

Detektor Medan Magnet Tiga-Sumbu

Octavianus P. Hulu, Agus Purwanto dan Sumarna

Laboratorium Getaran dan Gelombang, Jurdik Fisika, FMIPA, UNY

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bentuk sensor induksi magnetik. Sensor yang digunakan merupakan tiga buah sensor *coil* induksi satu-sumbu yang disusun saling tegak lurus pada bidang koordinat Kartesius dimensi-tiga.

Metode penelitian yang digunakan adalah metode induksi. G.g.l induksi akan dibangkitkan pada ujung-ujung *coil*, jika *coil* diletakkan pada daerah induksi magnetik yang bervariasi terhadap waktu. Besar g.g.l induksi sebanding dengan kuat, frekuensi dan cosinus sudut induksi magnetik dengan vektor permukaan *coil*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor *coil* induksi tiga-sumbu dapat digunakan untuk mengukur induksi magnetik, pengukuran dapat dilakukan lebih teliti karena faktor orientasi arah induksi magnetik terhadap sensor *coil* induksi tiga-sumbu dapat diatasi oleh bentuk dan susunan sensor *coil* induksi tiga-sumbu. Pada penelitian ini juga telah dilakukan pengukuran induksi magnetik $(0,07-0,45)\mu\text{T}$ yang dihasilkan oleh kawat lurus berarus dengan menggunakan sensor tersebut.

Kata kunci: induksi magnetik, sensor, *coil*, g.g.l induksi, tiga-sumbu dan kawat lurus berarus.

PENDAHULUAN

Induksi magnetik adalah salah satu besaran fisis yang memiliki besar dan arah. Induksi magnetik timbul jika terdapat gerakan elektron, sebagai contoh: arus listrik yang mengalir dalam kawat SUTET akan membangkitkan induksi magnetik mengelilingi kawat. Pada tubuh manusia induksi magnetik yang bervariasi terhadap waktu akan menginduksikan tegangan dan arus. Badan Standardisasi Nasional Indonesia (SNI04-6950-2003) menetapkan batas maksimum induksi magnetik yang dapat diterima oleh tubuh manusia adalah 0,5 mT (www.bsn.or.id).

Salah satu metode yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur induksi magnetik yang bervariasi terhadap waktu adalah metode induksi; metode ini menggunakan *coil* yang akan menghasilkan g.g.l induksi jika diletakkan pada daerah induksi magnetik yang bervariasi terhadap waktu. Metode ini mempunyai kelemahan karena hanya dapat mengukur kuat induksi magnetik secara efektif jika vektor dari induksi magnetik searah dengan vektor permukaan *coil*.

Untuk mengatasi kelemahan seperti tersebut di atas, digunakan tiga buah *coil* induksi identik. Ketiga *coil* diletakkan pada masing-masing bidang koordinat Kartesius dan berpusat pada titik pusat koordinat. Resultan dari g.g.l induksi pada masing-masing *coil*, sama dengan besar g.g.l induksi pada saat vektor induksi magnetik searah dengan vektor permukaan salah satu sensor *coil* induksi.

TEORI

Sensor *coil* induksi adalah sensor induksi magnetik berupa lilitan kawat konduktor (*loop*) yang bekerja berdasarkan hukum Faraday (Ripka, 2001: 47). Jika *coil* diletakkan dalam induksi magnetik yang bervariasi terhadap waktu, maka gaya gerak listrik (g.g.l) induksi (ε) akan dibangkitkan dalam *coil*, dengan ε diberikan oleh

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

dimana N adalah jumlah lilitan *coil* dan Φ adalah fluks magnetik yang dilingkupi oleh *coil*. Dimisalkan *coil* berbentuk lingkaran dan diletakkan pada induksi magnetik $\mathbf{B}(t)$. Dengan luas permukaan *coil* A dan vektor permukaan \hat{n} , maka fluks magnetik Φ yang dilingkupi oleh *coil* adalah

$$\Phi = \iint \mathbf{B}(t) \cos \theta dA, \quad (2)$$

dengan θ adalah sudut antara $\mathbf{B}(t)$ dan $d\mathbf{A}$.

Sensor *coil* induksi tiga-sumbu (Gambar 1) merupakan tiga buah *coil* dengan luasan A_{xy} , A_{yz} dan A_{zx} yang masing-masing terletak pada bidang koordinat Kartesius. Ketiga *coil* diletakkan dengan posisi saling tegak lurus satu sama lain dan berpusat di titik (0,0,0) pada koordinat Kartesius. Induksi magnetik $\mathbf{B}(t)$ melewati *coil* dan membentuk sudut α , β dan γ yang masing-masing merupakan sudut antara induksi magnetik $\mathbf{B}(t)$ dengan vektor permukaan *coil* xy , *coil* yz dan *coil* zx . Dengan cara yang sama seperti pada persamaan (2), maka fluks magnetik yang dilingkupi oleh masing-masing *coil* dapat didefinisikan dengan

$$\Phi_{xy} = \iint \mathbf{B}(t) \cdot \hat{k} dx dy, \quad \Phi_{yz} = \iint \mathbf{B}(t) \cdot \hat{i} dy dz, \quad \Phi_{zx} = \iint \mathbf{B}(t) \cdot \hat{j} dz dx. \quad (3)$$

Substitusi persamaan (3) ke persamaan (1), maka didapatkan g.g.l induksi pada *coil xy*, *coil yz* dan *coil zx*:

$$\varepsilon_{xy} = -N \frac{d}{dt} \oint \mathbf{B}(t) \cdot \hat{k} \, dx \, dy, \quad (4)$$

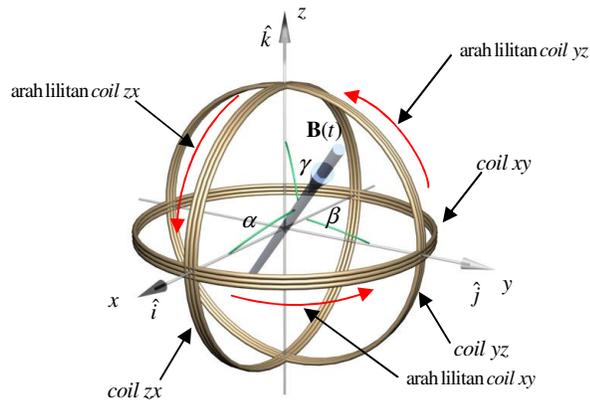
$$\varepsilon_{yz} = -N \frac{d}{dt} \oint \mathbf{B}(t) \cdot \hat{i} \, dy \, dz, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{zx} = -N \frac{d}{dt} \oint \mathbf{B}(t) \cdot \hat{j} \, dz \, dx. \quad (6)$$

Dengan menganggap induksi magnetik $\mathbf{B}(t)$ dihasilkan oleh kawat lurus berarus dengan panjang tak berhingga (relatif terhadap ukuran *coil*) maka berdasarkan hukum Biot-Savart, induksi magnetik $\mathbf{B}(t)$ diberikan oleh persamaan berikut

$$\mathbf{B}(\rho, t) = \frac{\mu_0 I(t)}{2\pi} \frac{1}{\rho} \hat{\phi} \quad (7)$$

dimana kawat lurus berarus sebagai sumbu dari sistem koordinat silinder, ρ adalah jari-jari silinder dan $\hat{\phi}$ adalah vektor satuan induksi magnetik $\mathbf{B}(\rho, t)$ dalam koordinat silinder.



Gambar 1. Sensor *coil* induksi tiga-sumbu pada sistem koordinat Kartesius.

Bila arus $I(t)$ dikondisikan sinusoidal dengan frekuensi f , maka g.g.l induksi pada *coil xy*, *coil yz*, dan *coil zx* diberikan oleh

$$\varepsilon_{xy} = -N \mu_0 f I_0 \cos(2\pi ft) \frac{1}{\rho} \cos \gamma A_{xy}, \quad (8)$$

$$\varepsilon_{yz} = -N\mu_0 f I_0 \cos(2\pi ft) \frac{1}{\rho} \cos \alpha A_{yz}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{zx} = -N\mu_0 f I_0 \cos(2\pi ft) \frac{1}{\rho} \cos \beta A_{zx}, \quad (10)$$

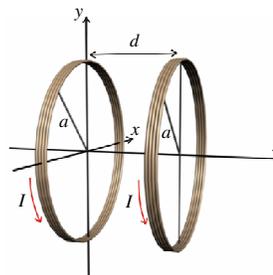
dimana γ , α dan β adalah sudut yang dibentuk oleh $\hat{\phi}$ dan \hat{k} , $\hat{\phi}$ dan \hat{i} serta $\hat{\phi}$ dan \hat{j} . Karena $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$ (Javid and Brown, 1963: 8), maka dengan mengkuadratkan persamaan (8), (9) dan (10) kemudian dijumlahkan akan diperoleh

$$\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2 = \left(-\frac{N\mu_0 f}{\rho} I_0 \cos(2\pi ft) \right)^2 (A_{yz}^2 \cos^2 \alpha + A_{zx}^2 \cos^2 \beta + A_{xy}^2 \cos^2 \gamma),$$

atau jika luas $A_{xy} = A_{yz} = A_{zx} = A$, persamaan di atas dapat dinyatakan dengan

$$\sqrt{\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2} = \frac{NA\mu_0 f}{\rho} I_0 \cos(2\pi ft). \quad (11)$$

Sensor *coil* induksi tiga-sumbu memerlukan rangkaian lain agar keluaran sensor tersebut dapat dianalisis. Rangkaian dan alat yang digunakan untuk mengkalibrasi sensor *coil* induksi tiga-sumbu terdiri dari: rangkaian pengkondisi sinyal dan *coil* Helmholtz. Karena untuk mewujudkan luas *coil* yang indentik sulit dilakukan ($A_{xy} \neq A_{yz} \neq A_{zx}$), maka g.g.l induksi yang dihasilkan masing-masing *coil* berbeda meskipun berada pada besar dan posisi yang sama terhadap induksi magnetik. Rangkaian pengkondisi sinyal yang diterapkan pada masing-masing *coil* tersusun dari: rangkaian penyangga (*buffer*), *low pass filter* dan rangkaian penguat tegangan.



Gambar 2. Coil Helmholtz

Coil Helmholtz tersusun dari dua buah *coil* dengan jumlah lilitan N_H , dan jari-jari lilitan a yang sama. Kedua *coil* diletakkan sejajar satu sama lain dan

dipisahkan dengan jarak sebesar d dengan arah lilitan yang sama (Gambar 2). Dengan menggunakan hukum Biot-Savart, besar induksi magnetik (sepanjang sumbu z) merupakan hasil dari penjumlahan induksi magnetik dari masing-masing *coil* ($B(z) = B_1(z) + B_2(z)$), sehingga diperoleh:

$$B(z) = \frac{\mu_0 N_H I a^2}{2} \left[\frac{1}{(z^2 + a^2)^{3/2}} + \frac{1}{((z-d)^2 + a^2)^{3/2}} \right] \quad (12)$$

Jika jarak kedua kumparan $d = a$, maka induksi magnet yang dihasilkan menjadi seragam di tengah kedua *coil* ($z = d/2$) (Zahn, 1987: 330-331). Induksi magnetik yang dihasilkan oleh *coil* Helmholtz diberikan oleh:

$$B(z = d/2) = \frac{8\mu_0 N_H I}{5\sqrt{5}a}. \quad (13)$$

Induksi magnetik yang dihasilkan oleh *coil* Helmholtz dapat digunakan untuk mengkalibrasi masing-masing *coil* sensor induksi magnetik tiga-sumbu. Arus yang mengalir pada *coil* Helmholtz dikondisikan sinusoidal dengan ferkuensi f . Jika sensor *coil* induksi tiga-sumbu diletakkan diantara *coil* Helmholtz, maka persamaan (4), (5) dan (6) dapat dinyatakan dengan

$$\varepsilon_{xy}(t) = -NA_{xy} \cos \gamma 2\pi f B_0 \cos(2\pi ft), \quad (14)$$

$$\varepsilon_{yz}(t) = -NA_{yz} \cos \alpha 2\pi f B_0 \cos(2\pi ft), \quad (15)$$

$$\varepsilon_{zx}(t) = -NA_{zx} \cos \beta 2\pi f B_0 \cos(2\pi ft), \quad (16)$$

dengan $B_0 = \frac{8\mu_0 N_H I_0}{5\sqrt{5}a}$.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di laboratorium Getaran dan Gelombang, Jurusan Pendidikan Fisika FMIPA UNY. Pada penelitian ini keluaran masing-masing *coil* dilewatkan pada pengkondisi sinyal; keluaran masing-masing rangkaian pengkondisi sinyal kemudian direkam dengan program *Adobe Audition v.2* secara bersamaan dengan durasi 1 detik (*sample-rate* 44100 Hz). Data hasil rekaman

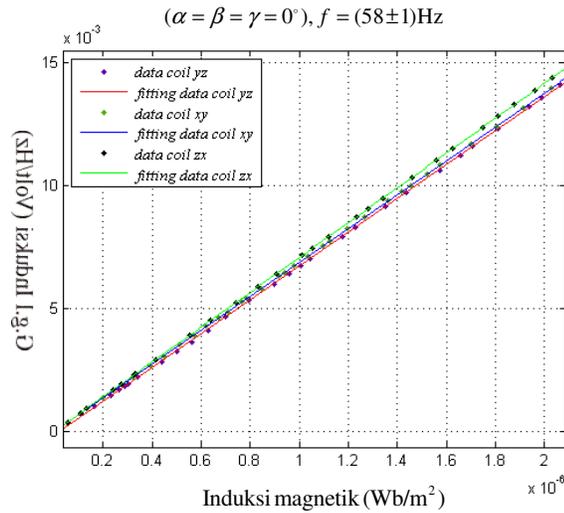
dianalisis dengan menggunakan program *FlexPro v.7*; hasil analisis spektrum berupa amplitudo sebagai fungsi dari frekuensi penyusun sinyal.

Sensor *coil* induksi tiga-sumbu terlebih dahulu dikalibrasi menggunakan *coil* Helmholtz. *Coil* Helmholtz digunakan karena pada sumbu *coil* dan di sekitar setengah jarak dari kedua *coil* Helmholtz induksi magnetik yang dihasilkan seragam; besar induksi magnetik yang dihasilkan oleh *coil* Helmholtz sebanding dengan kuat arus yang mengalir pada *coil* Helmholtz. Frekuensi arus yang dilewatkan pada Helmholtz *coil* adalah 60 Hz; hal ini dilakukan karena hanya sedikit peralatan listrik di sekitar lokasi penelitian yang menggunakan frekuensi ini, dibandingkan dengan peralatan dan sumber listrik yang menggunakan frekuensi 50 Hz. Setelah sensor *coil* dikalibrasi, kemudian dilakukan pengukuran induksi magnetik oleh kawat lurus berarus, dimana orientasi kawat terhadap pusat sensor *coil* induksi tiga-sumbu dibuat bebas (sembarang).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

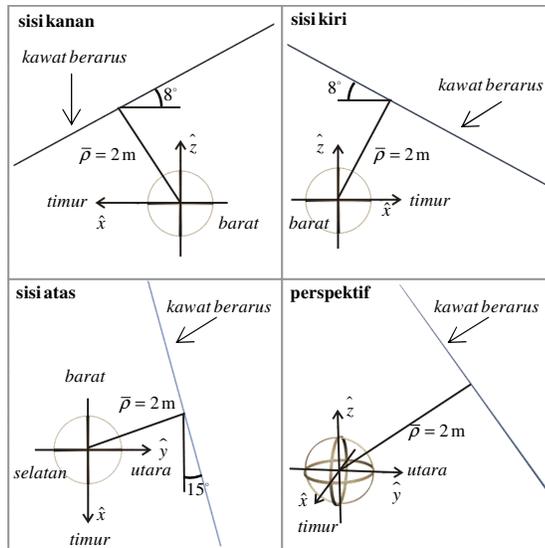
Dari hasil penelitian diperoleh dua kelompok data, yaitu: data kalibrasi menggunakan *coil* Helmholtz dan data pengukuran g.g.l induksi oleh kawat lurus berarus. Hasil analisis data kalibrasi akan digunakan untuk menentukan induksi magnetik yang dihasilkan oleh kawat lurus berarus. Untuk melihat perbandingan keluaran masing-masing *coil* pada kalibrasi, maka digambarkan grafik hubungan g.g.l induksi dengan induksi magnetik pada ketiga *coil* pada sudut 0° , seperti yang terlihat pada Gambar 3. Pada grafik tersebut terlihat bahwa masing-masing *coil* memiliki kurva hasil *fitting* yang saling berdekatan. Hal ini memperlihatkan bahwa ketiga *coil* dan masing-masing rangkaian pengkondisi sinyalnya memiliki karakteristik yang hampir sama. Dari ketiga hasil *fitting* pada posisi $\alpha = 0^\circ$, $\beta = \gamma = 90^\circ$; $\beta = 0^\circ$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$ dan $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, diperoleh tiga persamaan dari masing-masing *coil* yaitu:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{0s_{yz}} &= (6865 \text{ Vm}^2/\text{WbHz})B_{0yz} - (0,000144 \text{ V/Hz}), \\ \mathcal{E}_{0s_{xy}} &= (6886 \text{ Vm}^2/\text{WbHz})B_{0xy} - (0,000001 \text{ V/Hz}), \\ \mathcal{E}_{0s_{zx}} &= (7079 \text{ Vm}^2/\text{WbHz})B_{0zx} - (0,000006 \text{ V/Hz}). \end{aligned} \tag{17}$$



Gambar 3. Grafik hubungan g.g.l induksi terhadap induksi magnetik, masing-masing *coil* pada sudut 0°

Arus yang dialirkan pada kawat memiliki bentuk sinusoidal murni; hal ini dapat dilihat dari bentuk gelombang tegangan pada kawat berarus di *oscilloscope*. Dari hasil analisis spektrum, hanya dipilih amplitudo g.g.l induksi pada komponen frekuensi percobaan saja, sesuai dengan frekuensi arus yang mengalir pada kawat. Pengukuran induksi magnetik dari kawat lurus berarus dilakukan dengan cara meletakkan *coil* pada posisi tertentu, relatif terhadap kawat.



Gambar 4. Orientasi kawat berarus terhadap sensor *coil* induksi dalam koordinat Kartesius ($\bar{\rho} = (2,0 \pm 0,1)\text{ m}$)

Dengan menggunakan kompas, orientasi sumbu x positif ditetapkan mengarah ke timur-kompas, sumbu y positif mengarah ke utara-kompas dan sumbu z positif mengarah keluar secara tegak lurus dari permukaan bumi. Kawat diletakkan pada posisi dengan jarak pusat *coil* terhadap kawat $\bar{\rho} = (2,0 \pm 0,1)$ m dan frekuensi arus pada kawat dapat dilihat dari data terukur yaitu $f = (49 \pm 1)$ Hz. Kawat memiliki orientasi sudut *inklinasi* 8° (sudut yang dibentuk antara kawat dengan permukaan bumi), dan sudut yang dibentuk kawat terhadap sudut sumbu x (timur-kompas) adalah 15° , seperti yang terlihat pada Gambar 4. Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa amplitudo induksi magnetik yang terukur dan yang terhitung memiliki selisih nilai yang relatif kecil. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa hasil pengukuran dekat dengan nilai terhitung.

Tabel 1. Induksi magnetik terukur dengan induksi magnetik terhitung dari kawat lurus berarus pada posisi *coil* $\rho = (2,0 \pm 0,1)$ m dan $f = (49 \pm 1)$ Hz

B_o terhitung (μT)	$\mathcal{E}_{0_{yz}} / f$ (mV/Hz)	$\mathcal{E}_{0_{xy}} / f$ (mV/Hz)	$\mathcal{E}_{0_{xz}} / f$ (mV/Hz)	\mathcal{E}_0 / f resultan	B_o terukur (μT)
0,071±0,006	0,140±0,003	0,35±0,01	0,32±0,01	0,50 ± 0,06	0,07 ± 0,01
0,099±0,008	0,057±0,001	0,216±0,004	0,197±0,004	0,30 ± 0,04	0,10 ± 0,01
0,113±0,008	0,199±0,004	0,49±0,01	0,45±0,01	0,70 ± 0,09	0,12 ± 0,01
0,127±0,009	0,226±0,005	0,56±0,01	0,51±0,01	0,8 ± 0,1	0,13 ± 0,02
0,14±0,01	0,251±0,005	0,63±0,01	0,58±0,01	0,9 ± 0,1	0,14 ± 0,02
0,16±0,01	0,280±0,006	0,69±0,01	0,63±0,01	1,0 ± 0,1	0,16 ± 0,02
0,17±0,01	0,310±0,006	0,75±0,02	0,69±0,01	1,1 ± 0,1	0,17 ± 0,02
0,18±0,01	0,339±0,007	0,83±0,02	0,76±0,02	1,2 ± 0,1	0,19 ± 0,02
0,20±0,01	0,363±0,007	0,90±0,02	0,83±0,02	1,3 ± 0,2	0,20 ± 0,02
0,21±0,01	0,395±0,008	0,98±0,02	0,90±0,02	1,4 ± 0,2	0,21 ± 0,03
0,23±0,01	0,423±0,009	1,04±0,02	0,95±0,02	1,5 ± 0,2	0,23 ± 0,03
0,24±0,01	0,446±0,009	1,10±0,02	1,01±0,02	1,6 ± 0,2	0,23 ± 0,03
0,25±0,02	0,448±0,009	1,11±0,02	1,03±0,02	1,6 ± 0,2	0,24 ± 0,03
0,27±0,02	0,48±0,01	1,16±0,02	1,11±0,02	1,7 ± 0,2	0,25 ± 0,03
0,28±0,02	0,50±0,01	1,23±0,03	1,14±0,02	1,8 ± 0,2	0,27 ± 0,03
0,30±0,02	0,53±0,01	1,31±0,03	1,21±0,02	1,9 ± 0,2	0,28 ± 0,03
0,31±0,02	0,56±0,01	1,38±0,03	1,27±0,03	2,0 ± 0,2	0,30 ± 0,04
0,33±0,02	0,59±0,01	1,44±0,03	1,34±0,03	2,1 ± 0,3	0,31 ± 0,04
0,34±0,02	0,61±0,01	1,51±0,03	1,39±0,03	2,1 ± 0,3	0,33 ± 0,04
0,35±0,02	0,64±0,01	1,57±0,03	1,47±0,03	2,2 ± 0,3	0,32 ± 0,04
0,37±0,02	0,64±0,01	1,57±0,03	1,44±0,03	2,2 ± 0,3	0,34 ± 0,04
0,38±0,02	0,67±0,01	1,68±0,03	1,53±0,03	2,4 ± 0,3	0,36 ± 0,04
0,40±0,02	0,70±0,01	1,73±0,04	1,58±0,03	2,4 ± 0,3	0,37 ± 0,05
0,41±0,02	0,74±0,02	1,84±0,04	1,66±0,03	2,6 ± 0,3	0,39 ± 0,05
0,42±0,02	0,77±0,02	1,91±0,04	1,73±0,04	2,7 ± 0,3	0,45 ± 0,05

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor *coil* induksi tiga-sumbu dengan bentuk seperti pada Gambar 1 dapat digunakan untuk mengukur induksi magnetik. Pengukuran dapat dilakukan lebih teliti karena faktor orientasi arah induksi magnetik terhadap sensor *coil* induksi tiga-sumbu dapat diatasi oleh bentuk dan susunan sensor *coil* induksi tiga-sumbu.

DAFTAR PUSTAKA

Javid, M & Brown, P.M. (1963). *Field Analysis and Electromagnetics*. New York: McGraw Hill Book Companies, Inc

Ripka, Pavel. (2001). *Magnetic Sensors and Magnetometers*. London: Artech House, Inc.

Zahn, Markus. (1987). *Electromagnetic Field Theory: a problem solving approach*. Malabar: Krieger Publishing Company, Inc

<http://www.bsn.or.id/SNI/download/maret2003/SNI04-6950-2003.pdf>