

PEMILIHAN KAWAT ENAMEL UNTUK PEMBUATAN SOLENOID DINAMOMETER ARUS EDDY DENGAN TORSI MAKSIMUM 496 Nm

Nazaruddin Sinaga⁽¹⁾, Marsono H. Sonda⁽²⁾

⁽¹⁾. Dosen Pasca Sarjana Teknik Mesin Undip Semarang

⁽²⁾. Mahasiswa Magister Teknik Mesin Undip Semarang

Jl. Prof. H. Sudarto, SH., Tembalang, Kotak Pos 6199 SMS, Semarang 50329

Telp. 7473417, 7466420 (Hunting), Fax. 7472396

Abstrak

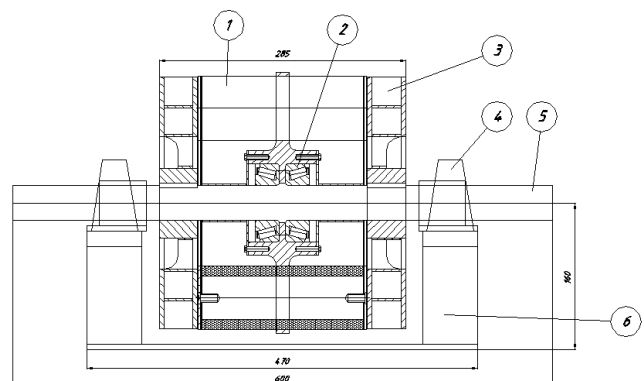
Kumparan elektromagnet atau sering disebut koil dibuat dengan cara menggulung kawat pada sebuah inti. Apabila arus listrik dialirkan pada kumparan tersebut maka akan dibangkitkan suatu medan magnet. Untuk memperoleh medan magnet yang kuat diperlukan banyak lilitan dan jenis kawat yang baik. Kawat yang biasa dipergunakan pada dinamometer arus eddy adalah kawat enamel, yang harus dipilih berdasarkan kuat medan magnet yang hendak dibangkitkan, kemampuan menerima arus listrik, panas yang dibangkitkan, kemudahan mendapatkan, harga dan umur. Dalam tulisan ini disajikan hasil perancangan kawat solenoid yang akan digunakan pada dynamometer arus eddy dengan torsi maksimum 496 Nm. Dari hasil penelitian ini dipilih kawat enamel Hellenic Mediotherm 200 dengan diameter 1,05 mm (AWG 18). Hasil pengujian koil yang menggunakan kawat jenis ini menunjukkan bahwa pada arus 4,4 A temperaturnya mencapai 91,6 °C dan tidak menunjukkan tanda-tanda kerusakan atau putusnya kawat tersebut. Oleh karena itu kawat ini dapat digunakan sebagai kawat solenoid pada dinamometer arus eddy karena temperaturnya masih di bawah 150°C.

Kata kunci : kawat enamel, solenoid, dinamometer, arus eddy.

1. Pendahuluan

Dinamometer arus eddy adalah salah satu alat yang dipergunakan untuk mengukur daya dan torsi suatu mesin yang berputar. Salah satu jenis diantaranya yaitu *chassis dinamometer* berpendinginan udara (*air cooled dinamometer*) [1]. Dinamometer ini terdiri dari beberapa bagian utama seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Solenoid adalah merupakan bagian yang terpenting yang dapat membangkitkan medan magnet. Pada saat medan magnet ini terjadi dan rotor berputar maka terjadilah arus eddy. Energi kinetik yang dibangkitkan ini kemudian diubah menjadi panas. Besarnya panas yang ditimbulkan haruslah dapat diatasi oleh solenoid. Karena solenoid merupakan suatu kumparan kawat, maka kawat yang dipakai haruslah memenuhi sifat-sifat mekanik, elektrik dan termal yang dipersyaratkan sehingga tidak hanya mempertimbangkan secara ekonomis tetapi juga secara teknis.

Di dalam penelitian ini akan dipelajari dan dilakukan pemilihan kawat enamel yang layak digunakan sebagai kumparan solenoid dinamometer arus eddy berpendingin udara.



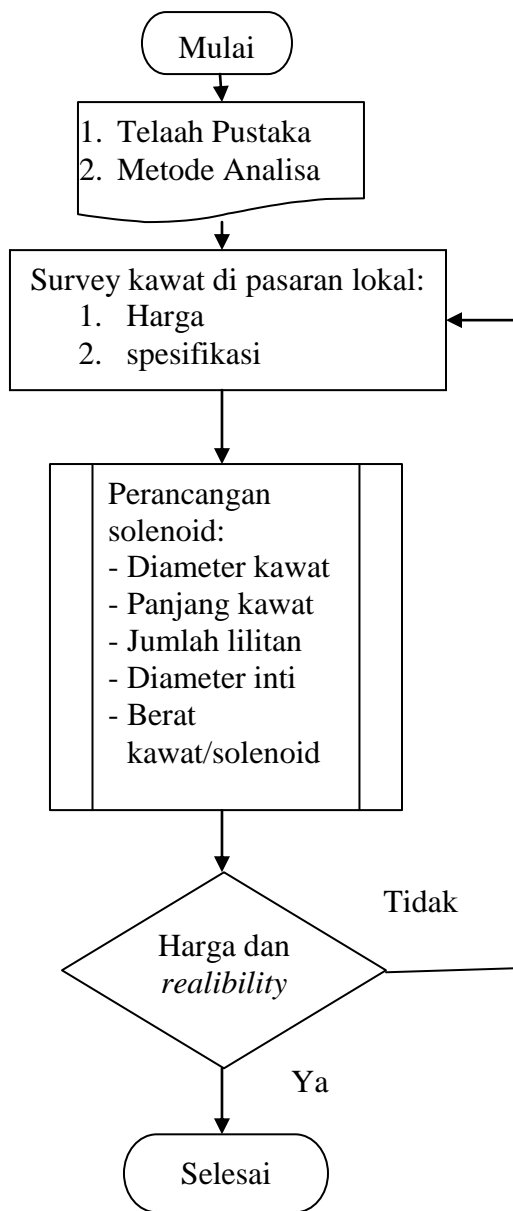
Gambar 1. Bagian-bagian utama dinamometer: (1) Solenoid; (2) Stator; (3) Rotor; (4) Pillow block bearing; (5) Poros; (6) Rangka

2. Metodologi Pemilihan Kawat Solenoid

Dalam penelitian ini metoda yang digunakan untuk pemilihan kawat solenoid diperlihatkan pada Gambar 2.

Kawat yang dibutuhkan untuk membuat solenoid perlu untuk diteliti berdasarkan referensi yang ada, baik melalui buku-buku pustaka ataupun standarisasi yang berlaku. Karena kebanyakan kawat yang dijual di pasaran tidak diketahui spesifikasinya oleh

penjual, yang diketahuinya hanyalah merek dan pabrik pembuatnya. Padahal bahasa pedagang untuk menyampaikan tentang jenis kawat ataupun merek sering tidak sesuai dengan referensi yang tertulis di buku ataupun yang dikeluarkan oleh pabrik pembuatnya. Sehingga informasi tentang merek dan kawat yang diberikan perlu dilakukan pengecekan kebenarannya melalui internet dan perusahaan pembuatnya.



Gambar 2. Metode pemilihan kawat

Dalam perancangan ini yang utama harus diketahui adalah diameter kawat, panjang kawat, jumlah lilitan, diameter inti besi dan berat total kawat untuk satu

solenoid. Kawat yang sudah digulung sesuai rencana dilakukan klarifikasi tentang harga/biaya dan kemampuan teknisnya terhadap arus yang dipakai dengan menggunakan sebuah *power supply*. Apabila harganya pantas dan mudah diperoleh serta dapat memenuhi spesifikasi yang diinginkan berarti kawat tersebut dapat dipakai.

2.1. Jenis Kawat yang Ada di Kota Semarang

Kawat enamel yang banyak dijumpai di pasaran lokal adalah kawat buatan Indonesia (PT. Sucaco, Tbk) dan buatan Jerman (*Hellenic Cables, SA*). Adapun buatan Malaysia dan China (*Ningbo Jintian New Material Co, Ltd*) tidak semua toko menjualnya.



Gambar 3. Kawat enamel Supreme[2]

Kawat produksi PT Sucaco ini ada beberapa jenis:

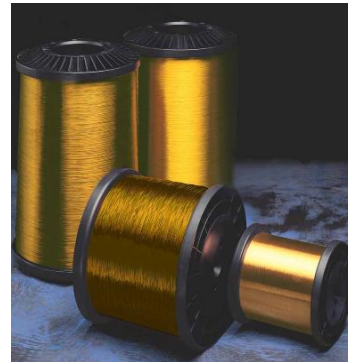
- a. PVF (*polyvinyl Formal*), cocok untuk *electricity meter*.
- b. UEW (*polyurethane*), untuk alat-alat rumah tangga dan lainnya.
- c. SBUEW (*polyurethane self bonding*), untuk alat-alat rumah tangga.
- d. PEW (*polyester*), untuk alat-alat rumah tangga, motor, transformator dll.
- e. PEWN (*polyester nylon*), untuk pompa air, *blender, mixer, motor, transformator, ignition coil, magnetic coil*.
- f. EIW (*polyesterimide*), untuk alat-alat rumah tangga, motor, *transformator, magnetic coil*.
- g. PEW AI (*polyester poliamideimide*), untuk *transformator, ignition coil*.

Masing-masing jenis kawat tersebut mempunyai ukuran diameter 0,10 – 4,0 mm dengan thermal class 105 – 220 °C dengan harga rata-rata Rp. 95.000,-/kilogram. Kawat supreme tidak menyebutkan sifat-sifat mekanik secara rinci, hanya menyebutkan kesetaraan standarisasi industri, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Kawat enamel lainnya yaitu produksi Hellenic Cable S.A. Jenis-jenisnya terdiri dari :

- a. Adomin
- b. Enoflex-B
- c. Enoflex-F
- d. Enoflex 180
- e. Enoflex-H
- f. Idiotherm
- g. Mediotherm
- h. Politherm
- i. Enobond 180
- j. Idiobond
- k. Mediobond 200

Kawat enamel Hellenic mempunyai diameter 0,07 – 5,0 mm dengan *thermal class* 120 – 200 °C dengan harga Rp. 130.000,-/kilogram. Setiap jenis kawat Hellenic menyebutkan sifat-sifat mekaniknya, sebagai contoh seperti diperlihatkan pada Tabel 2 untuk kawat Mediotherm 200.



Gambar 4 kawat enamel Hellenic[3]

Tabel 1 Standar produk kawat Supreme

Code	Shape	JIS	IEC	NEMA	
PVF	Solid Circular	C 3202-2	60317-1	MW 15	
PEW		C3202-5	60317-3	MW 5	
UEW		C3202-6	60317-4	MW 75	
SBUEW		C3202-7	60317-15		
EIW		-	60317-8		
PEWN/EIWN		C3202-8	60317-22	MW 30	
PEW AI/EIW AI			60317-23	MW 76	
UEW UI			-	MW 35	
AIW				60317-26	MW 79

2.2. Perencanaan Solenoid dan Pemilihan Kawat

Solenoid ini adalah kumparan yang terbuat dari kabel panjang yang dililitkan secara rapat, dan dapat diasumsikan bahwa panjangnya jauh lebih besar daripada diameternya[4]. Panjang kumparan solenoid ideal tak terhingga dengan kabel yang saling berhimpit dalam lilitannya dan medan magnet di dalamnya adalah seragam dan paralel terhadap sumbu solenoid tersebut.

Nilai induksi magnet untuk solenoid ideal dapat dihitung dengan persamaan berikut [5]:

$$B = \mu \cdot H = \mu \cdot \frac{n \cdot i}{l_c} \dots\dots\dots(1)$$

di mana:

B = induksi magnet (Tesla = Wb/m²)

μ = permeabilitas (Wb/A.m)

H = kuat medan magnet (A/m)

i = kuat arus yang mengalir (A)

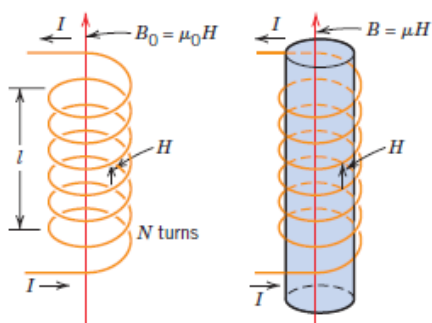
n = jumlah lilitan

l_c = panjang kumparan

Table 2. kawat Hellenic Mediotherm 200

Properties	
Standard	IEC 60317-13
	NEMA MW 73-C., MW 35-C
	DIN 46416-6/7
Insulation Coatings	Modified Polyester (MDE) with Polyamide-MDE Overcoat
Availability	0,07 – 6,00 mm L 0,10 – 6,00 mm 2L
Mechanical Properties	For ϕ 1,00
- Elongation	>38 %
- Springness	<40
- Adherence-flexibility	Excellent
- Resistance to abrasion	>15,3 N
Electrical Properties	
Breakdown Voltage	10 kV
Thermal Properties	
- Temperature Index	200., 210
- Cut through	2 min \geq 360 °C
- Heat shock	1d, 1/2 h \geq 220 °C
Chemical Properties	
- Solvent test	5 H
- Solderability	-
- Resistance to refrigerants	to HFC 134-404-407 Freon 12-22

Arah vector-vektor pada persamaan di atas ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Medan magnet solenoid

Solenoid yang dipergunakan dalam dinamometer ini harus mampu membangkitkan torsi (τ). Hal ini dapat diperkirakan dari persamaan berikut :

$$\tau = B \cdot i \cdot A \cdot n \dots\dots\dots(2)$$

atau

$$\tau = \mu \cdot i^2 \cdot A \cdot n^2 \cdot \frac{1}{l_c} \dots\dots\dots(3)$$

dimana A = luas penampang solenoid (m^2)

Nilai permeabilitas bahan magnet adalah

tidak konstan, dimana sebagian besar tergantung pada kekuatan magnetisasi yang dikenakan padanya. Besarnya permeabilitas suatu bahan magnet selalu dibandingkan terhadap permeabilitas hampa udara, dimana perbandingan tersebut disebut permeabilitas relatif. Permeabilitas relatif didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

μ_r = permeabilitas relatif

μ_o = permeabilitas hampa udara ($4 \pi \cdot 10^{-7}$ Wb/A.m)

μ = permeabilitas bahan (Wb/A.m)

sehingga persamaan (3) menjadi:

$$\tau = \mu_r \cdot \mu_o i^2 A n^2 \cdot \frac{1}{l_c}$$

$$\tau = \mu_r \cdot \mu_o i^2 \frac{\pi}{4} D_o^2 n^2 \cdot \frac{1}{l_c} \dots\dots\dots(5)$$

Dalam penelitian ini telah dilakukan perhitungan rancangan terhadap beberapa jenis kawat enamel yang dapat menghasilkan torsi sebesar 62,07 Nm untuk setiap solenoid.

Apabila solenoid dibuat dengan inti besi[6] dengan diameter 50 mm dan panjang 150 mm diperoleh permeabilitas relatif untuk besi $\mu_r = 150$. Jika kawat yang akan dipakai adalah kawat tembaga 1,05 mm, maka panjang kawat yang dibutuhkan adalah:

$$l_c = \pi(D_i + a_n \cdot d_w)n \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

- l_c = panjang kawat
- D_i = diameter inti solenoid
- a_n = tumpukan ke-n
- d_w = diameter kawat
- n = jumlah lilitan

Tahanan yang terjadi pada kawat adalah:

$$R_n = \frac{\rho \cdot l_c}{A_w} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana:

- R_n = tahanan (Ω)
- ρ = tahanan jenis kawat ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
- l_c = panjang kawat (m)

A_w = luas penampang kawat (mm^2)

Apabila dalam rancangan ini dipakai sampai dengan 8 tumpukan maka panjang kawatnya

adalah $l_c = 183289$ mm yang dapat membangkitkan torsi sebesar 62 Nm. Hasil perhitungannya ditunjukkan pada Tabel 3.

Pertimbangan selanjutnya adalah harga dan kemudahan mendapatkan di kota Semarang. Kawat Hellenic dan kawat Supreme banyak dijual dengan harga bervariasi, Hellenic lebih mahal dari pada Supreme. Dari penjelasan para konsumen penggolong dynamo kawat Supreme lebih disukai konsumen, karena murah harganya, tetapi bagi konsumen yang menghendaki syarat teknis tertentu lebih menyukai kawat Hellenic. Oleh karena itu untuk solenoid ini dipilih kawat Hellenic Mediotherm IEC 603 17-3 dengan diameter kawat 1,05 mm. Kawat yang dipilih ini kemudian digulung pada inti besi sehingga menjadi sebuah solenoid seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Selanjutnya dilakukan pengujian untuk mengetahui besarnya temperatur yang dibangkitkan pada beberapa posisi dengan cara mengaliri arus listrik.

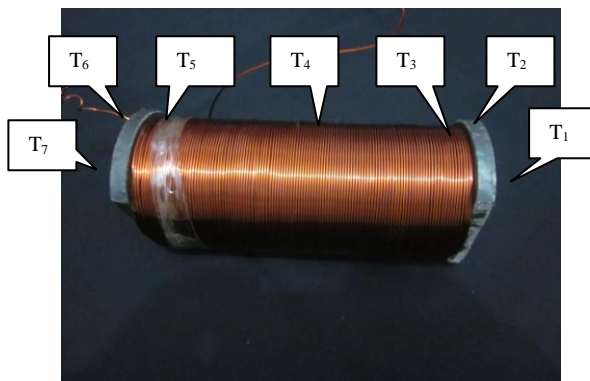
Tabel 3 Perhitungan Solenoid

n	tumpukan	lc (mm)	R(Ω)	i/solenoid	τ (Nm)
143	1	22900	0.456	26.305	37.79
286	2	46866	0.934	12.853	39.06
429	3	71316	1.421	8.447	40.95
571	4	96248	1.917	6.259	43.01
714	5	121664	2.424	4.951	45.14
857	6	147562	2.940	4.082	47.30
1000	7	156424	3.116	3.851	61.21
1143	8	183289	3.651	3.286	62.07

2.3. Pengujian Kawat Solenoid

Kawat solenoid yang telah digulung dalam sebuah inti besi dilakukan pengujian dengan diberi arus listrik mulai 1 A – 4,4 A. Hal ini karena batas maksimum untuk kawat 1,05 mm adalah 3,45 A [7]. Mula-mula arus 1 A dari *power supply* dialirkan pada salah satu ujung kawat.

Kemudian pengukur suhu (*infrared thermometer*) diarahkan pada beberapa titik dan diamati temperturnya. Setelah *steady*, kurang lebih satu menit untuk setiap titik pengukuran, pembacaan temperatur ini baru dicatat. Hasil pengukuran pada beberapa nilai kuat arus ditunjukkan pada Tabel 4.

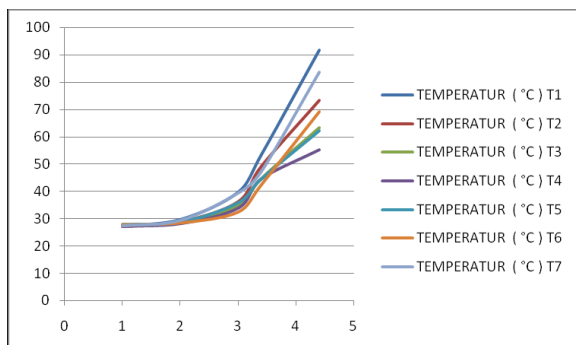


Gambar 6 Pengujian solenoid

Tabel 4 Pengukuran temperatur pada solenoid

E (volt)	I (A)	R(Ω)	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
4.36	1	4.36	27.5	27.2	27.9	27.1	27.8	27.8	27.5
8.6	2	4.3	29.8	28.9	28.6	28.1	28.6	28.5	29.5
13.05	3	4.35	39.8	36.3	34.8	33.8	35.8	32.5	39.5
14.82	3.4	4.36	53.5	49.2	44.7	44.6	44.6	42.5	47.4
19.18	4.4	4.36	91.6	73.2	63.2	55.3	62.3	69.2	83.5

Dari hasil pengujian ternyata suhu tertinggi adalah pada bagian tengah sepatu solenoid ($T_1 = 91,6 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $T_7 = 83,5 \text{ }^\circ\text{C}$) dan suhu ini terjadi pada arus tertinggi yaitu 4,4 Amper. Pada saat arus dinaikkan hingga mencapai 5 Ampere, serlak kumparan mulai meleleh, sehingga pengukuran tidak dilanjutkan karena akan berakibat renggangnya pori-pori diantara kawat tersebut. Pada bagian tengah kumparan dan ujung kumparan suhunya lebih rendah dari pada bagian tengah sepatu.



Gambar 7 Hasil pengukuran temperatur

Bagian tengah sepatu adalah bagian yang terpanas, berarti medan magnet yang terbesar dan gaya elektromagnetnya adalah yang terbesar yang dapat dibangkitkan oleh arus

eddy, apabila terdapat konduktor yang memotongnya. Kawat Hellenic Medioterm yang diuji cobakan mempunyai kapasitas maksimum $200 \text{ }^\circ\text{C}$ sedangkan kawat lain seperti Supreme maupun Ningbo Jintian tidak dilakukan uji coba karena data spesifiknya tidak diketahui walaupun harganya lebih murah.

3. Hasil dan Pembahasan

Ada beberapa macam kawat enamel yang dijual di berbagai toko di Semarang, dimana para penjual tidak dapat memberitahukan spesifikasi kawat tersebut. Walaupun demikian, dengan disebutkan merek yang terdapat pada label gulungan yang baru, dapat diperiksa spesifikasi melalui internet. Dengan demikian diperoleh informasi tentang perusahaan pembuat dan keterangan lain yang lebih lengkap. Kawat Hellenic lebih jelas spesifikasinya dibandingkan dengan kawat Supreme. Kedua jenis kawat ini mudah didapatkan di kota Semarang dengan harga yang bervariasi. Untuk Hellenic Rp. 125.000,-/kg – Rp. 140.000,-/kg sedangkan jenis Supreme Rp. 90.000,-/kg - Rp. 120.000,-/kg.

Dari hasil perencanaan sebagaimana tersebut pada Tabel 3, solenoid dibuat dengan diameter kawat 1,05 mm dan panjang 183,5 m, yang mampu menghasilkan torsi 62,07 Nm pada arus 3,286 A. Arus ini dibatasi sesuai dengan arus maksimum yang direkomendasikan untuk kawat 1,05 mm (AWG 18).

Dynamometer yang akan dibuat memiliki 8 buah solenoid. Untuk sebuah solenoid dibutuhkan kawat dengan berat 1,6 kg sehingga untuk 8 buah solenoid biaya yang diperlukan adalah Rp. 1.664.000,-.

Pengukuran temperatur pada solenoid hingga arus 4,4 A menunjukkan bahwa temperatur kawat dibagian permukaan tidak melebihi 80 °C. Dapat diperkirakan bahwa temperatur kawat di bagian dalam akan lebih tinggi dari ini. Pada temperatur 80 °C tersebut tidak ditemui tanda-tanda kerusakan seperti bekas terbakar, putusnya kawat ataupun melelehnya enamel kawat. Dengan pertimbangan spesifikasi kawat Mediotherm 200, yang memiliki indek temperatur 200 maka diperkirakan solenoid ini masih dapat bekerja dengan aman pada kuat arus sekitar 5 A.

4. Kesimpulan

Kawat Hellenic Mediotherm 200 yang telah diuji cobakan untuk sebuah solenoid mampu menghasilkan torsi (τ) = 62,07 Nm untuk sebuah solenoid yang tersusun dari 8 tumpukan kawat dengan panjang kawat 184 m atau seberat 1,6 kg. Suhu tertinggi dicapai pada ujung kawat sebelah luar, masih jauh daripada suhu maksimum yang diijinkan

kawat tersebut. Sehingga untuk keperluan pembuatan dynamometer yang menghasilkan torsi sekitar 60 Nm kawat Hellenic Mediotherm dapat dipergunakan.

Daftar Pustaka

- Dynamite., "Eddy Current (Air Cooled) Dynamometer", <http://www.land-and-sea.com/eddy-current-dynamometer/eddy-current-dynamometer.htm>., 9 April 2013
- Supreme Enamelled wire., <http://www.sucaco.com/pdf/Enamel.pdf>., 3 April 2013;
- Hellenic Cable.S.A., http://www.cablel.gr/dyn/dw_pr/11260940330_gr.pdf., 3 April 2013;
- Halliday, David., Resnick, Robert., Walker, Jearl., 2001, *Fundamentals of Physics* (edisi ke-6th). John Wiley & Sons, Inc
- Callister, D., Jr., Rethwisch, David G., 2010., *Materials Science and Engineering an Introduction*., 8 th ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Babani, BB., 2000., *Coil Design and Construction*., Microchip: Embedded Control Handbook
- Mc Gahee, Thomas., "AWG American Wire Gauge Table for Bare Copper Wire", http://www.kengilbert.com/techstuff/AWG_WIRE_TABLE.html, 11 Pebruari 2013