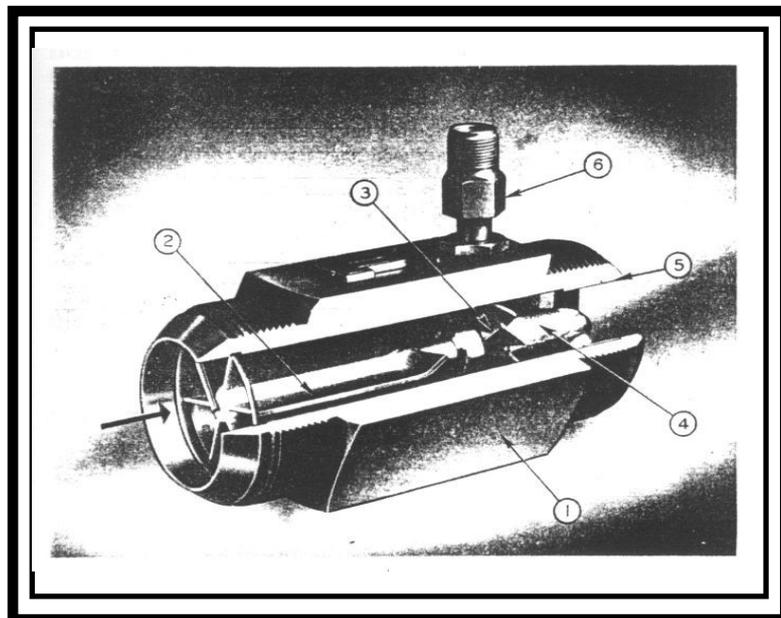


DIKTAT KULIAH
PENGUKURAN TEKNIK



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DARMA PERSADA
2014

DIKTAT KULIAH

PENGUKURAN TEKNIK

Disusun :

ASY'ARI DARYUS

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Darma Persada
Jakarta.

KATA PENGANTAR

Untuk memenuhi buku pegangan dalam perkuliahan, terutama yang menggunakan bahasa Indonesia dalam bidang teknik, maka kali ini penulis menyempatkan diri untuk ikut membuat sebuah buku/diktat yang bisa digunakan oleh mahasiswa teknik, terutama mahasiswa jurusan teknik mesin. Kali ini penulis menyiapkan diktat yang ditujukan untuk mata kuliah Pengukuran Teknik.

Dalam penyusunan buku ini penulis berusaha menyesuaikan materinya dengan kurikulum di jurusan Teknik Mesin, Universitas Darma Persada Indonesia.

Perlu ditekankan bahwa buku ini belum merupakan referensi lengkap dari pelajaran Pengukuran Teknik, sehingga mahasiswa perlu untuk membaca buku-buku referensi lain untuk melengkapi pengetahuannya tentang materi buku ini.

Akhir kata, mudah-mudahan buku ini bisa menjadi penuntun bagi mahasiswa dan memberikan manfaat sebagaimana yang diharapkan. Tak lupa penulis mengucapkan banyak-banyak terima-kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian pembuatan buku ini.

Jakarta, Juni 2014

IR. ASY'ARI DARYUS SE. MSc.

DAFTAR ISI

BAB I. Konsep-konsep Dasar.	1
BAB II. Piranti-piranti Pengukuran.	16
BAB III. Detektor-Transduser.	31
BAB IV. Pengukuran Anjakan dan Pengukuran Luas.	51
BAB V. Pengukuran Tekanan.	65
BAB VI. Pengukuran Aliran.	79
BAB VII. Pengukuran Suhu.	100
BAB VIII. Pengukuran Sifat Termal dan Sifat Transport.	115

BAB I

KONSEP KONSEP DASAR

DEFINISI DAN ISTILAH-ISTILAH

Sebelum membahas lebih jauh tentang pengukuran baiklah terlebih dahulu dijelaskan istilah-istilah yang sering digunakan dalam metrologi (ilmu pengukuran).

- *Kemampubacaan* (readability) : adalah menunjukkan berapa teliti skala suatu instrumen dapat dibaca.

Instrumen yang mempunyai skala 12 inchi mempunyai kemampubacaan lebih tinggi dari instrumen yang mempunyai skala 6 inchi dan jangkauan sama.

- *Cacah terkecil* (least count) : adalah beda terkecil antara dua penunjukan yang dapat dideteksi (dibaca) pada skala instrumen.
- *Ketelitian* (accuracy) instrumen menunjukkan deviasi atau penyimpangan terhadap masukan yang diketahui.

misal : pengukur tekanan 100 kPa yang mempunyai ketelitian 1 % artinya teliti disekitar +/- 1 kPa dalam keseluruhan jangkauan bacaan pengukuran tersebut.

- *Ketepatan atau presisi* suatu instrumen adalah menunjukkan kemampuan instrumen itu menghasilkan kembali bacaan tertentu dengan ketelitian yang diketahui.

contoh : suatu instrumen mengukur tegangan 100 Volt, diambil 5 ukuran yang didapat hasilnya adalah 104, 103, 105, 103 dan 105 V. Terlihat bahwa ketelitian tidak lebih baik dari 5% (5 V) sedang presisinya +/- 1 % karena deviasi maksimum dari harga rata-rata 104 V adalah 1 V.

Kalibrasi

Kalibrasi atau peneraan adalah memeriksa instrumen terhadap standar yang diketahui untuk selanjutnya mengurangi kesalahan dalam ketelitiannya.

Kalibrasi dilakukan terhadap :

1. standar primer
2. standar sekunder yang mempunyai ketelitian lebih tinggi dari instrumen yang dikalibrasi.
3. dengan sumber masukan yang diketahui.

Standar

Meter baku (standar) didefinisikan sebagai panjang suatu batang platina-iridium yang dipelihara pada kondisi yang sangat teliti di Biro Internasional untuk Bobot dan Ukuran (International Bureau of Weights and Measures) di Sevres, Perancis.

Kilogram adalah massa platina-iridium yang disimpan di Biro tersebut.

Standar-standar sekunder mengenai massa dan panjang disimpan di National Bureau of Standard (USA) untuk kegunaan kalibrasi.

Tahun 1960 meter standar didefinisikan dengan panjang gelombang cahaya merah-jingga lampu krypton-86. Meter standar adalah :

1 meter = 1.650.763,73 panjang gelombang

1 detik (sekon) adalah waktu yang diperlukan untuk 9.192.631.770 periode radiasi yang berhubungan dengan transisi dua tingkat yang sangat halus daripada keadaan fundamental atom Cesium-133.

Skala suhu absolut diusulkan oleh Lord Kelvin pada tahun 1854 :

$$K = ^\circ C + 273,15$$

$$^\circ R = ^\circ F + 459,67$$

$$^\circ F = 9/5 ^\circ C + 32,0$$

Dimensi Dan Satuan

Dimensi fundamental adalah :

L = panjang

M = massa

F = gaya

τ = waktu

T = suhu

Gaya \ddagger laju perpindahan momentum menurut waktu.

$F = k \, d(m.v)/d\tau$ k = konstanta proporsional

$F = K.m.a$ a = percepatan = $dv/d\tau$

atau : $F = m.a/g_c$ $1/g_c = k$

- Kerja atau usaha mempunyai dimensi hasil perkalian gaya dengan jarak.

$$N.m = 1 \text{ joule (J)}$$

- Bobot suatu benda didefinisikan sebagai gaya yang bekerja pada benda itu sebagai percepatan gravitasi.

$$W = g/g_c \cdot m \qquad W = \text{bobot}$$

g = gravitasi

Satuan-satuan dasar dan tambahan dalam SI :

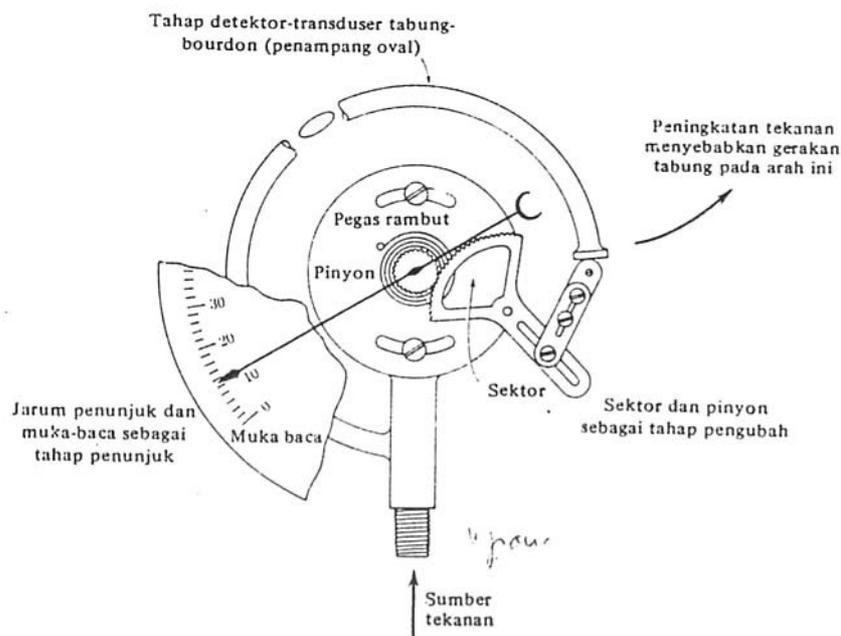
Besaran	Satuan	Lambang SI	Rumus
Satuan Dasar			
Panjang	meter	m	
Massa	kilogram	kg	
Waktu	sekon	s	
Arus	amper	A	
Temperatur termodinamika	kelvin	K	
Jumlah zat	mole	mol	
Intensitas cahaya	kandela	cd	
Satuan tambahan			
Sudut bidang	radian	rad	
Sudut ruang	steradian	sr	
Satuan yang diturunkan			
Percepatan	meter per sekon kwadrat	m/s^2	
Percepatan sudut	radian per sekon kwadrat	rad/s^2	
Kecepatan sudut	radian per sekon	rad/s	
Luas	meter persegi	m^2	
Berat jenis	kilogram per meter kubik	kg/m^3	
Kapasitas listrik dsb	farad	F	

Bentuk Umum Sistem Pengukuran

Umumnya sistem pengukuran terdiri dari tahap-tahap berikut :

1. *Tahap detektor-transduser*, yaitu tahap yang mendeteksi besaran fisika dan melakukan transformasi secara mekanik atau listrik untuk mengubah sinyal menjadi bentuk yang lebih berguna.
2. *Tahap antara*, yaitu mengubah sinyal langsung dengan penguatan, penyaringan atau cara-cara lain, agar didapatkan keluaran yang dikehendaki.
3. *Tahap akhir atau penutup*, yaitu tahap yang fungsinya menunjukkan, merekam dan mengendalikan variabel yang diukur.

Gambar 1. berikut adalah contoh sebuah alat ukur dalam hal ini yaitu pengukur tekanan tabung bourdon sederhana.



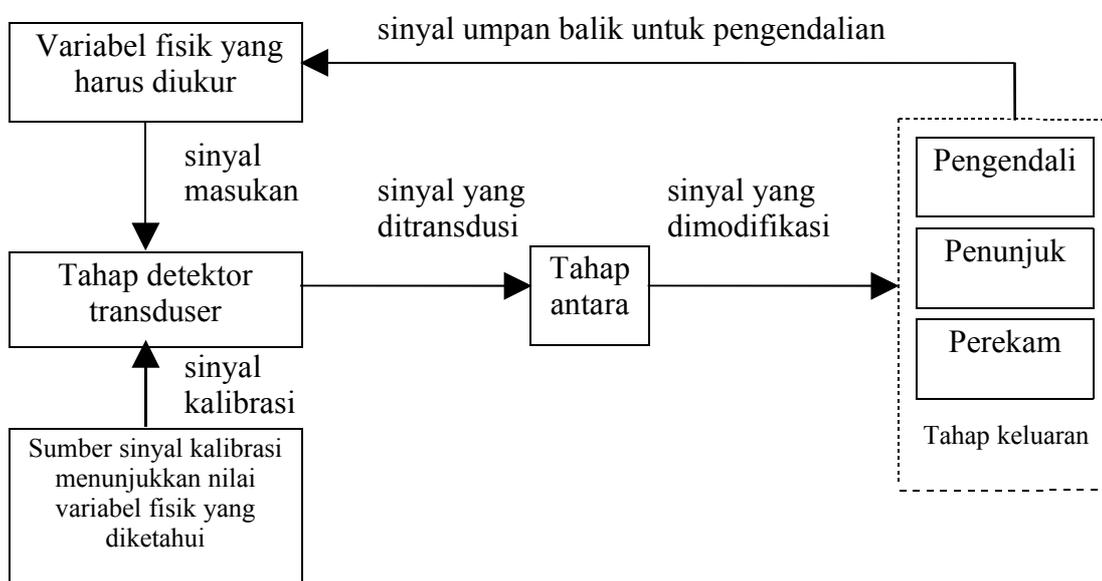
Gambar 1. Pengukur tekanan tabung Bourdon sebagai suatu sistem umum pengukuran.

Dari gambar diatas maka tahap-tahap pengukurannya adalah :

- Tahap detektor-transduser adalah tabung bourdon yang berfungsi merubah sinyal tekanan menjadi gerakan mekanik tabung.

- Tahap antara adalah susunan roda gigi yang memperkuat gerakan diujung tabung sehingga gerakan kecil saja bisa menghasilkan sampai tiga-perempat putaran pada roda gigi pusat.
- tahap penunjuk akhir terdiri dari jarum penunjuk dan susunan muka-baca (dial), yang bila dikalibrasi dengan dengan masukan tekanan yang diketahui, akan menunjukkan sinyal tekanan yang diberikan tabung bourdon itu.

Diagram skema sistem umum pengukuran ditunjukkan oleh gambar 2. berikut.



Gambar 2. Skema umum sistem pengukuran

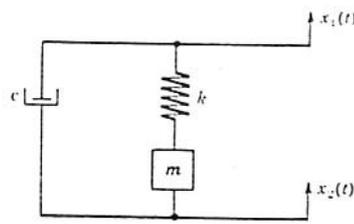
Sinyal umpan balik digunakan untuk pengendali pada tahap akhir pengukuran.

Konsep-konsep Dasar Dalam Pengukuran Dinamik

Pengukuran statik besaran fisika dilakukan bila besaran itu tidak berubah dengan waktu. Contoh besaran statik adalah lenturan balok karena suatu beban tetap. Lain halnya jika balok tersebut mengalami getaran, defleksinya akan berubah-ubah menurut waktu, dan proses pengukurannya pun akan sulit. Pengukuran proses-proses aliran jauh lebih

mudah bila fluida itu mengalir dalam keadaan stedi (keadaan tunak, steady state), dan menjadi sulit bila harus dilakukan pada waktu terdapat perubahan.

Perhatikan sistem peredam pegas-massa seperti gambar 3. Sistem ini bisa dianggap sebagai sistem pengukuran mekanik sederhana dimana variabel anjakan (pergerakan, displacement) masukan yang bekerja pada susunan pegas-massa itu adalah $x_1(t)$ dan menghasilkan anjakan $x_2(t)$ sebagai keluaran. Baik x_1 maupun x_2 berubah menurut waktu.



Gambar 3. Sistem sederhana peredam pegas-massa.

Andaikan gaya redam berbanding lurus dengan dengan kecepatan, maka sesuai dengan hukum Newton tentang gerakan yaitu :

$$k(x_1 - x_2) + c\left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt}\right) = m \frac{d^2 x_2}{dt^2}$$

Dituliskan dalam bentuk lain,

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c \frac{dx_2}{dt} + kx_2 = c \frac{d x_1}{dt} + kx_1$$

jika $x_1(t)$ fungsi harmonik :

$$x_1(t) = x_0 \cos \omega_1 t$$

dimana : x_0 = amplitudo anjakan

ω_1 = frekwensi

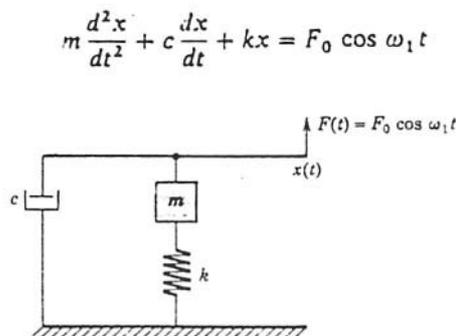
Secara sederhana prinsip diatas diterapkan pada timbangan. Jika massa timbangan m dan konstanta pegas k dan gesek mekanik yang terdapat

ditimbangan tersebut dinyatakan dengan c , timbangan diberi frekwensi tertentu, badan timbangan mengikuti osilasi yang diberikan. Respon dari timbangan akan maksimal pada frekwensi alamiah timbangan tersebut (natural frequency). Pada osilasi yang diberikan berada diatas dan dibawah frekwensi alamiahnya maka osilasi timbangan akan berada dibawah osilasi maksimalnya.

Fungsi anjakan $x_2(t)$ akan tergantung pada fungsi masukan $x_1(t)$ dan disebut sistem memberikan respon yang tergantung frekwensi masukan.

Dari eksperimen sederhana pada sistem pegas-massa menunjukkan bahwa anjakan massa tidak satu fase dengan anjakan yang diberikan artinya anjakan maksimum massa tidak terjadi pada saat yang sama dengan anjakan maksimum fungsi yang diberikan. Fenomena ini disebut *pergeseran fase* (phase shift).

Untuk melihat respon frekwensi dan pergeseran fase, misalkan sistem pegas massa seperti gambar 4. dibawah ini.



Gambar 4. Sistem peredam pegas-massa yang diberi masukan gaya.

Fungsi gaya yang diberikan :

$$F(t) = F_0 \cos \omega_1 t$$

Persamaan diferensial sistem :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos \omega_1 t$$

Persamaan diatas mempunyai penyelesaian :

$$x = \frac{(F_0 / k) \cos(\omega_1 t - \phi)}{\{[1 - (\omega_1 / \omega_n)^2]^2 + [2(c / c_c)(\omega_1 / \omega_n)]^2\}^{1/2}}$$

dan :

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2(c / c_c)(\omega_1 / \omega_n)}{1 - (\omega_1 / \omega_n)^2}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$c_c = 2\sqrt{m \cdot k}$$

dimana : ϕ = sudut fase

ω_n = frekwensi alamiah

c_c = koefisien peredam kritis

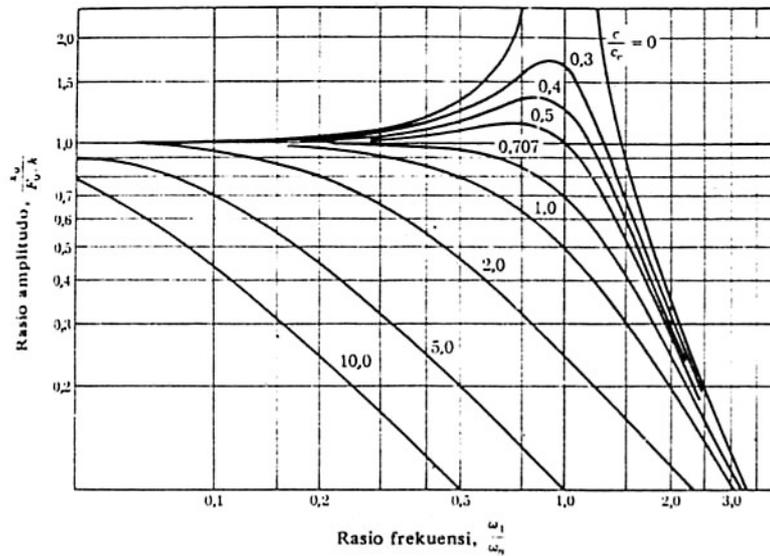
Perbandingan antara amplitudo keluaran dan masukan $x_0/(F_0/k)$, dimana x_0 ialah amplitudo gerakan, diberikan oleh :

$$x_0 = \frac{F_0 / k}{\{[1 - (\omega_1 / \omega_n)^2]^2 + [2(c / c_c)(\omega_1 / \omega_n)]^2\}^{1/2}}$$

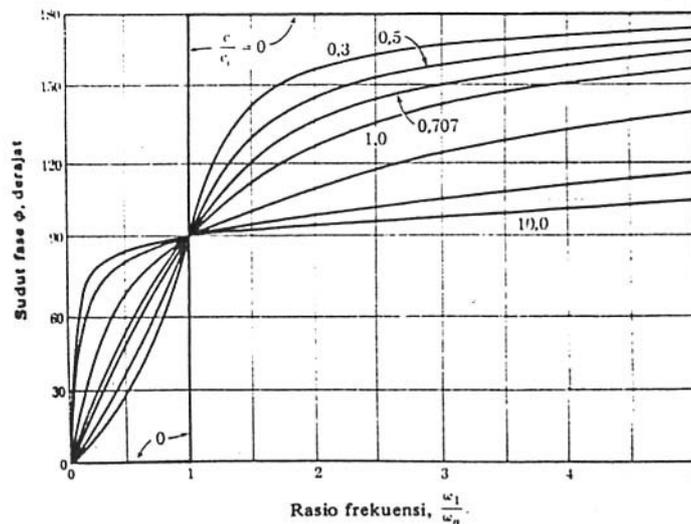
grafiknya pada gambar 5. menunjukkan respon frekwensi sistem itu, dan sudut fase digambarkan grafiknya pada gambar 6. untuk menunjukkan contoh karakteristik geseran fase. Dari grafik tersebut dapat kita amati sebagai berikut:

1. Untuk nilai c/c_c rendah, amplitudo hampir konstan sampai rasio frekwensi 0,3.
2. Untuk nilai c/c_c besar (sistem lewat-redam) amplitudo berkurang dengan nyata.
3. Karakteristik pergeseran fase merupakan fungsi kuat rasio redaman pada semua frekwensi.

Dapatlah dikatakan bahwa sistem ini mempunyai linieritas yang baik pada rasio redaman rendah sampai rasio frekwensi 0,3 karena amplitudo hampir konstan dalam jangkauan tersebut.



Gambar 5. Respon-frekuensi sistem dalam Gambar 4.



Gambar 6. Karakteristik pergeseran fasa sistem dalam Gambar 4.

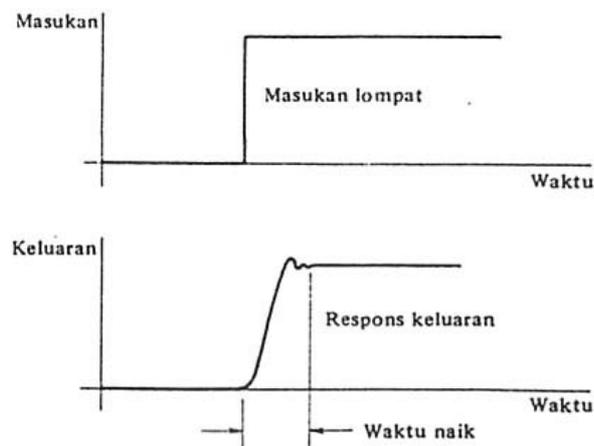
Respon Sistem

Respon frekwensi linier adalah apabila sistem mempunyai sifat mempunyai rasio amplitudo keluaran dan masukan sama dalam jangkauan frekwensi tertentu.

Respon amplitudo linier adalah apabila rasio amplitudo keluaran dan masukan harus tetap dalam jangkauan amplitudo masukan tertentu.

Sistem disebut terdorong-lewat (overridden) apabila jangkauan linier terlewati.

Apabila kepada suatu sistem diberikan masukan tiba-tiba (step), biasanya akan terdapat sedikit kelambatan sebelum terlihat respon keluaran, dan kelambatan ini disebut *waktu-naik* (rise time) atau *tunda* (delay) dari sistem tersebut. Fenomena ini ditunjukkan pada gambar 7. laju maksimum yang dapat dikelola sistem disebut *laju-kenaikan* (slew-rate).



Gambar 7. Pengaruh waktu naik pada respon keluaran sistem itu terhadap masukan lompat.

Beberapa sistem bisa juga menunjukkan gejala pelemahan (melapuk) secara eksponensial. Contoh kapasitor membuang muatan melalui suatu tahanan, voltasenya akan berubah secara eksponen.

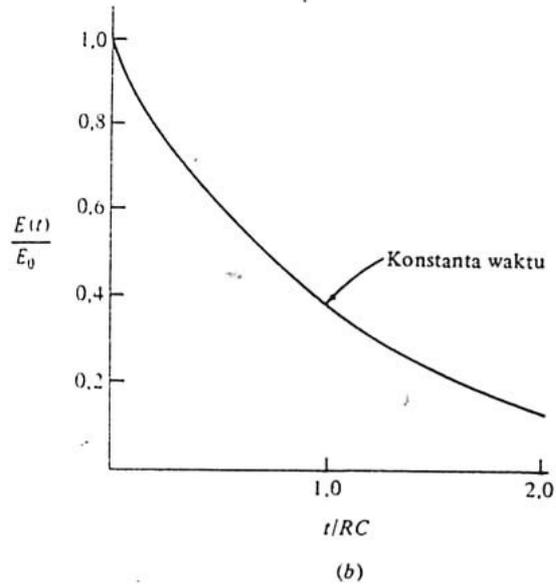
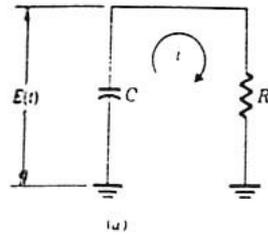
$$\frac{E(t)}{E_0} = e^{-(1/RC)t}$$

dimana : R = tahanan

C = kapasitansi

$E(t)$ = tegangan melalui C

E_0 = tegangan awal

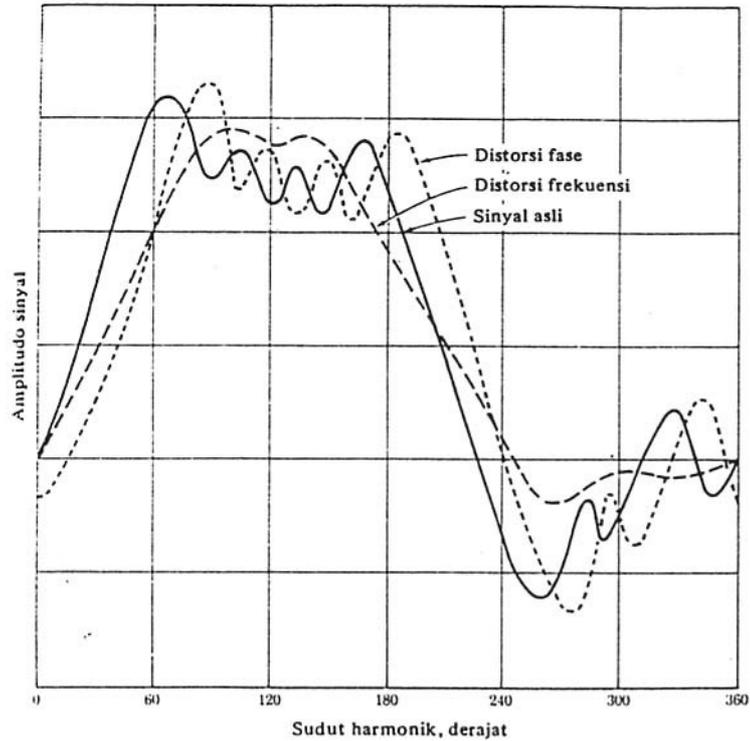


Gambar 8. Buangan kapasitor melalui tahanan. (a) Skema. (b) Grafik tegangan.

Distorsi

Distorsi adalah adanya varian/cacat sinyal terhadap bentuk aslinya.

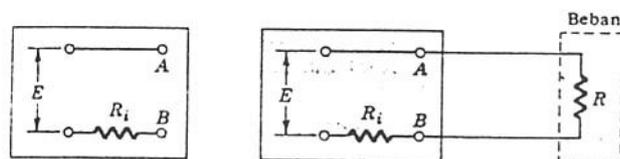
Jika input merupakan suatu fungsi harmonik yang terdiri dari berbagai frekwensi atau spektrum frekwensi bentuk gelombang datang yang cukup luas, maka setiap komponen frekwensi akan mengalami karakteristik pergeseran fase dan amplitudo yang berbeda, sehingga bentuk frekwensi keluaran mungkin tidak ada kesamaannya lagi dengan masukan, hal demikian disebut *distorsi*. Pengaruh respon frekwensi yang buruk dan respon pergeseran fase yang tidak baik terhadap bentuk gelombang yang kompleks dilustrasikan pada gambar 9.



Gambar 9. Pengaruh respon frekuensi dan respon pergeseran fasa pada bentuk gelombang yang kompleks.

Kesesuaian Impedansi

Dalam perangkat eksperimen, untuk melakukan pengukuran secara menyeluruh berbagai peralatan listrik perlu dihubungkan satu sama lain. Jika berbagai peralatan disambungkan harus diperhatikan bahwa impedansi antar peralatan tersebut harus sesuai.



Gambar 10. Piranti dua terminal dengan impedansi dalam R_i .

Pada gambar 10 terlihat impedansi masukan suatu piranti berterminal dua. Piranti ini mempunyai tahanan dalam R_i dihubungkan dalam seri dengan sumber tegangan dalam E . Terminal-terminal penghubung instrumen ditandai dengan A dan B, dan tegangan rangkaian terbuka atau tegangan beban nol

(open circuit voltage) pada terminal ini ialah tegangan dalam E . Jika beban luar dihubungkan dengan piranti itu, sedang tegangan E masih tetap, tegangan yang terdapat pada terminal keluaran A dan B akan bergantung nilai R . Potensial yang terdapat pada terminal keluaran ialah :

$$E_{AB} = E \frac{R}{R + R_i}$$

Makin besar nilai R , makin dekat pula tegangan terminal mendekati tegangan dalam E .

Jika piranti ini digunakan sebagai sumber tegangan dengan impedansi dalam, maka impedansi luar (beban) harus cukup besar agar tegangan pada terminal tetap. Atau jika kita ingin mengukur tegangan dalam E , impedansi alat ukur yang dihubungkan dengan terminal harus cukup besar dibandingkan dengan impedansi dalam.

Misalkan kita ingin menyampaikan daya dari piranti itu ke beban luar R . Daya diberikan oleh persamaan :

$$P = \frac{E_{AB}^2}{R}$$

maka :

$$P = \frac{E^2}{R} \left(\frac{R}{R + R_i} \right)^2$$

Kondisi maksimum dicapai jika : $dP/dR=0$ sehingga : $R = R_i$.

Artinya : Daya maksimum akan diperoleh jika impedansi beban luar persis sama dengan impedansi dalam.

Perencanaan Eksperimen

Kunci keberhasilan dalam eksperimen adalah selalu mempertanyakan: Apa yang saya cari? Mengapa saya mengukur besaran ini? Dapatkah pengukuran ini benar-benar bisa menjawab pertanyaan saya? Apakah yang

saya dapat ketahui dari pengukuran ini? Pertanyaan-pertanyaan ini nampaknya sederhana, namun harus selalu ditanyakan selama pelaksanaan program eksperimen tersebut.

Beberapa pertanyaan khusus yang harus dipertanyakan pada tahap awal perencanaan eksperimen :

1. Apakah variabel primer yang akan diselidiki?
2. Apakah kendali yang harus dilakukan terhadap eksperimen itu?
3. Berapakah jangkauan variabel yang diperlukan untuk menerangkan fenomena yang dikaji?
4. Berapa banyak titik data yang perlu didapatkan?
5. Berapa ketelitian instrumen yang diperlukan?
6. Bila melibatkan pengukuran dinamik, bagaimana respon frekwensi instrumen itu seharusnya?
7. Adakah instrumen itu terdapat di pasaran atau harus dibuat khusus?
8. Persiapan keselamatan apa yang harus dilakukan?
9. Berapakah dana yang tersedia?
10. Persiapan apakah yang sudah dibuat mengenai perekaman data?

Eksperimen itu harus dianalisa. Kesalahan akan ada pada sebuah eksperimen. Kesalahan ada yang bersifat acak, adapula yang disebabkan kekeliruan pelaksanaan eksperimen.

Data yang buruk yang disebabkan oleh kekeliruan yang nyata harus dibuang. Untuk data yang “tampaknya buruk” tidak boleh dibuang begitu saja, hanya karena tidak sesuai dengan yang kita harapkan kecuali kita tahu betul bahwa ada sesuatu yang tidak beres.

Soal Latihan

1. Perhatikan suatu termometer raksa-dalam-gelas biasa sebagai suatu sistem pengukuran, dan tunjukkan bagian-bagian mana termometer itu yang dimaksudkan oleh kotak-kotak dalam gambar 2.
2. Sebuah termometer digunakan untuk jangkauan 200 sampai 400 °F, dan ketelitiannya dikatakan seperempat persen. Berapakah ketelitian itu dalam suhu ?
3. Suatu fungsi desakan sinusoida diberikan pada sistem dalam gambar 4. Frekwensi alamiahnya ialah 100 Hz dan rasio redam c/c_c ialah 0,7. Hitunglah amplitudo dan keterlambatan (time lag) sistem itu untuk frekwensi masukan 40 Hz.
4. Untuk frekwensi alamiah 100 Hz dan rasio redam 0,7 hitunglah jangkauan frekwensi-masukan untuk sistem dalam gambar 4 yang mempunyai rasio amplitudo $1,00 \pm 0,01$.
5. Sebuah timbangan baja diberi tanda skala setiap $1/32$ in. Berapakah kemampuannya dan cacah terkecil skala itu?
6. Suatu kapasitor $10 \mu\text{F}$ diberi muatan sampai potensial 100 V. Pada waktu nol muatan kapasitor itu dibuang melalui resistor $1 \text{ M}\Omega$. Berapakah konstanta-waktu sistem ini ?

BAB II

PIRANTI-PIRANTI PENGUKURAN

Banyak piranti pengukuran yang operasinya banyak memakai prinsip listrik dasar yang diaplikasikan dalam perangkat listrik atau elektronik. Oleh sebab itu dalam berikut ini akan dijelaskan tentang piranti listrik dan elektronik dan penggunaannya dalam alat ukur.

Gaya Elektromagnetik

Listrik mempunyai muatan yaitu muatan positif dan muatan negatif. Jika muatan titik bergerak dengan kecepatan \mathbf{v} , gaya hasil yang bekerja pada muatan itu diberikan oleh :

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \text{newton} \quad (2.1)$$

dimana : \mathbf{E} = volt per meter

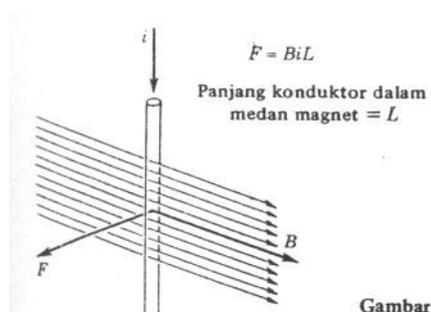
\mathbf{v} = meter per sekon

\mathbf{B} = weber per meter persegi

q = muatan, Coulomb

Jika sebuah konduktor kawat dialiri arus listrik dan ditempatkan dalam medan magnet dan tidak ada medan listrik dalam hal ini seperti yang ditunjukkan pada gambar 1, arus listrik i dalam konduktor dirumuskan :

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (2.2)$$



Gambar 1. Konduktor membawa arus dalam medan magnet.

$$ids = \frac{dq}{dt} ds = v dq \quad (2.3)$$

dimana : ds = panjang konduktor yang ditempuh muatan yang bergerak

dt = waktu

Gaya yang bekerja pada muatan dq diberikan oleh persamaan berikut :

$$d\mathbf{F} = dq(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = i(ds \times \mathbf{B}) \quad (2.4)$$

Persamaan diatas menunjukkan banyaknya pertambahan gaya $d\mathbf{F}$ yang bekerja pada panjang ds konduktor karena adanya interaksi antara muatan yang bergerak melalui konduktor dan densitas fluks magnet tempat konduktor itu berada. Gaya total \mathbf{F} yang bekerja pada konduktor sepanjang L :

$$\mathbf{F} = \int_0^L i(ds \times \mathbf{B}) \quad (2.5)$$

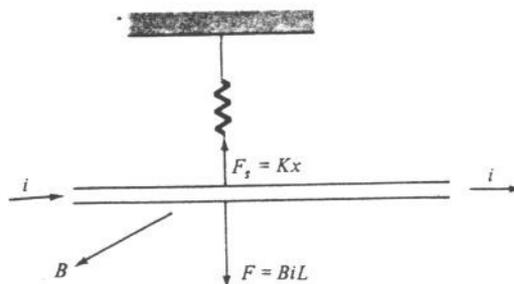
Untuk menyederhanakan hasil, perhatikan saja situasi di mana sumbu konduktor tegak lurus terhadap \mathbf{B} , jadi:

$$ds \times \mathbf{B} = dsB \sin 90^\circ = dsB$$

dan gaya total F diberikan oleh :

$$F = BiL \quad (2.6)$$

Perhatikan gambar 2, tanpa ada arus yang mengalir melalui konduktor, pegas akan berada pada posisi tak terentang. Bila arus mengalir, pegas akan merentang dan menimbulkan gaya yang mengimbangi gaya elektromagnetik. Jarak total x dari pegas dihitung dengan menyamakan kedua gaya itu.



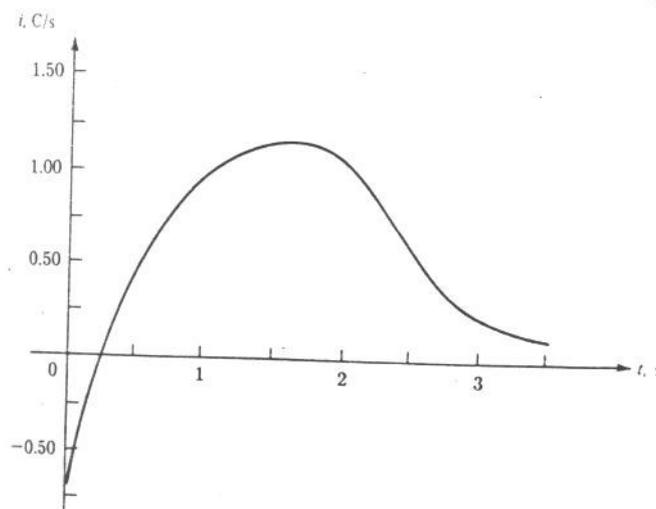
Gambar 2. Ammeter primitif.

$$Kx = BiL$$

$$x = \frac{BLi}{K}$$

dimana : K = konstanta pegas

Jika konduktor pada gambar 2 diberi arus i yang berubah dengan waktu, maka posisi x konduktor akan berubah dengan waktu. Grafik fungsi arus terhadap waktu bisa didapatkan dengan merekam posisi pada waktu-waktu tertentu, umpamanya dengan kamera film, seperti contohnya gambar 3.



Gambar 3. Bentuk gelombang analog.

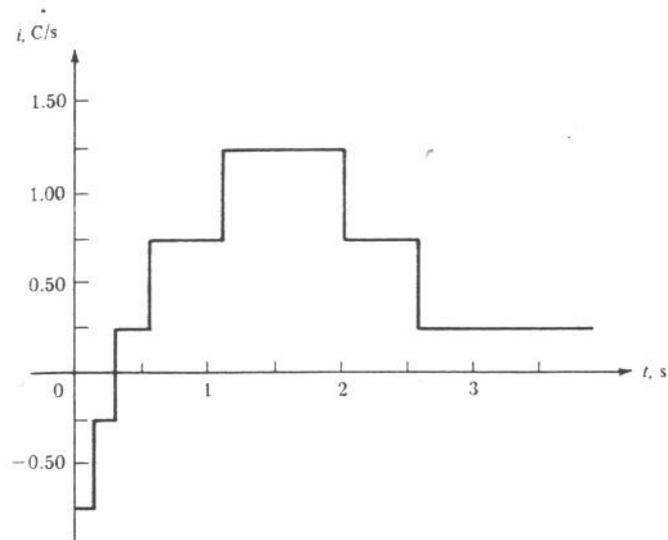
Grafik pada gambar 3 diatas merupakan penggambaran *analog* dari arus i sebagai fungsi waktu. Dalam konteks ini. "penggambaran analog" berarti bahwa arus itu dianggap sebagai variabel kontinyu.

Penggambaran *digital* adalah penggambaran hanya nilai *farik* atau diskrit, misalnya untuk kasus diatas secara digital bisa digambarkan seperti gambar 4. Dalam hal ini arus dianggap sebagai "bongkah-bongkah" diskrit sebesar 0,5 C/s.

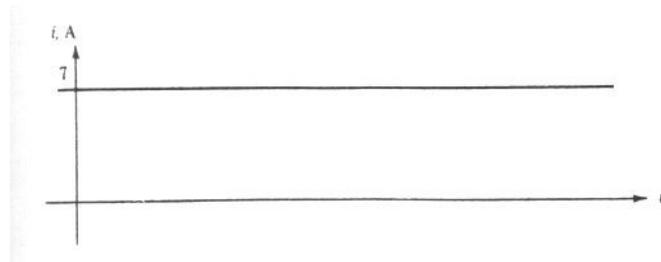
Ukuran Bentuk gelombang

Apabila suatu besaran fisik skalar konstan terhadap waktu, spesifikasi besaran itu hanya melibatkan satu bilangan saja. Misal pada gambar

menunjukkan arus tetap sebesar 7A yang mengalir melalui konduktor. Dikatakan bahwa mengalir arus searah sebesar 7A.



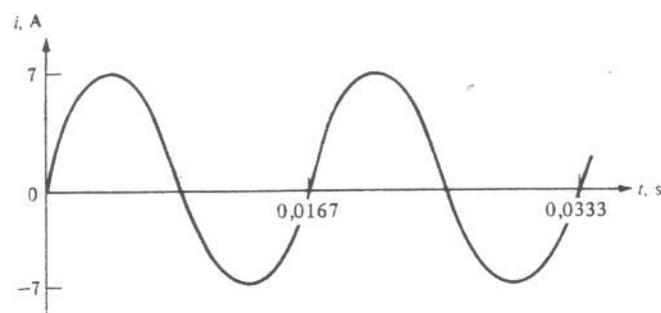
Gambar 4. Bentuk gelombang digital.



Gambar 5. Suatu arus searah 7-A.

Kalau besaran fisik berubah menurut waktu, situasinya menjadi pelik. Misal pada gambar 6, dimana arus mengalir mengiktui persamaan:

$$i(t) = 7 \sin (377t) \quad A$$



Gambar 6. Suatu arus sinusoidal.

Grafik sinusoidal ini tidak bisa diukur dengan harga rata-rata karena akan memberikan nilai nol. Maka cara lain adalah mengukur arus puncak ke puncak, artinya beda antara titik maksimum dan minimum arus yang didapatkan dari bentuk gelombang itu.

$$i_{p-p} = 7 - (-7) = 14 \text{ A}$$

Meter Analog Dasar

Sebuah kumparan yang dialiri arus dalam medan magnet seperti pada gambar 8, jika kumparan mempunyai N lilitan, dan panjang setiap lilitan di dalam medan magnet adalah L , maka gaya pada kumparan adalah :

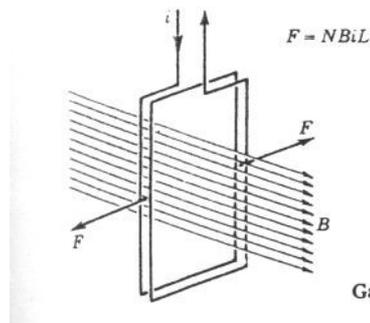
$$F = N B i L \quad (2.7)$$

dengan : N = jumlah lilitan

i = arus

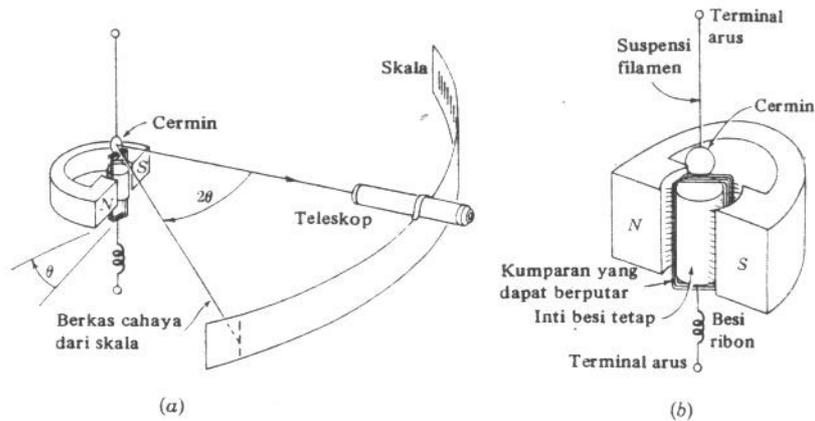
L = panjang setiap lilitan

B = medan magnet



Gambar 8. Kumparan yang membawa arus dalam medan magnet.

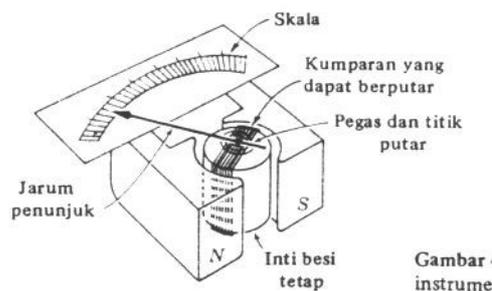
Teori ini dimanfaatkan salah satunya pada *galvanometer cermin*. Sebuah magnet permanen digunakan untuk membuat medan magnet, sedangkan susunan teleskop dan skala yang diperbesar membantu memperbaiki kemampuan bacaan instrumen tersebut. Meter jenis ini dinamakan jenis kumparan bergerak *D'Arsonval* (*D'Arsonval moving coil type*).



Gambar 9. Sebuah galvanometer. (a) Sistem optik. (b). Gerakan D'Arsonval.

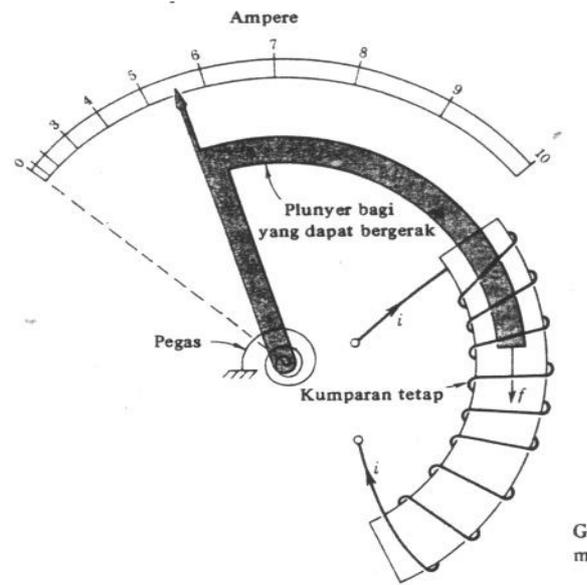
Dalam hal ini, gaya penahan pegas-torsi diberikan oleh pita logam, sedangkan pada instrumen yang lebih peka digunakan suspensi filamen.

Penggunaan lainnya terlihat pada gambar 10 yaitu instrumen jenis penunjuk. Gerakan meter D'Arsonval tersebut dapat digunakan untuk mengukur arus searah. Jika gerakan ini dihubungkan dengan arus bolak-balik, meter akan bergetar atau jika frekwensinya tinggi, akan menunjukkan nol.



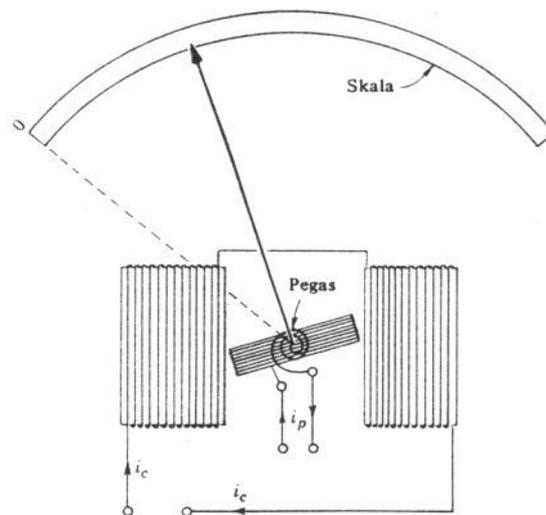
Gambar 10. Gerakan D'Arsonval digunakan sebagai instrumen jenis penunjuk.

Dua jenis gerakan yang paling lazim dipakai untuk pengukuran arus bolak balik ialah susunan sudu besi (iron vane) atau besi bergerak (moving iron), dan elektrodinamometer. Pada instrumen sudu besi (gambar 11), arus dialirkan pada *kumparan tetap*. Sudu besi dapat bergerak dan dihubungkan dengan pegas penahan seperti pada gambar. Anjakan (displacement) sudu berbanding dengan gaya induksi yang bekerja pada kumparan itu. Meter jenis ini mengalami arus pusaran dalam sudu besi dan berbagai efek histerisis, sehingga ketelitiannya terbatas.

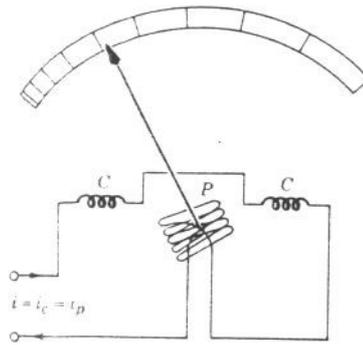


Gambar 11. Prinsip kerja instrumen sudu besi atau besi bergerak.

Gerakan elektrodinamometer diperlihatkan pada gambar 12. Gerakan ini serupa dengan gerakan D'Arsonval kecuali disini magnet permanen diganti dengan elektromagnetik yang dapat digerakkan oleh arus bolak-balik. Agar gerakan elektrodinamometer dapat digunakan untuk pengukuran arus bolak-balik, elektromagnet itu perlu dihubungkan dalam seri dengan kumparan bergerak seperti gambar 13.



Gambar 12. Perlengkapan dasar gerakan elektrodinamometer.

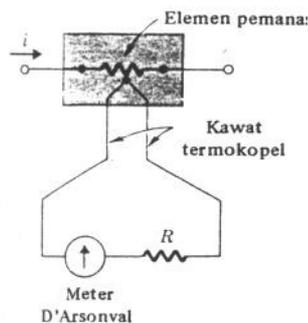


Gambar 13. Gerakan elektrodinamometer dipakai sebagai ammeter.

Baik gerakan sudu-besi maupun elektrodinamometer, keduanya biasanya dipakai untuk frekwensi rendah yaitu antara 25 sampai 125 Hz. Untuk meluaskan jangkauannya hingga kira-kira 2000 Hz, dapat digunakan gerakan elektrodinamometer dengan rancangan khusus.

Arus bolak-balik dapat juga diukur dengan pengukur arus searah setelah terlebih dahulu disearahkan dengan penyearah (rectifier).

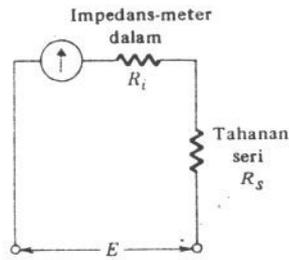
Untuk mengukur arus bolak-balik frekwensi tinggi digunakan meter termokopel. Meter jenis ini ditunjukkan pada gambar 14. Arus bolak balik dilewatkan melalui elemen pemanas, dan suhu elemen itu ditunjukkan oleh termokopel yang dihubungkan dengan meter D'Arsonval.



Gambar 14. Skema meter termokopel.

Termokopel ini menunjukkan nilai akar rata-rata kwadrat arus karena daya rata-rata yang diserap dalam pemanas yaitu $I_{ark}^2 R$.

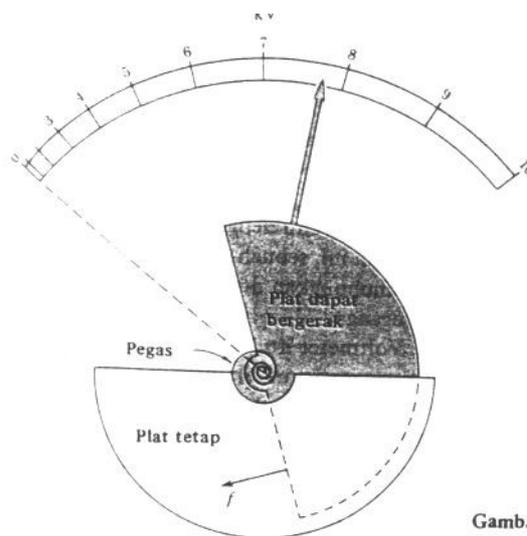
Volmeter arus searah bisa juga dibuat dengan meter D'Arsonval, yaitu dengan mengubah gerakan D'Arsonval seperti gambar 15.



Gambar 15. Meter D'Arsonval digunakan sebagai voltmeter.

Jangkauan voltmeter dapat diganti dengan mengubah nilai tahanan seri. Susunan seperti ini bisa juga digunakan untuk instrumen sudu besi atau elektrodinamometer untuk mengukur tegangan rata-rata kwadrat bolak-balik.

Gaya elektrostatik dapat juga untuk mengukur beda potensial (tegangan) listrik. Untuk itu dua buah pelat disusun seperti gambar 16. Salah satu pelat dibuat tetap sedang yang satu lagi dapat bergerak bebas. Sebuah pegas digunakan untuk memberikan gaya penahan pada pelat yang bergerak. Pada kedua pelat kemudian diberi tegangan yang akan diukur. Karena konstruksinya seperti gambar tersebut, maka pengaruh samping dari medan listrik menghasilkan gaya neto pada arah seperti yang ditunjukkan gambar. Gaya ini sebanding dengan pangkat dua tegangan rata-rata.



Gambar 4

Gambar 16. Gerakan voltmeter elektrostatik.

Voltmeter elektrostatis dapat digunakan untuk mengukur tegangan arus searah maupun arus bolak-balik, tetapi tegangannya harus diatas 100 V agar dapat memberikan momen puntir yang cukup kuat.

Meter Digital Dasar

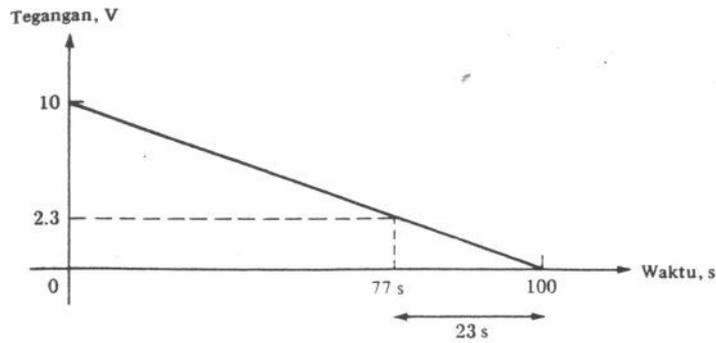
Dengan meter digital, nilai yang diukur ditunjukkan langsung dengan sederatan angka sehingga kesalahan paralaks bisa dihindarkan.

Jantung meter digital adalah suatu osilator atau *clock*. Piranti ini biasanya adalah suatu kristal kuarsa yang diberi kontak listrik. Bila kristal ini dihubungkan dengan komponen listrik luar yang tepat, ia akan menghasilkan suatu tegangan yang hampir berciri sinusoida dengan frekwensi tetap. Contoh arloji digital, dimana osilator akan membangkitkan frekwensi. Frekwensi ini secara elektronik dirubah ke bentuk pulsa yaitu satu pulsa untuk setiap siklus osilasi jam (1 pulsa/detik).

Tumpuan instrumentasi digital ialah voltmeter digital. Operasi alat ini dicirikan sebagai berikut:

1. Kemampuan membangkitkan tegangan rujukan dalam dan menurunkan daya secara linier dari 10 V menjadi 0 dengan laju 0,1 V/dt.
2. Kemampuan membandingkan tegangan rujukan dengan tegangan yang diukur dan membangkitkan sinyal bila kedua tegangan itu sama.
3. kemampuan membangkitkan sinyal lain bila tegangan rujukan menjadi 0 V.

Contoh : Andaikan sebuah jam membangkitkan satu pulsa setiap detik. Kita hanya perlu mencacah/menghitung pulsa jam itu bila tegangan rujukan sama dengan tegangan yang diukur, dan berhenti mencacah bila tegangan rujukan telah nol. Misal jumlah cacah 23 ketika tegangan yang diukur sama dengan tegangan rujukan, artinya waktu telah berjalan 23 detik sejak pencacahan dimulai. Oleh karena tegangan berkurang sebesar 0,1 V/dt maka setelah 23 detik tegangan berkurang $23 \times 0,1 = 2,3$ V, maka tegangan yang diukur = $10 - 2,3 = 7,7$ V.



Gambar 17. Pengukuran tegangan digital.

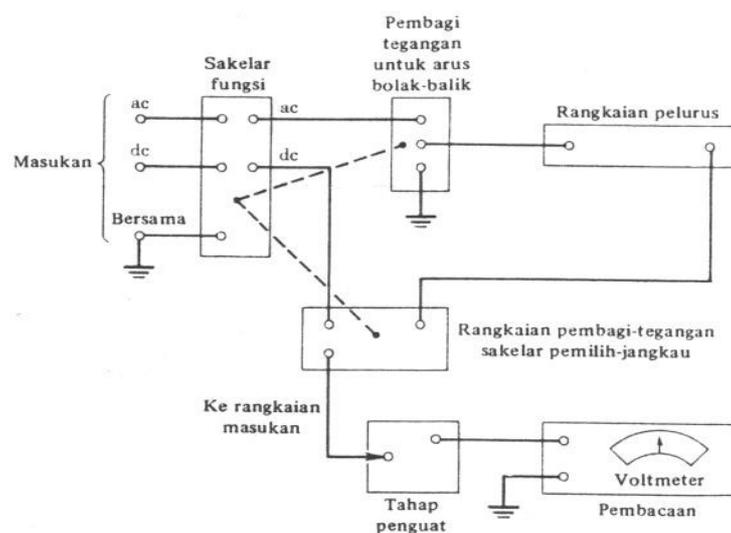
Voltmeter digital dapat dirubah menjadi *ammeter* dengan memasang resistor di dalam instrumen dan mengukur penurunan tegangan pada resistor tersebut yang disebabkan oleh arus listrik.

Contoh diatas bisa menggambarkan cara kerja meter digital namun pada kenyataannya waktu pencacahan (pulsa) lebih cepat dari pada pulsa jam.

Voltmeter Elektronik (EVM)

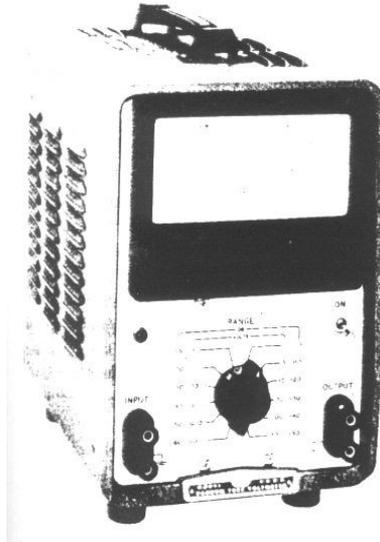
Alat ini dibangun dari rangkaian elektronik yang mengandung transistor dan IC (Integrated Circuit). Alat ini bisa mengukur arus AC ataupun DC. Impedansi masukannya sangat tinggi, sehingga bisa dipakai mengukur tegangan dalam rangkaian elektronik.

Suatu diagram kotak yang menunjukkan skema EVM sederhana diberikan pada gambar 42 berikut :



Gambar 42. Diagram kotak skema voltmeter elektronik (EVM).

Gambar 43 memperlihatkan sebuah contoh alat ukur voltmeter elektronik.



Gambar 43. Foto sebuah EVM.

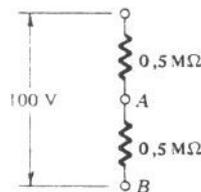
Yang penting ialah bahwa impedansi masukan EVM ini sangat tinggi, biasanya lebih dari $50 \text{ M}\Omega$, sehingga rangkaian yang diukur tidak dibebani dan tegangan yang dibaca mendekati nilai sejati tegangan yang diukur.

Voltmeter Digital

Voltmeter digital mempunyai tahanan/impedansi masukan yang tinggi sehingga memberikan presisi yang lebih baik. Banyak voltmeter digital yang mampu melakukan pengukuran dalam jangkauan yang luas.

Contoh 1:

Kita hendak mengukur tegangan pada titik A dan B. Pada rangkaian , sebagaimana terlihat pada gambar, diberikan tegangan tetap 100 V. Ada dua meter yang tersedia untuk pengukuran: sebuah volt-ohmmeter kecil dengan impedansi dalam 100.000Ω dan jangkauan 100 V, dan sebuah EVM dengan impedansi masukan $17 \text{ M}\Omega$.

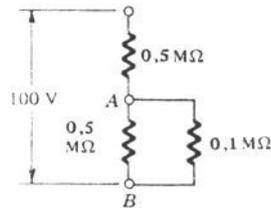


Bandingkan kesalahan dalam pengukuran untuk masing-masing piranti diatas!

Penyelesaian

Tegangan sejati adalah 50 V.

a. Dengan volt-ohmmeter dihubungkan dengan rangkaian itu akan didapat :



dan tegangan pada A dan B ialah :

$$E_{AB} = I \cdot R_{AB}$$

$$E = I \cdot R_{tot}$$

$$I = E/R_{tot} \qquad R_{tot} = \text{tahanan total pada E (100 V)}$$

- Tahanan Pada A dan B, R_{AB} (tahanan 0,5 MΩ paralel dengan tahanan 0,1 MΩ):

$$1/R_{AB} = (1/0,5) + (1/0,1)$$

$$R_{AB} = \frac{1}{\frac{1}{0,5} + \frac{1}{0,1}}$$

- Tahanan total (tahanan 0,5 MΩ seri dengan tahanan R_{AB}) :

$$\begin{aligned} R_{tot} &= R_{AB} + 0,5 \\ &= 1/[(1/0,5)+(1/0,1)] + 0,5 \end{aligned}$$

- Arus yang mengalir, I :

$$I = E / R_{tot}$$

- Tegangan pada A dan B, E_{AB} :

$$\begin{aligned} E_{AB} &= I \cdot R_{AB} \\ &= \frac{E \cdot R_{AB}}{R_{tot}} \end{aligned}$$

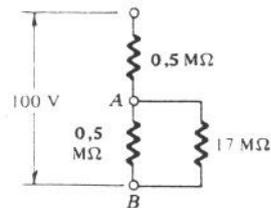
maka :

$$E_{AB} = 100 \frac{1/[(1/0,5) + (1/0,1)]}{1/[(1/0,5) + (1/0,1)] + 0,5}$$

$$E_{AB} = 100 \frac{0,0833}{0,0833 + 0,5} = 14,3 \text{ V}$$

atau kesalahan -71%

- Dengan EVM dihubungkan dengan rangkaian itu didapat :



dengan cara yang sama maka tegangan pada A dan B ialah :

$$E_{AB} = 100 \frac{1/[(1/0,5) + (1/17)]}{1/[(1/0,5) + (1/17)] + 0,5}$$

$$E_{AB} = 100 \frac{0,4875}{0,4875 + 0,5} = 49,27 \text{ V}$$

atau kesalahan sebesar -1,46%

Soal latihan

1. Nyatakan perbedaan antara penyajian sinyal secara analog dan secara digital?
2. Apakah perbedaan antara elektrodinamometer dengan meter D'Arsonval?
Apakah kelebihanya terhadap meter D'Arsonval?
3. Apakah perbedaan antara pengukuran arus bolak-balik dengan arus searah?
4. Bagaimana mengukur arus frekuensi tinggi?
5. Dalam hal apakah voltmeter-elektrostatik digunakan?
6. Bagaimana mengubah ammeter menjadi voltmeter?
7. Apakah kelebihan dari instrumen digital?
8. Mengapa EVM berguna untuk pengukuran listrik?
9. Meter dasar pada gambar 2 dirancang sehingga :
 $B = 1 \text{ Wb/m}^2$
 $L = 0,1 \text{ m}$
 $K = 1 \text{ N/m}$
 - a. Berapakah defleksi x yang terjadi bila arus searah 4 A mengalir melalui meter itu?
 - b. Tentukan persamaan untuk $x(t)$ jika $i(t) = 2 \cos t \text{ A}$.

BAB III

DETEKTOR-TRANSDUSER

Singgungan/kontak pertama dari alat ukur dengan besaran yang akan diukur dilakukan oleh elemen pendeteksi tingkat awal. Proses ini biasanya diikuti oleh proses dimana input segera di robah ke bentuk analog.

Detektor mengindera input informasi, dan *transduser* menjadikannya ke dalam bentuk yang lebih mudah untuk diproses selanjutnya. Efisiensi transfer menyatakan perbandingan piranti tingkat pertama ini :

$$\text{Efisiensi transfer} = I_{out} / I_{in}$$

dimana : I_{out} = informasi yang dilepaskan oleh alat pungut

I_{in} = informasi yang diterima oleh alat pungut

Klasifikasi Piranti Tingkat pertama

Tingkat satu instrumentasi bisa mempunyai variasi perbedaan dasar yang kompleks, tergantung atas jumlah operasi yang dilakukan. Oleh karena itu piranti tingkat pertama diklasifikasikan sebagai berikut:

Kelas I : elemen tingkat pertama yang digunakan hanya untuk detektor

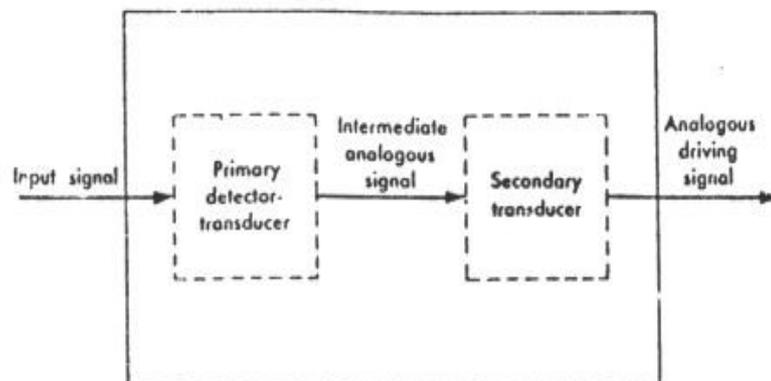
Kelas II : elemen tingkat pertama yang digunakan sebagai detektor dan transduser tunggal.

Kelas III : elemen tingkat pertama yang digunakan sebagai detektor dengan dua tingkat transduser.

Tingkat pertama secara umum bisa dilihat pada gambar 3.

Tingkat satu instrumentasi bisa saja mempunyai konstruksi sederhana, yang terdiri dari tidak lebih dari spindel mekanik atau komponen yang bersinggungan untuk meneruskan sinyal ke transduser sekunder. Atau bisa saja terdiri dari rakitan elemen yang kompleks. Namun secara umum, detektor-transduser primer adalah kesatuan yang berfungsi sebagai (1) secara selektif mengindera sejumlah ukuran, (2) memproses informasi yang diindera kedalam bentuk yang

bisa diterima oleh operasi tingkat dua. Piranti ini tidak menghasilkan keluaran dalam bentuk yang bisa langsung dipakai.



Gambar 3. Diagram blok piranti tingkat pertama dengan transduser primer dan sekunder.

Dalam banyak kasus, perpindahan/anjakan dalam output piranti mekanik atau hidropneumatik menjadi input piranti listrik. Hal ini merupakan kombinasi dimana piranti mekanik sebagai detektor-transduser primer, piranti listrik sebagai transduser sekunder, dan anjakan sebagai bentuk sinyal antara.

Komponen Mekanik Sebagai Detektor Primer

Komponen elastik digunakan untuk merubah gaya menjadi anjakan. Ada banyak bentuk yang bisa dipilih, namun pada prinsipnya komponen tersebut termasuk pada salah satu atau kombinasi kategori berikut : (1) tarikan atau kompresi langsung, (2) lenturan, (3) torsi.

Pengaturan mikrometer atau *dial gages* (sukat dial) sering digunakan pada pengukuran defleksi (lendutan), namun elemen transduser listrik juga bisa digunakan. *Strain gages* (sukat regangan) bisa digunakan sebagai transduser sekunder untuk mengukur defleksi.

Meter torsi sering menggunakan komponen torsi elastis. Komponen terpuntir sesuai dengan besarnya torsi yang diberikan ketika digunakan mengukur torsi.

Banyak piranti pengukur tekanan menggunakan komponen elastis dalam berbagai tipe. Gaya pada diafragma, atau tabung Bourdon pada dasarnya adalah deformasi elastis yang akan dihasilkan oleh gaya karena tekanan.

Manometer juga termasuk piranti elastis dimana defleksinya proporsi terhadap gaya.

Pada piranti pengukuran tekanan, sebagaimana pengukuran gaya, anjakan mekanik biasanya kecil, sehingga transduser sekunder mesti digunakan bersama-sama dengan piranti tingkat dua untuk memberikan keluaran yang bisa terbaca.

Elemen transduser mekanik lainnya yang banyak digunakan dalam alat ukur diberikan oleh inersia dari konsentrasi massa. Dalam bentuk *accelerometer*, akan mengukur karakteristik gerakan dinamik, yaitu anjakan, kecepatan, percepatan dan frekwensi dengan memakai prinsip hukum Newton tentang gerak.

Deteksi temperatur didasarkan atas perbedaan ekspansi pada dua material yang berbeda, seperti pada termometer sederhana atau pada termometer strip-bimetal. Atau temperatur bisa ditentukan oleh sifat termoelektrik bahan, misalnya pada termometer tahanan dan termokopel.

Elemen Transduser Listrik

Sebagian besar elemen listrik tingkat satu berfungsi juga sebagai transduser sekunder. Umumnya elemen ini merubah gerakan mekanik menjadi tegangan listrik. Besaran yang diukur pertama-tama diukur dan ditransdusikan ke anjakan dengan elemen mekanik, kemudian elemen listrik bertindak sebagai transduser sekunder, merubah anjakan analog menjadi tegangan atau arus analog. Pada dasarnya perubahan listrik yang terjadi bisa berupa resistif (bentuk tahanan), induktif, kapasitif dsb, yang akan menghasilkan perubahan tegangan dan arus.

Elemen listrik yang digunakan pada pengukuran mekanik mempunyai keuntungan-keuntungan :

1. Penguatan atau pelemahan mudah dilakukan.
2. Efek inersia massa minimum.
3. Efek gesekan minimum.
4. Output dengan daya yang cukup untuk bagian kendali bisa diberikian.
5. Indikasi atau perekaman jarak jauh memungkinkan.

6. Transduser biasanya mudah dibikin dalam ukuran kecil.

Elemen Transduser Tahanan Variabel

Tahanan konduktor listrik bisa dirumuskan:

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

dengan : R = tahanan, ohm

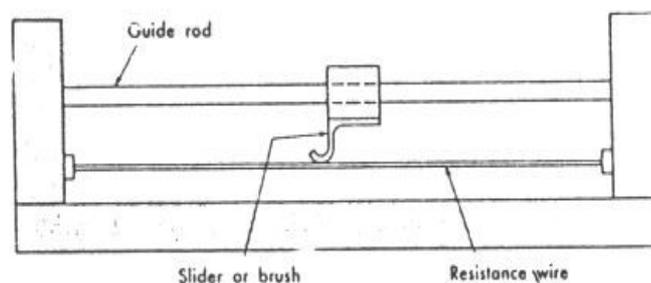
L = panjang konduktor, cm

A = luas penampang konduktor, cm^2

ρ = resistifitas bahan, ohm-cm

Piranti Kontak Luncur

Piranti kontak luncur adalah jenis transduser tahanan variabel. Tahanan Kontak Luncur merubah anjakan mekanik menjadi keluaran listrik, baik tegangan ataupun arus. Perubahan tahanan didapatkan dari perubahan panjang efektif konduktor, L . Beberapa bentuk elemen tahanan listrik yang digunakan adalah dengan sebuah *contactor* (penghubung) atau sikat yang tetap terhubung secara listrik ketika ia bergerak. Bentuk yang paling sederhana, piranti terdiri dari kawat tahanan yang dibentangkan dan sebuah peluncur seperti yang terlihat pada gambar 4.

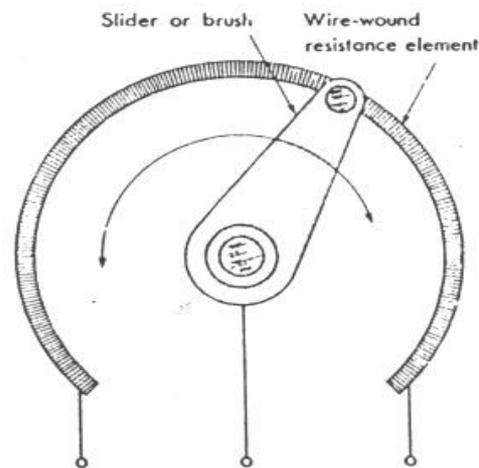


Gambar 4. Tahanan variabel yang terdiri dari sebuah kawat dan *kontaktor* atau sikat yang bisa bergerak. Alat ini sering disebut *slide wire*.

Tahanan efektif yang ada antara ujung kawat dengan sikat merupakan pengukuran anjakan mekanik.

Bentuk yang lebih umum adalah dengan melilitkan kawat tahanan pada sebuah batang. Lilitan tidak boleh terlalu dekat untuk mencegah hubungan pendek. Sikat akan bergeser dari satu lilitan ke lilitan lainnya. Tahanan ini

disebut *potensiometer tahanan* atau hanya potensiometer. Lilitan kawat bisa lingkaran atau lurus. Gambar 5 memperlihatkan potensiometer dengan gerakan sudut/melingkar.



Gambar 5. Tahanan variabel gerakan angular, atau potensiometer.

Tahanan Kawat Strain Gage

Pada piranti jenis ini, tahanan kawat dipengaruhi oleh *strain gage* (regangan). Kawat disatukan kepada gage regangan dan ketika kawat menjadi bertambah panjang karena regangan (misalnya regangan tarik), diameter kawat berkurang dan panjangnya bertambah. Perubahan dimensi kawat akan merubah resistivitasnya.

Thermistor

Thermistor adalah resistor/tahanan variabel yang sensitif terhadap panas. Resistor terbuat dari bahan sejenis keramik seperti mangan oksida, dan kobalt yang mempunyai resistivitas antara 100 hingga 450.000 ohm-cm.

Ada dua dasar penggunaan piranti ini: (1) sebagai elemen pendeteksi suhu yang digunakan untuk mengindera perubahan suhu yang bertujuan untuk pengukuran atau kendali, dan (2) sebagai piranti pengindera daya listrik dimana temperatur thermistor sebagai fungsi daya yang dilepaskan oleh peralatan.

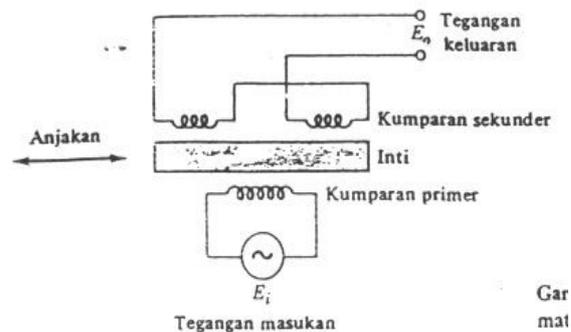
Thermokopel

Jika dua logam bersinggungan, gaya elektromotif timbul dimana besarnya adalah fungsi beberapa faktor termasuk *temperatur*. Pertemuan logam seperti ini yang digunakan untuk mengukur temperatur disebut *termokopel*.

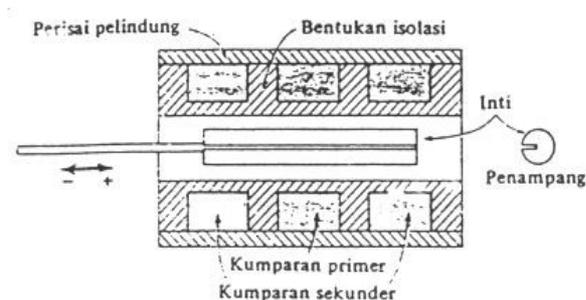
Karena ukurannya yang kecil, kehandalannya dan jangkauan kegunaannya yang luas, termokopel menjadi elemen primer yang sangat penting.

Transformator Diferensial (LVDT)

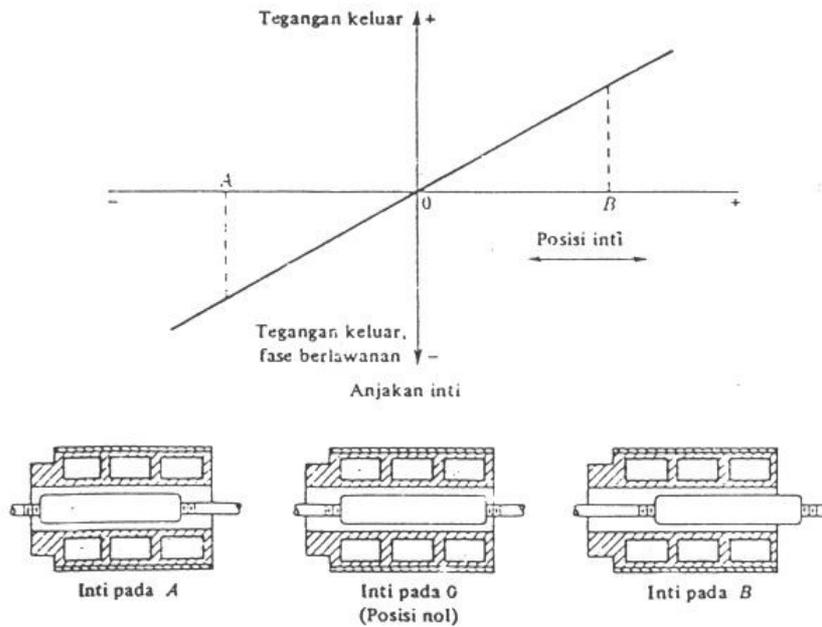
Gambar 55 adalah skema transformator diferensial (*differential transformer*). Tiga buah kumparan disusun secara linier dengan inti magnet yang dapat digerakkan secara bebas. Gerakan inti bisa dilihat lebih jelas pada gambar 56. Suatu tegangan masukan bolak-balik diberikan ke kumparan tengah, dan tegangan keluaran dari kedua kumparan ujung bergantung pada perpasangan magnet antara inti dan kumparan. Jadi tegangan keluaran piranti merupakan petunjuk anjakan dari inti. Selama inti berada di sekitar pusat susunan kumparan, keluarannya akan linier seperti terlihat pada gambar 57. Apabila piranti beroperasi pada daerah linier, piranti disebut *transformator diferensial variabel linier* (LVDT). Di dekat posisi nol terdapat kondisi tak linier seperti terlihat pada gambar 58.



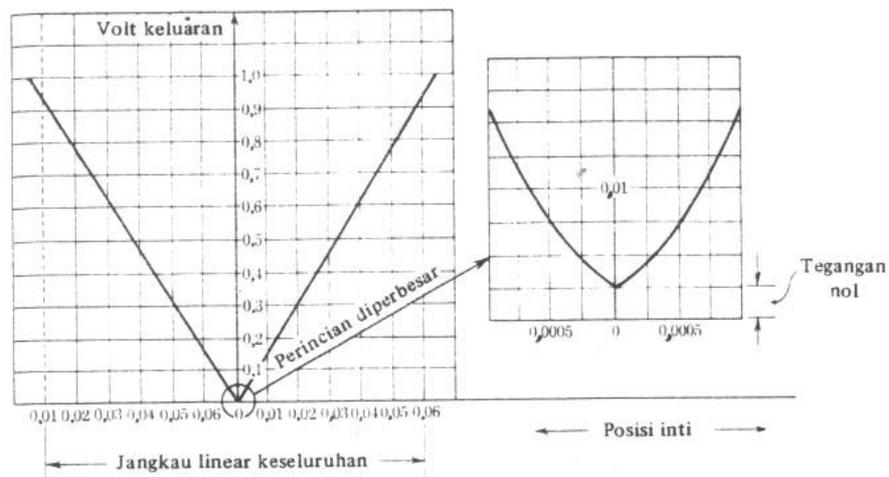
Gambar 55. Diagram skema transformator diferensial.



Gambar 56. Konstruksi transformator diferensial variabel linier (*linear differential transformer, LVDT*).



Gambar 57. Karakteristik keluaran sebuah LVDT.



Gambar 58. Grafik V untuk suatu LVDT menunjukkan perangai yang agak tak-linier di daerah nol.

Respon frekuensi LVDT dibatasi terutama oleh karakteristik inersia (kelembaman) piranti tersebut. Pada umumnya, frekwensi tegangan yang diberikan besarnya harus 10 kali respon frekwensi yang dikehendaki.

Transduser Kapasitif

Gambar 59 memperlihatkan skema transduser kapasitif. Kapasitans diberikan oleh persamaan:

$$C = 0,22\varepsilon \frac{A}{d}$$

dengan : C = kapasitansi, pF

d = jarak antar pelat

A = luas tumpang-tindih, in²

ε = konstanta dielektrik ($\varepsilon = 1$ untuk udara, $\varepsilon = 3$ untuk plastik)

Nilai konstanta 0,0885 bila luas dalam senti meter persegi dan jarak dalam sentimeter.

Susunan pelat dapat digunakan untuk mengukur jarak d melalui perubahan kapasitansi. Perubahan kapasitansi bisa juga sebagai fungsi perubahan luar bidang tumpang tindih A dari gerakan relatif pelat pada arah lateral atau perubahan konstanta dielektrik bahan diantara kedua pelat tersebut. Impendansi keluaran kapasitor diberikan oleh persamaan:

$$Z = \frac{1}{2\pi fC}$$

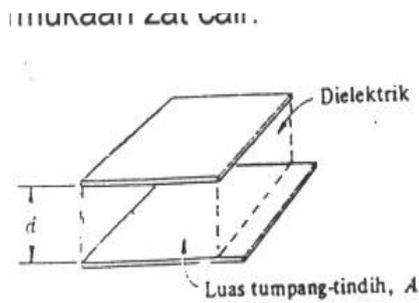
dengan: Z = impedansi, ohm

f = frekwensi, Hz

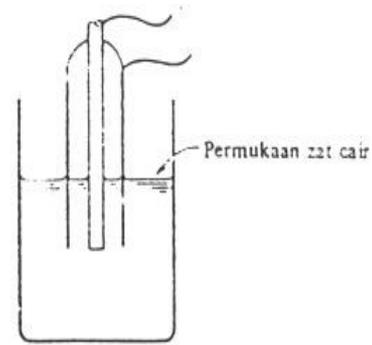
C = kapasitansi, F

Pada umumnya impedansi keluaran transduser kapasitif tinggi.

Transduser kapasitif dapat juga digunakan untuk pengukuran anjakan melalui perubahan jarak pisah d atau perubahan luas pelat. Alat ini banyak digunakan untuk pengukuran tinggi permukaan zat cair seperti terlihat pada gambar 60. Dua buah elektrode disusun seperti pada gambar, dan konstanta dielektrik diantara kedua elektrode itu berubah menurut tinggi permukaan zat cair. Jadi kapasitansi antara kedua elektrode memberikan petunjuk langsung mengenai tinggi permukaan zat cair.



Gambar 59. Skema transduser kapasitif.



Gambar 60. Penggunaan transduser kapasitif untuk pengukuran tinggi permukaan zat cair.

Contoh 1:

Sebuah transduser kapasitif terbuat dari dua buah pelat 1 in² yang terpisah pada jarak 0,01 in oleh udara. Hitunglah kepekaan anjakan susunan demikian. Konstanta dielektrik udara ialah : 1,0006.

Jawab

Kepekaan, S, didapat dengan mendiferensialkan persamaan Kapasitansi:

$$S = \frac{\partial C}{\partial d} = - \frac{0,255\epsilon A}{d^2}$$

Jadi :

$$S = - \frac{(0,255)(1,0006)(1)}{(0,01)^2} = - 2,25 \times 10^3 \text{ pF/in}$$

Transduser Piezoelektrik

Gambar 61 adalah skema efek piezoelektrik. Kristal piezoelektrik ditempatkan diantara kedua pelat elektrode. Bila kedua pelat diberi gaya, kristal akan mendapat tegangan dan mengalami deformasi. Dengan kristal-kristal tertentu deformasi ini akan mengakibatkan timbulnya beda potensial pada permukaan kristal dan pengaruhnya disebut *efek piezoelektrik*. Muatan induksi pada kristal diperoleh dari persamaan :

$$Q = d \cdot F$$

dengan : Q = muatan listrik, coulomb

F = gaya, newton

d = konstanta piezoelektrik

Tegangan keluaran kristal :

$$E = g t p$$

dengan : E = tegangan

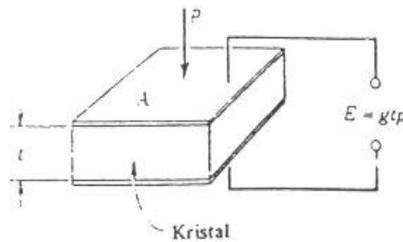
t = tebal kristal, m

p = tekanan, N/m^2

g = kepekaan tegangan

Kepekaan tegangan diberikan oleh persamaan :

$$g = d/\epsilon$$



Gambar 61. Efek piezoelektrik.

Nilai konstanta piezoelektrik dan kepekaan tegangan untuk berbagai bahan piezoelektrik diberikan pada tabel 1.

Tabel 1. Konstanta piezoelektrik.

Bahan	Orientasi	Kepekaan muatan d , $\frac{C/m^2}{N/m^2}$	Kepekaan tegangan g , $\frac{V/m}{N/m^2}$
Kuarsa	Potongan X; panjang di sepanjang Y longitudinal	$2,25 \times 10^{-12}$	0,055
	Potongan X; tebal longitudinal	-2,04	-0,050
Garam Rochelle	Potongan Y; geser ketebalan	4,4	-0,108
	Potongan X 45°; panjang longitudinal	435,0	0,098
	Potongan Y 45°; panjang longitudinal	-78,4	-0,29
Amonium dihidrogen fosfat	Potongan Z 0°; geser muka	48,0	0,354
	Potongan Z 45°; panjang	24,0	0,177

Keramik barium titanat komersial	longitudinal Ke polarisasi Ke polarisasi	130 - 160 -56,0	0,0106 0,0042 - 0,0053
----------------------------------	--	--------------------	---------------------------

Contoh 2:

Sebuah kristal piezoelektrik yang tebalnya 2 mm dan mempunyai kepekaan tegangan 0,055 V-m/N diberi tekanan 200 psi. Hitunglah tegangan keluarannya.

Jawab

Diketahui :

$$p = (200)(6,895 \times 10^3) = 1,38 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$t = 2 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Jadi :
$$E = (0,055)(2 \times 10^{-3})(1 \times 10^6)$$

$$= 151,8 \text{ V}$$

Efek Fotoelektrik

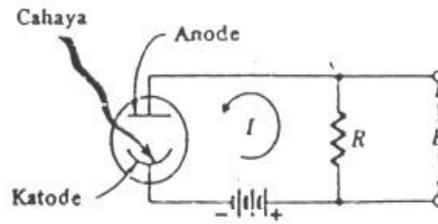
Transduser fotoelektrik mengubah berkas cahaya menjadi sinyal listrik yang berguna. Skema efek fotoelektrik bisa dilihat pada gambar 62. Cahaya menimpa sebuah katode fotoemisif dan membebaskan elektron, yang ditarik kearah anode, dan dengan demikian menyebabkan arus listrik mengalir didalam rangkaian luar. Katode dan anode dikurung dalam sampul gelas atau kwarsa yang dihampakan, atau kalau tidak, diisi gas lembam atau gas mulia. Kepekaan atau sensitifitas dirumuskan:

$$I = S \Phi$$

dengan : I = arus fotoelektrik

Φ = eliminasi katode

S = kepekaan



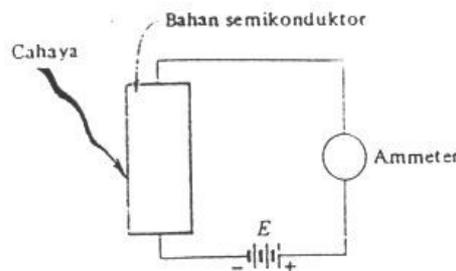
Gambar 62. Efek fotoelektrik.

Kepekaan biasanya dinyatakan dalam satuan ampere per watt atau ampere per lumen.

Respon tabung fotoelektrik terhadap panjang gelombang cahaya yang berbeda dipengaruhi oleh : (1) karakteristik transmisi sampul tabung gelas dan (2) karakteristik fotoemisif bahan katode. Beberapa bahan bisa menanggapi panjang gelombang cahaya dalam jangkauan 0,2 sampai 0,8 μm . Tabung-tabung fotoelektrik sangat berguna dalam pengukuran intensitas cahaya.

Transduser Fotokonduktif

Gambar 63 memperlihatkan skema transduser fotokonduktif. Bila cahaya menimpa bahan semikonduktor, terdapat penurunan tahanan, dan hal itu menyebabkan terjadinya peningkatan arus yang akan terbaca pada meter.



Gambar 63. Skema transduser fotokonduktif.

Responsivitas atau ketanggapan (*responsivity*) R_v suatu detektor didefinisikan oleh:

$$R_v = \frac{\text{apk (rms) tegangan keluaran}}{\text{apk (rms) daya yang menimpa detektor}}$$

Daya setara derau (noise equivalent power, NEP) didefinisikan sebagai masukan radiasi minimum yang dapat menghasilkan rasio sinyal-terhadap-derau sebesar satu. *Detektivitas* (detectivity) D didefinisikan sebagai:

$$D = \frac{Rv}{apk \text{ derau-tegangan keluaran sel}}$$

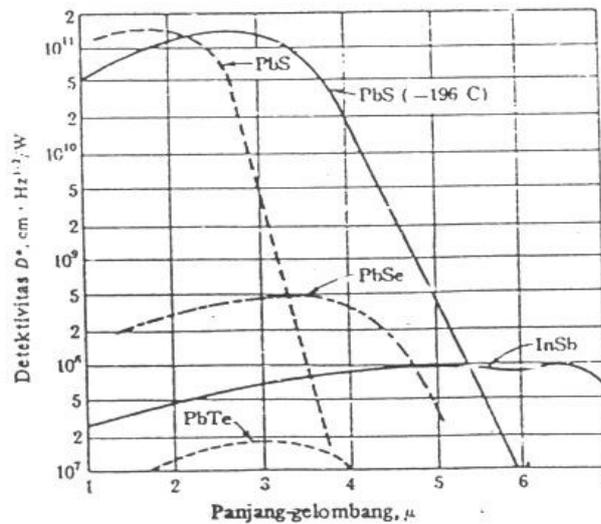
Detektivitas adalah kebalikan dari NEP. Detektivitas-dinormalisasi D^* didefinisikan sebagai :

$$D^* = (A \Delta f)^{1/2} D \quad \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$$

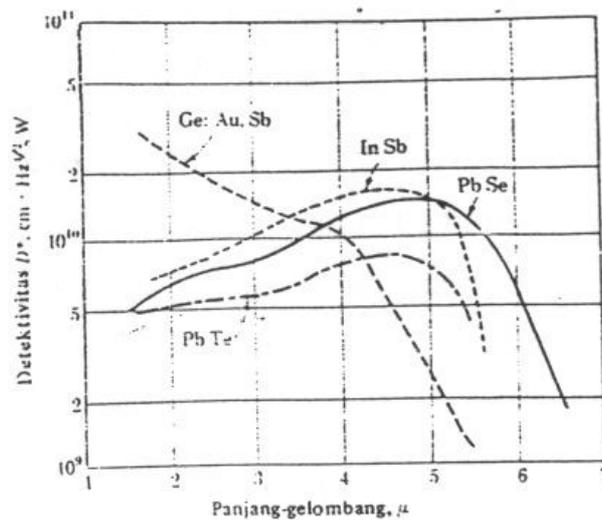
dengan : A = luas detektor

Δf = lebar-pita setara derau

Hasil ini digunakan untuk memeriksa hasil unjuk kerja detektor sehingga luas permukaan dan lebar pita tertentu tidak akan mempengaruhi hasil. Gambar 64 dan 65 memberikan ilustrasi tentang hasil unjuk beberapa detektor fotokonduktif dalam suatu jangkauan panjang gelombang.



Gambar 64. Respon-spektra absolut berbagai detektor khas pada suhu ruang.



Gambar 65. Respon-spektra absolut detektor khas yang didinginkan sampai suhu nitrogen cair.

Sel timbal sulfida banyak digunakan untuk deteksi termal dalam panjang gelombang 1 sampai 3 μm . Detektor *indium-antimonida* bisa digunakan untuk mendeteksi panjang gelombang yang lebih besar.

Contoh 3

Hitunglah radiasi yang menimpa pada 2 μm yang diperlukan untuk menghasilkan rasio sinyal-dan-derau (signal-to-noise, S/N) sebesar 40 dB dengan detektor timbal sulfida pada suhu kamar; luas bidang 1 mm^2 .

Jawab

$$D^* = (A \Delta f)^{1/2} \frac{E_0}{E_{\text{derau}}} \frac{1}{P_{\text{menimpa}}} \quad (a)$$

Dari gambar 64 : $D^* = 1,5 \times 10^{11} \text{ cm.Hz}^{1/2}/\text{W}$ untuk $\Delta f = 1 \text{ Hz}$. Untuk rasio S/N = 40 dB, kita dapat :

$$40 = 20 \log \frac{E_0}{E_{\text{derau}}}$$

sehingga : $\frac{E_0}{E_{\text{derau}}} = 100$

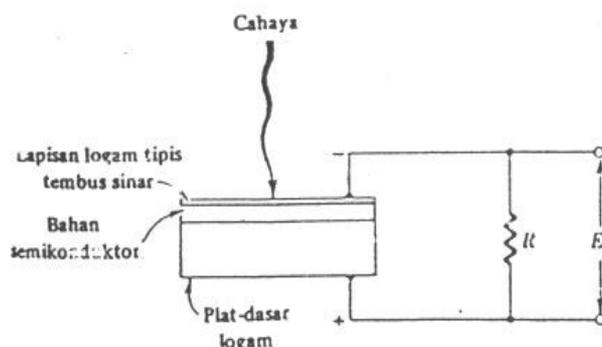
Dengan menggunakan $A = 10^{-2} \text{ cm}^2$, persamaan (a) menghasilkan :

$$1,5 \times 10^{11} = \frac{(10^{-2})^{1/2} (1) (100)}{P_{\text{menimpa}}}$$

Jadi, $P_{\text{menimpa}} = 6,7 \times 10^{-11} \text{ W}$

Sel Fotovoltaik

Prinsip sel fotovoltaik digambarkan pada gambar 66. Terdapat suatu konstruksi berlapis yang terdiri dari plat dasar logam, sebuah bahan semikonduktor, dan suatu lapisan tipis logam transparan.



Gambar 66. Diagram skema sel fotovoltaik.

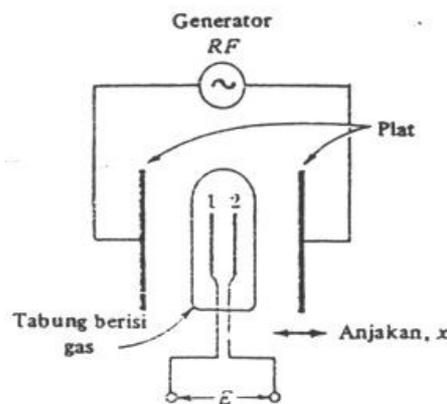
Bila sinar menimpa sekat antara lapisan logam transparan dan semikonduktor, maka akan terbangkitlah suatu tegangan listrik seperti terlihat pada gambar. Keluaran dari piranti ini akan tergantung dari beban R . Penggunaan yang luas dari sel fotovoltaik ini adalah sebagai fotometer untuk menentukan penyinaran dalam fotografi.

Transduser Ionisasi

Gambar 67 adalah skema transduser ionisasi. Tabung berisi gas pada tekanan rendah, sedangkan generator RF memberikan medan pada gas tersebut. Karena medan, maka terjadi pembuangan muatan sambil berpijar atau lucutan pijar (glow discharge), dan beda potensial dalam plasma gas dideteksi oleh elektrode 1 dan 2. Beda potensial, E , tergantung dari jarak pisah elektrode dan perpasangan kapasitif antara plat-plat RF dan gas. Bila tabung ditempatkan ditengah-tengah diantara pelat, potensial kedua elektrode akan sama, tetapi bila tabung beranjak dari tengah, akan terjadi beda potensial arus searah.

Kumparan-Cari Magnetometer

Skema kumparan cari magnetometer terlihat pada gambar 68. Sebuah kumparan rata dengan N lilitan ditempatkan di dalam medan magnet seperti gambar. Panjang kumparan adalah L , dan luas penampang A (m^2). Kekuatan medan magnet magnet ialah H (ampere per meter), dan kerapatan fluks magnet B (weber per meter persegi) pada arah menurut gambar.



Gambar 67. Diagram skema transduser anjakan ionisasi.

Fluks magnet dirumuskan :

$$B = \mu H$$

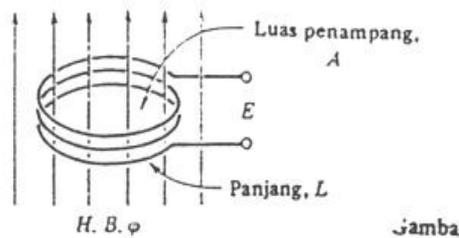
dengan : μ = permeabilitas magnet. (μ untuk ruang bebas = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m)

Tegangan keluaran pada kumparan :

$$E = N A \cos \alpha \frac{dB}{dt}$$

dengan : α = sudut yang dibentuk oleh arah medan magnet dan garis tegak-lurus terhadap bidang kumparan.

N = jumlah lilitan



Gambar 68. Skema sebuah kumparan cari magnetometer.

Fluks total :

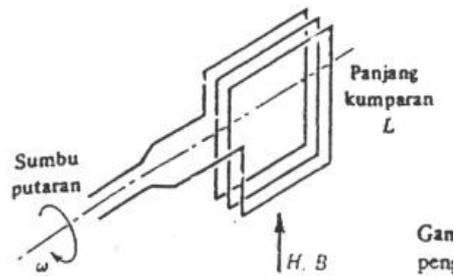
$$\phi = A \cos \alpha B \quad \text{weber}$$

sehingga :

$$E = N \frac{d\phi}{dt}$$

Terlihat bahwa harga tegangan, E , bergantung kepada harga perubahan medan magnet. Karena itu kumparan cari merupakan transduser yang mentransformasikan sinyal medan magnet menjadi tegangan listrik.

Untuk dapat melakukan pengukuran medan magnet stedi, diperlukan suatu gerakan pada kumparan-cari. Suatu cara yang khas adalah penggunaan kumparan berputar seperti terlihat pada gambar 69.



Gambar 69. Penggunaan kumparan-cari putar untuk pengukuran medan magnet steady.

Nilai tegangan apk (rms) piranti diatas adalah :

$$E_{apk} = \frac{1}{\sqrt{2}} NAB\omega$$

dengan : ω = kecepatan sudut putaran.

Contoh 4:

Sebuah kumparan cari putar mempunyai 10 lilitan dengan luas penampang 5 cm². Kecepatan putaran ialah 100 rpm. Tegangan keluaran adalah 40 mV. Hitunglah kekuatan medan magnet!

Jawab

$$B = \frac{\sqrt{2E_{apk}}}{NA\omega} = \frac{\sqrt{2(0,04)}}{(10)(5 \times 10^{-4})[(100)(2\pi) / 60]}$$

$$= 1,08 \text{ Wb/m}^2$$

$$H = B/\mu = 1,08/(4\pi \times 10^{-7})$$

$$= 8,6 \times 10^5 \text{ A/m}$$

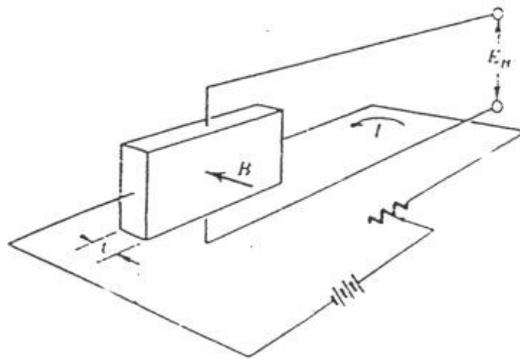
Transduser Efek-Hall

Gambar 70 memperlihatkan prinsip efek-Hall. Sebuah pelat semikonduktor yang tebalnya t dihubungkan dengan arus luar I yang mengalir melalui bahan seperti terlihat. Bila pada pelat diberikan medan magnet pada arah tegak lurus

terhadap permukaan pelat tersebut, maka tegangan E_H akan ditimbulkan seperti gambar. Tegangan ini disebut *tegangan Hall* dan dirumuskan dengan:

$$E_H = K_H \frac{IB}{t}$$

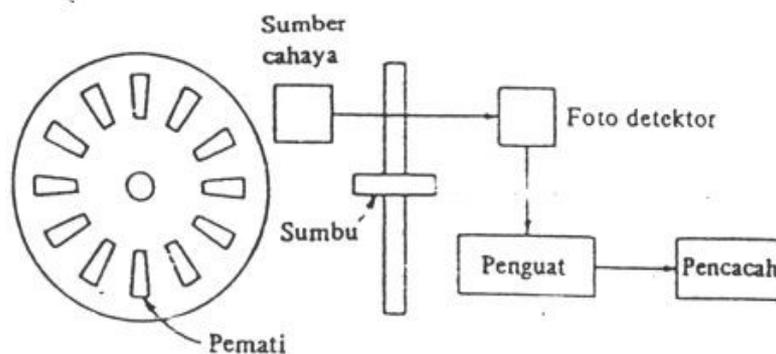
dimana I dalam amper, B dalam gauss, dan t dalam sentimeter. K_H disebut konstanta proporsionalitas atau disebut *Koefisien Hall* dan mempunyai satuan volt-cm per amper-gauss.



Gambar 70. Efek Hall.

Transduser Anjakan Digital

Transduser anjakan digital dapat digunakan untuk pengukuran angular (sudut) maupun linier. Contoh piranti pengukuran sudut diperlihatkan pada gambar 71.

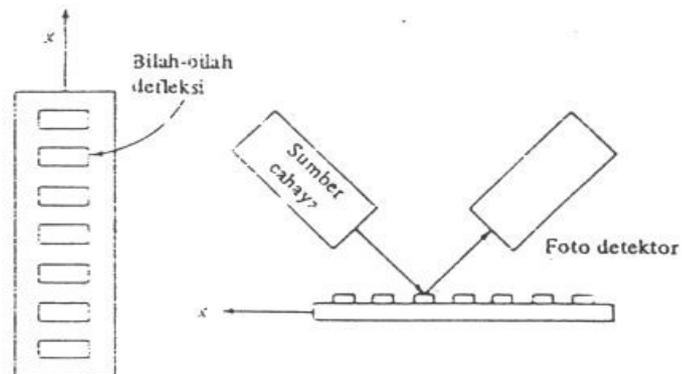


Gambar 71. Transduser digital untuk anjakan sudut.

Bila roda berputar, cahaya dari sumber akan menyala dan mati secara bergantian, sehingga memberikan sinyal digital kepada foto detektor. Sinyal ini

kemudian diperkuat dan dikirim ke pencacah. Jumlah hasil cacahan sebanding dengan kecepatan sudut.

Transduser linier yang bekerja dengan prinsip refleksi ditunjukkan oleh gambar 72. Bilah-bilah kecil yang bersifat refleksi dipasangkan pada piranti gerak. Cahaya dari sumber kemudian dipantulkan dan diserap secara bergantian sesuai dengan gerakan linier dan memberikan sinyal kepada fotodetektor.



Gambar 72. Transduser digital untuk anjakan linier.

Soal Latihan

1. Sebutkan klasifikasi piranti tingkat pertama dari sebuah detektor transduser.
2. Gambarkan diagram blok piranti tingkat pertama dengan transduser primer dan sekunder.
3. Jelaskan prinsip kerja transformator diferensial (LVDT).
4. Mengapa EVM berguna untuk pengukuran listrik ?
5. Jelaskan prinsip kerja transduser ionisasi.
6. Sebuah kumparan cari-putar seperti gambar 69 mempunyai luas bidang nominal 1 cm^2 dengan 50 lilitan kawat berdiameter kecil. Kecepatan putaran nominal 180 rpm. Hitungan tegangan keluaran bila kumparan itu ditempatkan di dalam medan magnet 1 WB/m^2 .

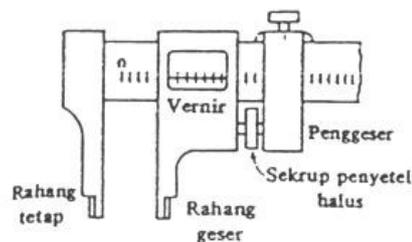
BAB IV

PENGUKURAN ANJAKAN DAN PENGUKURAN LUAS

Pengukuran dimensional dikategorikan sebagai penentuan ukuran benda, sedang *pengukuran anjakan* (displacement measurement) mencakup pengukuran perpindahan dari titik ke titik lain. Pengukuran luas pada suatu bentuk geometri merupakan kombinasi dari berbagai pengukuran dimensional yang relevan, dengan bantuan hubungan analitik yang benar. Penentuan luas suatu bentuk geometri yang tak beraturan biasanya melibatkan integrasi mekanik, grafik atau numerik.

Pengukuran Dimensional

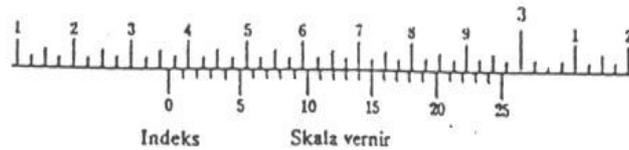
Pengukuran dimensional sederhana dengan ketelitian $\pm 0,01$ in (0,25 mm) dapat dilakukan dengan mistar-logam tukang bubut ataupun mistar kayu yang menggunakan tanda-tanda goresan yang teliti. Untuk pengukuran dimensi besar dapat digunakan pita logam. Kesalahan utama pada piranti pengukur tersebut adalah kesalahan kemampubacaan, pemuaian dan penciutan termal.



Gambar 1. Jangka sorong.

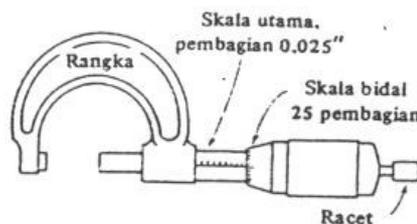
Jangka sorong (vernier caliper) merupakan piranti pengukuran dengan kemampu bacaan yang ditingkatkan. Konstruksi jangka sorong bisa dilihat pada gambar 1, dan skala vernier yang sudah diperbesar bisa dilihat pada gambar 2. Jangka ditempatkan pada benda yang diukur dan penyetel halus diputar hingga rahang jangka terpasang pas pada benda itu. Pertambahan pada skala primer adalah 0,025 in. Skala vernier pada gambar dapat membaca sampai 0,001 in (0,025 mm), sehingga skala itu mempunyai 25 pertambahan yang sama besar (0,001 mm yaitu $1/25$ kali 0,025) dan panjang keseluruhan $24/25$ kali panjang pembagian skala primer. Akibatnya skala vernier tidak persis segaris dengan

skala primer, dan rasio angka segaris terakhir pada vernier terhadap panjang total vernier akan sama dengan fraksi keseluruhan pembagian skala skala primer yang ditunjukkan oleh posisi indeks. Dalam contoh gambar 2, bacaannya menjadi $2,350 + (14/25)(0,025) = 2,364$ in.



Gambar 2. Skala vernier diperbesar.

Kaliper *mikrometer* pada gambar 3 adalah piranti pengukur yang lebih presisi daripada jangka sorong. Sebagai pengganti susunan skala vernier, digunakan ulir sekrup yang dikalibrasi, serta pembagian skala melingkar yang menunjukkan bagian traksi pembagian skala utama (primer). Mikrometer dapat dipakai untuk pengukuran dimensi sampai 0,0001 in (0,0025 mm).



Gambar 3. Kaliper mikrometer.

Indikator dial (dial indicator) adalah piranti yang dapat melakukan pembesaran mekanik terhadap anjakan-penunjuk atau pengikut agar dapat melakukan pembesaran kira-kira 0,001 in. Konstruksi indikator adalah mempunyai batang gigi yang dihubungkan dengan batang pengindera anjakan. Batang-batang gigi ini berhubungan dengan pinyon yang pada gilirannya digunakan untuk memberikan penguatan terhadap gerakan itu dengan rangkaian roda gigi. Keluaran bacaan diberikan oleh piring baca bundar (circular dial).

Contoh 1:

Sebuah pita baja 30 m (pada 15 °C) digunakan untuk pekerjaan ukur tanah pada musim panas sehingga suhu pita dibawah sinar matahari ialah 45 °C. Pengukuran menunjukkan $24,567 \pm 0,001$ m. Koefisien pemuaian termal linier ialah $11,65 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ pada 15 °C. Hitunglah jarak sejati yang diukur.

Jawab

Panjang pita yang ditunjukkan merupakan nilai sejati apabila pengukuran dilakukan pada 15 °C. Pada suhu tinggi pita ini memuai sehingga bacaannya lebih kecil. Panjang pita 30 m pada 45 °C sesungguhnya ialah :

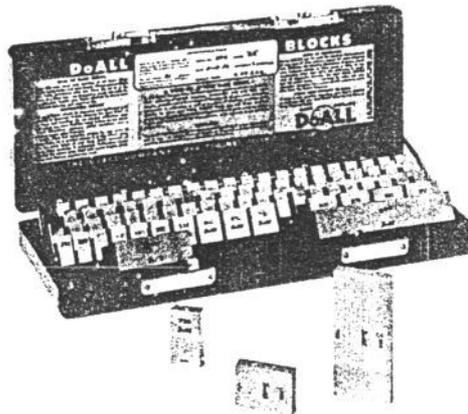
$$L(1 + \alpha \Delta T) = [1 + (11,65 \times 10^{-6})(45 - 15)](30) = 30,010485 \text{ m}$$

Panjang sejati itu terbaca 30 m. Bacaan sejati untuk keadaan dalam soal ini ialah:

$$(24,567)[1 + (11,65 \times 10^{-6})(45 - 15)] = 24,567 \text{ m}$$

Blok Ukur

Blok Ukur (gauge block) merupakan standar untuk pengukuran dimensi. Blok ini berbentuk blok-blok kecil dari baja, ukurannya kira-kira 3/8 x 1 3/8 in, dengan permukaan sejajar yang dipoles mengkilap.



Gambar. Satu set dengan 81 ukur blok.

Tebal blok itu ditentukan menurut toleransi berikut :

Kelas blok	Toleransi, μin *
AA	2
A	4
B	8

* Toleransi untuk blok yang tebalnya kurang dari 1 in; untuk blok yang lebih tebal toleransi diatas adalah untuk per inci.

Blok ukur terdapat dalam jangkauan ketebalan yang memungkinkannya ditumpuk sedemikian rupa sehingga dengan seperangkat 81 buah blok setiap

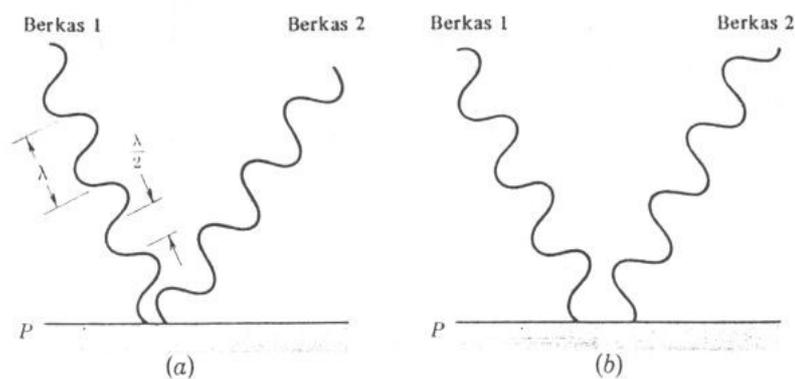
dimensi antara 0,100 dan 8,000 bisa didapatkan dengan penambahan 0,0001 in. Permukaan logam bila disatukan dilakukan dengan cara menggeserkan sambil memberikan tekanan stedi. Permukaan tersebut akan mengalami gaya adhesi sebagai akibat tarikan molekular, dimana gaya adhesi ini mungkin sampai 30 kali lebih besar dari tekanan atmosfer.

Karena ketelitiannya, blok ini digunakan untuk kalibrasi piranti pengukuran dimensional lainnya.

Metode-metode Optik

Pengukuran dengan metode optik untuk mendapatkan ketelitian sangat tinggi didasarkan atas prinsip *interferensi cahaya*. Instrumennya disebut *interferometer* dan digunakan untuk kalibrasi blok ukur dan standar-standar dimensional lainnya.

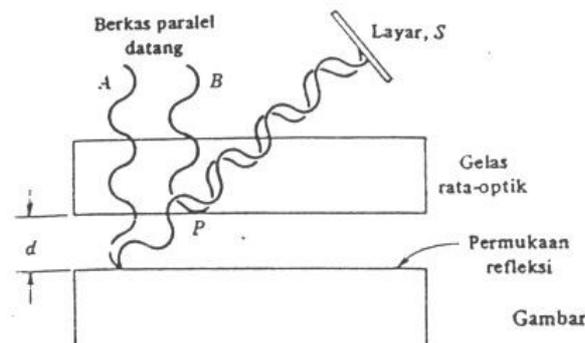
Gambar 4a memperlihatkan kedua berkas cahaya dalam satu fase, sehingga kecerahan pada titik P bertambah jika kedua berkas sinar tersebut berpotongan. Sementara gambar 4b, kedua berkas sinar mempunyai perbedaan fase setengah panjang gelombang sehingga terjadi saling penghapusan, dan gelombang cahaya itu dikatakan *berinterferensi* satu sama lain.



Gambar 4. Prinsip interferensi. (a) Kedua berkas dalam satu fase. (b) kedua berkas berbeda fase.

Perbedaan fase gelombang bisa didapatkan dengan membiarkan dua gelombang cahaya dari satu sumber menempuh lintasan yang berbeda panjangnya. Bila perbedaan jarak merupakan kelipatan bulat dari panjang gelombang maka akan terjadi penguatan gelombang, dan bila perbedaan jarak merupakan kelipatan ganjil dari setengah gelombang maka akan terjadi penghapusan/pelemahan.

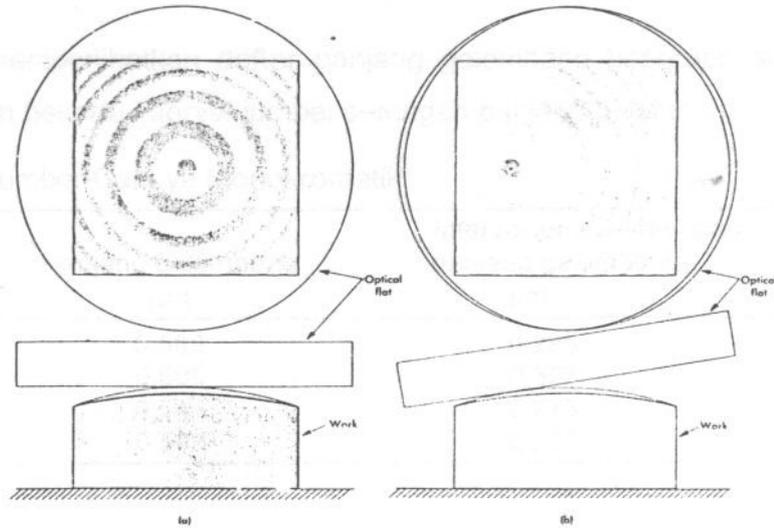
Prinsip ini bisa diterapkan untuk pengukuran dimensional. Pada gambar 5 digambarkan dua buah pelat. Pelat yang satu adalah gelas tanpa regangan, transparan dan dipoles rata dengan ketelitian beberapa mikroiinci. Pelat yang satu lagi adalah permukaan logam yang memantul. Pelat gelas itu disebut *rata optik* (optical flat). Dua berkas cahaya paralel A dan B diproyeksikan pada pelat itu dari suatu sumber yang bersifat kolimasi (*collimating*). Jarak kedua pelat, d , diandaikan sangat kecil. Berkas pantulan A berpotongan dengan berkas datang B pada titik P. Berkas A sudah menempuh jarak yang lebih panjang dari berkas B yaitu sejauh $2d$, akan terjadi interferensi pada titik P jika tambahan jaraknya merupakan kelipatan ganjil dari $\lambda/2$. Jika jarak $2d$ merupakan kelipatan genap $\lambda/2$, berkas pantulan akan memperkuat B. Jadi untuk $2d = \lambda/2, 3\lambda/2$, dan seterusnya, layar S tidak akan mendeteksi suatu cahaya pantulan.



Gambar 5. Penerapan prinsip interferensi.

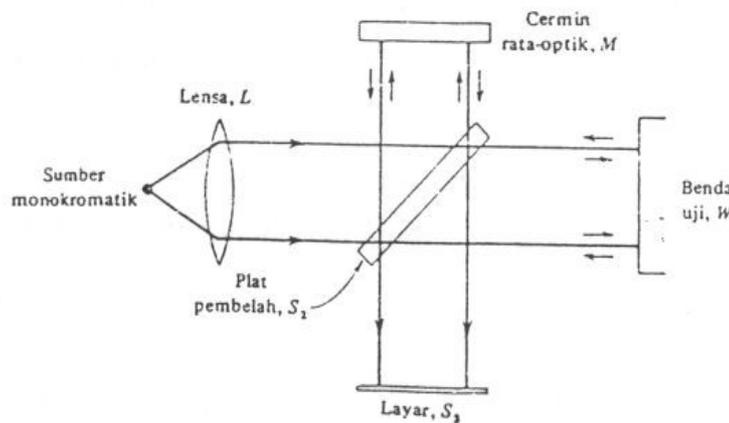
Sekarang jika pelat-pelat itu miring sedikit, sehingga jarak antara kedua pelat itu dapat berubah-ubah, maka berkas cahaya pantulan pada layar akan menampakkan bagian terang dan gelap berselang-seling, menunjukkan adanya variasi dalam jarak pelat. Garis-garis atau daerah-daerah gelap disebut *jumbai* (fringe), dan perubahan jarak pelat antara posisi dua jumbai berhubungan dengan:

$$\Delta(2d) = \lambda/2 \quad (4-1)$$



Gambar. (a) Pola interferensi yang terjadi ketika pelat optik ditempatkan pada permukaan cembung. (b). Pergeseran pola interferensi yang disebabkan oleh pergerakan pelat optik.

Prinsip interferensi merupakan cara yang praktis untuk mengukur cacat-cacat kecil pada permukaan, dan untuk kalibrasi alat ukur. Untuk penggunaan praktis dipakai interferometer seperti gambar 6.



Gambar 6. Skema interferometer.

Cahaya monokromatik dari suatu sumber dikolimasikan oleh lensa L ke pelat pembelah S_2 , yang merupakan cermin berperak setengah yang memantulkan separuh cahaya ke arah cermin rata-optik M, disamping melakukan transmisi ke belahan yang satu lagi menuju benda uji W. Kedua berkas itu direfleksikan kembali dan bergabung lagi pada pelat pembelah S_2 , dan kemudian diteruskan ke layar. Jumbai-jumbai mungkin akan muncul pada layar sebagai akibat perbedaan panjang lintasan optik kedua berkas itu. Jika instrumen dikonstruksi dengan baik, terdapat perbedaan yang disebabkan variasi dimensional benda

uji. Tabel 1 memperlihatkan daftar panjang gelombang beberapa sumber cahaya yang umum beserta interval jumbai setengah panjang gelombang.

Tabel 1. Sumber Cahaya Monokromatik.

Sumber	Panjang gelombang μm	Interval jumbai setengah- panjang gelombang, μm
Helium	0,589	0,295
Krypton 86	0,606	0,303
Raksa 198	0,546	0,273
Natrium	0,598	0,299

Contoh 2:

Suatu sumber cahaya raksa menggunakan penyaring hijau sehingga panjang gelombangnya ialah 5460 Å. Cahaya ini dikolimasikan dan diarahkan kedua permukaan miring seperti gambar 5. Kedua permukaan itu berada pada kontak presisi pada salah satu ujungnya. Antara titik kontak dan jarak 3,000 inci diamati ada lima jumbai interferensi. Hitunglah jarak pisah antara dua permukaan dan sudut kemiringan pada posisi ini.

Jawab :

Kelima garis jumbai menunjukkan $\lambda/2, 3\lambda/2, \dots, 9\lambda/2$; artinya,

$$2d = 9\lambda/2$$

Diketahui : $\lambda = 5460 \times 10^{-8} \text{ cm} = 2,15 \times 10^{-5} \text{ in}$, sehingga

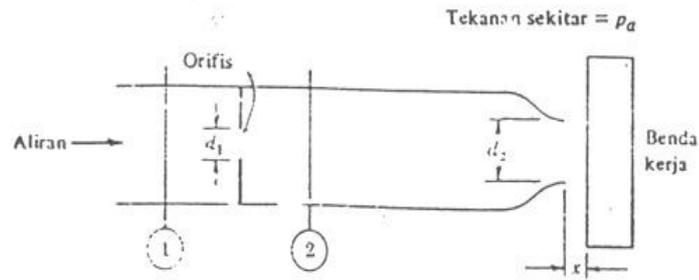
$$d = (9/4)(2,15 \times 10^{-5}) = 48,4 \mu\text{in}$$

Sudut kemiringan ialah :

$$\phi = \tan^{-1} \frac{48,4 \times 10^{-6}}{3,000} = \frac{48,4 \times 10^{-6}}{3,000} = 16,1 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

Pengukur Anjakan Pneumatik

Seperti diperlihatkan gambar 7, udara tersedia pada tekanan p_1 . Aliran melalui orifis atau lubang kecil dan melalui lubang keluar dengan diameter d_2 ditentukan oleh jarak pisah x antara lubang keluar dan benda kerja. Perubahan aliran karena perubahan x ditunjukkan oleh perubahan tekanan p_2 di hilir orifis.



Gambar 7. Piranti anjakan pneumatik.

Untuk analisa, andaikan aliran adalah tak-mampu-mampat (incompressible). Aliran volumetrik melalui orifis dinyatakan dengan :

$$Q = CA\sqrt{\Delta p} \quad (4-2)$$

dimana : C = koefisien buang (discharge coefficient)

A = luas aliran orifis

Δp = diferensial tekanan melintas orifis

Ada dua orifis pada gambar 7, yaitu orifis sebenarnya dan orifis yang terbentuk karena pembatasan aliran antara lubang keluar dan benda kerja. Luas orifis pertama adalah A_1 dan yang kedua A_2 . maka persamaan 2 menjadi :

$$Q = C_1 A_1 \sqrt{p_1 - p_2} = C_2 A_2 \sqrt{p_2 - p_a} \quad (4-3)$$

dimana : p_a = tekanan sekitar yang diandaikan konstan.

Jika $C_1 = C_2$ maka :

$$r = \frac{p_2 - p_a}{p_1 - p_a} = \frac{1}{1 + (A_2 / A_1)^2} \quad (4-4)$$

dan :

$$A_1 = \pi d_1^2 / 4 \quad (4-5)$$

$$A_2 = \pi d_2^2 x \quad (4-6)$$

Graneek dan Evans membuktikan dengan eksperimen bahwa hubungan antara rasio r dan rasio A_2/A_1 sangat mendekati linier untuk $0,4 < r < 0,9$, dan bahwa :

$$r = 1,10 - 0,50 (A_2/A_1)$$

sehingga persamaan (4-5) dan (4-6) menjadi :

$$r = \frac{p_2 - p_a}{p_1 - p_a} = 1,10 - 2,00 \frac{d_2}{d_1^2} x \quad \text{untuk } 0,4 < r < 0,9 \quad (4-8)$$

Pengukur anjakan pneumatik terutama digunakan untuk pengukuran anjakan kecil.

Contoh 3:

Sebuah pengukur anjakan pneumatik seperti yang terlihat pada gambar 7 mempunyai $d_1 = 0,030$ in dan $d_2 = 0,062$ in. Tekanan masuk ialah 10,0 psig dan tekanan diferensial $p_2 - p_a$ diukur dengan manometer air yang dapat membaca dengan ketakpastian 0,05 in H_2O . Hitunglah jangkauan anjakan dimana persamaan 4-8 berlaku.

Jawab:

$$\frac{d_2}{d_1^2} = \frac{0,062}{(0,030)^2} = 68,8$$

Bila $r = 0,4$:

$$x = \frac{1,10 - 0,4}{(2,00)(68,8)} = 0,0509 \text{ in } (0,129 \text{ cm})$$

Bila $r = 0,9$:

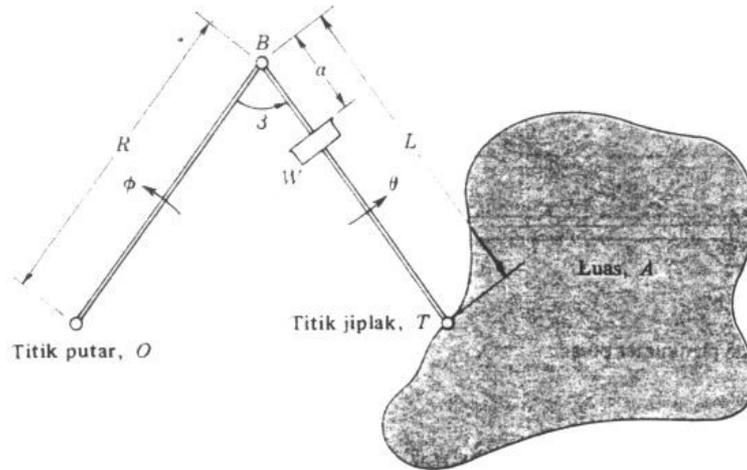
$$x = 0,0145 \text{ in } (0,0368 \text{ cm})$$

Pengukuran Luas

Pengukuran luas banyak dipakai pada berbagai keperluan seperti penentuan luas secara grafik peta hasil survei, integrasi suatu fungsi untuk menentukan luas dibawah kurva, dan analisa grafik data eksperimen. Berikut ini diuraikan beberapa metode pengukuran luas.

Planimeter

Planimeter adalah pengukur mekanik untuk mengukur luas bidang datar. Gambar 8 memperlihatkan skema planimeter polar.



Gambar 8. Skema planimeter polar.

Titik O tetap, sedang titik-jiplak T digerakkan di sepanjang keliling bentuk yang akan ditentukan luas permukaannya. Roda W dipasangkan pada lengan BT sehingga dapat bergerak bebas bila lengan mengalami peranjakan sudut. Roda itu mempunyai goresan pembagian dan skala vernier sehingga jumlah perputarannya dapat ditentukan dengan tepat selama titik jiplak bergerak di sepanjang kurva. Planimeter dan bidang yang diukur ditempatkan diatas bidang datar yang cukup licin sehingga roda W hanya menggelinding bila lengan BT mengalami gerakan translasi aksial. Jadi, roda menunjukkan anjakan sudut nol bila terjadi gerakan translasi aksial pada lengan BT . Umpamakan panjang lengan jiplak BT ialah L , dan jarak dari titik B ke roda ialah a . Diameter roda adalah D . Jarak OB dinamakan R . Umpamakan lengan BT berputar sebesar $d\phi$ dan lengan OB menurut sudut $d\phi$ sebagai akibat gerakan titik-jiplak. Luas yang disapu oleh lengan BT dan OB ialah :

$$dA = \frac{1}{2} L^2 d\theta + LR \cos \beta d\phi + \frac{1}{2} R^2 d\phi \quad (4-9)$$

dimana : β adalah sudut antara kedua lengan.

Jarak yang ditempuh oleh pinggir roda karena rotasinya ialah :

$$ds = a d\theta + R \cos \beta d\phi \quad (4-10)$$

Persamaan diatas diintegrasikan, didapatkan :

$$A = 0,5L^2 \int d\theta + LR \int \cos \beta d\phi + 0,5R^2 \int d\phi \quad (4-11)$$

$$s = a \int d\theta + \int R \cos \beta d\phi \quad (4-12)$$

Jadi ,

$$\int R \cos \beta d\phi = s - a d\theta$$

dan

$$A = (0,5L^2 - aL) \int d\theta + Ls + 0,5R^2 \int d\phi \quad (4-13)$$

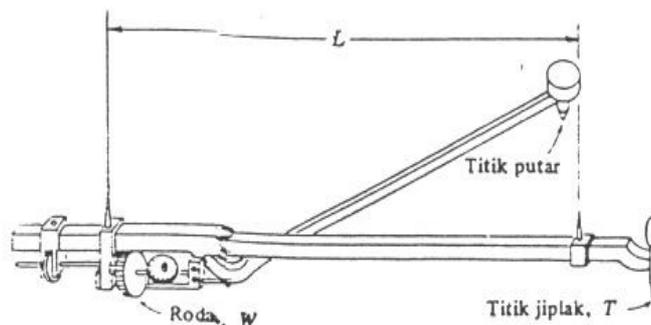
Jika kutub berada diluar daerah yang diukur dalam gambar 8, maka $\int d\theta = 0$ maupun $\int d\phi = 0$, dan luas didapatkan :

$$A = Ls \quad (\text{kutub di luar daerah})$$

Bila kutub berada di dalam daerah, baik $\int d\theta$ maupun $\int d\phi$ sama dengan 2π karena kedua lengan membuat putaran penuh. Luas menjadi :

$$A = Ls + (R^2 + L^2 - 2aL)\pi \quad (\text{kutub di dalam daerah}) \quad (4-14)$$

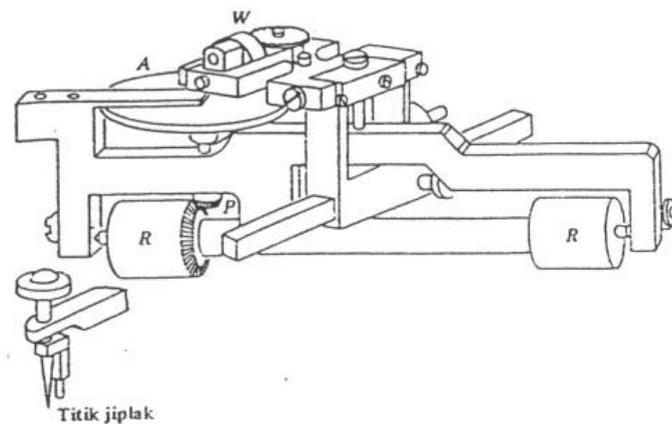
Instrumen yang disebut diatas disebut *planimeter polar*. Piranti komersial biasanya mempunyai roda dengan keliling 2,50 inci, dan model-model ada yang mempunyai lengan jiplak yang tetap dan ada yang dapat diatur. Contoh konstruksi planimeter polar ditunjukkan oleh gambar 9.



Gambar 9. Konstruksi planimeter polar.

Planimeter polar pada umumnya tidak cocok untuk pengukuran bidang yang panjang tetapi sempit karena titik putar harus tetap. *Planimeter rol* lebih cocok untuk pengukuran yang demikian. Gambar 10 memperlihatkan contoh planimeter rol. Kedua rol R dihubungkan melalui suatu susunan roda gigi kerucut dengan meja A . Roda W berada dalam kontak dengan meja itu dan berputar sesuai dengan jumlah putaran meja itu. Titik jiplak T dihubungkan dengan

peletakan roda sehingga gerakannya menyebabkan roda itu bergerak ke arah dalam dan luar diatas meja berputar tersebut. Putaran roda itu bergantung pada jaraknya dari pusat roda, sehingga pada gilirannya, ia bergantung pada anjakan titik jiplak pada arah sejajar dengan sumbu kedua rol. Jadi penunjukan total roda itu merupakan fungsi dari jarak gerakan nol dan anjakan tegak lurus titik jiplak, dan karena itu merupakan fungsi luas keliling.

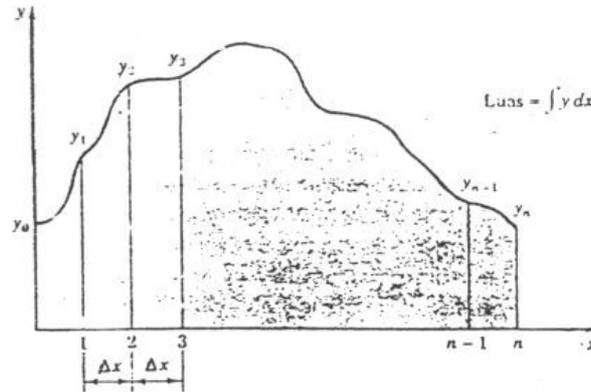


Gambar 10. Planimeter rol.

Metode Grafik dan Metode Numerik Untuk Pengukuran Luas

Salah satu cara yang sangat sederhana untuk pengukuran luas bidang datar ialah dengan menggambarkan luas itu pada kertas berpetak/koordinat dan menghitung jumlah kotak yang terdapat pada gambar itu. Untuk menentukan luas bidang dibawah suatu kurva tak beraturan biasanya diterapkan integrasi numerik. Dua kaidah yang lazim digunakan adalah kaidah *trapezoida* dan kaidah *Simpson*.

Misal luas bidang dibawah kurva seperti gambar 11.



Gambar 11. Penentuan luas bidang datar.

Luas bidang dibawah kurva :

$$A = \int y dx \quad (4-15)$$

Jika bidang tersebut dibagi-bagi dengan sama besar sebesar Δx , dengan kaidah trapezoida maka:

$$A = \frac{y_0 + y_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} y_i \Delta x \quad (4-16)$$

Bila luas itu dibagi dengan sejumlah pertambahan yang genap, kaidah Simpson akan memberikan :

$$A = \frac{\Delta x}{3} y_0 + y_n + \sum_{i=1}^{n-1} y_i [3 + (-1)^{i+1}] \quad (4-17)$$

Kaidah trapezoida didapat dengan menghubungkan ordinat-ordinat kurva itu dengan garis lurus, sedang hasil yang didapatkan dari persamaan (4-17) menghubungkan tiga titik setiap waktu dengan suatu parabola.

Soal-soal:

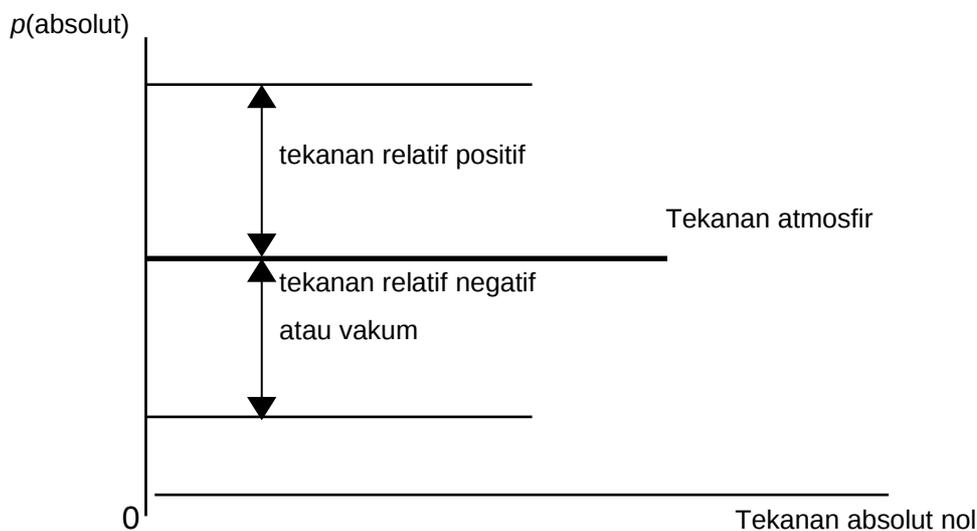
1. Coba anda jelaskan mengenai prinsip kerja jangka sorong.
2. Apa kegunaan dari blok ukur?
3. Jelaskan prinsip kerja anjakan pneumatik.
4. Suatu sumber cahaya raksa menggunakan penyaring hijau sehingga panjang gelombangnya ialah 5460 \AA . Cahaya ini dikolimasikan dan diarahkan kedua permukaan miring seperti gambar 5. Kedua permukaan itu berada pada kontak presisi pada salah satu ujungnya. Antara titik kontak dan jarak 100 mm diamati ada lima jumbai interferensi. Hitunglah jarak pisah antara dua permukaan dan sudut kemiringan pada posisi ini.
5. Sebuah pengukur anjakan pneumatik seperti yang terlihat pada gambar 7 mempunyai $d_1 = 0,7 \text{ mm}$ dan $d_2 = 1,6 \text{ mm}$. Tekanan masuk ialah $0,7 \text{ barg}$ dan tekanan diferensial $p_2 - p_a$ diukur dengan manometer air yang dapat membaca dengan ketakpastian $0,05 \text{ in H}_2\text{O}$. Hitunglah jangkauan anjakan dimana persamaan 4-8 berlaku.

BAB V

PENGUKURAN TEKANAN

Tekanan dinyatakan sebagai gaya per satuan luas. Pembahasan berikut akan dibatasi hanya pada sistem-sistem fluida saja. *Tekanan absolut* (absolute pressure) menunjukkan nilai mutlak gaya per satuan luas yang bekerja pada dinding penampung fluida. *Tekanan relatif* atau tekanan pengukur (gauge pressure) ialah selisih antara tekanan absolut dan tekanan atmosfer setempat. *Vakum* atau hampa menunjukkan berapa lebihnya tekanan atmosfer dari tekanan absolut atau bisa dikatakan vakum adalah Tekanan relatif negatif.

Dalam SI satuan tekana adalah newton per meter persegi (N/m^2) atau pascal (Pa). Tekanan sering dinyatakan dalam tinggi kolom fluida (umpamanya raksa) yang dapat dipikulnya pada suhu $20\text{ }^\circ\text{C}$. Pada tekanan atmosfer standar (baku) tingginya adalah 760 mm raksa yang kerapatannya $13,5951\text{ g/cm}^3$.



Gambar 1. Hubungan antara istilah-istilah tekanan

Beberapa satuan tekanan yang lazim adalah :

$$\begin{aligned} 1 \text{ atmosfer (atm)} &= 14,696 \text{ pon per inci persegi absolut (psi)} \\ &= 1,01325 \times 10^5 \text{ newton per meter persegi (Pa)} \\ &= 2116 \text{ pon-gaya per kaki persegi (pound-force per square foot, lbf/ft}^2\text{)} \\ 1 \text{ N/m}^2 &= 1 \text{ pascal (Pa)} \end{aligned}$$

1 atmosfer (atm)	= 760 milimeter raksa (mmHg)
1 bar	= 10 ⁵ newton per meter persegi (100 kPa)
1 milimeter raksa (mmHg)	= 1333,22 mikrobar
	= 133,322 newton per meter persegi (13,3 Pa)
1 torr	= 1 milimeter raksa (mmHg)
1 inci raksa	= 70,73 pon gaya per kaki persegi

Tekanan fluida terjadi karena pertukaran momentum antara molekul-molekul fluida dan dinding penampung. Pertukaran momentum total bergantung pada jumlah molekul yang menubruk dinding per satuan waktu dan kecepatan rata-rata molekul itu.

Untuk gas ideal, tekanan dirumuskan :

$$p = (1/3)nmv_{apk}^2 \quad (5-1)$$

dimana : n = kerapatan molekul, molekul per satuan volume

m = massa molekul

v_{apk} = akar purata (rata-rata) kecepatan

Dapat pula dirumuskan :

$$v_{apk} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \quad (5-2)$$

dimana : T = suhu mutlak gas, K

$k = 1,3803 \times 10^{-23}$ J/molekul.K, (konstanta Boltzman)

Jalur bebas rata-rata (mean free path) adalah jarak rata-rata perjalanan molekul antara dua tubrukan. Untuk gas ideal yang molekul-molekulnya mempunyai sifat hampir seperti bola biliar,

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}}{8\pi r^2 n} \quad (5-3)$$

dimana : r = jari-jari efektif molekul

λ = jalur bebas rata-rata

Pada suhu dan tekanan atmosfer, standar jalur bebas rata-rata sangat kecil disekitar 10^{-5} cm. Pada tekanan 1 μ m, jalur bebas rata-rata sekitar 1 cm. Untuk udara, hubungan tentang jalur bebas rata-rata dapat disederhanakan menjadi :

$$\lambda = 8,64 \times 10^{-7} \frac{T}{p} \text{ ft} \quad T \text{ dalam } ^\circ\text{R dan } p \text{ dalam lbf/ft}^2 \quad (5-3a)$$

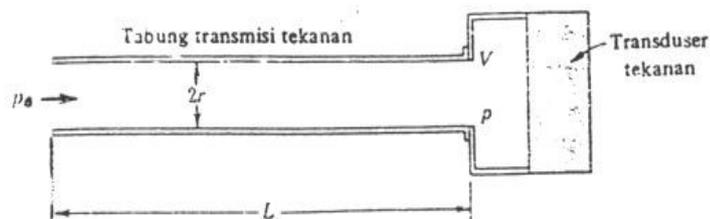
$$\lambda = 2,27 \times 10^{-5} \frac{T}{p} \text{ m} \quad T \text{ dalam K dan } p \text{ dalam Pa} \quad (5-3b)$$

Respon Dinamik

Respon transien atau tanggapan fana (transient response) instrumen pengukuran tekanan bergantung atas 2 faktor :

1. Respon unsur transduser yang mengindera tekanan.
2. Respon fluida transmisi tekanan dan saluran-saluran penghubung, dsb.

Yang terakhir ini sering merupakan faktor yang menentukan respon frekwensi menyeluruh sistem pengukuran tekanan. respon ini akhirnya akan harus ditentukan dengan kalibrasi langsung. Perkiraan mengenai perangai tersebut bisa didapatkan dengan analisa berikut. Perhatikan sistem yang terlihat pada gambar 2.



Gambar 2. Skema sistem transmisi-tekanan.

Tekanan yang berfluktuasi mempunyai frekwensi ω dan amplitudo p_o dan bekerja pada tabung yang panjangnya L dan jari-jari r . Pada ujung ada volume V yang berhubungan dengan transduser peka tekanan. Massa fluida bergetar karena pengaruh gesekan fluida dalam tabung, yang cenderung meredam gerakan. Rasio tekanan-amplitudo ialah :

$$\left| \frac{p}{p_o} \right| = \frac{1}{\{ [1 - (\omega / \omega_n)^2]^2 + 4h^2 (\omega / \omega_n)^2 \}^{1/2}} \quad (5-4)$$

dimana : p = amplitudo sinyal tekanan yang diberikan transduser.

ω_n = frekwensi alamiah.

dan :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{3\pi r^2 c^2}{4LV}} \quad (5-5)$$

$$h = \frac{2\mu}{\rho c r^3} \sqrt{\frac{3LV}{\pi}} \quad (5-6)$$

dimana : c = kecepatan bunyi dalam fluida

μ = viskositas dinamik fluida

ρ = kerapatan fluida.

Sudut fase sinyal tekanan :

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2h(\omega / \omega_n)}{1 - (\omega / \omega_n)^2} \quad (5-7)$$

Kecepatan bunyi di udara dapat dihitung dari :

$$c = 49,1 T^{1/2} \text{ ft/s} \quad \text{dengan } T \text{ dalam } ^\circ\text{R}$$

$$c = 20,04 T^{1/2} \text{ m/s} \quad \text{dengan } T \text{ dalam } ^\circ\text{K}$$

Jika diameter tabung sangat kecil, seperti pada kapiler, kita bisa mendapatkan rasio peredaman yang sangat besar sehingga persamaan (5-4) akan menjadi lebih sederhana untuk frekwensi dibawah frekwensi alamiah :

$$\left| \frac{p}{p_o} \right| = \frac{1}{[1 + 4h^2 (\omega / \omega_n)^2]^{1/2}} \quad (5-8)$$

Jika fluida yang melakukan transmisi suatu gas, seluruh sistem itu dapat bekerja sebagai suatu resonator Helmholtz dengan frekwensi resonansi :

$$\omega_n = \frac{\pi r^2 c^2}{V(L + 0,5\sqrt{\pi^2 r^2})}^{1/2} \quad (5-9)$$

Contoh 1:

Sebuah tabung kecil, diameter 0,5 mm, dihubungkan dengan transduser tekanan melalui suatu volume 3,5 cm³. Panjang tabung 7,5 cm. Fluida transmisi tekanan ialah udara pada 1 atm dan 20 °C. Hitunglah frekwensi alamiah sistem ini dan rasio peredaman.

Jawab :

Kita akan gunakan persamaan (5-9) untuk menjawab soal ini. Untuk udara:

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{1,0132}{(287)(293)} = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

$$c = (20,04)(293)^{1/2} = 343 \text{ m/s}$$

$$\mu = 1,91 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s (Tabel A-6)}$$

Jadi :

$$\omega_n = \frac{\pi(0,25 \times 10^{-3})^2(343)^2}{(3,5 \times 10^{-6})[0,075 + (0,5)(\pi)(0,25 \times 10^{-3})]}^{1/2}$$
$$= 296 \text{ Hz}$$

Rasio peredaman dihitung dengan persamaan (5-6):

$$h = \frac{(2)(1,91 \times 10^{-5})}{(1,205)(343)(0,25 \times 10^{-3})^3} \frac{(3)(0,075)(3,5 \times 10^{-6})}{\pi}^{1/2}$$
$$= 2,96$$

Contoh 2:

Hitunglah atenuasi sinyal tekanan 100 Hz dalam sistem contoh 1.

Jawab :

Untuk perhitungan ini kita gunakan persamaan (5-4),

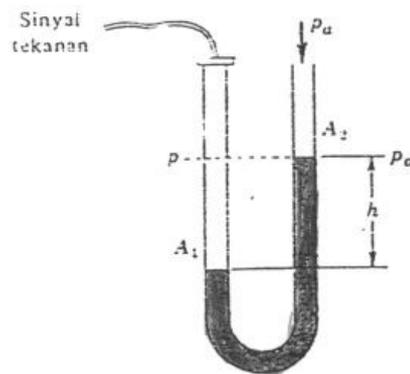
$$\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{100}{296} = 0,338$$

sehingga

$$\left| \frac{p}{p_0} \right| = \frac{1}{\{[1 - (0,338)^2]^2 + 4((2,96)^2(0,338)^2)\}^{1/2}} = 0,457$$

Piranti-piranti Pengukur Tekanan Mekanik

Manometer fluida banyak digunakan untuk pengukuran fluida pada keadaan stedi atau tunak (steady state). Gambar 3 adalah sebuah **manometer tabung-U**. Perbedaan tekanan antara tekanan p yang tidak diketahui dan tekanan atmosfir adalah fungsi tinggi h .



Gambar 3. Manometer tabung-U.

Persamaan fluida pada kolom adalah :

$$p_a + \frac{g}{g_c} h \rho_m = p + \frac{g}{g_c} h \rho_f \quad (5-10)$$

dimana : ρ_f = kerapatan fluida yang mentransmisi tekanan p

ρ_m = kerapatan fluida manometer

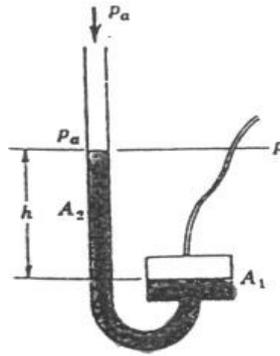
h = perbedaan ketinggian

atau bisa ditulis :

$$p - p_a = \frac{g}{g_c} h (\rho_m - \rho_f) \quad (5-11)$$

Persamaan (5-11) merupakan prinsip dasar manometer U.

Manometer jenis-bejana (well-type manometer) bekerja dengan cara yang sama dengan manometer U, kecuali konstruksinya seperti gambar 4.



Gambar 4. Manometer jenis bejana.

Dalam hal ini neraca tekanan masih menghasilkan :

$$p - p_a = \frac{g}{g_c} h (\rho_m - \rho_f)$$

Biasanya manometer jenis ini diisi sampai suatu ketinggian pada kondisi selisih-tekanannol. Pengukuran anjakan pada kolom kecil lalu dilakukan terhadap titik nol ini. Jika anjakan itu diberi nama h' , maka :

$$h'A_2 = (h - h')A_1 \quad (5-12)$$

karena anjakan volume sama pada kedua kaki manometer, dengan menyisipkan persamaan (5-10) ke persamaan (5-12) didapat :

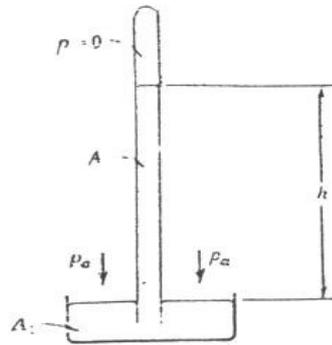
$$p - p_a = \frac{g}{g_c} h' \frac{A_2}{A_1} + 1 (\rho_m - \rho_f) \quad (5-13)$$

Bila manometer jenis bejana dipasang seperti gambar 5, alat ini biasanya disebut **barometer**. Bagian atas kolom mengandung uap raksa pada suhu setempat. Tekanan jenuh ini dapat diabaikan terhadap tekanan atmosfer. Bejananya terbuka ke tekanan atmosfer. Tinggi h merupakan tekanan absolut. Bila $p_a = 14,696$ psia (1 atm), tinggi kolom raksa pada 68 °F (20 °C) adalah 760 mm.

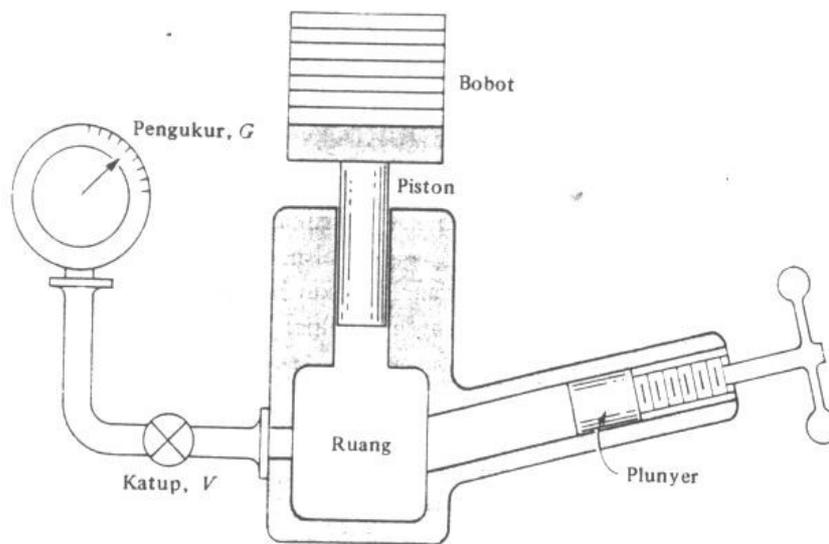
Penguji Bobot-Mati

Penguji bobot mati (dead weight tester) ialah suatu piranti yang digunakan untuk menyeimbangkan tekanan fluida dengan suatu bobot yang diketahui.

Biasanya piranti ini digunakan untuk kalibrasi-statik pengukur tekanan dan jarang digunakan untuk pengukuran tekanan pada keadaan sebenarnya.



Gambar 5. Manometer digunakan sebagai barometer.



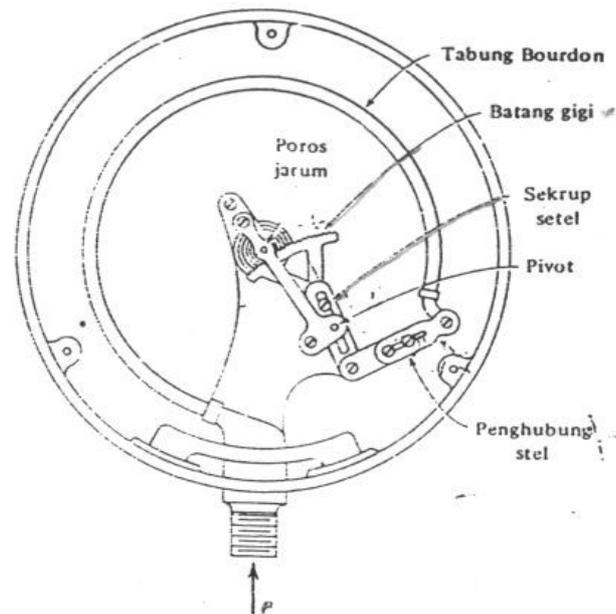
Gambar 6. Skema penguji bobot mati.

Pada gambar 6 terlihat alat digunakan untuk mengkalibrasi pengukur-tekanan (pressure gauge) G. Ruang dan silinder diisi dengan minyak dengan cara, mula-mula menggerakkan plunyer ke posisi paling maju, dan kemudian mundur perlahan-lahan sambil menarik minyak masuk melalui bukaan tempat piston. Pengukur yang diuji dipasang demikian juga piston ditempatkan pada silinder. Tekanan dari fluida akan diteruskan ke pengukur bila katup dibuka. Tekanan ini dapat diubah dengan menambahkan beban pada piston atau dengan menggunakan kombinasi piston-silinder yang luasnya bermacam-macam.

Ketelitian pengujian bobot mati dibatasi oleh dua faktor : (1) gesekan antara silinder dan piston, dan (2) ketidakpastian mengenai luas piston.

Pengukur Tekanan Tabung Bourdon

Konstruksi pengukur tabung Bourdon bisa dilihat pada gambar 7 dibawah ini.



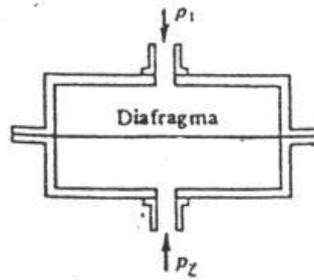
Gambar 7. Skema pengukur-tekanan tabung Bourdon.

Pengukur tabung Bourdon banyak digunakan dalam pengukuran statik bilamana diperlukan pengukuran yang murah namun dapat diandalkan. Tabung-tabung ini terdapat dalam berbagai ukuran (1 sampai 16 in) dan berbagai tingkat ketelitian. Pengukur Heise (Heise Gage) ialah pengukur tabung Bourdon yang sangat teliti, dengan ketelitian 0,1 persen bacaan skala penuh.

Tabung Bourdon biasanya mempunyai penampang elips dan konfigurasi "C". Bila ada tekanan di dalam tabung, akan terjadi deformasi elastik yang sebanding dengan tekanan. Ujung pengukur dihubungkan dengan suatu penghubung berpegas yang memperbesar anjakan dan mengubahnya menjadi gerakan putar pada penunjuk.

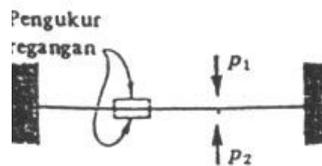
Pengukur Diafragma Dan Pengukur Ujub

Perhatikan sebuah diafragma rata yang diberi perbedaan tekanan $p_1 - p_2$ pada gambar 8.

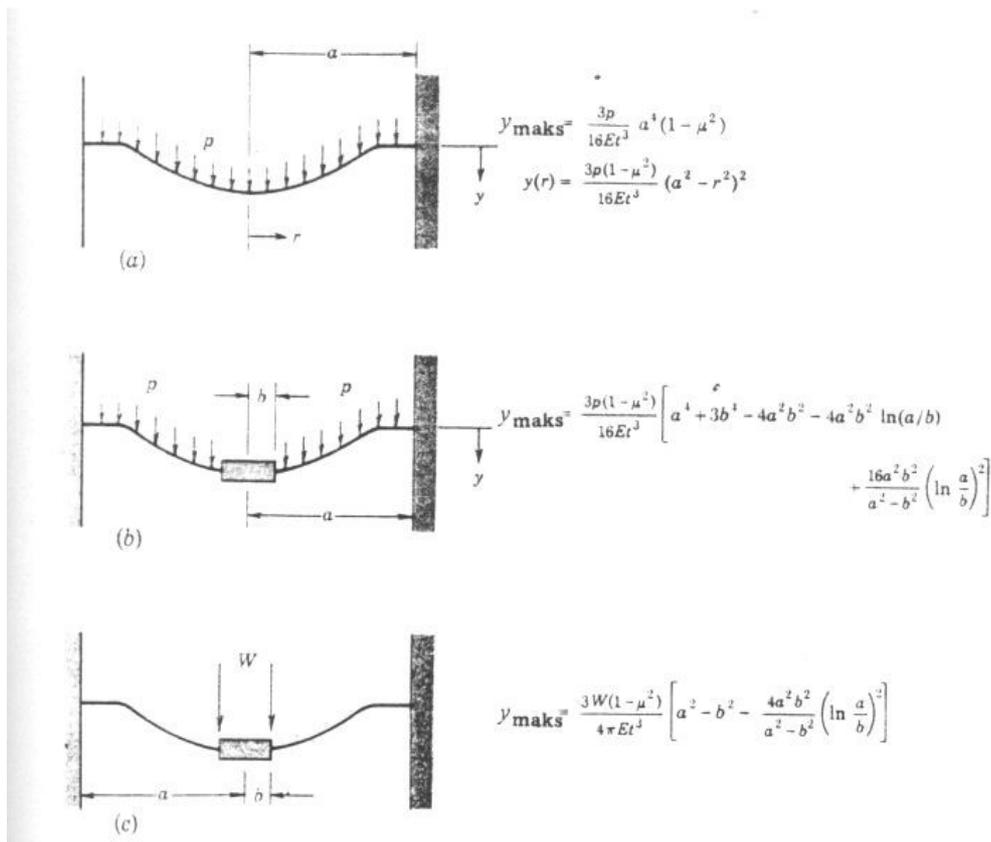


Gambar 8. Skema pengukur diafragma.

Diafragma ini mengalami defleksi sesuai dengan perbedaan tekanan dan defleksi ini diindera dengan suatu transduser anjakan yang sesuai. Pada diafragma tersebut bisa dipasang pengukur regangan tahanan listrik seperti gambar 9.



Gambar 9. Pengukur diafragma yang menggunakan pengukur regangan tahan-listrik.

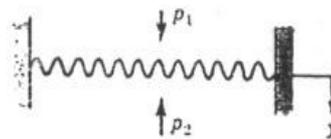


Gambar 10. Karakteristik defleksi tiga macam susunan diafragma. (a) Pinggir mati, belum seragam pada keseluruhan permukaan; (b). pinggir luar mati dan ditunjang, pinggir dalam mati, beban merata pada keseluruhan permukaan sebenarnya; (c) pinggir luar mati dan ditunjang, pinggir dalam mati, beban seragam di sepanjang pinggir dalam.

Keluaran dari pengukur ini merupakan fungsi regangan setempat, yang pada gilirannya mungkin berhubungan dengan defleksi diafragma dan perbedaan tekanan. Defleksi pada umumnya adalah linier sesuai Δp apabila defleksi kurang dari sepertiga tebal diafragma.

Gambar 10 memperlihatkan karakteristik defleksi ketiga susunan diafragma, dimana dua diafragma pertama mempunyai pembebanan tekanan seragam (merata) di keseluruhan permukaan piring, sedang pada jenis ketiga beban diberikan pada bos pusat.

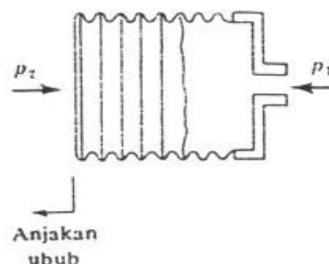
Untuk memudahkan respon linier dalam jangkauan defleksi yang luas, diafragma dibuat dalam bentuk piring bergelombang seperti pada gambar 11.



Gambar 11. Diafragma piring gelombang.

Diafragma ini sangat cocok untuk penerapan yang menggunakan piranti mekanik untuk mengindera defleksi diafragma. Dengan piranti mekanik diperlukan defleksi yang lebih besar daripada dengan transduser listrik.

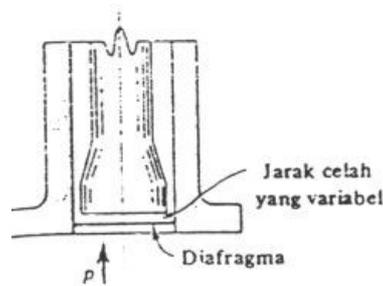
Gambar 12 diberikan skema pengukur Ubub. Perbedaan gaya menyebabkan terjadinya perbedaan anjakan pada Ubub, yang dapat diubah menjadi sinyal listrik atau diperbesars secara mekanik sehingga dapat dibaca sebagai keluaran pada piring penunjuk.



Gambar 12. Skema pengukur tekanan ubub.

Pengukur Ubub biasanya tidak cocok untuk pengukuran transien karena gerakan dan massa yang terlihat disini relatif besar.

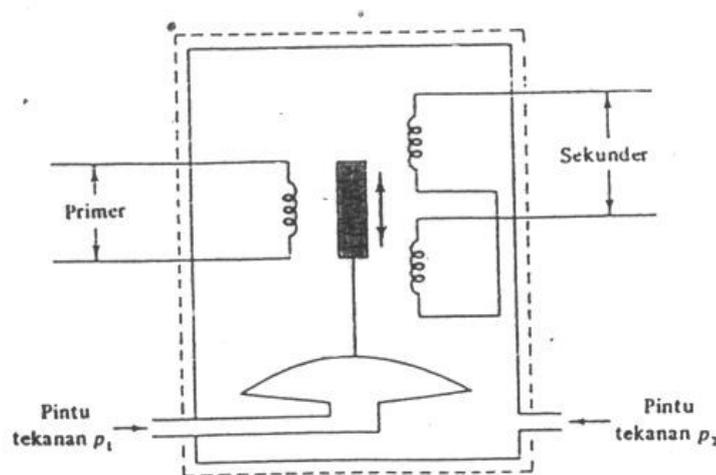
Defleksi diafragma karena tekanan dapat dindra melalui perubahan kapasitas seperti terlihat pada gambar 13. Pemungutan seperti ini cocok untuk pengukuran dinamik, karena frekwensi alamiah diafragma agak tinggi.



Gambar 13. Pengukur tekanan kapasitans.

Pungutan kapasitas mempunyai kepekaan rendah karena rangkaian keluaran baca harus dibuat lebih seksama.

Diagram skema pengukuran tekanan diferensial diafragma LVDT terlihat pada gambar 14. Model seperti ini dapat digunakan untuk pengukuran tekanan sampai serendah 0,000035 psi (0,25 Pa).



Gambar 14. Skema pengukur tekanan diferensial diafragma-LVDT.

Frekwensi alamiah diafragma bundar yang terpasang pada kelilingnya diberikan oleh Hetenyi sebagai :

$$f = \frac{10,21}{a^2} \sqrt{\frac{g_c E t^2}{12(1 - \nu^2) \rho}} \text{ Hz} \quad (5-15)$$

dimana : E = modulus elastisitas

t = tebal, in atau m

a = jari-jari diafragma, in atau m

ρ = kerapatan bahan, lbm/in³ atau kg/m³

g_c = konstanta konversi dimensi = 385,9 lbm*in/lbf*s² atau 1,0 kg*m/N*s²

μ = rasio poisson

Persamaan (5-15) dapat disederhanakan untuk diafragma baja menjadi :

$$f = 1,934 \times 10^6 t / (\pi a^2) \quad (t \text{ dan } a \text{ dalam in}) \quad (5-16a)$$

$$f = 4,912 \times 10^4 t / (\pi a^2) \quad (t \text{ dan } a \text{ dalam m}) \quad (5-16a)$$

Contoh 3:

Sebuah pengukur tekanan diafragma terbuat dari pegas baja ($E = 200 \text{ GN/m}^2$, $\mu = 0,3$), diameter 5,0 cm dan dirancang untuk tekanan maksimum 1,4 MPa. Hitunglah tebal pengukur yang diperlukan sehingga defleksi maksimum adalah sepertiga tebal. Hitunglah frekwensi alamiah diafragma ini.

Jawab:

Dengan menggunakan persamaan pada gambar 10, kita dapat :

$$\frac{1}{3}t = \frac{3 \Delta p}{16Et^3} a^4 (1 - \mu^2)$$

$$t^4 = \frac{(9)(1,4 \times 10^6)(0,025)^4 [1 - (0,3)^2]}{(16)(2 \times 10^{11})}$$

$$t = 1,09 \text{ mm}$$

Frekwensi alamiah dapat kita hitung dari persamaan (5-15):

$$f = \frac{10,21}{(0,025)^2} \frac{(1,0)(2 \times 10^{11})(0,00109)^2}{(12)[1 - (0,3)^2](7800)}^{1/2}$$

$$= 27,280 \text{ Hz}$$

Soal-soal

1. Coba jelaskan pengertian dari tekanan atmosfer dan tekanan absolut.
2. Respon transien atau tanggapan fana instrumen pengukuran tekanan bergantung atas dua faktor. Jelaskan kedua faktor tersebut.
3. Jelaskan prinsip kerja pengukur tekanan tabung Bourdon.
4. Sebuah tabung kecil, diameter 0,5 mm, dihubungkan dengan transduser tekanan melalui suatu volume 3,0 cm³. Panjang tabung 7,0 cm. Fluida transmisi tekanan ialah udara pada 1 atm dan 30 °C. Hitunglah frekwensi alamiah sistem ini dan rasio peredaman.
5. Sebuah pengukur tekanan diafragma terbuat dari pegas baja ($E = 200 \text{ GN/m}^2$, $\mu = 0,25$), diameter 4,0 cm dan dirancang untuk tekanan maksimum 1,5 MPa. Hitunglah tebal pengukur yang diperlukan sehingga defleksi maksimum adalah sepertiga tebal. Hitunglah frekwensi alamiah diafragma ini.

BAB VI

PENGUKURAN ALIRAN

Laju aliran dapat dinyatakan baik dalam satuan volume ataupun dalam satuan massa. Beberapa istilah yang lazim digunakan:

1 galon per menit (gpm)

= 231 inchi kubik per menit (in^3/min)

= 63,09 sentimeter kubik per sekon (cm^3/s)

1 liter

= 0,26417 galon = 1000 sentimeter kubik

1 kaki kubik permenit (cfm, atau ft^3/min)

= 0,028317 meter kubik per menit = 471,95 sentimeter kubik per sekon

1 kaki kubik standar per menit udara pada 20 °C, 1 atm

= 0,07513 pon-massa per menit

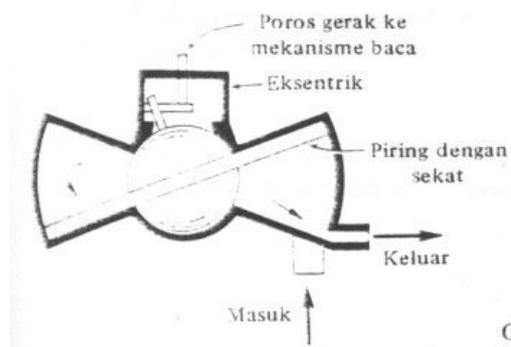
= 0,54579 gram per detik

Metode Anjakan-Positif

Laju aliran yang tak mudah menguap seperti air dapat diukur dengan teknik penimbangan langsung, dimana bobot zat cair yang dikumpulkan diukur dengan teliti. Laju aliran rata-rata dapat dengan mudah dihitung.

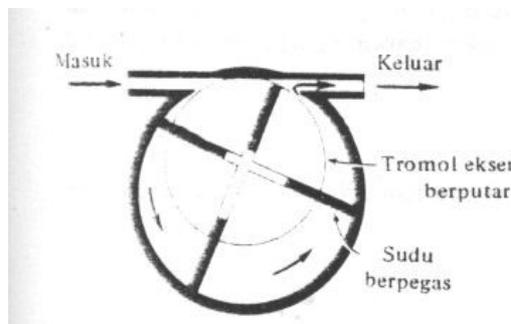
Metode *aliran anjakan-positif* (positive-displacement flowmeter) pada umumnya dipakai dalam penerapan yang memerlukan ketelitian tinggi pada kondisi aliran stedi (tunak). Contoh piranti anjakan positif ini ialah meter air rumah tangga, yang skemanya dapat dilihat pada gambar 1. Meter ini bekerja dengan prinsip piring angguk (nutating disc). Air masuk pada bagian kiri meter lalu menekan piring yang terpasang secara eksentrik. Agar zat cair dapat melalui meter itu, piring itu harus mengangguk-angguk di seputar sumbu vertikal karena bagian atas dan bagian bawah piring selalu dalam kontak dengan ruang tempat piring itu terpasang. Ruang masuk dan keluar piring itu terpisah oleh dinding sekat. Volume zat cair yang melalui meter itu terlihat dari jumlah anggukan piring. Penunjukan aliran volumetrik diberikan melalui suatu susunan roda gigi

dan pencatat yang dihubungkan dengan piring angguk. Meter piring angguk mempunyai ketelitian sampai 1%.

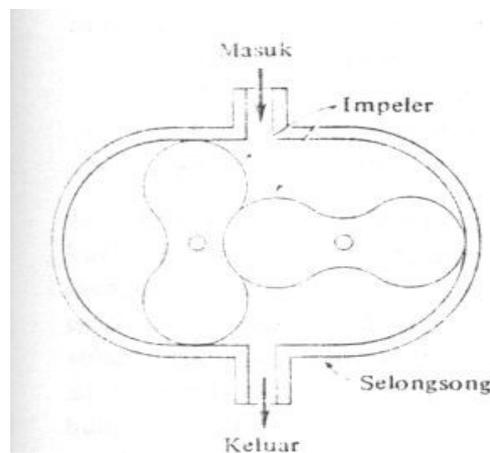


Gambar 1. Skema meter piring angguk.

Suatu piranti anjakan positif lainnya ialah meter sudu-putar (rotary-vane meter) seperti gambar 2. Sudu-sudunya berpegas sehingga selalu berada dalam kontak dengan selongsong meter itu. Pada waktu tromol eksentrik itu berputar, di dalam tromol itu terkurung suatu kuantitas tertentu fluida yang akhirnya akan mengalir ke luar. Poros tromol eksentrik itu dihubungkan dengan suatu alat yang mencatat volume zat cair yang berpindah. Ketakpastian meter sudu putar ialah kira-kira 0,5%.



Gambar 2. Skema meter aliran sudu-putar.



Gambar 3. Skema meter aliran impeler-daun.

Meter impeler daun (lobed-impeller meter) seperti pada gambar 3 dapat digunakan untuk pengukuran aliran gas ataupun zat cair. Fluida yang masuk selalu terperangkap di antara kedua rotor dan terangkut keluar oleh putarannya. Jumlah putaran rotor memberi petunjuk tentang laju aliran volumetrik.

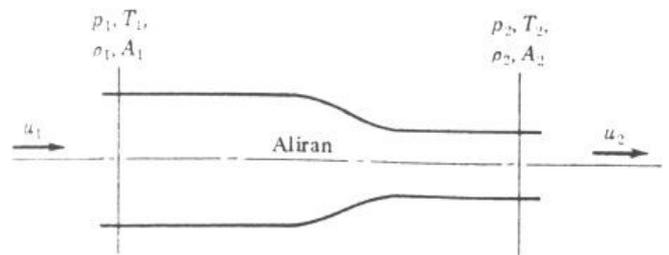
Metode Rintangan Aliran

Piranti pengukur aliran jenis rintangan atau obstruksi sering disebut meter tinggi-tekan (head meter), karena sebagai penunjuk tentang laju aliran digunakan pengukuran kehilangan tinggi (head loss) atau penurunan tekanan (pressure drop).

Perhatikan sistem aliran satu dimensi seperti gambar 4, hubungan kontinuitas adalah :

$$m = \rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2 \quad (6-1)$$

dimana: u = kecepatan



Gambar 7-4. Sistem aliran satu-dimensi.

Gambar 4. Sistem aliran satu-dimensi.

Jika aliran adiabatik dan tanpa gesek dan fluidanya adalah tak-mampumampat (incompressible), maka persamaan Bernoulli dapat ditulis sebagai:

$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{u_1^2}{2g_c} = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{u_2^2}{2g_c} \quad (6-2)$$

dimana sekarang $\rho_1 = \rho_2$, bila persamaan (6-1) dan (6-2) diselesaikan secara serentak, kita dapatkan sebagai penurunan tekanan:

$$p_1 - p_2 = \frac{u_2^2}{2g_c} \left[1 - \frac{A_2^2}{A_1^2} \right] \quad (6-3)$$

dan laju aliran volumetrik:

$$Q = A_2 u_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2 / A_1)^2}} \sqrt{\frac{2g_c(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (6-4)$$

dimana : $Q = \text{ft}^3/\text{s}$ atau m^3/s

$$A = \text{ft}^2 \text{ atau } \text{m}^2$$

$$\rho = \text{lbm}/\text{ft}^3 \text{ atau } \text{kg}/\text{m}^3$$

$$p = \text{lbf}/\text{ft}^2 \text{ atau } \text{N}/\text{m}^2$$

$$g_c = 32,17 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{lbf} \cdot \text{s}^2 \text{ atau } 1,0 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{N} \cdot \text{s}^2$$

Maka bila kita lihat saluran pada gambar 4 yang digunakan untuk mengukur aliran, kita hanya mengukur penurunan tekanan ($p_1 - p_2$) dan lalu menghitung aliran dari persamaan (6-4). Namun tidak ada saluran yang tanpa gesek sama sekali dan selalu saja ada kehilangan tekanan dalam aliran itu. laju aliran volumetrik yang dihitung dari persamaan (6-4) adalah nilai ideal. Untuk laju aliran nyata maka diperlukan satu koefisien buang (discharge coefficient) C dengan hubungan berikut:

$$\frac{Q_{nyata}}{Q_{ideal}} = C \quad (6-5)$$

Koefisien buang tidak konstan dan bergantung dari angka Reynolds dan geometri saluran.

Untuk aliran gas ideal berlaku:

$$p = \rho R T \quad (6-6)$$

dimana T adalah suhu absolut dan R konstanta gas untuk gas yang bersangkutan, yang dapat dinyatakan dalam konstanta gas universal \mathcal{R} dan bobot molekul:

$$R = \frac{\mathcal{R}}{M}$$

Nilai \mathcal{R} ialah $8314 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{mol} \cdot \text{K}$ atau $1545 \text{ ft} \cdot \text{lbf}/\text{lbm} \cdot \text{mol} \cdot ^\circ\text{R}$.

Untuk aliran adiabatik reversibel, persamaan energi aliran stedi untuk gas ideal adalah:

$$c_p T_1 + \frac{u_1^2}{2g_c} = c_p T_2 + \frac{u_2^2}{2g_c} \quad (6-7)$$

dimana C_p adalah kalor spesifik pada tekanan tetap dan diandaikan konstan untuk gas ideal. Bila persamaan (6-1), (6-6) dan (6-7) digabungkan maka:

$$m^2 = 2g_c A_2^2 \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_1^2}{RT_1} \frac{p_2}{p_1} - \left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{(y+1)/y} \quad (6-8)$$

dimana kecepatan masuk, yaitu kecepatan pada bagian 1 diandaikan sangat kecil. Hubungan dapat disederhanakan:

$$m = \sqrt{\frac{2g_c}{RT_1}} A_2 p_2 \Delta p - \frac{1,5}{\gamma} - 1 (\Delta p)^2 + \dots^{1/2} \quad (6-9)$$

dengan $\Delta p = p_1 - p_2$ dan $\gamma = c_p/c_v$ ialah rasio kalor spesifik gas tersebut. Persamaan (6-9) berlaku untuk $\Delta p < p_1/4$. Bila $\Delta p < p_1/10$ persamaan bisa disederhanakan menjadi:

$$m = A_2 \sqrt{\frac{2g_c p_2 (p_1 - p_2)}{RT_1}} \quad (6-10)$$

dimana: m = laju aliran massa, lbm/s atau kg/s

A = luas, ft² atau m²

g_c = 32,17 lbm • ft/lbf • s² atau 1,0 kg • m/N • s²

p = tekanan, lbf/ft² atau N/m²

R = konstanta gas, lbf.ft/lbm.°R atau Nm/kg.K

T = suhu absolut, °R atau K

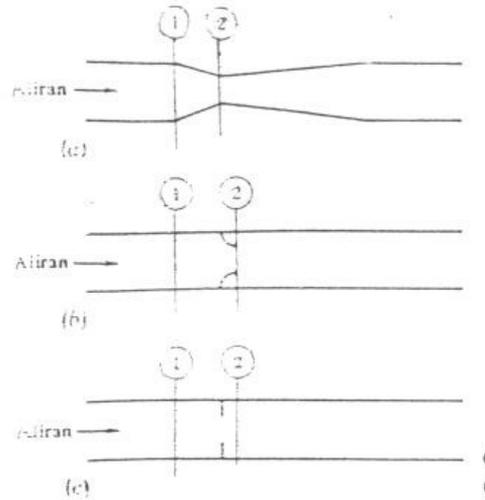
Pada gambar 5 terlihat tiga macam meter-rintangan. Jenis venturi mempunyai keunggulan dalam ketelitiannya yang tinggi dan penurunan tekanannya yang kecil, akan tetapi dari segi biaya orifis jauh lebih murah. Baik nosel aliran maupun orifis mempunyai penurunan tekanan permanen yang relatif tinggi.

Perhitungan untuk ketiga jenis piranti ini dapat dilakukan atas dasar persamaan (6-4) dengan menggunakan konstanta empirik yang didefinisikan sebagai berikut:

$$M = \text{faktor kecepatan masuk} = \frac{1}{\sqrt{1 - (A_2 / A_1)^2}} \quad (6-11)$$

$$K = \text{koefisien aliran} = CM \quad (6-12)$$

$$\beta = \text{rasio diameter} = d/D = (A_2/A_a)^{1/2} \quad (6-13)$$



Gambar 5. Skema tiga jenis meter rintangan. (a) Venturi; (b) nosel aliran; (c) Orifis.

Persamaan empirik berikut berlaku untuk venturi, nosel atau orifis untuk aliran tak mampu mampat.

VENTURI :

$$Q_{nyata} = CMA_2 \sqrt{\frac{2g_c}{\rho}} \sqrt{p_1 - p_2} \quad (6-17)$$

NOSEL DAN ORIFIS:

$$Q_{nyata} = KA_2 \sqrt{\frac{2g_c}{\rho}} \sqrt{p_1 - p_2} \quad (6-18)$$

dimana: Q = laju aliran volume, ft^3/s atau m^3/s

A = luas, ft^2 atau m^2

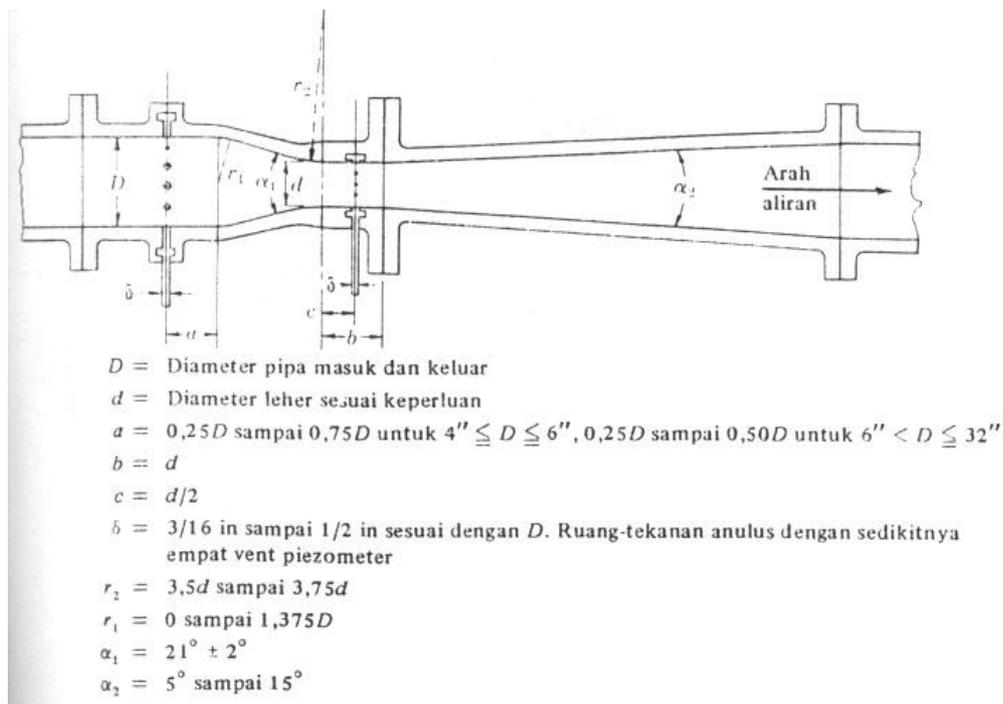
g_c = $32,17 \text{ lbm} \cdot \text{ft}/\text{lbf} \cdot \text{s}^2$ atau $1,0 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{N} \cdot \text{s}^2$

p = tekanan, lbf/ft^2 atau N/m^2

ρ = kerapatan, lbm/ft^3 atau kg/m^3

Tinjauan Praktis Tentang Meter Rintangan

Konstruksi meter rintangan sudah dibakukan oleh American Society of Mechanical Engineers (ASME). Bagian-bagian tabung yang disarankan terlihat pada gambar 6. Titik pengambilan tekanan dihubungkan dengan *manifold* yang mengelilingi bagian hulu dan bagian leher tabung. Manifold menerima cuplikan tekanan dari sekeliling bagian itu sehingga didapatkan nilai rata-rata.



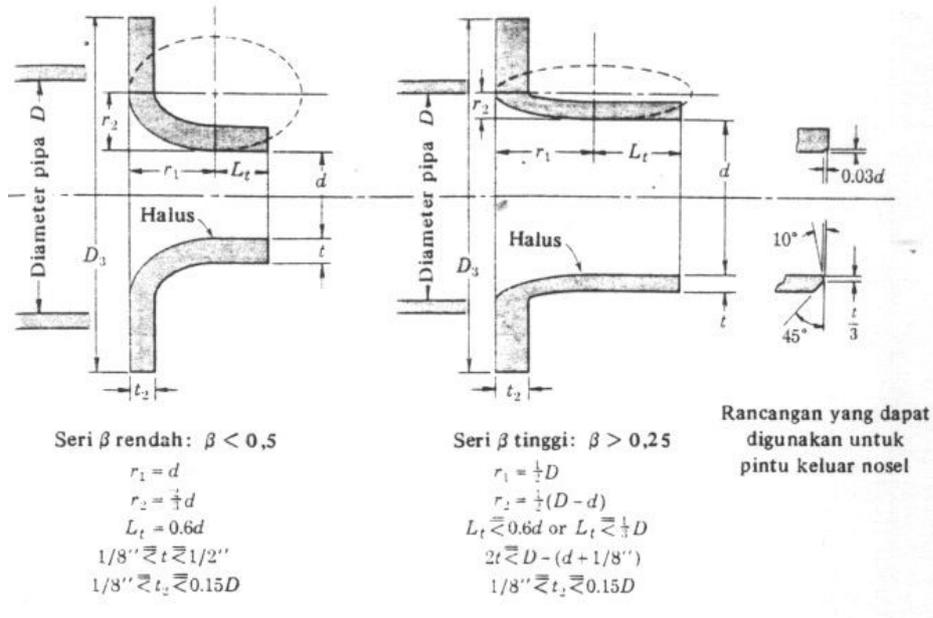
Gambar 6. Perbandingan ukuran-ukuran yang disarankan untuk tabung venturi.

Koefisien buang untuk venturi itu diperlihatkan oleh gambar 9, dimana batas toleransi digambarkan oleh garis putus-putus. Koefisien buang pada pipa yang diameternya kecil dari 2 in umumnya lebih kecil dan perangnya kira-kira seperti yang digambarkan oleh gambar 10. Dimensi-dimensi yang disarankan oleh ASME terlihat pada gambar 7 dan koefisien buangnya pada gambar 11.

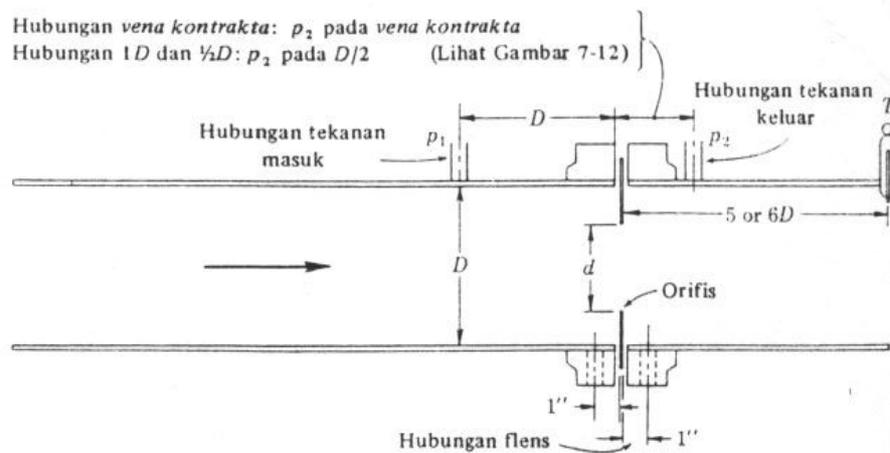
Cara pemasangan untuk orifis konsentris pipa tipis terlihat pada gambar 8. Ada tiga perangkat lokasi pengambilan tekanan yang dapat digunakan:

1. Kedua titik pengambilan tekanan dipasang pada flens.
2. Titik pengambilan tekanan masuk terletak pada jarak satu diameter pipa di sebelah hulu, dan titik pengambilan tekanan keluar terletak setengah diameter pipa disebelah hilir orifis, diukur dari muka-hulu orifis.

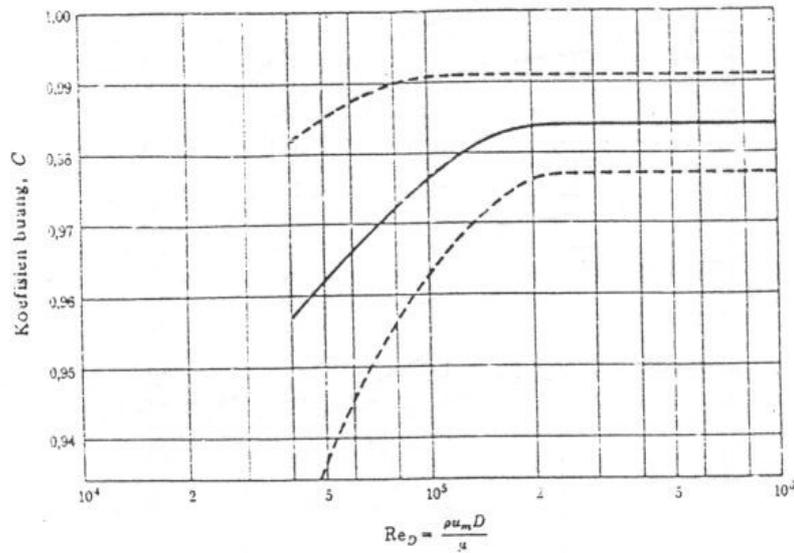
3. Titik pengambilan tekanan masuk terletak pada jarak satu diameter pipa di sebelah hulu, dan titik pengambilan tekanan keluar terletak pada vena kontrakta orifis seperti gambar 12.



Gambar 7. Perbandingan ukuran yang disarankan untuk nosel-aliran jari-jari panjang ASME.

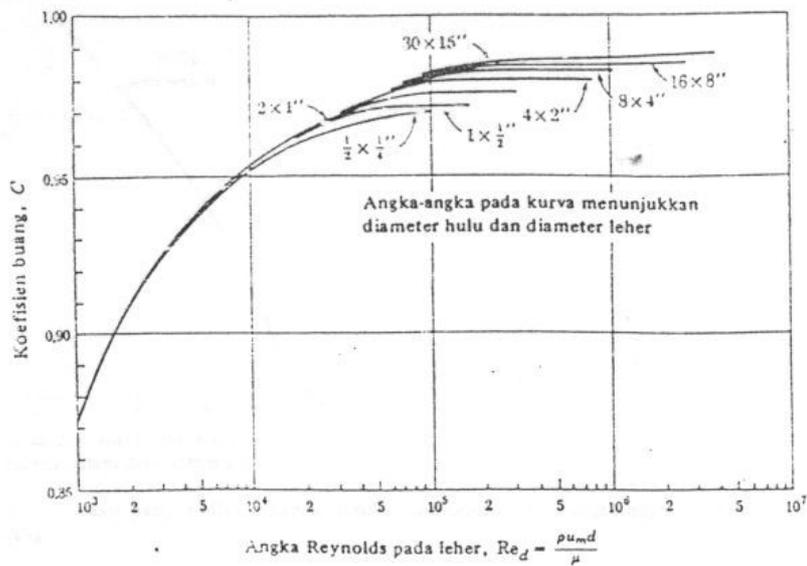


Gambar 8. Lokasi yang disarankan untuk pengambilan tekanan pada orifis konsentrik, plat tipis, pinggir siku.

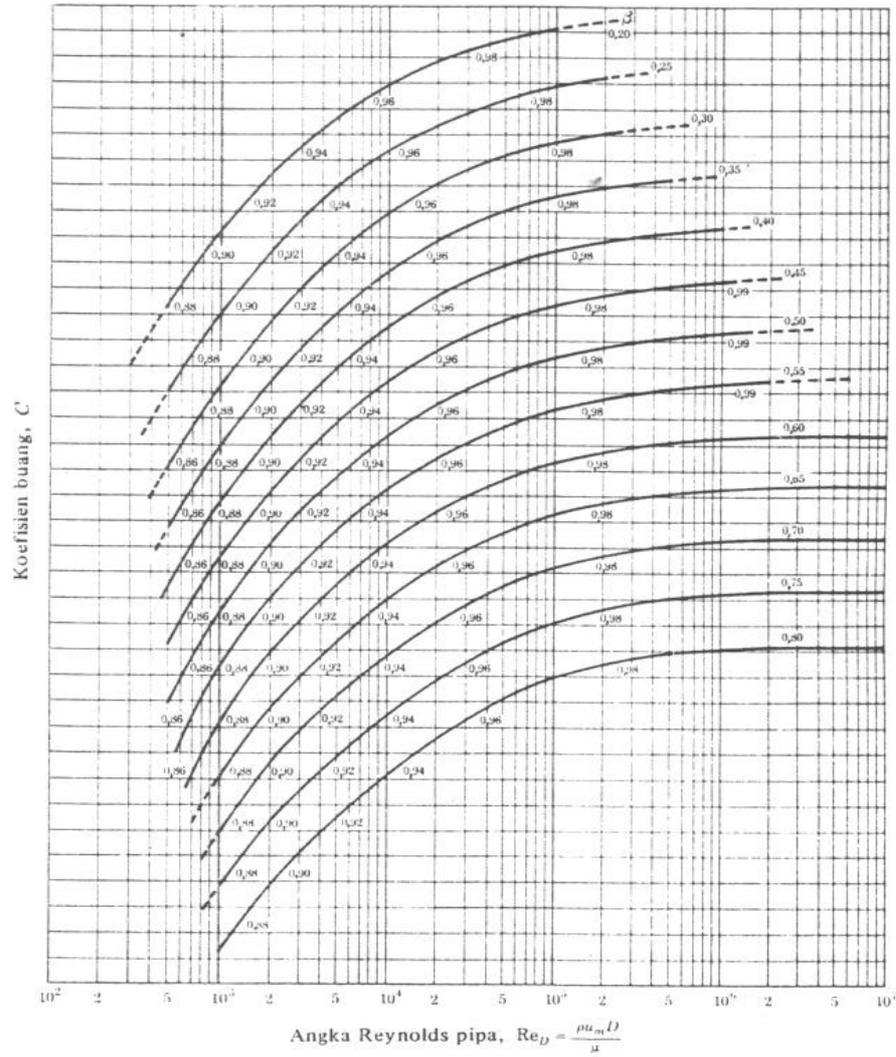


Gambar 9. Koefisien buang untuk tabung venturi pada Gambar 6, Nilai-nilai berlaku untuk $0,25 < \beta < 0,75$ dan $D > 2$ in.

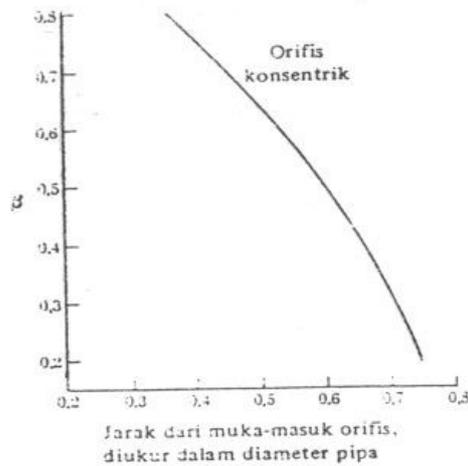
Pada gambar 13 diberikan nilai-nilai koefisien aliran orifis untuk pipa-pipa ukuran $1 \frac{1}{4}$ in sampai 3 in dengan titik pengambilan tekanan sesuai dengan kasus 2 diatas.



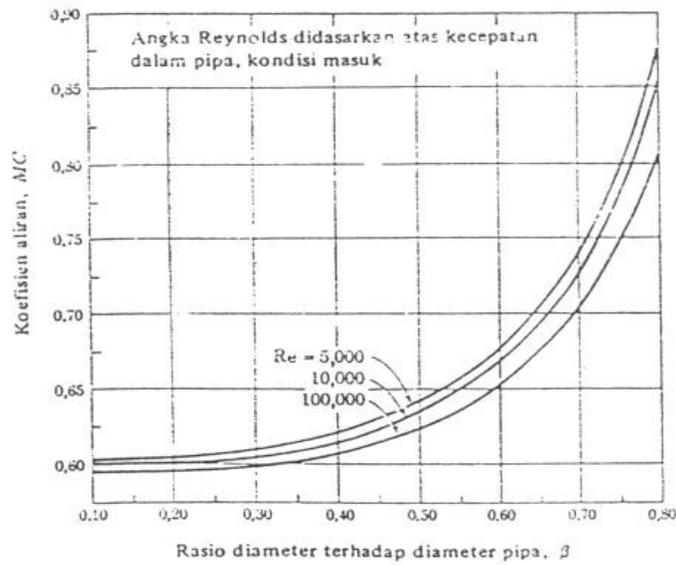
Gambar 10. Nilai kira-kira koefisien venturi untuk berbagai diameter leher.



Gambar 11. Koefisien buang untuk nosel ASME jari-jari panjang pada Gambar 7.



Gambar 12. Lokasi pengambilan tekanan untuk orifis dengan titik pengambilan tekanan pada vena kontakta.



Gambar 13. Koefisien buang untuk orifis konsentrik dalam pipa. Titik pengambilan tekanan satu diameter di sebelah sudu dan setengah diameter di sebelah hilir. Berlaku untuk $1,25 < D < 3,00$ in.

Grafik berbagai koefisien aliran diberikan sebagai fungsi angka Reynold, yang dirumuskan:

$$Re = \frac{\rho u_m d}{\mu} \quad (6-21)$$

dimana : ρ = kerapatan fluida

μ = viskositas dinamik

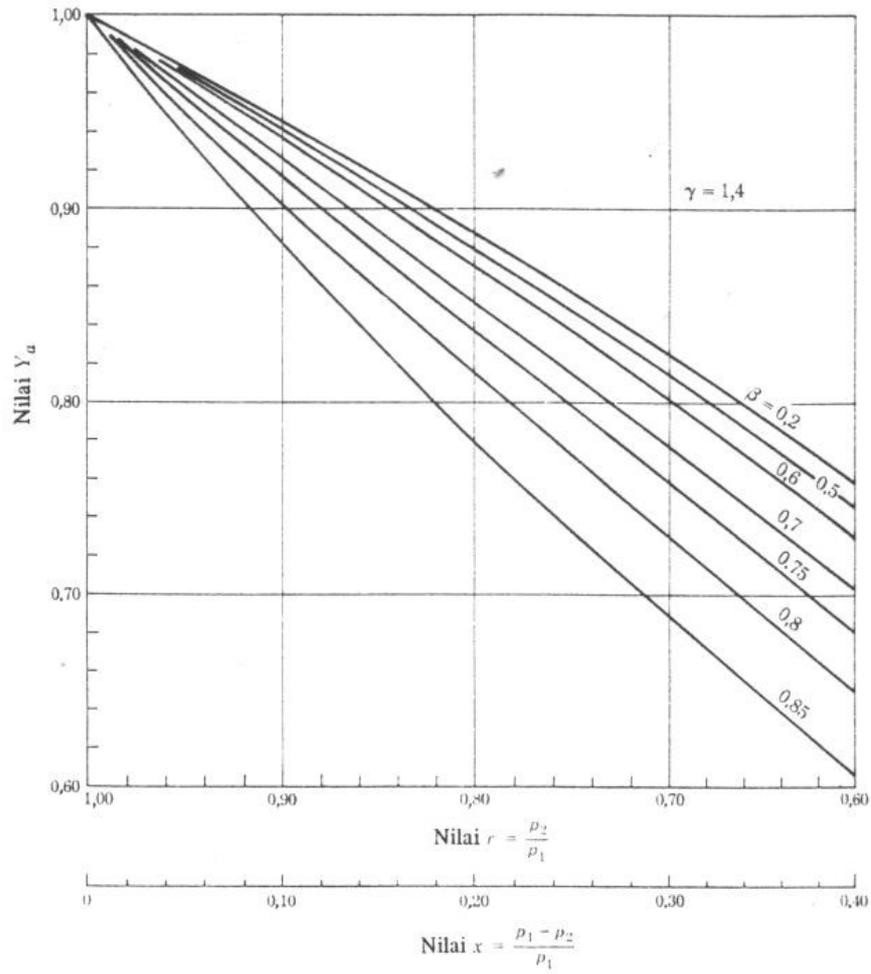
u_m = kecepatan aliran rata-rata

d = diameter pada tempat menentukan angka Reynold tsb.

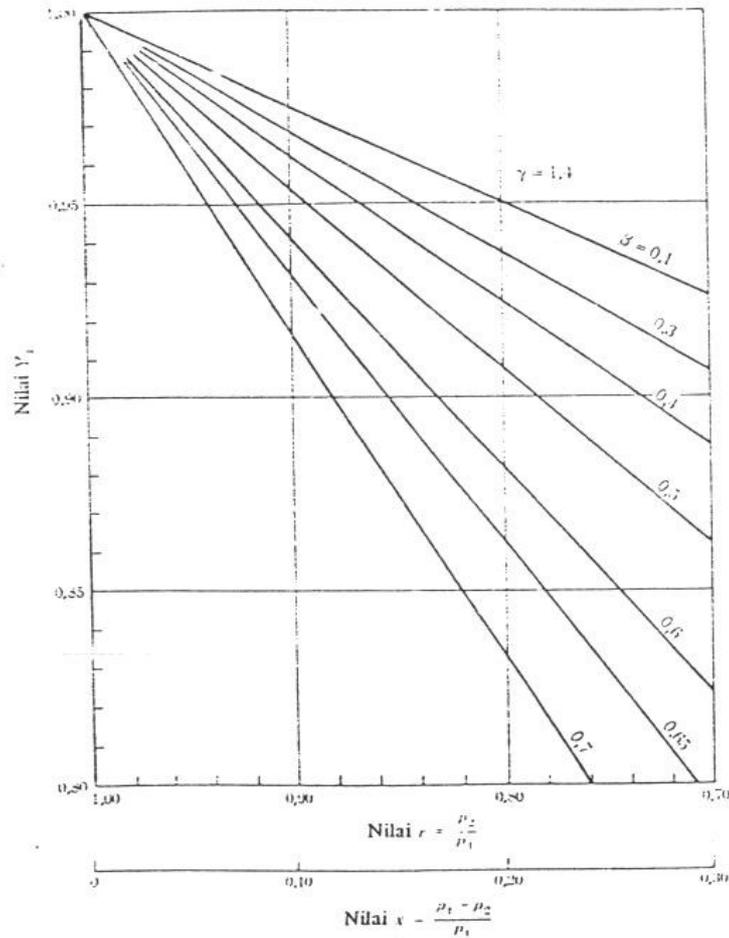
Hasil perkalian ρu_m dapat dihitung dari aliran massa menurut:

$$m = \rho u_m A_c \quad (6-22)$$

dimana A_c adalah luas penampang aliran dimana u_m diukur.



Gambar 14. Faktor ekspansi adiabatik untuk venturi dan nosel aliran.



Gambar 15. Faktor ekspansi untuk orifis pinggir-siku dengan pengambilan tekanan pipa.

Contoh 1

Sebuah tabung venturi digunakan untuk mengukur laju aliran maksimum air pada 50 gpm pada 70 °F. Angka Reynolds pada leher venturi harus sedikitnya 10^5 pada kondisi aliran ini. Dalam hal ini digunakan pengukur tekanan diferensial yang mempunyai ketelitian 0,25 % skala penuh, dan mempunyai limit skala atas sesuai dengan laju aliran maksimum. Tentukanlah ukuran venturi itu, dan jangkauan maksimum pengukur tekanan diferensial itu. Laju aliran nominal 50 dan 25 gpm. Gunakan gambar 9 atau 10 untuk menentukan koefisien buang.

Jawab:

$$p = 62,4 \text{ lbf/ft}^3 \quad \mu = 2,36 \text{ lbf/h.ft}$$

$$Re_d = \frac{\rho u_m d}{\mu} = \frac{md}{(\pi d^2 / 4)\mu} = \frac{4m}{\pi d \mu} = 10^5$$

Laju aliran maksimum adalah :

$$m = (50)(8,33)(60) = 2,5 \times 10^4 \text{ lbm/h (3,027 kg/s)}$$

maka diperoleh :

$$d_{maks} = \frac{(4)(2,5 \times 10^4)}{\pi(10^5)(2,36)} = 0,135 \text{ ft} = 1,62 \text{ in (4,11 cm)}$$

Venturi yang dipilih yaitu diameter lehernya 1,0 in karena kita punya kurva koefisien buang pada gambar 10. Diameter pipa di bagian hulu dianggap 2,0 in. Dari gambar 10 kita perkirakan koefisien buang adalah 0,976 untuk $8 \times 10^4 < Re_d < 3 \times 10^5$. Angka Reynolds leher maksimum adalah :

$$(Re_d)_{maks} = (10^5)(1,62/1,0) = 1,62 \times 10^5$$

Angka Reynolds minimum adalah setengah nilai ini, atau $8,1 \times 10^4$. Perbedaan tekanan maksimum bisa dicari dari persamaan (6-17):

$$Q_{nyata} = CMA_2 \sqrt{\frac{2g_c}{\rho}} \sqrt{p_1 - p_2}$$

$$\text{atau : } \frac{(50)(231)}{(60)(1728)} = \frac{(0,976)\pi(1,0)^2}{(4)(144)\sqrt{1 - (1/2)^2}} \sqrt{\frac{(2)(32,2)}{62,4}} \sqrt{\Delta p}$$

$$\Delta p = 948 \text{ psf} = 6,58 \text{ psi (45,4 kPa)}$$

Nosel Sonik

Meter rintangan yang telah dibahas bisa digunakan untuk gas. Bila laju aliran cukup besar, perbedaan tekanan cukup besar sehingga akan bisa menghasilkan aliran sonik (sonic flow) pada luas aliran minimum. Pada kondisi ini aliran kita katakan tercekik (choked), dan laju aliran mencapai nilai maksimum pada kondisi masuk tertentu.

Untuk gas ideal, kalor spesifik konstan dan aliran isentropik, rasio tekanan adalah:

$$\frac{p_2}{p_1} \Big|_{\text{kritis}} = \left[\frac{2}{\gamma + 1} \right]^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (6-23)$$

rasio tekanan diatas disebut *rasio tekanan kritis*. Bila persamaan diatas disisipkan ke persamaan (6-8) didapatkan laju aliran massa:

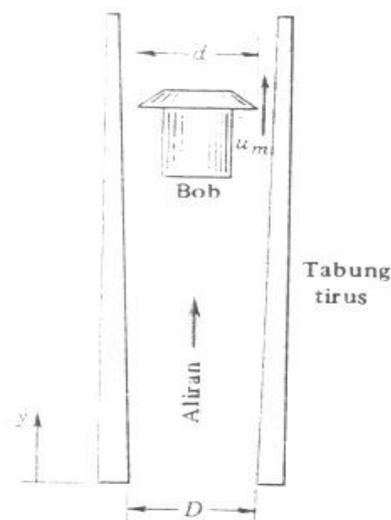
$$m = A_2 p_1 \sqrt{\frac{2g_c}{RT_1} \frac{\gamma}{\gamma+1} \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{2/(\gamma-1)}} \quad (6-24)$$

Persamaan (6-24) sering digunakan untuk nosel dengan rasio tekanan kecil dari rasio tekanan kritis. Pada kondisi ini aliran ideal hanya bergantung pada kondisi stagnasi masuk p_1 dan T_1 .

Laju aliran nosel sonik ideal seperti persamaan (6-24) harus diubah dengan kondisi buang yang tepat yang merupakan fungsi geometri nosel dan faktor-faktor lain. Biasanya kondisi buang sekitar 0,97.

Pengukuran Aliran Dengan Efek Seret

Rotameter yang diperlihatkan pada gambar 16, merupakan piranti aliran yang lazim dipakai. Aliran masuk melalui bagian bawah tabung vertikal tirus dan menyebabkan *bob* atau *apung* bergerak ke atas. Bob akan bergerak ke atas sampai gaya seret (drag force) seimbang dengan gaya apung. Posisi bob digunakan sebagai penunjuk laju aliran.



Gambar 16. Skema rotameter.

Neraca gaya pada bob memberikan:

$$F_d + \rho_f V_b \frac{g}{g_c} = \rho_b V_b \frac{g}{g_c} \quad (6-25)$$

dimana: ρ_f = kerapatan fluida

ρ_b = kerapatan bob

V_b = volume total bob

g = percepatan gravitasi

F_d = gaya seret

Gaya seret dirumuskan:

$$F_d = C_d A_b \frac{\rho_f u_m^2}{2g_c} \quad (6-26)$$

dimana: C_d = koefisien seret

A_b = luas frontal bob

u_m = kecepatan aliran rata-rata dalam ruang anulus antara bob dan tabung

Gabungan persamaan (6-25) dan (6-26) memberikan:

$$u_m = \frac{1}{C_d} \frac{2gV_b}{A_b} \frac{\rho_b}{\rho_f} - 1 \quad (6-27)$$

atau: $Q = Au_m = A \frac{1}{C_d} \frac{2gV_b}{A_b} \frac{\rho_b}{\rho_f} - 1 \quad (6-28)$

dan: $A = \pi/4 [(D + ay)^2 - d^2] \quad (6-29)$

dimana A = luas anulus dan diberikan oleh:

D = diameter pada pintu masuk tabung

d = diameter maksimum bob

y = jarak vertikal dari pintu masuk

a = konstanta yang menunjukkan tirus tabung.

Koefisien seret biasanya tergantung pada viskositas, namun pada bob-bob khusus mempunyai koefisien seret konstan. Jika kwadrat pada persamaan (6-29) mempunyai hubungan linier, aliran massa menjadi:

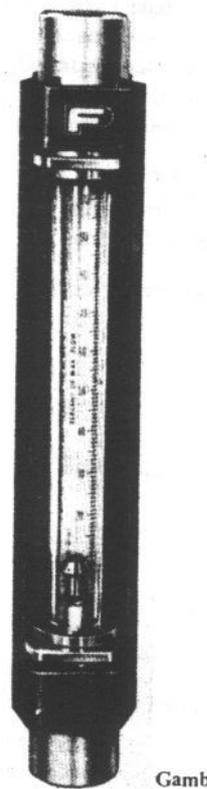
$$m = C_1 y \sqrt{(\rho_b - \rho_f) \rho_f} \quad (6-30)$$

dimana C_1 adalah konstanta meter yang semestinya.

Jika penunjukan tidak tergantung kerapatan dimana didapatkan $\rho_b = 2\rho_b$ maka aliran massa adalah:

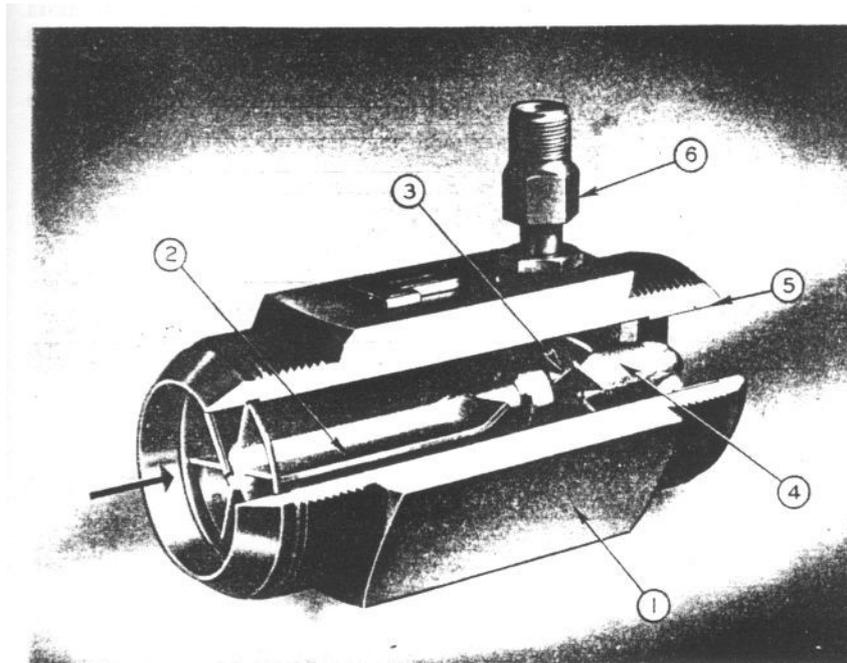
$$m = \frac{C_1 y \rho_b}{2} \quad (6-32)$$

Gambar 17 memperlihatkan foto rotameter komersial dan gambar 18 adalah adalah pengukur aliran meter turbin.



Gambar

Gambar 17. Foto rotameter komersial.



Gambar 18. Meter aliran turbin. (1) Badan meter; (2) sudu pelurus aliran masuk. (3) sudu turbin. (4) pelengkap badan bagian hilir untuk menjaga kehalusan aliran. (5). penghubung pipa atau tabung. (6) pemungut reluctance.

Anemometer Kawat Panas

Prinsip anemometer kawat panas adalah sebuah kawat halus dipanaskan dengan listrik, ditempatkan di dalam arus aliran. Laju perpindahan kalor dari kawat dinyatakan:

$$q = (a + bu^{0.5})(T_w - T_\infty) \quad (6-34)$$

Laju perpindahan kalor diberikan juga oleh:

$$q = i^2 R_w = i^2 R_0 [1 + \alpha(T_w - T_0)] \quad (6-35)$$

dimana : T_w = suhu kawat

T_∞ = suhu arus-bebas fluida itu

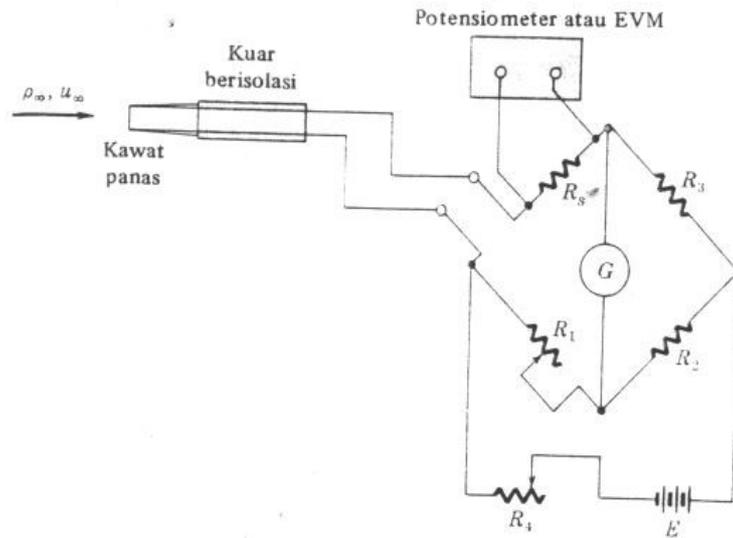
u = kecepatan fluida

a, b = konstanta yang didapatkan dari kalibrasi piranti.

i = arus listrik

R_0 = tahanan kawat pada suhu rujukan

α = koefisien suhu tahanan tersebut.



Gambar 20. Skema rangkaian pengukuran kawat-panas.

Pada waktu pengukuran, kawat panas dihubungkan dengan rangkaian jembatan seperti gambar 20. Arus ditentukan dengan mengukur penurunan tegangan melintas tahanan standar R_s , dan tahanan kawat ditentukan dari rangkaian jembatan.

Meter Aliran Magnetik

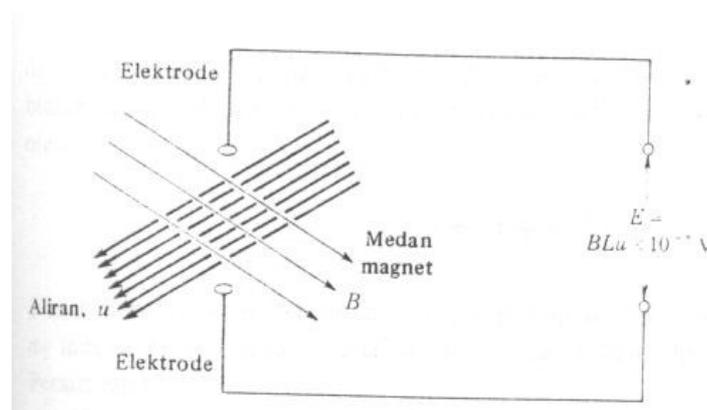
Jika aliran suatu fluida yang bersifat menghantar melalui medan magnet seperti yang ditunjukkan gambar 23, terjadi tegangan induksi yang besarnya:

$$E = BLu \times 10^{-8} \text{ V} \tag{6-38}$$

dimana: B = kerapatan fluks magnet, gauss

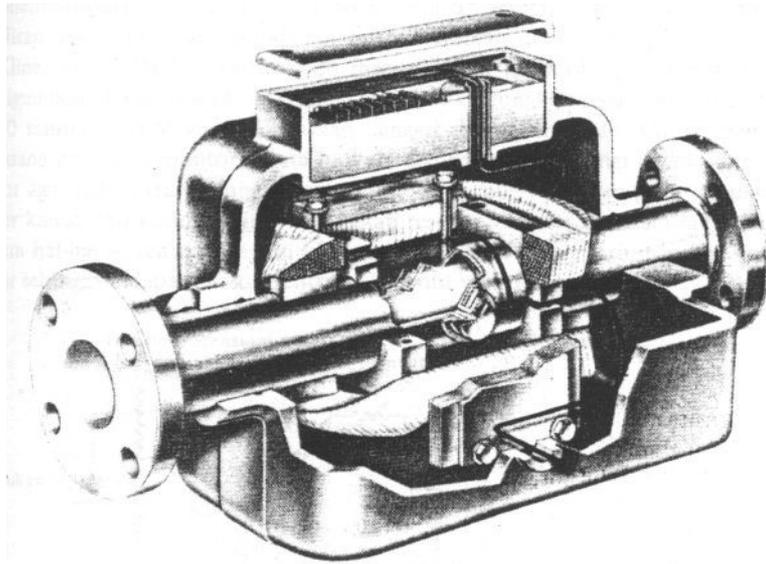
u = kecepatan konduktor, cm/s

L = panjang konduktor, cm



Gambar 23. Aliran fluida-penghantar melalui medan magnet.

Gambar 24 memperlihatkan konstruksi meter-aliran magnetik komersial.



Gambar 24. Konstruksi meter aliran-magnetik niaga untuk pengukuran fluida konduktivitas rendah.

Soal-soal

1. Apakah metode-metode dasar yang digunakan untuk mengkalibrasi piranti-piranti pengukuran aliran?
2. Apa yang dimaksud dengan meter-aliran anjakan positif?
3. Apakah keuntungan-keuntungan relatif dari venturi, orifis dan meter nosel aliran?
4. Mengapakah rotameter disebut meter seret? Dapatkah ia dinamakan meter area (area meter) ?
5. Bagaimanakah penggunaan anemometer kawat panas ?
6. Sebuah venturi meter hendak digunakan untuk mengukur aliran udara pada 300 psia dan 80 °F. Laju aliran maksimum adalah 1,0 lbm/s. Laju aliran minimum ialah 30 persen dari nilai tersebut. Tentukan ukuran venturi sehingga angka Reynolds pada leher tidak kurang dari 10^5 . Hitunglah tekanan diferensial melintas venturi itu untuk aliran massa 0,3; 0,5; 0,7; dan 1,0 lbm/s. Andaikan $\beta = 0,5$ untuk venturi itu.
7. Sebuah rotameter digunakan untuk pengukuran aliran udara pada 100 psia dan 70 °F. Laju aliran maksimum ialah 0,03 lbm/s, diameter lubang masuk meter ialah 1 in, dan panjang meter 12 in. Bob dibuat sedemikian rupa hingga kerapatannya lima kali kerapatan udara dan volumenya 1 in³. Hitunglah tirus tabung untuk koefisien seret 0,4; 0,8; dan 1,2 dan tentukan konstanta-meter untuk penggunaan dalam persamaan (6-30). Gambarkan grafik kesalahan yang diakibatkan oleh penggunaan persamaan (6-30) sebagai fungsi laju aliran.

BAB VII

PENGUKURAN SUHU

Skala Suhu

Skala suhu yang banyak digunakan adalah Fahrenheit dan Celsius. Skala Celsius absolut disebut Kelvin dan skala Fahrenheit absolut disebut Rankine. Titik didih air pada 1 atm secara sembarang dianggap 100° pada skala Celsius dan 212° pada skala Fahrenheit. Hubungan skala keduanya dirumuskan:

$$^\circ\text{F} = 32,0 + 9/5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (7-2a)$$

$$^\circ\text{R} = 9/5 \text{ K} \quad (7-2b)$$

Termometer Gas Ideal

Sifat gas ideal pada tekanan rendah dapat digunakan sebagai dasar bagi piranti pengukuran suhu yang boleh dipakai sebagai standar eksperimental sekunder. Persamaan gas ideal:

$$pv = mRT \quad (7-3)$$

dimana V = volume yang diisi gas

m = massa

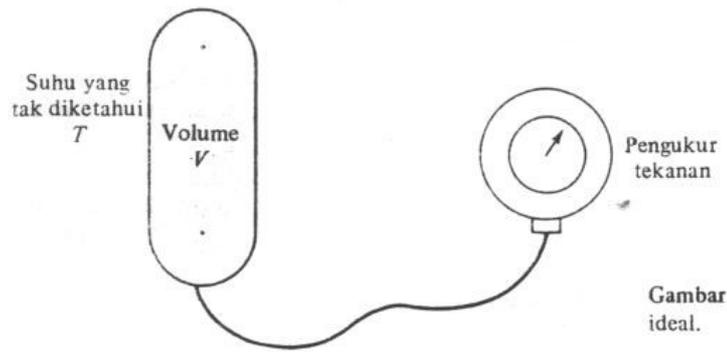
R = konstanta gas = \mathcal{R}/M

\mathcal{R} = konstanta gas universal = 8314,5 J/kg.mol.K

M = bobot molekul gas

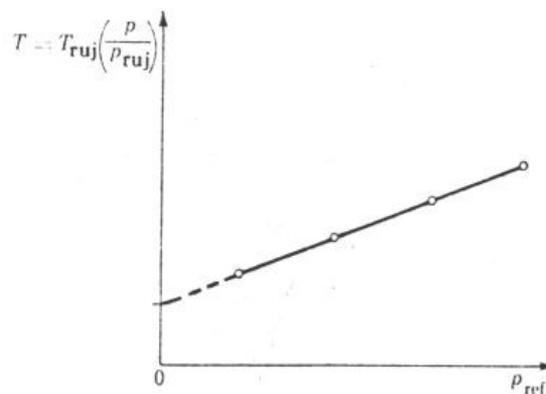
Pada termometer gas terdapat suatu volume tetap berisi gas dan dikenakan pada suhu yang diukur, seperti gambar 2. Pada T tekanan sistem gas itu diukur, kemudian volume ditempatkan di dalam suhu rujukan standar dan tekanannya diukur pada kondisi ini. Maka pada volume konstan:

$$T = T_{ruj} \left[\frac{p}{p_{ruj}} \right]_{volkonst} \quad (7-4)$$



Gambar 2. Skema termometer gas ideal.

Bila pengukuran diulangi untuk berbagai tekanan, akan didapatkan kurva seperti gambar 3. Bila kurva diekstrapolasi ke tekanan nol, akan didapat suhu sebenarnya sesuai dengan yang didefinisikan oleh persamaan-persamaan gas ideal.



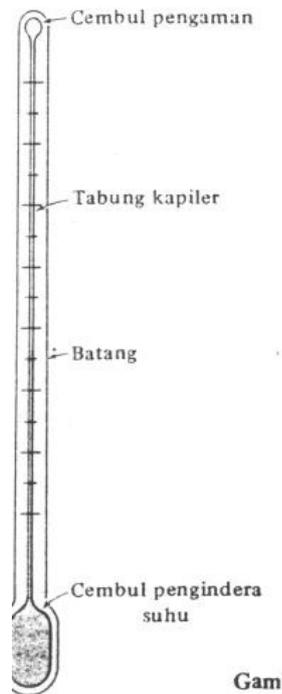
Gambar 3. Hasil pengukuran dengan termometer gas-ideal.

Pengukuran Suhu Dengan Efek Mekanik

Dalam pengertian ini kita membicarakan tentang piranti-piranti yang bekerja atas dasar perubahan dimensi mekanik karena perubahan suhu.

Termometer cair di dalam gelas merupakan jenis piranti pengukuran suhu yang paling umum. Konstruksinya bisa dilihat pada gambar 8.4. Sebuah cembul ditempatkan dibawah untuk menampung sebagian besar zat cair yang memuai bila dipanaskan, dan akan mengisi tabung kapiler yang telah diberi garis-garis penanda skala. Pada bagian atas tabung kapiler ada sebuah cembul lagi yang gunanya sebagai pengaman bilamana jangkauan suhu termometert terlampaui. Zat cair yang umum digunakan adalah alkohol dan raksa. Alkohol mempunyai

keunggulan karena mempunyai indeks muai yang lebih besar dari raksa akan tetapi mempunyai keterbatasan untuk pengukuran suhu rendah karena mudah mendidih pada suhu tinggi. Raksa mempunyai titik beku -38,78 °F (37,8 °C sehingga tidak bisa digunakan untuk suhu dibawah angka tersebut.



Gambar 4. Skema termometer raksa dalam gelas.

Termometer raksa dalam gelas biasanya dipakai sampai kira-kira 600 °F (315 °C), tetapi jangkauannya bisa diperluas hingga 1000 °F (538 °C) dengan jalan mengisi ruang diatas raksa dengan gas nitrogen, umpamanya. Hal ini akan meningkatkan tekanan diatas raksa, menaikkan titik didihnya, dan dengan demikian memungkinkan penggunaannya untuk suhu lebih tinggi.

Metode lain yang banyak digunakan adalah *bilah dwi logam* (bi metallic strip). Dua keping logam yang mempunyai koefisien ekspansi/muai termal yang berbeda diikat sehingga membentuk piranti seperti pada Gambar 5. Bila bilah dikenai suhu lebih tinggi dari suhu pengikatannya, ia akan membengkok ke satu arah, bila dikenai suhu yang lebih rendah ia akan membengkok ke arah yang lainnya. . Jari-jari pembengkokan dapat dihitung dengan :

$$r = \frac{t\{3(1+m)^2 + (1+mn)[m^2 + (1/mn)]\}}{6(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)(1+m)^2} \quad (7-5)$$

dimana : t = tebal gabungan bilah terikat

m = perbandingan tebal bahan ekspansi rendah dengan bahan ekspansi tinggi

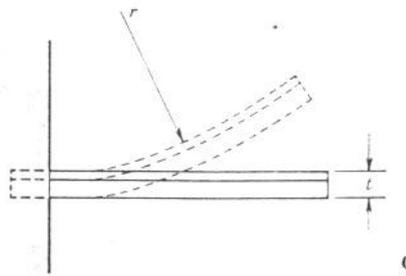
n = Perbandingan modulus elastisitas bahan ekspansi rendah dengan bahan ekspansi tinggi

α_1 = koefisien ekspansi yang rendah

α_2 = koefisien ekspansi yang tinggi

T = suhu

T_0 = suhu pengikatan awal



Gambar 5. Bilah dwi-logam.

Koefisien ekspansi bahan yang umum digunakan diberikan oleh tabel 1.

Tabel 1. Sifat-sifat mekanik beberapa bahan yang lazim dipakai.

Bahan	Koefisien ekspansi termal per °C	Modulus elastisita, psi	GN/m ²
Invar	$1,7 \times 10^{-6}$	$21,4 \times 10^6$	147
Kuningan kuning	$2,02 \times 10^{-5}$	$14,0 \times 10^6$	96,5
Monel 400	$1,35 \times 10^{-5}$	$26,0 \times 10^6$	179
Inconel 702	$1,25 \times 10^{-5}$	$31,5 \times 10^6$	217
Baja anti karat 316	$1,6 \times 10^{-5}$	28×10^6	193

Contoh 1

Sebuah bilah dwi logam terbuat dari bilah kuningan kuning dan Invar yang terikat satu sama lain pada 30 °C. Masing-masing bilah tebalnya 0,3 mm. Hitunglah jari-jari pembengkokkan bila bilah itu dikenakan pada suhu 100 °C.

Jawab:

Kita gunakan persamaan (7-5) dengan sifat-sifat dari tabel 1.

$$T - T_0 = 100 - 30 = 70 \text{ °C}$$

$$m = 1,0$$

$$n = 147/96,5 = 1,52$$

$$\alpha_1 = 1,7 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_2 = 2,02 \times 10^{-5} /^{\circ}\text{C}$$

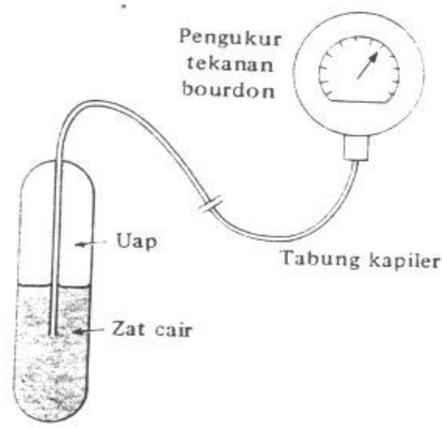
$$t = (2)(0,3 \times 10^{-3}) = 0,6 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Jadi:

$$r = \frac{(0,6 \times 10^{-3})[(3)(2)^2 + (1+1,52)(1+1/1,52)]}{6(2,02 - 0,17)(10^{-5})(70)(2)^2}$$

$$= 0,312 \text{ m}$$

Termometer ekspansi fluida adalah jenis pengukur suhu lainnya yang paling ekonomis, dan serbaguna (Gambar 6). Sebuah cembul yang berisi zat cair, gas atau uap dicelupkan ke dalam lingkungan. Cembul dihubungkan dengan sebuah tabung kapiler dan piranti pengukur tekanan (seperti tabung bourdon dsb). Kenaikan suhu menyebabkan zat cair atau gas memuai, dan karenanya menaikkan tekanan pada pengukur, tekanan ini lalu digunakan sebagai penunjuk suhu.



Gambar 6. Termometer ekspansi-fluida.

PENGUKURAN DENGAN EFEK LISTRIK

Metode-metode listrik untuk pengukuran suhu sangat menyenangkan kalau memberikan sinyal yang mudah dideteksi, diperkuat atau digunakan untuk tujuan pengendalian. Metode listrik biasanya cukup teliti bila telah dikalibrasi dengan baik.

Termometer Tahanan Listrik

Alat ini menggunakan tahanan listrik yang dikenakan pada suhu yang akan diukur. Perubahan suhu ditunjukkan dengan perubahan nilai tahanan. Beberapa jenis bahan yang digunakan sebagai tahanan diperlihatkan pada tabel 2. Koefisien suhu linier tahanan α didefinisikan sebagai :

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (7-6)$$

dimana: R_2 dan R_1 masing-masing ialah tahanan bahan pada suhu T_2 dan T_1 . Hubungan persamaan (7-6) berlaku untuk jangkauan suhu yang sempit. Untuk jangkauan suhu yang lebih luas, tahanan bahan biasanya dinyatakan dengan suatu hubungan kuadrat:

$$R = R_0(1 + aT + bT^2) \quad (7-7)$$

dimana: R = tahanan pada suhu T

R_0 = tahanan pada suhu rujukan T_0

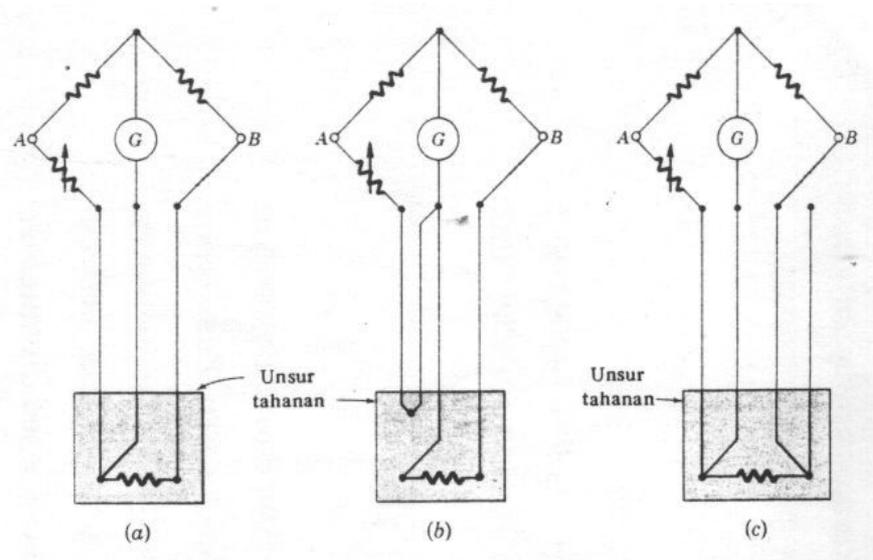
a, b = konstanta yang ditentukan dengan eksperimen

Tabel 2. Koefisien suhu-tahanan dan resistivitas pada 20 °C.

Bahan	$\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	$\rho(\mu\Omega.\text{cm})$
Nikel	0,0067	6,85
Besi (paduan)	0,002 sampai 0,006	10
Wolfram	0,0048	5,65
Aluminium	0,0045	2,65
Tembaga	0,0043	1,67
Timbal	0,0043	20,6
Perak	0,0041	1,59
Emas	0,004	2,35
Platina	0,00392	10,5
Raksa	0,00099	98,4
Manganin	$\pm 0,00002$	44
Karbon	- 0,0007	1400
Elektrolit	- 0,02 sampai - 0,09	bergantung
Semikonduktor (termistor)	- 0,068 sampai + 0,14	10^9

Termometer tahanan platina digunakan untuk skala suhu Internasional antara titik oksigen dan titik antimonium. Salah satu sumber utama kesalahan dalam termometer listrik ialah efek tahanan kawat-kawat penghubung antara

unsur-unsur dan pada rangkaian jembatan. Untuk mengoreksi efek ini digunakan beberapa macam susunan seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Metode-metode koreksi tahanan kawat pada termometer tahanan-listrik. (a) susunan tiga kawat Siemen. (b). susunan empat kawat Callender; ©. susunan potensial mengapung. Hubungan daya dilakukan pada A dan B.

Susunan tiga kawat Siemen merupakan jenis rangkaian koreksi yang paling sederhana. Pada kondisi seimbang kawat tengah tidak membawa arus, dan efek tahanan kedua kawat lain saling menghilangkan.

Contoh 2

Sebuah termometer tahanan platina digunakan pada suhu kamar. Andaikan variasi suhu dengan tahanan bersifat linier, hitunglah kepekaan termometer itu dalam ohm per derajat Fahrenheit.

Jawab:

Variasi tahanan linier dengan suhu:

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

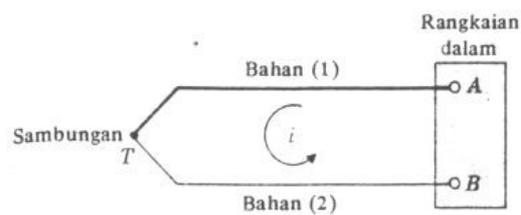
dimana R_0 adalah tahanan pada suhu rujukan T_0 . Jadi kepekaan adalah :

$$S = \frac{dR}{dT} = \alpha R_0$$

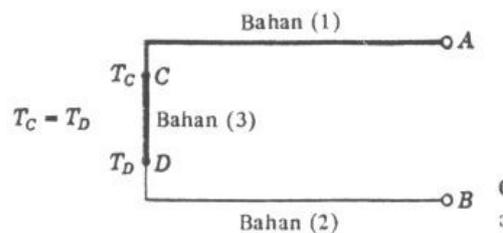
R_0 bergantung pada panjang dan besar kawat tahanan. Pada suhu kamar $\alpha = 0,00392 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} = 0,00218 \text{ } ^\circ\text{F}^{-1}$ untuk platina.

Efek Termoelektrik

Metode listrik yang paling umum digunakan untuk pengukuran suhu adalah *termokopel*. Bila dua logam disatukan seperti yang ditunjukkan gambar 12 maka akan timbul tegangan gerak elektrik atau disingkat *tge* antara dua titik A dan B yang merupakan fungsi suhu sambungan. Fenomena ini disebut efek Seebeck.



Gambar 12. Sambungan dari dua logam yang sama menunjukkan efek termoelektrik.

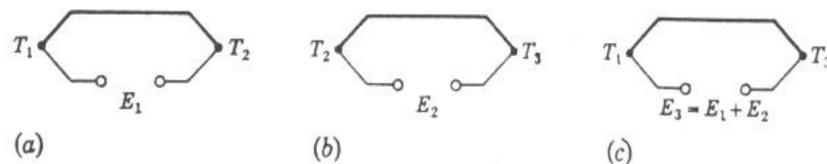


Gambar 13. Pengaruh logam ketiga dalam rangkaian termoelektrik; hukum logam antara.

Jika kedua bahan dihubungkan dengan rangkaian luar sehingga arus mengalir, *tge* bisa berubah sedikit karena fenomena yang disebut efek Peltier. Selanjutnya jika terdapat gradien suhu pada salah satu atau kedua bahan, *tge* sambungan akan berubah sedikit lagi, hal ini disebut efek Thomson. Jika *tge* yang dibangkitkan pada persambungan dua logam tidak sama diukur sebagai fungsi suhu, maka sambungan tersebut bisa digunakan untuk mengukur suhu. Dalam praktek harus diperhitungkan juga pengaruh kawat-kawat penghubung dengan pengukur tegangan, karena bisa mempengaruhi besar *tge* pada sambungan.

Ada dua kaedah yang digunakan dalam analisis rangkaian termoelektrik:

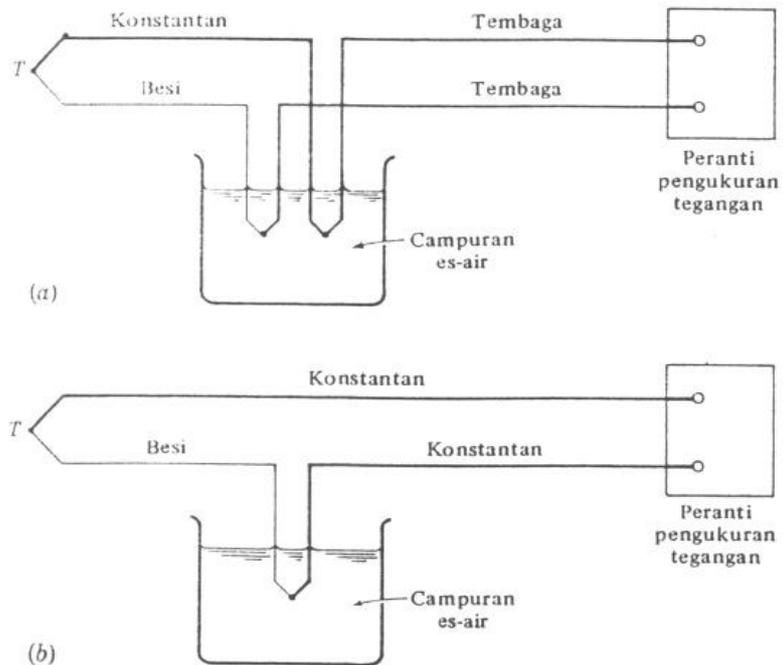
1. Jika logam ketiga dihubungkan seperti gambar 13, tge neto rangkaian tidak terpengaruh selama sambungan baru itu berada pada suhu yang sama. Pernyataan ini dapat dibuktikan dengan bantuan hukum kedua termodinamika dan dikenal dengan hukum *logam-antara*.
2. Perhatikan gambar 14, rangkaian-rangkaian tersebut terbuat dari logam-logam yang sama, tetapi beroperasi pada suhu yang berbeda. Gambar 14a membangkitkan tge E_1 antara T_1 dan T_2 , gambar 14b membangkitkan tge E_2 antara T_2 dan T_3 . *Hukum suhu-antara* menunjukkan bahwa rangkaian yang sama ini akan membangkitkan tge $E_3 = E_1 + E_2$ bila beroperasi antara suhu T_1 dan T_3 , seperti terlihat pada gambar 14c.



Gambar 14. Rangkaian-rangkaian yang menjelaskan hukum suhu-antara.

Jadi terlihat bahwa pada termokopel sedikitnya harus mempunyai dua sambungan. Jika satu suhu sambungan diketahui, maka suhu sambungan lainnya bisa dihitung dengan menggunakan sifat termoelektrik bahan. Suhu yang diketahui disebut suhu rujukan. suhu rujukan biasanya diambil dari *bak es* yang terdiri atas es dan air suling jenuh udara pada tekanan atmosfer dan suhu $32\text{ }^\circ\text{F}$ (gambar 15). Pada gambar 15a dimana kedua kawat termokopel selalu berada pada suhu rujukan, digunakan jika titik-titik hubung instrumen pengukur tegangan berada pada suhu yang berlainan. Sedangkan pada gambar 15b memadai jika titik-titik hubung berada pada suhu yang sama.

Tabel 3 adalah tabel berisikan besarnya tge termal termokopel standar dengan suhu rujukan $32\text{ }^\circ\text{F}$ ($0\text{ }^\circ\text{C}$). Gambar 16 adalah grafik tge terhadap suhu untuk beberapa termokopel.



Gambar 15. Metode-metode konvensional untuk memantapkan suhu rujukan dalam rangkaian termokopel. Contoh menunjukkan termokopel besi-konstantan.

Tegangan keluaran rangkaian termokopel sederhana biasanya ditulis dalam bentuk :

$$E = AT + \frac{1}{2} BT^2 + \frac{1}{3} CT^3 \quad (7-10)$$

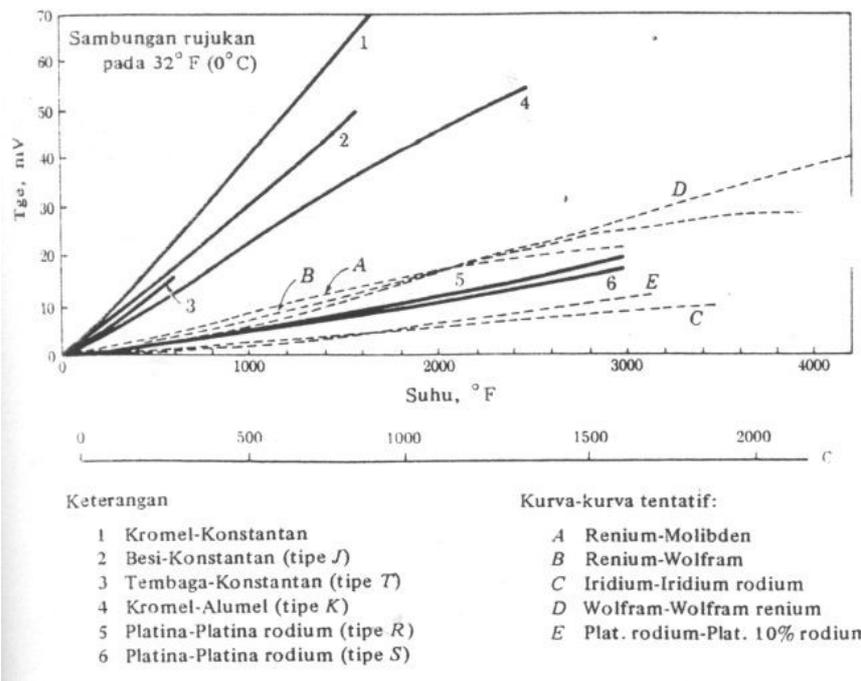
dimana : T adalah suhu (dalam derajat Celsius) dan E didasarkan pada suhu sambungan rujukan pada 0°C . Konstanta A , B dan C tergantung dari bahan termokopel.

Sensitivitas (kepekaan) atau daya termoelektrik termokopel diberikan oleh:

$$S = \frac{dE}{dT} = A + BT + CT^2 \quad (7-11)$$

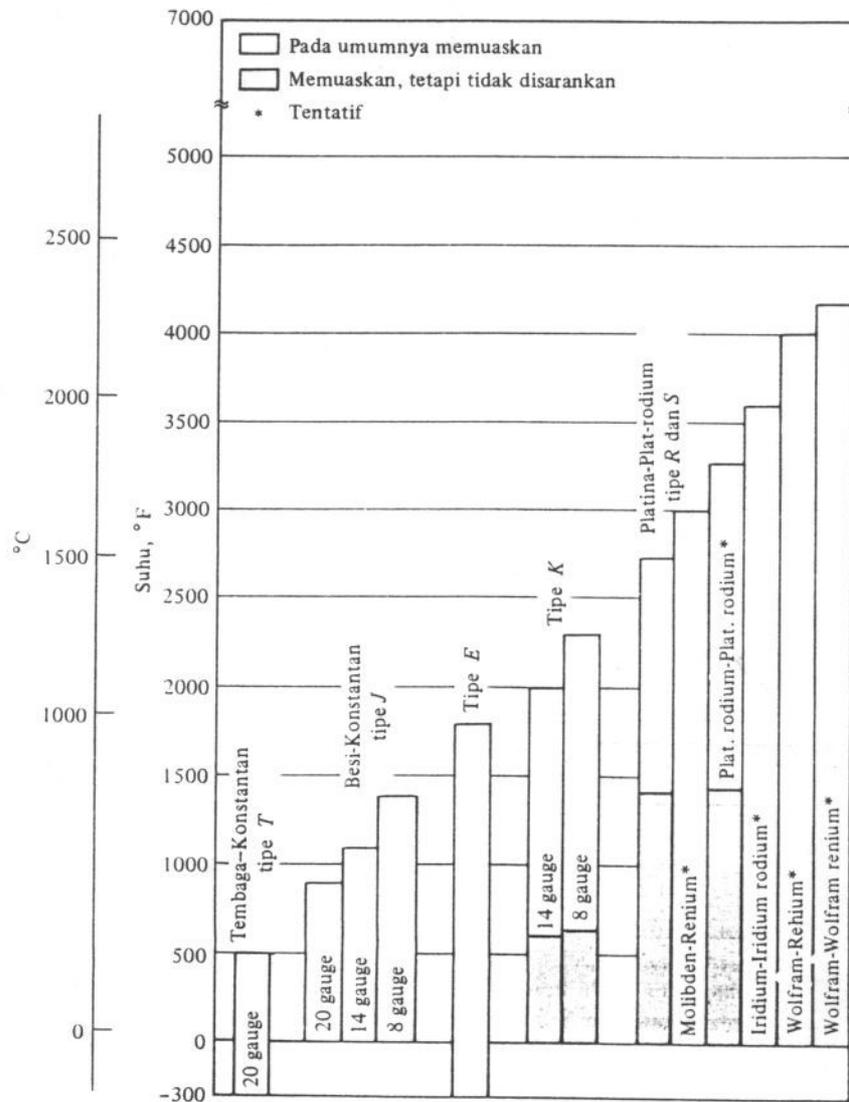
Tabel 8-3. Tge termal dalam milivolt absolut untuk kombinasi termokopel yang lazim. (Sambungan rujukan pada 0°C).

Suhu		Tembaga vs. konstantan (T)	Kromel vs. konstantan (E)	Besi vs. konstantan (J)	Kromel vs. alumel (K)	Platina vs. platina 10% rodium (S)
F	C					
-300	-184,4	-5,341	-8,404	-7,519	-5,632	
-250		-4,745	-7,438	-6,637	-5,005	
-200	-128,9	-4,419	-6,471	-5,760	-4,381	
-150		-3,365	-5,223	-4,623	-3,538	
-100	-73,3	-2,581	-3,976	-3,492	-2,699	
-50		-1,626	-2,501	-2,186	-1,693	
0	-17,8	-0,674	-1,026	-0,885	-0,692	-0,092
50		0,422	0,626	0,526	0,412	0,064
100	37,8	1,518	2,281	1,942	1,520	0,221
150		2,743	4,075	3,423	2,667	0,408
200	93,3	3,967	5,869	4,906	3,819	0,597
250		5,307	7,788	6,425	4,952	0,807
300	148,9	6,647	9,708	7,947	6,092	1,020
350		8,085	11,728	9,483	7,200	1,247
400	204,4	9,523	13,748	11,023	8,314	1,478
450		11,046	15,844	12,564	9,435	1,718
500	260,0	12,572	17,942	14,108	10,560	1,962
600		15,834	22,287	17,178	12,865	2,472
700	371,1	19,095	26,637	20,253	15,178	2,985
800			31,108	23,338	17,532	3,524
1000	537,8		40,056	29,515	22,251	4,609
1200			48,927		26,911	5,769
1500	815,6		62,240		33,913	7,514
1700					38,287	8,776
2000	1093,3				44,856	10,675
2500	1371,1				54,845	14,018
3000	1648,9					17,347



Gambar 16. Hubungan suhu tge untuk bahan-bahan termokopel, elektrode positif didaftarkan lebih dahulu.

Tabel 4 memberikan nilai-nilai kira-kira kepekaan berbagai bahan dibandingkan dengan bahan platina pada 0 °C. Gambar 17 adalah rangkuman jangkauan operasi beberapa termokopel.



Gambar 17. Rangkuman jangkauan operasi termokopel. Lihat juga gambar 16.

Tabel 8-4. Sensitivitas termoelektrik $S = dE/dT$ termoelemen yang terbuat dari bahan-bahan dalam daftar, terhadap platina, $\mu V^{\circ}C^{-1}$ †
(Sambungan rujukan pada suhu $0^{\circ}C$)

Bismut	- 72	Perak	6,5
Konstantan	- 35	Tembaga	6,5
Nikel	- 15	Emas	6,5
Kalium	- 9	Wolfram	7,5
Natrium	- 2	Kadmium	7,5
Platina	0	Besi	18,5
Raksa	0,6	Nikrom	25
Karbon	3	Antimonium	47
Aluminium	3,5	Germanium	300
Timbal	4	Silikon	440
Tantalum	4,5	Telurium	500
Rodium	6	Selenium	900

Contoh 3:

Sebuah termokopel besi-konstantan dihubungkan dengan termokopel yang terminalnya berada pada $75^{\circ}F$. Bacaan potensiometer ialah $3,59\text{ mV}$. Berapakah suhu pada sambungan termokopel?

Jawab:

Potensial termoelektrik pada $75^{\circ}F$ didapatkan dari tabel 3.

$$E_{75} = 1,234\text{ mV}$$

Tge termokopel didasarkan atas suhu rujukan $0^{\circ}C$ adalah:

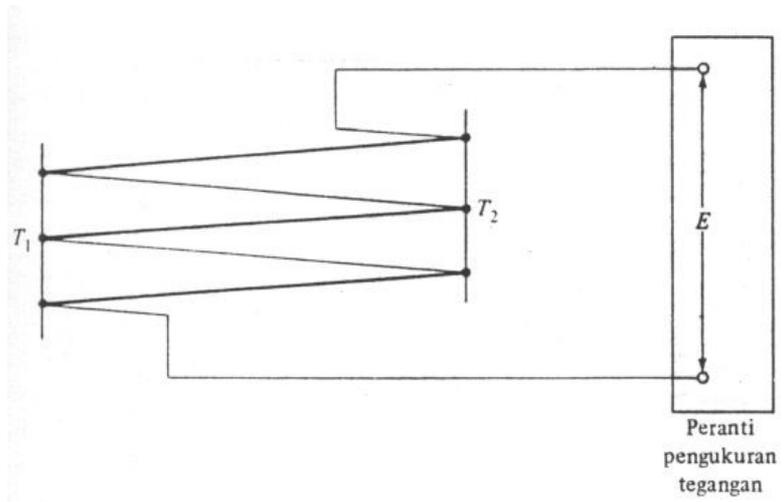
$$E_T = 1,234 + 3,59 = 4,824\text{ mV}$$

Dari tabel 3, suhu sambungan adalah $197^{\circ}F$.

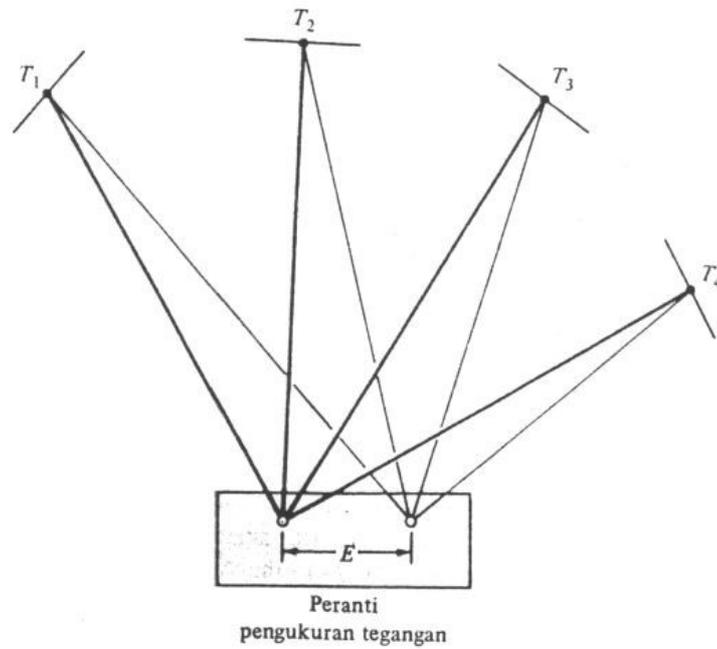
Untuk mendapatkan rangkaian yang lebih peka, termokopel bisa dihubungkan secara seri (contohnya seperti gambar 20). Susunan ini disebut *thermopile*. Susunan ini berguna untuk mendapatkan tge yang agak besar untuk pengukuran dengan perbedaan suhu kecil antara sambungannya.

Hubungan paralel seperti gambar 22 dapat digunakan untuk mendapatkan suhu rata-rata pada beberapa titik. Keempat sambungan itu masing-masing mungkin berada pada suhu yang berbeda-beda, dan karena itu membangkitkan

tge yang berbeda-beda pula. Tegangan yang diberikan oleh p[otensiometer merupakan harga rata-rata dari tegangan keempat sambungan.



Gambar 20. Hubungan termopil.



Gambar 22. Termokopel hubungan paralel.

Soal-soal

1. Sebutkan hukum logam-antara dalam termokopel.
2. Apakah yang disebut efek Seebeck.
3. Mengapa suhu rujukan diperlukan bila kita menggunakan termokopel.
4. Hitunglah suhu dimana skala Fahrenheit sama dengan skala Celsius.
5. Sebuah termokopel kromel-alumel mengukur suhu $1560\text{ }^{\circ}\text{F}$. Potensiometer digunakan sebagai sambungan dingin dan suhunya diperkirakan $83\text{ }^{\circ}\text{F}$. Hitunglah tge yang ditunjukkan oleh potensiometer.
6. Sebuah bilah kuningan kuning dan monel 400 diikat pada $120\text{ }^{\circ}\text{F}$. Tebal kuningan kuning adalah $0,014\text{ in}$, dan tebal monel $0,010\text{ in}$. Panjang bilah 5 in . Hitunglah sensitivitas defleksi yang didefinisikan sebagai defleksi per derajat Fahrenheit perbedaan suhu.

BAB VIII

PENGUKURAN SIFAT TERMAL DAN SIFAT TRANSPOR

Pengukuran Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal didefinisikan sebagai:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8-1)$$

dimana: q_x = laju perpindahan kalor, Btu/h atau W

A = luas bidang tempat berlangsungnya perpindahan kalor, ft² atau m²

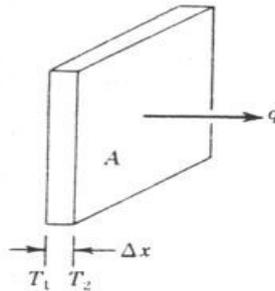
$\partial T/\partial x$ = gradien atau landaian suhu dalam arah perpindahan kalor, °F/ft atau °C/m

k = konduktivitas termal, Btu/h.ft.°F atau W/m.°C

Penentuan konduktivitas termal secara eksperimen dilakukan atas dasar rumus ini. Pada gambar 1 terlihat sebuah pelat logam tipis, konduktivitas termal dihitung dari:

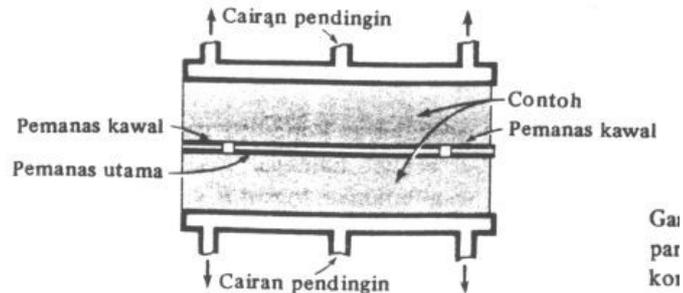
$$k = \frac{q\Delta x}{A(T_1 - T_2)} \quad (8-2)$$

Suhu pada kedua sisi pelat diukur dengan termokopel atau termistor, mana yang paling cocok.



Gambar 1. Pengukuran konduktivitas termal sederhana.

Masalah pokok dalam metode penentuan konduktivitas termal ialah adanya kemungkinan kalor hilang dari rusuk pelat, ataupun kalau rusuk pelat diisolasi, mungkin terjadi profil suhu dua dimensi, yang menyebabkan adanya kesalahan dalam penentuan. Masalah ini dapat dihindari dengan memasang pemanas kawal, seperti pada gambar 2.

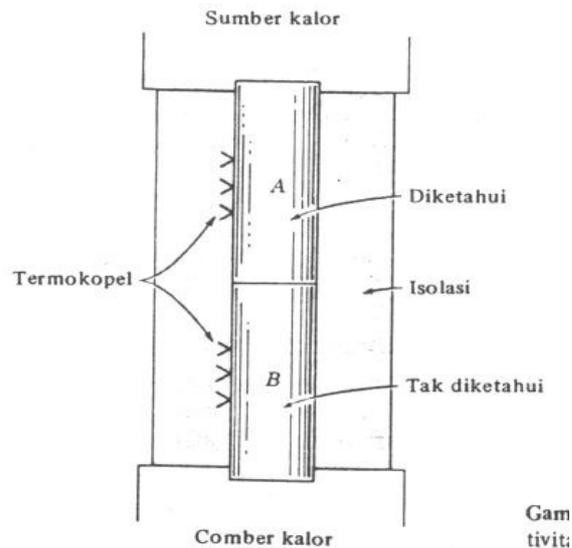


Gambar 2. Skema aparatus plat-panas berkawal untuk pengukuran konduktivitas termal.

Dalam susunan ini pemanas ditempatkan di pusat dan pelat ditempatkan di kedua sisi pemanas. Suatu pendingin dialir-lingkarkan melalui piranti itu untuk mengeluarkan energi, dan pada tempat-tempat tertentu dipasang termokopel. Pemanas kawal mengurung pemanas utama, dan suhunya dijaga agar sama dengan pemanas utama. Hal ini untuk mencegah adanya perpindahan kalor melalui rusuk-rusuk spesimen, dan dengan demikian menjamin adanya perpindahan kalor satu dimensi melalui bahan yang akan dicari konduktivitasnya.

Gambar 3 memperlihatkan suatu metode sederhana untuk mengukur konduktivitas termal logam. Suatu batang logam A yang konduktivitas termalnya diketahui dihubungkan dengan batangan logam B yang akan dicari konduktivitasnya. Sebuah sumber kalor (heat source) dan comber kalor (heat sink) dihubungkan dengan ujung-ujung batang gabungan tersebut, dan rakitan itu dibalut dengan bahan isolasi untuk menghambat pembuangan kalor ke lingkungan. Pada kedua batang dipasang termokopel. Jika gradien suhu diketahui, maka konduktivitas bisa dicari dengan:

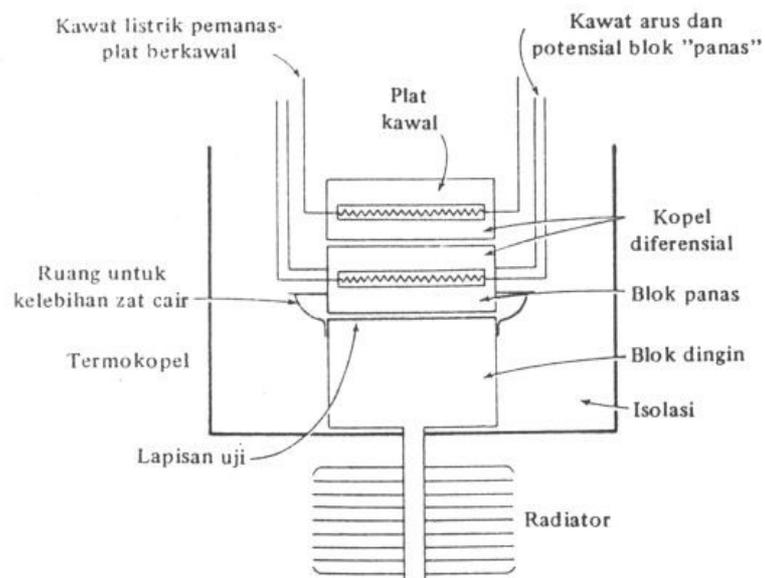
$$q_x = -k_A A \left(\frac{dT}{dx} \right)_A = -k_B A \left(\frac{dT}{dx} \right)_B \quad (8-3)$$



Gambar 3. Alat untuk pengukuran konduktivitas termal bahan.

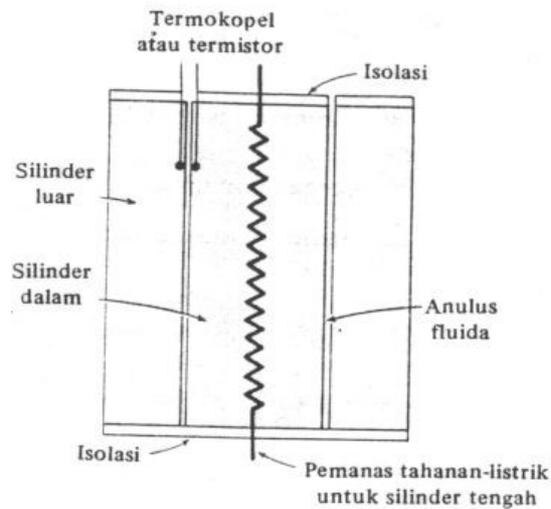
Konduktivitas Termal Zat Cair Dan Gas

Gambar 4 memperlihatkan aparatus untuk mengukur konduktivitas zat cair dengan menggunakan pelat panas berkawat. Diameter pelat adalah 5 cm, dan tebal lapisan zat cair kira-kira 0,05 cm. Lapisan harus cukup tipis supaya arus konveksi minimum.

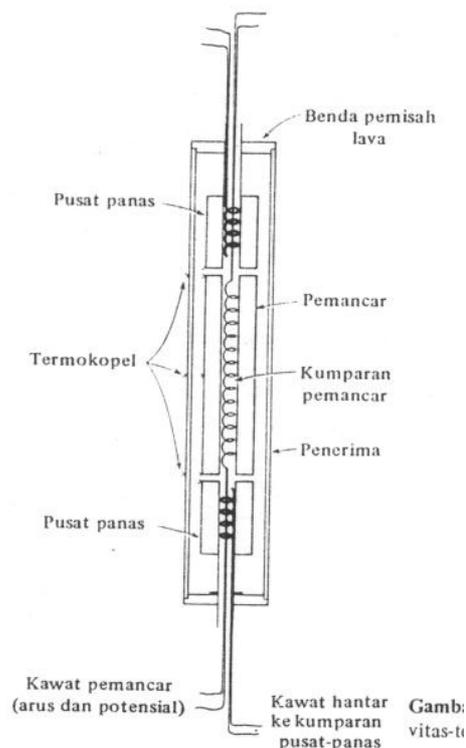


Gambar 4. Aparatus plat-panas berkawat untuk pengukuran konduktivitas termal zat cair.

Susunan anulus seperti gambar 5 dapat pula digunakan untuk pengukuran konduktivitas zat cair. Susunan silinder-konsentrik dapat ini pula digunakan untuk pengukuran konduktivitas termal gas. *Vines* menggunakan piranti seperti gambar 6 untuk mengukur konduktivitas termal gas pada suhu tinggi. Pemancar berfungsi sebagai sumber kalor, sedang pusat-pusat panas pada kedua ujungnya menjadi pemanas kawal. Pada kebanyakan pengujian, beda suhu antara pemancar dan penerima dapat dijaga antara 5 sampai 10°C.



Gambar 5. Metode silinder-konsentrik untuk pengukuran konduktivitas termal zat cair.



Gambar 6. Aparatus untuk penentuan konduktivitas termal gas pada suhu tinggi.

Laju perpindahan kalor diukur dengan menentukan masukan daya listrik ke pemancar, sedang beda suhu ditentukan dengan termo kopel yang dipasang pada permukaan pemancar dan penerima.

Untuk piranti silinder-konsentrik konduktivitas termal dapat dihitung dengan:

$$k = \frac{q \ln(r_2 / r_1)}{2\pi L(T_1 - T_2)} \quad (8-4)$$

dimana: q = laju perpindahan kalor

r_2 dan r_1 = jari-jari luar dan jari-jari dalam ruang anulus yang berisi zat cair

T_2, T_1 = suhu yang diukur pada jari-jari diatas

Pengukuran Viskositas

Viskositas dinamik atau viskositas absolut dirumuskan sebagai:

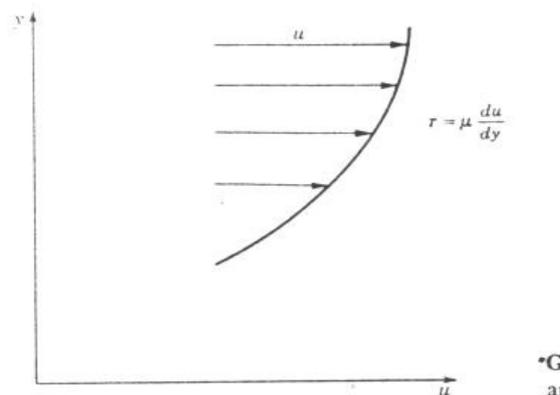
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (8-5)$$

dimana: τ = tegangan geser antara lapisan-lapisan fluida dalam aliran laminar

μ = viskositas dinamik

du/dy = gradien kecepatan normal sebagaimana ditunjukkan oleh gambar

7



Gambar 7. Diagram menunjukkan hubungan antara gradien viskositas dan geser fluida.

Viskositas kinematik didefinisikan sebagai:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

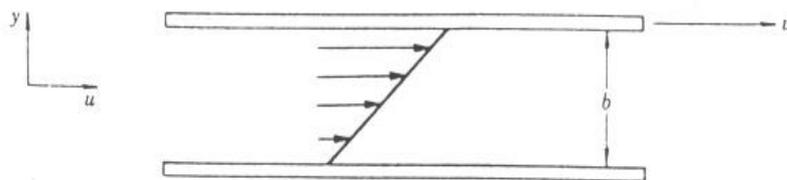
dimana ρ adalah kerapatan fluida. Satuan viskositas ada bermacam-macam, untuk lebih jelasnya bisa dilihat dibuku-buku referensi, diantaranya adalah N.s/m², Poise untuk viskositas dinamik, m²/s, St untuk viskositas kinematik.

Pengukuran viskositas umumnya dilakukan dengan metode *silinder konsentrik berputar* dan metode *aliran kapiler*.

Metode Silinder Berputar

Perhatikan gambar 8, Pelat yang satu diam dan yang satu lagi bergerak dengan kecepatan tetap u . Profil kecepatan berupa garis lurus dengan gradien kecepatan:

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{b} \quad (8-6)$$



Gambar 8. Distribusi kecepatan antara pelat-sejajar besar.

Sistem ini dapat digunakan untuk mengukur viskositas dengan hanya mengukur gaya. Perhatikan gambar 9. Silinder dalam stasioner dan dihubungkan dengan piranti pengukuran momen puntir atau torsdi, sedang silinder luar berputar dengan kecepatan sudut konstan ω konstan. Jika ruang anulus b cukup kecil dibandingkan dengan jari-jari silinder dalam, susunan silinder-berputar ini dapat mendekati situasi pelat sejajar, dan profil kecepatan dalam ruang celah:

$$\frac{du}{dy} = \frac{r_2\omega}{b} \quad (8-7)$$

dimana y adalah jarak pada arah radial dan $b \ll r_1$. Tegangan geser:

$$\tau = \frac{T}{2\pi r_1^2 L} \quad (8-8)$$

dimana T adalah momen puntir dan L adalah panjang silinder. Dengan menggabungkan persamaan (8-5), (8-7) dan (8-9) maka viskositas adalah:

$$\mu = \frac{Tb}{2\pi r_1^2 r_2 L \omega} \quad (8-9)$$

Jika susunan silinder konsentrik dibuat sedemikian rupa sehingga celah a kecil, maka piring bawah juga berperan dalam momen puntir yang besarnya:

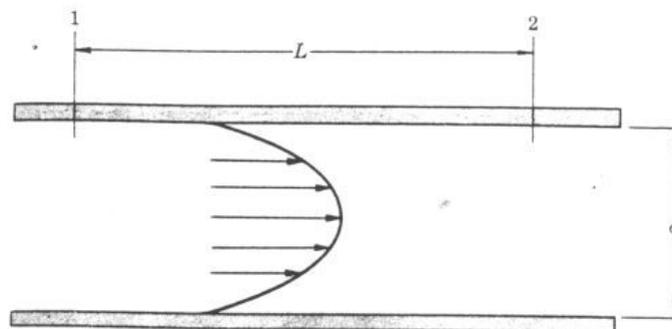
$$T_d = \frac{\mu \pi \omega}{2a} r_1^4 \quad (8-10)$$

dimana a adalah jarak celah. Bila momen puntir piring bawah digabungkan dengan momen puntir ruang anulus maka:

$$T = \mu \pi r_1^2 \left(\frac{r_1^2}{2a} + \frac{2 L r_2}{b} \right) \quad (8-11)$$

Metode Aliran Kapiler

Perhatikan gambar 10 berikut ini.



Gambar 10. Aliran laminar melalui tabung kapiler.

Angka Reynold, Re :

$$Re_d = \frac{\rho u_m d}{\mu} \quad (8-12)$$

Jika angka Reynold kurang dari 100, terdapat aliran laminar di dalam tabung, dan terjadi profil kecepatan parabola. Untuk aliran tak mampu mampat dan aliran stedi, laju aliran volume, Q dirumuskan:

$$Q = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8 \mu L} \quad (8-13)$$

dan : $\rho u_m = \frac{m}{\pi r^2}$ (8-14)

dimana m adalah laju aliran massa.

Untuk aliran massa gas pada kondisi aliran laminar di dalam kapiler :

$$m = \frac{\pi r^4}{16 \mu R T} (p_1^2 - p_2^2) \quad (8-15)$$

dimana R adalah konstanta gas bersangkutan.

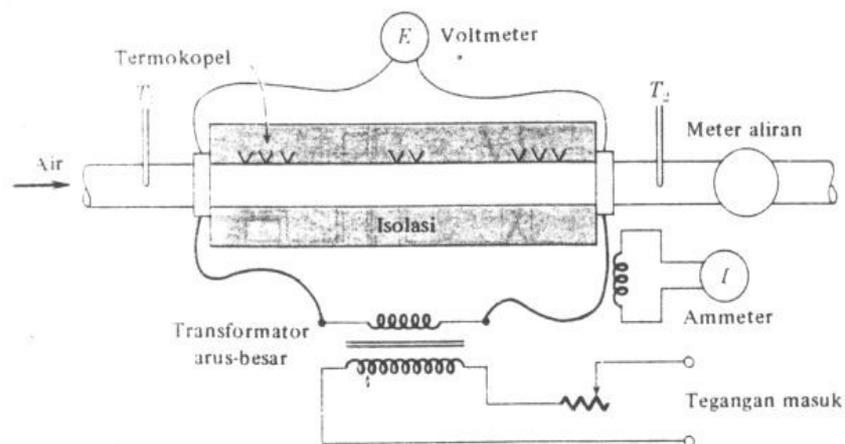
Pengukuran harus dilakukan dihilir dimana aliran telah berkembang penuh. Kondisi berkembang penuh apabila:

$$\frac{L}{d} > \frac{Re_d}{8} \quad (8-16)$$

dimana L adalah jarak dari pintu masuk tabung.

Pengukuran Perpindahan Kalor Konveksi

Perhatikan gambar 17, kita ingin mendapatkan koefisien perpindahan kalor konveksi untuk aliran air di dalam tabung licin. Kalor diberikan ke tabung oleh pemanas listrik.



Gambar 17. Skema aparatus untk penentuan koefisien perpindahan kalor konveksi paksa di dalam tabung licin.

Tabung yang dipanaskan memberikan fluks kalor konstan ke air sehingga suhu air mengalami perubahan linier dari waktu masuk hingga keluar. Koefisien perpindahan kalor pada setiap posisi aksial dapat dihitung dengan :

$$q = hA(T_w - T_b)$$

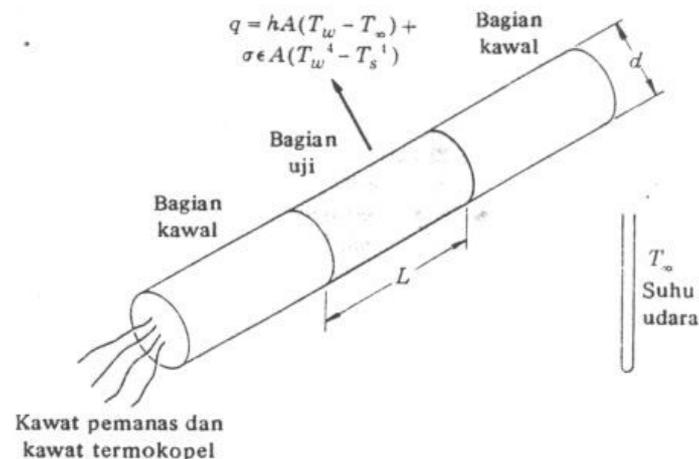
dimana A adalah luas permukaan dalam, T_w dan T_b adalah suhu dinding dan suhu lindak (bulk) pada posisi itu, dan q adalah laju perpindahan kalor total yang diberikan oleh:

$$q = EI \tag{8-34}$$

E adalah tegangan dan I adalah arus. Luas permukaan yang dipanaskan dirumuskan:

$$A = \pi d_i L$$

Rakitan eksperimen untuk mengukur perpindahan kalor konveksi alamiah pada silinder horizontal diperlihatkan oleh gambar 18.



Gambar 18. Skema susunan silinder panas untuk penentuan koefisien perpindahan kalor konveksi bebas.

Rugi kalor dari unsur yang diuji adalah:

$$q = hA(T_w - T_\infty) + \sigma \epsilon A(T_w^4 - T_s^4) \tag{8-36}$$

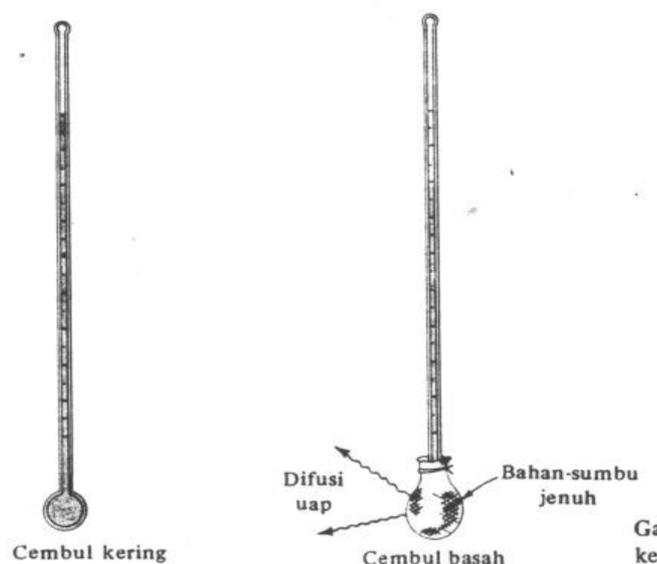
dimana h adalah koefisien kalor konveksi bebas, T_w suhu bagian uji, ε emisivitas permukaan, T_∞ suhu udara sekitar, T_s suhu udara sekitar dalam kamar atau pengurung, A luas permukaan.

Pengukur Kelembaban

Kandungan uap air di dalam udara merupakan suatu parameter penting, misalnya dalam bidang tata udara.

Kelembaban spesifik atau *rasio kelembaban* ialah massa uap air per satuan massa udara kering. *Suhu cembul kering* (dry bulb temperature) ialah suhu campuran udara-uap air sebagaimana diukur dengan termometer di dalam campuran itu. *Suhu cembul basah* (wet bulb temperature) ialah suhu yang ditunjukkan oleh termometer yang dibalut dengan bahan seperti sumbu yang jenuh dengan zat cair, seperti terlihat pada gambar 19.

Titik embun campuran adalah suhu dimana uap mulai mengembun bila campuran itu didinginkan pada tekanan tetap. *Kelembaban relatif* adalah rasio massa uap nyata dan uap yang diperlukan untuk mendapatkan campuran jenuh pada suhu yang sama.



Gambar 19. Pengukuran suhu cembul-kering dan cembul-basah.

Kelembaban relatif dirumuskan:

$$\phi = \frac{m_v}{m_{jenuh}} = \frac{p_v V / R_v T}{p_g V / R_v T} = \frac{p_v}{p_g} \quad (8-38)$$

dimana p_v adalah tekanan parsial dan p_g adalah tekanan jenuh uap pada suhu campuran. Kelembaban spesifik adalah :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (8-39)$$

yang untuk gas ideal menjadi:

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{p_a} \quad (8-40)$$

dimana p_a adalah tekanan parsial udara.

Metode klasik untuk menentukan kelembaban dalam ruang besar ialah dengan mengukur suhu cembul-kering dan cembul-basah dengan psykrometer sling (sling psstcometer). Kedua termometer diputar dengan kecepatan 5 m/s dan suhunya dicatat. Tekanan uap dihitung dengan persamaan Carrier:

$$p_v = p_{gw} - \frac{(p - p_{gw})(T_{DB} - T_{WB})}{K_w - T_{WB}} \quad (8-41)$$

dimana : p_v = tekanan uap nyata

p_{gw} = tekanan jenuh yang berkaitan dengan suhu cembul basah

p = tekanan total campuran

T_{DB} = suhu cembul kering, °F atau °C

T_{WB} = suhu cembul basah, °F atau °C

K_w = 2800 bila T dalam °F

= 1537,8 bila T dalam °C

Kelembaban spesifik atau relatif dihitung dari persamaan (8-38) atau (8-40).

Soal-soal:

1. Jelaskan prinsip kerja pengukuran konduktivitas termal sederhana.
2. Jelaskan prinsip kerja alat ukur konduktivitas termal logam menggunakan termokopel.
3. Coba anda sebutkan jenis alat yang digunakan untuk mengukur viskositas.
4. Jelaskan prinsip kerja salah satu alat ukur perpindahan kalor konveksi.
5. Bagaimana cara mengukur kelembaban dengan menggunakan cembul kering dan cembul basah.

DAFTAR PUSTAKA

1. Holman J.P., terj. E. Jasjfi. *Metode Pengukuran Teknik, edisi keempat*. Erlangga, 1985.
2. Bechwith T.G., *Pengukuran Mekanis*. Erlangga, 1987.
3. Rochim Taufik. *Spesifikasi, Metrologi & Kontrol Kualitas Geometri*. Penerbit ITB Bandung, 2001.