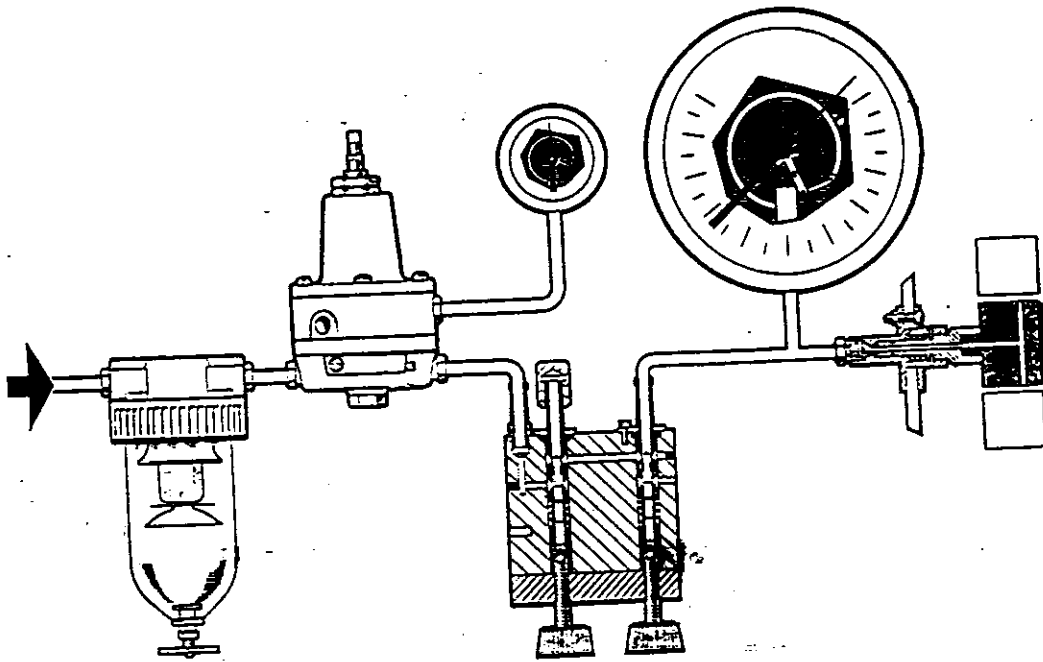


# DASAR-DASAR PENGUKURAN MEKANIS



Oleh:

DRS. ABD. AZIZ

UPT PUSAT MEDIA PENDIDIKAN  
FPTK IKIP PADANG  
1992

MILIK UPT PERPUSTAKAAN IKIP PADANG	
DI TERIMA TGL	28-6-94
SURUT PERHUBUNGAN	HD
KODING	KK/
NO INVENTARIS	497/140/94-dile
CALL NO	621.07 Aziz

MILIK UPT PERPUSTAKAAN  
IKIP PADANG

## KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT, Alhamdulillah penulis telah dapat menyelesaikan penulisan buku yang diberi judul "**DASAR-DASAR PENGUKURAN MEKANIS**".

Buku ini antara lain berisikan tentang pengetahuan dasar pengukuran mekanis yang terdiri atas tiga bab utama. Bab I berisikan tinjauan umum tentang masalah pengukuran mekanis yang meliputi atas pengertian, metoda dasar, sistim dan standar pengukuran. Bab II membicarakan masalah kuantitas masukan dari pengukuran mekanis yang meliputi atas kuantitas dalam bentuk hubungan waktu, dan kuantitas dalam bentuk digital. Bab III mengenai beberapa perlakuan terhadap ketidak pastian hasil pengukuran mekanis yang meliputi beberapa peristilahan, klasifikasi kesalahan pengukuran, propagasi ketidak pastian, serta beberapa perlakuan tentang kesalahan sistimatis dan kesalahan acak.

Diharapkan buku ini dapat bermanfaat bagi mereka yang berminat mendalami masalah pengukuran terutama pengukuran mekanis dan menambah koleksi buku-buku teknik yang relatif masih kurang.

Penulisan buku ini tidak terlepas dari bantuan rekan sejawat yang memberikan dorongan semangat. Untuk semua itu penulis mengucapkan banyak terima kasih, semoga Allah membalasnya.

Akhirnya penulis mengharapkan saran dan kritik dari para pembaca yang sifatnya membangun demi perbaikan buku ini untuk masa-masa yang akan datang.

Medio Pebruari 1992

Penulis

## DAFTAR ISI

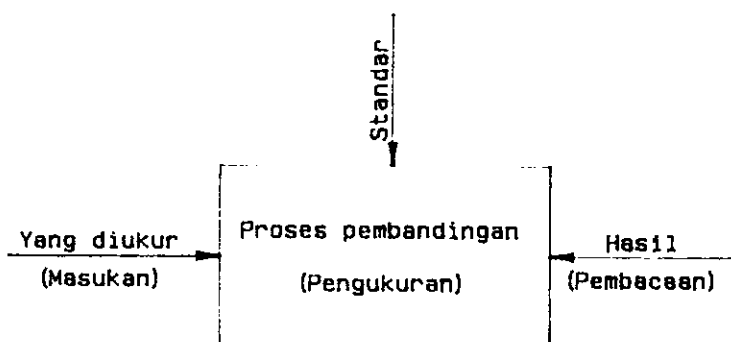
	Halaman	
KATA PENGANTAR	i	
DAFTAR ISI	ii	
BAB I	PROSES PENGUKURAN SUATU TINJAUAN	1
	A. Pengertian Pengukuran Mekanis	2
	B. Metoda Dasar Pengukuran	3
	1. Perbandingan Langsung	3
	2. Perbandingan Tidak Langsung	4
	C. Sistem Pengukuran Umum	5
	1. Penginderaan-Pengubah	7
	2. Persiapan Sinyal	13
	3. Pembacaan Akhir	14
	D. Standar Pengukuran	17
	1. Standar Panjang	20
	2. Standar Massa	20
	3. Standar Waktu	21
	4. Standar Temperatur	22
	5. Standar Listrik	22
BAB II	KUANTITAS MASUKAN PENGUKURAN MEKANIS	25
	A. Kuantitas Dalam Bentuk Hubungan Waktu	25
	1. Hubungan Selaras Sederhana	26
	2. Hubungan Komplek	29
	B. Kuantitas Dalam Bentuk Digital	36
	1. Alasan Menggunakan Metoda Digital	40
	2. Mendigitalkan Masukan Mekanis	41
	3. Elemen-elemen Dasar Rangkaian Digital	42

BAB III	PERLAKUAN TERHADAP KETIDAK PASTIAN	45
A.	Peristilahan	46
B.	Klasifikasi Kesalahan	52
C.	Propagasi Ketidak pastian	56
D.	Perlakuan Terhadap Ketidakpastian Sistematis	58
E.	Perlakuan Terhadap Kesalahan Acak	64

## BAB I PROSES PENGUKURAN SUATU TINJAUAN

"Setiap hal yang berujud, berujud dalam jumlah". Dari ungkapan kalimat di atas kita dapat mengambil suatu kesimpulan bahwa penentuan jumlah tersebut sebetulnya merupakan hakekat dari pengukuran. Dan apabila hal tersebut kita hubungkan dalam kerangka praktek teknik permesinan, maka penentuan jumlah tersebut merupakan subyek dari pengukuran mekanis. Dalam hal ini yang perlu digarisbawahi, bahwa pengukuran tidak harus dilakukan dengan bantuan alat-alat mekanis. Kata-kata mekanis hanyalah ditujukan kepada besaran itu sendiri.

Suatu proses atau kegiatan pengukuran sesungguhnya adalah merupakan perbandingan kuantitatif atau besaran antara standar yang telah ditentukan sebelumnya dengan yang diukur. Kata diukur ini dipakai untuk menunjuk kepada parameter fisika yang sedang diamati, yaitu kuantitas masukan ke proses pengukuran. Kegiatan pengukuran akan memperoleh suatu hasil berupa penentuan jumlah dari objek yang diukur seperti yang terlihat dalam gambar 1.1. berikut ini.



Gambar 1.1 Dasar proses pengukuran  
(Sumber: Beckwith, 1982, hal. 4)

Standar pembanding haruslah mempunyai sifat yang sama dengan yang diukur dan biasanya diatur dan ditentukan

oleh suatu lembaga resmi atau organisasi yang diakui seperti International Organization for Standardization (ISO), National Bureau of Standards (NBS), atau American National Standards Institute (ANSI).

Besaran-besaran seperti suhu, regangan, parameter mengenai aliran fluida, akustik dan gerakan, di samping besaran dasar, massa, panjang, waktu dan sebagainya adalah merupakan jenis-jenis yang termasuk dalam ruang lingkup pengukuran mekanis. Mau tidak mau pengukuran besaran mekanis sering juga mencakup pertimbangan pemakaian alat-alat listrik karena sering mempermudah untuk mengubah besaran mekanis yang diukur menjadi besaran listrik yang sesuai.

#### A. Pengertian Pengukuran Mekanis

Pengukuran sesungguhnya memberikan landasan dasar untuk penelitian dan pengembangan. Pengembangan merupakan tahap akhir dari prosedur perancangan, dan seluruh rancangan mekanis dari setiap hal yang rumit biasanya terdiri atas tiga elemen yaitu elemen empiris, elemen rasional dan elemen eksperimental. Elemen empiris berdasarkan atas pengalaman yang diperoleh dan atas akal sehat kerekayasaan. Sedangkan elemen rasional selalu tunduk pada prinsip-prinsip kerekayasaan, hukum-hukum fisika dan lain sebagainya. Sedangkan elemen eksperimental didasarkan atas pengukuran, yaitu pengukuran bermacam-macam besaran yang berhubungan dengan operasi dan unjuk kerja alat atau proses yang sedang dikembangkan.

Pengukuran juga merupakan elemen dasar dari setiap proses pengendalian. Konsep pengendalian **membutuhkan** penyimpangan pengukuran antara unjuk kerja nyata dengan yang diharapkan. Bagian pengendali dari sistem haruslah mengetahui besar dan arah perbedaan tersebut agar bisa bereaksi dengan betul. Selain itu, berbagai operasi harian juga memerlukan pengukuran agar diperoleh unjuk kerja yang benar.

Agar bisa berguna atau terpakai, hasil pengukuran harus bisa dipercaya. Mempunyai informasi yang tidak tepat dapat lebih merusak daripada tidak mempunyai informasi sama sekali. Hal ini tentu saja menimbulkan pertanyaan tentang derajat kepastian dan ketidak pastiannya. Arnold D. Beckman, seorang pencipta peralatan pernah mengatakan bahwa satu hal yang dipelajari dalam ilmu pengetahuan adalah tidak ada jawaban yang sempurna dan tidak ada pengukuran yang sempurna. Adalah sangat penting bagi pengguna alat-alat ukur, terutama para ahli teknik, dalam menafsirkan hasil-hasil pengukuran hendaknya selalu berpijak kepada pengevaluasian derajat kepastian atau ketidakpastian dari hasil pengukuran tersebut. Para ahli teknik dianjurkan untuk tidak boleh secara gampang membaca skala atau cetakan dan secara membabi buta menafsirkan angka yang terlihat. Mereka harus secara hati-hati memberikan toleransi yang realitis pada setiap nilai dari pengukuran yang diperoleh, dan bukan saja harus merasa ragu-ragu melainkan juga harus mencoba mengukur keragu-raguan itu.

## **B. Metoda Dasar Pengukuran**

Terdapat dua macam dasar metoda pengukuran yaitu; Perbandingan langsung dengan standar primer atau sekunder dan Perbandingan nirlangsung dengan menggunakan sistem yang telah dikalibrasi.

### **1. Perbandingan Langsung**

Bagaimanakah anda mengukur panjang suatu batang baja? jika anda hanya akan puas dengan tingkat ketelitian, katakanlah  $\pm 1/8$ " atau kira-kira 3 mm, maka anda mungkin dapat menggunakan satu meteran pita baja. Anda membandingkan panjang batang baja tersebut dengan suatu standar (dalam hal ini meteran pita), dan memperoleh data panjang batang tersebut sekian inci karena meteran anda sama pan-

jangnya dengan batang tersebut. Jadi hal yang anda lakukan tersebut adalah menentukan panjang dengan pembanding langsung. Standar yang anda gunakan disebut standar sekunder.

Meskipun mengukur dengan cara membandingkan langsung menghilangkan proses-proses pengukuran sampai hanya yang paling pokok saja, kadang-kadang metoda tersebut tidaklah memadai. Perasaan manusia tidak dilengkapi dengan kemampuan untuk membuat pembandingan langsung dari seluruh besaran dengan sarana yang sama. Dalam banyak hal orang tidak cukup peka. Kita dapat membuat suatu pembanding langsung yaitu mengukur suatu jarak pendek dengan menggunakan mistar baja dengan ketelitian sekitar 1 mm (kira-kira 0,04 inci). Seringkali kita menginginkan tingkat ketelitian yang lebih tinggi, oleh karena itu kita kemudian harus meminta bantuan tambahan dari beberapa betuk sistem pengukuran yang lebih rumit. Dalam beberapa hal, pengukuran dengan pembanding langsung agak kurang umum dibanding dengan pengukuran nirlangsung.

## **2. Pembanding Nirlangsung**

Pembanding nirlangsung dapat menggunakan beberapa alat pengubah (transduser) yang dikopel dengan alat-alat penghubung yang secara keseluruhannya disebut sebagai **sistim** pengukuran. Sistim kerja rangkaian alat-alat ini mengubah bentuk dasar masukan menjadi bentuk analogi yang kemudian diproses dan disajikan dibagian keluaran sebagai fungsi masukan yang diketahui. Konversi seperti ini sering dibutuhkan agar informasi yang diinginkan dapat dimengerti. Perasaan manusia, misalnya tidak diberi kelengkapan untuk dapat mengetahui tegangan yang terjadi di dalam bagian-bagian mesin. Bantuan suatu sistim barangkali sangat diperlukan untuk mengindera, mengubah dan pada akhirnya menyajikan keluaran analogi dalam bentuk perpindahan skala, grafik atau bentuk digital lainnya.



Pemrosesan sinyal analogi dapat mempunyai bermacam-macam bentuk seperti menaikkan amplitudo atau daya melalui berbagai bentuk penguat sering diperlukan. Dalam kasus yang lain, untuk memperoleh suatu informasi dari sejumlah besar masukan diperlukan penyaringan atau penyeleksian, dan barangkali pembacaan dari jarak jauh atau perekaman mungkin mutlak diperlukan. Sebagai contoh, pencatatan di bumi mengenai suhu dan tekanan dari suatu rudal yang sedang melayang di udara. Dapat dipastikan bahwa suhu dan tekanan rudal tersebut dapat diketahui dengan menggunakan sinyal frekuensi radio untuk mengirimkannya ke bumi, atau ke pusat kontrol.

Pada setiap kasus yang memerlukan penguatan, atau penyaringan, ataupun perekaman jarak jauh dan sebagainya, metoda elektrik sangat cocok untuk dipakai. Pada kenyataannya, kebanyakan pengubah yang dipakai terutama untuk pengukuran mekanis dinamik, yaitu mengubah masukan mekanis ke analogi elektrik untuk memproses data lebih lanjut.

### C. Sistim Pengukuran Umum

Secara umum, sistim pengukuran pada dasarnya mempunyai kerangka kerja yang terdiri atas tiga fase atau tiga tingkat.

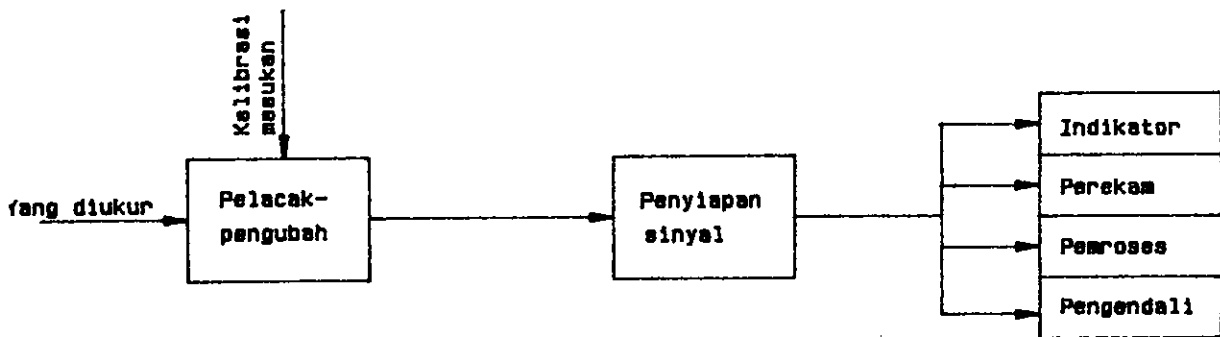
Tingkat I, yaitu tingkat deteksi-pengubah atau **tingkat pengindera** (detection-transducer)

Tingkat II, yaitu tingkat **penyiapan sinyal** (signal conditioning)

Tingkat III, yaitu tingkat pembacaan (read-out).

Masing-masing tingkat tersebut terdiri dari beberapa kelompok komponen tersendiri yang bekerja sesuai dengan langkah-langkah yang telah ditentukan dan diminta untuk pengukuran. Hal ini disebut **elemen dasar** yang ruang lingkungannya ditentukan oleh fungsinya, bukan oleh konstruksinya.

nya. Gambar 1.2 serta Tabel 1.1. dapat menjelaskan garis besar arti dari masing-masing tingkat ini.



**Gambar 1.2** Diagram blok dari sistim pengukuran umum  
(Sumber: Beckwith, 1982, hal.6)

**Tabel 1.1.** Tingkat-Tingkat Sistim Pengukuran umum

Tingkat Pertama, Pelacak-Pengubah	Tingkat Kedua Penyiapan Sinyal	Tingkat Ketiga Pembacaan Akhir
1	2	3
<p>Melacak masukan yang dikehendaki dan meninggalkan yang lain serta memberikan ke luaran analogi</p> <p>Jenis dan contoh pemakaian Mekanis: Jarum kontak massa pegas, alat-alat elastis seperti Bourdon untuk tekanan, cincin percobaan untuk gaya dan sebagainya.</p> <p>Hidrolik-pneumatik: Pelampung, orifis, venturi, sudu dan propeler.</p> <p>Optik: Film fotografi sel foto elektrik.</p>	<p>Mengalih ragam sinyal yang dapat dirubah kebentuk yang bisa dipakai oleh tingkat akhir, seperti menaikkan amplitudo atau daya dan lain-lain.</p> <p>Jenis dan contoh pemakaian Mekanis: roda gigi, engkol, peluncur, rantai penghubung, bubungan dan sebagainya.</p> <p>Hidrolik-pneumatik Pemipaan katup dsb.</p> <p>Optik: Cermin lensa penyaring optik, fiber optik dan lain-lain.</p>	<p>memberikan suatu penunjukkan atau pencatatan dalam bentuk yang dapat dievaluasi.</p> <p>Jenis dan contoh pemakaian indikator: Penunjuk bergerak dan skala bergerak dan indeks, pancaran cahaya dan skala pancaran elektron dan skala (osiloskop) dan sebagainya.</p> <p>Digital: Pembacaan alfanumerik langsung.</p> <p>Perekaman pencetak digital, pena bertinta dan grafik, fotografi langsung, perekam magnetik dan,</p>

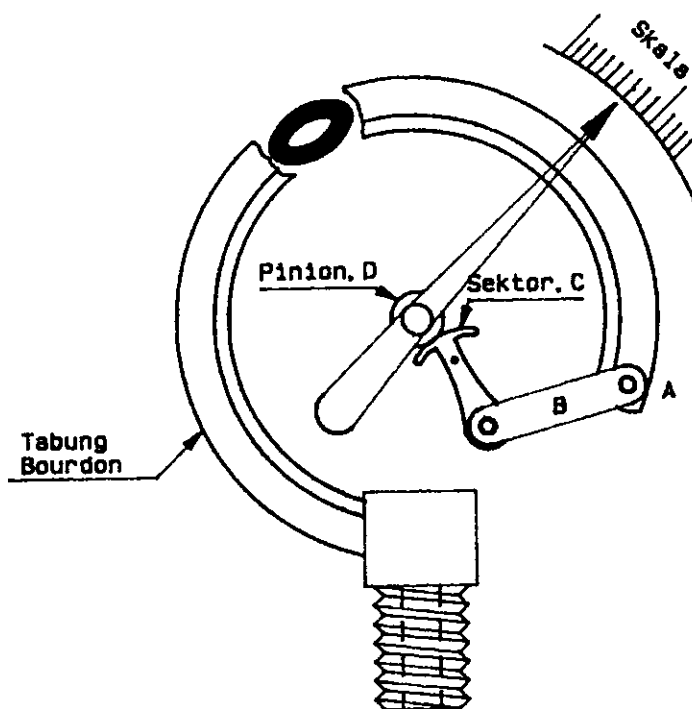
1	2	3
Listrik: kontak, tahanan, kapasitor, kristal piezoelektrik, termokopel dan sebagainya.	listrik sistim pengua atau alat penyuai, penyaring, bermacam alat rangkaian terpadu untuk tujuan khusus dan sebagainya.	Femrosees: berbagai jenis sistim penghitung yang dipakai untuk memberikan umpan ke pembacaan/alat perekam atau sistim pengendali.  dali: semua jenis

Sumber : Thomas G (1982, hal. 8)

### 1. Tingkat Pertama, Pengindera-Pengubah

Fungsi utama dari tingkat pertama ini adalah untuk mendeteksi atau mengindera (melacak) objek yang diukur. Pada waktu yang sama alat ini harusnya tidak peka untuk jenis masukan lain yang tidak dikehendaki. Misalnya, apabila alat ini adalah pelacak tekanan, seharusnya dia tidak peka terhadap misalnya; percepatan, jika alat ini adalah pengukur regangan, harusnya tidak peka terhadap suhu, jika alat ini adalah suatu pengukur percepatan lurus (linier), maka dia tidak boleh peka terhadap percepatan sudut. Namun jarang dapat ditemukan suatu alat pendeteksi yang betul-betul sempurna.

Sering dalam tingkat pertama ini dijumpai lebih dari satu pengubah sifat sinyal. Sebagai contoh dari sistim yang menggunakan hanya elemen mekanis, kita coba melihat tekanan tabung Bourdon yang ditunjukkan dalam gambar 1.3 berikut ini.



**Gambar 1.3** Bagian pokok pengukur tekanan tabung Bourdon  
(Sumber: Holman, 1985, hal.214)

Elemen deteksi-pengubah utama terdiri dari tabung melingkar dengan potongan melintang yang menyerupai elip. Bila tekanan diberikan, maka bagian tabung yang datar cenderung untuk membuat bentuk yang lebih bundar. Ini pada gilirannya membuat bagian bebas A bergerak ke arah luar dan gerakan yang dihasilkannya diteruskan oleh batang B ke sektor roda gigi C dan pada akhirnya diteruskan ke pinion D yang mengakibatkan jarum indikator bergerak sepanjang skala.

Dalam contoh tersebut, tabung berfungsi sebagai deteksi-pengubah utama, yang mengubah tekanan menjadi perpindahan yang mendekati linear. Susunan batang-roda gigi berfungsi sebagai pengubah sekunder (linear terhadap gerakan putar), dan juga sebagai penguat yang menghasilkan keluaran yang diperbesar.

Suatu modifikasi dari susunan dasar ini dapat dilakukan dengan mengganti susunan (rangkaiannya) batang rodagigi dengan suatu peralatan listrik seperti transformer diferensial ataupun potensiometer pembagi voltase. Dalam hal ini peralatan listrik tersebut juga berfungsi sebagai pengubah sekunder yang mengubah perpindahan menjadi voltase atau tegangan.

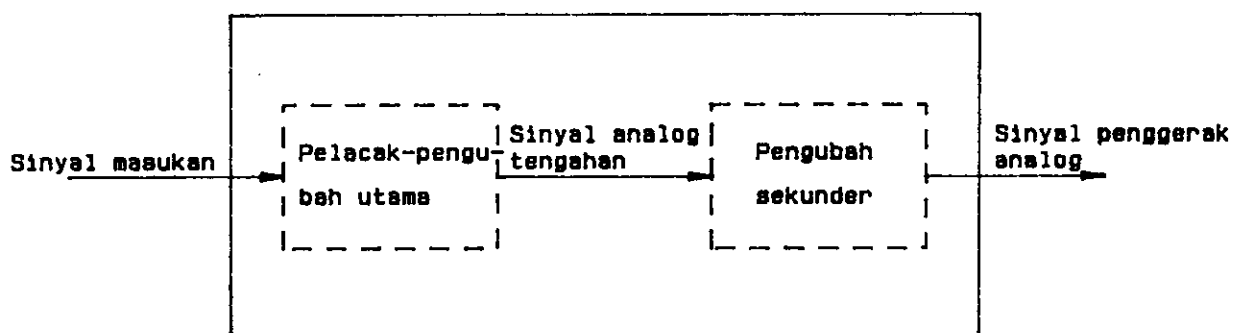
Dari penjelasan-penjelasan di atas, jelaslah bahwa pengukuran tingkat pertama ini mempunyai kompleksitas yang sangat berbeda, tergantung atas jumlah operasi yang dilakukannya. Dalam hal ini, maka alat-alat tingkat pertama ini dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kelas berikut ini:

Kelas I, yaitu elemen tingkat pertama yang digunakan hanya sebagai detektor (pelacak) saja

Kelas II, yaitu elemen tingkat pertama yang digunakan sebagai detektor dan sekaligus sebagai pengubah tunggal.

Kelas III, yaitu elemen tingkat pertama yang digunakan sebagai detektor dengan tingkat pengubah (transducer).

Generalisasi tingkat pertama ini bisa ditunjukkan secara skematik pada gambar 1.4 berikut ini.



Gambar 1.4 Blok diagram alat tingkat pertama dengan pengubah utama dan kedua

(Sumber: Beckwith, 1982, hal.91)

Instrumentasi tingkat-satu mungkin sangat sederhana, yang hanya terdiri dari sebuah spindel mekanis atau bagian pengontak yang dipakai untuk memindah kuantitas yang diukur kesuatu pengubah sekunder atau mungkin juga terdiri dari rakitan elemen yang lebih kompleks. Dalam setiap kejadian, pelacak-pengubah utama selalu merupakan rakitan terpadu yang mempunyai fungsi:

- a. Mengindera atau melacak secara selektif kuantitas yang dikehendaki, dan
- b. Memproses informasi yang diindera ke dalam bentuk yang dapat diterima untuk dioperasikan oleh tingkat-dua. Tingkat ini tidak menyajikan keluaran dalam bentuk yang dapat langsung digunakan.

Kebanyakan operasi awal yang dilakukan oleh alat tingkat pertama ini ialah mengubah kuantitas masukan menjadi suatu analog perpindahan. Tanpa mencoba untuk memformulasikan daftar komprehensif yang lengkap, marilah kita lihat tabel 1.2 berikut ini yang menyajikan daerah umum pelacak-pengubah utama dalam pengukuran mekanis.

**Tabel 1.2. Beberapa Elemen Pelacak-Pengubah dan Operasi yang Dilakukannya.**

Elemen	Operasi
1	2
I. Mekanis A. Spindel pengerut, pena, jari B. Bagian-bagian elastis 1. Sel-sel beban a. Tarikan/tekanan b. lengkungan c. torsi 2. cincin pengujian 3. tabung bourdon 4. embusan 5. diafragma 6. pegas helik 7. kolom cairan	Perpindahan ke perpindahan  Gaya ke perpindahan linear Gaya ke perpindahan linear torsi ke perpindahan sudut gaya ke perpindahan linear tekanan ke perpindahan tekanan ke perpindahan tekanan ke perpindahan gaya ke perpindahan linear tekanan ke perpindahan

1	2
<p>C. Massa</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Masa seismik</li> <li>2. Ayunan</li> <li>3. Ayunan</li> <li>4. Kolom cairan</li> </ol> <p>D. Termal</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Termokopel</li> <li>2. Bimaterial (termasuk raksa di dalam gelas)</li> <li>3. Termistor</li> <li>4. Komposisi kimia (khusus)</li> </ol> <p>E. Hidro-pneumatik</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Statik <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Pelampung</li> <li>b. Hidrometer</li> </ol> </li> <li>2. Dinamik <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Orifis</li> <li>b. Venturi</li> <li>c. Pitot</li> <li>d. Kipas</li> <li>e. Turbin</li> </ol> </li> </ol>	<p>Fungsi gaya ke perpindahan relatif</p> <p>Percepatan gravitasi ke frekuensi atau perioda</p> <p>Gaya ke perpindahan</p> <p>Tekanan ke perpindahan</p> <p>Suhu ke arus listrik</p> <p>Suhu ke perpindahan</p> <p>Suhu ke perubahan tahanan</p> <p>Suhu ke rasa kimia</p> <p>Level fluida perpindahan</p> <p>Gravitasi jenis ke perpindahan relatif</p> <p>Kecepatan fluida ke perubahan tekanan</p> <p>Kecapatan fluida ke perubahan</p> <p>Kecepatan fluida ke perubahan</p> <p>Kecepatan ke gaya</p> <p>Kecepatan linear ke kecepatan sudut</p>
<p>II. Elektro Resistansi</p> <p>A. Resistif</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. kontak</li> <li>2. konduktor dengan panjang berubah</li> <li>3. Konduktor dengan luas berubah</li> <li>4. Konduktor dengan dimensi berubah</li> <li>5. Konduktor dengan resistivitas</li> </ol> <p>B. Induktansi</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dimensi koil berubah</li> <li>2. Cejrah udara berubah</li> <li>3. Perubahan material inti</li> <li>4. Perubahan posisi inti</li> </ol>	<p>Perpindahan ke perubahan tahanan</p> <p>Perpindahan ke perubahan tahanan</p> <p>Perpindahan ke perubahan tahanan</p> <p>Regangan ke perubahan tahanan</p> <p>Suhu ke perubahan tahanan</p> <p>Perpindahan ke perubahan induktansi</p> <p>Perpindahan ke perubahan induktansi.</p> <p>Perpindahan ke perubahan induktansi</p> <p>Perpindahan ke perubahan induktansi</p>

1	2
5. Perubahan posisi ini 6. Koil bergerak 7. Magnet permanen bergerak 8. inti bergerak	Perpindahan ke perubahan induktansi Kecepatan ke perubahan induktansi Kecepatan ke perubahan induktansi Kecepatan ke perubahan induktansi
C. Kapasitansi 1. Perubahan celah udara 2. Perubahan luas pelat 3. Perubahan dielektrik	Perpindahan ke perubahan kapasitansi Perpindahan ke perubahan kapasitansi Perpindahan ke perubahan kapasitansi
D. Piezoelektrik	Perpindahan ke voltase dan/atau voltase ke perpindahan
E. Fotoelektrik 1. Fotovoltaik 2. Fotoresistif 3. Fotoemisif	Intensitas cahaya ke voltase intensitas cahaya ke perubahan tahanan Intensitas cahaya ke arus

Sumber: Beckwith, 1982, hal. 90-91)

Pengkajian teliti terhadap tabel 1.2 mengungkapkan bahwa sementara beberapa pengindera mekanis mengubah masukan menjadi perpindahan, beberapa pengindera listrik mengubah perpindahan menjadi keluaran jenis listrik. Hal ini sangat menguntungkan, karena dapat menimbulkan kemungkinan kombinasi praktis dimana pengindera mekanis dapat bertindak sebagai pengubah primer, dan pengindera listrik sebagai pengubah sekunder. Dua alat listrik yang sangat umum dipakai adalah tahanan variabel dan induktansi variabel, meskipun beberapa yang lain seperti fotoelektrik dan piezoelektrik juga merupakan alat ukur yang juga penting.

Selain kecocokan kombinasi terkait pengubah mekanis-elektris, ternyata elemen-elemen listrik mempunyai beberapa keuntungan lain yang penting yaitu:



- a. Penguatan dan pelemahan dapat dilakukan dengan lebih mudah.
- b. Efek inersia massa dapat diperkecil.
- c. Daya keluaran dengan hampir semua besaran yang dikehendaki bisa disediakan
- d. Penunjukan pencatatan dari jarak yang jauh bisa dilakukan.
- e. Pengubah biasanya mudah diminiaturkan.

## 2. Tingkat Kedua, atau Penyiapan Sinyal

Tujuan utama tingkat kedua dari sistem pengukuran umum ini ialah untuk memodifikasi informasi sehingga informasi ini dapat diterima oleh tingkat ketiga atau tingkat terakhir. Di samping itu, tingkat kedua ini dapat juga memperlihatkan satu atau beberapa operasi dasar, seperti menyaring satu atau lebih operasi secara selektif, mengintegrasikan, memisahkan atau mengukur jarak jauh sebagaimana yang dibutuhkan.

Pengukuran kuantitas mekanis dinamik membuktikan persyaratan khusus terhadap elemen-elemen yang digunakan pada langkah penyiapan sinyal ini. Kadang-kadang dibutuhkan penguatan yang besar dan respon transien yang baik, dan keduanya sulit diperoleh dengan cara mekanis, hidraulik ataupun pneumatis. Oleh karena ini biasanya dibutuhkan elemen-elemen listrik atau elektronik.

Sinyal masukan sering diubah oleh pelacak-pengubah menjadi perpindahan mekanik (lihat tabel 1.2). Kemudian sinyal ini diumpankan ke pengubah sekunder yang mengubahnya ke suatu bentuk, seringkali bentuk listrik yang lebih mudah diproses oleh tingkat menengah. Pada beberapa alat ukur, perpindahan tersebut di atas diumpankan ke elemen tingkat menengah yang berbentuk mekanis seperti batang-batang sambungan, roda gigi atau hubungan. Penguatan dengan elemen-elemen mekanis ini kerjanya sangat terbatas. di samping itu kalau penguatan dilakukan maka gaya gesek juga ikut diperkuat sehingga dapat menimbulkan

pembebanan sinyal yang cukup besar dan tidak dikehendaki. Efek ini, disamping adanya selip balik (backlash) dan deformasi elastis, juga menghasilkan respon yang jelek.

Beberapa kombinasi pelacak-pengubah memberikan keluaran dalam bentuk listrik. Dengan terjadinya hal ini tentu saja memberikan kemudahan dalam menampilkan penyediaan sinyal selanjutnya secara listrik. Demikian juga untuk memperkecil gesekan, inersia dan persyaratan fleksibilitas struktur lebih disukai penggunaan cara listrik karena dapat dilakukan penguatan daya. Daya tambahan ini dapat dimasukkan ke dalam sistim untuk menghasilkan daya keluaran yang lebih besar daripada masukan sehingga lebih mudah mendeteksi besarnya masukan tersebut.

### 3. Tingkat Ketiga atau Tingkat Pembacaan Akhir

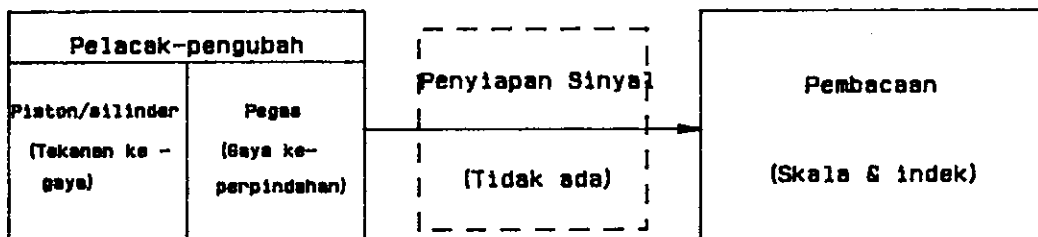
Pada dasarnya tingkat ketiga ini informasi yang dicari dalam bentuk yang komprehensif terhadap salah satu indera manusia atau pengendali. Pemberian informasi ini dapat berupa salahsatu bentuk di bawah ini.

- a. Pemberian informasi sebagai salah satu **perpindahan relatif**, misalnya perpindhan jarum penunjuk, perpindahan jalur osiloskop, atau pancaran sinar osiloskop dan sebagainya
- b. Pemberian informasi dalam bentuk digital, sebagaimana disajikan oleh suatu alat cacah seperti odometer mobil, atau sejenis multimeter moderen dan sebagainya.

Untuk mendapatkan gambaran mengenai suatu sistem pengukur yang sangat sederhana, mari kita perhatikan suatu alat pengukur tekanan udara ban mobil (lihat gambar 1.5a). Alat ini terdiri atas silinder dan piston, sebuah pegas tekan yang menahan gerakan piston dan sebuah batang yang mempunyai pembagian skala. Ketika terjadi tekanan udara menekan piston, gaya yang dihasilkan akan menekan pegas sampai terjadi keseimbangan gaya pegas dan tekanan udara. Batang berskala yang telah dikalibrasi yang tetap tinggal diam ditempatnya setelah pegas mendorong piston kembali, menunjukkan besarnya tekanan udara dalam ban yang dipakai.



(a)

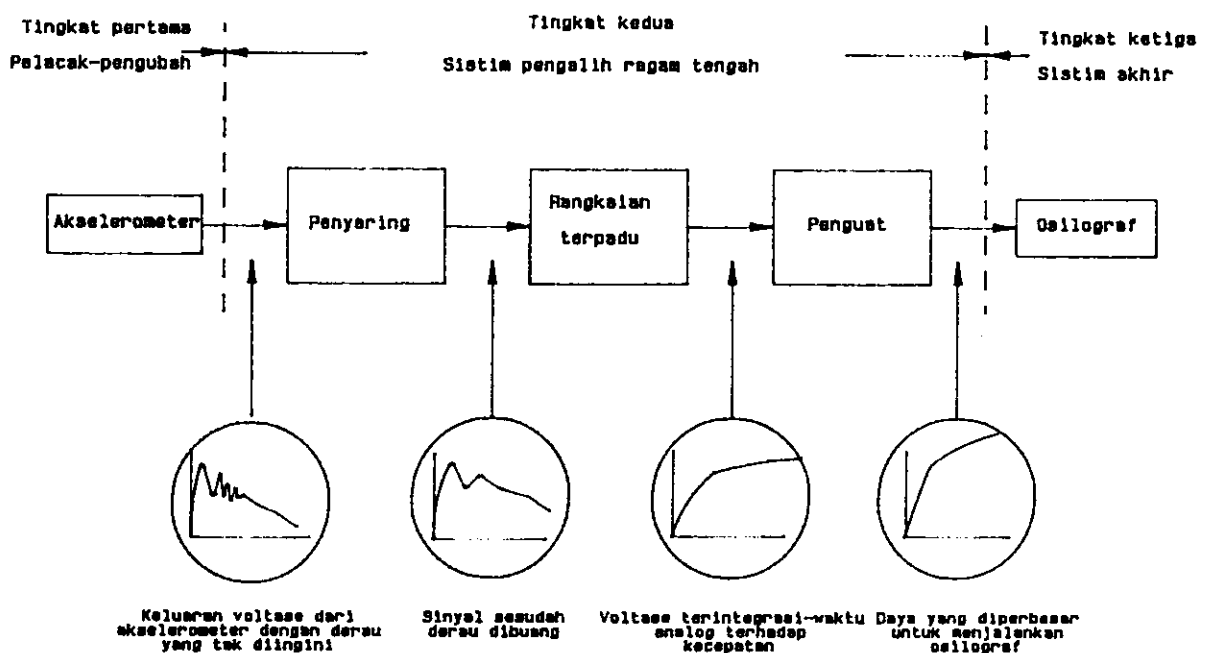


(b)

Gambar 1.5 (a) Alat ukur tekanan udara ban mobil  
 (b) Diagram balok dari fungsi pengukur tekanan ban  
 (Sumber: Beckwith, 1982, hal.8)

Kombinasi piston-silinder ini merupakan alat penjumlah gaya, yang mengindera dan mengubah tekanan menjadi gaya yang merupakan pengubah utama. Sebagai pengubah sekunder, pegas mengubah gaya ke perpindahan. Akhirnya masukan yang diubah tersebut dipindahkan tanpa melalui tingkat penyiapan sinyal langsung ke skala pembagian untuk pembacaan (gambar 1.5.b)

Sebagai contoh sistim yang lebih rumit, misalkan suatu kecepatan akan diukur seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.6 berikut ini. Alat tingkat pertama akselerometer mengeluarkan voltase analogi. Selain sebagai penguat voltase, tingkat kedua juga bertindak sebagai penyaring atau filter yang secara selektif melemahkan komponen-komponen frekuensi yang tidak diinginkan. Tingkat ini juga mengintegrasikan sinyal analog terhadap waktu, sehingga memberikan hubungan terhadap waktu, dan bukan suatu sinyal percepatan waktu.



Gambar 1.6 Diagram balok suatu sistim pengukur yang relatif lebih rumit (Sumber: Beckwith, 1982, hal. 9)

492/170/94 - d1(2)

621.07  
Asi  
17 d(1)

Pada akhirnya, daya sinyal mungkin harus dinaikkan sampai mencapai level yang dibutuhkan untuk menjalankan tingkat ketiga, atau pembacaan akhir.

#### D. Standar Pengukuran

Tanpa memandang metoda dasar pengukuran, harus digunakan beberapa basis untuk perbandingan satuan, yang disebut dengan satuan **standar**. Sejarah perkembangan satuan standar ini barangkali sudah sama tuanya dengan sejarah peradaban manusia di bumi ini. Sesuai dengan perkembangan teknologi dan kebutuhan manusia, maka satuan pengukuranpun mengalami perkembangan yang pesat. Namun satu hal yang perlu diingat bahwa harus terdapat suatu perjanjian umum mengenai nilai yang pasti dari satuan standar tersebut, dan selama terdapat sistim satuan yang berbeda harus ada perjanjian bersama untuk daerah perubahan dari sistim yang satu ke sistim yang lain.

Ada tujuh satuan dasar dan dua satuan tambahan yang dikeluarkan oleh ISO (International Standards Organization), yaitu suatu organisasi yang mengelola standar pengukuran secara internasional. Sistim ini lebih populer disebut sebagai sistim metrik. Ketujuh satuan dasar dan dua satuan tambahan itu secara lengkap dapat dilihat pada tabel 1.3. berikut ini.

Tabel 1.3. Satuan-satuan Dasar dan Tambahan Menurut ISO 1000

Kuantitas	Nama dan Simbol Unit
Satuan Dasar	
Panjang	meter (m)
Massa	kilogram (kg)
Waktu	detik (s)
Arus listrik	ampere (A)
Temperatur termodinamik	kelvin (K)
Jumlah zat	molekul (mol)
Intensitas cahaya	lilin (cd)
Satuan Tambahan	
sudut bidang	radian (rad)
sudut ruang	steradian (sr)

(Sumber: Parsons, 1970, hal. 11 )

Selanjutnya bermacam-macam satuan yang diturunkan dari satuan dasar yang diberikan dalam standar. Beberapa satuan turunan diberikan nama khusus, beberapa yang lain tidak. Misalnya luas secara sederhana bisa dinyatakan dalam bentuk meter kuadrat, sedang gaya ( $m/kg/s^2$ ) diberi nama khusus, yaitu **newton**. Kerja dan energi ( $m^2.kg/s^2$ ) disebut **Joule**. Beberapa satuan turunan dapat dilihat pada tabel 1-4 berikut ini. Perlu dicatat bahwa jika dinyatakan dalam kata, tidak perlu dimulai dengan huruf besar meskipun berasal dari nama orang, sedang singkatannya diberikan dalam huruf besar.

Tabel 1.4. Satuan-satuan Turunan

Kuantitas	Satuan	
Luas	Meter persegi	$m^2$
Isi	meter kubik	$m^3$
Frekuensi	hertz	Hz ( $S^{-1}$ )
Kerapatan	kilogram per meter kubik	$kg/m^3$
Kecepatan	meter per detik	$m/s$
kecepatan sudut	radial per detik	$rad/s$
Percepatan	meter per detik kuadrat	$m/s^2$
Percepatan sudut	radial kuadrat per detik	$rad/s^2$
Gaya	Newton	N ( $kg\ m/s^2$ )
Tekanan	newton per meter kuadrat	$N/m^2$
Viskositas	meter kuadrat per detik	$m^2/s$
Viskositas dinamik	newton-detik per meter kuadrat	$N.s/m^2$
Kerja, energi, jumlah panas	joule	J ( $N.m$ )
Daya	Watt	W ( $J/s$ )
Muatan listrik	coulomb	C ( $A.s$ )
Voltase, perbedaan potensial gaya elektro magnet	V	V ( $W./$ )
Kuat medan listrik	volt per meter	$V/m$
Tahanan listrik	Ohm	( $V/A$ )
Kapasistansi listrik	farad	F ( $A.s/V$ )
Fluks magnet	weber	wb ( $V.s$ )
Induktansi	henry	h ( $V.s/A$ )
Kerapatan fluks magnet	tesla	t ( $wb/M^2$ )
Kuat medan magnet	ampere per meter	$A/m$
Gaya magnetomotif	ampere	A
fluks Cahaya	lumen	$lm$ ( $cd.sr$ )
Luminasi	lilin per meter per segi	$cd/m^2$
Illuminasi	lux	$I_x$ ( $lm/m^2$ )

(Sumber: Holman, 1985, hal. 15)

## 1. Standar Panjang

Sampai dengan tahun 1960 standar panjang adalah suatu Batang Meter Internasional (International Meter Bar), yaitu jarak yang diukur antara dua garis yang ditulis halus di batang yang terbuat dari campuran platinum-iridium ketika berada pada kondisi yang telah ditentukan. Akan tetapi tanggal 14 Oktober 1960, pada General Conference Weight and Measures ke-sebelas di Paris, meter didefinisikan kembali sebagai 1.650.763,73 panjang gelombang atom krypton-86 dalam ruang hampa udara dari radiasi yang terjadi pada transisi antara tingkat energi  $2p_{10}$  dan  $5d_5$ .

## 2. Standar Massa

Kilogram didefinisikan sebagai massa dari Prototipe Kilogram Internasional, yaitu suatu massa yang berasal dari campuran platinum-iridium yang disimpan di International Bureau of Weight and Measures di kota Sevres Perancis. Di antara standar-standar dasar, kilogram merupakan satu-satunya yang ditentukan dengan suatu model (prototipe), yaitu benda yang merupakan pola asli dimana pembuatan seluruh benda yang lain (massa turunan) merujuk ke benda ini untuk perbandingan.

Standar sekunder yang disebut massa relatif dipelihara oleh masing-masing negara industri utama di dunia. Sebagai contoh, di Amerika Serikat, satuan dasar massa ialah "United States National Prototype Kilogram No. 20" yang dengan hati-hati dipelihara oleh Biro Standar Nasional.



### 3. Standar Waktu

Sampai dengan tahun 1956, detik didefinisikan sebagai  $1/86400$  dari periode rata-rata perputaran bumi di sumbunya. Meskipun definisi ini kelihatannya jelas dan relatif sederhana, namun masih terdapat masalah yaitu terjadi perlambatan pelan-pelan dari perputaran bumi. Berdasarkan penelitian, terjadi perlambatan putaran bumi sebesar  $0,001$  detik/abad, dan selain itu rotasi tersebut juga tidak teratur.

Oleh sebab itu, pada tahun 1956 disetujui suatu standar yang disempurnakan; yaitu detik didefinisikan sebagai  $1/31.556.925,9747$  waktu yang diperlukan oleh bumi untuk mengelilingi matahari ditahun 1900. Ini disebut detik ephemeris. Kesalahan serius pada definisi ini adalah bahwa tidak seorangpun dapat mengukur selang waktu melalui perbandingan langsung dengan selang waktu yang mendefinisikan detik. Jadi diperlukan pengukuran astronomi selama beberapa tahun untuk menghubungkan nilai detik matahari rata-rata (mean solar second) saat ini dengan standar dasar. Hasil pengukuran dan perhitungan ini, dalam harga estimasi kemungkinan kesalahan (estimated probable error), adalah sekitar 1 bagian dari  $10^9$ . Angka ini sangat kasar bila dibandingkan dengan ketepatan yang dinyatakan oleh definisi dasar dari detik tadi. Untuk mengatasi kesulitan ini, maka para ahli metrologi dalam konferensi internasional untuk ukuran dan timbangan yang ke-13 kembali menetapkan definisi detik berdasarkan harga frekuensi resonator atomik. Hal ini didasarkan pada penelitian atom yang menemukan bahwa getaran yang dihasilkan oleh beberapa transisi atom bisa diukur dengan pengulangan yang tinggi. Maka pada tanggal 13 Oktober 1968, diputuskan secara resmi memakai satuan waktu adalah detik dengan definisi sebagai berikut:

"Detik adalah selang waktu yang sesuai dengan  $9.192.631.770$  siklus dari frekuensi resonansi atomik sesium  $133$ ".

#### 4. Standar Temperatur

Pada tahun 1927, laboratorium nasional di AS, Inggris dan Jerman mengusulkan suatu standar temperatur yang kemudian dikenal sebagai skala temperatur international 1927 (ITS-27). Standar ini yang waktu dipakai oleh tidak kurang dari 31 negara, disesuaikan sedekat mungkin dengan skala temperatur termodinamik yang diusulkan oleh Lord Kelvin pada tahun 1854. Skala ini didasarkan atas 6 titik temperatur tetap yang tergantung kepada sifat-sifat bahan tertentu termasuk titik es dan titik uap dari air. Beberapa revisi telah dibuat pada beberapa konferensi berikutnya, terutama pada tahun 1948 dan 1968. Sekarang ini international Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68) yang kemudian dipakai oleh International Committee on Weights and Measures dan dikuatkan oleh General Conference ke - 13, telah berlaku sebagai satuan dasar temperatur adalah kelvin (K).

Satuan dasar temperatur, kelvin (K) didefinisikan sebagai  $1/273,16$  bagian dari temperatur termodinamik titik tripel air, yaitu temperatur dimana fase padat, cair dan uap air berada dalam keseimbangan. Nilai  $0,010^{\circ}\text{C}$ , ditunjuk sebagai temperatur ini. Derajat Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) didefinisikan sebagai:  $t = T - 273,15$ .

Dimana  $t$  dan  $T$  adalah derajat celsius dan kelvin.

#### 5. Standar Listrik

Sebelum tahun 1948, standar listrik didasarkan atas Ohm, Ampere, dan volt "Internasional" yang dipakai sejak

tahun 1893. Ohm Internasional didefinisikan sebagai "tehanan dari suatu kolom air raksa yang mempunyai penampang seragam, dengan panjang 106,300 cm dan mempunyai massa 14,4521 gram ketika suhunya  $^{\circ}\text{C}$ ". Ampere Internasional didefinisikan sebagai "arus yang tidak berubah, ketika melalui larutan nitrat perak dalam air sesuai dengan spesifikasi standar, mengendapkan perak dengan laju 0,001118 gram per detik". Sedangkan Volt Internasional didefinisikan sedemikian rupa sehingga suatu sel clark pada  $15^{\circ}\text{C}$  mempunyai tegangan listrik (tgl/emf) 1,434 volt.

Kesulitan utama pada sistem ini terletak pada kenyataan bahwa terdapat ketidakcocokan antara standar listrik Internasional dengan standar listrik mutlak. Dari definisi di atas tampak bahwa satuan-satuan tersebut tidak cocok dengan hukum Ohm yang sesungguhnya. Definisi ini kemudian dikoreksi pada tahun 1908 dengan membuat volt menjadi satuan yang diturunkan berdasar kepada definisi tahun 1893 untuk Ampere dan Ohm. Tetapi pada saat ini disetujui bahwa satuan **praktis** didasarkan langsung atas satuan-satuan mutlak yang bisa diturunkan.

Dasar untuk menentukan/menetapkan satuan-satuan listrik mutlak terletak secara teoritis dalam rumus-rumus turunan yang berdasar pada definisi dan dua prosedur eksperimental. Pada langkah pertama, suatu induktor yang dimensi fisiknya telah ditentukan dengan sangat tepat disusun dan induktansinya juga **dihitung**. Reaktansi induktor tersebut kemudian dibandingkan dengan standar tahanan yang tahananannya telah ditentukan dalam bentuk dimensional. Langkah kedua terdiri atas penentuan gaya atau teori yang ditimbulkan oleh dua koil (kumparan), dalam bentuk yang disebut **neraca arus**, ketika dilewati arus. Arus tersebut juga melewati suatu tahanan yang distandarkan dengan prosedur pertama. Penurunan potensial lewat tahanan kemudian

dibandingkan dengan keluaran dari suatu sel **jenis standar**. Berdasar pada data yang didapatkan dari neraca arus, volt mutlak dapat dihitung, dengan demikian menstandarkan sel yang tadinya merupakan **jenis standar** sekarang menjadi standar betulan.

Dari voltase dan Ohm yang ditentukan dengan eksperimen ini, satuan-satuan listrik yang lain, misalnya ampere, henry, dan farad dapat diturunkan dalam bentuk mutlak, bahkan dengan ketelitian sampai beberapa per-sepuluh juta bisa diperoleh.

Pada tahun 1935, komite internasional untuk ukuran dan timbangan akhirnya menetapkan bahwa konversi harus dibuat, dan ditentukan tanggal 1 Januari 1948 sebagai tanggal perubahannya. Pada waktu itu perlu untuk mempersamakan sistim mutlak ke sistim Internasional lama melalui hubungan sebagai berikut:

- 1 Ohm Internasional = 1,00049 Ohm mutlak
- 1 volt Internasional = 1,000330 volt mutlak
- 1 ampere Internasional = 0,99835 ampere mutlak

Standar-standar sekunder dalam bentuk **sel-sel standar** untuk voltase dan **tahanan-tahanan standar** untuk tahanan listrik masih dipakai di laboratorium-laboratorium untuk sumber kalibrasi praktis.

## BAB II

### KUANTITAS MASUKAN PENGUKURAN MEKANIS

Secara umum, ada dua jenis kuantitas masukan pengukuran mekanis yaitu: kuantitas hubungan waktu, dan kuantitas analog atau digital.

#### A. Kuantitas Dalam Bentuk Hubungan Waktu

Suatu parameter yang umum bagi semua pengukuran adalah waktu. Ketika waktu riil berlalu, maka besarnya benda yang diukur dapat saja berubah atau tetap seperti semula. Sifat setiap perubahan sering sangat penting sebagaimana halnya amplitudo yang berdiri sendiri yang bisa diklasifikasikan menjadi:

##### 1. Sifat Statis

##### 2. Sifat Dinamis; yang terdiri atas

- a. Keadaan tenang berkala
- b. Keadaan tak berulang (transien).

Dalam hal ini, sudah tentu objek yang diukur yang bersifat statis (tidak berubah) adalah yang paling mudah untuk diukur. Bila suatu sistem pengukuran diakhiri dengan beberapa bentuk indikator jenis meter, maka penunjukan ukuran tidak mendapat kesulitan yang berarti dalam mencapai penunjukan ukuran tertentu. Yang menjadi masalah dalam mendapatkan penunjukan ukuran tertentu ini adalah pengukuran suatu objek ukur yang dengan cepat berubah dan ini merupakan tantangan nyata terhadap pengukuran.

Terdapat dua bentuk umum dari masukan dinamis yaitu keadaan tenang-berkala dan keadaan tak-berulang (transien). Kuantitas masukan keadaan tenang-berkala adalah masukan yang besarnya mempunyai siklus waktu berulang

tertentu, sedangkan perubahan waktu besaran transien tidak berulang. Jaringan voltase (tegangan) 50 Hz. Berarti mempunyai 50 siklus adalah salah satu contoh dari sinyal keadaan tenang berkala.

Pada bagian ini kita akan mencoba membahas kuantitas besaran yang perlu untuk mendefinisikan dan menentukan beberapa faktor yang berhubungan dengan waktu.

### 1. Hubungan Selaras-Sederhana

Suatu fungsi variabel dinamakan sederhana apabila turunan keduanya sebanding dengan fungsinya, tapi mempunyai tanda yang berlawanan. Kebanyakan variabel bebas tersebut adalah waktu  $t$ , meskipun setiap dua variabel mungkin berhubungan selaras.

Salah satu fungsi selaras yang paling umum dalam teknik permesinan adalah yang berhubungan dengan perpindahan dan waktu. Dalam kerekayasaan listrik, banyak kuantitas variabel dalam jaringan arus bolak-balik merupakan fungsi selaras terhadap waktu. Hubungan ini merupakan dasar pokok dari fungsi dinamik, dan kebanyakan kuantitas yang merupakan fungsi waktu dapat dituliskan secara selaras.

Dalam bentuk yang paling mendasar, gerakan selaras sederhana dapat didefinisikan dalam hubungan:

$$S = S_0 \sin \omega t \quad (2.1)$$

dimana:

- S adalah perpindahan sesaat dari keseimbangan
- $S_0$  adalah amplitudo atau perpindahan maksimum dari keseimbangan

$w$  adalah frekuensi putar dalam rad/det, dan  
 $t$  adalah selang waktu yang diukur dari keadaan di-  
 mana  $t = 0$  detik.

Gerakan pendulum dengan amplitudo kecil, massa diujung  
 suatu batang, serta pemberat yang digantung dengan tali  
 karet, keseluruhan tersebut bergetar dalam sistim gerakan  
 selaras sederhana, atau sangat mendekati.

Dari persamaan (2.1) di atas, maka dapat diturunkan  
 persamaan-persamaan berikut dengan melakukan langkah  
 mendiferensialkan dalam persamaan (2.1) tersebut.

$$v = \frac{ds}{dt} = S_0 w \cos wt \quad (2.2)$$

dan

$$v_0 = S_0 w \quad (2.2a)$$

Juga

$$a = \frac{dv}{dt} = -S_0 w^2 \sin wt \quad (2.3)$$

$$= -S w^2 \quad (2.3a)$$

dan

$$a_0 = -S_0 w^2 \quad (2.3b)$$

dimana:

$v$  adalah kecepatan

$v_0$  adalah kecepatan maksimum atau kecepatan amplitudo

$a$  adalah percepatan

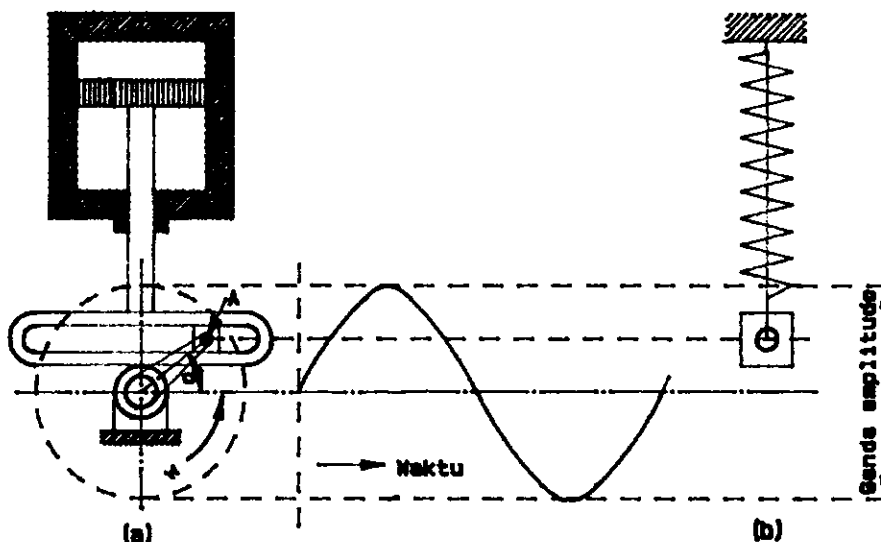
$a_0$  adalah percepatan maksimum atau percepatan ampli-  
 tudo.

Persamaan (2.3a) memenuhi ketentuan yang diuraikan dalam  
 paragraf pertama bagian ini tentang gerakan selaras-  
 sederhana yaitu: percepatan  $a$  berbanding lurus dengan  
 perpindahan  $S$ , tetapi dengan arah yang berlawanan, dimana

faktor pembandingnya adalah kuadrat dari frekuensi putar ( $\omega^2$ ).

Ide frekuensi putar, seperti yang digunakan di atas, sangat berguna dalam mempelajari hubungan-hubungan siklus. Sebagai contoh, analogi mekanis dalam bentuk mekanisme Scotch-yoke barangkali dapat memperjelas makna dari frekuensi putar pada hubungan selaras sederhana.

Gambar 2.1 (a) memperlihatkan suatu elemen Scotch-Yoke, yang terdiri atas engkol OA, dengan sebuah blok luncur yang mendorong kombinasi yoke-piston. Apabila kita mengukur perpindahan piston dari posisi tengah, maka amplitudo perpindahan adalah  $\pm OA$ . Jika engkol berputar pada  $\omega$  radial/detik, maka sudut engkol  $\theta$  bisa ditulis sebagai  $\omega t$ . Ini tentu saja terjadi karena kita memasukkan nilai waktu  $t$  ke dalam persamaan yang tidak langsung kelihatan dalam bentuk  $\theta$ . Perpindahan piston sekarang dapat ditulis sebagai:  $S = S_0 \sin \omega t$  (ini sama dengan persamaan 2.1). Satu siklus terjadi apabila engkol telah berputar sepanjang  $2\pi$  radian, dan bila  $f$  adalah frekuensi dalam hertz, maka  $\omega = 2\pi f$  (2.4)



Gambar 2.1 (a) Mekanisme Scotch-Yoke dalam gerakan selaras sederhana.  
(b) Sistem pegas massa yang bergerak dalam gerakan selaras sederhana.

(Sumber: Beckwith, 1982, hal.23)



Persamaan perpindahan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi yoke-piston bergerak dalam gerakan selaras-sederhana. Contoh lain dari hubungan gerakan selaras sederhana ini adalah sistem pegas massa seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.1(b). Jika amplitudo dan frekuensi alamnya tepat sama dengan amplitudo dan frekuensi mekanis Scotch-yoke, maka massa dan piston dapat bergerak ke atas dan ke bawah dalam keadaan sinkron sempurna.

Dengan perkataan lain, bahwa untuk setiap hubungan selaras sederhana, analogi mekanisme Scotch-yoke dapat digunakan sebagai contoh. Panjang engkol OA memberikan vektor amplitudo, dan kecepatan sudut  $\omega$  dalam radian/detik akan sesuai dengan frekuensi putar dari hubungan selaras. Bila massa dan piston tersebut mempunyai frekuensi yang sama dan secara bersamaan mencapai perpindahan maksimum yang sesuai, maka gerakan mereka dinamakan gerakan sefasa. Akan tetapi bila keduanya mempunyai frekuensi yang sama tetapi tidak berosilasi secara bersamaan, maka hubungan waktu (ketinggalan atau meninggalkan) antara mereka dapat dinyatakan dalam sudut yang disebut sudut fasa,  $\phi$ .

## 2. Hubungan Komplek

Kebanyakan dari sinyal mekanis-dinamis adalah komplek pada keadaan tetap atau transien, apabila mereka itu merupakan fungsi waktu dari tekanan perpindahan, regangan atau lain-nya, dapat dinyatakan sebagai kombinasi komponen selaras sederhana. Hanya saja masing-masing komponen akan mempunyai amplitudo dan frekuensinya sendiri dan dapat dikombinasikan dengan berbagai komponen lain dalam bermacam hubungan fasa. Pernyataan secara matematis umum mengenai hal ini dapat ditulis sebagai berikut.

$$f(t) = \frac{A}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (2.5)$$

dimana

$A$ ,  $A_n$ , dan  $B_n$  adalah amplitudo penentu konstanta, yang disebut sebagai koefisien keselarasan.  $n$  adalah bilangan bulat dari 1 sampai tak terhingga yang disebut sebagai orde (tingkat) keselarasan.

Jika  $n$  adalah satu, maka bentuk sinus dan cosinus yang bersesuaian disebut fundamental. Untuk  $n = 2, 3, 4$  dan sebagainya, bentuk yang bersesuaian disebut selaras kedua, ketiga, keempat dan seterusnya.

Persamaan (2.5) dapat juga ditulis ke dalam dua bentuk ekuivalen yaitu:

$$f(t) = \frac{A}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos (n\omega t - \phi_n) \quad (2.5a)$$

$$f(t) = \frac{A}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin (n\omega t - \phi'_n) \quad (2.5b)$$

dimana koefisien keselarasan  $C_n$ , ditentukan dari hubungan

$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$   
dan hubungan fasa  $\phi_n$  dan  $\phi'_n$  ditentukan dari:

$$\operatorname{tg}\phi_n = \left(\frac{B_n}{A_n}\right) \quad \text{dan} \quad \operatorname{tg}\phi'_n = \left(\frac{A_n}{B_n}\right)$$

Sudut fasa  $\phi_n$  dan  $\phi'_n$  memberikan hubungan waktu yang perlu di antara bermacam komponen yang selaras.

Meskipun persamaan (2.5) menunjukkan bahwa semua keselarasan dapat dinyatakan dalam definisi hubungan sinyal-waktu, pada kenyataannya hubungan seperti ini sering hanya mengandung sejumlah kecil hubungan yang selaras. Dalam kenyataannya, seluruh sistim pengukuran mempunyai beberapa

frekuensi atas dan bawah, di luar batas ini hubungan selaras lainnya akan dilemahkan. Dengan arti kata, tidak ada alat yang mempunyai daerah frekuensi tak terbatas.

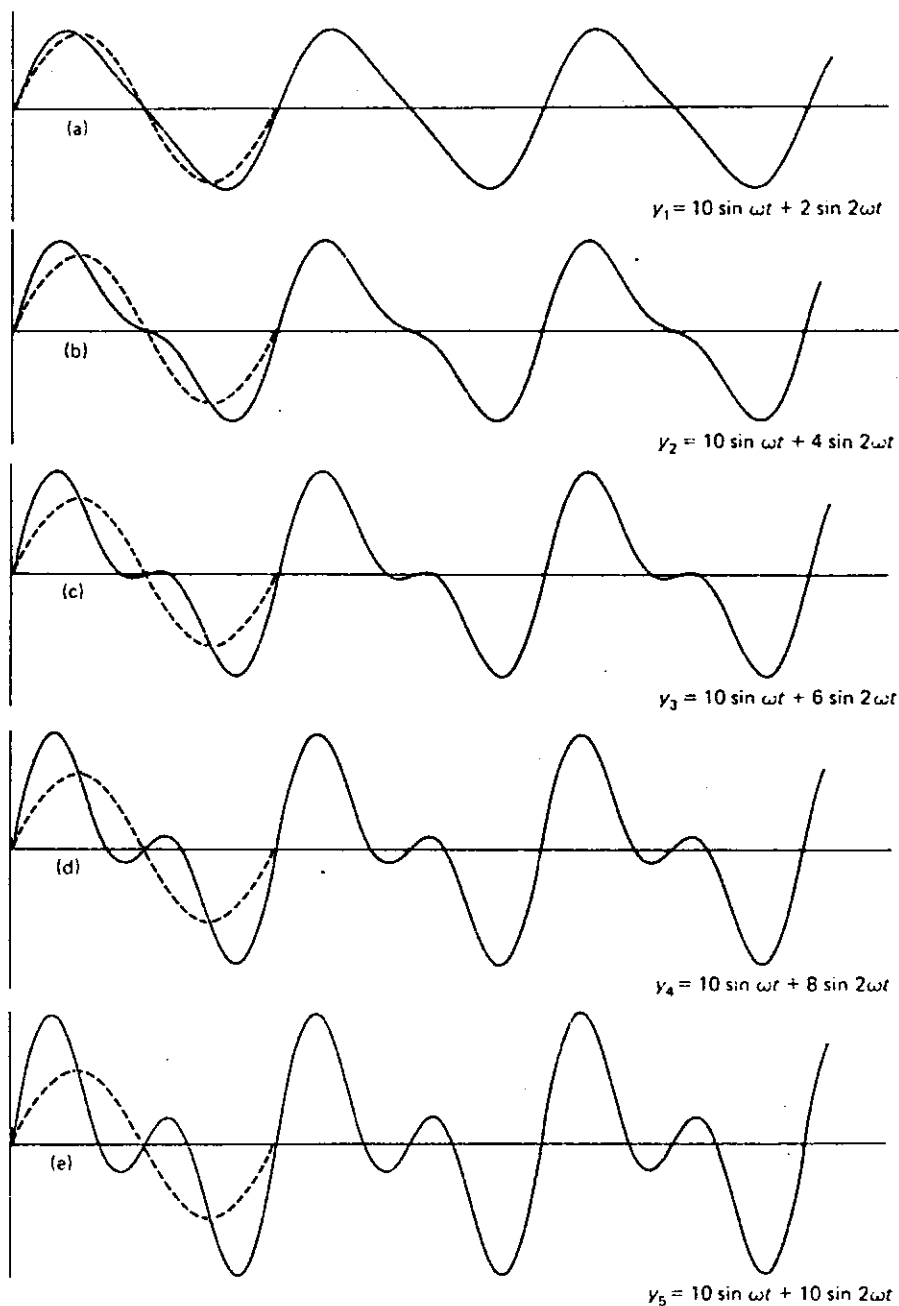
Meskipun amat mustahil mengumpulkan seluruh kombinasi hubungan selaras yang mungkin, akan tetapi barangkali ada gunanya mempertimbangkan efek (pengaruh) beberapa variabel seperti amplitudo relatif, tingkat keselarasan  $n$ , dan hubungan fasa  $\phi$ . Untuk itu gambar 2.2. sampai 2.6 memberikan hubungan dua komponen yang masing-masingnya hanya menunjukkan efek dari satu variabel saja pada bentuk gelombang totalnya. Gambar 2.2. menunjukkan efek amplitudo relatif; gambar 2.3. menunjukkan frekuensi relatif; gambar 2.4. menunjukkan bermacam hubungan fasa; gambar 2.5. menunjukkan rupa bentuk gelombang untuk dua komponen dengan frekuensi yang berbeda; dan gambar 2.6 menunjukkan efek dari dua frekuensi yang hampir sama.

Sebagai contoh untuk hubungan yang dibuat selaras, marilah kita lihat suatu fungsi tekanan-waktu yang relatif lebih sederhana, yang terdiri atas dua bentuk selaras yaitu:

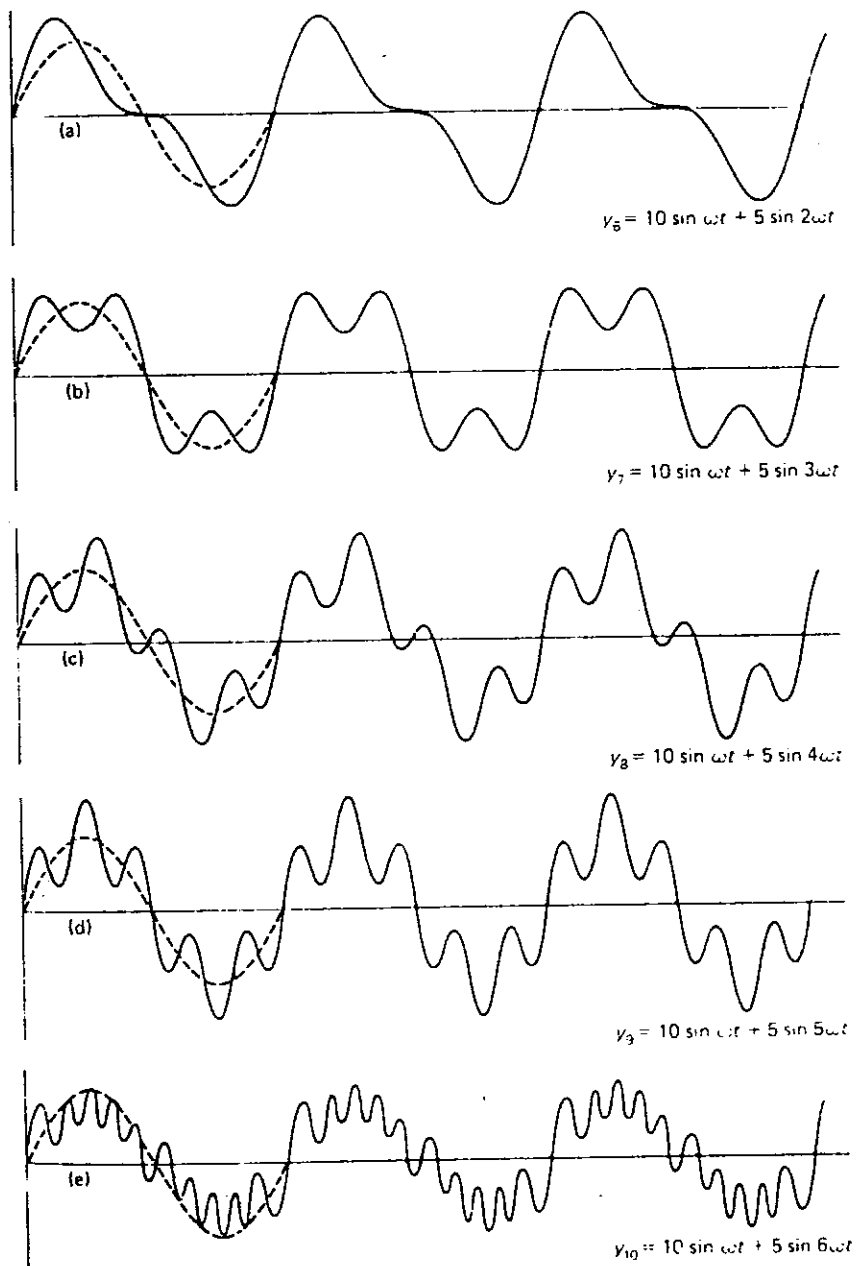
$$P = 100 \sin (80.t) + 50 \cos \left( 160t - \frac{\pi}{4} \right) \quad (2.6)$$

Pemeriksaan terhadap persamaan ini menunjukkan bahwa frekuensi putar fundamental mempunyai nilai 80 radian perdetik, atau  $80/2\pi = 12,7$  Hz. Karena itu periode tekanan adalah  $1/12,7 = 0,0788$  detik. Bentuk kedua mempunyai frekuensi radian lebih besar daripada frekuensi fundamental, yaitu 160 radian perdetik. Frekuensi ini ketinggalan dari frekuensi fundamental sejauh  $1/8$  siklus atau  $\pi/4$  radian. Persamaan ini juga menunjukkan bahwa amplitudo

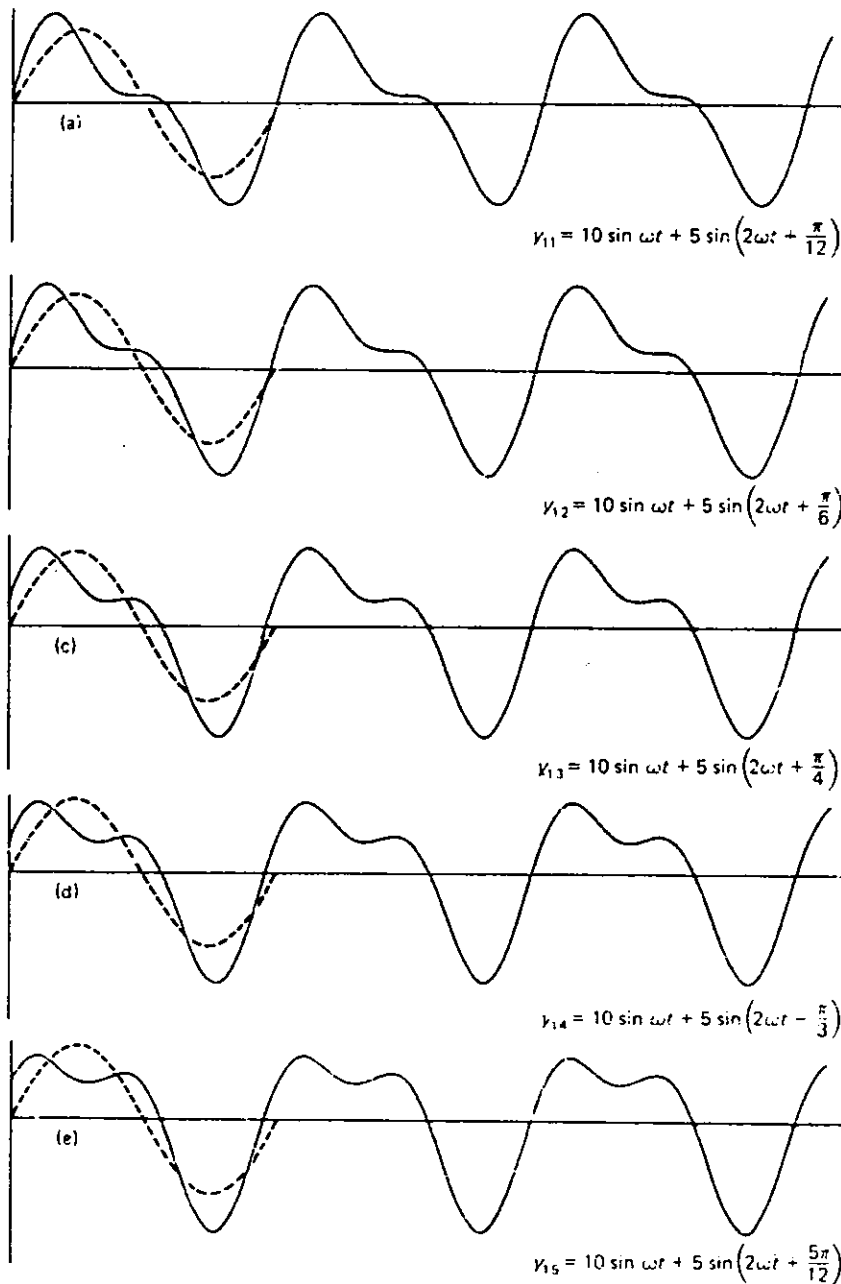
fundamental, yang besarnya 100, adalah dua kali besar amplitudo selaras ke dua, yang besarnya 50. Lukisan mengenai hubungan ini ditunjukkan pada gambar 2.7.



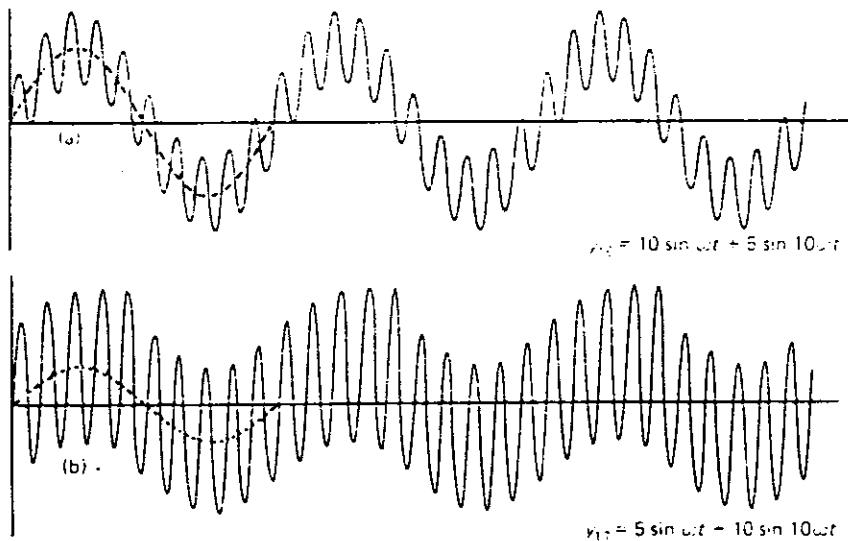
Gambar 2.2 Contoh bentuk gelombang dua komponen dengan komponen selaras kedua dari bermacam amplitudo relatif.  
(Sumber: Beckwith, 1982, hal. 26)



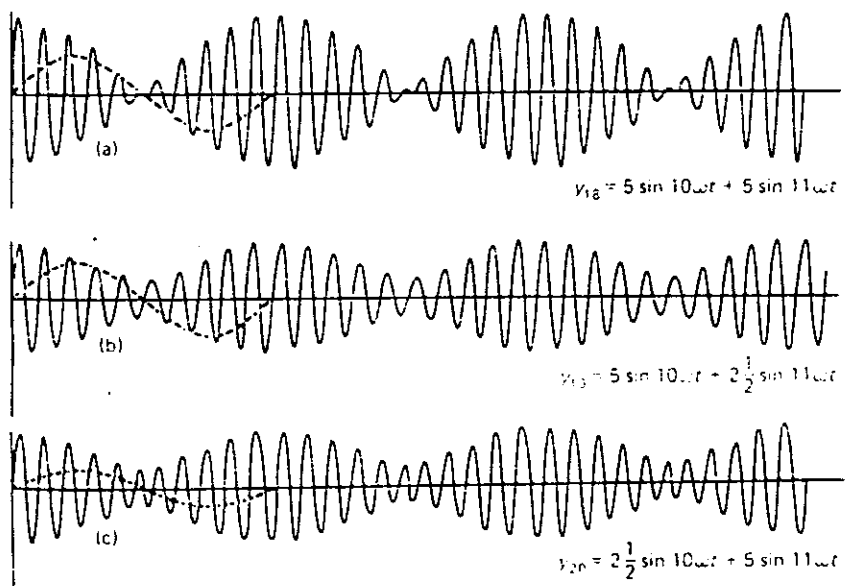
Gambar 2.3 Contoh bentuk gelombang dua komponen dengan komponen selaras kedua dari bermacam frekuensi relatif.  
 (Sumber: Beckwith, 1982, hal.27)



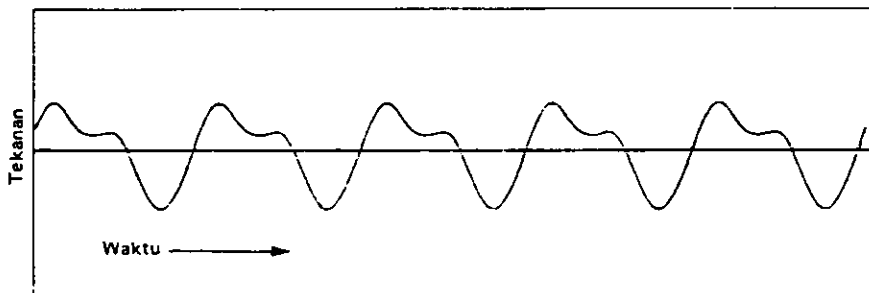
Gambar 2.4 Contoh bentuk gelombang dua komponen dengan komponen selaras kedua yang mempunyai bermacam tingkat perpindahan fasa. (Sumber: Beckwith, 1982, hal.28)



Gambar 2.5 Contoh bentuk gelombang dengan dua komponen yang mempunyai frekuensi *sangat berbeda*. (Sumber: Beckwith, 1982, hal.29)



Gambar 2.6 Contoh bentuk gelombang dengan dua komponen yang mempunyai frekuensi *sangat mirip*. (Sumber: Beckwith, 1982, hal.29)



Gambar 2.7 Hubungan Tekanan-Waktu pada  $P=100 \sin(80t) + 50 \cos(160t - \pi/4)$ .  
(Sumber: Beckwith, 1982, hal.30)

## B. Kuantitas Dalam Bentuk Digital

Kebanyakan suatu objek yang diukur berubah terhadap waktu dalam pola analog, yaitu mereka berubah dengan cara yang kontinu dalam suatu daerah besaran dengan pola yang seragam. Sebagai contoh adalah kelajuan suatu mobil, ketika mulai berjalan dari keadaan diam mempunyai beberapa besaran disetiap saat selama bergerak, tidak peduli berapa kecilpun selang waktu pengukuran diberikan. Kelajuan mobil tersebut berubah dalam suatu sifat analog sebagai fungsi dari waktu. Contoh lain adalah voltase dalam suatu jaringan daya listrik yang berubah secara sinusoida terhadap waktu. (Gambar 2.8a). Hal seperti ini juga dinamakan dengan kuantitas analog. Tetapi sinyal analog tidaklah selalu berbentuk sinusoida ataupun periodik, suatu hubungan tegangan-waktu yang mengikuti kejut mekanis (gambar 2.8b), dianggap berbentuk analog. Variasi tekanan karena transi-

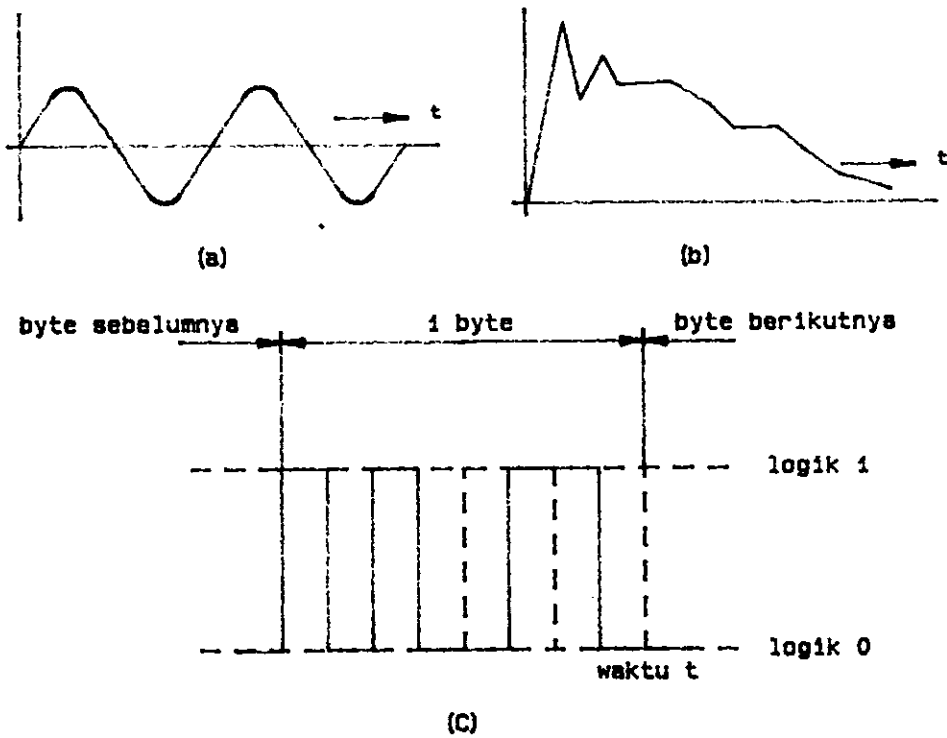


si suara manusia lewat udara juga analog. Skala analog dapat diperbandingkan dengan daerah terangnya antara hitam dan putih, termasuk variasi abu-abu di antaranya. Sedangkan masukan digital hanya menginginkan variasi waktu di antara dua, hitam atau putih saja. Meskipun pada bagian ini kita akan membahas beberapa dasar penggunaan logika digital dan rangkaianannya sebagaimana dipakai dalam pengukuran mekanis, perlu dipahami bahwa tujuan penulis bukanlah mencoba membahas sampai mendalam tentang elektronika digital. Dikarenakan luasnya subjek dan terbatasnya kemampuan penulis, maka pada buku ini tujuan kita hanyalah sedikit meninjau subjek dibidang rekayasa, bukan mengenai kelistrikannya, sehingga cukup memberikan pengertian mengenai kelebihan dan kekurangannya, serta kerja umum dari rangkaian zat padat terutama jenis logika pulsa.

Informasi atau masukan digital ditranmissikan dan diproses dalam bentuk bit, gambar 2.8c. Masing-masing bit didefinisikan dengan:

1. Satu atau dua "tingkat logik" yang telah didefinisikan sebelumnya.
2. Selang waktu yang ditunjuk untuknya, yang dinamakan selang bit.

Dasar yang paling umum untuk kedua ketentuan logik ialah tingkat-tingkat voltase yang telah ditentukan sebelumnya, misal 0 s/d 5 VA.



Gambar 2.8. Contoh hubungan-hubungan voltase-waktu untuk sinyal-sinyal jenis analog (a dan b) dan sinyal digital (c)

Arus atau pergeseran pembawa frekuensi juga digunakan. Laju waktu dari bit juga dikontrol ketat dengan menggunakan suatu osilator yang dikendalikan dengan kristal (atau detak). Intelijensi ini kemudian dibawa oleh kelompok-kelompok bit yang telah diberi kode khusus dalam urutan yang telah ditentukan sebelumnya; misalnya data-data alphanematik dapat ditangani oleh urutan tiga, empat atau lebih bit yang dikirim dalam bermacam kombinasi yang mungkin, masing-masing kombinasi atau kelompok membentuk satu kata informasi. Istilah **byte** dipakai untuk suatu kata yang terdiri atas 8-bit, sedang istilah kata biasa dipakai untuk setiap unit informasi digital. Kata 16-bit mempunyai panjang 2 byte.

Gambar 2.8c. menunjukkan kepada kita suatu kombinasi yang mungkin dari sejumlah bit sehingga membentuk satu byte. Dalam hal ini, urutan dari nilai bit tersebut adalah 10100110. Di sini kita bisa melihat bahwa suatu bit tidaklah harus merupakan pulsa, dengan arti bahwa dia harus dalam urutan ke atas/bawah/atas yang **sempurna**. Artinya suatu byte informasi dapat berupa 00000000 ataupun 11111111, dalam hal seperti ini tidak terjadi perubahan dari bit ke bit.

Karena kebanyakan masukan pengukuran berasal dari bentuk analog, maka biasanya diperlukan beberapa jenis konverter analog ke digital (A/D atau ADC). Kadang-kadang juga diperlukan penggunaan konverter digital ke analog (D/A atau DAC) dalam satu mata rantai pengukuran. Salah satu contoh dari penggabungan kedua jenis konverter ini adalah penanganan informasi dengan menggunakan suatu alat digital canggih yang disebut **modulasi kode pulsa**.

Dengan alat ini suara manusia (berupa masukan analog) diubah menjadi bentuk digital pada transmisi sepanjang rangkaian telepon, dan kemudian diubah kembali menjadi

bentuk analog diujung bagian penerimaan. Beberapa alasan penggunaan cara atau proses ini dapat dibicarakan pada bagian berikut ini.

### 1. Mengapa Menggunakan Metode Digital?

Pengetahuan dan pengertian seseorang pertama kali dengan peralatan digital barangkali terjadi dengan alat-alat ukur yang menggunakan pembacaan secara digital seperti mikrometer digital, voltmeter digital dan sebagainya. Keuntungan yang segera terlihat dari pembacaan digital ini adalah interpolasi tidak dibutuhkan, pembacaan secara langsung dan presisi, sehingga dapat mengurangi kesalahan karena interpolasi yang tidak benar.

Kemajuan yang lebih besar dari teknik digital dalam instrumentasi terletak pada kenyataan bahwa peralatan yang memakai sistem digital dapat dengan mudah digandeng satu sama lainnya dengan komputer. Peralatan yang berdasarkan komputer sangat memudahkan perekaman data dan pencetakannya, atau tetapi hal yang lebih penting lagi ialah bahwa banyak langkah yang perlu dilakukan dalam mengolah data (masukan) dapat ditangani dengan mudah dan otomatis sehingga dapat dipelajari lebih lanjut.

Keuntungan lain yang diperoleh dari penggunaan instrumentasi digital, adalah karena sinyal digital bersifat tahan derau. Isi informasi sinyal digital tidak tergantung atas amplitudo, akan tetapi tergantung pada urutan khusus dari pulsa atas/bawah yang digunakan. Oleh sebab itu selama urutannya dapat diidentifikasi, bentuk masukannya yang benar dan sempurna tetap utuh.

Sistem pengukuran digital barangkali tidak mempunyai keuntungan khusus dari segi biaya jika perbandingan yang diambil hanya berdasarkan instrumentasinya saja.

## 2. Mendigitalkan Masukan Mekanis

Untuk dapat diproses secara digital, maka objek ukur analog haruslah memenuhi kriteria sebagai berikut:

- a. Masukan hendaklah diubah ke pulsa "ya/tidak",
- b. Masukan harus diberi kode tertentu dalam bentuk yang dapat dimengerti oleh sistim yang berlaku; dan
- c. Masukan harus diselaraskan agar dapat berhubungan dengan benar, baik terhadap pengendali ataupun terhadap sinyal perintah yang lain.

Apabila ketiga persyaratan tersebut terpenuhi, maka masukan tersebut disebut **interface**.

Seandainya beberapa bentuk komputer merupakan bagian-bagian dari sistim, masukan tidak hanya harus diubah menjadi pulsa digital, tetapi pulsa tersebut harus diubah ke bahasa yang digunakan oleh komputer, yaitu **bahasa biner**. Selanjutnya sudah barang tentu bahwa komputer tidak dapat memberikan perhatian yang tak terbagi kepada setiap sumber sinyal secara bersamaan. Untuk ini setiap masukan, memproses data, mengeluarkan data, dan mengendalikan perintah harus menunggu gilirannya. Dengan kata lain, seluruh masukan dan keluaran harus diselaraskan dengan interfacing yang sesuai.

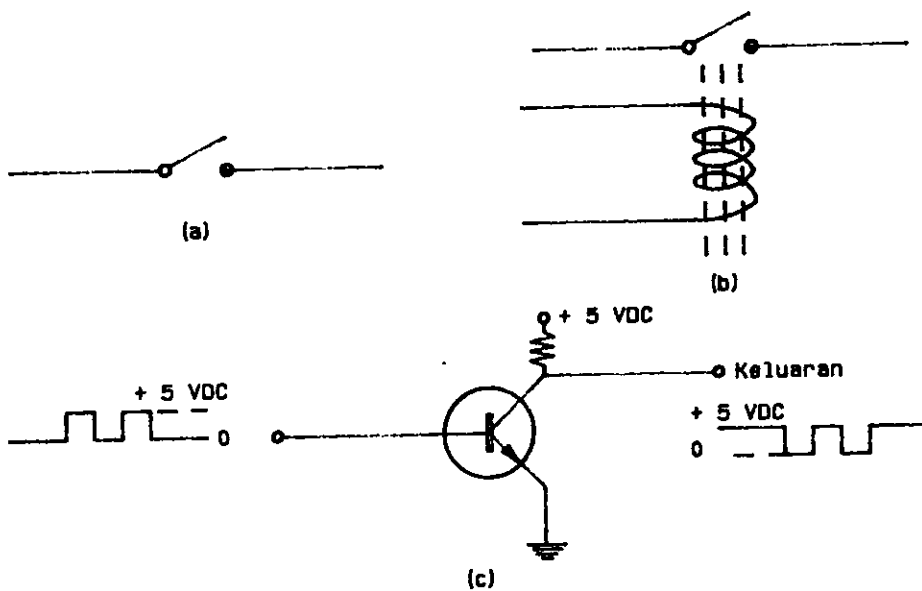
Instrumetasi jenis digital tunggal yang tujuan akhirnya hanyalah sekedar mempertunjukkan besarnya suatu masukan dalam bentuk digital, sering hanya membutuhkan pengubahan masukan ke frekuensi. Pengubah konvensional dapat dipakai untuk mengindera besaran yang diukur dan mengubahnya ke dalam bentuk analog. Voltasenya kemudian dapat diperkuat dan dengan memakai suatu osilator yang dikendalikan dengan voltase, diubah ke frekuensi yang sebanding. Terdapat sejumlah transuder dalam lapangan pengukuran mekanis yang menghasilkan keluaran voltase se-

perti jembatan wheatstone (pengukur regangan), jembatan termistor, transformer diferensial, termokopel dan sebagainya. Selanjutnya gerakan mekanis, baik gerakan translasi maupun rotasi dapat dengan cepat, mudah dan sempurna diubah ke pulsa voltase digital oleh pengubah proksimiti, fotosel, interuptor dan sebagainya.

### 3. Elemen-Elemen Dasar Rangkaian Digital

#### a. Elemen Logik Dasar

Suatu elemen digital dalam bentuk yang paling sederhana adalah mekanisme saklar katup tunggal gerak tunggal (single-pole single-throw-SPST) biasa seperti yang terlihat pada gambar 2.9a berikut ini. Apabila digerakkan alat ini bisa memproduksi dan mengendalikan urutan ya-tidak, atas-bawah. Pada gambar 2.9b adalah suatu relay elektromekanis biasa yang merupakan alat digital yang sedikit lebih maju daripada SPST, dimana masukan listrik dapat dimanfaatkan untuk mengubah kondisi suatu keluaran. Alat saklar yang lebih canggih adalah tabung vakum elektronik trioda dan transistor (gambar 2.9c). Bila dibias dengan tepat, maka transistor dapat dibuat menghubungkan atau memutus tergantung atas sinyal yang masuk. Alat ini dapat melakukan fungsi pada tegangan kendali yang relatif lebih rendah, dan bisa melakukan pemutusan hubungan pada laju ratusan MHz, dapat dibuat sangat kecil atau besar, serta tidak mahal dan juga tidak membutuhkan filamen pemanas. Pada saat ini transistor banyak dipadukan dengan elemen-elemen sederhana yang lain, misalnya tahanan (resistor), dan dioda ke balok paduan untuk maksud khusus yang dikenal dengan istilah lempengan terpadu atau IC (integrated Circuit chip).



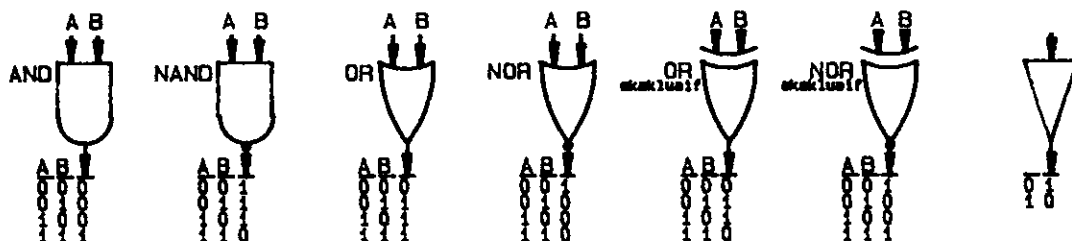
Gambar 2-9 Alat saklar digital

- (a). Saklar mekanis sederhana
  - (b). Relay dengan pengontrol listrik
  - (c). Saklar jenis transistor
- (Sumber: Beckwith, 1982, hal. 169)

Terdapat banyak sekali serpihan/lempengan IC ini, variasi dan kerumitan alat ini berkembang sangat cepat sehingga rangkaian listrik banyak yang diubah untuk bisa menggunakannya. Kebanyakan lempengan IC adalah merupakan gabungan dari beberapa elemen sederhana dalam bermacam-macam kombinasi. Simbol-simbol singkatan khusus dipakai untuk menggambarkan berbagai macam operasi lempengan. Masing-masing simbol digerakan untuk menunjukkan kombinasi elemen-elemen zat padat seperti transistor, resistor, dioda dan lain sebagainya, dan dikombinasikan untuk menunjukkan fungsi yang dipunyainya. Selanjutnya kombinasi elemen logik dasar tersebut dirakit dalam susunan tertentu dalam suatu lempengan tunggal. Apa yang disebut dengan lempengan NSI (medium-scale-integration) terdiri atas 50 sampai 100 komponen elemen logik individu yang dirakit menjadi satu. Lempengan MSI (large-scale-integration) mempunyai lebih dari 100 elemen logik.

Gambar 2.10 memperlihatkan beberapa simbol untuk elemen logik secara umum yang dipakai dalam berbagai-macam kombinasi untuk membentuk bermacam-macam serpihan IC. Elemen-elemen 2.10(a) sampai 2.10(g) juga disebut gerbang (gate) Gambar 2.10 (g) menunjukkan pembalik (inverter) sederhana. Ditunjukkan juga logik atau tabel-tabel kebenaran (truth table) yang memuat daftar semua kombinasi yang mungkin dari masukan dan keluaran yang bersangkutan. Yang perlu diperhatikan bahwa dasar operasi digital ialah ketentuan Ya/Tidak, 1/0. Misalnya tabel kebenaran untuk gerbang AND menunjukkan bahwa keluaran adalah tinggi hanya jika masukan ke A dan B juga tinggi, jadi kaidah AND adalah sebagai berikut:

Untuk suatu gerbang AND, setiap masukan yang rendah akan menyebabkan keluaran yang rendah, sehingga setiap masukan harus tinggi untuk mendapatkan keluaran yang tinggi pula.



Gambar 2-10 Simbol-simbol untuk beberapa unit logik digital beserta tabel kebenaran untuk unit-unit yang bersangkutan

(Sumber: Holman, 1985, hal. 170)



### BAB III

#### PERLAKUAN TERHADAP KETIDAK PASTIAN

Pada bab I yang terdahulu telah disinggung tentang derajat **ketidak pastian** dari hasil suatu pengukuran, karena pada dasarnya memang tidak ada pengukuran yang sempurna. Ketika suatu angka yang menunjukkan suatu besaran kuantitas diperoleh dengan cara eksperimen, hanya karena keberuntungan sajalah angka yang diperoleh tersebut sama dengan nilai yang sesungguhnya. Hal itupun barangkali tidak disadari oleh orang yang melakukan eksperimen tersebut. Besaran nilai yang sesungguhnya barangkali dapat didekati, akan tetapi sulit untuk dievaluasi. Perbedaan antara nilai sesungguhnya (tidak diketahui) dengan hasil yang diperoleh (dari pengukuran atau eksperimen) itulah yang dinamakan dengan **kesalahan** (error).

Barangkali kita tidak pernah mengetahui dengan sesungguhnya berapa besarnya kesalahan yang dibuat sewaktu melakukan suatu pengukuran. Hal yang dapat kita lakukan adalah mencoba untuk memberikan batasan-batasan, dimana kita merasa cukup yakin bahwa dalam batasan itulah akan terjadi kesalahan, tetapi fakta berbicara lain, bahwa pada dasarnya kita tidak pernah yakin akan hal itu. Kita hanya mampu menciptakan istilah lain yang kita anggap merupakan suatu nilai yang wajar dari kesalahan tersebut. Istilah yang sering dipakai dalam konteks ini adalah **ketidak-pastian**. Ketidak pastian dapat dikatakan sebagai perkiraan yang paling baik dari besaran kesalahan yang tidak diketahui. Tentu saja ini tidak berarti membatasi kesalahan yang sedang kita bahas, ataupun mengklasifikasikan kesalahan ataupun menentukan aturan-aturan untuk bekerja dengan kesalahan tersebut. Hal ini dilakukan adalah untuk mencoba menempatkan suatu nilai numerik dari

perbedaan antara "yang diukur" dengan "yang sesungguhnya", dimana kita harus berhati-hati terhadap kedua istilah tersebut.

Pembahasan berikut ini akan mengetengahkan sejumlah peristilahan yang penting, serta garis-garis besar beberapa prosedur yang bisa dipakai dalam pengolahan dari hal ketidak pastian hasil pengukuran.

#### **A. Peristilahan**

Sebelum pembahasan tentang perlakuan ketidak pastian dilanjutkan, maka ada baiknya kita mendefinisikan beberapa istilah yang biasanya dipakai pada penanganan data hasil pengukuran.

**Data;** adalah unsur-unsur informasi yang diperoleh dari eksperimen dan dianggap berbentuk angka.

**Populasi;** sekumpulan data baik dengan jumlah tertentu maupun dengan jumlah tak terbatas yang kesemuanya dianggap mewakili kuantitas yang sama.

**Cuplikan;** adalah bagian dari populasi berupa suatu himpunan nilai yang didapat secara eksperimen dengan jumlah tertentu yang dianggap mewakili populasi nyata ataupun secara teoritis. Cuplikan ini biasanya disebut juga dengan sampel.

**Pengujian Cuplikan Banyak;** adalah pengukuran yang dilakukan berulang kali pada kondisi uji yang berubah-ubah, misalnya pengamatannya berbeda, dan/atau instrumentasinya yang berbeda. Pembacaan berulang kali dengan prosedur dan

alat yang sama saja, tidak akan menghasilkan cuplikan yang banyak. Contoh lain dari pengujian cuplikan banyak adalah, pengamatan terhadap lamanya kecepatan cahaya dalam ruang hampa udara yang telah diamati selama bertahun-tahun dengan berbagai alat dan teknik pengukuran dan, masing-masingnya mengukur nilai yang sama. Meskipun hasilnya bervariasi, tetapi secara bersama-sama merupakan hasil dari cuplikan banyak.

**Pengujian Cuplikan Tunggal;** merupakan pembacaan tunggal atau pembacaan berurutan yang diambil pada kondisi yang identik sama, kecuali waktu. Ketelitian pengukuran hanya bisa diperkirakan dengan memakai cara statistik.

**Nilai Sebenarnya  $V_a$ ;** adalah besaran nyata dari benda yang diukur. Evaluasi kuantitas ini bisa didekati, tetapi dalam pengertian yang paling ketat besaran nyata ini tidak pernah dapat ditentukan dengan sesungguhnya.

**Nilai yang Ditunjukkan,  $V_i$ ;** adalah besaran yang ditunjukkan secara langsung oleh sistim pengukuran. Nilai ini adalah data mentah atau data yang langsung direkam.

**Pembetulan;** adalah revisi yang diberikan untuk nilai yang ditunjukkan, yang dianggap dapat memperbaiki kebergunaan hasilnya. Revisi ini bisa berbentuk faktor penambah atau pengali, ataupun keduanya.

**Hasil,  $V_r$ ;** diperoleh dengan memasukkan seluruh pembetulan yang diketahui ke nilai yang ditunjukkan, secara matematis dapat ditulis sebagai berikut.

$$V_r = AV_i + B \quad (3.1)$$

dimana A dan B masing-masingnya adalah pembetulan pengali dan penambah.

**Penyimpangan;** adalah perbedaan antara dua nilai yang ditunjukkan atau hasil yang ditentukan dari nilai sesungguhnya yang dianggap tetap.

**Kesalahan;** yaitu perbedaan nyata antara nilai sesungguhnya dengan yang dihasilkan/diperoleh, yang secara matematis dapat ditulis.

$$\text{Kesalahan} = V_r - V_a \quad (3.2)$$

**Ketelitian;** adalah jumlah maksimum perbedaan antara hasil pengukuran yang diperoleh dengan nilai sesungguhnya. Dalam banyak hal ketelitian ini dinyatakan dalam prosentase, yang didasarkan pada **pembacaan skala nyata** atau pada apa yang disebut **pembacaan skala penuh**, yang terakhir adalah nilai maksimum dari kesalahan yang dibuat pada daerah khusus yang dipakai.

Persentase ketelitian berdasar pada skala pembacaan =

$$\frac{V_r \text{ (maks.atau min)} - V_a}{V_a} = \times 100 \% \quad (3.3a)$$

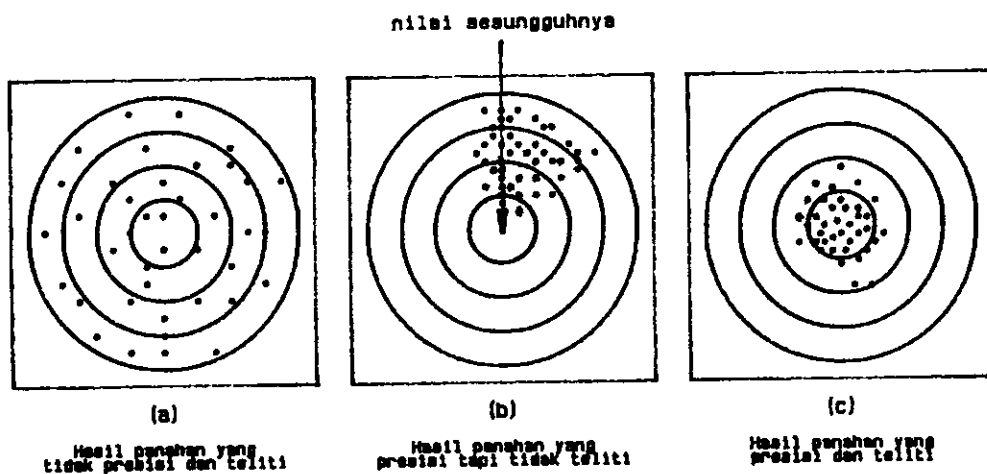
Persentase kesalahan berdasar pada skala penuh =

$$\frac{V_r \text{ (maks.atau min)} - V_a}{V_{fs}} = \times 100 \% \quad (3.3b)$$

dimana  $V_{fs}$  adalah pembacaan maksimum yang mampu dilakukan oleh sistim pengukuran yang digunakan. Kemampuan yang dimaksudkan di sini adalah kemampuan penyetelan atau skala alat ukur dalam mengukur suatu objek ukur.

Perlu ditegaskan di sini, bahwa persentase ketelitian yang ditunjukkan oleh persamaan 3.3.a dan 3.3.b biasanya dipakai untuk menyatakan ketelitian alat ukur, dan jika dipakai demikian tidak termasuk unjuk kerja prosedur dan personilnya. Nilai-nilai ini tidak menyatakan unjuk kerja total yang sesungguhnya dari sistim pengukuran.

**Presisi;** adalah derajat keseragaman dari hasil pengukuran yang dilakukan berulang kali. Data yang presisi mempunyai dispersi atau pencaran data yang relatif lebih sedikit, tetapi mungkin saja menyimpang jauh dari nilai sesungguhnya. Sebagai contoh dapat dilihat gambar 3.1 berikut ini yang menggambarkan tentang sejumlah anak panah yang dilepaskan kesasaran yang dituju. Dari gambaran tersebut kita sekaligus dapat membandingkan apa yang dimaksud dengan presisi dan teliti yang kadang-kadang kedua kata tersebut disamakan artinya padahal maksudnya sangat berbeda.



Gambar 3.1 Ilustrasi yang menggambarkan presisi dan telitinya suatu hasil pengukuran (Sumber: Abd.Aziz,1992,hal. )

**Ketidak Pastian;** adalah kesalahan yang memungkinkan atau suatu dugaan daerah kesalahan yang mungkin terjadi. Walaupun hasil suatu pengukuran tidak diketahui, namun kesalahan atau ketidak pastian adalah merupakan suatu bilangan tertentu. Hubungan ini dinyatakan dalam pandangan yang sama, yaitu dalam dimensi yang terbatas. Dimensi suatu mesin dispesifikasikan di atas gambar dengan memakai toleransi. Ketika gambar dibuat, dimensi bagian-bagian yang khusus tidak diketahui, walaupun demikian daerahnya dapat diketahui dengan pasti. Sesudah bagian tersebut dibuat, maka dia mempunyai dimensi tertentu, dan menyimpang sebanyak jumlah tertentu dari nominal. Deviasi ini menggambarkan suatu kesalahan dimensi dan toleransi menggambarkan ketidak pastian.

**Propagasi dari ketidak pastian;** adalah suatu cara dimana kombinasi ketidak pastian akan mempengaruhi hasil. Seringkali suatu hasil diperoleh dari kombinasi pengukuran yang masing-masing mempunyai kesalahan. Bagaimana mereka bergabung untuk menghasilkan suatu ketidak pastian secara menyeluruh? Beberapa di antaranya merupakan penambahan secara sederhana, sedangkan yang lain tidak. Sebagai contoh, jika suatu mikrometer mempunyai kesalahan yang terkait dalam jarak bagi(pitch) ulirnya, dan dipakai untuk mengukur dimensi persegi panjang, perhitungan luas sudah tentu akan membawa serta kesalahan-kesalahan yang terekam oleh dimensi panjang, dan lebar dari dimensi yang diukur, dan kesalahan keseluruhan merupakan interaksi dari kedua kesalahan yang terekam tersebut. Contoh lain adalah, bila tekanan diukur dengan yang menggunakan alat pengukur tekanan angin ban sederhana seperti yang terlihat pada gambar 1.5(a). Kesalahan barangkali akan terjadi disebabkan

kan oleh ketidak telitian ukuran piston dan ketidak telitian konstanta pegas. Dalam kasus terakhir ini jelas, bahwa kesalahan-kesalahan mungkin dapat dibenarkan, sedangkan pada kasus yang pertama tidak. Kesalahan dalam contoh pertama disebut kesalahan yang **terikat** (dependent error) dan kesalahan yang terakhir disebut kesalahan yang **berdiri sendiri** (independent error). Pengkajian mengenai propogasi kesalahan harus mempertimbangkan juga hubungan antara berbagai jenis kesalahan.

**Rata-rata (mean);** yaitu penjumlahan hasil-hasil dibagi dengan banyaknya hasil. Hal ini dianggap sebagai pendekatan "terbaik" terhadap nilai sesungguhnya dari suatu pengukuran.

**Median;** adalah nilai tengah dari sederetan data yang menyatakan suatu bilangan. Sejumlah data berada di satu pihak dari median dan data lainnya berada dipihak yang lain.

**Mode;** adalah hasil yang paling sering terjadi mungkin saja dalam sekumpulan data akan terjadi lebih dari satu mode.

**Daerah Jangkauan (Range);** yaitu perbedaan antara hasil terbesar dengan hasil terkecil.

**Penyebaran (Dispersi);** suatu keadaan dimana hasil-hasil terletak di sekitar nilai rata-rata. Penyebaran ini merupakan suatu ukuran keterandalan dari suatu hasil.

**Penyimpangan (deviasi);** yaitu perbedaan antara hasil tunggal dengan nilai rata-rata dari hasil untuk kuantitas percobaan atau sekumpulan data yang sama.

**Deviasi Rata-rata (probable error)**, yaitu jumlah dari deviasi mutlak dibagi oleh banyaknya deviasi mutlak yang ada. Ada kemungkinan yang sama, dimana suatu deviasi tertentu akan lebih besar atau lebih kecil dari nilai ini. Deviasi rata-rata ini adakalanya disebut dengan kesalahan yang mungkin terjadi.

**Deviasi Standar**; adalah akar kuadrat dari penyimpangan kuadrat rata-rata. Bilangan ini menyatakan ketepatan pengukuran umum dari suatu data cuplikan (data sampel).

**Persentase Deviasi Standar**; yaitu perbandingan antara deviasi standar dan deviasi rata-rata yang dinyatakan dalam persentase.

## **B. Klasifikasi Kesalahan**

Adalah cukup sulit untuk memberi nama terhadap berbagai jenis kesalahan yang dapat terjadi sewaktu melakukan pengukuran. Dalam proses pengukuran, paling tidak ada tiga faktor yang terlibat secara langsung yaitu alat ukur, objek ukur dan si pengukur. Memang hasil pengukuran tidak mungkin mencapai suatu kebenaran yang absolut, tetapi hanya hasil yang dianggap paling mendekati. Meskipun hasil pengukuran itu dianggap hasil yang paling benar, tapi dalam kenyataannya masih juga terjadi beberapa kesalahan (penyimpangan) dari pengukuran tersebut. Kesalahan-kesalahan tersebut cukup sulit untuk mendefinisikannya satu persatu yang kadang-kadang banyak definisi yang tumpang tindih dan mungkin juga mempunyai arti ganda. Untuk itu penulis mencoba mengklasifikasikan jenis-jenis kesalahan atas tiga hal pokok yaitu:



1. Kesalahan Sistimatis atau Kesalahan Tetap, yang terdiri atas:
  - a. Kesalahan kalibrasi
  - b. Kesalahan-kesalahan teknik
  - c. Kesalahan-kesalahan akibat ketidak-telitian dalam pembebanan
  - d. Beberapa jenis kesalahan oleh manusia (pengukur) yang berulang secara konsisten
  - e. Kesalahan karena adanya beberapa keterbatasan dari resolusi sistim
  
2. Kesalahan-kesalahan Acak atau Kebetulan (random error), yang terdiri atas:
  - a. Kesalahan akibat terjadinya perubahan lingkungan
  - b. Kesalahan akibat definisi yang bervariasi
  - c. Beberapa jenis kesalahan manusia
  - d. Kesalahan akibat kurang pekaan sistim pengukuran.
  
3. Kesalahan karena Pelanggaran Terhadap Aturan (ketentuan)
  - a. Kekeliruan - atau khilaf
  - b. Kesalahan perhitungan
  - c. Kesalahan-kesalahan kekacauan

**Kesalahan sistimatis** merupakan gejala alami. Hal ini benar-benar tersamar, dan kehadirannya tidak diketahui apabila tidak dicari secara sengaja. Seperti yang ditunjukkan oleh namanya, kesalahan ini berulang kali terjadi dan berasal dari suatu nilai yang konstan sewaktu pengukuran dilaksanakan. Oleh sebab itu kesalahan ini tidak mudah untuk dianalisis secara statistik.

Suatu sumber kesalahan sistimatis tertentu dan penting berasal dari ketidak-tepatan kalibrasi. Kalibrasi

adalah pengujian pembacaan skala-skala sistim pengukuran yang dilakukan dengan membandingkan dengan suatu standar tertentu yang bersesuaian. Sudah tentu, bahwa dalam semua standar juga ada faktor ketidak-pastian walau kecil sekalipun. Namun hal ini sedikit banyak akan mempengaruhi kepada hasil pengukuran.

Kesalahan teknik secara sederhana, adalah disebabkan oleh ketidak tepatan pemakaian alat ukur. Jenis kesalahan teknik ini juga dapat dikelompokkan pada bagian ketiga di atas, jika hal ini merupakan suatu kekeliruan atau kekhilafan. Patut dicatat di sini bahwa betapapun canggihnya suatu sistim pengukuran, tidak ada tekniknya yang sempurna, namun masing-masingnya mudah untuk diperbaiki.

Kesalahan manusia barangkali lebih sistimatis, sebagaimana kecendrungan seseorang untuk membaca dengan sungguh-sungguh dan konsisten diwaktu bekerja sendirian dan cenderung "menyimpang" ketika pembacaan secara bersama dilakukan.

Peralatan pengukuran (alat ukur)nya sendiri mungkin mengandung beberapa kesalahan ikutan sebagai akibat dari ketidak telitian disain, pembuatan atau disaat melakukan perbaikan. Kesalahan-kesalahan seperti ini bisa disebut sebagai kesalahan yang disebabkan oleh unsur-unsur yang salah, seperti ketidak telitian graduasi skala, hubungan roda gigi yang rusak atau adanya penghubung (linkage) yang keliru. Kesalahan alat penguat elektronik tertentu juga termasuk ke dalam kesalahan seperti ini. Kesalahan seperti ini juga termasuk ke dalam kesalahan yang konsisten, baik tanda maupun besarannya, sehingga kadang-kadang dapat diperbaiki dengan jalan kalibrasi.

Terjadinya kesalahan pembebanan diakibatkan oleh proses pengukuran yang dengan pasti merubah karakteristik-karakteristik dari sumber besaran yang diukur dan sistim

pengukurannya sendiri. Benda ukur yang mempunyai sifat fisik elastis biasana sangat mudah berubah bila diukur dengan pembebanan yang tidak seimbang.

Kesalahan-kesalahan acak dapat dibedakan oleh ketidaktepatannya. Seorang peneliti mungkin tidak konsisten ketika memperkirakan hasil-hasil pembacaannya, atau proses yang bersangkutan mengandung variabel tertentu yang tidak terkontrol atau variabel yang buruk pengontrolannya dan menyebabkan adanya perubahan kondisi. Pada instrumentasinya sendiri, kesalahan-kesalahan di atas adalah akibat dari unsur-unsur yang terganggu yang biasanya datang dari pengaruh luar seperti variasi-variasi getaran atau suhu (lingkungan). Kesalahan lain yang termasuk dalam kesalahan-kesalahan acak ini adalah kurang pekanya suatu sistim pengukuran. Tidak pekanya suatu sistim pengukuran bisa disebabkan oleh adanya slip-balik (backlash) pada instrumentasi yang menggunakan sistim roda gigi, atau oleh gesekan-gesekan lainnya. Ketidakpekaan sistim pengukuran ini berkaitan erat dengan masalah-masalah disain yang mencakup bahan dan toleransi-toleransi geometris atau dimensinya.

Sebagaimana dinyatakan dari namanya, secara tidak langsung kesalahan-kesalahan akibat pelanggaran terhadap ketentuan seharusnya tidak ada. Ini termasuk kepada faktor kekeliruan atau kekhilafan seketika yang dapat dihindari melalui latihan dan pengulangan pengukuran yang berkesinambungan. Kesalahan-kesalahan kekacauan meliputi gangguan-gangguan acak yang menimbulkan kesalahan dengan besaran yang cukup menyembunyikan keterangan pengukuran yang sesungguhnya. Getaran ekstrim, kejutan mekanis terhadap peralatan atau pengambilan derau yang berlebihan mungkin merupakan besaran yang cukup membuat hasil menjadi tidak berarti. Dalam hal seperti ini pengukuran harus

dihentikan sementara sampai unsur-unsur yang mengganggu tersebut bisa dihilangkan.

### C. Propagasi Ketidak Pastian

Pada pasal A mengenai peristilahan, telah dinyatakan bahwa propogasi dari ketidak-pastian adalah suatu cara dimana kombinasi ketidak-pastian akan mempengaruhi pengukuran yang masing-masingnya mempunyai kesalahan.

Teorama Taylor adalah suatu pemakaian khusus dari deret Taylor yang dapat dipakai untuk menentukan derajat ketidak pastian suatu pengukuran. Teorama Taylor di atas dapat diterangkan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 f [(x_1 + \Delta x_1), (x_2 + \Delta x_2), \dots, (x_n + \Delta x_n)] = \\
 f (x_1, x_2, \dots, x_n) + \Delta x_1 \frac{\delta f}{\delta x_1} \\
 + \Delta x_2 \frac{\delta f}{\delta x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\delta f}{\delta x_n} \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

dimana:

$x_n$  adalah variabel, dan

$\Delta x_n$  adalah variasi (ketidak-pastian) kenaikan yang ditentukan atau dibayangkan dari masing-masing nilai  $x_n$ .

Persamaan di atas dapat ditulis kembali dengan mengganti  $\Delta x_n$  dengan  $V_{x_n}$  semata-mata untuk menunjukkan ketidak-pastian yang lebih jelas.

$$\begin{aligned}
 f [(|x_1 + V_{x_1}|), (|x_2 + V_{x_2}|), \dots, (|x_n + V_{x_n}|)] = \\
 f (|x_1|, |x_2|, \dots, |x_n|) =
 \end{aligned}$$

$$V_f = \left| V_{x_1} \frac{\delta f}{\delta x_1} \right| + \left| V_{x_2} \frac{\delta f}{\delta x_2} \right| + \dots + \left| V_{x_n} \frac{\delta f}{\delta x_n} \right| \quad (3.4a)$$

Persamaan (3.4a) diperkirakan dapat memperhitungkan ketidak-pastian fungsi secara maksimum. Tetapi bagaimanapun juga tidak mungkin dicapai nilai maksimum seperti yang kita harapkan. Sebuah nilai yang masuk akal barangkali dapat didekati dengan memakai penjumlahan Pythagoras dari ketidak-pastian tersendiri, atau:

$$V_f = \sqrt{\left( V_{x_1} \frac{\delta f}{\delta x_1} \right)^2 + \left( V_{x_2} \frac{\delta f}{\delta x_2} \right)^2 + \dots + \left( V_{x_i} \frac{\delta f}{\delta x_i} \right)^2} \quad (3.5)$$

dimana:

$x_i$  = nilai-nilai variabel nominal

$V_{x_i}$  = ketidak-pastian tersendiri, dan

$V_f$  = ketidak pastian secara keseluruhan

Sebagai latihan, misalkan:

$$X = AB^m / C^n \quad (3.6)$$

dimana, A, B dan C adalah variabel-variabel. Kemudian disubsitusi menjadi:

$$\frac{\delta x}{\delta A} = B^m / C^n$$

$$\frac{\delta x}{\delta B} = mAB^{(m-1)}, \text{ dan}$$

$$\frac{\delta x}{\delta C} = -n AB^m / C^{n+1}$$

Dengan memakai persamaan (3.4a), maka diperoleh:

$$V_x = \left| \frac{B^m}{C^n} V_A \right| + \left| \frac{mAB^{(m-1)}}{C^n} V_{BA} \right| + \left| \frac{nAB^m}{C^{(n+1)}} V_C \right|$$

dan 
$$\frac{V_x}{X} = \left| \frac{V_A}{A} \right| + \left| \frac{mV_B}{B} \right| + \left| \frac{nV_C}{C} \right|$$

atau memakai persamaan (3.5)

$$\frac{V_x}{X} = \sqrt{\left(\frac{V_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{mV_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{nV_C}{C}\right)^2} \quad (3.6a)$$

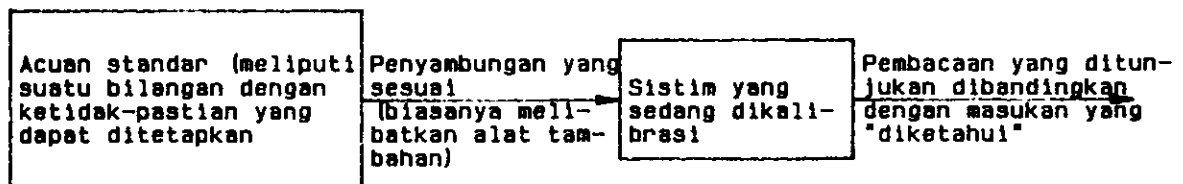
yang perlu diketahui bahwa faktor-faktor berat  $m$  dan  $n$ , bersama-sama dengan sumbernya dalam persamaan (3.6).

#### D. Perlakuan Terhadap Ketidak-Pastian Sistimatis

Ketidak pastian teknik, ketidak pastian kalibrasi, ketidak pastian manusiawi dan beberapa ketidak pastian yang memiliki tanda dan besaran tetap hanya dapat dijelaskan dan dianalisis melalui pengamatan yang giat, gigih dan hati-hati serta melalui pembahasan dan prosedur evaluasi.

Ketidak-pastian kalibrasi mungkin yang paling mudah diperhatikan. Kalibrasi membutuhkan suatu acuan standar sebagai pembanding sistim yang dipakai. Acuan mungkin bernilai tetap atau bernilai tunggal, seperti titik didih air, atau sebaliknya suatu sumber yang mampu untuk memberikan suatu daerah masukan yang dapat dibandingkan dengan daerah dari sistim. Sebagai contoh dari jenis yang terakhir ini adalah acuan tegangan yang dipakai secara komersil. Biasanya ketidak-pastian standar harus lebih kecil daripada sistim yang akan dikalibrasi. Untuk itu pada gambar 3.2. berikut ini dapat diperlihatkan suatu diagram balok dari susunan yang akan

dipakai dalam mengkalibrasi sistim.



Gambar 3-2 Diagram balok yang menunjukkan prosedur kalibrasi

(Sumber: Sharp, 1970, hal. 36 )

Untuk menganalisis ketidak-pastian sistimatis dapat dilakukan dengan menggunakan teorama Taylor yang sudah dibahas pada fasal C terdahulu. Dan sebagai contoh yang dapat dibahas dalam buku ini adalah menganalisis kesalahan sistimatis dari suatu alat ukur rintangan (ventury meter) yang dipakai untuk mengukur aliran fluida yang mengalir lunak (steady state fluid flow). Ada tabel-tabel koefisien yang bisa dimasukkan ke dalam persamaan berikut:

$$Q = KA_2 \sqrt{2g_c/P} \sqrt{P_1 - P_2} \quad (3.7)$$

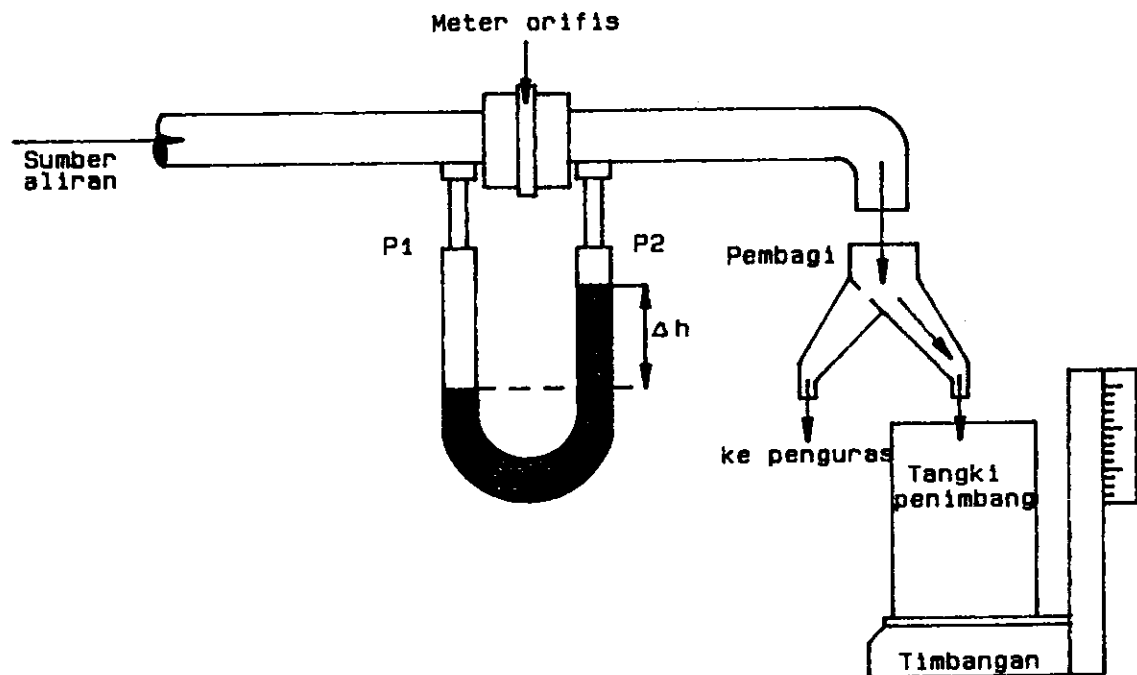
Persamaan ini dipakai untuk mengukur kecepatan air dalam bentuk penurunan tekanan setelah melewati halangan atau rintangan.

Gambar 3.6. memperlihatkan serangkaian alat untuk mengkalibrasi suatu orifis berpelat tipis yang beraliran tetap. Dalam kasus ini kalibrasi terdiri atas penentuan

koefisien  $K$  secara percobaan dengan menggunakan persamaan (3.7) di atas. Hal ini dilakukan dengan mengumpulkan fluida yang sudah melewati orifis ke dalam suatu tangki pengukur berat selama selang waktu tertentu. Selama periode kalibrasi ini, aliran dijaga agar tetap konstan dan perbedaan tekanan,  $(P_1 - P_2) = \Delta P$  dicatat.

Dengan mensubstitusikan  $A_2 = \pi/4 D^2$  dan  $Q = W/pt$  ke dalam persamaan 3.7 menghasilkan persamaan:

$$K = \frac{4w}{\pi D^2 t} \sqrt{\frac{1}{2g_c P \Delta P}} \quad (3.7a)$$



Gambar 3-3 Susunan peralatan mengkalibrasi orifis  
(Sumber: Beckwith, 1982, hal. 256)



Fenyisipan nilai-nilai  $W$ ,  $P$  dan  $t$  yang diamati ke dalam persamaan, bersama dengan nilai-nilai yang sesuai untuk  $D$ ,  $g_0$  dan  $p$  akan menghasilkan suatu nilai untuk koefisien alir yang ditentukan dengan percobaan.

Sekarang kita mencoba mengevaluasi secara kritis ketidak-pastian sistimatis yang menyeluruh mencakup percobaan ini. Berat  $W$  diukur dengan timbangan jenis lantai. Yang menjadi pertanyaan berapakah ketidak-pastian yang terjadi dalam pengukuran berat fluida dengan timbangan ini? Apakah timbangan ini sudah dikalibrasi? Bagaimana dengan standar pada waktu ini dan apa standarnya? Dengan pengharapan yang penuh kita telah melakukan beberapa langkah kalibrasi dengan menggunakan anak timbangan yang terbukti dapat dipercaya. Katakanlah bahwa kita dapat membuktikan kepastian sebesar 99% yang artinya ketidak pastiannya adalah sebesar 1%.

Diameter orifis harus ditentukan, dianggap diameternya berujung runcing dan kita telah memeriksanya dengan menggunakan mikrometer dalam (inside micrometer). Pertanyaan yang timbul adalah, apakah kita telah mengkalibrasi mikrometer dengan blok-blok ukur (gauge blocks) atau kita terima saja skala tersebut secara harfiah? Seberapa jauhkah pengalaman kita dalam menggunakan mikrometer tersebut. Penyimpangan apa yang kita temui dalam pembacaan berulang? Seberapa baikkah definisi dari dimensi? Adakah ketidak bulatannya? Katakanlah ketidak-pastian untuk semua jawaban dari beberapa pertanyaan di atas adalah  $\pm 0,008$  cm dan ukuran nominal orifis 4 cm, maka ketidak-pastiannya dalam prosentase adalah sebesar  $\pm 0,2$  .

Seberapa telitakah dalam menentukan waktu  $t$  sewaktu pipa pembagi dioperasikan dengan tangan? Kapan aliran dimulai dan kapan berhentinya, seberapa baikkah periode waktu didefinisikan. Jika memakai stopwatch,

seberapa baikkah penyesuaian antara tindakan pengalihan dan gerakan stopwatchnya sendiri? Jika waktu nominal adalah 5 menit, kita anggap bahwa ketidak-pastian total untuk pengukuran ini adalah  $\pm 3$  detik, atau  $\pm 1\%$ .

Antara  $0^{\circ}\text{C}$  dan  $38^{\circ}\text{C}$ , kepadatan air berkurang sekitar  $0,7\%$ . Untuk contoh kita, kita misalkan ketidak-pastian sebesar  $\pm 0,2\%$  untuk variabel ini. konstanta dimensional  $g_c$  dengan sendirinya tidak mempunyai ketidak-pastian. Nilai  $P$  diukur dengan menggunakan sebuah manometer dan dipakai prosentase ketidak pastian sebesar  $\pm 1\%$ .

Fluktuasi-fluktuasi apa yang terjadi pada laju alir setelah lima menit periode percobaan? Agaknya kita harus memantau hal ini dan berusaha untuk menselaraskan irama aliran selama percobaan berlangsung. Tapi kita harus waspada, karena pada titik ini kita sedang mempertimbangkan suatu kesalahan sistimatik, bukan acak, dan setiap ketidak konstanan dalam aliran akan berubah menjadi kesalahan yang bersifat acak.

Berdasarkan berapa perkiraan di atas, berapa nilai yang masuk akal untuk dapat menunjukkan ketidak pastian dari penentuan nilai  $K$  melalui pecobaan ini? Berikut ini kita sajikan ringkasan ketidak pastian individual yang sudah kita perkirakan sebelumnya.

Skala timbangan, $V_w$	= 1 %
Diameter orifis, $V_d$	= 0,2 %
Periode waktu efektif, $V_t$	= 1 %
Kerapatan air, $V_p$	= 0,2 %
Perubahan tekanan, $V_p$	= 1 %

Dengan mengambil faktor berat yang telah diperlihatkan pada persamaan (3.6a) didapatkan:

$$V_k = \left| V_w \frac{\delta K}{\delta w} \right| + \left| V_D \frac{\delta K}{\delta D} \right| + \left| V_t \frac{\delta K}{\delta t} \right| + \left| V_p \frac{\delta K}{\delta p} \right| + \left| V_{\Delta p} \frac{\delta K}{\delta \Delta p} \right|$$

atau

$$\frac{VK}{K} = \left[ \left( \frac{V_w}{w} \right)^2 + \left( 2 \frac{V_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{V_t}{t} \right)^2 + \left( \frac{V_p}{2p} \right)^2 + \left( \frac{V_{\Delta p}}{2p} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= \left[ (1)^2 + (2 \times 0,2)^2 + (1)^2 + (\frac{1}{2} \times 0,2)^2 + (\frac{1}{2} \times 1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 1,56 \%$$

Pemeriksaan terhadap evaluasi akhir secara cepat menunjukkan bahwa beberapa parameter hanya mempunyai sedikit pengaruh atau tidak samasekali terhadap hasil. Mengurangi ketidak-pastian dari prosedur penimbangan dan penentuan periode waktu efektif rasanya akan sangat bermanfaat sekali. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa dalam pembahasan di atas, kita yakin bahwa ketidak-pastian sistematik tidak akan lebih besar dari, katakanlah sebesar 2%.

Yang jadi pertanyaan sekarang adalah apakah yang mendasari penentuan persentase ketidak-pastian secara individual pada kasus di atas? Apakah nilai-nilai tersebut hanya merupakan suatu perkiraan saja? Untuk sebagian nilai, jawabannya adalah benar, tetapi hanya untuk tingkatan yang kecil. Beberapa faktor khusus dalam setiap perkiraan sudah dibicarakan dengan nilai-nilai akhir yang ditunjuk berdasarkan atas pertimbangan rekayasa, praktis yaitu dengan memakai akal fikiran yang sederhana. Kalau memang demikian, mengapa tidak menerka pada ketidak-pastian secara keseluruhan dan menggunakannya? Jawabannya adalah analisis secara rinci memberikan cara bagaimana mengevaluasi bobot (atau efek) dari setiap

ketidak-pastian sistematik yang dapat diidentifikasi. Dengan membiasakan hal yang demikian, kita lebih mampu memisahkan hal yang lebih penting dari yang kurang penting dalam menentukan variabel ketidak-pastian individual dari pada menduga secara keseluruhannya.

#### E. Perlakuan Terhadap Kesalahan Acak

Dalam mengamati data cuplikan banyak yang diperoleh melalui percobaan, terjadi penyimpangan yang ditunjukkan oleh data yang tersebar di sekitar hasil rata-rata. Sebagai contoh, kita mencoba menyajikan suatu hasil dari percobaan khayal pada tabel 3.1. berikut ini berkaitan dengan pengukuran tekanan. Dianggap bahwa persyaratan cuplikan-banyak cukup terpenuhi dan walaupun telah diusahakan kondisi percobaan konstan, variasi parameter masih menghasilkan bentuk data yang menyebar di sekitar rata-rata

Tabel 3.1. Hasil percobaan pengukuran tekanan

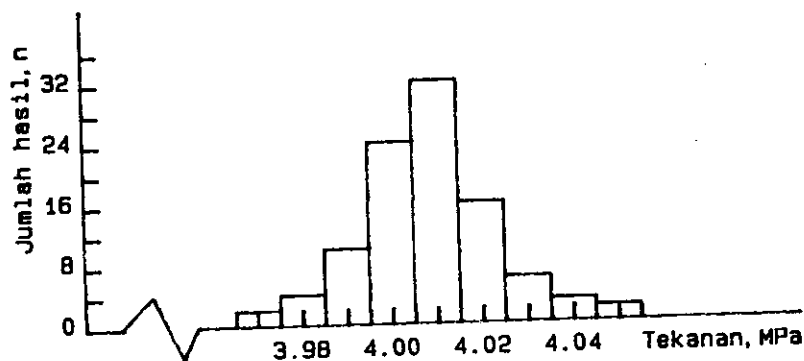
Tekanan, P dalam MPa	Jumlah hasil, n
3,97	1
3,98	3
3,99	12
4,00	25
4,01	33
4,02	17
4,03	6
4,04	2
4,05	1
Jumlah	100

Dalam menganalisis penyebaran data, langkah pertama yang dapat dilakukan adalah dengan menyiapkan suatu histogram, yaitu suatu diagram balok yang menunjukkan

frekuensi kejadian dari pembacaan percobaan tekanan tadi (gambar 3.4). Dalam membuat suatu histogram, pertama sekali yang harus ditentukan adalah jumlah selang kelas atau balok-balok yang akan dipakai. Jumlah yang dipilih akan banyak berpengaruh terhadap bentuk akhir dari histogram. Jumlah yang masuk akal dapat ditentukan dengan memakai hubungan empiris yang diketahui dengan nama aturan Sturgis, yang dinyatakan sebagai:

$$N = 1 + (3.3) \log (n),$$

dimana  $n$  adalah jumlah total data, dan  $N$  adalah jumlah selang kelas yang dianjurkan. Ini hanyalah sebagai panduan dan tidak ada aturan penjumlahan yang mutlak dipakai. Salah satu faktor dalam memilih selang kelas adalah bagaimana kita bisa membagi data dengan teratur. Sehubungan dengan contoh percobaan pengukuran tekanan ini, kita mengambil 9 selang kelas seperti yang tergambar pada histogram berikut ini.

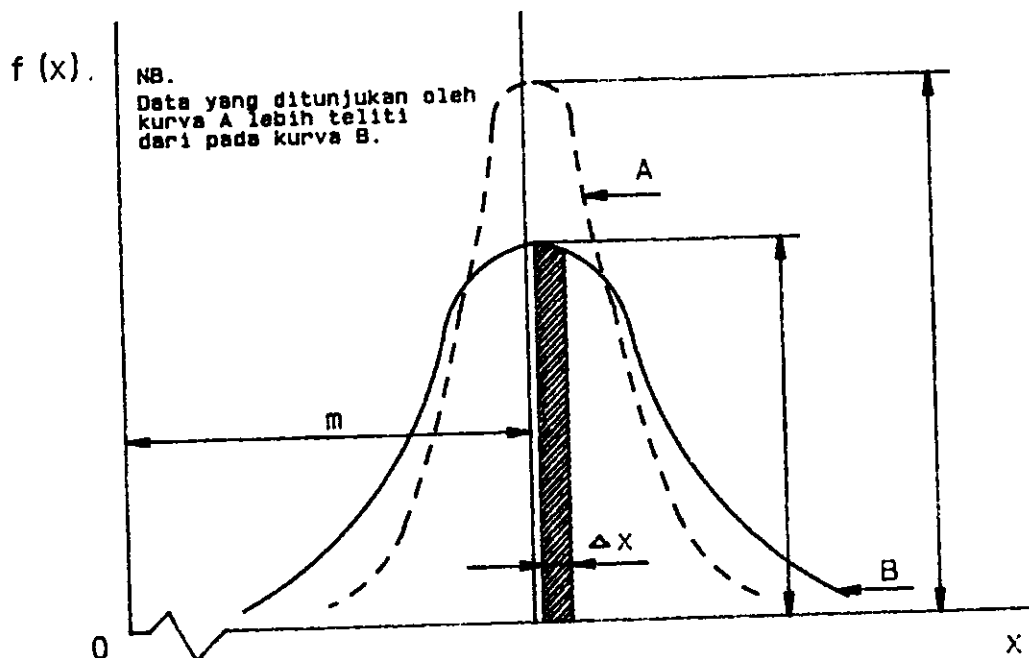


Gambar 3-4 Salah satu bentuk histogram untuk data yang terdaftar pada tabel 3.1

Data hasil percobaan seringkali disebarakan (dispersikan) dalam bentuk lonceng yang telah dikenal (gambar 3.5). Atas dasar populasi tak berhingga, penjelasan secara matematis untuk kurva ini adalah:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-m)^2/2\sigma^2} \quad (3.8)$$

dimana:  $x$  adalah kuantitas besaran yang diukur  
 $m$  adalah nilai rata-rata dari seluruh populasi,  
 $\sigma$  adalah penyimpangan standar (standard deviasi).  
 Distribusi jenis ini biasanya dinamakan distribusi Gaussian atau distribusi normal dan hubungan ini disebut fungsi probabilitas kerapatan.



Gambar 3-5 Kurva distribusi normal

Perlu diingat bahwa, histogram ini bekerja dengan data dari bilangan yang terbatas (dalam contoh kita 100 buah), sedang persamaan 3.8 dan gambar 3.5 menggunakan populasi yang tak berhingga. Jadi ordinat dari kurva yang rata harus ditafsirkan secara hati-hati. Luas total di bawah kurva dapat disamakan dengan kemungkinan sama dengan satu (100%). Ordinat yang diberikan tidak menggambarkan probabilitas kejadian dari nilai  $x$  yang sesuai, tetapi luas yang sesuai dengan kenaikan ( $\Delta x$ ), yang menggambarkan kemungkinan kejadian dari nilai yang berada dalam daerah  $\Delta x$ .

Bila data mengikuti aturan Gaussian (distribusi normal), maka penyimpangan plus dan minus barangkali akan sama besarnya, dan penyimpangan-penyimpangan kecil lebih mungkin terjadi daripada penyimpangan-penyimpangan besar yang tidak mempunyai batas yang nyata.

Dalam menganalisa data cuplikan-banyak, dianggap bahwa data disebarikan secara normal, untuk itu beberapa parameter yang terkait penting untuk didefinisikan. Ini dapat dikatakan bahwa bila sejumlah besar pengukuran dilakukan dengan ketelitian yang sama, maka nilai hasil pengukuran yang paling mungkin adalah nilai rata-rata yang secara matematis ditulis:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.9)$$

Dari definisi di atas, terlihat bahwa defiasi  $d$  adalah dari  $x$  ke  $\bar{x}$ . Dan terlihat juga, bahwa nilai rata-rata  $\bar{x}$  adalah sedemikian rupa, sehingga jumlah kuadrat dari deviasi-deviasi mencapai nilai minimum. Sebaliknya, bila jumlah kuadrat dari deviasi-deviasi di atas minimum, maka nilai yang paling mungkin dari kuantitas yang diukur adalah  $\bar{x}$ .

Persamaan berikut ini adalah definisi dari deviasi rata-rata.

$$\text{Deviasi rata-rata} = d_m = \frac{|d_1| + |d_2| + \dots + |d_n|}{n} \quad (3.10)$$

dengan catatan bahwa, nilai-nilai numerik dari deviasi ditambahkan tanpa memperhatikan tanda-tanda aljabar.

Deviasi standar atau deviasi rata-rata didefinisikan berdasarkan persamaan:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(d_1)^2 + (d_2)^2 + \dots + (d_n)^2}{n - 1}} \quad (3.11)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.11a)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad (3.11b)$$

Sebagaimana yang telah dinyatakan sebelumnya, bahwa nilai aktual yang hasilnya adalah dalam kesalahan yang tidak pernah diketahui. Walaupun demikian ada berbagai cara untuk memperkirakan ketidak-pastian acak, antara lain adalah deviasi rata-rata (atau penyimpangan yang mungkin) dan deviasi standar. Dari definisi deviasi rata-rata, terlihat bahwa untuk suatu populasi ada suatu kemungkinan yang sama, dimana nilai yang dipilih secara acak (random) akan berbeda dengan nilai rata-ratanya dengan jumlah yang lebih besar atau lebih kecil dari deviasi rata-rata tersebut.

Deviasi standar ( $\sigma$ ) mempunyai analogi (persamaan) dibidang mekanis dalam jari-jari girasi, seperti yang dipakai pada momen inersia. Bila luas daerah di bawah



kurva distribusi normal dianggap sebagai suatu benda dua dimensi yang berputar terhadap nilai rata-rata, maka harga  $\sigma$  sesuai dengan jari-jari girasinya. Deviasi standar ini terutama dipakai dalam pengolahan data statistik lanjutan untuk menyatakan perkiraan kesalahan atau ketidak-pastian.

Untuk distribusi normal, kemungkinan untuk mendapatkan deviasi yang lebih besar daripada  $\sigma$  kira-kira 31,7 %; lebih besar dari  $2\sigma$  kira-kira 5 %; lebih besar dari  $3\sigma$  kira-kira 1/3%; dan lebih besar dari  $4\sigma$  kira-kira 0,006%. Salah satu kriteria untuk mengenyampingkan data yang disangsikan adalah nilai  $3\sigma$  dimana suatu data yang mempunyai deviasi lebih besar dari  $3\sigma$  dibuang. Tabel 3.2 berikut ini membandingkan beberapa perkiraan kesalahan ini.

Tabel 3.2. Ringkasan Perkiraan Kesalahan Berdasarkan Distribusi Normal

Nama Kesalahan	Simbol	Harga dalam $\sigma$	Persentase Kepastian
Penyimpangan yang mungkin atau deviasi rata-rata	$E_p$	$0,6745 \sigma$	50
Deviasi Standar	$\sigma$	$\sigma$	68,3
Kesalahan 90 %	$E_{90}$	$1,6449 \sigma$	90
Kesalahan dua Sigma	$2 \sigma$	$2 \sigma$	95
Kesalahan Tiga Sigma	$3 \sigma$	$3 \sigma$	99,7

Sumber : Barry. B (1964, hal 262).

Contoh yang terurai dalam fasal E ini serta gambar 3.4 adalah meliputi 100 kali pembacaan tekanan. Dalam tabel 3.3. berikut ini semua data tersebut di atas didaftar kembali dengan penambahan beberapa perhitungan berdasarkan persdamaan-persamaan yang telah dibuat sebelumnya. Kita anggap bahwa semua koreksi telah dibuat dengan tepat dan kemudian didaftarkan pada kolom pertama. Patut diketahui bahwa daerahnya adalah 0.08 yang ditentukan dari perbedaan hasil terbesar dengan hasil terkecil. Daftar pada kolom dua adalah frekuensi masing-masing nilai dan gambar 3.6 memperlihatkan distribusinya. kolom 3 dan 4 masing-masing adalah deviasi dan kuadrat deviasi yang bersangkutan.

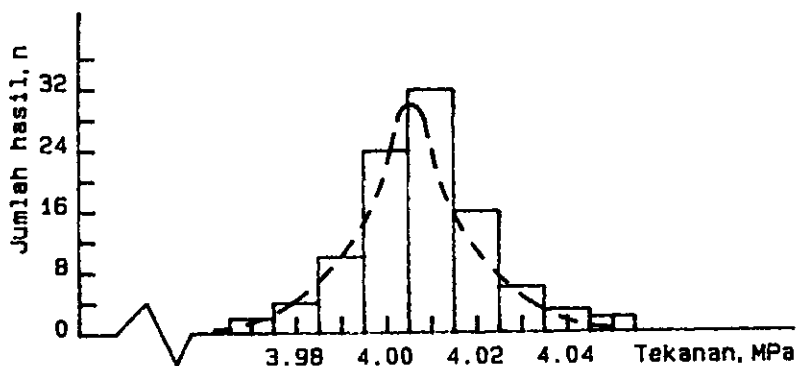
Tabel 3.3. Data Tekanan dan Penyimpangannya

Tekanan data MPa	Jumlah hasil, n	Deviasi, d	d <sup>2</sup>
3,97	1	- 0,038	144,4 × 10 <sup>-5</sup>
3,98	3	- 0,028	78,4
3,99	12	- 0,018	32,4
4,00	25	- 0,008	6,4
4,01	33	0,002	0,4
4,02	17	0,012	14,4
4,03	6	0,022	48,4
4,04	2	0,032	102,4
4,05	1	0,042	176,4
$\Sigma p = 400,77$	$\Sigma n = 100$	$\Sigma  d  = 1,046$	$\Sigma d^2 = 1858 \times 10^{-5}$

$$P_m = 400,77/100 \approx 4,008 \text{ MPa}$$

$$d_m = 1,046/100 = 1,046 \times 10^{-2} \text{ MPa}$$

$$\sigma = \sqrt{1858 \times 10^{-5}/99} = 13,7 \times 10^{-3} \text{ MPa}$$



Gambar 3-6 Histogram dari data yang terdaftar pada tabel 3.3

Hasil pembacaan rata-rata dihitung sebagai 4,008 MPa, deviasi rata-rata adalah  $1,046 \times 10^{-2}$  MPa dan deviasi standar adalah  $13,7 \times 10^{-3}$  MPa. Dari gambaran terakhir yang apabila kita pilih suatu hasil tunggal secara acak, maka akan didapat kesempatan sebesar 68,3 % yang mempunyai daerah antara:

$(4,008 \times 13,7 \times 10^{-3} = 4,0217$  MPa dan  $(4,008 - 13,7 \times 10^{-3} = 3,9943$  MPa, jika semua data betul-betul didistribusikan sesuai dengan persamaan (3.5). Dalam hubungan ini jelas bahwa bermacam-macam nilai numerik yang berkaitan seperti kuantitas deviasi rata-rata dan deviasi standar (Tabel 3.2) membutuhkan distribusi normal yang sesungguhnya. Walaupun data yang diperoleh dari hasil percobaan mendekati distribusi normal, jarang sekali sesuai benar dengan kurva berbentuk bel tersebut.

## DAFTAR KEPUSTAKAAN

- Beckwick, Thomas G dkk, (1982), *Mechanical Measurement*, Third Edition, Addison-Wesley Inc
- Doebelin, Ernest O, (1987), *Sistem Pengukuran, Aplikasi dan Perancangan*, Edisi Ketiga, Jilid I, Penerbit Erlangga, Jakarta
- Galyer, JFW., (1980), *Metrology for Engineers*, Fourth Edition, Cassel Ltd, London
- Holman J.F, (1985), *Metode Pengukuran Teknik*, Edisi Keempat, Penerbit Erlangga, Jakarta
- Jain, RK., (1981), *Engineering Metrology*, Sixth Edition, Khanna Publishers, India
- Parsons, SAJ, (1970), *Metrology and Gauging*, Second Edition, Mc Donald & Evans Ltd, London
- Sakri, Adjat, (1991), *Cara Menulis Buku Ajar*, Penerbit ITB, Bandung
- Sakri, Adjat, (1991), *Petunjuk Bagi Pengarang, Penyunting dan Korektor*, Terbitan Kedua, Penerbit ITB, Bandung
- Sharp, KWB, (1970), *Practical Engineering Metrology*, Pitman Paperbacks, London
- Sungguh, As'ad, (1989), *Kamus Istilah Teknik Inggris-Indonesia*, Penerbit Gaya Media Pratama, Jakarta