.
16. Yi, G., et al. (1989). Preparation of PZT thin film by sol-gel processing: Electrical, optical, and electro-optic properties. *Journal of Applied Physics*, 64, 2717.
17. Tamura, M., et al. (1975). Electroacoustical transducers with piezoelectric high polymer. *Journal of the Audio Engineering Society*, 23(31), 21-26.
18. Elliason, S. (1984). Electronic properties of piezoelectric polymers. Report TRITA-FYS 6665 from Dept. of Applied Physics, The Royal Inst. of Techn., Stockholm, Sweden.
19. Dargahi, J. (2000). A piezoelectric tactile sensor with three sensing elements for robotic, endoscopic and prosthetic applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 80(1), 1-90.
20. Kawai, H. (1969). The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride). *Japanese Journal of Applied Physics*, 8, 975-976.
21. Meixner, H., et al. (1986). Infrared sensors based on the pyroelectric polymer polyvinylidene fluoride (PVDF). *Siemens Forsch-u Entwicl Ber Bd*, 15(3), 105-114.
22. Ye, C., et al. (1991). Pyroelectric PbTiO<sub>3</sub> thin films for microsensor applications. In: *Transducers '91 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers* (pp. 904-907). ~~IEEE~~
23. Beer, A. C. (1963). Galvanomagnetic effect in semiconductors. In F. Seitz & D. Turnbull (Eds.), *Suppl. to solid state physics*. New York: Academic.
24. Putlye, E. H. (1960). The Hall effect and related phenomena. In C. A. Hogarth (Ed.), *Semiconductor monographs*. London: Butterwort.
25. Williams, J. (1990). Thermocouple measurement, AN28. In: *Linear applications handbook*. ~~Linear Technology Corp.~~

26. Seebeck, T. (1822–1823). Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz. Abhandlungen der Preussischen Akademie der Wissenschaften (pp. 265–373).
27. Benedict, R. P. (1984). Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
28. LeChatelier, H. (1962). Copt. Tend., 102, 188629. In: D. K. C. MacDonald (Eds.), Thermoelectricity: An introduction to the principles. New York: John Wiley & Sons.
29. Carter, E. F. (1966). Dictionary of inventions and discoveries. In F. Muller (Ed.), Crane. New York: Russak.
30. Peltier, J. C. A. (1834). Investigation of the heat developed by electric currents in homogeneous materials and at the junction of two different conductors. Annals of Physical Chemistry, 56(2nd ser.), 371–386.
31. Thomson, W. (1854, May). On the thermal effects of electric currents in unequal heated conductors. Proceedings of the Royal Soc. (Vol. VII).
32. Manual on the use of thermocouples in temperature measurement. (1981). ASTM Publication code number 04-470020-40. Philadelphia: ASTM.
33. Doebelin, E. O. (1990). Measurement systems: Application and design (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
34. Holman, J. P. (1972). Heat transfer (3rd ed.). New York: McGraw-Hill Book.
35. Fraden, J. (2002). Blackbody cavity for calibration of infrared thermometers. U.S. Patent No. 6447160.

## Glosarium

- Arus eddy** : adalah arus listrik yang diinduksikan ke dalam konduktor dengan mengubah medan magnet konduktor tersebut.
- Bahan dielektrik** : adalah sejenis bahan Isolator listrik yang dapat dikutubkan (*polarized*) dengan cara menempatkan bahan dielektrik tersebut dalam medan listrik.
- Dipol listrik** : adalah kombinasi dari dua muatan yang berlawanan, yang ditempatkan pada jarak terpisah.
- Efek fringing** : adalah fluks medan listrik yang terbentuk antara tepi dua logam pembentuk kapasitor dimana garis medan yang terbentuk melenceng dari garis medan yang lain.
- Efek Peltier** : adalah efek yang timbul ketika dua logam yang berbeda disambungkan dan kemudian arus listrik dialirkan pada sambungan tersebut, maka akan terjadi fenomena pompa kalor yang menyebabkan perubahan suhu.
- Efek piezoelektrik** : adalah pembangkitan muatan listrik oleh bahan kristal setelah mengalami tekanan.

- Efek piezoelektrik** : adalah kemampuan bahan tertentu untuk menghasilkan muatan listrik sebagai akibat adanya tekanan mekanis diterapkan.
- Efek Seebeck** : adalah fenomena yang mengubah perbedaan temperatur menjadi energi listrik.
- Efek Thompson** : adalah gejala penyerapan dan pemancaran kalor Bila arus listrik mengalir sepanjang sebuah batang, misalnya dari kiri ke kanan, sementara suhu di ujung kiri iebih tinggi daripada suhu di ujung kanan batang itu, batang akan menyerap kalor dari luar. Laju penyerapan kalor bergantung pada besarnya arus listrik dan selisih suhu.
- Efek triboelektrik** : yang merupakan proses perpindahan muatan listrik karena adanya gerakan benda, gesekan antara serat pakaian, turbulensi udara, listrik atmosfer, dan lain sebagainya.
- Elektrolit** : adalah suatu zat yang larut atau terurai ke dalam bentuk ion-ion yang merupakan atom-atom bermuatan elektrik.
- Elektromagnetik** : adalah gelombang yang memancar tanpa media rambat yang membawa muatan energi listrik dan magnet (elektromagnetik).
- Feroelektrik** : adalah gejala terjadinya perubahan polarisasi listrik secara spontan pada material akibat penerapan medan listrik yang mengakibatkan adanya

- ketidaksimetrisan struktur kristal pada suatu material.
- Feromagnetik** : adalah sifat material yang dapat ditarik kuat oleh magnet.
- Fluks magnetik** : adalah ukuran atau jumlah medan magnet yang melewati luas penampang tertentu.
- Flux** : adalah deskripsi yang mudah dari banyak medan seperti listrik, magnetik, termal, dan lain-lain yang menembus suatu luasan.
- Foton** : adalah partikel elementer dalam fenomena elektromagnetik. Biasanya foton dianggap sebagai pembawa radiasi elektromagnetik, seperti cahaya, gelombang radio, dan Sinar-X. Foton berbeda dengan partikel elementer lain seperti elektron dan quark, karena ia tidak bermassa dan dalam ruang vakum foton selalu bergerak dengan kecepatan cahaya,  $c$ . Foton memiliki baik sifat gelombang maupun partikel ("dualisme gelombang-partikel").
- Fotovoltaic** : adalah adalah suatu sistem atau cara langsung (direct) untuk mentransfer radiasi matahari atau energi cahaya menjadi energi listrik
- Gaya koersif (H)** : adalah medan magnet yang diperlukan untuk memindahkan induksi magnet.
- Gelombang longitudinal** : adalah gelombang yang memiliki arah getaran yang sama dengan arah rambatan. Contoh gelombang longitudinal adalah gelombang suara

- dan gelombang-P seismik yang disebabkan oleh gempa dan ledakan.
- Isolator** : adalah bahan yang tidak bisa atau sulit melakukan perpindahan muatan listrik.
- Konduktivitas listrik** : adalah ukuran kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik.
- Konduktor** : adalah bahan yang dapat menghantarkan listrik dengan baik, contohnya besi dan tembaga. Dalam konduktor, muatan listrik (elektron) bebas bergerak melalui materi, sedangkan pada isolator tidak
- Polarisasi dielektrik** : adalah suatu pembatasan jarak antara antara dua molekul terikat atau orientasi di dalam suatu molekul dua kutub pada bahan dielektrik dikarenakan adanya medan listrik.
- Resistivitas** : adalah kemampuan suatu bahan untuk mengantarkan arus listrik yang bergantung terhadap besarnya medan listrik dan kerapatan arus. Semakin besar resistivitas suatu bahan maka semakin besar pula medan listrik yang dibutuhkan untuk menimbulkan sebuah kerapatan arus.
- Sangkar Faraday** : adalah ruangan yang seluruhnya ditutupi oleh lembaran konduktif yang diarde atau jaring logam.
- Semikonduktor** : adalah perantara antara konduktor dan isolator dalam kemampuannya menghantarkan listrik.

- Sensor** : adalah peralatan elektronika yang digunakan untuk merasakan adanya perubahan variabel fisika atau kimia dan dinyatakan dalam besaran listrik.
- Strain gauge** : adalah komponen elektronika yang dipakai untuk mengukur tekanan (deformasi atau strain).
- Surface Acoustic Wave** : (SAW) adalah gelombang akustik yang merambat di sepanjang permukaan material yang memiliki elastisitas, dengan amplitudo yang biasanya meluruh secara eksponensial dengan kedalaman material.
- Termistor** : adalah alat atau komponen atau sensor elektronika yang dipakai untuk mengukur suhu. Prinsip dasar dari termistor adalah perubahan nilai tahanan (atau hambatan atau werstan atau resistance) jika suhu atau temperatur yang mengenai termistor ini berubah.
- Transduser** : adalah suatu alat yang dapat mengubah suatu bentuk energi ke bentuk energi lainnya.