

# MENENTUKAN BESAR MEDAN LISTRIK RADIAL PADA BERBAGAI JENIS KONDUKTOR YANG DIALIRI ARUS LISTRIK TETAP

Oleh

*Andi Suhandi, Dadi Rusdiana, Ida Kaniawati, R. Mudjiarto*

*Jurusan Pendidikan Fisika*

*Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam*

*Universitas Pendidikan Indonesia*

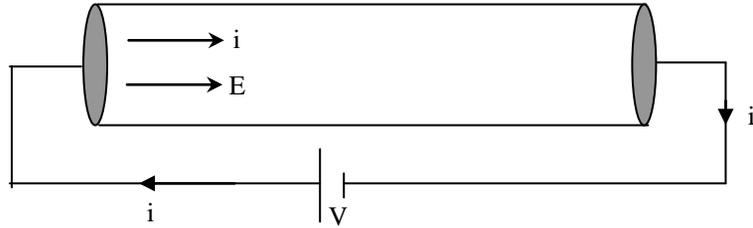
## ABSTRACT

A typical example in courses on electricity and magnetism is that of a conductor carrying a steady current. It is said that the electric field inside the conductor is parallel to the current and that there is no transverse (radial) component of the field. While this is reasonable assumption justified for pedagogical purposes, it is not rigorously true. In this paper, the transverse electrical field is calculated as being different from zero, but negligible from an experimental point of view. For various conductors, the transverse electrical field is a polynomial function from steady current.

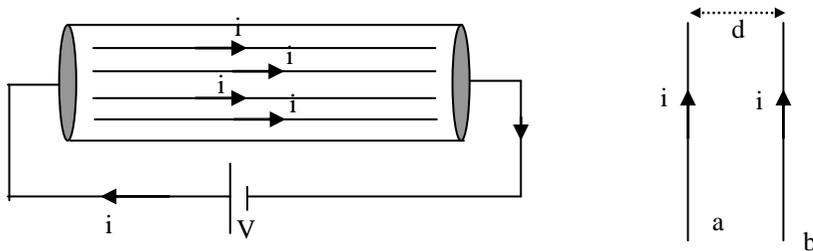
*Keywords : Transverse electrical field, steady current, conductor*

## Pendahuluan

Dari buku-buku teks fisika dasar kita ketahui bahwa apabila ujung-ujung konduktor listrik dihubungkan dengan sumber tegangan listrik, maka akan timbul sebuah medan listrik pada konduktor tersebut yang arahnya sejajar (longitudinal) dengan konduktor tersebut seperti terlihat pada gambar 1 (Haliday & Resnick, 1986). Akan tetapi jika kita analisis lebih jauh, sebenarnya pembawa-pembawa muatan listrik (elektron bebas) tersebar merata di seluruh ruang dalam konduktor. Deretan pembawa-pembawa muatan bebas tersebut dapat digambarkan sebagai garis-garis arus sejajar seperti terlihat pada gambar 2.



**Gambar 1.** Medan listrik longitudinal muncul ketika ujung-ujung konduktor dihubungkan dengan beda potensial listrik



**Gambar 2.** Garis-garis arus menggambarkan pergerakan pembawa muatan listrik

Tinjau dua buah garis arus yang satu sama lain saling berdekatan yang ditandai dengan garis arus a dan garis arus b. Garis arus a akan menghasilkan sebuah medan magnet  $B_a$  pada setiap titik di sekitarnya. Besarnya  $B_a$  yang ditimbulkan oleh arus  $i_a$  adalah : (Haliday & resnick, 1986)

$$B_a = \frac{\mu_0 i_a}{2\pi x} \quad (1)$$

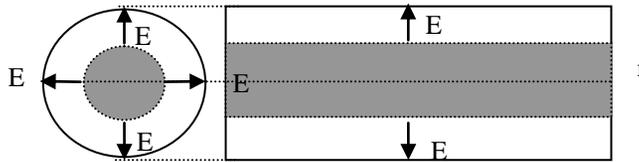
disini  $x$  adalah tegak lurus dari titik yang ditinjau medan magnetnya terhadap garis arus yang menimbulkannya. Dengan menggunakan kaidah tangan kanan dapat ditentukan bahwa arah  $B_a$  pada kawat b adalah masuk menembus bidang kertas. Garis arus b yang dialiri arus listrik  $I_b$  yang tercelupkan dalam medan magnet luar  $B_a$  akan mengalami gaya magnet yang mengarah ke samping kiri yang besarnya :

$$F_b = i_b |B_a| = \frac{\mu_0 I_b i_a}{2\pi d} \quad (2)$$

Sebaliknya garis arus a akan mengalami gaya magnet akibat pengaruh medan magnet yang ditimbulkan garis arus b ( $B_b$ ) yang arahnya ke kanan. Gaya-gaya yang dikerahkan oleh kedua garis arus tersebut terhadap satu sama lain adalah sama besarnya dan berlawanan arah, sehingga kedua garis arus itu akan saling tarik menarik. Analogi dengan ini, maka garis-garis arus pada konduktor juga akan saling tarik menarik dan cenderung akan berkumpul ke arah pusat konduktor, karena garis arus yang terletak di pusat cenderung diam akibat mendapat tarikan dari semua arah dalam konduktor. Dengan demikian seharusnya pada permukaan konduktor tidak terdapat garis arus. Dan jika pada permukaan konduktor tidak ada garis arus, maka seharusnya pada permukaan konduktor tidak ada arus listrik. Namun pada kenyataannya pada permukaan konduktor tetap ada arus listrik yang mengalir.

Adanya arus listrik yang mengalir pada permukaan konduktor, menandakan adanya suatu gaya tertentu sebagai gaya pengimbang yang cenderung mendorong kembali garis-garis arus ke arah luar konduktor secara radial, sehingga garis-garis arus ini tidak berkumpul disekitar pusat konduktor. Yang menjadi pertanyaan adalah apa jenis gaya pengimbang tersebut.

Jika kita amati dengan seksama dari peristiwa ini, maka jenis gaya yang mungkin bekerja adalah gaya listrik atau gaya magnet. Tetapi dengan segera dapat dipastikan bahwa gaya tersebut bukan gaya magnet lagi, sehubungan dengan ketiadaan sumbernya. Jadi sekarang satu-satunya yang mungkin adalah gaya listrik yang arahnya radial keluar ( $F_{Cr}$ ). Sudah tentu munculnya gaya listrik radial ini harus disebabkan oleh adanya medan listrik yang arahnya radial pula terhadap konduktor ( $E_r$ ) seperti terlihat pada gambar 3.



Gambar 3 Medan listrik radial

### Besar Medan Listrik Radial ( $E_r$ )

Tinjau keadaan yang digambarkan dalam gb.1; sebuah konduktor silinder dengan jari-jari  $R_0$ , dialiri arus listrik yang dihasilkan oleh sebuah medan listrik longitudinal  $E_L$ . Sesuai dengan hukum Ampere, maka akan timbul medan magnetik pada jarak  $r$  dari pusat sumbu konduktor sebesar :

$$\begin{aligned} \oint_C \vec{B}(\mathbf{r}) \cdot d\vec{l} &= \mu_0 i \\ \oint_C \vec{B}(\mathbf{r}) \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \int_S \vec{j}(\mathbf{r}') \cdot d\vec{a} = \mu_0 \int_S \vec{j}(\mathbf{r}') \cdot \hat{n} da \\ B(r) 2\pi r &= \mu_0 \int_0^r \vec{j}(r') \cdot \hat{n} da \\ B(r) &= \frac{\mu_0}{2\pi r} \int_0^r \vec{j}(r') \cdot \hat{n} da \quad \text{dengan } r < R_0 \end{aligned} \tag{3}$$

$\hat{n}$  merupakan sebuah vektor satuan normal terhadap elemen luas penampang konduktor  $da$ .

Seperti telah diungkapkan di muka, adanya medan magnetik  $B(r)$  ini, akan menyebabkan timbulnya gaya magnetik ( $F_M$ ) yang arahnya radial konduktor dan cenderung menarik garis-garis arus ke arah pusat konduktor (lihat gambar 3). Dan gaya listrik pengimbang ( $F_C$ ) yang mendorong garis-garis arus radial ke arah luar konduktor yang timbul akibat adanya medan listrik radial ( $E_r$ ), besarnya haruslah sama dengan gaya magnetik yang dilawannya. Atau dengan kata lain resultan gaya

dalam arah radial harus sama dengan nol, yang secara implisit dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$\begin{aligned}\sum \vec{F}_r &= 0 \\ q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} &= 0 \\ qE_r(r) - qvB(r) \sin \theta &= 0\end{aligned}$$

karena dalam kasus ini arah  $v$  selalu tegak lurus dengan arah  $B$ , maka  $\theta = 90$  dan  $\sin \theta = 1$ , sehingga :

$$\begin{aligned}qE_r(r) - qvB(r) &= 0 \\ qE_r(r) - \frac{v\mu_0}{2\pi r} \int_0^r \vec{j}(r') \cdot \hat{n} da &= 0 \quad (4) \\ qE_r(r) - \frac{v\mu_0}{2\pi r} \int_0^r j(r') 2\pi r' dr' &= 0\end{aligned}$$

Dengan mengingat kembali bahwa  $\frac{1}{c^2} = \epsilon_0 \mu_0$  dimana  $c$  adalah kecepatan cahaya, maka persamaan (4) dapat dituliskan sebagai :

$$E_r(r) = \frac{v}{\epsilon_0 c^2 r} \int_0^r j(r') dr' \quad (5.a)$$

Dari persamaan (5.a) dapat diamati bahwa harga  $E_r(r)$  tidak akan pernah nol jika  $j(r')$  tidak sama dengan nol, dan karena pada ruas kanan ada faktor  $\frac{v}{\epsilon_0 c^2}$ , maka harga  $E_r(r)$  ini akan sangat kecil. Hal ini berarti bahwa medan listrik radial dari sudut pandang eksperimen keberadaannya tidak signifikan dan dapat diabaikan. Untuk kasus rapat arus yang seragam dimana-mana dalam konduktor,  $j(r) = j_0$ , maka:

$$E_r(r) = \frac{v}{\epsilon_0 c^2 r} \int_0^r r' j_0(r') dr' = \frac{v j_0}{\epsilon_0 c^2 r} \frac{1}{2} r^2$$

$$E_r(r) = \frac{v j_0}{2 \epsilon_0 c^2} r$$
(5.b)

Jika kita gunakan teorema Gauss (teorema divergensi) pada konduktor silinder dengan jari-jari  $r$  seperti ditunjukkan dalam gb.3, dengan rapat muatan volume  $\rho$ , maka ungkapan untuk medan listrik radial dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\int_s \vec{E} \cdot \hat{n} da = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

$$E_r(r) 2\pi r = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho(r') 2\pi r' dr'$$

$$E_r(r) = \frac{1}{\epsilon_0 r} \int_0^r \rho(r') r' dr'$$
(6)

Dengan menyamakan persamaan 5.a dan persamaan 6, dapat disimpulkan bahwa :

$$\frac{v}{\epsilon_0 c^2 r} \int_0^r r' j(r') dr' = \frac{1}{\epsilon_0 r} \int_0^r \rho(r') r' dr'$$

$$\int_0^r \rho(r') r' dr' = \frac{v}{c^2} \int_0^r j(r') dr'$$
(7)

Rapat muatan total pada konduktor dapat ditulis sebagai jumlah dari rapat pembawa muatan bebas (carrier)  $\rho_c$  dan rapat kisi (lattice)  $\rho_{la}$  (Enrique N. Miranda, 1998), yaitu :

$$\rho = \rho_{la} + \rho_c$$
(8)

Jika persamaan 8 disubstitusikan ke persamaan 7, dan dengan mengingat kembali bahwa  $j_0 = \rho_c v$ , maka didapatkan :

$$\begin{aligned}
\int_0^r (\rho_{la} + \rho_c) r' dr' &= \frac{v}{c^2} \int_0^r r' \rho_c v dr' \\
\int_0^r \rho_{la} r' dr' &= \frac{v}{c^2} \int_0^r r' \rho_c v dr' - \int_0^r \rho_c r' dr' \\
\int_0^r \rho_{la} r' dr' &= -\left(1 - (v^2/c^2)\right) \int_0^r \rho_c r' dr' \\
\int_0^r \rho_c r' dr' &= -\frac{1}{(1 - (v^2/c^2))} \int_0^r \rho_{la} r' dr' \\
\int_0^r \rho_c r' dr' &= -\frac{\rho_{la}}{(1 - v^2/c^2)} \int_0^r r' dr' \\
\int_0^r \rho_c r' dr' &= -\frac{\rho_{la}}{(1 - v^2/c^2)} \left(\frac{1}{2} r^2\right) \\
\frac{1}{2} r^2 \rho_c &= -\frac{\rho_{la} r^2}{2(1 - v^2/c^2)} \\
\rho_c &= -\frac{\rho_{la}}{(1 - v^2/c^2)} .
\end{aligned} \tag{9}$$

Persamaan 9 menunjukkan bahwa rapat pembawa muatan bebas sedikit lebih besar daripada rapat kisi, karena faktor  $(v^2/c^2)$  cukup kecil. Dengan mensubstitusikan persamaan 9 ke persamaan 5.b akan didapat :

$$\begin{aligned}
E_r(r) &= \frac{v j_0}{2\epsilon_0 c^2} r = \frac{j_0}{v} \frac{v^2 r}{2\epsilon_0 c^2} = \rho_c \frac{v^2 r}{2\epsilon_0 c^2} \\
E_r(r) &= \frac{r}{2\epsilon_0} \frac{v^2}{c^2} \left[ -\frac{\rho_{la}}{1 - v^2/c^2} \right] \\
E_r(r) &\cong -\frac{r}{2\epsilon_0} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \rho_{la}
\end{aligned} \tag{10}$$

Persamaan 5.a dan 9 menunjukkan adanya efek dari arus listrik terhadap rapat pembawa muatan bebas yang mengakibatkan munculnya medan listrik radial.

## Contoh Perhitungan Medan Listrik Radial pada Berbagai Jenis Bahan Konduktor

Berikut ini disajikan beberapa hasil perhitungan medan listrik radial pada berbagai jenis bahan konduktor berbentuk silinder dengan luas penampang  $1 \text{ cm}^3$  yang dialiri arus listrik.

*Bahan konduktor Besi*, memiliki massa atom besi 56 gr dan kerapatan  $7,85 \text{ gr/cm}^3$

Dengan mengasumsikan setiap atom dianggap menyumbangkan elektron tunggal terhadap gas elektron dalam logam, dan dengan mengingat kembali bahwa bilangan Avogadro menyatakan jumlah atom dalam satu mol bahan, kita dapatkan :

$$\rho_{ia} = \frac{7,85 \text{ g}}{1 \text{ cm}^3} \frac{1 \text{ mol}}{56 \text{ g}} \frac{6 \times 10^{23} \text{ [atom]}}{1 \text{ mol}} \frac{1 \text{ [elektron]}}{1 \text{ [atom]}} \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{1 \text{ [elektron]}} = 1,346 \times 10^{10} \text{ C / cm}^3$$

harga-harga  $E_r(r)$  hasil perhitungan sebagai fungsi kuat arus listrik (i) dapat dilihat dalam tabel berikut ini :

**Tabel 1**  
**Medan Listrik radial fungsi kuat arus listrik**  
**pada konduktor Besi**

No	Arus	v	$(v/c)^2$	Er
1	10	7,42942E-06	6,13292E-28	-3,44982E-07r
2	20	1,48588E-05	2,45317E-27	-1,37993E-06r
3	30	2,22883E-05	5,51963E-27	-3,10484E-06r
4	40	2,97177E-05	9,81267E-27	-5,51971E-06r
5	50	3,71471E-05	1,53323E-26	-8,62455E-06r
6	60	4,45765E-05	2,20785E-26	-1,24194E-05r
7	70	5,20059E-05	3,00513E-26	-1,69041E-05r
8	80	5,94354E-05	3,92507E-26	-2,20788E-05r
9	90	6,68648E-05	4,96767E-26	-2,79435E-05r
10	100	7,42942E-05	6,13292E-26	-3,44982E-05r

Dengan cara perhitungan yang sama, untuk *bahan konduktor Aluminium* (Massa atom 27 dan kerapatan  $2,70 \text{ gr/cm}^3$ ), *Bahan konduktor Nikel* (Massa atom 59 gr dan kerapatan  $8,77 \text{ gr/cm}^3$ ), dan *bahan konduktor Tembaga* (Massa atom 63 gr dan

kerapatan  $8,8 \text{ gr/cm}^3$ ) diperoleh hasil seperti yang tercakup pada tabel 2 sampai tabel 4.

**Tabel 2**  
**Medan Listrik radial fungsi kuat arus listrik**  
**pada konduktor Aluminium**

No	Arus	V	$(v/c)^2$	Er
1	10	1,00438E-05	1,12086E-27	-6,30495E-07r
2	20	2,00876E-05	4,48345E-27	-2,52198E-06r
3	30	3,01314E-05	1,00878E-26	-5,67446E-06r
4	40	4,01752E-05	1,79338E-26	-1,00879E-05r
5	50	5,0219E-05	2,80216E-26	-1,57624E-05r
6	60	6,02627E-05	4,03511E-26	-2,26978E-05r
7	70	7,03065E-05	5,49223E-26	-3,08943E-05r
8	80	8,03503E-05	7,17353E-26	-4,03517E-05r
9	90	9,03941E-05	9,079E-26	-5,10701E-05r
10	100	0,000100438	1,12086E-25	-6,30495E-05r

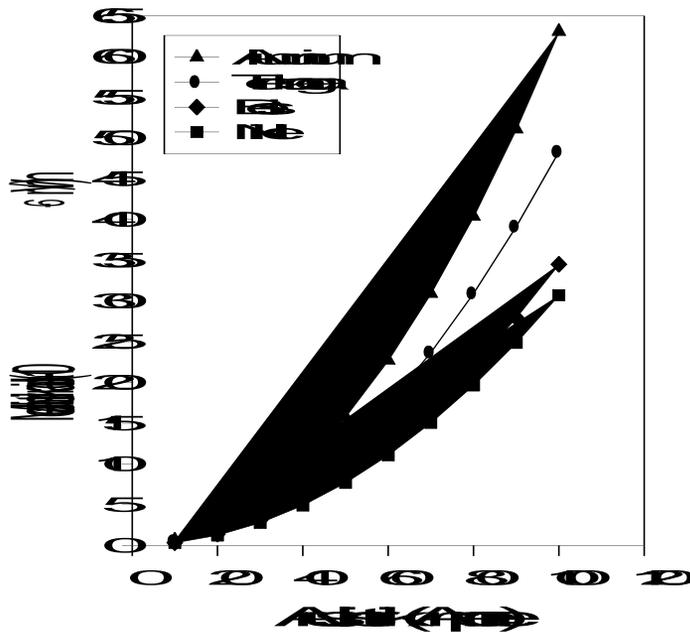
**Tabel 3**  
**Medan Listrik radial fungsi kuat arus listrik**  
**pada konduktor Nikel**

No	Arus	v	$(v/c)^2$	Er (r)
1	10	7,0082E-06	5,45721E-28	-3,06973E-07r
2	20	1,40164E-05	2,18288E-27	-1,22789E-06r
3	30	2,10246E-05	4,91149E-27	-2,76275E-06r
4	40	2,80328E-05	8,73153E-27	-4,91156E-06r
5	50	3,5041E-05	1,3643E-26	-7,67431E-06r
6	60	4,20492E-05	1,96459E-26	-1,1051E-05r
7	70	4,90574E-05	2,67403E-26	-1,50417E-05r
8	80	5,60656E-05	3,49261E-26	-1,96462E-05r
9	90	6,30738E-05	4,42034E-26	-2,48648E-05r
10	100	7,0082E-05	5,45721E-26	-3,06973E-05r

**Tabel 4**  
**Medan Listrik radial fungsi kuat arus listrik**  
**pada konduktor Tembaga**

No	Arus (A)	v	$(v/c)^2$	$E_r (r)$
1	10	7,69231E-06	6,57462E-28	-4,82882E-07r
2	20	1,53846E-05	2,62985E-27	-1,93153E-06r
3	30	2,30769E-05	5,91716E-27	-4,34594E-06r
4	40	3,07692E-05	1,05194E-26	-7,72611E-06r
5	50	3,84615E-05	1,64366E-26	-1,2072E-05r
6	60	4,61538E-05	2,36686E-26	-1,73837E-05r
7	70	5,38462E-05	3,22156E-26	-2,36612E-05r
8	80	6,15385E-05	4,20776E-26	-3,09044E-05r
9	90	6,92308E-05	5,32544E-26	-3,91134E-05r
10	100	7,69231E-05	6,57462E-26	-4,82882E-05r

Jika semua hasil perhitungan kita plot dalam suatu grafik yang menyatakan hubungan antara kuat medan listrik radial ( $E_r$ ) terhadap arus listrik ( $i$ ) yang mengalir pada setiap bahan konduktor, dihasilkan grafik sebagai berikut:



**Gambar 4 Grafik kuat medan listrik radial terhadap kuat arus listrik**

Dan berdasarkan hasil fitting kurva, semua kurva pada grafik di atas memenuhi persamaan polinomial dengan persamaan polinomial untuk masing-masing kurva adalah sebagai berikut :

$$Y = \alpha + \beta X + \gamma X^2$$

dengan masing-masing konstanta untuk setiap kurva seperti berikut :

No	Konduktor	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	Alumunium	$8,086 \times 10^{-11}$	$-2,176 \times 10^{-12}$	$6,305 \times 10^{-9}$
2	Tembaga	$1,150 \times 10^{-10}$	$-3,133 \times 10^{-12}$	$3,698 \times 10^{-9}$
3	Besi	$6,311 \times 10^{-12}$	$-2,683 \times 10^{-13}$	$3,450 \times 10^{-9}$
4	Nikel	$-1,337 \times 10^{-11}$	$4,894 \times 10^{-13}$	$3,070 \times 10^{-9}$

### Pembahasan

Keberadaan medan listrik radial dalam konduktor yang dialiri arus listrik seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (10) tidak dapat dibantah lagi, karena telah ditunjukkan melalui pengkajian dengan menggunakan konsep-konsep kelistrikan dan kemagnetan yang sampai saat diakui kehandalannya. Munculnya medan listrik radial ini sangat boleh jadi disebabkan tat kala pembawa-pembawa muatan (arus listrik) tertarik oleh gaya magnetik ke arah pusat konduktor secara radial, maka pengumpulan pembawa muatan ini akan menyebabkan terjadinya perbedaan konsentrasi pembawa muatan dibagian pusat dengan dibagian tepi konduktor, di bagian pusat menjadi lebih positif dibanding dibagian tepi konduktor, sehingga mengakibatkan munculnya medan listrik dalam arah radial konduktor dari daerah yang lebih positif ke daerah yang kurang positif. Medan listrik radial ini besarnya harus sedemikian rupa sehingga menimbulkan gaya listrik radial yang tepat sama dengan gaya magnetik penyebabnya, agar dapat mengembalikan pembawa-pembawa muatan tepat ke kedudukan asalnya. Dari hasil perhitungan ternyata

bahwa medan listrik radial ini nilainya bergantung pada jarak radial dari pusat (sumbu) konduktor dan besarnya arus listrik yang mengalir. Setelah diplot grafik hubungan medan listrik radial terhadap kuat arus listrik yang mengalir pada setiap bahan konduktor, ternyata menunjukkan hubungan fungsional secara polinomial, yang berarti nilai medan listrik radial akan naik secara polinomial jika kuat arus listrik yang mengalir pada konduktor diperbesar.

### **Kesimpulan**

Medan listrik radial di dalam sebuah konduktor yang dialiri arus listrik konstan dapat ditentukan, dengan menggunakan persamaan 5.a. Ternyata hasilnya tidak sama dengan nol, sangat bertolak belakang dengan pernyataan yang dikemukakan dalam buku-buku teks kelistrikan dan kemagnetan untuk tingkat dasar dan menengah. Medan listrik radial diperlukan untuk mengimbangi gaya magnetik yang bekerja pada pembawa-pembawa muatan bebas (elektron), dan medan ini dihasilkan akibat adanya perbedaan konsentrasi muatan dalam arah radial konduktor. Akan tetapi seperti dapat dilihat dari hasil perhitungan, nilainya sangat kecil dibanding medan listrik longitudinal sehingga dari sudut pandang eksperimen dapat diabaikan.

### **Daftar Pustaka**

- Halliday dan Resnick. *Fisika Jilid 2*. Erlangga. Jakarta, 1986
- Enrique N. Miranda., *The Fields Inside a Conductor Carrying a Steady Current*, Eur. J. Phys. 20 (1998) 97-100.