

Perancangan Penentuan Orientasi Lokasi Penempatan Strain Gage Pada Elemen Elastik Dynamometer Spindel

H. Ai Ruchiat Ir. MT.

Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik - Universitas Jenderal Achmad Yani
e-mail : airuchiat@yahoo.com

Abstrak. Strain gage merupakan sebuah sensor / transducer tahanan yang dapat mengubah perubahan besaran mekanik (regangan) menjadi perubahan besaran listrik (tahanan). Untuk mendeteksi regangan yang terjadi pada elemen elastik dari sebuah dynamometer, digunakan empat buah strain gage yang dirangkai menjadi bentuk jembatan Wheatstone. Regangan yang terjadi pada elemen elastik berasal dari gaya pemotongan dan momen puntir yang terjadi pada ujung pahat sewaktu pahat melakukan pemotongan, regangan ini akan mengakibatkan perubahan tahanan listrik dari strain gage, yang selanjutnya akan menimbulkan beda tegangan pada simpul yang berhadapan dari jembatan Wheatstone (tegangan masukan dan keluaran). Beda tahanan ini yang akan menentukan besarnya gaya pemotongan dan momen puntir yang terjadi sewaktu pahat melakukan pemotongan. Diperlukan dua buah jembatan Wheatstone pada dynamometer spindle, yaitu satu buah untuk mengukur besarnya momen puntir, dan satu buah lagi untuk mengukur besarnya gaya aksial yang terjadi pada ujung pahat freis.

Penentuan orientasi lokasi penempatan strain gage pada permukaan elemen elastik dynamometer perlu direncanakan dengan terlebih dahulu melakukan analisis tegangan dan regangan yang terjadi pada permukaan elemen elastik didasarkan pada gaya pemotongan dan momen puntir yang terjadi pada ujung pahat.

Tegangan keluaran dari Jembatan Wheatstone masih terlalu kecil untuk diproses pada penunjuk data, oleh karena itu perlu diperkuat pada Amplifier. Keluaran dari amplifier bisa langsung menjadi masukan pada penunjuk data *strip chart recorder*, atau perlu diubah terlebih dahulu menjadi data digital pada ADC, bila penunjuk data yang digunakan berupa monitor computer.

Kata kunci : *Strip chart recorder jembatan Wheatstone, pahat freis dan strain gage*

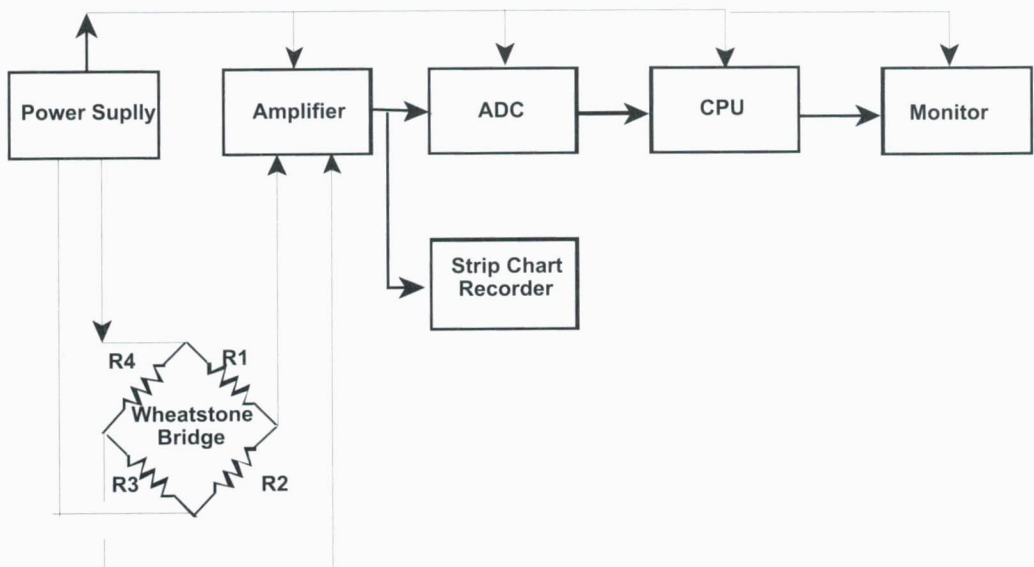
1 Pendahuluan

Dynamometer adalah alat untuk mengukur Gaya-gaya pemotongan saat proses pemesinan berlangsung. Gaya pemotongan yang berasal dari pahat diteruskan pada elemen elastik dari dynamometer di mana pada elemen elastik ini ditempatkan / ditempelkan empat buah strain-gage yang dirangkai membentuk jembatan Wheatstone. Fungsi dari strain-gage adalah untuk mendeteksi regangan yang terjadi pada elemen elastik. Regangan ini akan mengakibatkan terjadinya perubahan tahanan listrik dari strain-gage. Akibat terjadinya perubahan tahanan listrik dari salah satu atau semua strain-gage akan menimbulkan beda tegangan pada titik simpul yang berhadapan dari jembatan Wheatstone sehingga tegangan keluaran Jembatan

Wheatstone tidak lagi berharga nol. Dalam keseimbangan di mana tahanan listrik dari keempat strain-gage berharga sama besar tegangan keluaran dari jembatan Wheatstone adalah nol. Besarnya tegangan keluaran ini setelah dikalikan dengan sensitivitas dinamometer akan menyatakan berapa besar momen puntir atau gaya pemotongan yang terjadi tergantung besaran mana yang akan diukur.

Perancangan penentuan orientasi lokasi penempatan strain gage pada elemen elastik dynamometer spindle akan menyangkut perancangan bagian permukaan yang menderita regangan tarik/tekan akibat gaya pemotongan dan momen puntir yang terjadi pada ujung pahat yang diteruskan pada permukaan ini. Pada dynamometer spindel elemen elastik ini merupakan bagian dari pemegang pahat.

Gambar 1 memperlihatkan gambar blok dynamometer spindel yang dipergunakan untuk mengukur gaya pemotongan dan momen puntir pada proses freis.



Gambar 1 Gambar Blok Dinamometer Spindel

Komponen utama dinamometer spindel terdiri dari komponen sebagai berikut :

1. Pemegang pahat yang dipasang pada spindel mesin Freis.
2. Strain-gage yang dirangkai membentuk Jembatan Wheatstone dan ditempelkan/dipasan pada permukaan bagian elastik dari pemegang pahat dengan orientasi tertentu sesuai dengan regangan yang mau diukur.
3. Power supply.
4. Amplifier.
5. Analog To Digital Convertor (ADC).
6. CPU dan Monitor.

Prinsip kerja dinamometer adalah mengukur besarnya regangan yang terjadi pada permukaan pemegang pahat dengan alat pendeteksi regangan yaitu strain-gage .

Fungsi dari transducer adalah sebagai sensor yang dapat mengukur perubahan besaran mekanis (regangan) dan mengubahnya menjadi perubahan besaran listrik (tahanan). Selanjutnya 4 buah strain-gage dirangkai menjadi bentuk rangkaian Jembatan Wheatstone dan ditempatkan pada permukaan pemegang pahat dengan orientasi tertentu. Keluaran dari jembatan Wheatstone adalah tegangan yang menyatakan besar gaya atau momen puntir yang akan diukur. Tegangan keluaran dari jembatan Wheatstone ini kecil (dalam skala mV) dan sulit untuk ditampilkan pada alat penunjuk data sehingga perlu diperkuat dengan menggunakan amplifier. Keluaran dari amplifier berupa sinyal analog (tegangan) dapat langsung menjadi sinyal masukan untuk *strip chart recorder* dan keluarannya berupa grafik yang menyatakan hubungan antara sinyal analog dan gaya pemotongan (tarik/tekan) serta momen puntir yang kita cari besarnya. Bila penunjuk data keluaran yang kita gunakan adalah monitor computer (Akuisisi Data Berbasis Komputer) maka sinyal analog ke;luaran amplifier perlu di ubah terlebih dahulu menjadi sinyal digital pada ADC (Analog To Digital Converter) selanjutnya menjadi masukan pada CPU, dan setelah sinyal tersebut dimanipulasi pada CPU selanjutnya ditampilkan pada monitor yang berupa garafik hubungan waktu pemotongan dengan gaya serta momen puntir.

Dinamometer spindle digunakan untuk mengukur besarnya momen puntir dan gaya aksial yang terjadi, oleh karena itu akan terdapat dua pasang jembatan Wheatstone, satu pasang untuk mendeteksi momen puntir dan satu pasang lagi untuk mendeteksi besarnya gaya aksial.

Untuk mengetahui besarnya sensitivitas yang dimilikinya, maka pada dinamometer dilakukan kalibrasi dengan jalan memberi pembebanan puntir/tarik/tekan, selanjutnya diukur berapa besarnya tegangan keluaran dari jembatan Wheatstone untuk masing-masing besar pembebanan. Data-data hasil kalibrasi diproses dengan cara analis data statistika menggunakan software WP X3.

2 Pemegang Pahat (*Tool Holder*)

Dinamometer spindel digunakan untuk mengukur gaya tekan dan momen puntir yang terjadi pada saat proses pemesinan (dalam hal ini proses freis) berlangsung dapat dibuat dengan merencanakan suatu pemegang pahat yang khusus yang didasarkan kepada gaya tekan dan momen puntir yang direncanakan akan terjadi pada spindel / pemegang pahat. Selanjutnya dengan menghitung sesuai dengan kaidah-kaidah perencanaan elemen mesin didapatkan ukuran dari pemegang pahat tersebut. Untuk komponen mesin perkakas penekanan perencanaan dimensi adalah terhadap kekakuan yang terjadi. Dengan demikian komponen tersebut tidak saja harus memenuhi syarat dipandang berdasarkan tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan yang diizinkan tetapi juga terhadap kekakuan yang terjadi. Pemegang pahat standard sesuai ISO 50,40, atau 30, telah direncanakan sedemikian rupa sehingga memenuhi syarat dari aspek tegangan dan kekakuan yang terjadi, oleh karena itu spesifikasi dari pemegang pahat yang akan digunakan diambil sesuai dengan standard ISO 40 seperti terlihat pada gambar 2.

Pemegang pahat tersebut juga berfungsi sebagai bagian **elastik dari dinamometer spindel** di mana strain-gage yang membentuk rangkaian Jembatan Wheatstone ditempatkan dengan orientasi tertentu disesuaikan dengan tujuan pengukuran.

Dimensi utama pemegang pahat dihitung berdasarkan kepada tegangan yang akan bekerja. Ada dua cara untuk menentukan dimensi komponen (pemegang pahat) yaitu pertama dengan menentukan dimensinya terlebih dahulu kemudian dihitung berapa tegangan yang diperbolehkan bekerja padanya. Cara ke dua dengan menghitung dahulu beban/tegangan yang akan bekerja selanjutnya dicari besarnya dimensi dengan mensyaratkan tegangan yang bekerja harus sama atau lebih kecil dari tegangan yang diizinkan dari bahan komponen tersebut.

Tegangan yang terjadi pada pemegang pahat adalah berupa tegangan puntir, lentur dan tekan yang diterima dari pahat (gaya pemotongan). Setelah dihitung berapa tegangan total maksimum yang terjadi selanjutnya dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan sehingga didapat dimensi utama pemegang pahat. Dimensi pemegang pahat sesuai ISO 40 didapat berdasarkan urutan perhitungan seperti tersebut di atas dengan menitik beratkan terhadap kekakuan yang akan terjadi.

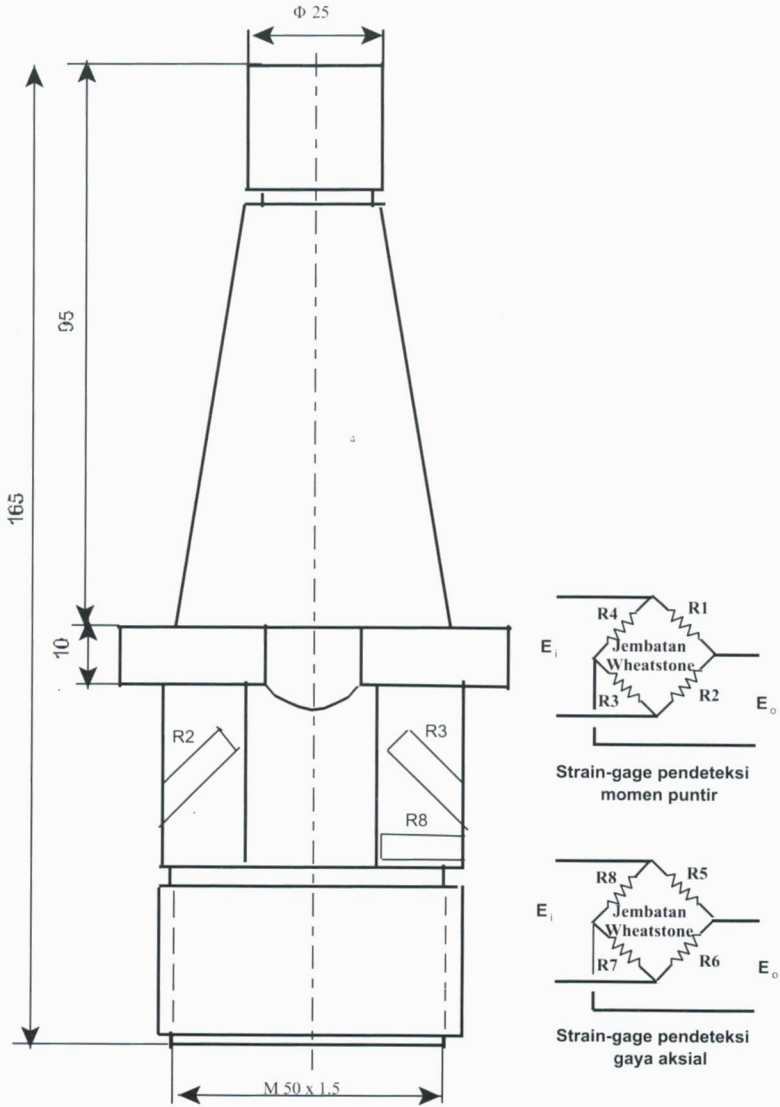
3 Strain-gage

Strain-gage adalah transducer tahanan yang dapat mengubah perubahan besaran mekanik (regangan) menjadi perubahan besaran listrik (tahanan). Transducer banyak digunakan sebagai alat pendeteksi regangan pada berbagai struktur seperti struktur pesawat terbang, kereta api, mesin perkakas dan sebagainya.

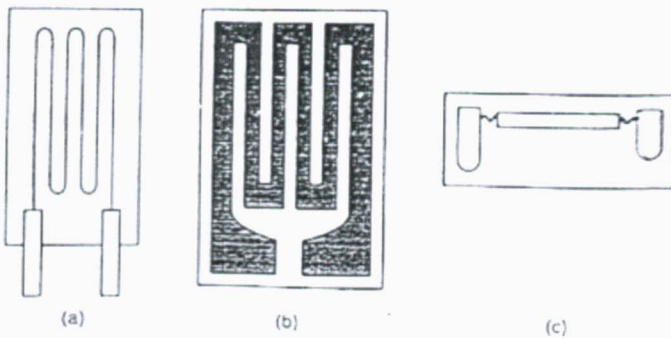
Untuk mengukur besarnya regangan yang terjadi pada bagian struktur adalah dengan cara melekatkan strain-gage pada bagian struktur tadi, sehingga strain-gage akan ikut mengalami regangan sesuai dengan besar regangan dari bagian struktur. Adanya regangan akan menimbulkan perpanjangan pada elemen strain-gage sehingga akan terjadi perubahan besarnya tahanan dari strain-gage.

Pada dinamometer strain-gage dirangkai membentuk jembatan Wheatstone, sehingga apabila terjadi perubahan besarnya tahanan dari masing-masing strain-gage akan menimbulkan perubahan tegangan pada titik yang berhadapan. Dengan mengukur perubahan tegangan ini maka perubahan beban yang bekerja pada bagian struktur akan diketahui. Perubahan tegangan akan sebanding dengan perubahan beban.

Terdapat tiga jenis strain-gage yaitu strain-gage kawat logam, foil logam, dan semikonduktor seperti Gambar 3.



Gambar 2 Pemegang Pahat



Gambar 3 Strain-gage : (a) kawat metal; (b) foil metal; (c) semikonduktor

Pemegang pahat direncanakan mempunyai kekakuan yang tinggi, sehingga regangan yang terjadi relatif kecil. Dengan demikian Strain-gage yang digunakan harus mempunyai faktor gage yang tinggi agar didapatkan sensitivitas dinamometer yang memadai. Dipilih strain-gage jenis semikonduktor yang memiliki faktor gage ± 100 .

Strain-gage merupakan transducer tahanan di mana apabila mengalami regangan akan menyebabkan perubahan tahanan listriknya. Dengan demikian perubahan tahanan listrik inilah yang merupakan ukuran terhadap besarnya regangan yang terjadi. Bagaimana hubungan yang terjadi antara regangan dan perubahan listrik dapat dijelaskan sebagai berikut.

Kawat penghantar yang merupakan elemen utama strain-gage seperti gambar 4, akan mengalami perpanjangan jika mengalami regangan (tarik). Bila panjang kawat semula l dan tahanan listriknya R , dan setelah perpanjangan panjangnya menjadi $l+\Delta l$, dan tahanan listriknya $R+\Delta R$.



Gambar .4 : Kawat penghantar yang mengalami regangan.

Besarnya tahanan listrik dari suatu penghantar dapat dihitung dengan persamaan :

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{3.1}$$

Dimana :

- R = Tahanan listrik ; Ohm
- ρ = Resistivity dari material kawat Ωmm ;
- l = Panjang pengantar ;mm.
- A = Luas penampang kawat; mm².

Besaran pada persamaan (3.1) merupakan fungsi dari temperatur, besaran tersebut akan berubah sesuai dengan perubahan temperatur. Dari hasil bagi diferensial terhadap temperatur dari logaritma persamaan tersebut diperoleh persamaan berikut.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \tag{3.2}$$

Luas penampang semula dari kawat pada gambar 2.3 adalah :

$$A = \frac{\pi}{4} d^2$$

Misalkan kawat pada gambar 3.4 mengalami perubahan panjang akibat tarikan yang bekerja padanya, sehingga diameternya berubah dari d menjadi d' , maka menurut persamaan poisson ratio :

$$\frac{\Delta A}{A} = 2 \frac{d' - d}{d} = 2\pi \frac{\Delta l}{l} \tag{3.3}$$

Di mana μ adalah poisson rasio.

Substitusikan persamaan (3.3) pada persamaan (3.2) sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} + 2\pi \frac{\Delta l}{l} \\ &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\pi) \frac{\Delta l}{l} \end{aligned}$$

Mengingat $\Delta l/l$ adalah regangan ϵ , maka persamaan di atas dapat ditulis kembali menjadi :

$$\frac{\Delta R}{R} / \epsilon = \frac{\Delta \rho}{\rho} / \epsilon + (1 + 2\mu) \tag{3.4}$$

Perubahan resistivity adalah sebanding dengan perubahan volumetrik dari material, yang dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned} \Delta \rho &= m\rho \frac{\Delta v}{v} \\ \frac{\Delta \rho}{\rho} &= m \frac{\Delta v}{v} \end{aligned} \tag{3.5}$$

Volume kawat setelah perpanjangan dengan memperhitungkan kontraksi lateral adalah :

$$v' = (1 - \mu)^2 (1 + \epsilon)v$$

Perubahan volume kawat Δv adalah :

$$\begin{aligned} \Delta v &= v' - v \\ &= \{(1 - \mu)^2 (1 + \epsilon) - 1\}v \end{aligned}$$

Dengan menyelesaikan persamaan di atas diperoleh :

$$\frac{\Delta v}{v} = (1 - 2\mu) \frac{\Delta l}{l} \tag{3.6}$$

Substitusikan persamaan (3.6) ke dalam persamaan (3.5) dan persamaan (3.4) sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} / \epsilon &= (1 + 2\mu) + m(1 - 2\mu) \\ &= (1 + m) + 2\mu(1 - m) \end{aligned} \tag{3.7}$$

Di mana m adalah konstanta dari persamaan (3.5) dan yang besarnya tergantung material kawat yang digunakan. Bagi sebagian besar material-material strain gage memiliki $m = 1$. Oleh karena itu suku di sebelah kanan akan berharga 2.

Dengan demikian persamaan (3.7) menjadi persamaan berikut.

$$\frac{\Delta R}{R} / \epsilon = 2 \tag{3.8}$$

Harga pada persamaan (3.8) disebut sensitivitas regangan dari material logam yang bersangkutan dan umumnya dinyatakan dengan simbol k .

Persamaan (3.8) dapat dituliskan kembali menjadi :

$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon \tag{3.9}$$

Di mana :

k = sensitivitas regangan (faktor gage).

ϵ = regangan ($\Delta l/l$)

Persamaan (3.9) menyatakan bahwa suatu perubahan tahanan listrik adalah sebanding dengan besarnya regangan yang dialami.

Untuk material semikonduktor kristal tunggal, persamaan yang diperoleh agak berbeda dari logam biasa. Di mana untuk semi konduktor :

$$\frac{\Delta\mu}{\mu} = \frac{\pi}{\sigma} \tag{3.10}$$

Seperti yang diketahui, semikonduktor memperlihatkan resistivity yang bervariasi terhadap besarnya tegangan σ . Parameter π disebut koefisien Piezo-resistiviti, yang harganya akan berubah-ubah tergantung dari arah sumbu kristal. Sedangkan πl menunjukkan suatu koefisien Piezoresistance untuk tegangan yang bekerja pada arah sumbu sensitivity dari strain gage.

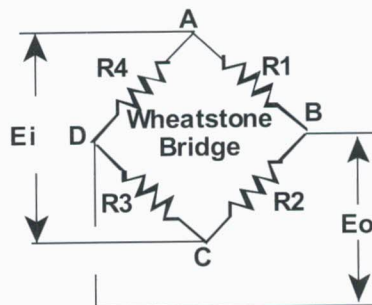
Substitusikan persamaan (3.10) ke dalam persamaan (3.5) dan (3.4) akan menghasilkan persamaan.

$$\frac{\Delta R}{R} / \epsilon = 1 + 2\mu + \pi l E \tag{3.10}$$

Bagi material semikonduktor, suku ke tiga dari Suku-suku di sebelah kanan tanda sama dengan, memberikan besaran yang jauh lebih besar daripada ke dua Suku-suku lainnya.

4 Jembatan Wheatstone

Jembatan Wheatstone merupakan bagian terpenting dari dinamometer yang digunakan untuk mengubah perubahan tahanan listrik dari strain-gage menjadi perubahan besaran tegangan. Jembatan Wheatstone ditempatkan pada permukaan elemen ststik dari dynamometer. Gambar 5 memperlihatkan bentuk dasar dari jembatan Wheatstone yang disusun dari rangkaian empat buah tahanan R_1 , R_2 , R_3 , dan R_4 .



Gambar 5 Jembatan Wheatstone

Hubungan tegangan keluaran (E_o) dengan tegangan masukan (E_i) adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 E_o &= \frac{E_i \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \left(\frac{\nabla R_3}{R_3} + \frac{\nabla R_1}{R_1} - \frac{R_2 \cdot \nabla R_4}{R_2 \cdot R_4} - \frac{\nabla R_2 \cdot R_4}{R_2 \cdot R_4} \right) \\
 &= \frac{E_i \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \left(\frac{\nabla R_3}{R_3} + \frac{\nabla R_1}{R_1} - \frac{\nabla R_4}{R_4} - \frac{\nabla R_2}{R_2} \right) \\
 &= \frac{E_i \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \left(\frac{\nabla R_1}{R_1} - \frac{\nabla R_2}{R_2} + \frac{\nabla R_3}{R_3} - \frac{\nabla R_4}{R_4} \right) \\
 &= \frac{E_i \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \\
 &= \frac{E_i \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)
 \end{aligned}$$

Dinamometer menggunakan empat buah strain gage dari jenis yang sama sehingga tahanan dan faktor gage sama besar. Dengan demikian $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, maka persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi :

$$\begin{aligned}
 E_o &= \frac{E_i \cdot R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \\
 &= \frac{E_i \cdot R_2^2}{4R_1^2} k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \\
 &= \frac{E_i}{4} k(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Dari persamaan di atas dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Tegangan keluaran (E_o) berbanding langsung dengan tegangan masukan (E_i), Tegangan keluaran maksimum akan didapat jika regangan yang terjadi pada masing-masing strain gage sama besarnya. Dan dengan mengikuti penempatan strain -gage sesuai konfigurasi strain-gage seperti pada gambar 5, maka strain gage 1 dan 3 harus menerima regangan positif (tarik), sedang strain gage 2 dan 4 mengalami regangan negatif (tekan), masing-masing dengan harga yang sama.
2. Strain-gage yang saling bersebelahan (R_1 dan R_2 atau R_3 dan R_4) pada jembatan Wheatstone akan saling mengurangi satu sama lain, sedang strain-gage yang saling berhadapan akan saling menjumlahkan satu sama lain (R_1 dan R_3)
3. Tegangan keluaran (E_o) akan lebih besar jika digunakan strain gage yang memiliki faktor k yang lebih besar, dan E_i yang besar namun E_i dibatasi agar arus yang melalui strain-gage tidak melebihi yang diizinkan (20 mA). Karena tahanan strain-gage paling besar 120 Ohm, maka tegangan eksitasi untuk jembatan Wheatstone maksimum 4 Volt.

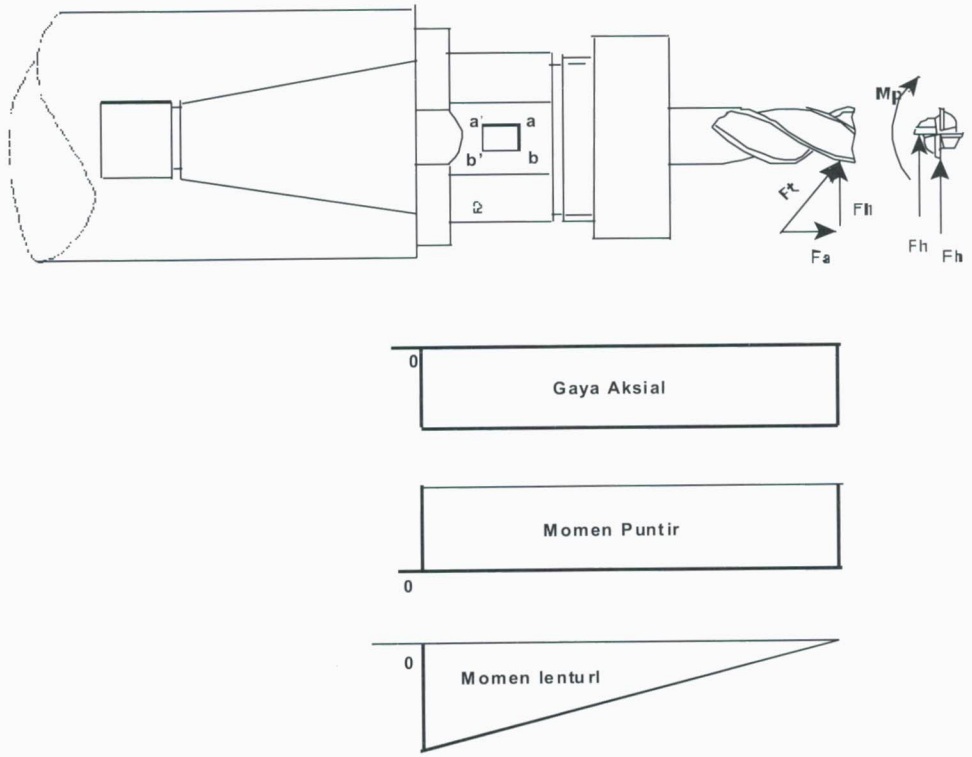
5 Analisis Tegangan dan Regangan pada Elemen Elastik Dinamometer

Elemen elastik dinamometer merupakan tempat atau lokasi di mana strain-gage akan

dilekatkan. Pada bagian ini diharapkan akan mempunyai sifat elastisitas yang tinggi sehingga akan memberikan tegangan keluaran dari jembatan Wheatstone yang tinggi. Elemen elastik pada dinamometer spindel tanpa kabel ini terletak pada permukaan pemegang pahat yang dirancang sedemikian rupa agar pemasangan strain-gage dapat dilakukan dengan benar. Pada bagian elastik ini perlu dilakukan analisis tegangan dan regangan yang terjadi, sehingga dapat ditentukan orientasi lokasi penempatan dari strain-gage sesuai dengan besaran yang akan diukur.

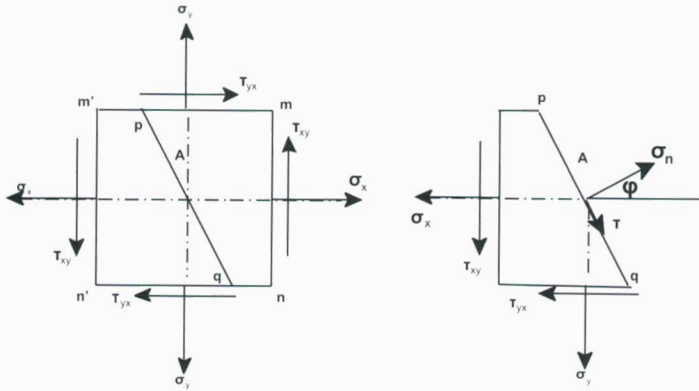
Tegangan yang terjadi pada permukaan pemegang pahat berasal dari puntiran, lenturan dan gaya aksial yang bekerja pada pahat saat proses pemotongan berlangsung. Gambar 6 memperlihatkan momen puntir dan lentur serta gaya aksial (tekan) yang bekerja pada pemegang pahat/element elastik dinamometer.

Ambil suatu elemen kecil $abb'a'$ dari permukaan elemen elastik di mana strain-gage akan ditempatkan. Pada elemen kecil ini bekerja tegangan tarik dalam arah sumbu x dan geseran dalam dua arah yang saling tegak lurus yang bekerja seperti pada gambar 7. Analisis tegangan dan regangan dilakukan untuk menentukan lokasi dan orientasi dari penempatan strain-gage.



Gambar 6 Gaya aksial, momen puntir dan momen lentur yang bekerja elemen elastik dinamometer

Untuk melakukan analisis tegangan pada elemen $abb'a'$ dari elemen Elastik dinamometer, terlebih dahulu an kita lakukan analisis terhadap suatu elemen pelat yang dibebani oleh tegangan tarik dan geser dalam dua arah yang saling tegak lurus seperti terlihat pada gambar 3.7.



Gambar 7. Elemen dengan beban tarik dan geser dalam dua arah yang saling tegak lurus

Dalam keadaan keseimbangan Gaya-gaya yang bekerja dalam arah garis normal (tegak lurus penampang p-q) adalah.

$$\begin{aligned}
 \sigma_n \cdot A &= (\sigma_x \cdot A \cos \varphi) \cos \varphi + (\sigma_y \cdot A \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \varphi + \\
 &\quad (\tau_{xy} \cdot A \cos \varphi) \cdot \sin \varphi + (\tau_{xy} \cdot A \cdot \sin \varphi) \cdot \cos \varphi \\
 \sigma_n &= (\sigma_x \cdot \cos \varphi) \cos \varphi + (\sigma_y \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \varphi \\
 &\quad + (\tau_{xy} \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \varphi + (\tau_{xy} \cdot \sin \varphi) \cdot \cos \varphi \\
 \sigma_n &= \sigma_x \cos^2 \varphi + \sigma_y \sin^2 \varphi + 2\tau_{xy} \cdot \sin \varphi \cos \varphi \\
 \sigma_n &= \sigma_x \cos^2 \varphi + \sigma_y \sin^2 \varphi - 2\tau_{xy} \cdot \sin \varphi \cos \varphi \\
 \sigma_n &= \sigma_x \left(\frac{1 + \cos 2\varphi}{2} \right) + \sigma_y \left(\frac{1 - \cos 2\varphi}{2} \right) + 2\tau_{xy} \cdot \frac{\sin 2\varphi}{2} \\
 \sigma_n &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\varphi + \tau_{xy} \cdot \sin 2\varphi
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

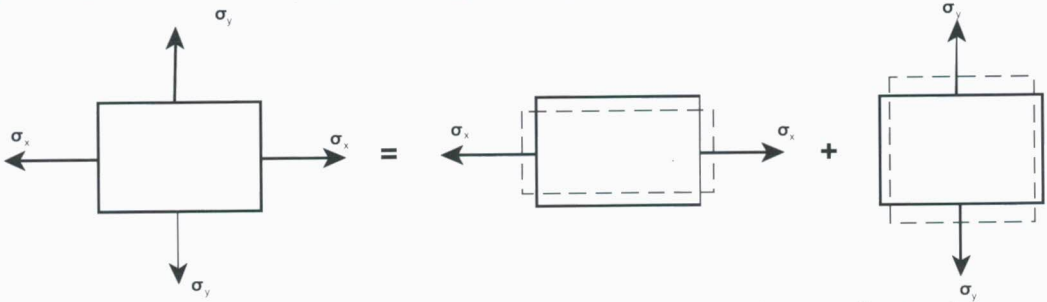
Keseimbangan gaya-gaya yang bekerja dalam arah bidang p-q adalah :

$$\begin{aligned}
 \tau \cdot A &= (\sigma_x \cdot A \cos \varphi) \sin \varphi - (\sigma_y \cdot A \sin \varphi) \cos \varphi + (\tau_{xy} \cdot A \cos \varphi) \cos \varphi - \\
 &\quad (\tau_{xy} \cdot A \sin \varphi) \sin \varphi \\
 \tau &= \sigma_x \cdot \cos \varphi \sin \varphi - \sigma_y \sin \varphi \cos \varphi + \tau_{xy} \cdot A \cos^2 \varphi + \tau_{xy} \sin^2 \varphi \\
 \tau &= \sigma_x \cdot \cos \varphi \sin \varphi - \sigma_y \sin \varphi \cos \varphi + \tau_{xy} \cdot A \cos^2 \varphi + \tau_{xy} \sin^2 \varphi \\
 \tau &= (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos \varphi \sin \varphi + \tau_{xy} (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \\
 \tau &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\varphi + \tau_{xy} \cos 2\varphi
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Analisis regangan pada elemen yang dibebani tegangan tarik/tekan dalam dua arah yang saling tegak lurus adalah sebagai berikut (lihat Gambar 8).

Perpanjangan dalam arah sumbu x tidak saja dipengaruhi oleh tegangan dalam arah sumbu x atau σ_x tetapi juga oleh tegangan dalam arah sumbu y atau σ_y . Regangan pada sumbu x yang

diakibatkan oleh σ_x adalah σ_x / E , Tegangan tarik σ_y . Akan menimbulkan kontraksi lateral pada arah sumbu x sebesar $\mu \sigma_y / E$, sehingga regangan dalam arah sumbu x adalah :



Gambar 8. Regangan pada akibat tegangan yang terjadi pada dua arah yang saling tegak lurus

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} \tag{3.20}$$

Regangan dalam arah sumbu y adalah :

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \mu \frac{\sigma_x}{E} \tag{3.21}$$

Kontraksi dalam arah sumbu z adalah :

$$\begin{aligned} \epsilon_z &= -\mu \frac{\sigma_x}{E} - \mu \frac{\sigma_y}{E} \\ &= -\frac{\mu}{E} (\sigma_x + \sigma_y) \end{aligned}$$

Dalam keadaan khusus dimana $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$, maka :

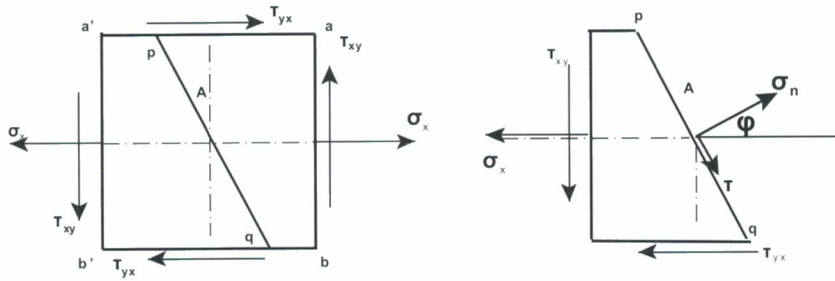
$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\sigma}{E} (1 - \mu)$$

Dari ke dua persamaan (3.20) dan (3.21) diperoleh σ_x dan σ_y yang merupakan fungsi dari regangan ϵ_x dan ϵ_y , sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{(\epsilon_x + \mu \epsilon_y) \cdot E}{1 - \mu^2} \\ \sigma_y &= \frac{(\epsilon_y + \mu \epsilon_x) \cdot E}{1 - \mu^2} \end{aligned} \tag{3.22}$$

Analisis tegangan dan regangan terhadap elemen 'abb'a' dari permukaan bagian elastik dinamometer sebagai berikut.

Pada Gambar 9, tegangan tarik σ_x dan tegangan τ_{yx} masing-masing berasal dari gaya aksial, momen puntir dan momen puntir yang bekerja pada pahat yang diteruskan pada elemen elastik dinamometer.



Gambar 9. Tegangan pada elemen dari permukaan elemen elastik dinamometer

Tegangan normal σ_n dan tegangan τ sesuai dengan persamaan (3.18) dan (3.19) dengan memberikan harga untuk $\sigma_y = 0$, dan arah dari σ_n dan τ berlawanan, sehingga didapat persamaan sebagai berikut.

Tegangan normal :

$$\sigma_n = \tau_{xy} \sin 2\varphi - \frac{\sigma_x}{2} - \frac{\sigma_x}{2} \cos 2\varphi \tag{3.23}$$

Tegangan geser :

$$\tau = \tau_{xy} \cos 2\varphi + \frac{\sigma_x}{2} \sin 2\varphi \tag{3.24}$$

Untuk lokasi penempatan strain-gage yang akan mendeteksi momen puntir, maka harus dipilih sudut φ yang akan memberikan regangan maksimum pada strain-gage. Dalam hal ini diambil sudut $\varphi_1 = 45^\circ$ dan $\varphi_2 = 135^\circ$, Sehingga tegangan normalnya menjadi .

$$\begin{aligned} \sigma_{n1} &= \tau_{xy} + \frac{\sigma_x}{2} \\ \sigma_{n2} &= -\tau_{xy} + \frac{\sigma_x}{2} \end{aligned} \tag{3.25}$$

Dengan demikian penempatan strain-gage untuk mendeteksi momen puntir adalah dua buah ditempatkan dengan membuat sudut $\varphi=45^\circ$ dengan sumbu x, dan lokasinya pada elemen elastik saling berhadapan, sedang pada rangkaian jembatan Wheatstone (dengan bentuk seperti pada gambar 4) menempati posisi 1 dan 3. Dua buah lagi ditempatkan dengan membuat sudut 135° dengan sumbu x, dan lokasi pada elemen elastik dinamometer saling berhadapan, dan lokasi pada rangkaian Jembatan Wheatstone pada menempati posisi 2 dan 4.

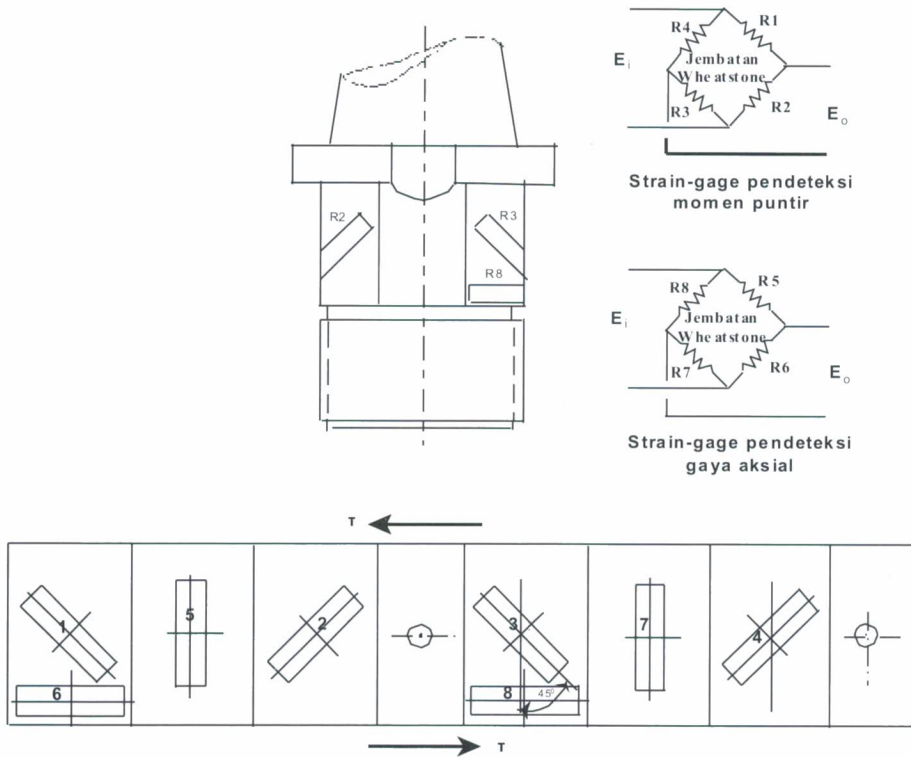
Regangan yang terjadi pada strain-gage 1 dan 3 adalah σ_{n1}/E , sedang regangan yang terjadi pada strain-gage 2 dan 4 adalah σ_{n2}/E .

Untuk lokasi kedudukan strain-gage yang akan mendeteksi gaya aksial diambil sudut $\varphi=0^\circ$. Dengan demikian penempatan strain gage ini adalah dua buah masing-masing membuat sudut $\varphi=0^\circ$, dan lokasi pada elemen elastik saling berhadapan, sedang pada rangkaian Jembatan Wheatstone menempati posisi 5 dan 7. Dan dua buah lagi Masing-masing membuat sudut 90° dengan sumbu x, dan lokasi pada elemen elastik saling berhadapan, sedang pada rangkaian Jembatan Wheatstone menempati posisi 6 dan 8.

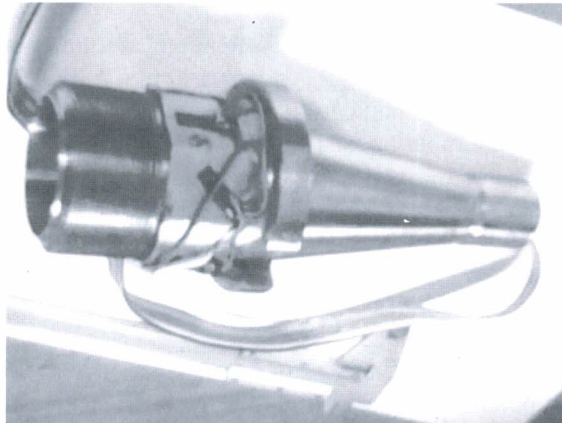
6 Orientasi Lokasi Penempatan Strain-gage Pada Elemen Elastik Dinamometer

Orientasi lokasi penempatan strain-gage pada elemen elastik Jembatan Wheatstone serta orientasi

masing-masing strain-gage pada sumbu x dapat dijelaskan pada gambar 10. Gambar 11. Memperlihatkan photo orientasi penempatan strain gage yang membentuk 2 buah Jembatan Wheatstone pada elemen elastic dynamometer spindle.



Gambar 10. Orientasi penempatan strain-gage pada elemen elastik dynamometer



Gambar 11. Orientasi Penempatan Strain gage Pada Elemen Elastik Dynamometer Spindel

7 Kesimpulan Dan Saran

1. Strain gage merupakan sensor / transducer tahanan yang dapat mengubah perubahan besaran mekanik (regangan) menjadi perubahan besaran listrik (tahanan).

2. Untuk mengukur gaya pemotongan / momen puntir yang terjadi pada ujung pahat freis sewaktu melakukan pemotongan dilakukan dengan mengukur regangan yang terjadi pada elemen elastic dinomometer dengan menggunakan strain gage yang dirangkai menjadi jembatan Wheatstone dan ditempelkan pada permukaan elastic dynamometer.
3. Dengan mengukur beda tegangan antara tegangan masukan dan keluaran dari jembatan Wheatstone dan kemudian beda tegangan tersebut dikalikan dengan sensitivitas dynamometer, hasilnya merupakan besarnya gaya pemotongan / momen punter yang diteliti.
4. Orientasi lokasi penempatan strain gage pada elemen elastik harus searah dengan regangan maksimum yang terjadi pada permukaan elemen elastik.
5. Tegangan normal pada elemen elastic disebabkan oleh gaya pemotongan / momen punter, besar dan arah tegangan normal maksimum perlu dicari terlebih dahulu dengan melakukan analisis tegangan dan regangan yang terjadi pada permukaan elemen elastic.
6. Dari analisis tegangan dan regangan diketahui orientasi lokasi penempatan strain gage adalah sebagai berikut :
 - a. Untuk mengukur momen puntir adalah dua buah ditempatkan dengan membuat sudut $\phi = 45^{\circ}$ dengan sumbu x, dan lokasinya pada elemen elastic saling berhadapan, sedang pada rangkaian jembatan Wheatstone (dengan bentuk sesuai Gambar 5) menempati posisi 1 dan 3. Dua buah lagi ditempatkan dengan membuat sudut 135° dengan sumbu x, dan lokasi pada elemen elastic dynamometer saling berhadapan, sedang lokasi pada rangkaian jembatan Wheatstone menempati posisi 2 dan 4. Regangan yang terjadi pada strain gage 1 dan 3 adalah σ_{n1}/E , sedang regangan yang terjadi pada strain gage 2 dan 4 adalah σ_{n2}/E .
 - b. Untuk mengukur gaya aksial adalah dua buah masing- masing membuat sudut 0° dengan sumbu x, dan lokasinya pada elemen elastic saling berhadapan, sedang pada Jembatan Wheatstone menempati posisi 5 dan 7. Dan dua buah lagi masing- masing membuat sudut 90° dengan sumbu x, dan lokasinya pada elemen elastic saling berhadapan, sedang pada rangkaian Jembatan Wheatstone menempati posisi 6 dan 8.
7. Photo penempatan strain gage pada elemen elastic seperti pada Gambar 11.

8 Daftar Pustaka

1. Taufiq Rochim, (2007), *Proses Pemesinan*(Buku 1,2,3,4), Penerbit ITB.
2. Taufiq Rochim, (2006), *Spesifikasi, Metrologi, & Kontrol Kualitas Geometrik* (Buku 1,2), Penerbit ITB.
3. Taufiq Rochim, (2006), *Perancangan Penelitian Dan Analisis Data Statistik*, Penerbit ITB.
4. Mikell P. Groover, (2002), *Fundamentals Of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc.
5. S Timoshenko, (1976), *Strength of Materials*, Robert E. Krieger Publishing Co. Inc, New York.
6. Albert Paul Malvino, (1979), *Electronic Principles*, McGraw-Hill Book Company.
7. W. Bolton, (1995), *Mechatronics*, Eddison Wesley Longman Limited, England.
8. Richard S. Figliola and Donald E. Beasley, (1991), *Theory And Design For Mechanical Measurements*.