Listrik dan Medan Magnet

by Suryanto_ Andi

Submission date: 31-May-2023 11:21AM (UTC+0700)
Submission ID: 2105747083
File name: LISTRIK_DAN_MEDAN_MAGNET.pdf (5.51M)
Word count: 36601
Character count: 219651

Andi Suryanto
Syamsul Bakhri

LISTRIK DAN MEDAN MAGNET



LISTRIK DAN MEDAN MAGNET

Andi Suryanto

Syamsul Bakhri

WADE GROUP

LISTRIK DAN MEDAN MAGNET

LISTRIK DAN MEDAN MAGNET

© Andi Suryanto
Syamsul Bakhri

Editor : Team WADE Publish
Layout : Team WADE Publish
Design Cover : Team WADE Publish
Sumber Gambar: https: //www. freepik. com/

Diterbitkan oleh:

WADE GROUP National Publishing

Anggota IKAPI 182/JTI/2017

Cetakan Pertama, Desember 2022
ISBN: 978-623-6243-27-5

Hak Cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk memfotocopy, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa seizin tertulis dari Penerbit.

Perpustakaan Nasional: Katalog Dalam Terbitan (KDT)
Viii+254 hlm; 15x23 cm

KATA PENGANTAR

Fisika merupakan ilmu pengetahuan yang memiliki peranan penting dalam memahami perilaku dan struktur materi. Materi akan mengantarkan pemahaman dalam menelusuri pengetahuan atomik hingga partikel yang paling elementer, bahkan mengarungi samudera alam, melintas dari satu gugus bintang ke gugus bintang lain, dari satu gugus galaksi ke gugus galaksi lain, dan seterusnya hingga ke lapisan terluar jagad raya. Mempelajari ilmu fisika mengantarkan kita, Insya Allah membawa kita semakin memahami fenemona alam dan semakin dekat kepada Sang Pencipta seluruh alam, yaitu ALLAH Subhana Wataala.

Buku ini sangat bermanfaat bagi siapa saja yang ingin mengetahui lebih mendalam tentang ilmu fisika yang membahas tentang Listrik dan Magnet, bahkan dapat menjadi pegangan dalam membangun utility dalam prarancangan pabrik.

Ucapan terima kasih kami haturkan kepada Saudara Prof. Dr. Eng. Mikrajuddin Abdullah M.Si yang karyanya telah memberikan kontribusi kepada penyempurnaan buku ini. Kepada Penerbit yang telah membantu pengeditan dan penerbitan buku ini, kami ucapkan terima kasih.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan buku ini masih banyak lubang yang terliang dan masih banyak rongga yang terengah. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan buku ini.

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **v**
DAFTAR ISI ..... **vii**
BAB I
LISTRIK STATIS
(ELEKTROSTATIKA) **1**
1. Muatan Listrik 1
2. Medan Listrik 9
3. Potensial Listrik 15
4. Kapasitas Listrik 19
BAB II
ARUS SEARAH (ELEKTRODINAMIKA) **29**
1. Arus Listrik 29
2. Kuat Arus Listrik 32
3. Hambatan Arus Listrik 33
4. Susunan Hambatan 37
5. Rangkaian Listrik Sederhana 47
6. Gabungan Sumber Tegangan 52
7. Rangkaian Listrik Majemuk 54
8. Sumber-sumber Arus Searah 67
BAB III
ENERGI DAN DAYA LISTRIK **77**
1. Energi Listrik 77
2. Daya Listrik 79
3. Alat Listrik 83
4. Alat Pengukur Listrik 88
5. Indutri Logam 103
BAB IV
ARUS BOLAK BALIK **109**
1. Pengertian Arus Bolak Balik 110
2. Pengertian Tegangan Bolak Balik 122
3. Disipasi Daya Pada Kapasitor Dan Induktor 132
4. Diagram Fasor 133
5. Operasi Trigonometri Dengan Diagram Fasor 137
6. Rangkaian Arus Bolak Balik 141

7. Filter 162
8. Daya Pada Arus Bolak Balik (Faktor Daya) 166
BAB V
KEMAGNETAN 171
1. Medan Magnet Di Sekitar Arus Listrik..... 171
2. Gaya Lorentz 226
3. Medan Magnet Oleh Magnet Batang 238
4. Hukum-Hukum Induksi Elektromagnetik 240
5. Penerapan Induksi Elektromagnetik 242
DAFTAR PUSTAKA 251
PROFIL PENULIS 253

BAB I
LISTRIK STATIS (ELEKTROSTATIKA)

1. Muatan Listrik

1.1. Pengertian Muatan Listrik

Listrik mempunyai dua jenis muatan, yaitu muatan listrik postif (+) dan muatan listrik negatif (-). Studi tentang listrik dibagi atas dua bagian, yaitu :

- Listrik statis (elektrostatics)
- Listrik dinamis (elektrodinamics)

Listrik statis mempelajari muatan listrik yang berada dalam keadaan diam, sedangkan listrik dinamis mempelajari muatan listrik yang bergerak atau disebut juga arus listrik. Bahan yang mudah menghantarkan listrik disebut konduktor, contohnya manusia dan benda logam. Sedangkan bahan yang sulit atau tidak dapat menghantarkan listrik disebut isolator, contohnya plastik, karet, dan kaca.

Muatan listrik adalah sifat atau muatan dasar yang dibawa partikel dasar sehingga menyebabkan partikel dasar tersebut mengalami gaya tarik tarik-menarik dan tolak-menolak. Muatan listrik suatu partikel dasar dapat berjenis positif dan negatif. Jika dua buah benda memiliki muatan yang sama akan tolak menolak dan kedua benda akan tarik menarik jika memiliki muatan yang berbeda jenis. Perlu diketahui, partikel dasar dan subatomik seperti elektron dan proton memiliki muatan listik. Elektron bermuatan negatif dan proton bermuatan positif. Contohnya sebagai berikut :

1) Plastik yang digosokan pada rambut kering akan bermuatan negatif.
2) Kaca yang telah digosokkan pada bulu akan bermuatan positif.

3) Dua buah benda yang bermuatan listrik sejenis akan tolak-menolak dan jika muatan listriknya berbeda akan tarik-menarik.

Benda atau materi pada umumnya mempunyai jumlah proton sama dengan jumlah elektron benda disebut dalam keadaan netral. Jika keseimbangan antara jumlah proton dan elektron terganggu yaitu adanya pengurangan atau penambahan muatan elektron, maka benda tersebut dikatakan bermuatan listrik. Benda akan bermuatan listrik positif bila kekurangan elektron dan bermuatan negatif bila kelebihan elektron.

Besar kecilnya suatu muatan listrik yang diukur dalam satuan Coulomb. Benda dikatakan bermuatan listrik negatif jika benda tersebut kelebihan elektron, sedangkan benda yang bermuatan listrik positif jika benda tersebut kekurangan elektron. Benda yang tidak bermuatan listrik atau netral jika jumlah muatan negatif sama dengan muatan positif.

Adapun sifat muatan listrik, adalah sebagai berikut :

1) Muatan listrik yang sejenis akan tolak-menolak dan muatan tidak sejenis akan saling tarik menarik.
2) Muatan listrik merupakan besaran pokok fisika yang diukur dalam satuan coulomb, yang disimbolkan dengan C. Satu coulomb sama dengan $6{,}24\ x\ 10^{18}\ e$ (e = muatan proton), sehingga muatan yang dikandung oleh proton adalah $1{,}602\ x\ 10^{-19}\ Coulomb$. Elektron memiliki muatan yang sama dengan proton namun berbeda jenis, yaitu $-1{,}602\ x\ 10^{-19}\ Coulomb$.
3) Muatan listrik memiliki hukum kekekalan muatan. Gaya yang ditimbulkan dua muatan memiliki karakter yang sama seperti gravitasi yang ditimbulkan dua buah benda dengan massa tertentu. Gaya antar muatan juga bersifat konservatif dan terpusat.

Newton menemukan bahwa dua buah massa saling tarik-menarik dengan gaya yang berbanding lurus dengan perkalian dua massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak keduanya. Fenomena ini dikenal dengan hukum gravitasi Newton. Gaya inilah yang mengikat benda-benda di alam semesta sehingga tetap

bersatu membentuk alam yang stabil. Jika tidak ada gaya tarik tersebut maka benda-benda di alam semesta (galaksi, bintang, planet, satelit, dan lain-lain) akan bergerak tanpa terkontrol sehingga dapat menyebabkan saling menjauh atau saling bertumbukan. Hukum Kepler tentang gerak planet merupakan konsekuansi logis (implikasi) dari hukuk Gravitasi Newton. Fenomena gaya gravitasi Newton telah kita pelajari cukup panjang di buku pertama.

1.2. Hukum Coulomb

Newton menemukan bahwa dua buah massa saling tarik-menarik dengan gaya yang berbanding lurus dengan perkalian dua massa dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak keduanya. Fenomena ini dikenal dengan hukum gravitasi Newton. Gaya inilah yang mengikat benda-benda di alam semesta sehingga tetap bersatu membentuk alam yang stabil. Jika tidak ada gaya tarik tersebut maka benda-benda di alam semesta (galaksi, bintang, planet, satelit, dan lain-lain) akan bergerak tanpa terkontrol sehingga dapat menyebabkan saling menjauh atau saling bertumbukan. Hukum Kepler tentang gerak planet merupakan konsekuansi logis (implikasi) dari hukuk Gravitasi Newton. Fenomena gaya gravitasi Newton telah kita pelajari cukup panjang di buku pertama.

Pertanyaan yang sama dapat dikenakan pada materi. Semua materi disusun oleh molekul, atom, atau partikel atomik. Sebagian partikel tersebut bermuatan listrik. Pertanyaannya adalah **gaya apakah yang mengikat partikel-partikel tersebut sehingga menyatu dan membentuk materi yang sangat stabil dan kuat? Apakah antar partikel bermuatan listrik bekerja semacam gaya?** Coulomb adalah orang pertama yang menjawab pertanyaan ini. Menurut Coulomb, muatan listrik saling menghasilkan gaya yang menyerupai gaya yang dilakukan oleh massa. Dua buah muatan listrik saling mengerjakan gaya yang besarnya berbanding lurus dengan perkalian dua muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak keduanya. Dengan demikian, bentuk persamaan gaya untuk muatan listrik persis sama dengan persamaan gaya untuk massa.

Namun, yang berbeda adalah pada gaya gravitasi hanya ada satu jenis massa, yaitu massa positif. Sedangkan muatan listrik terdapat dua jenis, yaitu muatanh positif dan muatan negatif. Akibatnya, gaya gravitasi hanya memiliki satu jenis gaya, yaitu gaya tarik. Pada muatan listrik, terdapat dua jenis gaya, yaitu gaya tarik dan gaya tolak, bergantung pada jenis muatan yang saling melakukan gaya.

Hingga saat ini masih ada ahli fisika yang penasaran mengapa gaya gravitasi hanya ada gaya tarik ?

Mengapa tidak ada gaya tolak gravitasi ? Kalau kita pelajari tentang kelistrikan dan kemagnetan, maka kita menemukan gaya tarik dan gaya total.

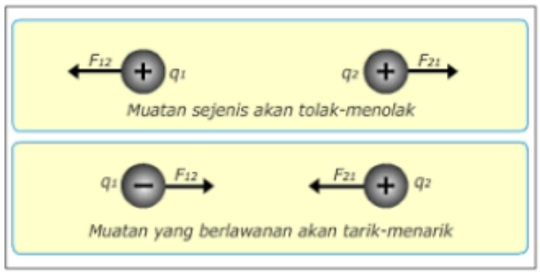
Dua kutub magnet sejenis tolak-menolak sedangkan yang berbeda jenis tarik-menarik.

Dua muatan listrik sejenis tolak-menolak sedangkan yang berbeda jenis tarik-menarik. Mengapa tidak ditemui gaya tolak gravitasi ?

Hukum coulomb adalah aturan yang menjelaskan tentang hubungan antara gaya listrik dan besar masing-masing muatan listrik. Ketika batang kaca digosokkan dengan kain sutra terjadi perpindahan elektron dari batang kaca ke kain sutra. Hal itu terjadi gaya tarik menarik inti atom kaca. Tentu saja batang kaca akan makin banyak kekurangan elektron jika penggosokan dilakukan lebih lama. Artinya, muatan listrik batang kaca menjadi lebih besar. Itulah sebabnya, gaya tarik batang kaca menjadi lebih besar dari sebelumnya.

Hukum Coulomb ditemukan oleh ahli fisika asal Prancis yang bernama **Charles Augustin de Coulomb**. Coulomb melakukan penelitian mengenai gaya yang ditimbulkan oleh dua benda yang diberi muatan listrik dan dipisahkan oleh jarak tertentu. Hukum Coulomb pada dasarnya menyatakan bahwa **interaksi muatan listrik yang sejenis akan tolak-menolak, sedangkan muatan yang berlainan jenis akan tarik-menarik**. Dari hasil percobaan

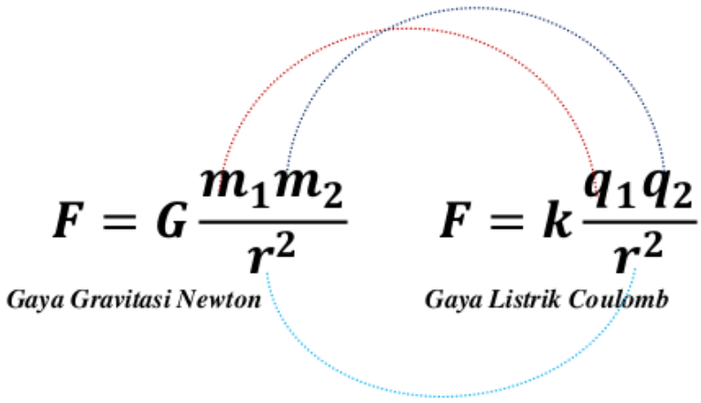
Coulomb pada tahun 1785 dengan menggunakan alat ukur yang sangat peka yang disebut dengan neraca puntir, dapat dinyatakan bunyi Hukum Coulomb sebagai berikut: "***Besarnya gaya tarik menarik atau tolak menolak antara dua buah benda yang bermuatan sebanding dengan besarnya masing-masing muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua benda tersebut***".



Gambar 1.1. Sifat Muatan Listrik

Pada **Gambar 1.1** (bagian atas), Muatan $\mathbf{q_1}$ dan $\mathbf{q_2}$ sama-sama positif, sehingga muatan $\mathbf{q_1}$ mendapat gaya tolak sebesar $\mathbf{F_{12}}$ ke kiri akibat interaksi dengan muatan $\mathbf{q_2}$, sementara muatan $\mathbf{q_2}$ mendapat gaya tolak sebesar $\mathbf{F_{21}}$ ke kanan akibat interaksi dengan muatan $\mathbf{q_1}$. Sedangkan pada **Gambar 1.1** (bagian bawah), muatan $\mathbf{q_1}$ negatif dan muatan $\mathbf{q_2}$ positif, sehingga terjadi gaya tarik menarik.

Ada satu pelajaran berharga dari uraian di atas. Fisika berkembang karena telah ada penemuan baru dan adanya pertanyaan pada fenomena serupa. Rumus untuk gaya antar massa telah ditemukan oleh Newton. Ketika diamati fenomena gaya pada muatan listrik maka timbul pertanyaan, seperti apa bentuk gaya pada muatan listrik. Coulumb akhirnya berhipotesis bahwa bentuk persamaan gaya antar muatan listrik serupa dengan persamaan gaya gravitasi Newton hanya dengan menukar besaran massa dengan besaran muatan listrik serta konstanta kesebandingan seperti diilustrasikan pada gambar di bawah. Ini baru hipotesis dan mesti dibuktikan dengan eksperimen untuk menerima hipotesis tersebut. Kemudian eksperimen dilakukan. Dan ternyata hasil eksperimen mendukung hipotesis yang diusulkan. Dengan demikian hipotesis tersebut diterima sebagai kebenaran ilmiah.



$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gaya Gravitasi Newton

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Gaya Listrik Coulomb

Secara matematis, Hukum Coulomb tentang besarnya gaya tarik menarik dan gaya tolak menolak antara dua buah benda bermuatan listrik dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

dimana, F = gaya Coulomb (*Newton*)
k = tetapan ruang hampa
q_1 = besarnya muatan listrik Q_1 (*Coulomb*)
q_2 = besarnya muatan listrik Q_2 (*Coulomb*)
r = jarak antara kedua muatan (*Meter*)

Besarnya tetapan ruang hampa (**k**) dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \quad atau \quad k = 9\,x\,10^9\ Nm^2C^{-2}$$

dimana k = tetapan ruang hampa
$\pi = 3{,}14 = \frac{22}{7}$
ε_0 = permivitas ruang hampa

Gaya Coulomb adalah gaya yang paling dominan di alam semesta yang secara langsung menentukan bentuk dan wujud benda. Gaya antar elektron dan proton membentuk atom merupakan gaya Coulomb. Gaya antar atom membentuk molekul adalah gaya Coulomb. Gaya antar molekul membentuk material besar, atau gaya antar atom-atom membentuk kristal-kristal besar juga gaya Coulomb. Bentuk tubuh kita, bentuk tumbuh-tumbuhan dan hewan seperti yang tampak saat ini juga dipengaruhi oleh gaya Coulomb antar atom atau molekul penyusunnya. Gaya Coulomb

menyebabkan elektron-elektron mengalir dalam konduktor sehingga muncul arus atau listrik. Kemampuan kita mengontrol arus atau tegangan listrik memungkinkan kita menciptakan teknologi.

Sekarang, timbul pertanyaan, yaitu satu coulomb itu sendiri memiliki berapa banyak muatan? Muatan 1 coulomb sebenarnya muatan yang sangat besar. Jika diilustrasikan, **muatan 1 elektron** hanyalah **1,602 x 10^{-19} Coulomb**, maka **1 Coulomb** adalah $\frac{1}{1{,}602 \times 10^{-19}}$ **buah elektron** atau **6,24 x 10^{18} buah elektron**. Marilah kita lihat perhitungan atom sebagai berikut : 1 gram emas mengandung 0,0051 mol atom yang setara dengan 0,0051 x N = 0,0051 x 6,02 x 10^{23} atom = 3,67 x 10^{21} atom, dengan N adalah bilangan Avogadro. Satu atom emas mengandung 79 elektron dan 79 proton, jadi satu gram emas mengandung 79 x (3,67 x 10^{21}) x (1,602 x 10^{-19}) = 4,6 x 10^{4} Coulomb muatan negatif dan 4,6 x 10^{4} Coulomb muatan positif. Dengan perhitungan yang sama, 1 gram air mengandung 5,4 x 10^{4} Coulomb muatan negatif dan 5,4 x 10^{4} Coulomb muatan positif.

Setelah memahami konsep hukum coulomb, kemudian bagaimanakah deskripsi tentang petir? Petir adalah aliran muatan listrik yang sangat besar. Petir yang banyak kita jumpai adalah petir jenis CG (*cloud to ground*), yaitu petir yang mengalir dari awan ke tanah. Besar arus listrik yang dihasilkan satu kilatan petir ini berkisar antara *30.000 ampere* hingga *120.000 ampere*. Namun, dalam *satu kali kemunculan petir* rata-rata terdapat *3 – 4 kilatan*. Lama aliran *arus pada tiap kilatan* sekitar *200 μs* (*mikrodetik*). Dengan demikian, *besar muatan* yang dialirkan *tiap kali kemunculan* berkisar antara *25 - 100 Coulomb*. Bayangkan, petir yang begitu besar dan sering menakutkan hanya *memindahkan muatan kurang dari 100 Coulomb*.



Gambar 1.2 Petir CG (cloud to ground)

Contoh Soal

Dua buah muatan listrik yang nilainya sama, diletakkan pada jarak *r* meter sehingga terjadi gaya coulomb sebesar F_1 Newton. Ketika jarak keduanya diubah menjadi dua kali semula, gaya coulomb yang dialami menjadi F_2. Tentukanlah perbandingan F_1 dan F_2 !

Penyelesian

Diketahui, $\mathbf{r_2 = r_1 = r}$

Rumus gayaa coulomb : $\boldsymbol{F = \frac{Q_1 Q_2}{r^2}}$

Maka gaya **F** berbanding lurus dengan $\frac{1}{r^2}$ atau $\boldsymbol{F \sim \frac{1}{r^2}}$,

Sehingga : $$\frac{\boldsymbol{F_1}}{\boldsymbol{F_2}} = \frac{\frac{1}{{r_1}^2}}{\frac{1}{{r_2}^2}} = \frac{{r_2}^2}{{r_1}^2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

Karena $\mathbf{r_2 = 2\, r_1}$, maka

$$\frac{\boldsymbol{F_1}}{\boldsymbol{F_2}} = \left(\frac{\boldsymbol{2\, r_1}}{\boldsymbol{r_1}}\right)^2 = \mathbf{4}$$

Jadi, perbandingan antara F_1 dan F_2 adalah 4 : 1.

2. Medan Listrik

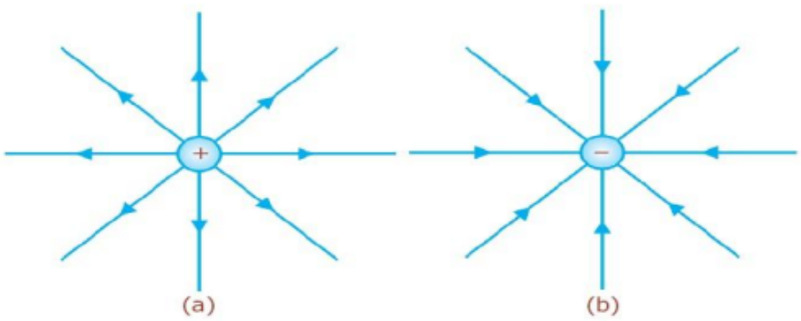
2.1. Teori Dan Sifat Medan Listrik

Medan listrik adalah tempat atau ruang di sekitar benda yang bermuatan listrik, yang mana benda yang bermuatan listrik lainnya yang diletakkan dalam ruang ini mengalami gaya listrik. Medan listrik dapat ditimbulkan oleh muatan positif maupun oleh muatan negatif, yang mana kuat medan listrik tersebut dapat ditentukan. Medan Listrik sering juga disebut dengan Kuat Medan Listrik atau Intensitas Medan Listrik.

Kuat medan listrik adalah besaran yang digunakan untuk menyatakan vektor medan listrik di suatu titik di sekitar muatan listrik. Kuat medan listrik di sekitar muatan listrik dapat digambarkan dengan garis-garis *khayal* yang dinamakan *garis-garis gaya*. Dua hal yang perlu diperhatikan tentang garis-garis gaya adalah :

- Garis-garis gaya tidak pernah saling berpotongan.
- Garis-garis gaya selalu keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif.

Untuk memvisualkan arah medan listrik, kita gambarkan serangkaian garis untuk menunjukkan arah medan listrik pada berbagai titik di ruang.



Gambar 1.3. Garis-garis medan listrik

Garis – garis gaya yang disebabkan oleh satu muatan positif ditunjukkan pada **Gambar 1.3.(a)**, dan untuk satu muatan negatif pada **Gambar 1.2.(b)**. Arah medan listrik dari suatu benda bermuatan listrik dapat digambarkan menggunakan garis-garis gaya listrik. Sebuah muatan positif memiliki garis gaya listrik dengan arah keluar dari muatan tersebut. Adapun sebuah muatan

negatif memiliki garis gaya listrik dengan arah masuk ke dalam muatan.

Adapun Medan Gaya Listrik, ada beberapa teori dasar untuk menjelaskannya, diantaranya sebagai berikut :

1) Medan adalah suatu besaran yang mempunyai harga pada tiap titik dalam ruang. Atau secara matematis, medan merupakan sesuatu yang merupakan fungsi kontinu dari posisi dalam ruang.
2) Medan Listrik merupakan daerah atau ruang di sekitar benda yang bermuatan listrik. Jika sebuah benda bermuatan lainnya diletakkan pada daerah itu, maka mengalami gaya elektrostatis (disebut juga gaya coulomb). Medan listrik adalah efek yang ditimbulkan oleh keberadaan muatan listrik, seperti elektron, ion, atau proton, dalam ruangan yang ada disekitarnya. Medan listrik mempunyai satuan N/C atau dibaca Newton per Coulomb.
3) Gaya listrik adalah gaya yang dialami oleh obyek bermuatan yang berada dalam medan listrik. Jadi suatu titik dikatakan berada dalam medan listrik apabila suatu benda yang bermuatan listrik ditempatkan pada titik tersebut akan mengalami gaya listrik.

Kuat medan listrik dinotasikan dengan huruf *E*. Besarnya kuat medan listrik dinaytakan dengan rumus berikut :

$$\boldsymbol{E = \frac{F}{q}}$$

dimana, E = kuat medan listrik (N/C)
F = gaya Coulomb (N)
q = muatan tetap (C)

Dari persamaan di atas, dapat diambil suatu ketentuan bahwa untuk muatan positif, *vektor gaya coulomb (F) searah dengan vektor kuat medan lsitrik (E)*, dan untuk muatan negatif, vektor gaya coulomb (F) berlawanan arah dengan vektor kuat medan listrik (**E**). Sedangkan kuat medan listrik pada suatu titik di jarak tertentu dari suatu muatan dapat diketahui melalui persamaan berikut :

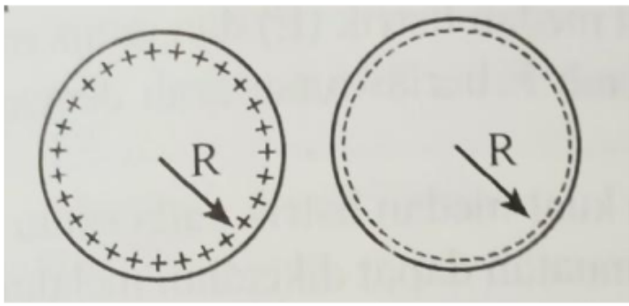
$$E = k\frac{q}{r^2} \quad atau \quad E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\ \frac{Q}{r^2}$$

dimana, E = kuat medan listrik (N/C)
k = tetapan ruang hampa
q = muatan tetap (C)
r = jarak muatan tetap dengan titik (m)
$\pi = 3{,}14 = \frac{22}{7}$
ε_0 = permivitas ruang hampa

Jika kuat medan listrik ditimbulkan oleh beberapa muatan listrik, maka besarnya kuat medan listrik dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$E = \sqrt{E_1{}^2 + E_2{}^2 + 2\,E_1\,E_2\,\cos\theta}$$

Pada bola konduktor yang diberi muatan listrik, maka muatan listrik akan tersebar merata pada permukaan bola. Besarnya kuat medan listrik di tempat tertentu akan memenuhi persamaan berikut :



Gambar 1.4 Bola Konduktor

Penjelasan

1) Jika kuat medan listrik berada di dalam bola konduktor, maka berlaku persamaan berikut :

$$E = 0$$

2) Jika kuat medan listrik berada di permukaan bola konduktor, maka berlaku persamaan berikut :

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

3) Jika kuat medan listrik berada di luar bola konduktor, maka berlaku persamaan berikut :

$$\boldsymbol{E = k\frac{Q}{R^2}}$$

Untuk medan listrik yang terjadi karena adanya dua keping bermuatan yang berlawanan jenis, maka besarnya kuat medan listrik dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\boldsymbol{E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o}}$$

dimana, E = kuat medan listrik (N/C)
σ = rapat muatan pada keping (C/m^2)
ε_0 = permivitas ruang hampa

Rapat muatan masing-masing keping dapat ditentukan melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{Q}{A}}$$

dimana, σ = rapat muatan pada keping (C/m^2)
Q = muatan pada masing-masing keping (C)
A = luas masing-masing keping (m^2)

2.2. Hukum Gauss

Hukum Gauss dapat digunakan untuk menentukan kuat medan lsitrik pada keping sejajar dan konduktor bola berongga. Hukum ini berdasar pada *konsep garis-garis gaya fluks listrik*, yaitu junlah garis gaya yang menembus tegak lurus suatu bidang.

Fluks lsitrik merupakan hasil kali antara kuat medan listrik dengan luas bidang yang tegak lurus dengan medan listrik tersebut. Secara matematis, dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut :

$$\boldsymbol{\Phi = E\,A}$$

dimana, Φ = fluks listrik (*weber*)
E = medan listrik (N/C)
A = luas bidang (m)

Untuk suatu permukaan yang dilukiskan secara sembarang, pada umumnya garis gaya tidak menembus permukaan secara tegak lurus dan kuat medan pada titik-titik permukaan tersebut tidak sama. Untuk medan listrik yang tidak menembus tegak lurus bidang, maka persamaan fluks listriknya adalah sebagai berikut :

$$\boldsymbol{\Phi = E\,A\,\cos\theta}$$

dimana, Φ = fluks listrik (*weber*)
E = medan listrik (*N/C*)
A = luas bidang (m^2)
θ = sudut medan listrik dengan garis normal

Sedangkan jumlah garis gaya yang menembus bidang permukaan, dapat digunakan persamaan berikut :

$$\boldsymbol{\Delta N = \varepsilon_o\,(E\,\cos\theta)\,\Delta A}$$

dimana, ΔN = jumlah garis gaya
ε_0 = permivitas ruang hampa
E = kuat medan listrik (*N/C*)
θ = sudut medan listrik dengan permukaan
A = luas permukaan (m^2)

Konsep fluks lsitrik Gauss menghasilkan sebuah hukum, berbunyi : "*Jumlah garis gaya yang menembus suatu permukaan tertutup sebanding dengan jumlah listrik yang dilengkapi oleh permukaan tertutup tersebut*".
Sehungga Hukum gauss dapat dituliskan dengan persaam berikut :

$$\boldsymbol{\Phi = E\,A\,\cos\theta = \frac{Q}{\varepsilon_o}}$$

dimana, Φ = fluks listrik (*weber*)
E = kuat medan listrik (*N/C*)
A = luas permukaan (m^2)
θ = sudut medan listrik dengan permukaan
Q = muatan listrik (C)
ε_0 = permivitas udara

Contoh Soal

1) Suatu muatan listrik yang dianggap sebagai muatan titik memiliki besar +30 μC. Tentukan besar kuat medan listrik pada jarak 100 cm dari muatan tersebut!

   Penyelesaian

   $$E = k\frac{Q}{r^2}$$
   $$E = 9\,10^9\ \frac{30\ 10^{-6}}{1^2}$$
   $$E = \ 27\ 10^4\ N/C$$

2) Sebuah muatan uji dengan besar muatan 15 x 10^{-5} C diletakkan dalam sebuah medan listrik. Apabila gaya yang bekerja pada muatan uji sebesar 0,6 N. Berapa besar medan listrik muatan uji?

   Penyelesaian

   $$E = \frac{F}{Q}$$
   $$E = \frac{0{,}6}{15\,x\,10^{-5}}$$
   $$E = 4000\ N/C$$

3) Titik A yang berjarak 10 cm dari suatu muatan listrik Q mempunyai kuat medan listrik sebesar 180 N/C. Tentukan kuat medan listrik di titik B yang berjarak 15 cm dari muatan Q!

   Penyelesaian

   Diubah terlebih dahulu satuan jarak 10 cm = 0,1 m dan 15 cm = 0,15 cm. Selanjutnya tentukan besar muatan Q dengan cara :

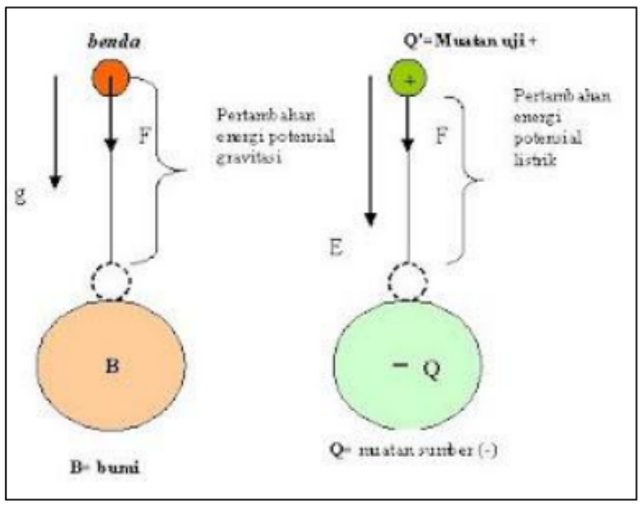
   $$E = k\frac{Q}{r^2}$$
   $$180 = 9.10^9\ \frac{Q}{(0{,}1)^2}\quad atau\quad Q = 2\ 10^{-10}\ C$$

   Jadi, kuat medan listrik di B sebesar:

   $$E = k\frac{Q}{r^2}\ =\ 9.10^9\ \frac{2\ 10^{-10}}{(0{,}15)^2}\ =\ \ 80\ N/C$$

3. Potensial Listrik

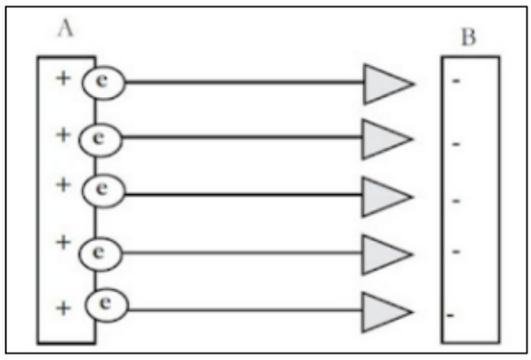
Dalam mekanika, konsep energi potensial sangat berguna. Pada saat kita mengangkat suatu benda bermassa m setinggi h, kerha yang kita lakukan menjadi energi potensial $m\,g\,h$ dari suatu sistem massa bumi. Jika kita menjatuhkan benda tersebut, energi potensial tersebut diubah menjadi energi kinetik. Konsep potensial listrik sama dengan konsep energi potensial pada mekanika.



Gambar 1.5 Konsep Energi Potensial dan Potensial Listrik

Potensial listrik adalah banyaknya muatan yang terdapat dalam suatu benda. Beda potensial listrik (tegangan) timbul karena dua benda yang memiliki potensial listrik yang berbeda dihubungkan oleh suatu penghantar. Beda potensial ini berfungsi untuk mengalirkan muatan dari satu titik ke titik lainnya. Atau bisa didefinisikan bahwa potensial listrik yaitu usaha yang dibutuhkan untuk memindahkan muatan postitif sebesar 1 satuan dari tempat yang tak terhingga ke sebuah titik tertentu. Bisa pula potensial listrik diartikan sebagai sebuah *energi potensial listrik per satuan muatan* penguji.

Agar lebih memahami konsep potensial listrik, perhatikan gambar berikut,



Gambar 1.6 Elektron yang Bergerak dari A ke B

Secara alami, elektron bergerak mendekati muatan positif dan menjauhi muatan negatif, sehingga sebuah elektron tidak akan mungkin dapat bergerak sendiri dari plat **A** menuju ke plat **B**. Maka dari itu, agar elektron dapat bergerak dari plat **A** menuju ke plat **B**, dibutuhkan suata usaha.

Usaha yang dibutuhkan untuk memindahkan sebuah muatan dari titik **B** ke tiitk **A** per satuan muatan disebut dengan potensial listrik. Sehingga rumus potensial listrik dapat dilukiskan dalam persamaan berikut :

$$\boldsymbol{V = \frac{W}{Q}}$$

dimana, V = potensial listrik (Volt)
W = usaha (Joule)
Q = muatan (Coulomb)

atau secara mudah dapat dituliskan :

$$\boldsymbol{1\,Volt = \frac{1\,Joule}{1\,Coulomb}}$$

Setiap titik di dalam suatu muatan listrik selalu memiliki kuat medan listrik yang merupakan besaran vektor dan potensial listrik yang merupakan besaran skalar. Potensial listrik adalah energi potensial listrik per satuan muatan positif. Besarnya potensial listrik suatu titik dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{V = k\frac{q}{r}} \quad atau \quad \boldsymbol{V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r}}$$

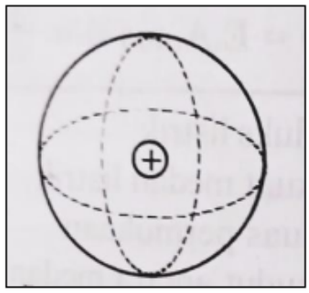
dimana, V = potensial listrik (Volt)

q = muatan listrik (Coulomb)
r = jarak muatan dengan titik
k = tetapan ruang hampa
$\pi = 3{,}14 = \frac{22}{7}$
ε_0 = permivitas udara atau ruang hampa

Jika potensial ditimbulkan oleh lebih dari satu muatan, maka besarnya potensial listrik merupakan aljabar potensialnya terhadap tiap-tiap muatan.

$$\boldsymbol{V = k\,\Sigma\frac{q}{r}} \quad atau \quad \boldsymbol{V = k\,(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} + \cdots)}$$

Bidang *eqipotensial* adalah bidang yang mempunyai potensial listrik yang sama.



Gambar 1.7 Bidang Eqipotensial

Sebuah muatan titik akan memiliki bidang *eqipotensial* berupa sebuah kulit bola. Usaha untuk memindahkan suatu muatan listrik dari suatu tiitk ke titik lainnya hanya tergantung pada energi potensial akhir dan energi potensial awal dari tempat-tempat tersebut.

Besarnya suatu usaha untuk memindahkan muatan listrik dari suatu titik ke titik lainnya dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\boldsymbol{W_{12} = q\,(V_2 - V_1)}$$

dimana, W_{12} = usaha pemindahan (Joule)
V_1 = potensial listrik pada kedudukan I (Volt)
V_2 = potensial lustrik pada kedudukan II (Volt)
q = besar muatan listrik (Coulomb)

Jadi usaha untuk memindahkan suatu muatan listrik adalah :

- tergantung dari besarnya muatan yang dipindahkan,
- tergantung pada beda potensial antara kedua tempat pemindahan muatan tersebut,
- tidak tergantung ada lintasan yang dilalui karena medan listrik merupakan medan konservatif.

Pada bola konduktor yang diberi muatan listrik, besarnya potensial listrik pada tempat-tempat tertentu di bola konduktor akan memenuhi persamaan sebagai berikut :

1) Potensial di luar bola konduktor ***(r > R)***

$$\boldsymbol{V = k\frac{Q}{r}}$$

2) Potensial di permukaan bola konduktor ***(r = R)***

$$\boldsymbol{V = k\frac{Q}{R}}$$

3) Potensial di dalam bola konduktor ***(r < R)***

$$\boldsymbol{V = k\frac{Q}{r}}$$

dimana, V = potensial listrik (Volt)
k = tetapan ruang hampa
Q = muatan listrik (Coulomb)
r = jari-jari dalam bola konduktor (meter)
R = jari-jari di luar bola konduktor

Potensial listrik di dalam bola sampai ke permukaan bola dimana-mana besarnya sama. Kemudian semakin jauh dari permukaan maka potensial listrik semakin menurun, seperti potensial listrik yang ditimbulkan oleh muatan titik.

Contoh Soal

1) Terdapat dua buah keping logam yang masing-masing mempunyai potensial listrik sebesar V_1 = 8 volt dan V_2 = 4 volt. Tentukan usaha yang diperlukan oleh sebuah elektron yang memiliki muatan sebesar – 1,6 10^{-19} C untuk berpindah dari V_1 ke V_2.

Penyelesaian

$W = q\ (V_2 - V_1)$

$W = \ -1{,}6\ 10^{-19}(4 - 8)$

$W = 6{,}4\ 10^{-19}$ Joule

2) Sebuah bola konduktor memiliki jari-jari 20 cm diberikan muatan listrik sebesar 10 μC. Tentukanlah potensial listrik pada sebuah titik yang memiliki jarak 4 cm di luar permukaan bola.

Penyelesaian

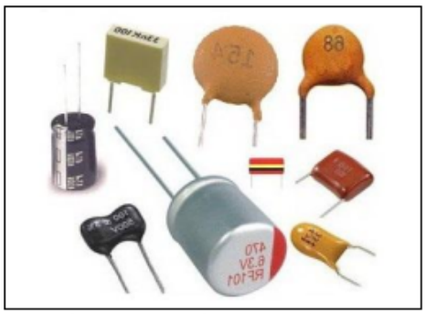
$V = k\frac{Q}{R}$

$V = 9\ 10^{9}\ \frac{10\ 10^{-6}}{0{,}24}$ (R = 20 cm + 4 cm)

$V = 3{,}75\ 10^{5}$ volt.

4. Kapasitas Listrik

Sebuah kapasitor (konduktor) adalah alat yang digunakan untuk menyimpan listrik yang bersifat sementara. Kapasitor adalah komponen listrik yang digunakan untuk menyimpan muatan listrik. Tetapi secara prinsip, kapasitor merupakan dua keping sejajar yang diberi muatan listrik yang sama tetapi jenisnya berlawanan. Bentuk kapasitor dapat berupa keping sejajar, bola sepusat, silindrik atau tabung.



Gambar 1.8 Kapasitor

Kemampuan kapasitor menyimpan muatan dinyatakan oleh besaran kapasitas yang pada umumnya diukur dalam satuan mikrofarad (**μF**) atau pikofarad (**pF**), dimana : **$1\ \mu F = 10^{6}$ pF = 10^{-6} F**.

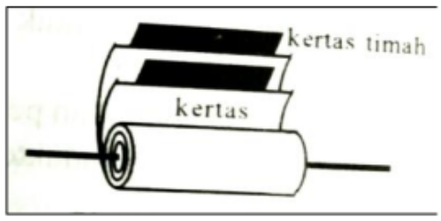
Beberapa kegunaan kapasitor dalam berbagai rangkaian listrik adalah sebagai berikut :

- untuk memilih frekuensi pada radio penerima,
- sebagai filter dalam catu daya (*power supply*),
- untuk menghindari terjadinya loncatan listrik pada rangkaian-rangkaian yang mengandung kumparan jika secara tiba-tiba arus listrik diputuskan,
- sebagai penyimpan energi listrik atau muatan listrik pada rangkaian penyala elektrik.

Kapasitor terdiri dari berbagai bentuk, ukuran, dan jenis sesuai dengan penggunaannya, yaitu :

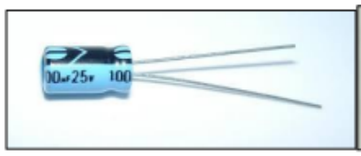
➢ **Kapasitor Kertas**

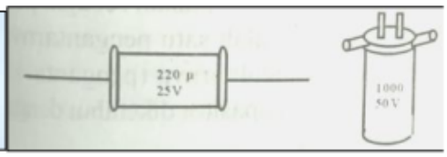




Kapasitor kertas terdiri atas dua lembar kertas timah panjang yang berfungsi sebagai pelat-pelat konduktor. Kertas timah tersebut digulung pada sebuah silinder yang diberi penyekat kertas yang berfungsi sebagai bahan penyekat di antara kedua pelat.

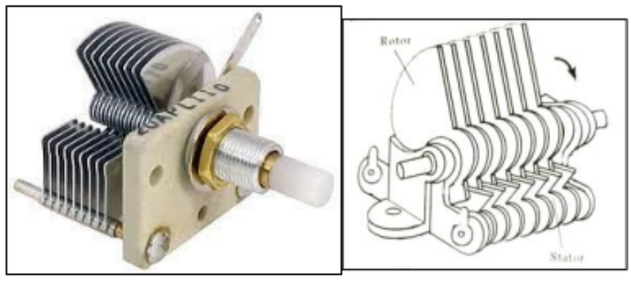
➢ **Kapasitor Elektrolit**





Kapasitor elektrolit terdiri atas dua kertas alumunium yang berfungsi sebagai pelat konduktor dan alumunium oksida yang diproses secara kimia sebagai bahan penyekat. Kapasitor jenis elektrolit memiliki kapasitas paling tinggi yaitu sampai 100.000 pF.

➢ **Kapasitor Variabel**



Gambar 1.11 Kapasitor Variabel

Kapasitor variabel digunakan untuk memilih frekuensi gelombang pada radio penerima. Kapasitor ini memiliki dua kumpulan pelat-pelat logam paralel yang berfungsi sebagai pelat konduktor yang dipisahkan oleh udara sebagai bahan penyekat. Nilai maksimum kapasitasnya sampai dnegan 500 pF.

4.1. Kapasitas Kapasitor

Tiap-tiap kapasitas mempunyai kapasitas kapasitor (C). Kapasitas kapasitor (C) adalah besarnya muatan listrik yang dapat disimpan per satuan beda potensial antara bidang-bidangnya atau dapat dinyatakan sebagai perbandingan tetap antara muatan dari salah satu pengantarnya terhadap beda potensial kedua konduktornya (pengantar).

Besarnya kapasitas kapasitor diketahui dengan menggunakan persamaan berikut :

$$C = \frac{q}{V}$$

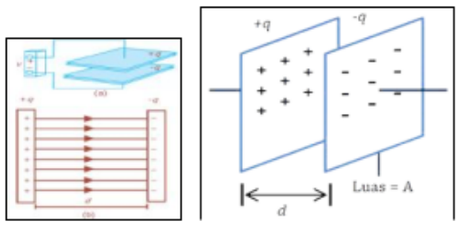
dimana, C = kapasitas (coulomb/volt) atau (farad)
q = muatan lsitrik (coulomb)
V = beda potensial (volt)

Dari persamaan di atas, diperoleh suatu harga yang konstan, yang filosofinya adalah :

- jika **q** besar, maka **V** besar, sedangkan **C** tetap.
- jika **q** kecil, maka **V** kecil, sedangkan C tetap.

Jadi, *besarnya kapasitas kapasitor tidak tergantung pada muatan yang dapat disimpannya dan juga tidak tergantung pada beda potensial antara kedua keping pengantarnya*.

4.2. Kapasitas Kapasitor Keping Sejajar



Gambar 1.12 Kapasitor Keping Sejajar

Besarnya kapasitas kapasitor suatu keping sejajar jika tidak ada bahan penyekat atau bahan penyekatnya udara atau vakum akan memnuhi persamaan berikut :

$$C = \varepsilon_o \frac{A}{d}$$

dimana, C = kapasitas kapasitor (farad)
ε_0 = permivitas udara atau ruang hampa
A = luas masing-masing keping (m2)
d = jarak antara keping (m)

Sedangkan jika disisipkan bahan penyekat yang memiliki *koefisien dielektrikum*, maka besarnya kapasitas kapasitor akan memenuhi persamaan berikut :

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad dimana \ \varepsilon = K \varepsilon_o$$

dimana, C = kapasitas kapasitor (farad)
ε = permitivitas bahan
A = luas masing-masing keping (m^2)
d = jarak antara keping (m)
K = konstanta dielektrikum
ε_0 = permivitas udara atau ruang hampa

Dari persamaan di atas, memiliki filosofi bahwa kapasitas suatu kapasitor keping sejajar, adalah

- sebanding dengan luas keping,
- sebanding dengan permitivitas bahan penyekat,

- berbanding terbalik dengan jarak pisah antara kedua keping.

4.3. Kapasitas Kapasitor Bentuk Bola

Besarnya kapasitas kapasitor bentuk bola dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut :

$$C = 4\,\pi\,\varepsilon_0\,R \quad atau \quad C = \frac{R}{k}$$

dimana, C = kapasitas kapasitor (farad)

π = 3,14 = $\frac{22}{7}$

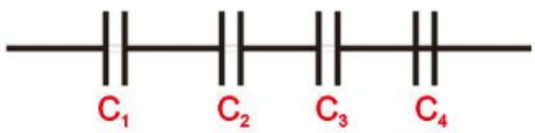
ε_0 = permivitas udara atau ruang hampa

R = jari-jari kapasitor (m)

k = tetapan ruang hampa atau udara

4.4. Gabungan Kapasitor

Beberapa kapasitor dapat digabungkan menjadi suatu rangkaian, baik itu secara seri atau paralel.



Gambar 1.13 Kapasitor Disusun Seri

Dua buah kapasitor atau lebih jika disusun secara seri maka muatan pada masing-masing kapasitor adalah sama, karena muatan total dari seluruh kapasitor sama dengan muatan maisng-masing kapasitor.

Kapasitas gabungan dari dua buah kapasitor besarnya dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$C_g = \frac{C_1\,C_2}{C_1 + C_2}$$

Sedangkan jika ada beberapa buah kapasitor dipasang secara seri, maka besarnya kapasitas gabungan dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\frac{1}{C_g} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \cdots + \frac{1}{C_n}$$

dimana, C_g = kapasitas gabungan

C_1, C_2, ..., C_n = kapasitas masing-masing kapasitor

Jadi, *kapasitas gabungan dari beberapa buah kapasitor selalu lebih kecil daripada kapasitas tiap-tiap kapasitor. Hal ini berarti susunan seri dari suatu kapasitor berfungsi untuk menghasilkan kapasitas terkecil.*

Pada susunan seri kapasitor, berlaku :

- muatan pada tiap-tiap kapasitor adalah sama dengan muatan pada kapasitor gabungan.

$$\boldsymbol{Q_g = Q_1 = Q_2 = \cdots = Q_n}$$

- beda potensial pada ujung-ujung kapasitor gabungan (pengganti) sama dengan jumlah beda potensial ujung-ujung tiap kapasitor.

$$\boldsymbol{V_g = V_1 + V_2}$$

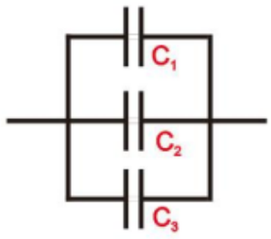
Contoh Soal

Dua buah kapasitor yang masing-masing mempunyai kapasitas sebesar $4\ \mu F$ dan $5\ \mu F$ yang dipasang seri. Tentukan kapasitas gabungan dari susunan seri tersebut.

Penyelesaian

$$C_g = \frac{C_1\, C_2}{C_1 + C_2} = \frac{4 \,.5}{4+5} = 2{,}22\ \mu F$$

4.5. Gabungan Kapasitor Secara Paralel



Gambar 1.14 Kapasitor yang Disusun Paralel

Jika terdapat beberapa buah kapasitor dipasang secara paralel, maka kapasitor tersebut memiliki beda potensial yang sama dan sama juga dengan beda potensial gabungan seluruh kapasitor.

Besarnya kapasitor gabungan dari kapasitor yang disusun secara paralel dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$C_g = C_1 + C_2 + C_3 + \cdots + C_n$$

dimana, C_g = kapasitas gabungan

C_1, C_2, ..., C_n = kapasitas masing-masing kapasitor

Kapasitas gabungan dari beberapa buah kapasitor yang disusun secara paralel, selalu lebih besar daripada kapasitas tiap-tiap kapasitor.

Jadi, untuk mendapatkan kapasitas kapasitor yang besar, maka kapasitor-kapasitor harus disusun secara paralel. Pada susunan paralel, memiliki filosofi sebagai berikut :

- beda potensial tiap-tiap kapasitor sama dan bernilai sama dnegan tegangan sumber,

$$V_g = V_1 = V_2 = V_s$$

- muatan kapasitor gabungan (pengganti) sama dengan jumlah muatan dari tiap-tiap kapasitor.

$$Q_g = Q_1 + Q_2$$

Jadi, dari kedua susunan di atas yaitu susunan seri dan paralel dapat diambil suatu kesimpulan, bahwa *kapasitas terbesar dari susunan kapasitor diperoleh dengan menyusun kapasitor secara paralel. Sedangkan kapasitas terkecil diperoleh jika kapasitor disusun secara seri*.

4.6. Kapasitor Gabungan

Dua buah kapasitor dapat digabungkan dengan tiga cara, yaitu :

- dengan cara menyentuh,
- dengan cara menghubungkan dengan kawat halus yang kapasitasnya dapat diabaikan,
- dengan cara menghubungkan kutub-kutub yang berpolaritas sama.

Jadi, pengertian gabungan kapasitor dan kapasitor gabungan adalah tidak sama atau berbeda. Prinsip yang berlaku pada kapasitor gabungan adalah sebagai berikut :

$$\Sigma\, q_{sebelum} = \Sigma\, q_{sesudah}$$
$$q_1 + q_2 = q_1' + q_2'$$

Pada saat kapasitor digabung akan terjadi aliran muatan dari kapasitor yang beda potensialnya lebih tinggi ke kapasitor yang memiliki beda potensial lebih rendah dan akan berhenti aliran tersebut jika kedua kapasitor mencapai beda potensial yang sama dengan potensial gabungannya. Besarnya potensial gabungan dari kapasitor gabungan dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$V_{gab} = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}$$

dimana, V_{gab} = potensial gabungan
C_1, C_2 = kapasitas tiap kapasitor
q_1, q_2 = muatan tiap kapasitor
V_1, V_2 = tegangan tiap kapasitor

Contoh Soal

Sebuah kapasitor yang memiliki kapasitas sebesar 8 μF diisi sehingga tegangannya mencapai 20 volt. Kemudian kapasitor dilepas dan dihubungkan dengan kapasitor lainnya yang mempunyai kapasitas 6 μF. Tentukan besar tegangan kapasitor (beda potensial) gabungan dari kapasitor gabungan tersebut!

Penyelesaian

$$V_g = \frac{C_1V_1 + C_2V_2}{C_1 + C_2} = \frac{(8)(20)+(6)(0)}{8+6} = \frac{160+0}{14} = 11{,}42\ volt$$

4.7. Energi dalam Kapasitor

Sebuah kapasitor yang bermuatan listrik memiliki energi potensial yang tersimpan di dalamnya. Jika sebuah kapasitor diberikan muatan listrik, maka akan terjadi perpindahan muatan dari satu keping ke keping lainnya yang tentunya diperlukan suatu usaha. Usaha tersebut kemudian disimpan oleh kapasitor sebagai energi.

Jika salah satu muatannya dipindahkan yang dimulai dari keadaan diam dari suatu keping ke keping lainnya, maka energi potensialnya semakin besar selama muatan itu berpindah. Besar potensial rata-rata pada masing-masing keping dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{V = \frac{1}{2}\frac{Q}{C}}$$

dimana, V = potensial rata-rata
Q = muatan kapasitor
C = kapasitas kapasitor

Sedangkan besarnya energi yang tersimpan dalam kapasitor dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{W = \frac{1}{2}\, Q\, V = \frac{1}{2}\, C\, V^2 = \frac{1}{2}\, \frac{Q^2}{C}}$$

dimana, W = energi kapasitor (Joule)
Q = muatan kapasitor (Coulomb)
V = tegangan (beda potensial) (volt)
C = kapasitas kapasitor (Farad)

Contoh Soal

Dua kapasitor yang masing-masing memiliki kapasitas sebesar 4 μF dan 6 μF disusun secara seri dengan beda potensial sebesar 220 V yang dipasang dalam rangkaian. Tentukan besarnya energi yang tersimpan dalam sistem tersebut!

Penyelesaian

$C_g = \frac{(4)(6)}{4+6} = \frac{12}{5}\,\mu F$

$W = \frac{1}{2}\, C_g\, V^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{12}{5}\right)(220)^2 = 58{,}08\, Joule$

BAB II
ARUS SEARAH (ELEKTRODINAMIKA)

Pada bab sebelumnya, kita membahas tentang gejala yang dihasilkan oleh muatan listrik yang diam. Topik tersebut dinamakan *elektrostatika*. Pada bab ini kita akan membahas tentang besaran-besaran yang terkait dengan muatan yang bergerak.

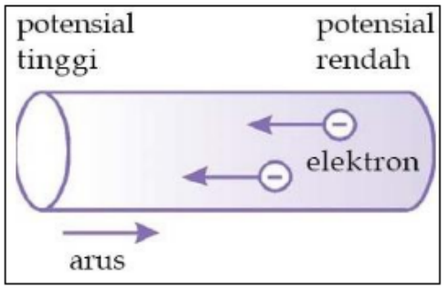
1. Arus Listrik

Arus listrik atau dalam bahasa Inggris disebut *Electric Current*, adalah muatan listrik yang mengalir melalui media konduktor dalam tiap satuan waktu. Muatan listrik pada dasarnya dibawa oleh Elektron dan Proton di dalam sebuah atom. Proton memiliki muatan positif, sedangkan Elektron memiliki muatan negatif. Namun, Proton sebagian besar hanya bergerak di dalam inti atom. Jadi, tugas untuk membawa muatan dari satu tempat ke tempat lainnya ini ditangani oleh Elektron. Hal ini dikarenakan elektron dalam bahan konduktor seperti logam sebagian besar bebas bergerak dari satu atom ke atom lainnya.

Atom dalam bahan konduktor memiliki banyak elektron bebas yang bergerak dari satu atom ke atom lainnya dengan arah yang acak (random atau tidak teratur) sehingga tidak mengalir ke satu arah tertentu. Namun ketika diberikan Tegangan pada konduktor tersebut, semua elektron bebas akan bergerak ke arah yang sama sehingga menciptakan aliran arus listrik.

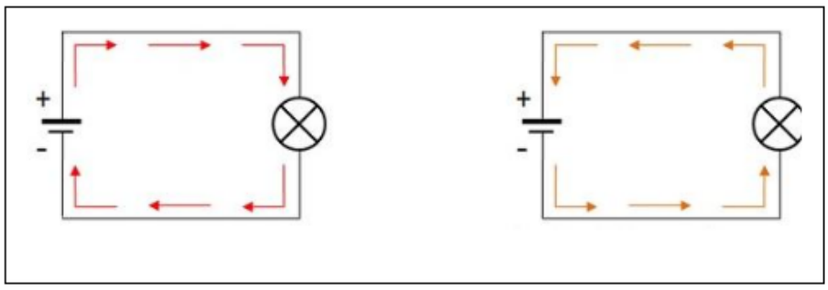
Muatan yang mengalir dalam suatu penghantar adalah elektron-elektron yang bergerak bebas. Aliran arus listrik pada suatu penghantar hampir sama dengan aliran kalor pada suatu benda. Di mana kalor mengalir dari benda yang bersuhu lebih tinggi ke suhu benda yang lebi rendah. Aliran kalor akan berhenti jika suhu kedua benda tersebut sama (kesetimbangan termal). Nah, dalam aliran arus listrik juga akan berlaku hal yang sama, jika kedua titik memiliki beda potensial yang sama maka aliran muatan listrik akan berhenti. Arus ini bergerak dari potensial

tinggi ke potensial rendah, dari kutub positif ke kutub negatif, dari anoda ke katoda. Jadi, Arus listrik mengalir dari potensial tinggi ke potensial rendah.



Gambar 2.1 Aliran Arus

Muatan listrik ada yang bertanda positif dan ada yang bertanda negatif. Arah arus listrik didefinisikan searah dengan arah aliran muatan positif. Pada logam-logam, sebenarnya yang mengalir adalah elektron-elektron yang memiliki muatan negatif. Muatan positif berupa atom-atom (yang ditinggalkan elektron) yang tidak dapat mengalir karena terikat kuat membangun logam tersebut. Mengingat definisi arus listrik searah dengan aliran muatan positif, maka arah arus listrik dalam logam berlawanan dengan arah aliran elektron. Jadi, ketika kita menggambar arah arus dalam kawat dari kanan ke kiri, sebenarnya yang terjadi adalah aliran elektron dari kiri ke kanan.



Gambar 2.2 (a) aliran arus listrik konvensional. (b) aliran elektron

Berdasarkan arah aliranya, arus listrik dibagi menjadi 2 (dua) kategori, yaitu :

1) Arus Searah (Direct Current/DC), dimana arus ini mengalir dari titik berpotensial tinggi menuju titik berpotensial rendah.

2) Arus Bolak-Balik (Alternating Current/AC), dimana arus ini mengalir secara berubah-ubah terhadap waktu.

Aliran listrik mengalir melalui rangkaian listrik. Pada dasarnya, rangkaian listrik adalah sarana untuk menghantarkan energi dari satu tempat ke tempat lain. Sewaktu partikel bermuatan bergerak di dalam sebuah rangkaian, makaenergi potensial listrik dipindahkan dari sebuah sumber (seperti aki atau generator) ke sebuah alat tempat energi tersebut disimpan atau dikonversi ke dalam bentuk energi lain. Dari sudut pandang teknologi, rangkaian listrik berguna karena memungkinkan energi untuk dipindahkan (diangkut) tanpa ada bagian-bagian yang bergerak (selain partikel bermuatan yang bergerak). Rangkaian listrik adalah jantung dari alat elektronika, sistem distribusi daya rumah tangga, dan industri.

Dalam kehidupan yang telah maju, kehadiran tenaga listrik dirasakan sangatlah penting dikarenakan listrik sangat berguna sebagai sumber tenaga. Hampir semua mesin yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari, baik di tiap-tiap rumah tangga maupun industri kebanyakan menggunakan tenaga listrik. Pemakaian energi ini dapat dilihat langsung di lingkungan sekolah, rumah sakit, rumah tangga, dan industri-industri.

Keamanan dan keselamatan dalam menggunakan listrik, kita harus mengetahui beberapa peraturan keselamatan kerja yang sangat sederhana agar kita dapat mencegah terjadinya kecelakaan.

- Jika kita menemukan adanya kebocoran pada kabel listrik, usahakan jangan disentuh kawat tersebut. Mintalah pertolongan kepada orang yang lebih memahami dalam menangani listrik.
- Jangan bekerja pada alat mesin listrik tanpa dilengkapi pengaman.
- Jangan menggunakan perlengkapan yang sudah rusak .Jika kabel listrik itu sudah rusak, maka sebaiknya diganti secepatnya untuk mencegah terjadinya kebakaran.

- Usahakan tangan kering (jangan sampai tangan kita basah) sewaktu menyentuh alat-alat perlengkapan listrik yang sedang dialiri listrik.

2. Kuat Arus Listrik

Kita sudah mengetahui tentang pengertian dari arus listrik, yakni aliran muatan listrik positif pada suatu penghantar dari potensial tinggi ke potensial rendah. Marilah kita tinjau hasil percobaan untuk mengetahui perbedaan arus listrik menggunakan 2 – 3 buah baterai.

Pada baterai terdapat dua kutub yang potensialnya berbeda. Bila kedua kutub tersebut dihubungkan dengan lampu melalui kabel, maka akan terjadi perpindahan elektron dari kutub negatif ke kutub positif atau terjadi arus listrik dari kutub positif ke kutub negatif, sehingga lampu dapat menyala. Selanjutnya, Bila baterai yang dipakai dua buah, maka lampu akan menyala lebih terang. Bila baterai yang dipakai tiga buah, maka lampu menyala makin terang. Mengapa demikian? Hal ini dikarenakan beda potensial kutub positif dan kutub negatifnya makin besar sehingga muatan muatan listrik yang mengalir pada penghantar makin banyak atau arus listriknya makin besar.

Besarnya arus listrik (disebut kuat arus listrik) sebanding dengan banyaknya muatan listrik yang mengalir. Kuat arus listrik adalah suatu kecepatan aliran muatan listrik. Dengan demikian, yang dimaksud dengan kuat arus listrik ialah jumlah muatan listrik yang melalui penampang suatu penghantar setiap satuan waktu. Jika jumlah muatan **q** melalui penampang penghantar dalam waktu **t**, maka kuat arus **I** secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$\boldsymbol{I = \frac{Q}{t}} \quad atau \quad \boldsymbol{Q = I\,t}$$

dimana, I = kuat arus listrik (Ampere)
Q = Jumlah muatan yang mengalir (Coulomb)
t = waktu yang diperlukan (detik)

Berdasarkan persamaan tersebut, bisa disimpulkan bahwa *satu coulomb adalah muatan listrik yang mengalir melalui sebuah titik dalam suatu penghantar dengan arus listrik yang tetap sebesar satu ampere dan mengalir selama satu detik*.

Muatan listrik dapat mengalir dari satu tempat ke tempat lain karena adanya beda potensial. Tempat yang memiliki potensial tinggi melepaskan muatan ke tempat yang memiliki potensial rendah. Besarnya arus yang mengalir berbanding lurus dengan beda potensial *V* atau ditulis $\boldsymbol{I \propto V}$. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\boldsymbol{I = \frac{1}{R} V}$$

dimana, I = kuat arus (Ampere)
V = beda potensial (Volt)
R = hambatan (Ohm)

Contoh Soal
Muatan sebesar 180 coulomb mengalir dalam 30 detik. Hitunglah kuat arus listriknya!

Penyelesaian :

Diketahui, Q = 180 C ; t = 30 detik.

$I = \frac{Q}{t} = \frac{180}{30} = 6$ Ampere

3. Hambatan Arus Listrik

Hambatan Listrik yaitu sebuah perbandingan antara tegangan listrik dari suatu konduktor atau suatu komponen elektronik (misalnya resistor) dengan arus listrik yang melewatinya. Hambatan listrik juga memiliki satuan yaitu *Ohm*.

Hukum Ohm berbunyi, "*jika suhu penghantar tidak berubah, maka kuat arus yang mengalir dari suatu penghantar sebanding dengan beda potensial antara ujung-ujung penghantar*". Persamaan dari hukum Ohm adalah

$$\boldsymbol{R = \frac{V}{I}}$$

dimana, R = hambatan arus listrik (ohm)
V = beda potensial (volt)
I = Arus listrik (ampere)

Satu ohm adalah besarnya hambatan suatu penghantar yang dapat dihasilkan arus satu ampere oleh beda potensial sebesar satu volt.

Hambatan jenis adalah perbandingan antara kuat medan listrik dengan kerapatan arus listrik, memiliki persamaan berikut :

$$\rho = \frac{\boldsymbol{E}}{\boldsymbol{J}}$$

dimana, ρ = hambatan jenis (*ohm . m*)
E = kuat medan listrik
J = rapat arus listrik

Jika terdapat suatu kawat penghantar yang memiliki luas penampang, maka besarnya hambatan pada kawat penghantar ddapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{R = \rho \frac{L}{A}}$$

dimana, R = hambatan pada kawat penghantar (*ohm*)
ρ = hambatan jenis penghantar (*ohm.m*)
L = panjang kawat penghantar (*m*)
A = luas penampang kawat penghantar (m^2)

Hambatan juga tergantung pada suhu, dimana *besarnya hambatan berbanding lurus dengan besarnya hambatan semula dan besarnya kenaikkan suhu*. Besarnya hambatan jenis suatu penghantar logam bertambah besar secara linier karena kenaikkan suhu. Hambatan jenis suatu logam dapat diketahui besarnya melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{\rho_t = \rho_o (1 + \alpha . t)}$$

dimana, ρ_t = hambatan jenis pada suhu t ^oC (ohm.m)
ρ_o = hambatan jenis awal (ohm.m)
α = koefisien suhu ($^oC^{-1}$)
t = suhu yang diperlukan (^oC)

Koefisien suhu adalah tambahan hambatan untuk suatu kawat yang hambatannya 1 ohm, jika dipanaskan dan 0 ^{o}C sampai 1 ^{o}C.

Berdasarkan dari rumus-rumus di atas, dapat diketahui bahwa hambatan suatu kawat tergantung dari :

- hambatan jenis penghantar
- panjang kawat penghantar
- luas penampang kawat penghantar
- suhu kawat penghantar.

Besarnya koefisien suhu dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{\alpha = \frac{1}{\rho_o}\,\frac{\Delta\rho}{\Delta t}}$$

dimana, α = koefisien suhu ($^{o}C^{-1}$)
ρ_o = hambatan jenis pada suhu 0 ^{o}C (ohm.m)
$\Delta\rho$ = perubahan hambatan jenis (ohm.m)
Δt = perubahan suhu (^{o}C)

Sedangkan besarnya perubahan hambatan listrik pada kawat, dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{\Delta R = R_t - R_o = R_o\,\alpha\,\Delta t}$$

dimana, ΔR = perubahan hambatan
R_t = hambatan kawat pada suhu t ^{o}C
R_o = hambatan kawat pada suhu 0 ^{o}C
α = koefisien suhu
Δt = perubahan suhu

Di bawah ini terdapat tabel hambatan jenis dan koefisien suhu dari berbagai bahan.

Tabel 2.1 Hamabatan Jenis Beberapa Bahan pada Suhu 20^{o}C

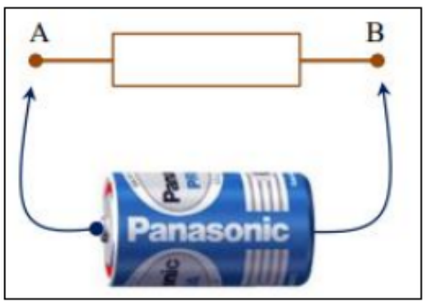
Jenis Bahan	Hambatan Jenis, ρ	Koefisien Suhu, α
karbon	$1{,}0 \times 10^{-8}$	- 0,0002
Perak	$1{,}59 \times 10^{-8}$	0,0061
Tembaga	$1{,}68 \times 10^{-8}$	0,0068
Emas	$2{,}44 \times 10^{-8}$	0,0034

Alumunium	$2{,}65 \times 10^{-8}$	0,00429
Tungsten	$5{,}6 \times 10^{-8}$	0,0045
seng	$5{,}90 \times 10^{-8}$	0,0037
nikel	$6{,}99 \times 10^{-8}$	0,006
Besi	$9{,}71 \times 10^{-8}$	0,00651
Platina	$10{,}6 \times 10^{-8}$	0,003927
timah	$10{,}9 \times 10^{-8}$	0,0045
timbal	$22{,}0 \times 10^{-8}$	0,0039
tianium	$42{,}0 \times 10^{-8}$	0,0038
mangan	$48{,}2 \times 10^{-8}$	0,000002
Air raksa	98×10^{-8}	0,0009
Nikrom	100×10^{-8}	0,0004
Gelas	$10^{9} - 10^{12}$	
Karet keras	$10^{13} - 10^{15}$	

Sumber : *Mikrajuddin Abdullah, (2017)*

Contoh Soal

1) Diilustrasikan pada Gambar 2.3, titik A memiliki potential lebih tinggi dari titik B. hambatan tersebut dihubungkan dengan baterei yang memiliki potensial 3,0 V. Jika hambatan listrik antara titik A dan B adalah 150 Ω,
   a) berapa arus yang mengalir melalui hambatan dan ke mana arahnya ?
   b) berapa besar muatan yang berpindah selama 10 s ?



Gambar 2.3. Gambar Contoh Soal

Penyelesaian

a) arus yang mengalir

$$I = \frac{V}{R} = \frac{3{,}0}{150} = 0{,}02\ Ampere$$

Karena titik A memiliki potensial lebih tinggi dari titik B maka arus listrik dalam hambatan mengalir dari A ke B.

Ini berarti pula bahwa elektron mengalir dari titik B ke titik A.

b) Muatan yang berpindah selama selang waktu tersebut adalah

$\Delta Q = I\,\Delta t = 0{,}02\ x10 = 0{,}2\ Coulomb$

2) Sebuah kawat penghantar sepanjang 12 m, memiliki jari-jari sebesar 10^{-3} *m* dan memiliki hambatan jenis sebesar $3{,}14x10^{-5}$ *ohm.m* sehingga luas penampangnya menjadi $3{,}14x(10^{-3})^2$ m^2. Tentukan hambatan dari kawat tersebut!

Penyelesaian

$R = \rho\ \frac{L}{A} = 3{,}14\ x10^{-5}\ \frac{12}{3{,}14\ x\ (10^{-3})^2} = 120\ ohm$

3) Diketahui hambatan jenis suatu logam pada suhu 25 ^oC sebesar 10^{-6} *ohm.m* dengan koefisien suhu 0,005/^oC.

Tentukan besarnya hambatan jenis logam tersebut pada suhu 200 ^oC!

Penyelesaian

$\rho_t = \rho_o\ (1 + \alpha\ \Delta t) = 10^{-6}\ (1 + 0{,}005\ 200)$

$= 10^{-6}(1 + 1) = 2\ 10^{-6}\ ohm.m$

4. Susunan Hambatan

Komponen-kompnen listrik dapat disusun menjadi rangkaian seri atau paralel dan gabungan seri dengan parallel.

4.1. Hambatan Susunan Seri

Pada susunan hambatan seri, besarnya hambatan seri sama dengan jumlah aljabar hambatan masing-masing. Ciri utama hambatan seri adalah besarnya arus yang melalui tiap-tiap hambatan adalah sama.



Gambit 2.4 Hambatan Susunan Seri

Pada hambatan yang disusun seri berlaku rumus dan ketentuan sebagai berikut.

1) Hambatan pengganti pada rangkaian seri sama dengan jumlah dari setiap hambatan yang ada pada rangkian tersebut. Berlaku rumus :

$$\boldsymbol{R_s = \Sigma R_n}$$

$$\boldsymbol{R_s = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n}$$

dimana, R_s = hambatan gabungan seri (ohm)

$R_1, R_2, .., R_n$ = hambatan masing-masing (ohm)

Fungsi dari hambatan yang dipasang seri adalah untuk mendapatkan hambatan gabungan yang lebih besar.

2) Kuat arus yang melewati tiap-tiap hambatan adalah sama.

$$\boldsymbol{I_1 = I_2 = I_3 = \cdots = I_n}$$

dimana, $I_1, I_2, ,... , I_n$ = kuat arus yang melalui tiap-tiap hambatan

3) Tegangan pada hambatan pengganti sama dengan penjumlahan semua tegangan pada tiap-tiap hambatannya.

$$\boldsymbol{V_S = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots + V_n}$$

Dimana, V_s = tegangan gabungan seri = tegangan sumber

$V_1, V_2, \ldots, V_n$ = tegangan pada tiap-tiap hambatan

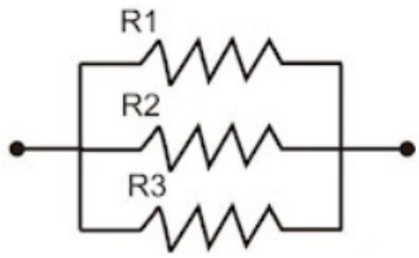
4) Tegangan pada tiap-tiap hambatan sebanding dengan hambatannya.

$$\boldsymbol{V_1 : V_2 : .... : V_n = R_1 : R_2 : .... : R_n}$$

Jadi semakin besar hambatannya, maka semakin besar pula tengangannya.

4.2. Hambatan Susunan Paralel

Hambatan dengan susunan paralel, kebalikan hambatan paralel sama dengan jumlah kebalikan masing-maisng hambatan. Ciri utama hambatan susunan paralel adalah besar beda tegangan tiap-tiap hambatan sama.



Gambar 2.5 Hambatan Susunan Paralel

Nilai gabungan hambatan menjadi lebih kecil dari tiap-tiap hambatan tersebut. Besar hambatan gabungan dari susunan paralel dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\frac{1}{R_p} = \Sigma \frac{1}{R_n}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

dimana, R_p = gabungan hambatan paralel (ohm)

$R_1, R_2, \ldots R_n$ = hambatan masing-masing (ohm)

Jika dalam rangkaian terdapat n hambatan dengan nilai *hambatan sama* besar maka total hambatan penggantinya adalah

$$R_p = \frac{R}{n}$$

Hambatan susunan pararel, berlaku rumus dan ketentuan sebagai berikut:

1) Besarnya kuat arus yang melalui hambatan pengganti sama dengan jumlah keseluruhan kuat arus pada setiap hambatannya.

$$\boldsymbol{I_p = I_1 + I_2 + \cdots + I_n}$$

dimana, I_p = kuat arus pengganti

$I_1, I_2, \ldots, I_n$ = kuat arus tiap-tiap rangkaian paralel

2) Besarnya tegangan pada setiap hambatan adalah sama. Nilai tersebut sama pula dengan tegangan pada hambatan penggantinya.

$$\boldsymbol{V_p = V_1 = V_2 = \cdots = V_n}$$

Dimana, V_p = tegangan paralel

$V_1, V_2, \ldots, V_n$ = Tegangan pada tiap hambatan

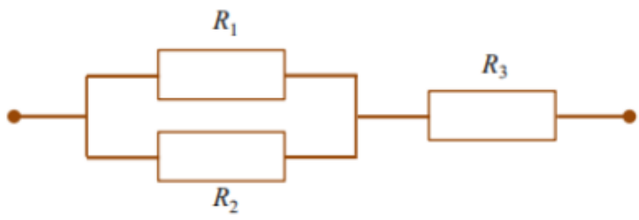
3) Kuat Arus yang melalui masing-masing hambatan berbanding terbalik dengan besarnya hambatan tersebut.

$$\boldsymbol{I_1 : I_2 : \ldots : I_n = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \ldots : \frac{1}{R_n}}$$

Rangkaian susunan paralel dari hambatan-hambatan, dimanfaatkan untuk memperkecil hambatan, karena nilai hambatan penggantinya lebih kecil dari nilai tiap hambatan. Rangkaian ini bermanfaat untuk membagi arus.

4.3. Hambatan Susunan Seri–Paralel

Hambatan susunan seri–paralel merupakan suatu susunan hambatan gabungan antara hambatan susunan seri dan susunan paralel.



Gambar 2.6 Hambatan Susunan Paralel-Seri

Besarnya hambatan gabungan dari susunan hambatan seri dan paralel, dapat diketahui melalui persamaan :

$$R_T = R_{12} + R_3$$

Dimana,

R_T = hambatan total = hambatan gabunga seri-paralel

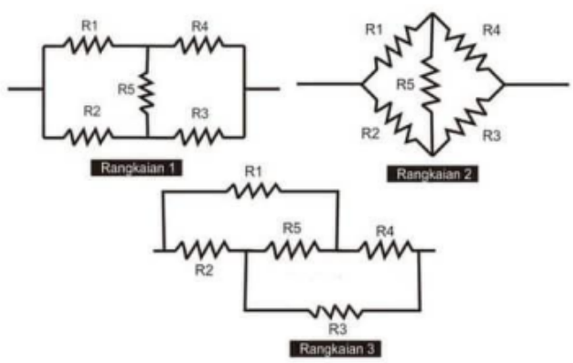
R_{12}= hambatan paralel

R_3 = hambatan seri

4.4. Hambatan Jembatan Wheatstone

Pada tahun1843, *Sir Charles Wheatstone* membuat suatu rangkaian yang disebut rangkaian jembatan Wheatstone untuk mengukur hambatan kawat-kawat telegraf.

Hambatan jembatan Wheatstone merupakan susunan hambatan-hambatan yang disusun sedemikian sehingga tidak dapat dijumlahkan secara seri maupun paralel, dan harus diselesaikan secara khusus.



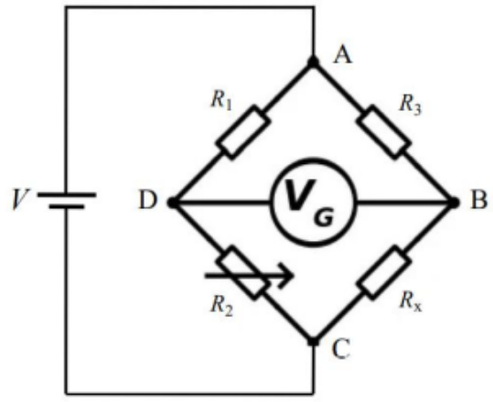
Gambar 2.7 Rangkaian Hambatan Jembatan Wheatstone

Jika hambatan jembatan *Wheatstone* pada keadaan seimbang, maka hasil kali dua hambatan yang saling berhadapan besarnya sama. Jadi dapat dituliskan dalam suatu bentuk persamaan:

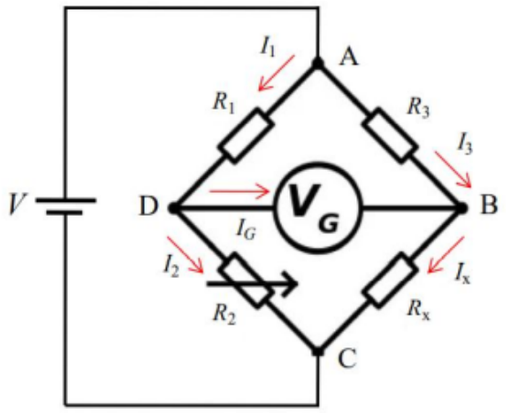
$$\boldsymbol{R_1 \, x \, R_3 = R_2 \, x \, R_4}$$

Untuk mengetahui penjelasan yang lengkap tentang hambatan jembatan Wheatstone, marilah kita dalami penjelasan di bawah ini.

Rangkaian *jembatan Wheatstone* sering digunakan sebagai sensor yang dapat mendeteksi arus yang cukup kecil. .Marilah kita analisis sifat rangkaian ini.



Gambar 2.8 Rangkaian Jembatan Wheatstone



Gambar 2.9 Asumsi Aliran Arus Dalam Rangkaian

Pada **Gambar 2.9** , di titik B berlaku :

$$\boldsymbol{I_3 = I_G + I_X}$$

dan di titik D berlaku :

$$\boldsymbol{I_1 = I_2 + I_G}$$

Kemudian kita gunakan *hukum Kirchoff II (penjelasan tentang hukum Kirchoff I dan II akan dijelaskan kemudian*) pada loop atas dan bawah. Pada loop atas, berlaku :

$$I_3\,R_3 - I_G\,R_G - I_1\,R_1 = 0$$

dan pada loop bawah, berlaku :

$$I_X\,R_X - I_2\,R_2 - I_G\,R_G = 0$$

Penggunaan *jembatan Wheatstone* biasa diatur sehingga arus yang mengalir melalui jembatan (arus yang mengalir dari titi **D** ke titik **B**) dibuat nol. Arus tersebut dilakukan dengan mengatur hambatan $\mathbf{R_2}$ yang biasanya merupakan potensiometer. Hambatan $\mathbf{R_2}$ diperbesar atau diperkecil sehingga arus yang mengalir pada jalur tersebut nol. Dalam kondisi setimbang tersebut maka dari *hukum Kirchoff I* kita peroleh $\mathbf{I_1 = I_2}$ dan $\mathbf{I_3 = I_X}$. Dan dari *hukum kirchoff II* kita peroleh $\mathbf{I_3\,R_3 - I_1\,R_1 = 0}$ dan $\mathbf{I_X\,R_X - I_2\,R_2 = 0}$, atau dapat ditulis :

$$I_3\,R_3 = I_1\,R_1 \quad dan \quad I_X\,R_X = I_2\,R_2$$

Jika dua persamaan tersebut *dibagi*, maka diperoleh :

$$\frac{I_X\,R_X}{I_3\,R_3} = \frac{I_2\,R_2}{I_1\,R_1}$$

karena $\mathbf{I_1 = I_2}$ dan $\mathbf{I_3 = I_X}$, maka kita dapatkan :

$$R_X = \frac{R_2\,R_3}{R_1}$$

Manfaat persamaan di atas adalah kita dapat menentukan nilai hambatan $\mathbf{R_X}$ menggunakan *jembatan Wheatstone* dengan mengatur arus yang mengalir pada jalur tengah sama dengan nol. Hambatan $\mathbf{R_X}$ hanya ditentukan oleh nilai hambatan $\mathbf{R_1}$, $\mathbf{R_2}$, dan $\mathbf{R_3}$.

Pertanyaan berikutnya adalah berapakah tegangan antara titik D dan **B**? Misalkan arus yang mengalir dari titik **D** ke titik **B** sangat kecil dan mendekati *nol*, maka kita tetap dapat melakukan aproksimasi $\mathbf{I_1 = I_2}$ dan $\mathbf{I_3 = I_X}$. Namun jika hambatan yang dimiliki $\mathbf{V_G}$ sangat besar, maka meskipun arus yang mengalir dari

titik **D** ke **B** sangat kecil, namun perkalian arus dengan hambatan $\mathbf{V_G}$ bisa cukup besar dan tidak dapat diabaikan. Untuk menentukan tegangan antara titik **D** dan **B** kita tulis ulang hukum *Kirchoff II* sebagai berikut. Pada loop bawah berlaku :

$$\boldsymbol{I_X R_X - I_2 R_2 + V_G = 0} \quad \boldsymbol{atau} \quad \boldsymbol{V_G = I_2 R_2 - I_X R_X}$$

Misalkan tegangan yang diterapkan adalah $\mathbf{V_s}$ (tegangan antara titik **A** dan **C**). dengan menggunakan *hukum Kirchoff* antara titik **A** dan **C** di jalur kiri, kita peroleh :

$$\boldsymbol{V_S = I_1 R_1 + I_2 R_2}$$

$$\boldsymbol{V_S = I_2 (R_1 + R_2)} \quad \boldsymbol{atau} \quad \boldsymbol{I_2 = \frac{V_S}{R_1 + R_2}}$$

Dengan cara serupa, apabila kita terapkan *hukum Kirchoof* antara titik **A** dan **C** di jalur kanan, kita peroleh :

$$\boldsymbol{I_X = \frac{V_S}{R_3 + R_X}}$$

Substitusi kedua ungkapan arus di atas ke dalam persamaan :

$$\boldsymbol{V_G = I_2 R_2 - I_X R_X}$$

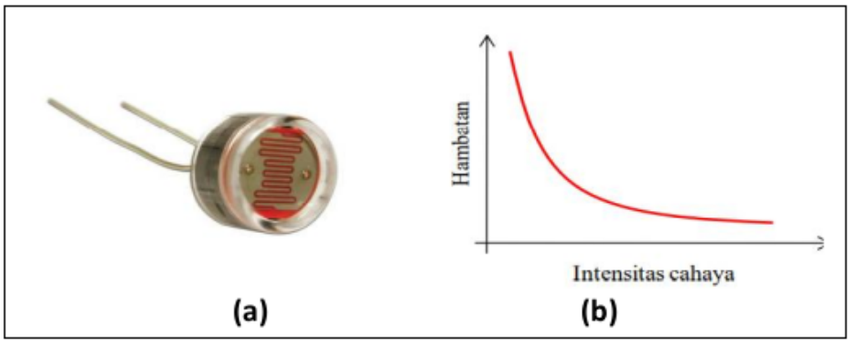
maka diperoleh :

$$\boldsymbol{V_G = \frac{V_S}{R_1 + R_2} R_2 - \frac{V_S}{R_3 + R_X} R_X}$$

$$\boldsymbol{= V_S \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_X}{R_3 + R_X}\right.}$$

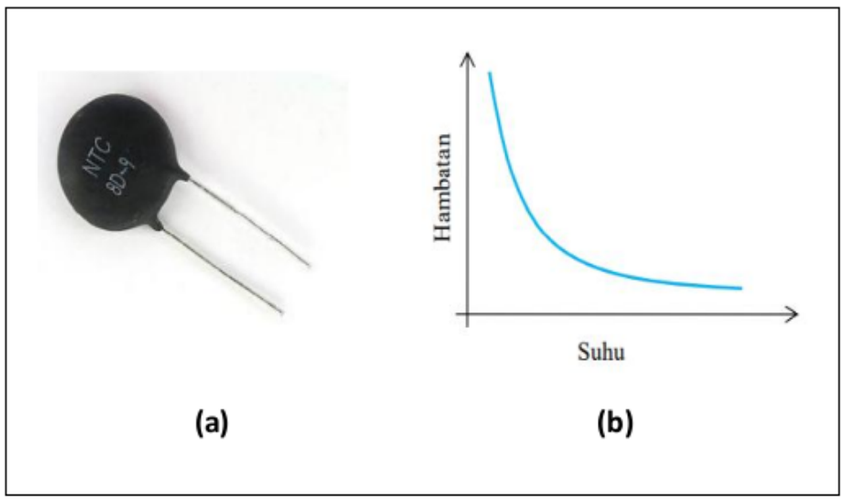
Tampak dari persamaan di atas bahwa jika hambatan $\mathbf{R_x}$ berubah-ubah maka tegabngan $\mathbf{V_G}$ yang diukur berubah-ubah juga. Dengan demikian, *jembatan Wheatstone* dapat digunakan sebagai sensor, besaran fisis yang menghasilkan perubahan hambatan jika besaran fisis tersebut berubah. Sensor tersebut dipasang pada posisi $\mathbf{R_x}$.

Untuk mengukur besaran fisis dengan *jembatan Wheatstone* adalah intensitas cahaya. Kita gunakan komponen LDR (*light dependent resistor*) sebagai sensor. Komponen ini adalah sebuah hambatan yang nilai hambatannya bergantung pada intensitas cahaya yang jatuh padanya. Semakin tinggi intensiotas cahaya yang jatuh maka hambataan yang dimiliki makin kecil. **Gambar 2.10** adalah contoh LDR serta contoh kurva hambatan sebagai fungsi intensitas cahaya. Komponen ini dipasang pada *jembatan Wheatstone* pada posisi $\mathbf{R_X}$. Dengan berubahnya intensitas cahaya maka nilai $\mathbf{R_X}$ berubah sehingga mengubah nilai $\mathbf{V_G}$**.** Berdasarkan nilai $\mathbf{V_G}$ tersebut maka nilai $\mathbf{R_X}$ diketahui dan dengan menggunakan kurva hubungan antara intensitas dan hambatan maka intensitas cahaya dapat ditentukan. Rangkaian ini dapat langsung dihubungkan dengan computer sehingga pengukurabn dapat diloakukan secara otomatis dalam rentang waktu yang lama.



Gambar 2.10 (a) Contoh LDR dan (b) Contoh Kurva Hambatan Sebagai Fungsi Intensitas Cahaya

Aplikasi lain adalah untuk sensor suhu. Kita dapat menggunakan komponen yang namanya termistor. Komponen ini juga sebuah hambatan yang nilai hambatannya bergantung pada suhu. Nilai hambatan berkurang dengan bertamhanya suhu. **Gambar 2.11** adalah contoh termistor dan kurva hambatan sebagai fungsi suhu. Untuk mendeteksi suhu menggunakan jembatan wheatstone maka kita tempatkan termistror pada posisi $\mathbf{R_X}$.



Gambar 2.11 (a) Contoh Termistor dan (b) Kurva Hambatan Sebagai Fungsi Suhu

Contoh Soal

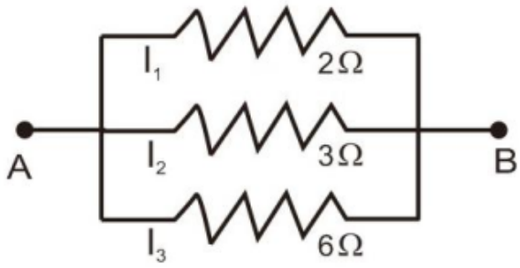
1) Sobat punya empat buah hambatan yang masing-masing bernilai 50 ohm dan dirangkai secara seri. Kemudian pada ujung-ujungnya dihubungkan dengan sumber tegangan 220 Volt. Tentukanlah kuat arus yang mengalir pada rangkaian tersebut!

   Penyelesaian

   $R_S = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 50 + 50 + 50 + 50 = 200\ \Omega$

   $I = \frac{V}{R_S} = \frac{220}{200} = 1{,}1\ Ampere$

2) Perhatikan gambar di bawah!



Gambar 2.12 Rangkaian Paralel AB

   Diketahui VAB = 220 Volt, Tentukanlah :

   a) I_1, I_2, dan I_3.

b) Hambatan Paralel (R_P)

c) Besar Arus Total (I_T)

Penyelesaian

a) Rangkaian paralel, Tegangan pada tiap-tiap hambatan adalah sama, maka : $I_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = \frac{220}{2} = 110\ Ampere$

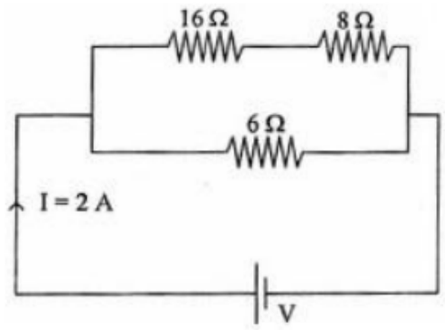
$$I_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{220}{3} = 73{,}33\ Ampere$$

$$I_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{220}{6} = 36{,}67\ Ampere$$

b) $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = 1 \quad maka \ R_p = 1\ \Omega$

c) $I_T = I_1 + I_2 + I_3 = 110 + 73{,}33 + 36{,}67 = 220\ Ampere$

3) Perhatikan gambar di bawah ini!



Gambar 2.13 Rangkaian Seri-Paralel

Tentukanlah beda potensial (tegangan) V!

Penyelesaian

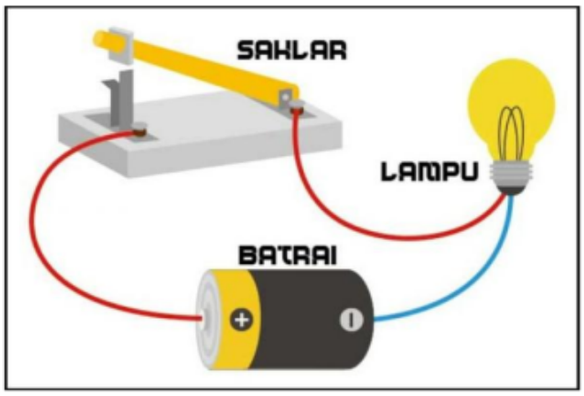
- $R_s = 16 + 8 = 24\ \Omega$
- $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{6} = \frac{1}{24} + \frac{1}{6} = \frac{5}{24} \quad maka \ R_p = \frac{24}{5} = 4{,}8\ \Omega$
- $maka \ V = I\ R_p = 2\ x\ 4{,}8 = 9{,}6\ Volt$

5. Rangkaian Listrik Sederhana

Rangkaian listrik merupakan suatu lintasan yang dapat dialiri oleh muatan listrik (arus). Suatu rangkaian listrik umumnya terdiri dari banyak komponen listrik. Komponen-komponen listrik tersebut terdiri dari komponen pen-supply energi listrik (seperti batterai) dan komponen pengguna energi listrik (seperti bola

lampu–resistor). Arus listrik akan mengalir dalam suatu rangkaian yang setidaknya :

1) memiliki sumber tegangan untuk membuat arus mengalir,
2) memiliki komponen pengguna energi yang di-supply sumber tegangan,
3) merupakan rangkaian tertutup



Gambar 2.14 Sebuah Rangkaian Listrik Sederhana

Gambar di atas merupakan contoh untuk sebuah rangkaian listrik sederhana. Pada gambar tersebut komponen *pen-supply* energi adalah baterai, sementara bola lampu bertindak sebagai komponen pengguna energi, dan rangkaian tersebut tertutup, sehingga arus dapat mengalir.

Pertanyaannya, ***apakah arus tidak akan mengalir jika tidak ada bola lampu?*** Dalam syarat yang ke-2 dikatakan bahwa harus terdapat minimal satu komponen yang menggunakan energi listrik yang disokong oleh sumber tegangan. Hal tersebut dikarenakan agar kedua ujung penghantar listrik memiliki potensial yang berbeda sehingga arus dapat terus mengalir. Namun, tanpa bola lampupun arus listrik dapat mengalir, karena dalam penghantar listrikpun memiliki hambatan. Sebenarnya kawat penghantarpun bertindak sebagai komponen pengguna energi listrik.

Rangkaian Sederhana atau biasa disebut rangkaian listrik sederhana memiliki makna bahwa rangkaian yang akan dialiri oleh arus tentunya memiliki muatan listrik di dalamnya. Dan biasanya di dalam rangkaian elektronika tersebut, terdapat beberapa macam komponen yang memiliki kinerja dan fungsi tertentu. Dalam

rangkaian listrik tersebut juga memiliki beberapa macam komponen yang akan mendapatkan suplai energi dari sumber tegangan yang memiliki besaran yang berbeda-beda, sehingga akan menghasilkan output atau tenaga keluaran yang bisa langsung digunakan.

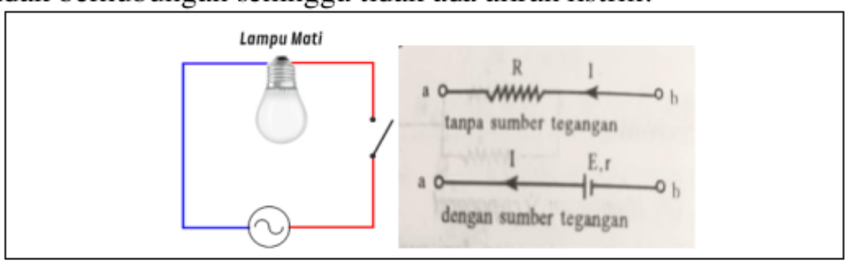
Rangkaian Terbuka dan Rangkaian Tertutup merupakan suatu konsep yang paling dasar pada rangkaian elektronika. Sebelum membuat rangkaian elektronika yang lebih kompleks, tentu kita harus memahami terlebih dahulu apa maksud dari rangkaian terbuka dan rangkaian tertutup.

Seperti kita ketahui energi listrik tercipta karena perpindahan elektron yang mengalir secara terus menerus melewati beban yang mana berupa komponen atau peralatan listrik. Beban ini bisa berbentuk berbagai macam peralatan elektronik seperti AC, Kompor Listrik, Televisi, Charger HP dan Laptop, dan lain sebagainya.

Pada dasarnya rangkaian terbuka dan tertutup merupakan suatu istilah yang digunakan untuk menyatakan rangkaian tersebut mengalirkan arus listrik atau tidak. Kurang jelas? maka langsung baca penjelasannya saja di bawah ini!

5.1. Rangkaian Terbuka

Rangkaian terbuka merupakan suatu istilah yang digunakan untuk menyatakan bahwa rangkaian tersebut tidak terhubung (terbuka). Sehingga pada rangkaian tersebut tidak mengalirkan aliran listrik. Atau dengan kata lain, bahwa Rangkaian listrik terbuka adalah rangkaian yang memiliki ujung pangkal. Rangkaian ini terjadi jika salah satu ujung kabel dilepas dari kutub baterai. Dikatakan rangkaian terbuka, jika kutub positif dan kutub negatif tidak berhubungan sehingga tidak ada aliran listrik.



Gambar 2.15 Rangkaian Terbuka

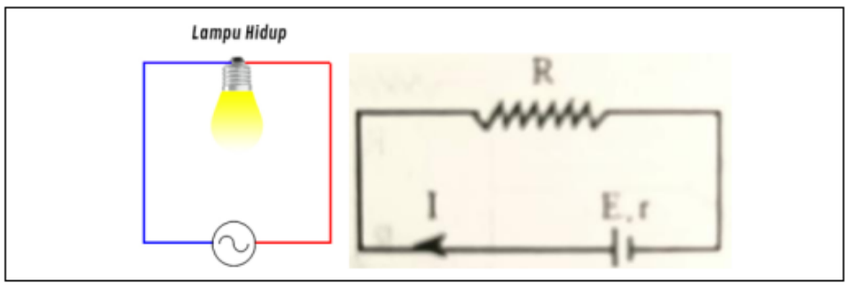
Dari **Gambar 2.15** dapat diketahui tegangan antara titik **a** dan titik **b**, yaitu dengan menggunakan persamaan berikut :

$$V_{ab} = E - I\,r \quad atau \quad V_{ab} = I\,R$$

dimana, Vab = tegangan dari a ke b (volt)
E = sumber tegangan (volt)
r = hambatan dalam sumber (ohm)
I = kuat arus lsitrik (ampere)
R = hambatan luar (ohm)

5.2. Rangkaian Tertutup

Rangkaian listrik tertutup adalah rangkaian yang tidak memiliki ujung dan pangkal. Dikatakan rangkaian tertutup, jika kutub positif dan kutub negatif berhubungan sehingga muncul aliran listrik.



Gambar 2.16 Rangkaian Tertutup

Besarnya arus listrik yang mengalir pada rangkaian di atas, dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$I = \frac{E}{R + r}$$

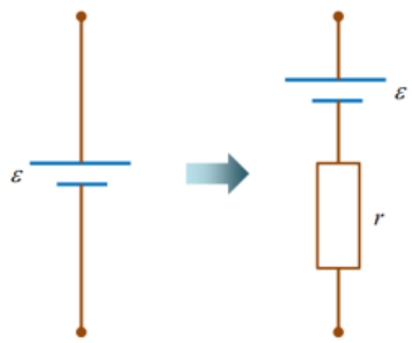
dimana, I = arus yang mengalir (ampere)
E = sumber tegangan (volt)
R = hambatan luar (ohm)
r = hambatan dalam (ohm)

Perlu juga diketahui definisi dari *hambatan dalam sumber tegangan* (ditulis **r**). Untuk mengetahui lebih mendalam tentang

hambatan dalam sumber tegangan (**r**), marilah kita mengikuti penjelasan di bawah ini.

Sumber tegangan seperti baterei dan aki sebenarnya juga memiliki hambatan. Ketika dipasang pada rangkaian maka hambatan di dalam rangkaian bukan hanya hambatan hambatan-hambatan yang dipasang, tetapi juga hambatan yang dimiliki sumber tegangan. Hambatan yang dimiliki sumber tegangan disebut hambatan internal. Sumber tegangan yang ideal adalah sumber tegangan yang hambatan dalamnya nol. Tetapi tidak ada sumber tegangan yang ideal. Sumber tegangan yang baik adalah sumber tegangan yang memiliki hambatan dalam sangat kecil.

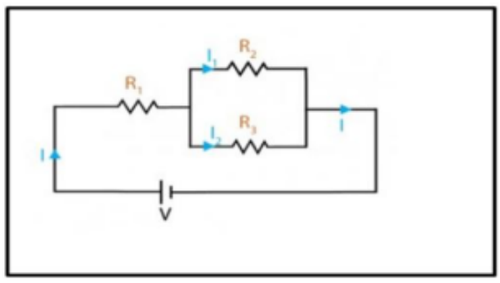
Untuk menentukan arus yang mengalir dalam rangkaian ketika dipasang sumber tegangan, maka sumber tegangan tersebut dapat digantikan dengan sebuah sumber tegangan ideal yang diseri dengan sebuah hambatan r seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.17**. Hambatan r inilah yang disebut tahahan internal sumber tegangan.



Gambar 2.17 Sebuah sumber tegangan sembarang (a) dapat digantikan oleh sumber tegangan ideal yang diseri dengan sebuah hambatan dalam (b). Tidak ada sumber tegangan yang ideal. Semua sumber tegangan mengandung hambatan dalam dan besarnya nilai hambatan dalam bergantung pada sumber tegangan tersebut. Untuk baterei, hambatan dalam bisa meningkat dengan lama waktu pemakaian. Baterei baru memiliki hambatan dalam yang kecil sedangkan baterei lama memiliki hambatan dalam yang besar. Hal sebut disebabkan karena perubahan sifat elektrolit dan elektroda dalam baterei setelah digunakan dalam jangka waktu yang lama

6. Gabungan Sumber Tegangan

Gabungan sumber tegangan adalah hubungan beberapa elemen identik dalam suatu rangkaian seri atau pararel uang dapat mempengaruhi besar kuat arus yang mengalir melalui rangkaian tersebut.



Gambar 2.18 Rangaian Gabungan

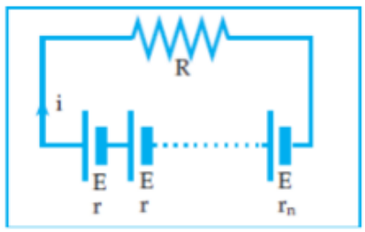
Rangkaian Campuran adalah gabungan dari 2 rangkaian listrik, yaitu rangkaian listrik seri dan rangkaian listrik paralel. Untuk dapat mencari besarnya hambatan dalam rangkaian campuran kita harus terlebih dahulu mencari besarnya hambatan tiap tiap model rangkaian (rangkaian seri dan paralel), kemudian mencari hambatan dari gabungan rangkaian akhir yang kita dapat. Contoh yang kita dapat dari rangkaian di atas, misalnya model rangkaian akhir yang di dapat adalah model rangkaian seri, sehingga total rangkaian yang akan kita cari dengan persamaan hambatan pengganti pada rangkaian hambatan seri. Sedangkan untuk rangkaian paralel harus mencarinya dengan menghubungan suatu hambatan secara paralel.

Sumber tegangan listrik arus searah yang disebut dengan gaya gerak listrik (GGL) dapat disusun secara seri atau secara paralel.

Gabungan sumber tegangan listrik bertujuan untuk memperbesar atau memperkecil tegangan listrik yang akan dihasilkan. Jika suatu rangkaian membutuhkan tegangan listrik yang besar, maka dapat diberikan beberapa tegangan listrik yang disusun secara seri. Jika suatu rangkaian membutuhkan arus yang besar, maka dapat dilakukan dengan cara memparalelkan tegangan listriknya.

6.1. Susunan Sumber Tegangan Seri

Jika beberapa buah sumber yang mempunyai GGL yang sama dengan masing-masing hambatan dalam, maka besarnya kuat arus yang keluar dari sumber tegangan untuk susunan seri adalah :



Gambar 2.19 Rangkaian Sumber Tegangan Seri

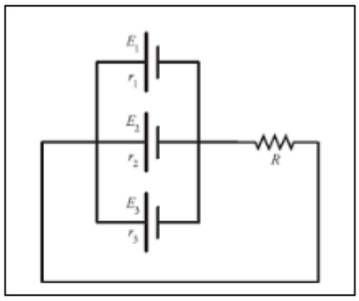
$$I = \frac{n\,E}{R + n\,r}$$

dimana, I = kuat arus (Ampere)
n = jumlah sumber tegangan
E = besar sumber tegangan (volt)
R = hambatan luar (ohm)
r = hambatan dalam (ohm)

Sumber tegangan yang disusun secara seri digunakan untuk mendapatkan tegangan gabungan yang lebih besar. Jadi, semakin banyak sumber tegangan yang disusun secara seri maka semakin besar pula tegangan total yang dihaislkan.

6.2. Susunan Sumber Tegangan Paralel

Jika beberapa sumber tegangan yang mempunyai GGL yang sama dengan masing-masing hambatan dalam yang seluruhnya dipasang secara paralel, maka besarnya kuat arus listrik pada rangkaian tersebut dapat diketahui melalui persamaan berikut:



Gambar 2.20 Rangkaian Sumber Tegangan Seri

$$I = \frac{E}{R + \frac{r}{n}}$$

dimana, I = kuat arus (ampere)
E = besar sumber tegangan (volt)
R = hambatan luar (ohm)
r = hambatan dalam (ohm)
n = jumlah sumber tegangan

Tujuan dari penyusunan sumber tegangan secara paralel adalah untuk mendapatkan arus listrik yang lebih besar. Jadi pada susunan sumber tegangan secara paralel, maka gaya gerak listriknya (GGL) hanya dipergunakan sebuah saja.

7. Rangkaian Listrik Majemuk

Tidak semua rangkaian dapat disederhanakan dengan menggunakan kombinasi susunan seri. Untuk rangkaian yang tidak sederhana misalnya rangkaian majemuk dapat digunakan *Hukum Kirchoff I* dan *II* dalam penyelesaiannya.

7.1. Hukum Kirchoff

Untuk memahami sebuah rangkaian listrik (Seri, Paralel dan Campuran) lebih jelas dan lengkap, ada baiknya mempelajari arus listrik yang mengalir pada rangkaian tersebut. Seorang Ahli Fisika dari Jerman bernama *Gustav Robert Kirchhoff* mengemukakan *Hukum Kirchhoff* pada tahun 1845. *Hukum Kirchhoff* ini memiliki fungsi dalam menganalisis arus dan tegangan dalam sebuah rangkaian listrik. Pada *Hukum Kirchhoff 1* merupakan *Hukum Kirchhoff* yang sangat berkaitan dengan arah arus pada titik percabangan.

Bunyi Hukum Kirchhoff 1 :
"*Jumlah kuat arus yang menuju suatu titik percabangan sama dengan junlah kuat arus yang meninggalkan titik percabangan tersebut*".

Jadi, menurut *Hukum Kirchoff I*,

- Kuat arus dalam kawat yang tidak bercabang dimanapun, besarnya sama.
- Pada kawat yang bercabang, jumlah kuat arus yang menuju ke suatu titik cabang sama dengan jumlah kuat arus yang keluar.

$$\Sigma I_{masuk} = \Sigma I_{keluar}$$

Bunyi Hukum Kirchoff II :
"*Dalam sebuah rangkaian listrik tertutup, jumlah aljabar gaya gerak listrik sama dengan jumlah aljabar penurunan potensial listriknya atau jumalh aljabar perubahan tegangan yang mengelilingi suatu rangkaian tertutup sama dengan nol*".

$$\Sigma V = 0$$

Gaya gerak listrik (GGL) di dalam sumber tegangan menyebabkan arus listrik mengalir sepanjang loop (rangkaian tertutup) dan arus listrik yang mendapat hambatan menyebabkan penurunan potensial listrik. Jadi, jumlah GGL di dalam sumber tegangan dan jumlah penurunan tegangan sepanjang rangkaian tertutup sama dengan nol.

$$\Sigma E + \Sigma (I.R) = 0$$

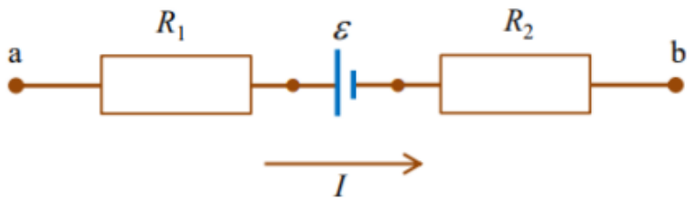
dimana, E = gaya gerak listrik (volt)
I = kuat arus listrik (ampere)
R = hambatan luar

Dengan perjanjian tanda untuk Gaya Gerak Listrik (GGL) dan arus sebagai berikut :

- Tanda arus diberi *positif,* jika arah arus searah atau mengikuti nrangkaian tertutup yang ditentukan dengan arah rangkaian tertutup yang kita tentukan.
- Tanda untuk GGL ditentukan oleh kutub yang dijumpai, jika saat mengikuti arah rangkaian tertutup, kutub positif

sumber tegangan dijumpai lebih dahulu daripada kutub negatif, maka GGL bertanda *positif*. Dan jika saat mengikuti arah rangkaian tertutup kutub negatif sumber tegangan dijumpai terlebih dahulu daripada kutub positif, maka GGL berharga *negatif*.

Dalam rangkaian listrik, kadang kita jumpai sejumlah hambatan dan sejumlah sumber tegangan seperti pada **Gambar 2.21**. Bagaimana menentukan arus yang mengalir.



Gambar 2.21 Contoh rangkaian yang mengandung hambatan dan sumber tegangan

Rumus yang menghubungan besar arus yang mengalir dan besarnya hambatan serta tegangan adalah

$$\boldsymbol{V_{ab} = {}^{a}_{b}\Sigma\,(I.R) - {}^{a}_{b}\Sigma\,\varepsilon}$$

dimana, V_{ab} adalah beda potensial antara ujung-ujung rangkaian,

${}^{a}_{b}\Sigma\,(I.R)$ adalah jumlah perkalian arus dan hambatan sepanjang rangkaian antara titik a dan b, dan

${}^{a}_{b}\Sigma\,\varepsilon$ adalah jumlah tegangan yang dipasang sepanjang rangkaian antara titik a dan b.

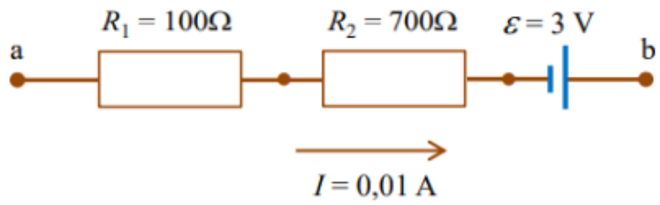
Persamaan di atas, diterapkan dengan perjanjian :

- **I** diberi harga *positif*, jika mengalir dari **a** ke **b**.
- **ε** diberi harga *positif* jika kutub negatif sumber tegangan menghadap titik **a** dan kutub positif menghadap titik **b**.

Contoh Soal

1) Perhatikan rangkaian pada **Gambar 2.22**. Berapakan tegangan listrik antara titik a dan b ?

Penyelesaian



Gambar 2.22 Rangkaian Contoh Soal

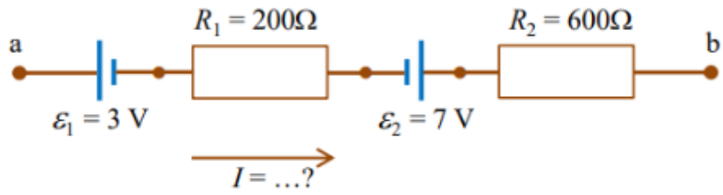
Arus **I** yang mengalir pada $\mathbf{R_1}$ dan $\mathbf{R_2}$ sama besar dan dalam rangkaian hanya terdapat satu sumber tegangan. Maka persamaannya :

$$\mathbf{Vab = I\,R_1 + I\,R_2 - \varepsilon}$$

Berdasarkan perjanjian : **I** mengalir dari a ke b sehingga diberi harga *positif*: **I = 0,01 A**. Kutub negatif **ε** menghadap titik a sehingga nilai **ε** diberi harga *positif*, **ε = +3 V**.

Jadi, $V_{ab} = 0{,}01\ x\ 100 + 0{,}01\ x\ 700 - 3 = 1 + 7 - 3 = 5\ Volt$

2) Berdasarkan **Gambar 2.23**, jika V_{ab} = 5 V, tentukan besar arus yang mengalir.



Gambar 2.23 Rangkaian Contoh Soal No. 2)

Penyelesaian

$$\boldsymbol{V_{ab} = \Sigma\, I.R - \Sigma\, \varepsilon = (I.R_1 + I.R_2) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}$$

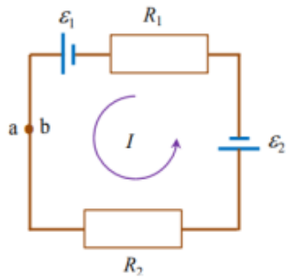
Berdasarkan perjanjian : Kutub positif ε_1 menghadap titik a, sehingga diberi harga negatif, $\varepsilon_1 = -3\,V$. Kutub negatif ε_2 menghadap tiitk b, sehingga diberi harga positif, $\varepsilon_2 = +7\,V$.

Jadi : $5 = I\,x\,200 + I\,x\,600 - (-3+7) = 800\,I - 4 \quad atau \quad I = \frac{5+4}{800} = \frac{9}{800} = 0{,}01125\,Ampere$

7.3. Rangkian Dengan Loop

Pada sebuah rangkaian tertutup (loop) atus yang mengalir adalah sama. Jadi menurut Hukum Kirchoff II : $\mathbf{\Sigma E + \Sigma (I.R) = 0}$.

Apa yang terjadi jika titik **a** dan **b** pada **Gambar 2.21** dihubungkan? Kita akan mendapatkan $\mathbf{V_{ab} = 0}$ dan rangkaian menjadi tertutup. Rangkaian yang tertutup tersebut disebut loop. Contoh loop adalah **Gambar 2.24**.



Gambar 2.24 Contoh loop sederhana yang disusun oleh dua sumber tegangan dan dua hambatan. Jumlah komponen dalam suatu loop dapat berapa saja dan arah kutub sumber tegangan bisa sembarang.

Karena $\mathbf{V_{ab} = 0}$, maka khusus untuk loop, persamaannya menjadi :

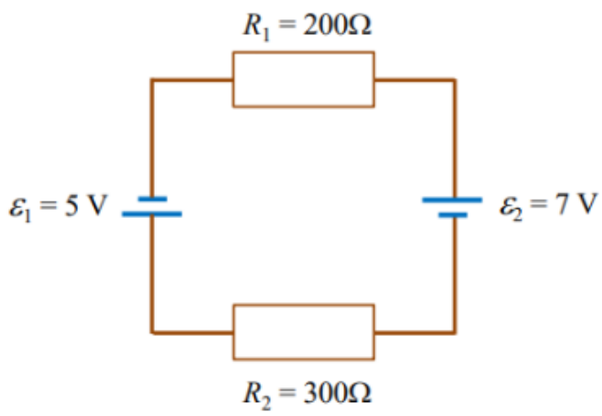
$$\mathbf{\Sigma\,(I.R) - \Sigma\,\varepsilon = 0}$$

Contoh Soal

Tentukan arus yang mengalir pada rangkaian **Gambar 2.25**, Jika sumber tegangan dianggap tidak memiliki hambatan dalam. Tentukan pula arus yang mengalir jika sumber tegangan memiliki hambatan dalam 50 Ω.

Penyelesaian

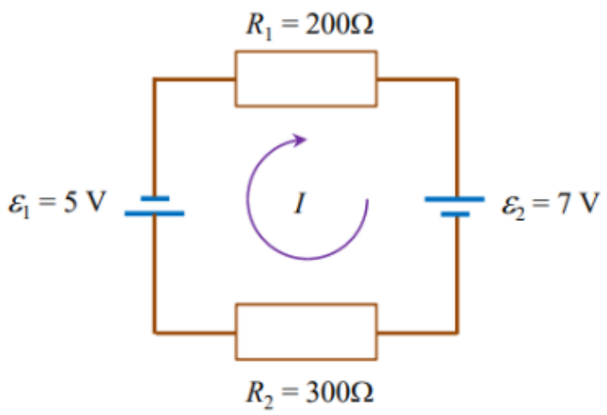
Kita bisa menganggap arah arus sembarang dalam loop. Jika setelah dilakukan perhitungan diperoleh arus bernilai positif, maka arah arus yang dipilih benar. Tetapi jika setelah dilakukan perhitungan diperoleh arus bernilai negatif, maka arah arus yang dipilih berlawanan dengan arah sebenarnya, tetapi besarnya arus benar (tinggal membalik arah saja tanpa melakukan perhitungan ulang).



Gambar 2.25 Gambar Untuk Contoh Soal

- ***Untuk Sumber Tegangan yang Tidak Memiliki Hambatan Dalam***

  Misalkan kita pilih arah arus seperi pada **Gambar 2.26**.



Gambar 2.26 Sumber Tegangan Tidak Memiliki Hambatan Dalam

$$\boldsymbol{\Sigma\,(I.R) - \Sigma\,\varepsilon = 0 \;\; atau \;\; (I.R_1 + I.R_2) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0}$$

Arah masuk ke ε_1 dari kutub negatif, maka ε_1 diberi harga positif. $\varepsilon_1 = +5\,V$.

Arah masuk ke ε_1 dari kutub positif, maka ε_2 diberi harga negatif. $\varepsilon_2 = -7\,V$

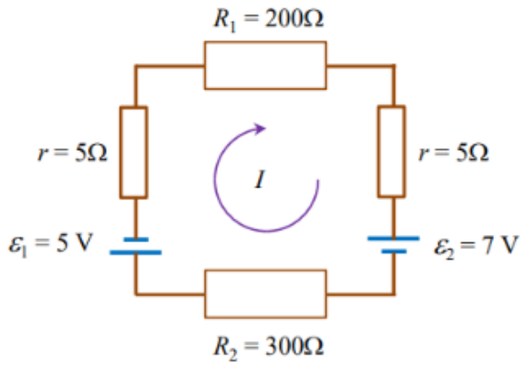
Dengan demikian,

$$I\ x\ 200 + I\ x\ 300 - (5 - 7) = 0 \;\; atau\; I = \frac{-2}{500} = -0{,}04\ Ampere$$

Karena diperoleh arus berharga negatif, maka arah arus dalam rangkaian berlawanan dengan anak panah yang digambar. Jadi arus mengalir berlawanan dengan arah jarum jam dan besarnya 0,04 A.

- ***Untuk Sumber Tegangan yang Memiliki Hambatan Dalam***

  Misalkan kita pilih arah arus seperi pada **Gambar 2.27**.



Gambar 2.27 Sumber tegangan memiliki hambatan dalam. Hambatan dalam selalu disusun seri dengan sumber tegangan

$$\boldsymbol{\Sigma\,(I.R) - \Sigma\,\varepsilon = 0}$$

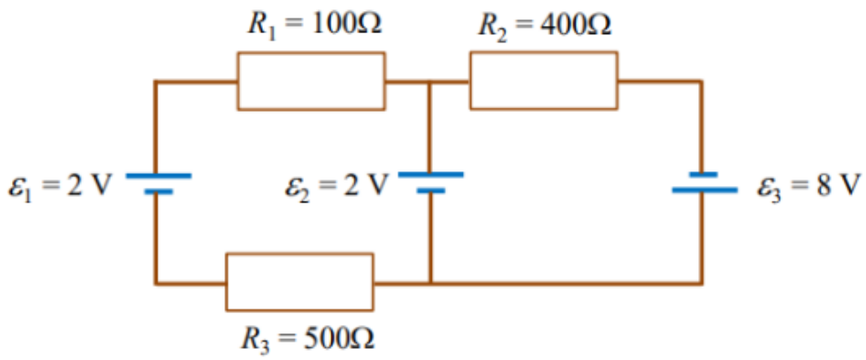
$$\boldsymbol{(I.R_1 + I.R_2) + (I\,r + I\,r) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0}$$

$$I\ x\ 200 + I\ x\ 300 + I\ x\ 5 + I\ x\ 5 - (5 - 7) = 0$$

$$600\ I + 2 = 0 \quad atau \quad I = \frac{-2}{600} = -0{,}003\ Ampere$$

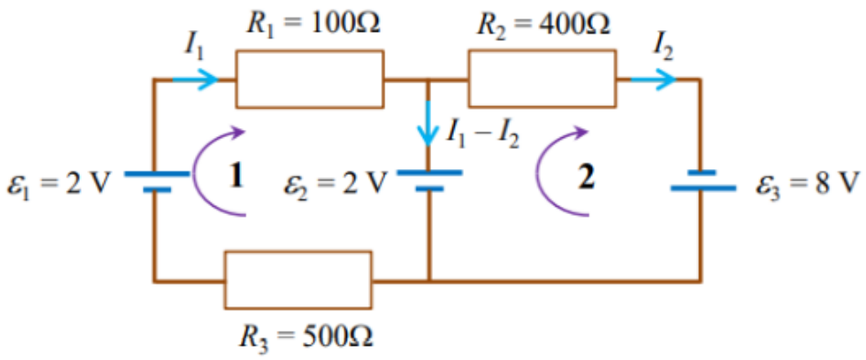
7.3. Rangkaian Lebih Dari Satu Loop

Jumlah loop dalam rangkaian tidak hanya satu, tetapi bisa banyak sekali. Sekarang kita bahas rangkaian yang terdiri dari dua loop. Prinsip yang digunakan sama dengan saat memecahkan persoalan satu loop. Hanya di sini akan muncul dua persamaan, karena ada dua arus yang harus dicari, yaitu arus yang mengalir pada masing-masing loop. Contohnya, kita tinjau rangkaian pada **Gambar 2.28**.



Gambar 2.28 Rangkaian Dua Loop

Arus yang mengalir pada tiap loop bisa dipilih sembarang. Jika nanti diperoleh nilai positif, maka arah yang dipilih sudah benar. Tetapi jika diperoleh nilai negatif, maka arah arus sebenarnya berlawanan dengan arah yang dipilih, tetapi besarnya sama. Misalkan kita pilih arah arus seperti pada **Gambar 2.29**.



Gambar 2.29 Arah arus yang dipilih untuk loop pada Gambar 2.28 (cataran $\varepsilon_2 = 4$ V)

Untuk Loop 1, berlaku :

$$\boldsymbol{\Sigma\,(I.R) - \Sigma\,\varepsilon = 0 \;\; atau \;\; I_1R_1 + I_1R_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0}$$

Berdasarkan perjanjian untuk tanda sumber tegangan, maka dari **Gambar 2.29** kita peroleh $\varepsilon_1 = +2\,V \;\; dan \;\; \varepsilon_2 = -4\,V$. Dengan demikian :

$$I_1\,x\,100 + I_1\,x\,500 - (2-4) = 0 \;\; atau \;\; I_1 = -\frac{2}{600}$$
$$= -0{,}003\;Ampere$$

Untuk Loop 2, berlaku :

$$\boldsymbol{\Sigma\,(I.R) - \Sigma\,\varepsilon = 0 \;\; atau \;\; I_2R_2 - (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) = 0}$$

Berdasarkan perjanjian untuk tanda sumber tegangan, maka dari **Gambar 2.29** kita peroleh $\varepsilon_2 = +4\,V \;\; dan \;\; \varepsilon_3 = +8\,V$. Dengan demikian :

$$400\;I_2 - (4+8) = 0 \;\; atau \;\; I_2 = \frac{12}{400} = 0{,}03\;Ampere$$

Berdasarkan hasil di atas, arus yang mengalir pada loop kiri adalah 0,003 A dengan arah berlawanan dengan yang dilukiskan pada **Gambar 2.29**. Arus yang mengalir pada loop 2 adalah 0,03 A sesuai dengan arah yang dilukiskan pada **Gambar 2.29**.

Secara umum, rangkaian elektrok pada barang kebutuhan manusia seperti TV, tape recorder, radio, dan sebagainya terdiri dari banyak sekali loop. Loop yang ada biasanya sangat rumit dan besar arus serta tegangan pada bagian-bagiannya sulit diselesaikan secara sederhana seperti di atas. Loop yang dipelajari di buku ini, umumnya sangat sederhana, sekedar untuk memberi pemahaman pada pembaca (mahasiswa) bagaimana metode penyelesain persoalan arus listrik pada rangkaian. Metode tersebut tetap berlaku untuk loop bentuk apa pun, hanya langkah penyelesaian yang lebih panjang dan rumit. Tetapi, dengan adanya kompouter yang makin canggih, kerumitan tersebut bukan masalah besar.

Sekarang, marilah kita membahas untuk banyak loop. Jika kita memiliki **N** buah loop maka ada **N** buah arus yang harus kita hitung. Dengan menerapkan persamaan Kirchoff berkali-kali, maka kita dapatkan bentuk persamaan linier berikut ini.

$$a_{11}I_1 + a_{12}I_2 + \cdots + a_{1N}I_N = E_1$$
$$a_{21}I_2 + a_{22}I_2 + \cdots + a_{2N}I_N = E_2$$
$$\cdots\cdots$$
$$a_{N1}I_1 + a_{N2}I_2 + \cdots + a_{NN}I_N = E_N$$

dimana, $\mathbf{A_{ij}}$ adalah mempunyai satuan hambatan yang dapat merupakan satu hambatan tunggal atau operasi sejumlah hambatan, atau bisa saja nol.

$\mathbf{I_j}$ adalah arus pada loop ke-**j** yang akan kita hitung.

$\mathbf{E_j}$ memiliki satuan tegangan yang dapat merupakan satu sumber tegangan tunggal atau penjumlahan atau pengurangan sejumlah sumber tegangan, atau bisa saja nol.

Persamaan di atas, dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut :

$$\boldsymbol{A\ I = E}$$

dengan

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} a_{11}I_1 + a_{12}I_2 + \cdots + a_{1N}I_N = E_1 \\ a_{21}I_2 + a_{22}I_2 + \cdots + a_{2N}I_N = E_2 \\ \cdots\ \cdots\ \cdots\ \cdots\ \cdots \\ a_{N1}I_1 + a_{N2}I_2 + \cdots + a_{NN}I_N = E_N \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{I} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdots \\ I_N \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{E} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdots \\ E_N \end{pmatrix}$$

Solusi untuk arus dapat diperloeh dengan melakukan perkalian ruas kiri dan kanan menggunakan invers matriks A, yaitu

$$\boldsymbol{A^{-1}(A\ I) = A^{-1}\ E} \quad atau \quad \boldsymbol{I = A^{-1}\ E}$$

Inverse suatu matriks dapat diperoleh dengan mudah menggunakan Excel seperti yang akan dibahas dalam contoh berikut ini.

Contoh Soal

Selesaikan persoalan yang dibahas untuk rangkaian dua loop di atas (**Gambar 2.29**) menggunakan metode matriks.

Penyelesaian

$$I_1R_1 + I_1R_3 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = 0$$
$$I_2R_2 - (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) = 0$$

yang dapat diulang menjadi :

$$(R_1 + R_3)\, I_1 + 0\, x\, I_2 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$
$$0\, x\, I_1 + I_2R_2 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

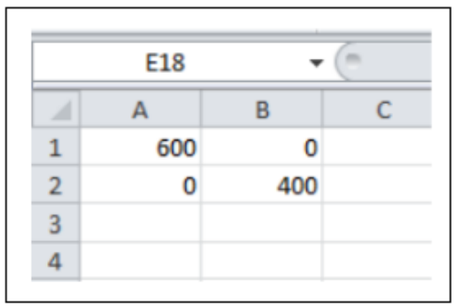
Dari persamaan di atas, kita dapatkan

$$A = \begin{pmatrix} R_1 + R_3 & 0 \\ 0 & R_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 400 \end{pmatrix}$$

Dengan mengacu pada **Gambar 2.29**, maka pada loop 1, $\varepsilon_1 = 2\,V$ dan $\varepsilon_2 = -4\,V$, pada loop 2, $\varepsilon_2 = 4\,V$ dan $\varepsilon_3 = 8\,V$, dengan demikian :

$$E = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 - 4 \\ 4 + 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 12 \end{pmatrix}$$

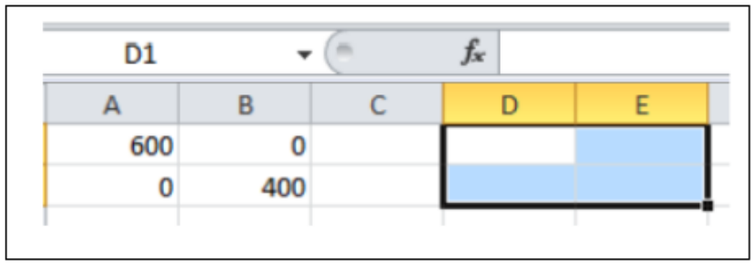
Untuk mencari solusi untuk arus **I**, maka kita perlu mencari dahulu inverse dari matriks A. Kita dapat menentukan dengan mudah menggunakan Excel. Caranya, ketik elemen-elemen matriks pada excel. Misalkan kita masukkan elemen-elemen tersebut pada elemen **A1** sampai **B2.**



Gambar 2.30 Elemen-elemen Matriks A

Untuk mencari invers matrik A, kita *highligh* sel kosong yang ukurannya sama dengan ukuran matriks A, yaitu 2×2. Misalkan

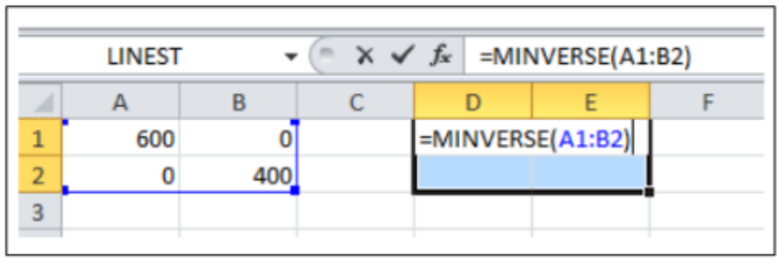
kita *highlight* sel **D1** sampai **D2** seperti pada **Gambar 2.31**. Sel kosong inilah yang akan digunakan untuk menempatkan elemen matriks inverse.



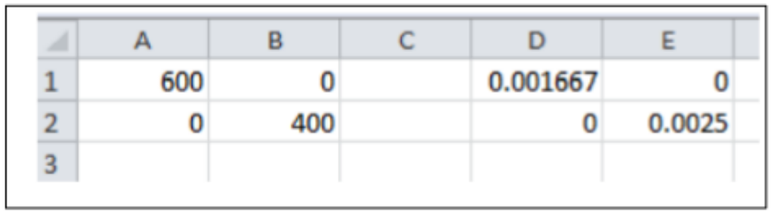
Gambar 2.31 Highligh sel kosong untuk menempatkan matriks invers

Setelah dihighlight maka ketik persamaan **=MINVESRE(A1:A2)** seperti ditujukkan pada **Gambar 2.32**. Kemudian silanjutkan dengan menekan secara serentak tombol **CTR+SHIFT+ENTER**. Akhirnya kita peroleh matriks inverse pada sel **D1** sampai **E2** seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.33**. Jadi kita peroleh:

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 0,001667 & 0 \\ 0 & 0,0025 \end{pmatrix}$$



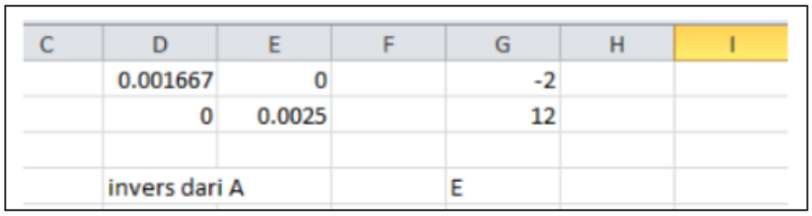
Gambar 2.32 Persamaan Untuk Menentukan Matriks Invers



Gambar 2.33 Matriks Invers dari A yang Diperoleh Terdapat Di cell D1 sampai E2

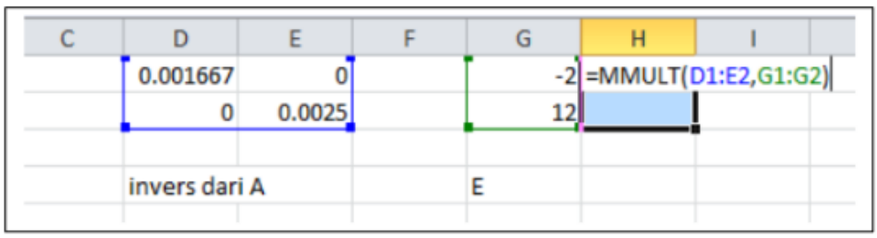
Setelah kita mendaptkan invers dari matrik A maka kita akan megalikan invers tersebut dengan **E** untuk mendapatkan **I**. Caranya

adalah mengisi elemen-elemen **E** ke dalam Excel. Misalkan kita isi pada cell **G1** dan **G2** seperti pada **Gambar 2.34**.



Gambar 2.34 Cell D1 sampai E2 adalah invers dari matriks A dan cell G1 sampai G2 adalah elemen matriks E.

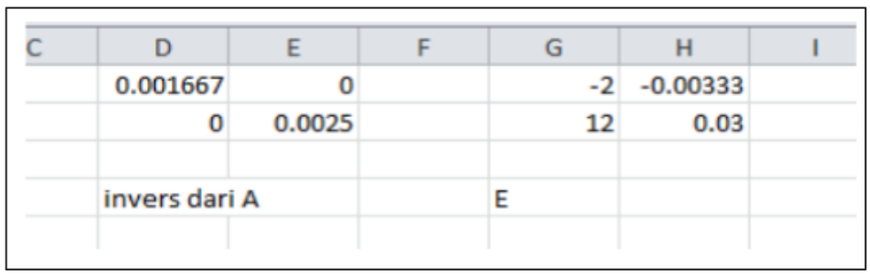
Kita selanjutnya melakukan operasi matiks menggunakan Excel. Karena hasil perkalian menghasilkan matriks kolom dengan jumlah dua baris maka kita highlight satu kolom dengan dua baris utuk menempatkan hasil perkalian. Misalkan kita akan tempatkan hasil perkalian pada cell **H1** sampai **H2** seperti diilustrasikan pada **Gambar 2.35**.



Gambar 2.35 Cell H1 dan H2 adalah tempat untuk melatakkan hasil perkalian matiks.

Setelah highlight maka ketik persamaan **=MMUTL(D1:E2,G1:G2)** yang dilanjutkan dengan menekan tombol **CTR+SHIFT+Enter** secara bersamaan sehingga diperoleh hasil paerkalian sepeti pada **Gambar 2.36**.

Dari hasil ini kita simpulkan $\boldsymbol{I_1 = -0,00333\ Ampere}$ dan $\boldsymbol{I_2 = 0,03\ Ampere}$, sama seperti yang diperoleh sebelumnya.



C	D	E	F	G	H	I
	0.001667	0		-2	-0.00333	
	0	0.0025		12	0.03	
	invers dari A			E		

Gambar 2.36 Hasil perkalian invers matriks A dengan E tampak pada kolom H.

Selain penjelasan di atas, kiranya perlu diketahui langkah-langkah penyelesain rangaikan majemuk, sebagai berikut :

- Gambarlah rangkaian listriknya.
- Tetapkan symbol dan arah dari arusnya pada setiap cabang yang penting. Gunakanlah satu arus penunjuk untuk satu cabang yang diberikan walaupun cabang tersebut terdiri dari beberapa elemen. Jika dua cabang terpisah satu dengan yang lainnya, maka arus pada cabang harus berbeda pula satu dengan yang lainnya.
- Sederhanakanlah sistem susunan seri dan paralel jika hal tersebut memungkinkan.
- Tetapkan loop berikut arahnya dan usahakan banyak loop dalam rangkaian seminimal mungkin dengan setiap komponen yang berarus dalam rangkaian dilalui oleh minimal satu buah loop.
- Tulislah persamaan untuk setiap loop yang ada dalam rangkaian dengan menggunakan Hukum Kirchoff II.
- Tulis persamaan-persamaan arus untuk tiap titik pencabangan dengan Hukum Kirchoff I.
- Selesaiakanlah dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah di atas.

8. Sumber-sumber Arus Searah

Sumber arus searah adalah semua sumber listrik yang dapat menimbulkan arus listrik secara konstan (tetap) terhadap waktu., baik yang diakibatkan oleh proses kimia atau proses lainnya. Sumber-sumber arus searah yang berasal dari proses kimiawi

adalah elemen-elemen elektronika yang terdiri atas elemen primer, elemen sekunder, dan elemen bahan bakar.

Elemen-elemen elektrokimia berasal dari reaksi oksidasi-reduksi, dimana reaksi tersebut menyangkut perpindahan elektron. Jika reaksi tersebut terjadi secara spontan dapat dijadikan sumber arus. Perpindahan elektron dalam larutan dapat dilakukan melalui kawat, dimana sistem tersebut dikatakan sebagai *sistem elektrokimia*. Di dalam elemen tersebut, terjadi perubahan energi kimia menjadi energi listrik.

8.1. Elemen Primer

Elemen primer adalah elemen elektro-elektro kimia yang memerlukan penggantian bahan-bahan pereaksi setelah sejumlah energi dibebaskan melalui rangkaian luar. Yang termasuk kelompok elemen primer, diantaranya adalah *Elemen Volta, Leclanche, Elemen Kering*, dan *Weston*

Elemen Volta

Elemen elektrikimia paling sederhana adalah *elemen volta*. *Alexandro Volta* (1745 – 1827) berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, mengambil suatu kesimpulan bahwa pasangan logam tertentu akan menghasilkan GGL yang lebih besar daripada pasangan logam lainnya.



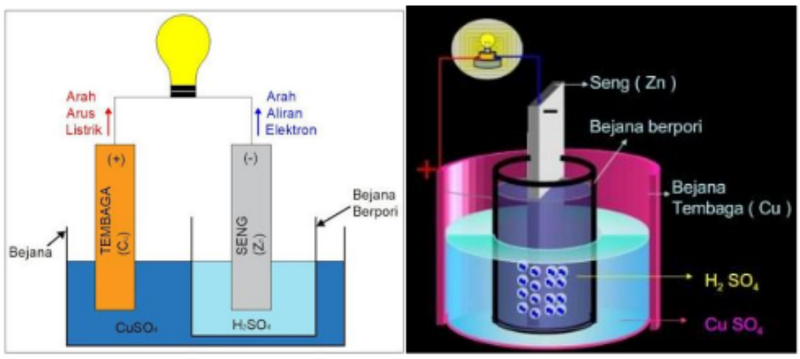
Gambar 2.37 Elemen Volta

Elemen *volta* dibuat dengan mempergunakan batang temabga (Cu) sebagai kutub positif dan batang seng (Zn) sebagai kutub negative. Sedangkan larutan elektrolitnya mempergunakan asam sulfat encer (H_2SO_4). Jika digunakan, maka di dalam larutan molekul-molekul asam sulfat akan terurai menjadi ion hidrogen yang bermuatan positif dan ion-ion sulfat yang bermuatan negatif. $\mathbf{H_2SO_4 \rightarrow 2\,H^+ + SO_4^{-2}}$. Jika dihubungkan dengan kawat dan sebuah lampu pada kutub positif dan negatif, maka lampu tersebut akan berpijar (nyala). Elektron-elektron pada kawat bergerak dari seng menuju tembaga. Elektron tersebut bergerak karena adanya selisih (beda) potensial. Tetapi, lampu berpijar tidak lama, karena pelat tembaga tertutup lapisan gelembung hidrogen. Peristiwa pelapisan gelumbung pada pelat tembaga disebut *polarisasi*. Energi yang digunakan untuk memindahkan elektron, berasal dari energi yang dibebaskan pelat seng ketika bereaksi dengan larutan elektrolit. Jadi elemen mengubah *energi kimia* menjadi *energi listrik*.

Elemen Daniel

Untuk mencegah terjadinya polarisasi dari hidrogen, maka elektroda dilindungi oleh suatu bahan kimia yang disebut *depolarisator*. Dipolarisator dipisahkan dari larutan asam sulfat (elektrolit) dengan menggunakan bejana berpori sehingga ion-ion masih bisa lewat dari elektroda satu ke elektroda lainnya melalui larutan elektrolit dan depolarisator.

Dalam Elemen Daniel, elektroda negatifnya terbuat dari seng dan elektroda positifnya adalah bejana yang terbuat dari tembaga. Larutan yang dipergunakan ada 2 macam , yaitu *larutan asam sulfat encer* (H_2SO_4) dan *larutan tembaga sulfat* (CuSO4) sebagai depolarisator.



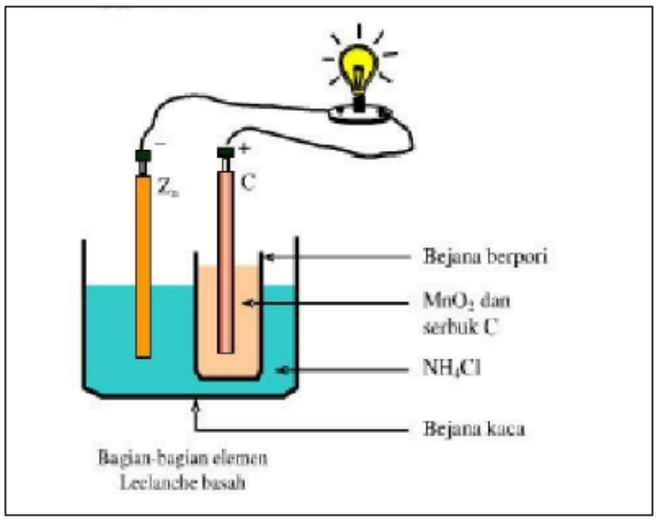
Gambar 2.38. Elemen Daniel

Larutan tembaga sulfat akan megikat hidrogen sehingga tidak sampai menutup kutub positifnya. $\mathbf{H_2 + CuSO_4 \rightarrow Cu + H_2SO_4}$. Karena adanya larutan tembaga sulfat, maka elemen Daniel lebih tahan dibandingkan elemen *Volta*.

Elemen Leclanche

Elemen *Leclanche* terbuat dari bejana kaca. Elektroda positifnya menggunakan batang karbon, sedangkan elektroda negatifnya tebuat dari batang seng. Larutan elektrolit yang digunakan larutan *ammonium klorida* (NH_4Cl), sedangkan sebagai depolisatornya adalah *mangan dioksida* (MnO_2) yang dicampur dengan serbuk karbon. Prinsip kerjanya mirip dengan elemen Daniel.

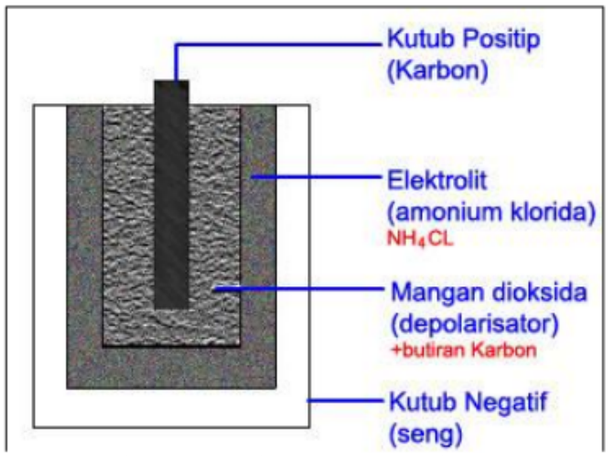
Ketika ion-ion seng masuk kedalam larutan ammonium klorida , batang seng akan mejadi negatif terhadap larutan logam. Ammonium klorida memberikan ion NH_4^+ menembus bejana berpori menuju batang karbon dan memberikan muatan positifnya pada batang karbon.



Gambar 2.39 Elemen Leclanche

Elemen Kering

Elemen Kering merupakan pengembangan dari elemen *Leclanche*. Elemen kering ini lebih mudah pemakaiannya.



Gambar 2.40 Elemen Kering

Ada tiga hal penting tentang elemen kering adalah :

- Elemen ini disebut elemen primer karena elemen ini tidak dapat dimuati kembali jika muatannya habis.
- Selama elemen ini bekerja, seng berubah menjadi seng klorida, hidrogen dibebaskan dan seng serta ammonium klorida berkurang.
- Gaya gerak listrik elemen sebesar 1,5 V.

Larutan elektrolit elemen kering adalah menggunakan pasta ammonium klorida yang dicampur dengan serbuk kayu atau tepung. Elemen kering banyak digunakan pada radio transistor, jam dinding, lampu senter, dan peralatan elektronik lainnya.

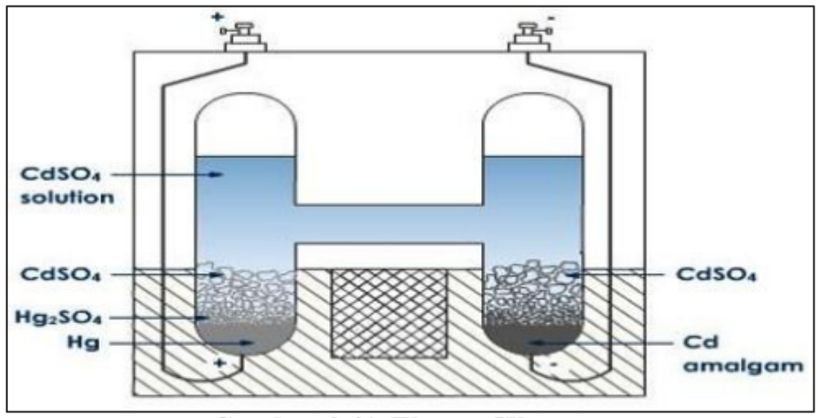
Elemen Weston

Di dalam elemen *Weston*, elektroda positifnya menggunakan air raksa dan *amalgama kadnium* sebagai elektroda negatifnya. Sedangkan sebagai polarisator, digunakan campuran *merkurosulfat* dan *kadniumsulfat* berbentuk pasta.

Salah satu ujung bejana berbentuk **H** berisi merkuri, di atasnya ditempatkan pasta merkuri sulfat dan merkuri. Di ekstremitas lain ditempatkan *amalgam Kadmium*. Sisa bejana diisi dengan larutan jenuh sulfat yang mengandung kelebihan kristal $\mathbf{CdSO_4.\frac{8}{3}H_2O}$ padat. Reaksi yang terjadi di dalam sel ketika menghasilkan arus I,

$$\mathbf{Cd_{(s)} + Hg_2SO_{4\,(s)} + H_2O_{(l)} \rightarrow CdSO_4.8/3\,H_2O_{(s)} + 2\,Hg_{(l)}}$$

Potensi sel adalah 1,0183 V pada 25 ^{0}C dan memiliki koefisien suhu yang sangat kecil.



Gambar 2.41 Elemen Weston

8.2. Elemen Sekunder

Elemen sekunder adalah elemen elektrokimia yang dapat memperbaharui bahan-bahan pereaksinya, yaitu dengan cara mengalirkan arus listrik dari sumber lain yang arahnya berlawanan

dengan arus yang dihasilkan elemen-elemen tersebut. Elemen sekunder dalam kehidupan sehari-hari dikenal dengan sebutan *akumulator* (*accu*).

Akumulator (Aki)

Jenis akumulator yang umum digunakan adalah akumulator timbal. Akumulator terdiri atas dua buah pelat yang dicelupkan dalam larutan asam sulfat encer. Pelat terbuat dari timbal dimana letak pelat positif dan pelat negatif saling berdekatan tetapi dicegah (dipisah) agar tidak saling menyentuh oleh sebuah pemisah yang terbuat dari bahan penyekat (isolator).

Pada saat digunakan, akumulator sudah terisi dan *kutub (+) adalah* PbO_2 dan *kutub (-) adalah Pb*. Larutan kimia H2SO4 kemudian mengalirkan arus listrik sehingga terjadi perubahan dari energi kimia menjadi energi listrik. Reaksi kimia yang terjadi saat pemakaian akumulator adalah sebagai berikut :

$$\boldsymbol{PbO_2 + 2\,H^+ + 2\,e^- \;\rightarrow\; PbO + H_2O}$$

$$\boldsymbol{Pb + {SO_4}^{-2} + H_2O \;\rightarrow\; PbO + H_2SO_4 + 2\,e^-}$$

Sedangkan pada saat pengisian akumulator dalam keadaan kosong dan akan diisi kembali. *Kutub (+) adalah* $\boldsymbol{PbO}$ dan *Kutub (-) adalah* $\boldsymbol{PbO}$. Dalam larutan $\mathbf{H_2SO_4}$ akan terjadi perubahan energi listrik menjadi energi kimia. Reaksi kimia yang terjadi pada saat pengisian akumulator adalah sebagai berikut :

- Pada Kutub Positif

  $$\mathbf{PbO + {SO_4}^{-2} + H_2O \;\rightarrow\; PbO_2 + H_2SO_4 + 2\,e^-}$$

- Pada Kutub Negatif

  $$\mathbf{PbO + 2\,H^+ + 2\,e^- \;\rightarrow\; Pb + H_2O}$$

Jadi, pada saat akumulator digunakan, arah arusnya berlawanan dengan arah pada saat akumulator diisi. GGL yang dihasilkan oleh sebuah akumulator sebesar 2 V. sebuah baterai mobil (aki) terdiri

dari enam buah akumulator yang disusun seri sehingga GGL-nya adalah 12 V.

Empat hal penting yang perlu diperhatikan selama proses pengisian kembali sebuah aki, adalah :

- Baterai pengisi yang digunakan harus memiliki GGL yang lebih besar daripada GGL aki.
- Lebih efektif untuk mengisi dengan arus kecil dalam selang waktu yang lama, daripada denga arus yang besar dalam selang waktu yang singkat.
- Selama proses pengisian, konsentrasi asam sulfat bertambah dan tinggi permukaan cairan turun. Pada ketinggian tertentu, cairan harus ditambah dengan air suling.
- Kapasitas aki diukur dalam satuan *ampere jam*.

Adapun alat yang digunakan untuk memeriksa muatan aki mobil adalah *hidrometer*.

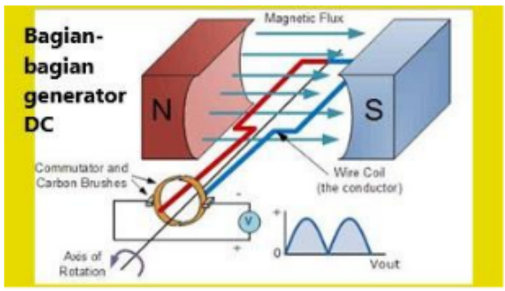
Elemen Bahan Bakar

Elemen bahan bakar adalah elemen elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia bahan bakar yang diberikan secara kontinyu menjadi energi listrik. Elemen ini masih dalam tingkat pengembangan. Elemen hidrogen oksigen ternyata telah dipergunakan dalam penerbangan. Elemen ini menggunakan elektroda nikel katalis dan kalium hidroksida sebagai larutan elektrolitnya.

Keunggulan elemen ini adalah tidak perlu mengadakan penggantian bahan-bahan seperti pada elemen primer atau pengisian seperti pada elemen sekunder.

Generator Arus Searah

Generator arus searah adalah suatu alat yang dapat mengubah energi mekanik atau energi gerak menjadi energi listrik.



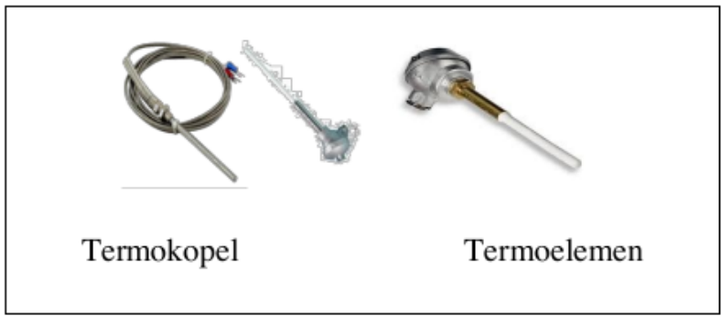
Gambar 2.42 Generator Arus Searah

Prinsip kerja generator adalah peristiwa induksi, yaitu jika kumparan kawat penghantar digerakkan dalam medan magnet dan memotong garis-garis gaya medan magnetnya, maka akan timbul gaya gerak listrik (GGL) induksi, yang kemudian akan terjadi arus listrik.

Termoelemen

Tahun 1826, *Thomas Johann Seebach* menemukan peristiwa terjadinya arus listrik karena adanya perbedaan suhu. Jika terdapat sebatang logam yang memiliki suhu ujung yang tidak sama, maka akan terjadi perpindahan elektron dari ujung yang satu ke ujung yang lainnya dan mengakibatkan timbulnya arus listrik. Arus listrik yang timbul karena perpindahan elektron disebut *arus termolistrik*, sedangkan gaya listriknya dinamakan *gaya gerak listrik Seebach*.

Hal tersebut di atas menunjukkan bahwa kalor atau panas berubah menjadi energi listrik. *GGL Seebach* inilah yang dijadikan dasar untuk membuat *termoelemen*, sedangkan pasangan logam yang bekerja di dalamnya dinamakan *termokopel*.



Gambar 2.43 Termoelemen Dan Termokopel

BAB III
ENERGI DAN DAYA LISTRIK

1. Energi Listrik

Energi listrik adalah energi yang disebabkan oleh mengalirnya muatan listrik dalam suatu rangkaian tertutup. Energi listrik dapat diubah menjadi berbagai bentuk energi yang lain. Sumber-sumber listrik seperti baterai yang dihasilkan oleh perubahan energi kimia dihasilkan energi listrik dan ada energi mekanik menjadi energi listrik, bahkan energi panas (kalor) menjadi energi listrik. Untuk memelihara arus listrik di dalam sebuah sirkuit, diperlukan energi. Energi listrik dapat dirubah menjadi panas, usaha, mekanik, energi kimia atau energi cahaya.

Untuk tegangan dan kuat arus yang konstan, maka besarnya energi listrik dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$W = V\,I\,t$$

dimana, W = usaha listrik (energi)
I = arus listrik
V = tegangan listrik (potensial)
t = lama arus mengalir

Sedangkan energi listrik yang terdapat pada sebuah hambatan, besarnya dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$W = I^2\,R\,t$$

dimana, W = usaha listrik (energi)
I = arus listrik
R = hambatan
t = lama arus mengalir

Untuk pemakaian energi listrik dalam jumlah besar, maka satuan dari energi listrik adalah *kilo watt jam* (*kWh*).

Untuk menghitung banyaknya kalor yang dihasilkan energi listrik, Joule melakukan suatu percobaan dan menyimpulkan suatu pendapat, yaitu : *Banyaknya kalor yang terjadi karena arus listrik adalah berbanding lurus dengan :*

- *Beda potensial antara kedua ujung kawat penghantar*
- *Kuat arus yang mengalir melalui kawat penghantar*
- *Waktu lamanya arus mengalir*

Besarnya kalor yang terjadi, dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{Q = 0,24\ I^2\ R\ t}$$

dimana, Q = banyak kalor

I = arus listrik

R = hambatan listrik

t = lamanya arus mengalir

Sumber-sumber listrik mempunyai kemampuan untuk mempertahankan beda potensial antara kedua kutubnya. Energi listrik dilambangkan dengan W. Sedangkan perumusan yang digunakan untuk menentukan besar energi listrik adalah :

$$\boldsymbol{W = Q\ V}$$

dimana, W = Energi listrik (*Joule*)

Q = Muatan listrik (*Coulomb*)

V = Beda potensial (*Volt*)

1 kWh = 3,6 x 10^6 Joule

Contoh Soal

1) Lampu yang dipasang di ruang tamu rumah Bapak Budi tegangannya 220 V mengalir alur listrik 2 A selama 5 menit. Tentukan besar energi listrik yang diperlukan lampu untuk menyala dengan baik!

   Penyelesaian

   V (beda potensial) = 220 V, 1 (kuat arus) = 2 A, t (waktu) 5 menit = 300 s

   W = V I t = 220 x 2 x 300 = 132000 Joule = 132 kJ

2) Sebuah setrika listrik dipasang pada tegangan 220 volt dan kuat arus 1 ampere. Berapa energi yang diperlukan selama 1 jam?

Penyelesaian

Menentukan energi listrik jika diketahui tegangan = 110 volt, kuat arus = 1 ampere, dan waktunya, 1 jam = 3600 detik.

W = V I t = 110 x 1 x 3600 = 396000 Joule = 396 kJ.

2. Daya Listrik

Daya listrik adalah banyaknya usaha yang dihasilkan tiap detik. Satuan daya listrik adalah :

- 1 watt = 1 VA = 11 joule/detik
- 1 kilowatt = 1 KVA = 1000 joule/detik
- 1 wattdetik = 1 joule
- 1 wattjam = 3600 joule
- 1 ampere = 1 coul/detik
- 1 ampere detik = 1 coulomb
- 1 hp = 746 watt
- 1kW = 1,36 hp

Jika arus listrik mengalir pada sebuah hambatan, maka hambatan tersebut akan menjadi panas. Ini menunjukkan bahwa pada hambatan tersebut terjadi proses perubahan energi dari energi listrik menjadi energi panas. Pertanyaannya, *berapakah energi listrik yang diubah penjadi panas per detik?* Atau *berapakah daya listrik yang diubah menjadi panas per detik pada suatu hambatan?*

Mari kita tinjau arus yang mengalir melewati sebuah hambatan selama selang waktu Δt . Jumlah muatan yang mengalir selama waktu ini adalah $\Delta q = I \Delta t$. Arus mengalir dari satu ujung hambatan ke ujung lain yang memiliki beda potensial V. Dengan demikian, ketika muatan bergerak dari satu ujung hambatan ke ujung lainnya, muatan tersebut mendapat tambahan energi sebesar $\Delta U = \Delta q\, V$.

Tambahan energi ini seharusnya menyebabkan energi kinetik muatan saat mencapai ujung kedua dari hambatan makin besar. Atau saat mencapai ujung kedua hambatan, kecepatan muatan makin besar sehingga arus di ujung kedua muatan juga makin besar. Tetapi, dalam rangkaian besar arus di ujung awal maupun

ujung akhir hambatan sama. Ini berarti tambahan energi yang didapat muatan dibuang dalam bentuk panas sehingga energi kinetik muatan tidak berubah. Jadi, jumlah energi yang diubah menjadi panas adalah

$$\Delta \boldsymbol{Q} = \Delta \boldsymbol{q}\, \boldsymbol{V} = \boldsymbol{I}\, \Delta \boldsymbol{t}\, \boldsymbol{V}$$

Dimana, ΔQ = energi panas (*Joule*)
Δq = muatan (*Coulomb*)
I = arus listrik (*Ampere*)
V = potensial (*Volt*)

Dengan demikian, daya yang dibuang pada hambatan adalah

$$\boldsymbol{P} = \frac{\Delta \boldsymbol{Q}}{\Delta \boldsymbol{t}} = \boldsymbol{I}\, \boldsymbol{V}$$

Dengan menggunakan hukum ohm **V = I R**, maka dapat dituliskan

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{I}^{\boldsymbol{2}}\, \boldsymbol{R}$$

dimana, P = daya listrik (*Watt*)
R = hambatan (*Ohm*)

Contoh Soal

1) Lampu pijar 75 W, 220 V dihubungkan secara paralel dengan lampu pijar 40 W, 220 V. Berapakah hambatan total lampu? Berapa daya yang dihasilkan gabungan dua lampu jika dihubungkan dengan tegangan 110 V ?

   Penyelesaiam

   Lampu pijar bekerja berdasarkan prinsip produksi panas pada kawat filamen. Kawak filament memiliki hambatan yang cukup besar sehingga ketika dialiri arus listrik maka terjadi disipasi daya dalam bentuk panas dalam jumlah besar. Suhu filament menjadi sangat tinggi (ribuan derajat celcius) sehingga filament berpijar. Penulisan 75 W, 220 V artinya jika dihubungkan dengan tegangan 220 V maka lampu menghasilkan daya 75 W. Ini berarti,

hambatan yang dimiliki kawat filament memenuhi persamaan, $\mathbf{R = \frac{V^2}{P}}$. Dengan demikian,

Hambatan lampu pertama, $\mathbf{R_1 = \frac{V^2}{P_1}} = \frac{220^2}{75} = 645\ \Omega$

Hambatan lampu kedua, $\mathbf{R_2 = \frac{V^2}{P_2}} = \frac{220^2}{40} = 1210\ \Omega$

Karena kedua lampu dihubungkan secara paralel, maka filament lampu membentuk susunan hambatan parallel. Hambatan total lampu, R menjadi

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{645} + \frac{1}{1210} = 0{,}00155 + 0{,}00826 = 0{,}002376$$

$$R = \frac{1}{0{,}002376} = 421\ \Omega$$

Karena lampu dihubungkan secara parallel maka tegangan antara dua ujung lampu sama. Dengan menghubungkan pada tegangan 110 V maka daya total gabungan dua lampu menjadi,

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{110^2}{421} = 28{,}7\ W$$

2) Suatu loop mengandung sebuah baterei dengan tegangan 1,5 V dan sebuah hambatan dengan hambatan 2 kΩ. Anggaplah baterei memiliki hambatan dalam nol. (a) Berapakah arus yang mengalir dalam loop? (b) berapa daya listrik yang hilang pada hambatan? (c) Berapa daya listrik yang hilang pada baterei ?

Penyelesaian

a) Arus yang mengalir dalam loop

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{1{,}5}{2000} = 0{,}00075\ A$$

b) Daya listrik yang hilang pada hambatan

$$P = I^2 R = (0{,}00075)^2\ 2000 = 0{,}0011\ W$$

c) Daya listrik yang hilang pada baterai

$$P = \varepsilon I = 1{,}5\ x\ 0{,}00075 = 0{,}0011\ W$$

Mohon diperhatikan bahwa daya yang hilang pada baterei sama dengan daya listrik yang diubah menjadi energi panas pada hambatan.

3) Dua hambatan, ketika dihubungkan secara seri ke tegangan 110 V menghasilkan daya seperempat dari yang dihasilkan ketika kedua hambatan tersebut dihubungkan secara paralel. Jika hambatan satu hambatan 2,2 kΩ, berapakah hambatan hambatan yang lainnya ?

Penyelesaian

Misalkan hambatan hambatan yang lain R, maka:

i. Ketika dihubungkan seri, hambatan total adalah $R_s = R + 2200\ \Omega$. Daya yang dihasilkan $P_s = \frac{V^2}{R_s}$

ii. Ketika dihubungkan secara paralel maka hambatan total R_p, memenuhi $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R} + \frac{1}{2200} = \frac{2200 + R}{2200\ R}$ atau $R_p = \frac{2200\ R}{2200 + R}$, Daua yang dihasilkan : $P_p = \frac{V^2}{R_p}$

Berdasarkan informasi soal, $P_s = \frac{1}{4}\ P_p$ sehingga $\frac{V^2}{R_s} = \frac{1}{4}\ \frac{V^2}{R_p}$ atau $\frac{1}{R_s} = \frac{1}{4}\frac{1}{R_p}$ atau $R_s = 4\ R_p$

$$R + 2200 = \frac{4\ x\ 2200\ R}{R + 2200}$$

$$(R + 2200)^2 = 8800\ R$$
$$R^2 + 4400\ R + 4.840.000 = 8800\ R$$
$$R^2 - 4400\ R + 4.840.000 = 0$$
$$(R - 2200)^2 = 0 \quad atau \quad R = 2200\ \Omega$$

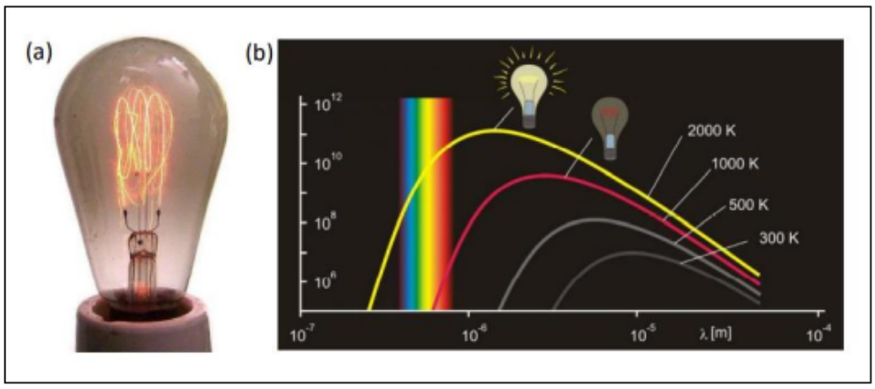
Jadi hambatan lain memiliki hambatan $2200\ \Omega$ juga.

3. Alat Listrik

3.1. Lampu Pijar

Kalau kita beli lampu pijar maka kita akan melihat filament tipis di dalamnya. Ada yang digulung da nada yang dilewatkan berikut saja pada beberapa untai penyagga. Bagaimana prinspip kerja lampu pijar? Filamen lampu pijar adalah kawat yang memiliki hambatan cukup tinggi. Ketika digunungkan dengan tegangan listrik, seperti tegangan listrik PLN, maka terjadi disipasi daya yang besar pada filament tersebut sehingga suhu filament meningkat tajam. Ketika suhu sudah mencapai di atas 1000 ^{o}C maka filament mulai memancarkan cahaya (Gambar 3.42). Warna cahaya yang dipancarkan bergantung pada suhu yang dimiliki. Agar lampu pijar menghasilkan warna kuning seperti pada Gambar 3.42, maka suhu filament harus sekitar 2000 ^{o}C. Ini adalah suhu yang sangat tinggi yang dapat membuat kebanyakan material meleleh. Pada suhu ini pun atom-atom gas akan terurai menjadi ion positif dan negative (electron lepas dari atom) sehingga gas berubah menjadi konduktor. Untuk menghindari terbentuknya gas yang bersifat konduktif maka ruang dalam lampu pijar divakumkan. Namun, filament lampu pijar terbuat dari material yang bisda bertahan pada suhu tersebut.

Timbul pertanyaan, berapakah hambatan filament dalam lampu pijar? Kita dapat menghitung dengan mudah dengan mengacu pada data tegangan dan daya yang dimiliki lampu. Misalkan pada lampu pijar tertulis tegangan 220 Volt dan daya 50 Watt. Maka hambatan filament lampu pijar adalah $R = V^2/P = 220^2/50 = 968\ \Omega$.



Gambar 3.1 (a) Contoh lampu pijar yang sedang menyala. Tampak filament berwarna kekuningan. (b) kurva intensitas cahaya yang dipancarkan lampu pijar dikaitkan dengan suhu filament (Science in School)

Saat ini lampu pijar mulai jarang digunakan karena tidak efisien. Sebagian energi listrik yang diberikan pada filament tidak semuanya berubah menjadi cahaya. Sebagian energi tersebut berubah menjadi panas. Kalau kita pegang lampu pijar yang telah menyala beberapa saat maka kita merasakan suhu lampu yang sangat tinggi. Teknologi sudah berkembang sangat pesat sejak *Thomas Alfa Edison* menemukan lampu pijar. Lampu hemat energy yang digunakan saat ini berbasis light emitting diode (LED). Energi listrik yang dialirkan ke LED sebagian besar berubah menjadi cahaya dan hanya sedikit yang menjadi panas. Dengan demikian LED sangat efisien. Di samping itu, LED dapat dijalankan dengan sumber tegangan listrik yang sangat kecil namun tetap menghasilkan cahaya yang terang. Hanya dengan menggunakan baterei maka kita dapat menghasilkan cahaya LED yang sangat terang. Dan kerena sangat hemat maka satu baterei dapat menyalakan lampu LED beberapa jam.

3.2. Kabel Listrik

Jika kita melihat rumus $\mathbf{P = I^2 R}$ bahwa untuk memperkecil disipasi daya pada kabel, maka hambatan listrik kabel harus diperkecil. Dengan mengacu pada rumus $\mathbf{R = \rho \frac{L}{A}}$ maka salah satu cara untuk mengurangi hambatan kabel adalah menggunakan material dengan hambatan jenis kecil seperti tembaga atau

aluminium. Tetapi hambatan jenis material di alam sudah tertentu dan tidak dapat diubah kecuali melakukan rekayasa material. Rekayasa tersebut dapat berupa membuat material campuran atau material baru yang memiliki hambatan lebih kecil dari material yang ada di alam. Pendekatan yang lebih mudah adalah menggunakan kabel dengan luas penampang lebih besar. Makin besar luar penampang maka hambatan makin kecil. Namun cara ini akan mengalami kendala di lapangan. Kalau luas penampang besar maka kabel menjadi lebih kaku, bahkan sulit dibengkokkan. Kesulitan tersebut menyebabkan kabel sulit disambung atau dililit, *padahal dalam sejumlah penerapan kabel, proses persambungan dan lilitan adalah kegiatan yang selalu muncul? Lalu bagaimana solusinya?* Caranya adalah membuat kabel bentuk serabut, seperti diiliustrasikan pada Gambar 3.43 Kabel secara keseluruhan terdiri dari serabut dengan luas penampang kecil. Karena jumlah serabut banyak maka luas penampang total seluruh serabut menjadi bear sehingga hambatan kabel menjadi kecil. Namun, karena kabel merupakan kumpulan serabut maka kabel masih mudah untuk digulung atau dililit.



Gambar 3.2 Contoh Kabel Listrik Berserabut Agar Mudah Dilengkungkan dan Dililit

3.3. Transmisi Melalui Jaringan SUTET

Jaringan SUTET (saluran udara tegangan ekstra tinggi) umunya digunakan untuk menyalurkan energi dengan daya besar. SUTET umumnya dipasang dari pembangkit tenaga listrik ke lokasi pemukiman. Kalau kalian melewati jalan tol Purbaleunyi maka akan mengamati sejumlah SUTET di atas jalan tol. Di sekitar tol Purbaleunyi terdapat dua PLTA besar, yaitu Jatiluhur dan Cirata yang berada di sungai Citarum. Dua PLTA tersebut berada di Kabupaten Purwakarta, Jawa Barat. PLTA lain yang juga berada di sungai Citarum adalah PLTA Saguling yang berlokasi di Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat. Tegangan listrik pada SUTET dapat mencapai 250.000 volt. Pertanyaannya adalah, mengapa listrik tersebut ditransmisikan melalui tegangan yang tinggi, bukan melalui arus yang tinggi ?

Pembangkit listrik menghasilkan daya listrik tersentu. Contohnya, PLTA Jatuluhur menghasilkan daya 187 MW, PLTA Saguling dan Cirata masing-masing menghasilkan daya 700 MW dan 1.008 MW. Jika energi listrik ditransmisikan pada tegangan V, maka arus litrik yang mengalir adalah $\mathbf{I = P/V}$. Tampak bahwa arus listrik yang ditransmisikan berbanding terbalik dengan tegangan transmisi. Dengan menggunakan tegangan transmisi ratusan kilovolt maka arus yang dihasilkan menjadi sangat kecil.

Jalur transmisi memiliki hambatan tertentu. Dengan mengingat persamaan (3.32) tampak bahwa daya yang terbuang dalam bentuk panas sepanjang jalur transmisi berbanding lurus dengan kuadrat arus transmisi. Akibatnya, dengan memperkecil arus transmisi akibat penggunakan tegangan ekstra tinggi maka daya yang terbuang sepanjang jaringan menjadi minimum. Dengan perkataan lain, penggunakan tegangan transmisi tinggi akan meningkatkan efisiansi transmisi daya.

3.4. Furnace

Furnace adalah alat pemanas suhu tinggi. Susu yang dihasilkan furnace bisa di atas 1000 ^{o}C. Bagaimana menghasilkan suhu sebesar itu?

Prinsipnya adalah menggunakan material yang memiliki hambatan sangat besar. Material tersebut dialiri arus listrik yang sangat besar sehingga dihasilkan panas yang besar pula. Panas yang dihasilkan harus sedikit mungkin mengalir ke udara sekitar sehingga yang dipanasi hanya ruang dalam furnace. Oleh karena itu dinding futnace terbuat dari material yang sangat sulit dilewati panas dan biasanya sangat tebal. Energi yang dihasilkan hambatan semata-semata digunakan untuk memanaskan udara dalam ruang furnace.

Suhu hambatan penghasil panas lebih tinggi lagi daripada suhu ruang dalam furnace. Oleh karena itu, material yang dipanasi selain memilki hambatan listrik yang besar juga harus memiliki ketahanan yang besar terhadap panas (tidak mudah rusak oleh pemanasan pada suhu tinggi). Apalagi pemanasan furnace dilakukan berlang-ulang sehingga hambatan penghasil panas berulang-ulang berada pada suhu rendah dan suhu sangat tinggi. Dalam kondisi seperti itu kebanyakan material akan cepat rusak. Maka hambatan elemen pemanas furnace harus berupa material khusus. Contoh materialnya adalah *Silicon Carbida* (SiC). Material ini dibentuk oleh atom silicon dan karbon, memiliki ketahahan termal sangat tinggi.



Gambar 3.3 Contoh Silikon Carbida (SiC)

4. Alat Pengukur Listrik

4.1. Galvanometer

Nama *Galvanometer* diambil dari nama seorang peneliti listrik asal Italia yang bernama *Luigi Galvani*. *Galvanometer* merupakan sebuah instrumen elektromekanis yang dipakai untuk menunjukkan arus listrik dan mendeteksinya.

Galvanometer adalah sebuah alat ukur listrik yang digunakan untuk mengukur ada tidaknya sebuah arus listrik dalam rangkaian listrik. Galvanometer ditemukan oleh *Andre-Marie Ampere*. Cara kerja galvanometer ini sama dengan cara kerja voltmeter, ampermeter, ohm meter dan juga motor listrik. Pendeteksian keberadaan listrik oleh galvanometer ditandai dengan bergeraknya jarum di galvano meter ke titik tertentu, bisa dikatakan hampir sama dengan alat ukur listrik pada umumnya. Namun galvanometer memiliki kepekaan yang lebih tinggi dibandingkan amperemeter.



Gambar 3.4 Contoh Galvanometer

Galvanometer ini memiliki fungsi sebagai sebuah *aktuator*. Prinsipnya adalah dengan menghasilkan lendutan putar karena merespon dari arus listrik yang mengalir melalui koil di medan magnet yang konstan. Sekedar pengetahuan, dulu Galvanometer tidak dikalibrasi. Dalam perkembangannya Galvanometer menggunakan sistem kalibrasi dan dipakai sebagai alat ukur. Jika dilihat dari sejarahnya sendiri, konsep tentang Galvanometer ini pertama kali muncul tahun 1820 yang dicetuskan oleh seorang peneliti bernama *Hans Christian Oersted*.

Dalam rangkaian listrik atau elektronik apapun, akan sulit untuk mengidentifikasi apakah ada aliran arus atau tidak. Oleh karena itu, fungsi Galvanometer digunakan untuk menentukan aliran arus di dalam rangkaian. Galvanometer juga adalah perangkat elektromekanis, yang fungsinya selain menentukan aliran arus, juga untuk mengukur arus dalam rangkian atau konduktor.

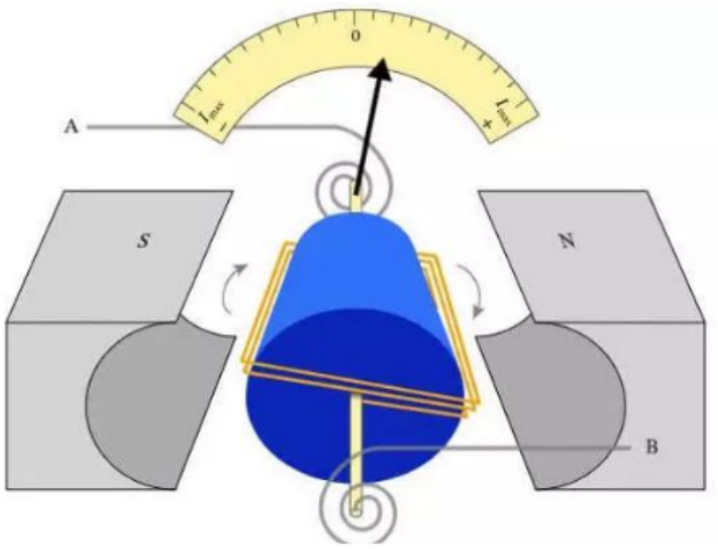
Fungsi Alat Ukur Galvanometer

Nah, setelah kita mengetahui perbedaan penggunaan galvanometer menurut dua waktu yang berbeda, kemudian kita akan membahas tentang fungsi dari galvanometer ini.

Fungsi galvanometer adalah sebagai *aktuator*, dan memiliki cara kerja melalui sebuah *lendutan* putar karena adanya arus tegangan listrik yang mengalir melewati koil pada medan magnet konstan di dalam galvanometer tersebut. Dan seiring waktu berjalan, galvanometer mulai memakai sistem kalibrasi, sehingga pada zaman sekarang galvanometer digunakan sebagai alat ukur. Kemudian berkembang menjadi alat ukur yang familiar dengan sebutan Amperemeter yang memiliki fungsi sama dengan galvanometer yaitu untuk mengukur kuat arus listrik pda sebuah rangkaian listrik.

Prinsip Kerja Galvanometer

Marilah kita melihat penjelasan ini. Dalam Galvanometer modern ada koil yang terpasang dan melintasi skala yang dikalibrasi. Pada prosesnya pegas torsi kecil akan menarik koil dan membuat penunjuk pada posisi nol. Lalu saat arus searah mengalir melalui koil, koil tersebut akan menghasilkan sebuah medan magnet. Medan magnet inilah yang bekerja melawan medan magnet permanen. Koil lalu berputar, mendorong pegasnya dan menggerakkan penunjuk di Galvanometer. Sehingga secara sederhana, semakin besar arus searah yang mengalir melalui koil, maka akan terlihat semakin tinggi arus listriknya.



Gambar 3.5 Gambar Prinsip Kerja Galvanometer

Jika dianalogikan pada kehidupan nyata, Kita seperti memasang sebuah baling-baling di sungai dan di atas baling-baling itu Kita letakkan lonceng, sehingga ketika baling-baling berputar sekali, akan membunyikan lonceng tersebut. Semakin sering lonceng berbunyi maka tandanya arus air semakin kencang. Semakin jarang lonceng berbunyi, maka arus air sedang lambat atau bahkan tidak ada.

Penggunaan Galvanometer

Dalam pemakaian galvanometer ini di bedakan dari dua waktu yang berbeda yaitu pada abad ke-20 dan di era modern yang mana memiliki fungsi berbeda, dan berikut perbedannya menurut kurun waktunya masing-masing.

Galvanometer Di Awal Abad Ke-20

Pada masa awal abad ke-20 galvanometer banyak dipakai untuk mendeteksi kesalahan sebuah kabel pada sistem telekomunikasi. Dengan menggunakan galvanometer ini, kesalahan akan terdeteksi seperti kabel yang terputus namun tidak dapat ditemukan dengan kasat mata, maka orang-orang pada masa abad ini menggunakan galvanometer untuk menemukannya. Pada abad ini banyak orang yang juga

mengaplikasikan mekanisme kerja galvanometer tersebut. Di abad ini, alat pengukur galvano cukup berkembang, pasalnya tidak hanya berfungsi sebagai pengukur arus listrik saja, tetapi juga bisa mendeteksi kabel yang putus dan kesalahan instalasi lainnya.

Galvanometer Di Era Modern

Pada era modern atau masa sekarang, penggunaan galvanometer semakin luas karena sekarang banyak sekali alat yang dilengkapi dengan sistem galvanometer tersebut, namun biasanya tidak terlihat. Biasanya galvanometer diterapkan pada bagian sistem kontrol atau suatu bagian penentuan posisi. Kita bisa ambil contoh, yaitu sebuah pemrosesan bahan yang menggunakan tenaga laser dengan daya tinggi. Dengan begitu akivitas kerja terbantu oleh galvanometer dengan sistem loop tertutup. Jenis Galvanometer ini juga sering dipakai pada beberapa aktivitas lain seperti pengelasan yang menggunakan sinar laser, pengukuran sistem laser, dan aktivitas-aktivitas lainnya. Jika dua hal di atas menggunakan sistem loop tertutup maka untuk jenis loop terbuka biasanya dipakai dalam sebuah sistem ruang, mesin cetak atau percetakan, dan juga alat pemindai barcode. Pada era modern ini, galvanometer tidak hanya digunakan untuk mengukur arus tegangan listrik saja, tetapi prinsip kerja alat ini juga diterapkan pada beberapa alat lain yang tidak menggunakan energi listrik di dalam cara kerja alat tersebut.



Gambar 3.6 Contoh Galvanometer Modern

Jenis Galvanometer

Ada 4 jenis Galvanometer yang berkembang dari awal penemuannya sampai sekarang.

1) **Tangent**

Galvanometer Tangent ini merupakan alat ukur yang dulu dipakai untuk mengukur arus listrik. Alat ini bekerja dengan menggunakan jarum kompas untuk membandingkan medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang tidak diketahui dengan medan magnet bumi. Tangent adalah galvanometer jenis pertama yang muncul dan diperkenalkan. Galvanometer jenis ini masih menggunakan konsep awal yang cukup sederhana, yang dimana alat ini hanya digunakan untuk mengukur arus listrik pada sebuah rangkaian. Dari segi model dan fungsinya galvanometer tangent ini dapat dikatakan masih terbatas sekali kegunaannya karena hanya memiliki satu kegunaan saja.



Gambar 3.7 Galvanometer Jenis Tangent

2) **Astatic**

Jika *Tangent* menggunakan medan magnet bumi, maka *Astatic* tidak. Galvanometer *Astatic* ini tidak perlu berorientasi pada bidang bumi sehingga lebih mudah dipakai. Astatic ditemukan oleh *Leopoldo Nobili* pada tahun 1825.

Hal tersebut tentu saja sangat berpengaruh dalam perkembangan galvanometer karena saat itu orang bisa menggunakan galvanometer dengan lebih mudah dengan hadirnya jenis ini.



Gambar 3.8 Galvanometer Jenis Astati

3) Mirror

Galvanometer *Mirror* ini diciptakan untuk mencapai sensitivitas yang jauh lebih tinggi. Tujuannya tentu agar arus yang paling kecil sekalipun tetap terdeteksi. Pertama kali dipakai pada tahun 1850 an, Galvanometer *Mirror* ini dipakai untuk penerima kabel telegraf bawah laut trans-atlantik.



Gambar 3.9 Galvanometer Jenis Mirror

4) Ballistic

Jenis terakhir adalah *Ballistic*. Belum ada penjelasan mendalam soal *ballistic*. Sejauh yang didapatkan, ballistic memiliki kemampuan baca yang lebih baik dari jenis lain. Galvanometer nyatanya bisa dipakai dalam hal apapun, terutama yang berhubungan dengan arus listrik

dan cara mendeteksinya. Keunggulan lain dari Galvanometer ini bukan hanya pada bendanya, tapi juga prinsip kerjanya.

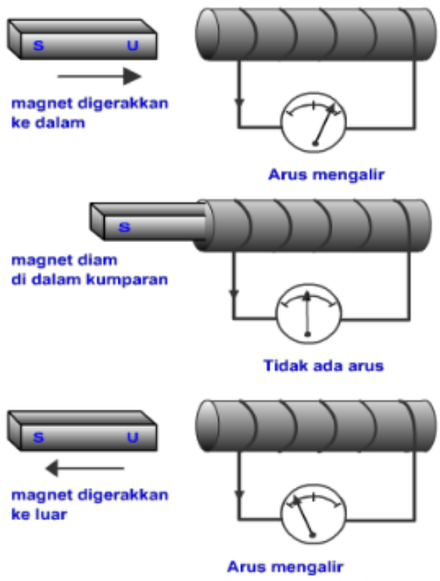


Gambar 3.10 Galvanometer Jenis Ballistic

Berdasarkan penjelasan di atas, maka Galvanometer dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

a) Galvanometer Oersted

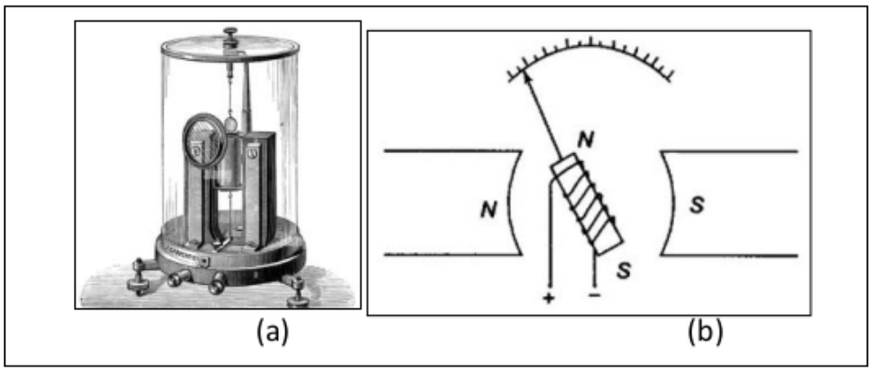
Galvanometer adalah alat dasar yang digunakan untuk mendeteksi atau mengukur arus listrik dengan besaran-besarannya yang berhubungan. *Galvanometer Oersted* disebut juga *Galvanometer Jarum*, yang merupakan galvanometer yang paling sederhana.



Gambar 3.11 Prinsip Kerja Galvanometer Jarum

b) Galvanometer d'Arsonval

Pernahkah anda mendengar Galvanometer *d'Arsonval*? Galvanometer *d'Arsonval* terdiri atas sebuah magnet yang permanen sebuah kumparan yang dapat berputar dan sebuah alat penujuk. Galvanometer *d'Arsonval* disebut juga sebagai *Galvanometer kumparan putar*.



Gambar 3.12 (a) Galvanometer d'Arsonval, (b) Illustrasi Prinsip Kerja Galvanometer d'Arsonval

Galvanometer kumparan putar lebih praktis jika dibandingkan dengan *Galvanometer Oersted* (Galvanometer Jarum), karena tidak perlu mengatur berkali-kali untuk menyesuaikan dengan bidang meridian magnet bumi. Di samping itu, *Galvanometer d'Arsonval* sangat peka sehingga dapat dipakai untuk mengukur arus-arus yang sangat lemah.

4.2. Ammeter

Sebuah galvanometer dapat diubah menjadi sebuah ammeter dengan menggunakan shunt yang hambatannya kecil yang dipasang secara paralel dengan galvanometer.

Agar alat pengukur miliampre dapat diperbesar **n** kali ukurannya, maka harus dipasang shunt yang memiliki hambatan sebesar :

$$R_s = \frac{1}{(n-1)} R_a$$

dimana, R_s = hambatan shunt
n = perbesaran amperemeter
R_a = hambatan amperemeter

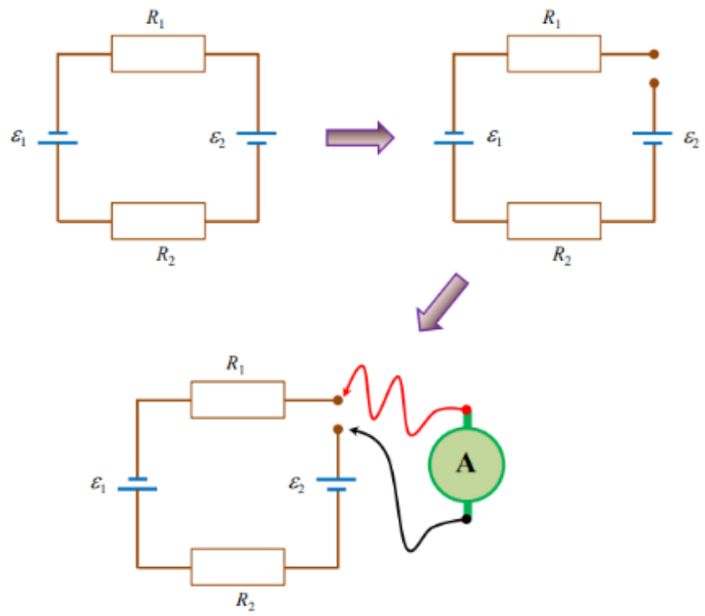
Jadi, amperemeter :

- *dipasang seri dengan kuat arus yang akan ditentunkan,*
- *mempunyai hambatan dalam yang kecil supaya arus dengan mudah dapat melaluinya,*
- *biasanya hanya mampu megukur kuat arus yang kecil,*
- *jika untuk mengukur kuat arus yang besar perlu dipasang hambatan depan yang dipasang secara paralel, disebut shunt.*

Sekarang, Berapa besar arus listrik yang mengalir dalam suatu rangkaian dapat diukur dengan alat yang namanya galvanometer atau amperemeter. **Gambar 3.13** adalah contoh amperemeter analog. Amperemeter analog menggunakan jarum sebagai penunjuk arus yang diukur. Untuk mengukur arus yang mengalir pada rangkaian, pertama-tama rangkaian harus diputus. Dua ujung kabel yang diputus dihubungkan ke dua terminal amperemeter sehingga arus mengalir ke dalam amperemeter. Proses tersebut diilustrasikan pada **Gambar 3.14**. Besarnya arus yang mengalir akan ditunjukkan oleh layar peraga amperemeter. Layar peraga tersebut dapat berupa jarum (untuk amperemeter analog) atau angka-angka (untuk amperemeter digital).



Gambar 3.13 Amperemeter. Arus yang diukur ditunjukkan langsung oleh jarum



Gambar 3.14 Tahap pengukuran arus dengan amperemeter. (a) rangkapan yang akan diukus arusnya. (b) rangkaian diputus dan (c) ujung rangkaian yang diputus dihubungkan ke terminal amperemeter

Beberapa hal yang harus diperhatikan saat mengukur arus dengan amperemeter di antaranya,

1) Amperemeter miliki hambatan, walaupun sangat kecil. Ketika amperemeter dipasang untuk mengukur arus maka hambatan total rangkaian menjadi lebih besar sehingga arus yang mengalir sedikit berkurang. Jadi arus yang ditunjukkan oleh amperemeter sedikit lebih kecil daripada arus yang mengalir sebelum amperemeter dipasang. Namun:
   a) Jika hambatan total dalam rangkaian cukup besar maka hambatan yang dimiliki amperemeter dapat dibaikan sehingga arus yang dibaca oleh amperemeter hampir sama dengan arus yang mengalir sebelum amperemeter dipasang.
   b) Jika hambatan total dalam rangkaian sangat kecil, maka pemasangan amperemeter dapat mengubah arus yang mengalir cukup signifikan. Arus yang

dibaca amperemeter jauh lebih kecil daripada arus yang mengalir sebelum amperemeter dipasang.

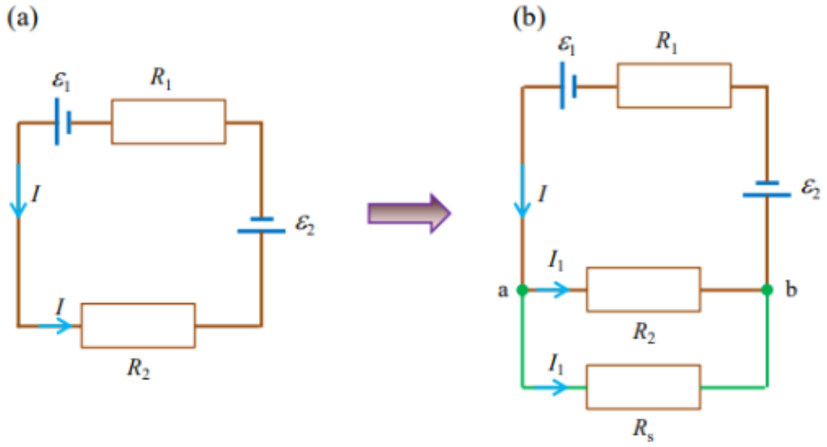
2) Ada batas maksimum arus yang dapat diukur oleh amperemeter. Jika arus yang diukur melebihi batas maksimum tersebut, maka amperemeter dapat rusak dan terbakar. Untuk itu, sebelum melakukan pengukuran, kita perkirakan dulu besarnya arus yang mengalir dalam rangkaian. Jika kalian yakin bahwa arus yang mengalir masih berada di bawah batas maksimum yang bisa diukur amperemeter, kalian dapat mengukurnya.

Lalu, ***Bagaimana mengukur arus yang nilainya melebihi kemapuan pengukuran amperemeter?*** Kita dapat memasang hambatan "*shunt*" yang dipasang secara parallel dengan salah satu hambatan dalam rangkaian. Peranan hambatan ini adalah untuk membagi arus sehingga sebagian mengalir di hambatan *shunt* dan sebagian mengalir di hambatan dalam rangkaian amperemeter. Nilai hambatan *shunt* harus cukup kecil sehingga arus yang mengalir pada amperemeter lebih kecil dari arus maksium yang dapat diukur amperemeter. Tampak dari **Gambar 3.15 (b)**

$$I = I_1 + I_2$$

$$I_2 = \frac{V_{ab}}{R_s} \quad atau \quad V_{ab} = I_2 R_s$$

$$I_1 = I_2 \frac{R_s}{R_2}$$

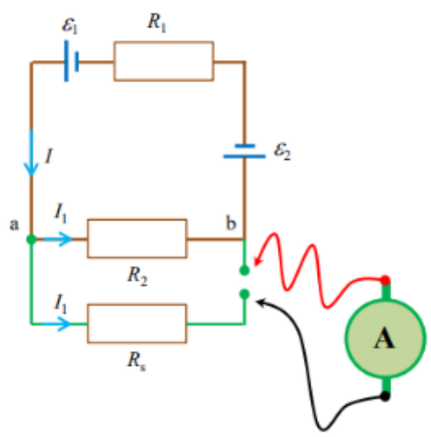


Gambar 3.15 Rangkaian Mula-mula (a), Rangkaian Setelah ditambahkan Shunt

Dan arus Total, menjadi :

$$I = \frac{R_s}{R_2} I_2 + I_2 = I_2 \left(1 + \frac{R_s}{R_2}\right)$$

Jadi, dengan mengukur I_2 maka nilai arus yang mengalir pada rangkaian semula dapat ditentukan. Pemasangan amperemeter pada saat pengukuran seperti pada **Gambar 3.16**.



Gambar 3.16 Pengukuran Arus yang Melebihi Kemampuan Ukur Amperemeter

4.3. Voltemeter

Sebuah galvanometer daapt diubah menjadi voltmeter, dengan menggunakan hambatan multiplier yang dipasang seri pada alat tersebut. Voltmeter adalah alat untuk mengukur beda potensial. Jadi, voltmeter :

- *dipasang paralel dengan tegangan yang akan ditentukan,*
- *mempunyai hambatan dalam yang besar, supaya arus tidak dapat melaluinya,*
- *untuk dapat mengukur beda potensial yang lebih besar, perlu dipasang hambatan depan secara seri yang disebut multiplier.*

Supaya batas ukur milivoltmeter dapat diperbesar, maka harus dipasang hambatan multiplier yang besarnya adalah

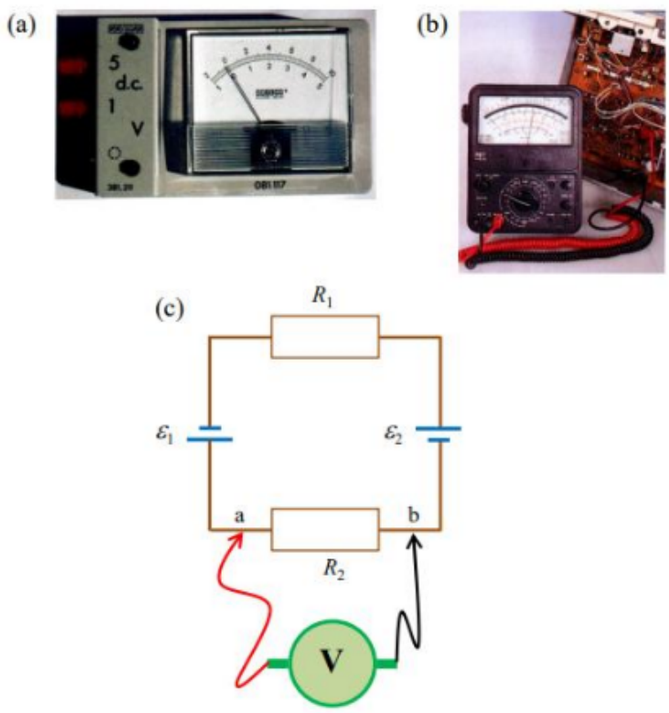
$$\boldsymbol{R_m = (n-1)R_d}$$

dimana, Rm = hambatan multiplier

Rd = hambatan dalam voltmeter

n = perbesaran voltmeter

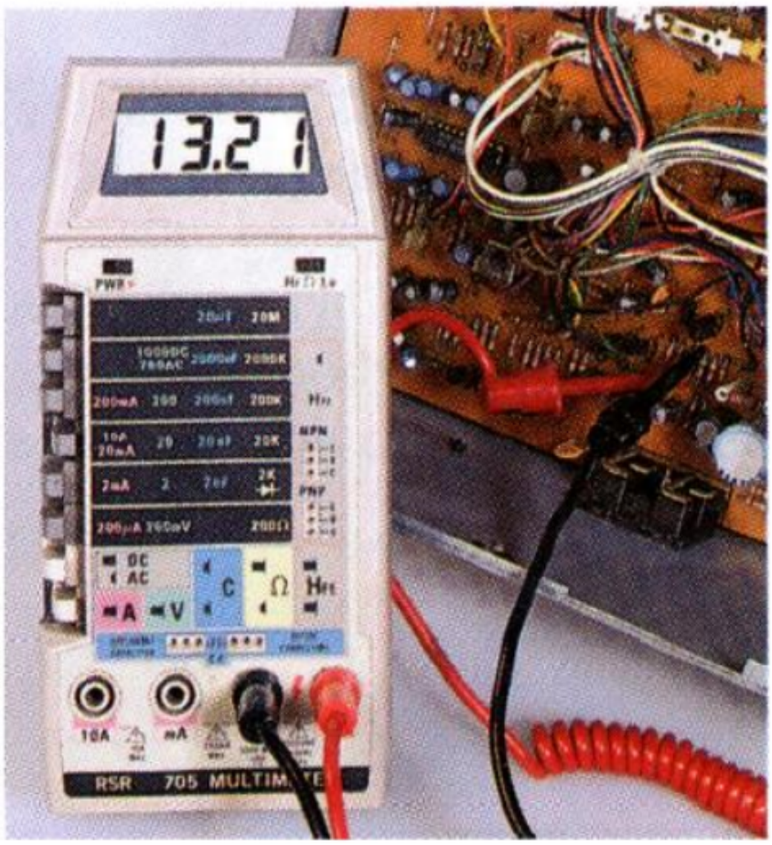
Kemudian, ***Bagaimana mengukur beda potensial di dua titik?*** Beda potensial antara dua titik dalam rangkaian dapat diukur dengan alat yang namanya voltmeter. Pengukuran beda potensial tidak perlu memutus rangkaian yang ada. Cukup menyentuhkan dua terminal voltmeter dengan dua titik yang akan diukur beda potensialnya seperti diilustrasikan pada **Gambar 3.17**. Beda potensial langsung terbaca pada layar voltmeter. Layar tersebut dapat berupa jarum (untuk volmeter analog) atau angka-angka (volmeter digital)..



Gambar 3.17 a) contoh voltmeter, (b) volmeter sedang digunakan untuk mengukur beda potensial dua titik dalam rangkaian, (c) skema pemasangan voltmeter saat mengukur beda potensial antara dua titik (titik a dan b).

4.4. Alat Mengukur Hambatan Listrik

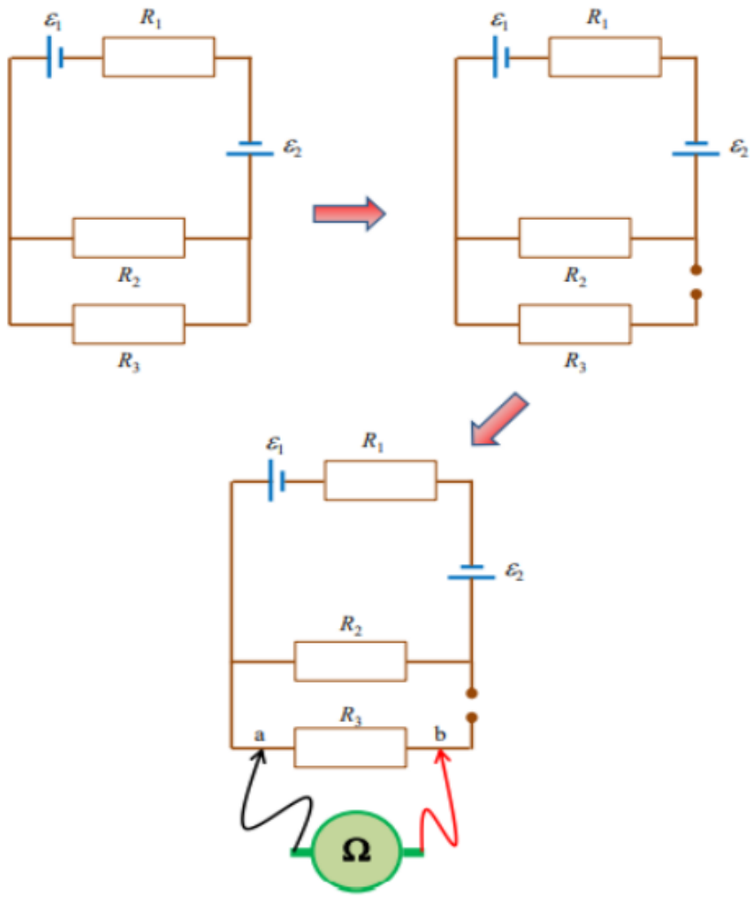
Hambatan listrik suatu resistor atau antar dua titik dalam rangkaian dapat diukur secara langsung dengan alat yang namanya Ohmmeter. Pengukuran dilakukan dengan menyentuhkan dua terminal Ohmmeter dengan dua ujung hambatan atau dua titik dalam rangkaian yang akan diukur hambatannya seperti ditunjukkan pada **Gambar 3.18**.



Gambar 3.18 Mengukur hambatan listrik dalam rangkaian dengan multimeter digital

Tetapi harus diingat, saat mengukur hambatan, komponen atau dua titik dalam rangkaian yang akan diukur hambatannya harus *diisolasi* dari rangkaian lainnya. Jika akan mengukur nilai sebuah hambatan dalam rangkaian, maka salah satu kaki hambatan tersebut harus dipotong dari rangkaian (**Gambar 3.19**). Hal yang

sama dilakukan ketika mengukur hambatan antar dua titik dalam rangkaian. Salah satu titik diputus dari rangkaian induk baru dilakukan pengukuran.



Gambar 3.19 Tahapan pengukuran nilai hambatan suatu komponen dalam rangkaian dengan Ohmmeter. (a) rangkaian asal di mana nilai R3 akan diukur, (b) salah satu kaki R3 diputus hubungannya dengan rangkaian, (c) hambatan R3 diukur dengan Ohmmeter.

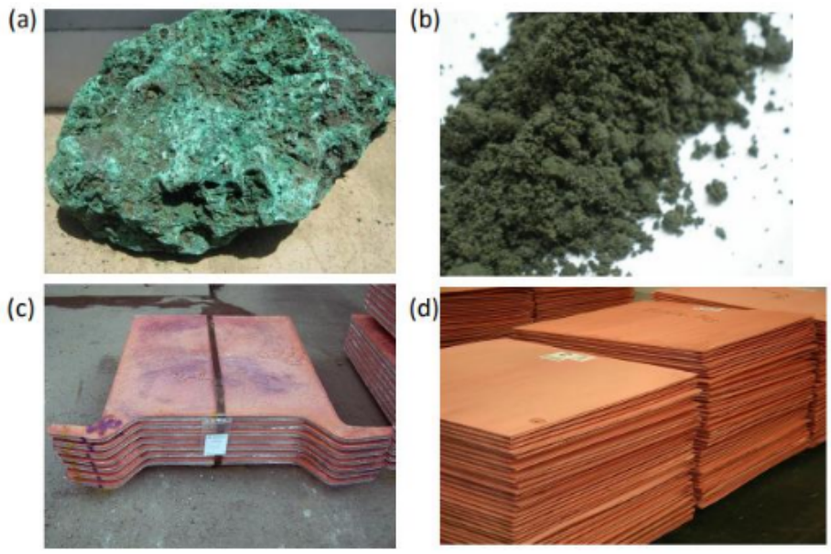
5. Indutri Logam

Daya listrik yang besar sekarang banyak digunakan dalam industri pengolahan logam. Daya listrik yang besar juga berimplikasi arus listrik yang besar. Arus listrik tersebut digunakan sebagai sumber panas untuk mencairkan logam atau digunakan dalam proses elektrolisis untuk mendapatkan logam murni dari campuran logam. Contoh proses elektrolisis dalam industry logam adalah industri pengubahan bauksit menjadi aluminium pada smelter aluminium dan produksi tembaga murni pada smelter tembaga.

5.1. Smelter Tembaga

Tembaga merupakan logam yang banyak digunakan di berbagai industri. Produk dari pabrik peleburan tembaga berupa produk hilir yaitu katoda tembaga. Katoda tembaga digunakan sebagai bahan baku dalam industri-antara untuk menghasilkan produk antara berupa tembaga batang (*rod*), tembaga pelat (*plate*) dan tembaga lembaran (*sheet*). Tembaga dan paduan tembaga diolah oleh industri hilir untuk digunakan dalam produk akhir seperti mobil, peralatan, elektronik, dan berbagai macam produk tembaga lain dalam rangka memenuhi kebutuhan masyarakat. Misalnya tembaga batang diolah menjadi kawat tembaga dan bahan hilir lainnya seperti kabel. Sementara tembaga pelat dan lembaran diproses menjadi foil tembaga di sektor hilir.

Rantai produksi tembaga dimulai dari penambangan bijih tembaga (*ore*) dan diolah menjadi konsentrat tembaga. Kosentrat tembaga adalah materil yang mengandung tembaga kira-kira 25%. PT Freeport Indonesia (PT FI) dan PT Newmont Nusa Tenggara (PT NNT) adalah perusahaan penghasil konsentrat tembaga. Setelah dihasilkan kontnrat maka proses selanjutnya adalah *smelting*. *Smelting* adalah proses peleburan konsentrat tembaga sehingga dihasilkan tembaga dengan kemurnian sekitar 99%. Konsentrat tembaga dipanaskan pada suhu sangat tinggi sehingga tembaga dalam konsentrat mencair dan mengalir. Alairan cairan tembaga tersebut ditampung dan itulah yang disebut anoda tembaga. **Gambar 3.20** adalah contoh bijih tembaga, konsentrat tembaga, anoda tembaga, dan katoda



Gambar 3.20 (a) bijih tembaga, (b) konsentrat tembaga, (c) anoda tembaga, dan (d) katoda tembaga.

Anoda tembaga dimurnikan lebih lanjut menjadi tembaga dengan kemurnian sekitar 99,99%. Pemrnian dilaklukan secara elektrolisis. Anoda tembada ditempakan pada kutub positif dan pada kutub negated terbentuk deposit tembaga yang santa murni. Deposit inilah yang dinamakan katoda tembaga. Proses smelting untuk menghasilkan anoda tembaga dan proses elektrolisis untuk menghasilkan katoda tembaga membutuhkan listrik yang sangat besar. Tetapi jumlah listrik yang dihasilkan masih jauh di bawah listrik untuk memproduksi aluminium dalam jumlah massa yang sama.

Satu-satunya industri pengolahan dan pemurnian tembaga yang ada di Indonesia saat ini adalah *PT Smelting Gresik* yang sudah mulai beroperasi sejak tahun 1999 (**Gambar 3.21**). *PT Smelting* mengolah konsentrat yang sebagian besar dihasilkan oleh *PT Freeport* dan sisanya dari *PT NNT*. Kapasitas produksi *PT Smelting* saat ini sudah mencapai 300.000 per tahun dengan rata-rata produksi per tahun sekitar 270.000 ton. Sekitar 60 persen produk tembaga katoda dari *PT Smelting* di jual di dalam negeri dan sisanya dijual di pasar Asia Tenggara.



Gambar 3.21 PT Smelting Gresik, satu-satunya pabrik tembaga di Indonesia

Tembaga katoda merupakan bahan baku untuk barang-barang dari tembaga dan sebagian besar digunakan untuk pembuatan kawat dan kabel listrik. Di dalam negeri sendiri, telah ada setidaknya 7 perusahaan yang memproduksi kawat dan kabel listrik dengan total produksi keseluruhan sekitar 168.000 ton per tahun. Selain tembaga katoda sebagai produk utama, juga terdapat produk sampingan yang juga memiliki nilai jual seperti asam sulfat, terak tembaga, gypsum, dan lumpur anoda. Asam sulfat digunakan pada industri petrokimia seperti pabrik pupuk. *PT Smelting* menjual asam sulfat 700.000 ton/tahun ke *PT Petrokimia Gresik*. Terak tembaga dan gypsum yang berguna untuk bahan baku semen dijual masing-masing 530.000 ton/tahun dan 20.000 ton/tahun ke *PT Semen Gresik*. Lumpur anoda mengandung logam-logam mulia emas, perak, dan logam-logam yang termasuk ke dalam kelompok logam *PGM* (Platinum Group Metal) seperti platinum, palladium, rodium, iridium, osmium, dan ruthenium. Produksi lumpur anoda *PT Smelting* sekitar 1.000 ton per tahun yang kesemuanya dijual karena *PT Smelting* tidak bisa mengolah lumpur anoda tersebut.

5.2. Smelter Alumunium

Alumunium adalah material yang dibutuhkan dalam industri modern. Material ini ringan, berkekuatan tinggi, tahan terhadap korosi, mempunyai kondusktivitas listrik tinggi, dan mudah diproses ulang (recycle). Dengan menggunakan acuan mana pun, aluminium tetap menjadi material yang paling banyak membutuhkan listrik untuk produksi. Untuk memproduksi aluminium diperlukan daya listrik yang sangat besar. Untuk menghasilkan satu ton aluminium dari alumina diperlukan listrik sampai 16 MWh. Untuk menghasilkan aluminium 250.000 ton/tahun, *PT Inalum* memerlukan energi listrik sebesar 4 Juta MWh. Apabila diasumsikan smelter bekerja selama 24 jam dan jumlah hari operasional setahun adalah 300 hari maka daya listrik yang dibutuhkan sekitar 560 MW. Itulah sebabnya mengapa hampir semua listrik yang diproduksi *PLTA Asahan II* sebesar 600 MW dipakai oleh *smelter Inalum*. Hampir semua smelter aluminium di dunia menggunakan listrik dengan daya di atas 100 MW sehingga pembangkit listrik yang dibangun hampir semuanya disuplai ke smelter aluminium.

Di Mozambique, tidak sampai 10% penduduk memiliki akses listrik. Namun pada saat bersamaan, smelter Mozal menggunakan listrik sebanyak empat kali total listrik yang digunakan untuk semua kebutuhan lain di negara tersebut. Smelter Aluminium Valco di Tema, Ghana, mengkonsumsi 45% listrik yang dihasilkan pembangkit listrik.

Alumunium adalah material yang dibutuhkan dalam industri modern. Material ini ringan, berkekuatan tinggi, tahan terhadap korosi, mempunyai kondusktivitas listrik tinggi, dan mudah diproses ulang (*recycle*). Dengan menggunakan acuan mana pun, aluminium tetap menjadi material yang paling banyak membutuhkan listrik untuk produksi. Sebagai contoh, pada tahun 2001, sebanyak 45,7× 109 kWh energi listrik telah digunakan untuk memproduksi aluminium di US. Listrik sebesar ini setara dengan 1,2% seluruh kebutuhan listrik di negara tersebut.

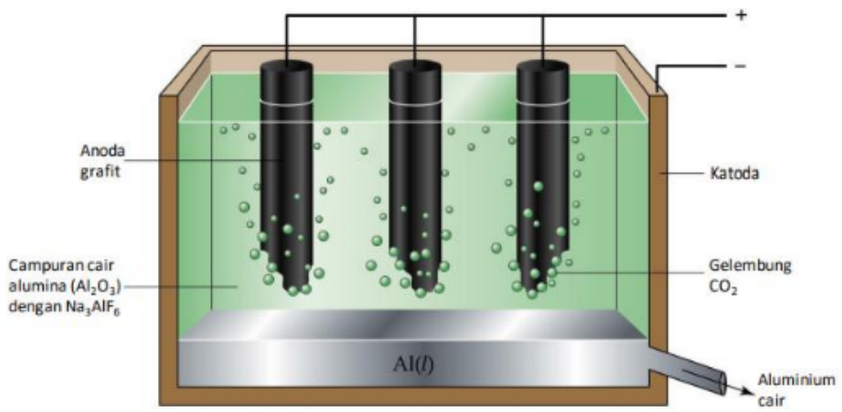
BHP Billiton membangun smelter aluminium dengan daya 2.000 MW di Congo Rio Tinto-Alcan (RTA) membangun smelter aluminium dengan daya 1.000 MW di Song Mbengue, Kamerun. Smelter Alscon di Nigeria yang rampung tahun 1997 telah menelah biaya US$ 2,5 miliar. Pembangunan Smelter Alucam di Kamerun yang melibatkan pembangunan PLTA Lom Pangar, jaringan transmisi, dan lain-lain menelan biaya US$ 1,6 miliar.

Membangun smelter sebenarnya bermakna membangun pembangkit tenaga listrik dengan daya besar. Pembangkit listrik dengan daya kurang dari 200 MW secara ekonomi kurang menguntungkan bagi pemnagunan smelter karena menyebabkan harga jual aluminum yang tinggi. Daya listrik 1000 MW dianggap sebagai daya minimum untuk membuat smelter yang sangat modern.

Aluminium primer diproduksi dengan cara elektrolisis alumina ($\mathbf{Al_2O_3}$) yang dilarutkan dalam garam fluoride ($\mathbf{AlF_2}$). Proses ini ditemukan pada tahun 1886 oleh *Charles Martin Hall* (Amerika Serikat) dan *Paul Louis Toussaint Heroult* (Perancis). Dalam sel elektrolisis *Hall-Heroult*, alumina dan aluminium fluorida digunakan sebagai bahan baku material. Karbon pada anoda, bereaksi dengan oksigen dalam alumina membentuk karbon dioksida. Reaksi elektrolisis yang terjadi adalah :

$$\mathbf{2\ Al_2O_3\ +\ 3\ C\ \rightarrow\ 4\ Al\ +\ 3\ CO_2}$$

Gambar 3.22 adalah ilustrasi *proses Hall-Heroult*.



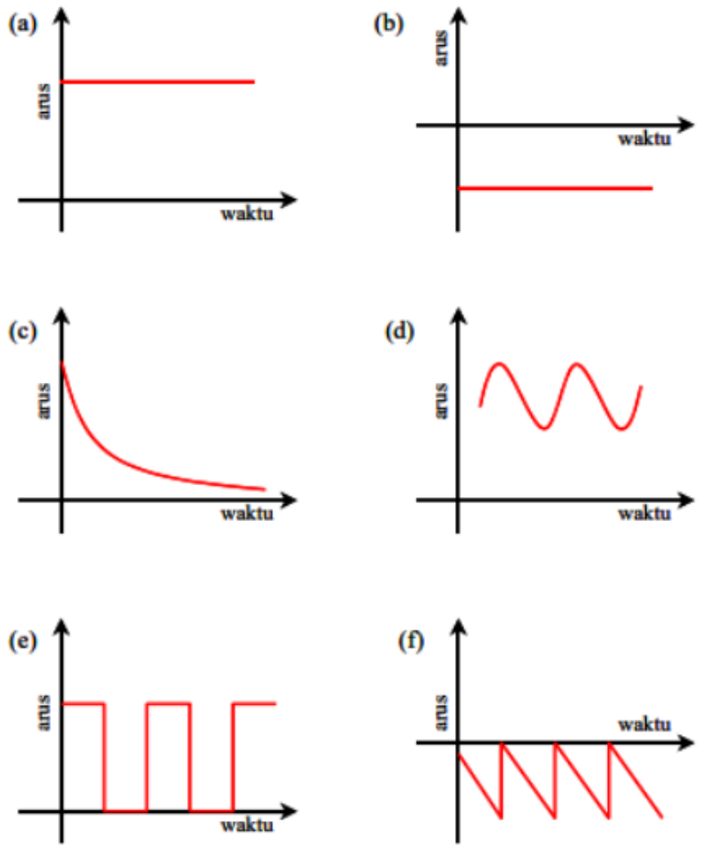
Gambar 3.22 adalah ilustrasi *proses Hall-Heroult*.

Ada dua teknologi utama yang digunakan untuk menghasilkan anoda pada *proses Hall-Heroult* yaitu *söderberg* dan *prebaked*. Perbedaan utama antara dua jenis anoda tersebut adalah *anoda Söderberg* mengeras oleh panas yang dihasilkan dari proses elektrolitik saat dimasukan ke dalam cairan *cryolite*, sedangkan anoda prebakedsudah dikeraskan sebelum digunakan dalam sel elektrolitik. Sebagian besar smelter aluminium pada umumnya menggunakan anoda prebaked karena lebih efisien.

Bahan baku utama dari proses peleburan aluminium adalah alumina, aluminium fluorida ($\mathbf{AlF_2}$), karbon (sebagai anoda), dan energi listrik. Produk utamanya adalah logam aluminium, CO_2, dan beberapa limbah padat. Dalam model yang dilustrasikan pada Gambar 3.54, pada proses peleburan aluminium di dunia, untuk menghasilkan 1 ton logam aluminium, diperlukan sekitar 1,92 ton alumina, 0,435 ton pasta anoda, dan sekitar 15,289 MWh listrik.

BAB IV
ARUS BOLAK BALIK

Kita telah mempelajari arus searah maupun rangkaian arus searah. Sesuai dengan namanya, arus searah adalah arus yang arahnya selalu sama setiap saat. Besarnya arus bisa berubah-ubah tetapi arahnya selalu sama; misalnya tetap dari kiri ke kanan. Kalau kita plot dalam grafik arus terhadap waktu, di mana arus adalah sumbu vertical dan waktu adalah sumbu horizontal, maka grafik arus searah bisa berbentuk seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 7.1 Contoh grafik arus searah. Semua kurva selalu berada di atas atau di bawah sumbu datar

Dari gambar di atas, kita dapat melihat bahwa :

i. Pada grafik (a) kita dapatkan arus searah yang besarnya selalu konstan dan bertanda positif,

ii. Pada grafik (b) kita dapatkan arus searah yang besarnya selalu konstan dan bertanda negatif,

iii. Pada grafik (c) kita dapatkan arus searah yang nilainya makin lama makin mengecil. Arus semacam ini sering disebut arus transien,

iv. Pada grafik (d) kita dapatkan arus searah yang besarnya berubah-ubah mengikuti pola sinusoidal. Walaupun arus berubah mengikuti pola sinusoidal, tetapi karena nilai arus selalu positif maka arus tersebut termasuk arus searah,

v. Pada grafik (e) arus selalu memiliki arah yang sama dan nilainya berubah-ubah mengikuti pola persegi,

vi. Pada gambar (f) arus selalu memiliki arah yang sama (negatif) dan nilainya berubah-ubah mengikuti pola segitiga.

Arus searah yang kita bahas di bab sebelumnya dibatasi pada arus searah yang besarnya tetap seperti yang ditunjukkan oleh gambar (a) atau (b).

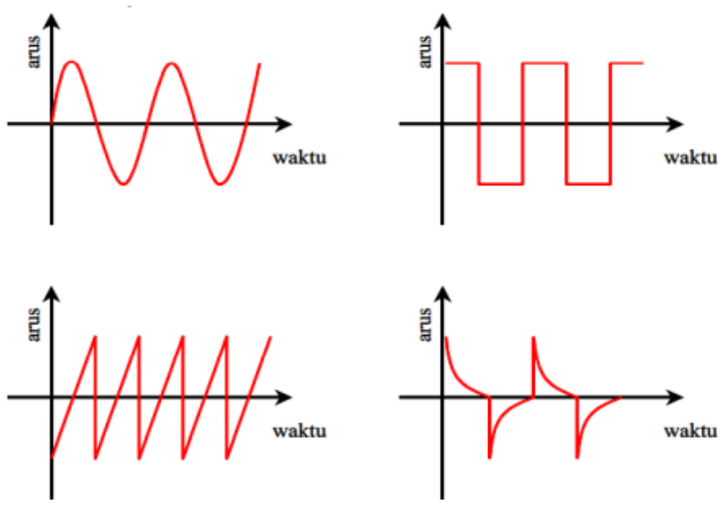
1. Pengertian Arus Bolak Balik

1.1. Arus Bolak Balik

Arus bolak balik adalah arus dan tegangan yang nilainya selalu bertambah terhadap waktu secara periodik. Sumber arus bolak balik adalah generator AC yang terdiri atas kumparan kawat yang berputar di dalam magnet serbasama. Jika generator bolak balik diukur dengan voltmeter DC atau galvanometer, maka alat

tersebut akan menunjukkan angka nol Karenna kumparan koelnya terlaluy lambat untuk mengikuti bentuk gelombang yang dihasilkan oleh sumber arus bolak balik tersebut. Arus bolak balik dapat diukur osiloskop yang dapat menunjukkan nilai-nilai arus atau tegangan yang dihasilkan selalu berubah terhadap waktu secara periodik yang memperlihatkan sebuah bentuk gelombang. Jadi, dengan mempergunakan alat ukur osiloskop, kita dapat mengamati nilai dan bentuk gelombang yang dihasilkan oleh sumber arus bolak balik.

Arus bolak-balik adalah arus yang arahnya berubah-ubah secara bergantian. Pada suatu saat arah arus ke kanan, kemudian berubah menjadi ke kiri, kemudian ke kanan, ke kiri, dan seterusnya. Kalau digambarkan dalam bentuk kurva, maka contoh kurva arus bolak-balik ditunjukkan dalam **Gambar 4.2**.



Gambar 4.2 Contoh grafik arus bolak-balik. Ada saat arus bernilai positif da nada saat bernilai negative. Bentuk kurva arus terhadap waktu bisa bermacam-macam. Namun yang pling sederhana dan paling mudah dianalisis adalah bentuk sinusoidal seperti ditunjukkan pada gambar (a). Arus bentuk sinusoidal diungkapkan oleh fungsi sinus atau kosinus saja

Marilah kita analisa gambar di atas, bahwa :

i. Pada grafik (a) kita dapatkan arus bolak-balik yang berubah secara sinusoidal. Setengah periode arus bergerak dalam satu arah dan setengah periode lainnya arus bergerak dalam arah sebaliknya,

ii. Pada grafik (b) kita amati arus bolak-balik yang berubah secara persegi. Dalam setengah periode arus bergerak dalam satu arah dan setengah periode lainnya arus bergerak dalam arah sebaliknya,

iii. Pada grafik (c) kita amati arus bolak-balik yang berubah dengan pola segitiga,

iv. Pada grafik (d) kita amati arus bolak-balik yang berubah secara transien.

Pada materi ini, kita akan pelajari *arus bolak-balik dan efek yang dihasilkan* ketika melewati komponen-komponen listrik. Arus bolak-balik adalah arus yang tandanya bergantian positif dan negative atau arahnya selalu bergantian. Osilasi arus bolak-balik sulit diamati dengan amperemeter atau voltmeter, khususnya arus bolak-balik yang memiliki frekuensi tinggi. Karena arahnya berubah secara periodeik maka jarum atau angka yang ditunjukkan oleh alat tersebut berosilasi terus menerus secara cepat. Jika frekuensi cukup besar maka mata tidak sanggup mengikuti perubahan. Mata seolah-olah melihat jarum tidak bergerak atau angka yang ditunjukkan nol.



Gambar 4.3 contoh tampilan tegangan pada layar osiloskop. Sumbu datar adalah waktu dan sumbu tegak adalah tegangan

Untuk melihat osilasi arus bolak-balik kita dapat menggunaakn osiloskop. Osiloskop dapat menampilkan gambar tegangan yang berosilasi hingga frekuensi beberapa megahertz. Pola tersebut tampak diam di layar osilosikop. Dengan adanya gambar tersebut maka kita dapat menentukan frekuensi tegangan maupun amplitudonya. **Gambar 4.3** adalah contoh pola yang ditampilkan di layar osiloskop.

1.2. Arus dan Tegangan Bolak Balik Sinusoidal

Sumber arus bolak balik adalah generator arus bolak balik yang terdiri dari sebuah kumparan persegi panjang yang diputar dalam medan magnet homogen. Dalam generator, kumparan persegi panjang yang diputar dalam medan magnet homogen akan membangkitkan gaya gerak listrik (GGL).

Bentuk arus bolak-balik yang paling sederhana adalah arus sinusoidal. Arus yang dihasilkan pembangkit listrik tenaga air, batu bara, angin, nuklir merupakan arus bolak-balik sinusoidal. Arus yang dihasilkan oleh turbin pasti arus bolak-balik sinusional. Pembangkit listrik tenaga air, batu bara, angin, nuklir menggunakan turbin yang memutar kumparan dalam medan magnet tetap. Kebergantungan arus dan tegangan terhadap waktu dapat dinyatakan oleh fungsi kosinus berikut ini.

$$I = I_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)$$

dimana, I_m = arus maksimum (amplitido arus)
T = periode arus
t = waktu
φ_o = fase mula-mula (saat t = 0)

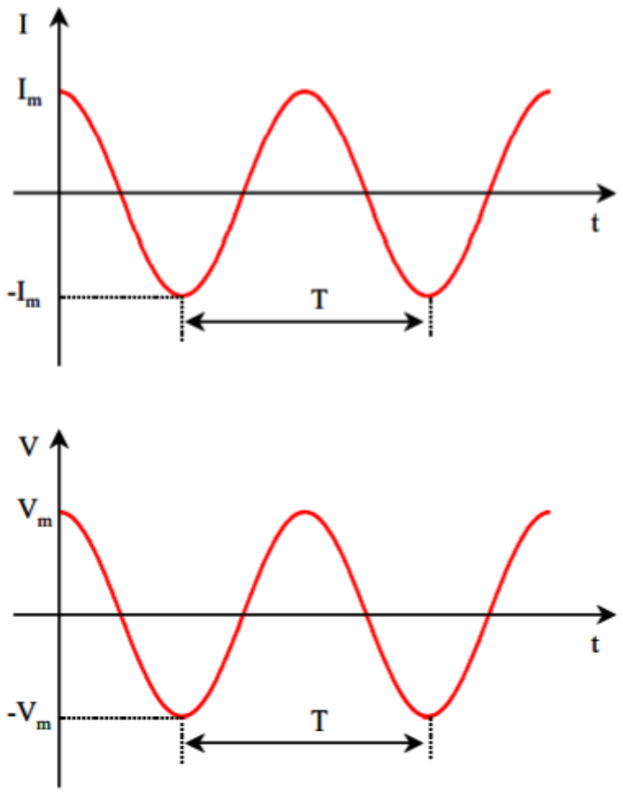
Jika arus tersebut melewati sebuah hambatan, maka tegangan antara dua ujung hambatan mmenuhi hukum Ohm.

$$V = I\,R$$

$$V = R\left(I_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}\,t + \varphi_o\right)\right)$$

$$V = V_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}\,t + \varphi_o\right)$$

dengan $\mathbf{V_m = I_m\,R}$ adalah amplitude tegangan. Gambar 4.4 adalah contoh kurva tegangan maupun arus terhadap waktu.



Gambar 4.4 kurva tegangan dan arus bolak-balik

Tegangan yang mengalir pada jaringan listrik PLN merupakan tegangan bolak-balik sinusoidal. Tegangan sinusoidal merupakan tegangan yang paling mudah dihasilkan. Dengan memutar lilitan dalam medan magnet dengan kecepatan sudut konstan maka dihasilkan tegangan sinusoidal. Kebanyakan pembangkit listrik PLN dihasilkan dengan memutar kumparan dalam medan magnet atau memutar magnet di dalam kumparan sehingga dihasilkan tegangan sinusoidal.

Pada arus bolak balik, nilai arus dan tegangan selalu berubah-ubah terhadap waktu secara periodik. Dengan memakai *osiloskop* dapat diketahui nilai maksimum yang dihasilkan dan frekuensi yang dihasilkan oleh sumbernya. *Osiloskop* adalah suatu alat ukur listrik yang memiliki sebuah layar yang berfungsi menampilkan bentuk bayangan atau arus dan nilai-nilai lainnya.

1.3. Alat Ukur Arus Bolak Balik

Alat ukur untuk mengukur arus bolak balik adalah *amperemeter AC*, sedangkan alat untuk mengukur tegangan bolak balik adalah *voltmeter AC*.

Untuk keperluan yang praktis, maka alat ukur tegangan, arus , dan hambatan dibuat menjadi satu yang disebut *AVOmeter*, yang merupakan singkatan dari *Ampere, Volt, Ohm (AVO) meter*. Alat ini juga dinamakan sebagai *multimeter* atau *multitester*. Jadi, *AVOmeter* berguna untuk mengukur arus, tegangan, dan hambatan listrik, sebab pada alat tersebut terdapat daerah daerah batas hambatan, tegangan, dan arus searah, serta tegangan dan arus bolak balik. Sedangkan untuk mengamati langsung bentuk kurva arus da tegangan bolak balik dapat digunakan alat yang disebut *osiloskop*.

1.4. Nilai Efektif

Besaran listrik yang memiliki harga tetap, diperlukan untuk keperluan praktis sehingga dalam arus dan tegangan bolak balik, harga ini disebut nilai efektif. Jadi nilai efektif kuat arus atau tegangan bolak balik adalah kuat arus atau tegangan bolak balik yang dianggap setara dengan arus atau tegangan searah yang

menghasilkan jumlah kalor yang sama ketika melalui suatu penghantar dalam waktu yang sama.

Ada sejumlah alat ukur yang dirancang yang hanya dapat mengukur nilai rata-rata suatu besaran. Jika ada alat ukur tegangan rata-rata, berapa tegangan rata-rata yang dihasilkan arus bolak-balik? Berapa juga arus rata-ratanya? Kita dapat mencarinya sebagai berikut.

Tegangan rata-rata didefinisikan sebagai berikut

$$(V) = \lim_{\tau \to \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} V \, dt$$

Integral di atas dilakukan terhadap waktu dan perata-rataan dilakukan pada selang waktu $\boldsymbol{\tau}$ menuju tak berhingga. Untuk fungsi sinusoidal atau fungsi periodic secara umum, perata-rataan di atas menghasilkan nilai yang sama dengan perata-rataan selama satu periode saja. Jadi, tegangan rata-rata dapat ditulis dalam bentuk :

$$\boldsymbol{(V) = \frac{1}{T} \int_0^T V \, dt}$$

Karena $V = V_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)$, maka

$$(V) = \frac{1}{T} \int_0^T V_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right) dt$$

$$(V) = \frac{V_m}{T} \left(\frac{T}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)\right)_0^{\tau}$$

$$(V) = \frac{V_m}{2\pi} \left(\sin(2\pi + \varphi_o) - \sin(\varphi_{o)})\right)$$

$$\boldsymbol{(V) = 0}$$

Pada baris terakhir kita sudah menerapkan sifat periodisitas fungsi sinus sebesar 2π radian, sehingga $\sin(2\pi + \varphi_o) = \sin(\varphi_{o)})$. Jadi nilai rata-rata tegangan bolak balik sinusoidal adalah nol. Dengan menggunakan hukum Ohm $I = \frac{V}{R}$, maka nilai rata-rata arus bolak balik adalah

$$\boldsymbol{(I) = \frac{(V)}{R} = 0}$$

Jadi, nilai rata-rata arus bolak balik sinusoidal juga nol. Nilai rata-rata nol dapat dimengerti karena selama setengah periode, tegangan dan arus memiliki nilai positif dan setengah periode berikutnya memiliki nilai negative yang sama besar. Dengan demikian, nilai tegangan atau arus pada masing-masing setengah periode tersebut saling menghilangkan. Akibatnya tegangan dan arus rata-rata menjadi nol.

Untuk arus bolak-balik, nilai rata-rata tidak memberikan informasi yang lengkap tentang besaran arus atau tegangan, misalnya amplitudo. Karena berapapun besar amplitudo, nilai rata-rata selalu nol. Apabila kita gunakan alat ukur tegangan rata-rata maka kita akan amati tegangan listrik PLN selalu nol. Agar diperoleh data yang lebih informatif maka didefinisikan besaran lain yang dipakai pada arus bolak-balik. Besaran tersebut adalah besaran efektif. Tegangan dan arus efektif didefinisikan sebagai :

$$\boldsymbol{V_{ef} = \sqrt{V^2}}$$

$$\boldsymbol{I_{ef} = \sqrt{I^2}}$$

Tampak dari definisi bahwa untuk mendapatkan nilai efektif, maka kita melakukan tiga langkah, yaitu

i. *besaran tersebut dikuadratkan,*
ii. *menghitung nilai rata-rata besaran yang dikuadratkan tersebut*
iii. *mengambil akar besaran yang telah dihitung nilai rata-ratanya*

Dengan melakukan kuadrat sebelum perhitungan rata-rata maka nilai yang *negatif dipositifkan* dahulu, sehingga semua bagian yang dirata-ratakan bernilai *positif* dan tegangan efektif yang dihasilkan selalu *positif*, bagaimana pun bentuk arusnya. *Tegangan efektif nol* hanya jika *arus nol*. Jika *arus atau tegangan selalu positif, atau selalu negatif, atau bergantian positif dan negatif maka tegangan rms selalu positif*.

Contoh berikut adalah bagaimana kita menghitung nilai rms dari tegangan bolak-balik sinusoidal :

$$V = V_m \cos\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)$$

$$V^2 = {V_m}^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)$$

Rata-rata kuadratik tegangan adalah

$$(V)^2 = \left({V_m}^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)\right)$$

$$(V)^2 = \left({V_m}^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)\right)$$

$$(V)^2 = {V_m}^2 \left(\cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right)\right)$$

$$(V)^2 = {V_m}^2 \left(\frac{1}{T}\int_0^T \cos^2\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_o\right) dt\right)$$

Mari kita gunakan kesamaan berikut ini $\boldsymbol{\cos^2 \alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\alpha}$, maka kesamaannya dapat ditulis :

$$(V)^2 = \frac{{V_m}^2}{T}\int_0^T \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{4\pi}{T} t + 2\varphi_o\right)\right) dt$$

$$(V)^2 = \frac{{V_m}^2}{T}\left(\frac{t}{2} + \frac{T}{8\pi}\sin\left(\frac{4\pi}{T} t + 2\varphi_o\right)\right)_0^\tau$$

$$(V)^2 = \frac{{V_m}^2}{2}$$

Maka tegangan efektif, adalah :

$$\boldsymbol{V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}}$$

dimana, V_{ef} = tegangan efektif
V_m = tegangan maksimum

Dengan cara yang sama, maka kita akan dapatkan,

$$\boldsymbol{I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}}$$

dimana, I_{ef} = kuat arus efektif
I_m = kuat arus maksimum

Contoh Soal

1) Sebuah voltmeter digunakan untuk mengukur beda potensial (beda tegangan) di dalam rangkaian bolak balik. Angka yang ditunjukkan oleh voltmeter adalah 110 volt, maka beda tegangan maksimumnya adalah …..

   Pemyelesaian

   $$V_{ef} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{atau} \quad V_m = V_{ef}\sqrt{2} = 110\sqrt{2} \text{ volt}$$

2) Tegangan listrik PLN di Indonesia memiliki frekuensi 50 Hz. Tegangan yang dialirkan ke rumah tangga besarnya 220 V. Nyatakan tegangan tersebut sebagai fungsi waktu.

   Penyelesaian

   Periode adalah $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{50}$. Ungkapan tegangan 220 V yang dialirkan ke rumah tangga bermakna tegangan efektif. Jadi, V_{ef} = 220 V. Dengan demikian, amplitudo tegangan (tegangan maksimum) adalah

   $$V_m = \sqrt{2}\ V_{ef} = \sqrt{2}\, x\, 220 = 220\sqrt{2}\ volt$$

   Kita dapatkan tegangan sebagai fungsi waktu sebagai berikut

   $$V(t) = V_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}\, t + \varphi_o\right)$$

   $$V(t) = 220\sqrt{2} \cos\left(\frac{2\pi}{\frac{1}{50}}\, t + \varphi_o\right)$$

   $$V(t) = 220\sqrt{2} \cos(100\pi\, t + \varphi_o)$$

   dengan φ_o dapat diberi nilai sembarang.

1.5. Daya dan Daya Rata-rata

Mirip dengan Arus Searah, pada arus bolak-balik disipasi daya pada sebuah hambatan juga merupakan perkalian arus dan tegangan antara dua ujung hambatan. Misalkan sebuah hambatan R dialiri arus bolak-balik. Misalkan tegangan antara dua ujung hambatan memenuhi

$$\boldsymbol{V = V_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}\, t + \varphi_o\right)}$$

Disipasi daya pada hambatan memenuhi

$$\boldsymbol{P = \frac{V^2}{R}}$$

$$P = \frac{\left(V_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}\, t + \varphi_o\right)\right)^2}{R} = \frac{{V_m}^2 \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}\, t + \varphi_o\right)}{R}$$

Disipasi daya rata-rata pada hambatan adalah

$$(P) = \left(\frac{V^2}{R}\right) = \frac{(V^2)}{R}$$

Pembilang pada persamaan di atas tidak lain daripada kuadrat dari tegangan efektif. Jadi kita dapat menulis :

$$\boldsymbol{(P) = \frac{{V_{ef}}^2}{R}}$$

Tampak bahwa *daya yang dihasilkan arus bolak-balik selalu bernilai posifit,* karena *berbanding dengan kudrat fungsi sinusoidal*. Daya rata-rata *sebanding dengan kuadrat tegangan efektif*. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa *tegangan efektif merepsentasikan nilai daya yang ada dalam tegangan bolak-balik*.

Jumlah energi yang didisipasi arus bolak-balik yang melewati hambatan selama waktu **t** adalah

$$W = \int_0^t P \; dt$$

$$W = \int_0^t \frac{{V_{ef}}^2}{R} \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}\, t + \varphi_o\right) dt$$

$$W = \frac{{V_{ef}}^2}{R} \int_0^t \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}\, t + \varphi_o\right) dt$$

$$W = \frac{{V_{ef}}^2}{R} \int_0^t (\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\cos\left(\frac{4\pi}{T}\, t + 2\varphi_o\right) dt$$

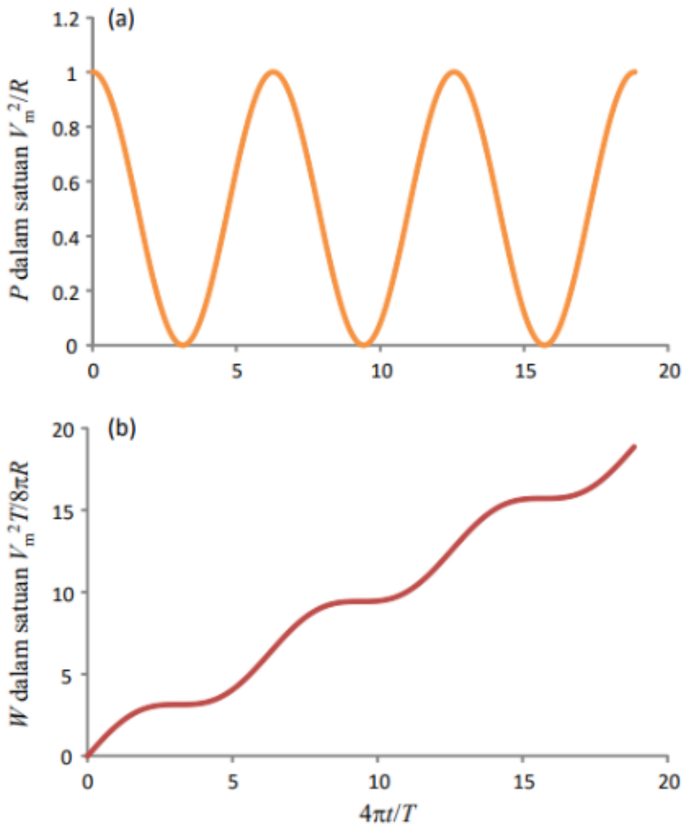
$$W = \frac{{V_{ef}}^2}{R} \left(\frac{t}{2} + \frac{T}{8\pi}\sin\left(\frac{4\pi}{T}\, t + 2\varphi_o\right)\right)_0^t$$

$$W = \frac{{V_{ef}}^2}{2\,R} \left(t + \frac{T}{4\pi}\sin\left(\frac{4\pi}{T}\, t + 2\varphi_o\right) - \frac{T}{4\pi}\sin(2\varphi_o)\right)$$

Jika kita misalkan $\varphi_o = 0$, maka kita dapat menulis

$$\boldsymbol{W = \frac{{V_{ef}}^2}{2\,R} \left(t + \frac{T}{4\pi}\sin\left(\frac{4\pi}{T}\, t\right)\right)}$$

Gambar 4.5 adalah contoh plot disipasi daya dan energi pada hambatan akibat dialiri arus bolak-bali sebagai fungsi waktu. Sumbu datar dinyatakan dalam variable $\frac{4\pi\, t}{T}$**.** Pada **Gambar 4.5(a)** daya pada sumbu vertikal dinyatakan dalam satuan $\frac{{V_m}^2}{R}$ dan pada **Gambar 4.5(b)** energi pada sumbu vertikal dinyatakan dalam satuan $\frac{{V_m}^2\, T}{8\pi\, R}$.



Gambar 4.5 Contoh plot disipasi daya dan energi pada hambatan akibat dialiri arus bolak-balik sebagai fungsi waktu. Sumbu datar dinyatakan dalam variable $\frac{4\pi t}{T}$. (a) Daya pada sumbu vertikal dinyatakan dalam satuan $\frac{V_m{}^2}{R}$ dan (b) energy pada sumbu vertikal dinyatakan dalam satuan $\frac{V_m{}^2 T}{8\pi R}$

2. Pengertian Tegangan Bolak Balik

Marilah kita mulai menganalisis tegangan yang dihasilkan arus bolak balik ketika melewati komponen. Komponen yang akan kita pelajari adalag *hambatan*, *kapasitor*, dan *induktor*. Kita mulai dengan menganalisis sifat arur bolak-balik yang melewati hambatan.

2.1. Tegangan Bolak Balik Pada Dua Ujung Hambatan

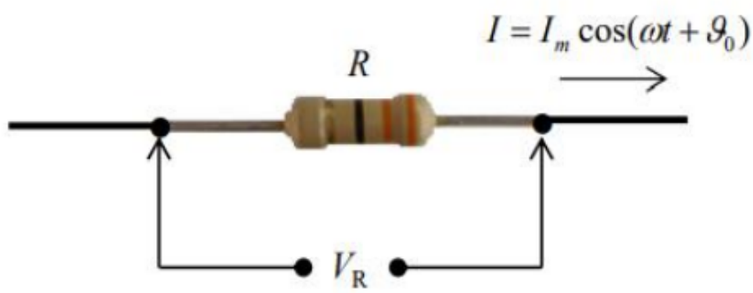
Marilah kita tinjau **Gambar 4.6**, dimisalkan pada sebuah hambatan dialiri arus bolak balik yang dituliskan dalam persamaan :

$$\boldsymbol{I = I_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}\, t + \varphi_o\right)} \quad karena\ \omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$= 2\pi f \quad \left(f = \frac{1}{T}\right)$$

$$\boldsymbol{I = I_m \cos(\omega\, t + \varphi_o)}$$

dari persamaan di atas, kita akan tentukan tegangannya.



Gambar 4.6 Arus bolak-balik melewati sebuah hambatan

Tegangannya dapat kita ketahui dengan menggunakan hukum ohm,

$$\boldsymbol{V_R = I\,R = I_m \cos(\omega\, t + \varphi_o)\ R}$$

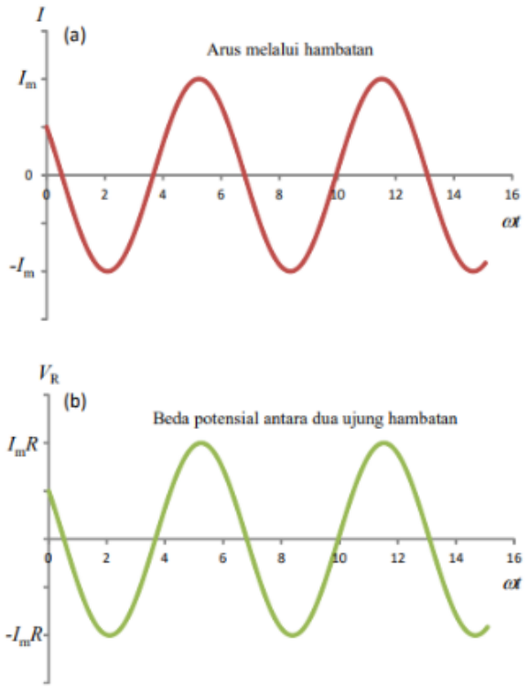
Tampak bahwa arus dan tegangan berubah secara bersamaan karena fase dalam fungsi kosinus sama bentuknya. Ketika arus nol, tegangan pun nol dan ketika arus maksimum, tegangan pun maksimum. Jika kita buatkan kurva arus dan tegangan maka kita dapatkan **Gambar 4.7**.

2.2. Tegangan Antara Dua Ujung Kapasitor

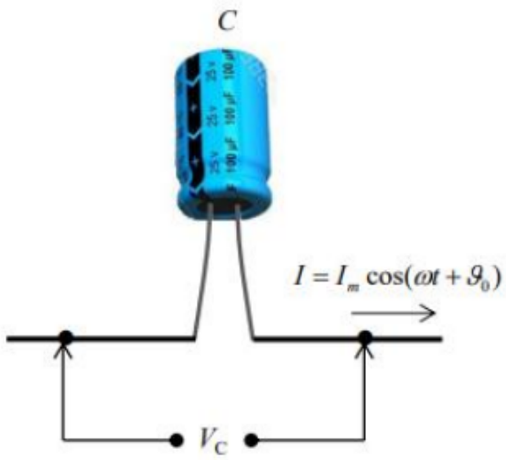
Berikutknya kita mencari hubungan arus dan tegangan pada kapasitor seperti diilustrasikan pada **Gambar 4.8**. Misalkan arus yang mengalir pada kapasitor juga memenuhi persamaan :

$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi_o)$$

Marilah kita mencari tegangan antara dua ujung kapasitor.



Gambar 4.7 Kurva tegangan dan arus sebagai fungsi waktu kerika arus bolak-balik dilewatkan pada sebuah resisto



Gambar 4.8 Arus bolak-balik melewati sebuah kapasitor

Mari kita hitung. Tegangan antara dua ujung kapasitor dapat dihitung dengan persamaan

$$\boldsymbol{V_C = \frac{Q}{C}}$$

Selanjutnya kita menentukan Q dengan cara mengintegralkan arus yang mengalir pada kapasitor terhadap variabel waktu dan diperoleh

$$Q = \int I \, dt$$

$$Q = \int I_m \cos(\omega t + \varphi_o) \, dt = I_m \int \cos(\omega t + \varphi_o) \, dt$$

$$Q = \frac{I_m}{\omega} \sin(\omega t + \varphi_o)$$

Dengan demikian, tegangan antara dua ujung kapasitor adalah

$$\boldsymbol{V_C = \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t + \varphi_o)}$$

yang dapat ditulis juga dalam bentuk sebagai berikut

$$V_C = I_m X_C \sin(\omega t + \varphi_o)$$

dengan

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Peranan $\mathbf{X_C}$ sama dengan peranan hambatan. Jadi pada arus bolak-balik kapasitor berperan sebagai hambatan dengan nilai hambatan $\mathbf{X_C}$. Besaran ini sering dinamakan *reaktansi kapasitif*. *Makin besar frekuensi arus bolak-balik maka hambatan kapasitor (reaktansi kapasitif) makin kecil*.

Arus searah atau DC dapat dipandang sebagai arus bolak-balik dengan frekuensi nol, $\boldsymbol{\omega = 0}$. Dengan frekueisn demikian, maka hambatan yang dimiliki kapsitor untuk arus bolak-balik adalah

$$X_C = \frac{1}{0 \, . \, C} = \infty$$

Dengan hambatan tak berhingga tersebut, maka arus searah tidak dapat mengalir melalui kapasitor. Bagi arus searah, kapasitor berperan sebagai sebuah saklar dalam posisi terbuka (*off*).

Hambatan kapasitor (*reaktansi kapasitif*) bergantung pada *frekuensi arus yang melewati kapasitor tersebut*. Jika *frekuensi arus sangat besar maka hambatan kapasitor sangat kecil*. Untuk *frekuensi yang menuju tak berhingga maka hambatan kapasitor menuju nol*, yang berarti kapasitor seolah-olah terhubung singkat. Sebaliknya jika *frekuensi arus yang mengalir pada kapasitor menuju nol maka hambatan kapasitor menuju tak berhingga*. Dalam kondisi ini kapasitor berperilaku sebagai sebuah saklar yang terbuka. Ini penyebab mengapa kapasitor tidak dapat dilewati arus DC karena arus DC memiliki frekuensi nol.

Dengan aturan trigonometri kita mendapatkan hubungan :

$$\sin(\omega t + \varphi_o) = \cos\left(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2}\right)$$

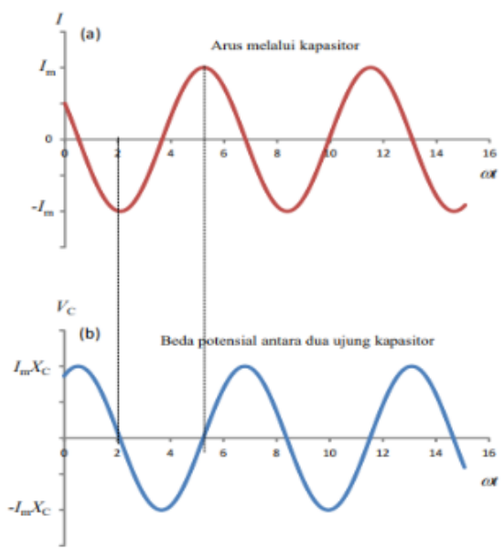
Substitusi kesamaan ini ke dalam persamaan,

$$\boldsymbol{V_C = I_m X_C \sin(\omega t + \varphi_o)}$$

Maka tegangan antara dua ujung kapasitor dapat ditulis :

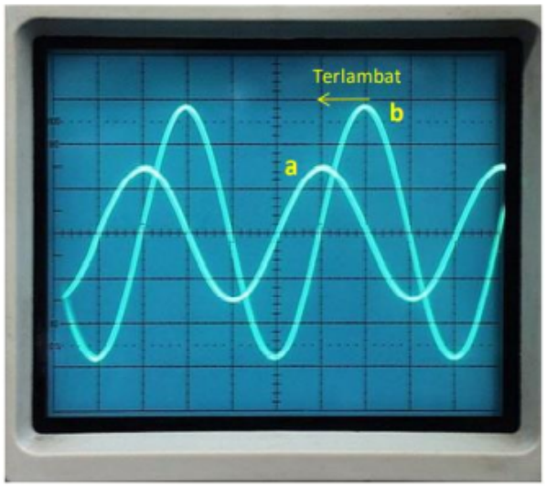
$$\boldsymbol{V_C = I_m X_C \cos(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2})}$$

Kurva arus yang mengalir pada kapasitor dan tegangan antara dua ujung kapasitor tampak pada **Gambar 4.9**. Jelas dari gambar tersebut bahwa kurva tegangan dapat diperoleh dari kurva arus dengan menggeser fasa sebesar $\frac{\pi}{2}$ atau $\mathbf{90^o}$. Dengan kata lain tegangan antara dua ujung kapasitor muncul lebih lambat daripada arus. Atau tegangan pada kapasitor mengikuti arus dengan keterlambatan fasa $\frac{\pi}{2}$.



Gambar 4.9 Kurva arus dan tegangan ketika arus bolak-balik melewati sebuah kapasitor

Gambar 4.10 adalah tampilan di layar osiloskop tegangan antara dua ujung hambatan dan dua ujung kapasitor. Kurva **(a)** menyatakan tegangan antara dua kaki gambatan dan kurva **(b)** adalah tegangan antar dua kaki kapasitor. Tampakm jelas bahwa tegangan antara dua kaki hambatan mendahului fasa tegangan antar dua kaki kapasitor sebesar $\frac{\pi}{2}$.



Gambar 4.10 tampilan di layar osiloskop tegangan antara dua ujung hambatan (a) dan dua ujung kapasitor (b). Pada layar osiloskop, makin ke kiri artinya makin cepat muncul.

2.3. Tegangan Antara Dua Ujung Induktor

Berikutnya kita akan kaji sifat arus bolak-balik yang mengalir melalui inductor. Seperti diilustrasikan pada **Gambar 4.11** kita akan mencari tegangan antara dua ujung induktor jika dialiri arus bolak-balik. Misalkan induktor dengan indultansi L juga dialiri arus yang memenuhi persamaan $I = I_m \cos(\omega t + \varphi_o)$. Berapa tegangan antara dua ujung induksor tersebut? Mari kita hitung.

Tegangan antara dua ujung induktor dapat ditentukan dari persamaan

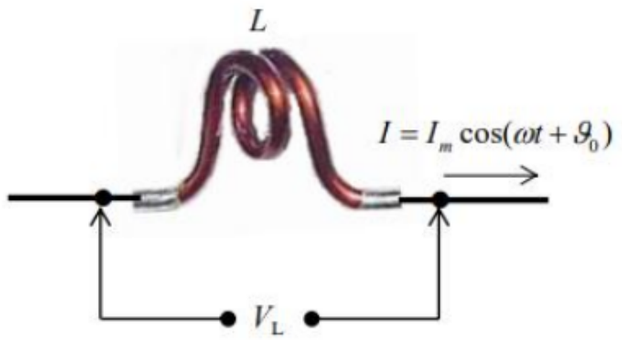
$$V_L = L \frac{dI}{dt}$$

$$V_L = L \frac{d}{dt} (I_m \cos(\omega t + \varphi_o))$$

$$V_L = -\omega L I_m \sin(\omega t + \varphi_o)$$

Jika $X_L = \omega L$, maka

$$\boldsymbol{V_L = -X_L I_m \sin(\omega t + \varphi_o)}$$



Gambar 4.11 Arus bolak-balik melewati sebuah induktor

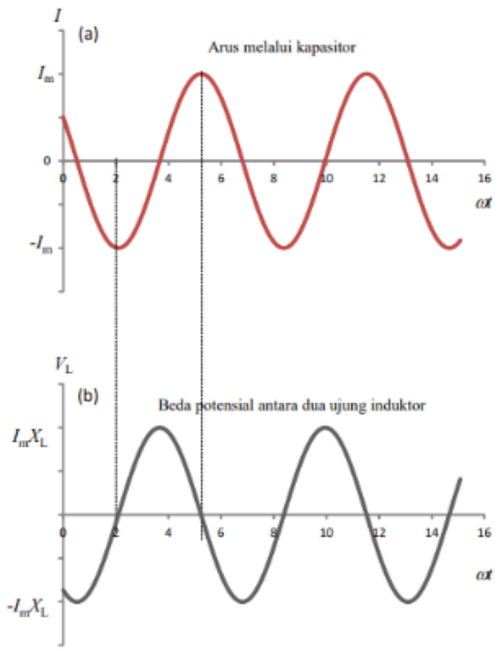
Tampak dari persamaan $\boldsymbol{V_L = -X_L I_m \sin(\omega t + \varphi_o)}$, bahwa ketika dialiri arus bolak-balik, induktor berperan sebagai hambatan dengan nilai hambatan X_L. Besaran X_L sering juga disebut *reaktansi induktif*. Nilai hambatan ini *makin besar jika frekuensi arus makin besar*. *Jika frekuensi arus menuju tak berhingga maka hambatan induktor menuju tak berhingga*. Dalam kondisi ini, induktor berperan sebagai sebuah saklar terbuka. Sebaliknya, jika frekuensi arus menuju nol maka hambatan induktor juga menuju nol, atau induktor seperti terhubung singkat.

Dengan aturan trigonometri, kita memperoleh hubungan berikut ini :

$$-\sin(\omega t + \varphi_o) = \cos(\omega t + \varphi_o)$$

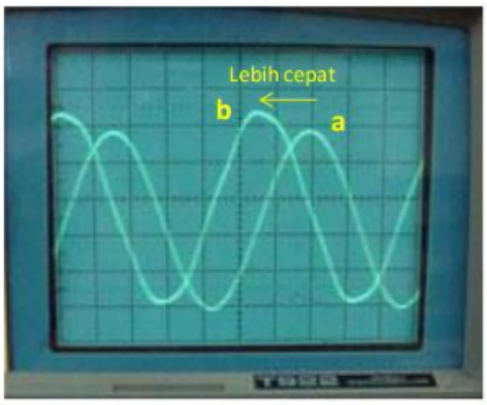
Maka tegangan antara dua ujung induktor, dapat dituliskan menjadi

$$\boldsymbol{V_L = -X_L I_m \sin(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2})}$$



Gambar 4.12 Kurva arus dan tegangan ketika arus bolak-balik melewati sebuah induktor

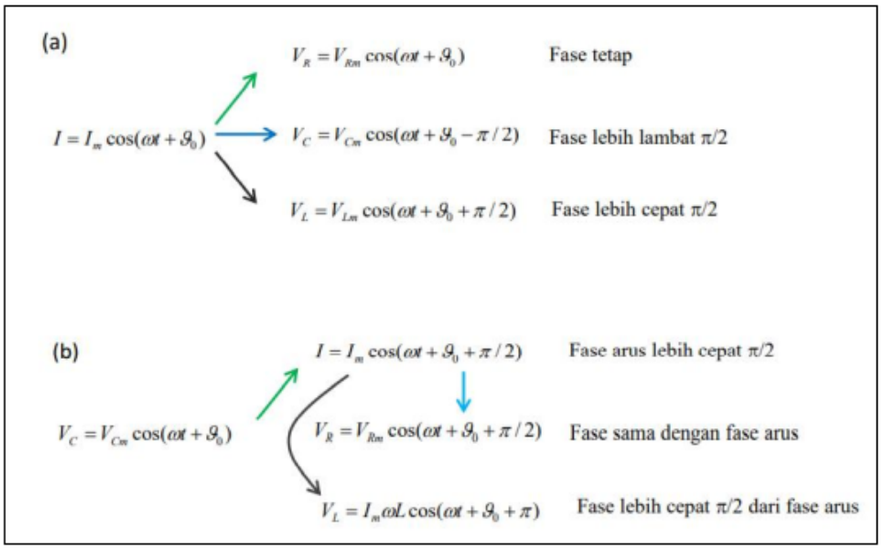
Gambar di atas dalah kurva arus dan tegangan antara dua ujung induktor. Tampak bahwa kurva $\mathbf{V_L}$ dapat diperoleh dari kurva arus dengan menggeser fasa ke kiri sebesar $\frac{\pi}{2}$ atau 90^o. Ini menandakan bahwa tegangan antara dua ujung induktor mendahului arus dengan fasa sebesar $\frac{\pi}{2}$ atau 90^o.



Gambar 4.13 tampilan di layar osiloskop tegangan antara dua ujung hambatan (a) dan dua ujung induktor (b). Pada layar osiloskop, makin ke kiri artinya makin cepat muncul.

Gambar 4.13 di atas adalah tampilan di layar osiloskop tegangan antara dua ujung hambatan dan dua ujung induktor. Kurva **(a)** menyatakan tegangan antara dua kaki gambatan dan kurva **(b)** adalah tegangan antar dua kaki induktor. Tampak jelas bahwa tegangan antara dua kaki hambatan mengalami keterlambatan fasa dibandingan tegangan antar dua kaki induktor sebesar $\frac{\pi}{2}$.

Dalam rangka mencari tegangan antara dua ujung hambatan, kapasitor, atau induktor, langkah pertama adalah *menentukan fase arus*. Begitu fase arus diperoleh maka fase antara dua ujung komponen dapat ditentukan dengan mudah, yaitu fase pada hambatan sama dengan fase arus, fase pada kapasitor berkurang $\frac{\pi}{2}$ terhadap fase arus, dan fase pada induktor bertambah $\frac{\pi}{2}$ terhadap fase arus. Proses ini diilustrasikan pada **Gambar 4.14(a)**.



Gambar 4.14 (a) Diberikan arus maka tegangan antara kaki-kaki resistor, kapasitor, dan induktor dapat ditentukan dengn mudah. (b) diberikan tegangan pada kapasitor. Langkah pertama adalah meenntukan fase arus. Setelah fase arus diketauhui maka fase pada hambatan dan induktor dapat ditentukan dengan mudah.

Kadang yang diberikan adalah tegangan antara dua ujung kapasitor atau inductor. Untuk menentukan tegangan antara ujung komponen lainnya maka mulai dengan menentukan fase arus. Contohnya pada **Gambar 4.14 (b)** tegangan antara dua ujung kapasitor diberikan. Dari situ kita mendapatkan fase arus dengan menambahkan $\frac{\pi}{2}$ pada fase kapasitor. Dari fase arus maka kita dapatkan fase tegangan pada resistor, yaitu sama dengan fase arus. Lalu fase pada inductor diperoleh dengan menambahkan $\frac{\pi}{2}$ pada fase arus.

3. Disipasi Daya Pada Kapasitor Dan Induktor

Kita sudah memahami bahwa jika sebuah hambatan dilewati arus, maka *timbul disipasi daya*. Ketika dilewati arus bolak-balik, kapasitor dan induktor berperan sebagai hambatan. Berapakah disipasi daya pada dua komponen tersebut? Mari kita analisis satu per satu.

3.1. Disipasi Daya Pada Kapasitor

Kita sudah membahas disipasi daya pada resistor yang dilewati atus bola-balik. Sekarang kita bahas disipasi daya pada kapasitor. Disipasi daya pada kapasitor memenuhi

$$\boldsymbol{P_C = I\,V_C}$$

Dengan mensubtitusi arus para persamaan $I = I_m \cos(\omega\, t + \varphi_o)$ dan tegangan V_C pada persamaan $V_C = I_m\, X_C \sin(\omega\, t + \varphi_o)$ ke dalam persamaan di atas, maka

$$P_C = (I_m \cos(\omega\, t + \varphi_o))\ (I_m\, X_C \sin(\omega\, t + \varphi_o))$$

$$\boldsymbol{P_C = {I_m}^2\, X_C \sin(\omega\, t + \varphi_o)\cos(\omega\, t + \varphi_o)}$$

Maka, disipasi daya rata-rata adalah :

$$\boldsymbol{(P) = {I_m}^2\, X_C\, [\sin(\omega\, t + \varphi_o)\cos(\omega\, t + \varphi_o)]}$$

$$\boldsymbol{(P) = {I_m}^2\, X_C\ \frac{1}{T}\int_0^T \sin(\omega\, t + \varphi_o)\cos(\omega\, t + \varphi_o)\ dt}$$

Mudah dibuktikan bahwa integral perkalian fungsi sinus dan kosinus dalam satu periode hasilnya *nol*. Dengan demikian, kita akan dapatkan

$$(\boldsymbol{P_C}) = \mathbf{0}$$

Jadi, *disipasi daya rata-rata pada kapasitor adalah nol*. Kapasitor yang dilewati arus bolak-balik tidak mengalami pemanasan seperti yang dialami resistor, walaupun pada rangkaian bolak-balik kapasitor berperan seperti sebuah hambatan.

3.2. Disipasi Daya Pada Kapasitor

Marilah kita hitung disipasi daya pada induktor. Disipasi daya pada induktor memenuhi

$$\boldsymbol{P_L = I\, V_L}$$

Dengan mensubtitusi arus para persamaan $I = I_m \cos(\omega\, t + \varphi_o)$ dan tegangan V_L pada persamaan $V_L = -X_L\, I_m \sin(\omega\, t + \varphi_o)$ ke dalam persamaan di atas, maka

$$\boldsymbol{P_L} = (I_m \cos(\omega\, t + \varphi_o))\,(-X_L\, I_m \sin(\omega\, t + \varphi_o))$$

$$\boldsymbol{P_L = -{I_m}^2\, X_L\, \sin(\omega\, t + \varphi_o)\cos(\omega\, t + \varphi_o)}$$

Maka, disipasi daya rata-rata adalah :

$$(\boldsymbol{P_L}) = -{\boldsymbol{I_m}}^2\, \boldsymbol{X_L}\,[\sin(\boldsymbol{\omega\, t + \varphi_o})\cos(\boldsymbol{\omega\, t + \varphi_o})] = \mathbf{0}$$

Kita peroleh juga bahwa disipasi daya rata-rata pada induktor juga nol, sama dengan disipasi daya pada kapasitor.

4. Diagram Fasor

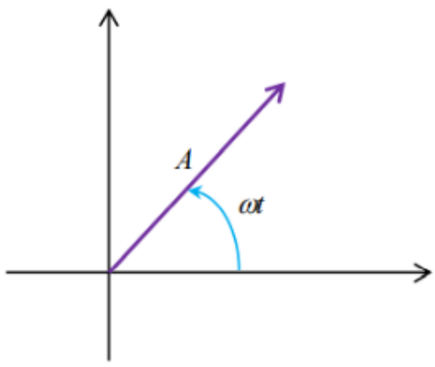
Pada bagian selanjuutnya kita akan memelajari rangkaian arus bolak-balik. Menentukan arus dan tegangan pada rangkaian ini lebih rumit daripada mencari arus dan tegangan pada rangkaian arus searah. Pada rangkaian arus bolak-balik kita akan

memecahkan besaran-besaran yang mengandung fungsi trigonometri.

Untuk memmudahkan pembahasan tentang arus bolak-balik, pada bagian ini kita akan memelajari diagram fasor. Diagram fasor sangat membantu kita dalam melakukan operasi aljabar pada fungsi-fungsi trigonometri. Dalam diagram fasor, sebuah fungsi trigonometri digambarkan sebagai sebuah vektor. Panjang vektor tersebut sama dengan amplitudo fungsi dan sudut yang dibentuk vektor dengan sumbu datar sama dengan fase fungsi tersebut. Contohnya, kita memiliki fungsi :

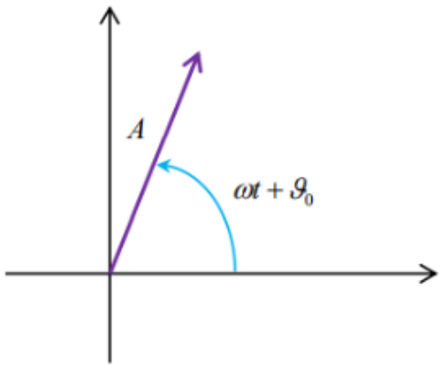
$$\boldsymbol{V = A\ \cos(\omega t)}$$

Amplitudo fungsi di atas adalah **A** dan fasenya adalah **ωt**. Jika direpresentasikan dalam diagram fasor maka kita akan dapatkan vektor dengan panjang A dan membentuk sudut ωt terhadap sumbu datar, seperti dintunjukkan dalam **Gambar 4.15**.



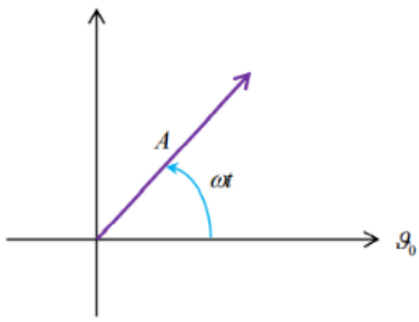
Gambar 4.15 Contoh diagram fasor untuk fungsi $V = A\ \cos(\omega t)$

Kita gambarkan vektor yang panjangnya **A** dan membentuk sudut $(\omega\, t + \varphi_o)$ terhadap sumbu datar. Hasilnya tampak pada **Gambar 4.16**.



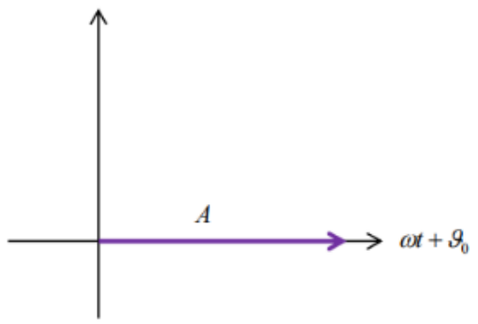
Gambar 4.16 Diagram Fasor pada Fungsi $V = A\ \cos(\omega t + \varphi_o)$

Cara lain menggambar diagram fasor adalah dengan memberikan sudut berapa saja pada arah yang sejajar sumbu datar. Dengan pemberian sudut ini maka sudut antara vektor dengan sumbu datar sama dengan selisih sudut fase mula-mula dengan sudut yang diberikan dalam arah datar tersebut. Sebagai contoh, untuk fungsi $\boldsymbol{V = A\ \cos(\omega t + \varphi_o)}$ kita dapat memberikan sudut $\boldsymbol{\varphi_o}$ untuk arah datar. Akibatnya, sudut yang dibentuk vektor terhadap arah datar menjadi $\boldsymbol{\omega t}$ saja. Diagram fasornya tampak pada **Gambar 4.17**.



Gambar 4.17 Diagram fasor untuk fungsi $V = A\ \cos(\omega t + \varphi_o)$ dengan mengambil sumbu datar memiliki sudut fasa φ_o

Lebih ekstrim lagi, kita dapat juga memberikan sudut $(\boldsymbol{\omega t + \varphi_o})$ untuk arah datar. Pemilihan ini menyebabkan bentuk diagram fasor seperti pada **Gambar 4.18**.



Gambar 4.18 Diagram fasor untuk fungsi $V = A\ \cos(\omega t + \varphi_o)$ dengan mengambil sumbu datar memiliki sudut fasa $(\omega t + \varphi_o)$

Keterangan

Untuk menggambarkan diagran fasor, lebih dianjurkan semua fungsi dinyatakan dalam bentuk kosinus. Jika dijumpai fungsi sinus, maka fungsi tersebut diubah ke fungsi kosinus dengan menggunakan hubungan

$$\sin\theta = \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

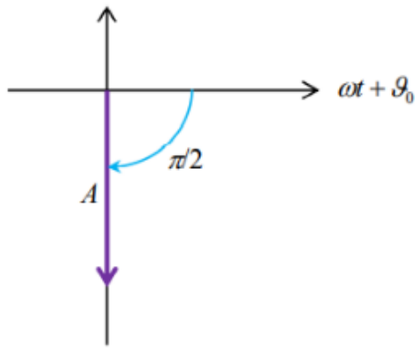
Bagaimana menggambar diagram fasor fungsi $V = A\ \sin(\omega t + \varphi_o)$ *?*

Pertama, kita ubah fungsi di atas menjadi fungsi kosinus sebagai berikut

$$V = A\ \sin(\omega t + \varphi_o)$$

$$V = A\ \cos(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2})$$

Kedua, kita gambarkan diagram fasor dengan memilih fase arah datar sembarang. Jika kita pilih fase arah datar adalah sudut $(\omega t + \varphi_o)$ maka diagram fasor menjadi seperti pada **Gambar 4.19**.



Gambar 4.19 Diagram fasor untuk fungsi $\sin(\omega t + \varphi_o)$

5. Operasi Trigonometri Dengan Diagram Fasor

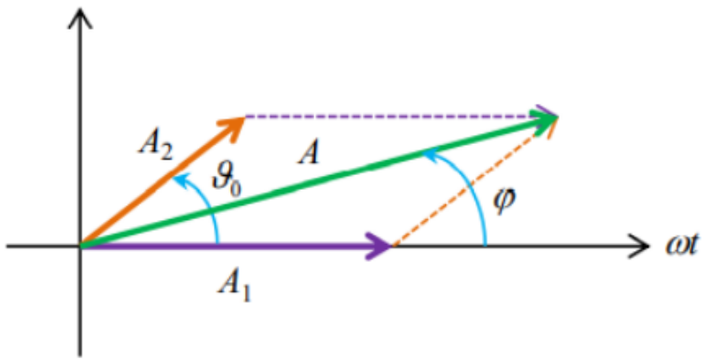
Marilah kita mencari hasil penjumlahan dan pengurangan fungsi trigonometri dengan menggunakan diagram fasor. Terlihat bahwa yang kita cari nanti ternyata hanyalah proses penjumlahan dan pengurangan vektor seperti yang telah kita pelajari sebelumnya.

Contonya, kita akan menjumlahan dua buah fungsi trigonometri berikut ini,

$$\boldsymbol{V_1 = A_1 \cos(\omega t)}$$

$$\boldsymbol{V_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_o)}$$

Kita akan mencari fungsi $\mathbf{V = V_1 + V_2}$. Yang pertama kali yang akan kita lakukan adalah menggambarkan $\mathbf{V_1}$ dan $\mathbf{V_2}$ dalam diagram fasor. Karena kedua fungsi trigonometri di atas memiliki salah satu komponen fase yang sama yaitu $\boldsymbol{\omega t}$, maka akan sangat tertolong apabila kita pilih sumbu datar memiliki fase $\boldsymbol{\omega t}$. Akibatnya, fungsi $\mathbf{V_1}$ digambarkan sebagai vektor yang searah sumbu datar dan fungsi $\mathbf{V_2}$ digambarkan sebagai vektor yang membentuk sudut $\boldsymbol{\varphi_o}$ terhadap sumbu datar. Diagram fasornya tampak pada **Gambar 4.20**.

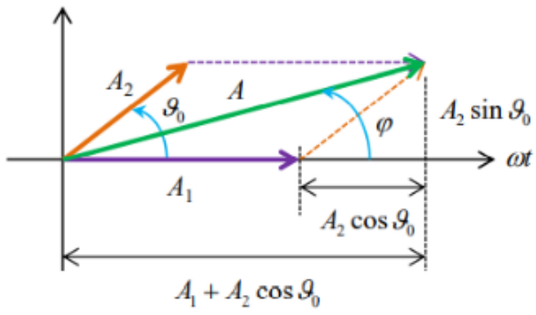


Gambar 4.20 Diagram Fasor fungsi V_1 dan V_2 serta fungsi hasil penjumlahan

Yang perlu kita cari selanjutnya adalah panjang vektor V yaitu **A** dan sudut yang dibentuk vektor V dengan sumbu datar, yaitu $\boldsymbol{\theta}$. Dengan aturan penjumlahan vektor metode jajaran genjang kita dapatkan,

$$\boldsymbol{A = \sqrt{A_1{}^2 + A_2{}^2 + 2\,A_1\,A_2\cos\varphi_o}}$$

Untuk menentukan $\boldsymbol{\theta}$, lihat **Gambar 4.21** berikut ini



Gambar 4.21 Menentukan sudut fasa fungsi hasil penjumlahan V_1 dan V_2

Tampak dari gambar di atas, vektor A memiliki komponen arah horizontal,

$$\boldsymbol{A_h = A_1 + A_2\,\cos\varphi_o}$$

dan komponen arah vertikal,

$$\boldsymbol{A_v = A_2 \sin \varphi_o}$$

Sudut yang dibentum vektor A dengan sumbu datar memenuhi,

$$\boldsymbol{\tan \theta = \frac{A_v}{A_h} = \frac{A_2 \sin \varphi_o}{A_1 + A_2 \cos \varphi_o}}$$

Setelah panjang **A** dan sudut $\boldsymbol{\theta}$ ditentukan maka fungsi penjumlahan **V** dapat diperoleh, yaitu

$$\boldsymbol{V = A \cos(\omega t + \theta)}$$

Contoh Soal

Dua fungsi trigonometri masing-masing berbentuk $\boldsymbol{V_1 = 7 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)}$ dan $\boldsymbol{V_2 = 5 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)}$.

a) Gambarkan diagram fasor yang memuat dua fungsi di atas,
b) Tentukan persamaan untuk fungsi $V = V_1 + V_2$.

Penyelesaian

Untuk memudahkan kita ubah semua fungsi trigonometri dalam bentuk kosinus. Jadi

$$V_1 = 7 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right)$$
$$= 7 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) = 7 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)$$

dengan penulisan ini, maka selisih fase dua fungsi tersebut menjadi

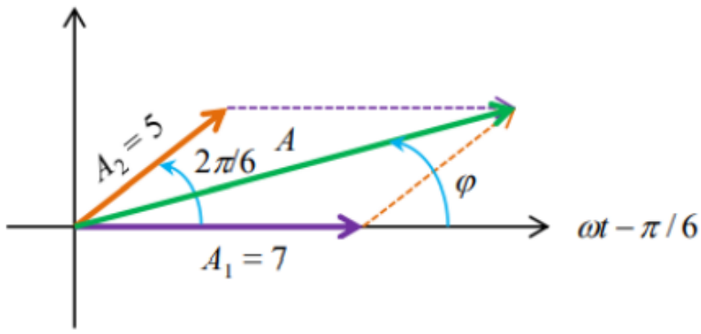
$$\varphi_o = \left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) - \left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)$$

Untuk menggambar diagram fasor, kita dapat mengambil arah horisontal memiliki sudut $(\omega t - \frac{\pi}{6})$. Diagram fasor tampak pada **Gambar 4.22**.

Amplitudo hasil penjumlahan dua fungsi dia atas adalah

$$A = \sqrt{{A_1}^2 + {A_2}^2 + 2\,A_1\,A_2 \cos\varphi_o}$$

$$A = \sqrt{7^2 + 5^2 + 2.7.5.\cos(\frac{2\pi}{6})} = \sqrt{109} = 10{,}4$$



Gambar 4.22 Diagram fasor dua fungsi serta hasil penjumlahannya

Sudut yang dibentuk vektor A dengan sumbu datar memenuhi

$$\tan\theta = \frac{A_2\ \sin\varphi_o}{A_1 + A_2\ \cos\varphi_o}$$

$$\tan\theta = \frac{5\ \sin(\frac{2\pi}{6})}{7 + 5\ \cos(\frac{2\pi}{6})} = 0{,}14\ \pi$$

Karena fase arah sumbu x telah dipilih $(\omega t - \frac{\pi}{6})$, maka fase hasil penjumlahan menjadi $(\omega t - \frac{\pi}{6} + \theta)$. Dengan demikian, kebergantungan fungsi V terhadap waktu menjadi :

$$V = A \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6} + \theta\right)$$

$$V = 10{,}4 \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6} + 0{,}14\pi\right) = 10{,}4 \cos(\omega t + 0{,}03\pi)$$

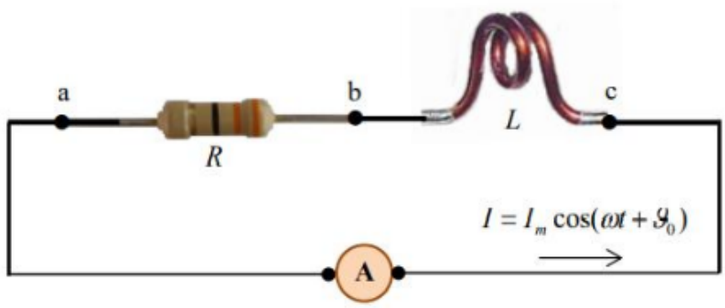
6. Rangkaian Arus Bolak Balik

Berbekal pemahaman tentang diagram fasor maka kita dapat melakukan analisis rangaian bolak-balik dengan mudah. Yang dimaksud dengan rangkaian bolak-balik di sini adalah *rangkaian yang dialiri arus bolak-balik*. Pada bagian ini kita hanya akan membahas rangkaian yang mengandung resistor, induktor, dan kapasitor. Pada prinsipnya, komponen apapun yang dipasang pada rangkaian bolak-balik dapat diganti dengan rangkaian yang mengandung resistor, kapasitor, dan induktor yang menghasilkan sifat yang serupa.

6.1. Rangkaian RL Seri

Sebuah rangkaian yang mempunyai hambatan (resistor) dan reaktansi induktif yang tersusun secara seri dan dihubungkan dengan tegangan bolak balik, seperti pada **Gambar 4.23**.

Kita ingin mencari tegangan antara titik **a** dan **b**, antara titik **b** dan **c**, dan antara titik **a** dan **c**. Mari kita analisis.



Gambar 4.23 Rangkaian RL Seri

Diberikan $I = I_m \cos(\omega t + \varphi_o)$. Tegangan antara dua ujung hambatan memiliki fasa yang sama dengan arus. Maka kita langsung dapat menulis,

$$\boldsymbol{V_{ab} = I_m R \cos(\omega t + \varphi_o)}$$

Tegangan antara dua ujung induktor memiliki fasa yang mendahului arus sebesar $\frac{\pi}{2}$. Maka kita dapatkan

$$\boldsymbol{V_{bc} = I_m X_L \cos\left(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}\right)}$$

dengan

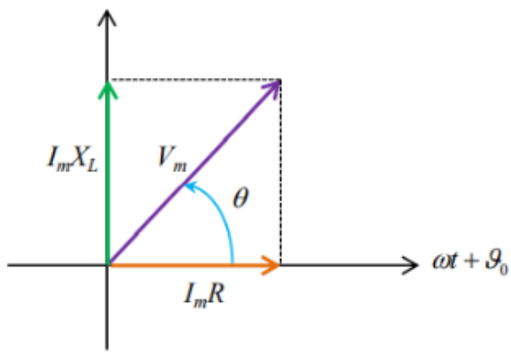
$$\boldsymbol{X_L = \omega L}$$

Tegangan antara ujung kiri resistor dengan ujung kanan induktor menjadi

$$\boldsymbol{V_{ac} = V_{ab} + V_{bc}}$$

$$V_{bc} = I_m R \cos(\omega t + \varphi_o) + I_m X_L \cos\left(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}\right)$$

Kita menemui penjumlahan trigonometri yang tidak sefasa. Maka kita dapat menggunakan diagram fasor untuk menyelesaikannya. **Gambar 4.24** adalah diagram fasor yang kita gunakan



Gambar 4.24 Diagram faror untuk penjumlahan

Kita pilih sumbu datar memiliki sudut fasa $(\omega t + \varphi_o)$ agar memudahkan penyelesaian. Dengan dalil Phitagoras maka

$$V_m = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L)^2} = I_m \sqrt{R^2 + {X_L}^2}$$

dan

$$\tan\theta = \frac{I_m X_L}{I_m R} = \frac{X_L}{R}$$

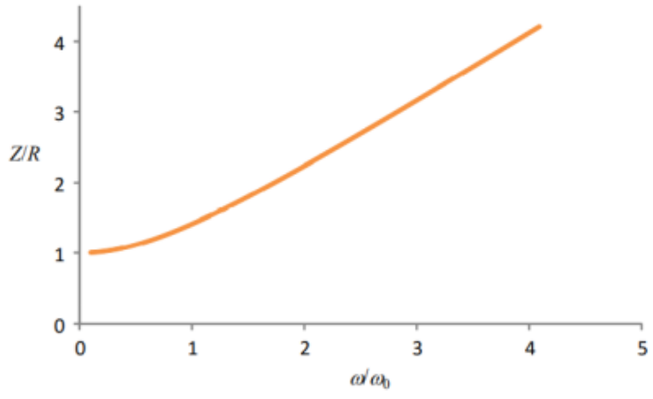
Akhirnya kita dapatkan bentuk umum tegangan antara titik **a** dan **c** sebagai berikut

$$V_{ac} = V_m \cos(\omega t + \varphi_o + \theta)$$

$$V_{ac} = I_m \sqrt{R^2 + {X_L}^2} \cos(\omega t + \varphi_o + \theta)$$

$$\boldsymbol{V_{ac} = I_m Z \cos(\omega t + \varphi_o + \theta)} \quad dengan\ \boldsymbol{Z} = \boldsymbol{\sqrt{R^2 + {X_L}^2}}$$

dimana **Z** disebut dengan impedansi rangkaian seri RL.



Gambar 4.25 Plot rasio Z terhadap hambatan resistor terhdap ω yang dinyatakan dalam satuan ω_o pada rangkaian RL.

Karena X_L merupkan fungsi frekuensi maka impedansi rangkaian RL bergantung pada frekuensi. Kita dapat menulis secara eksplisit kebergantungan Z pada frekuensi sebagai berikut,

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$\boldsymbol{Z = R\sqrt{1 + (\frac{\omega L}{R})^2}}$$

Selanjutnya kita definisikan

$$\omega_o = \sqrt{\frac{R}{L}}$$

Sehingga kita dapat menulis

$$Z = \boldsymbol{R\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_o})^2}}$$

Gambar 4.25 adalah plot rasio Z terhadap hambatan resistor terhdap **ω** yang dinyatakan dalam satuan **ω_0**. Tampak bahwa *impedansi makin bertambah dengan bertabahnya frekuensi*. Ini artinya bahwa *makin tinggi frekuensi maka pengarud induktor makin besar*.

Contoh Soal

Hambatan 30 kΩ dihubungkan secara seri dengan induktor 0,5 H pada suatu rangkaian AC. Hitung impedansi rangkaian jika frekuensi sumber arus adalah 60 Hz.

Penyelesaian

$$f = 60\ Hz,$$

$$maka\ \omega = 2\pi f = 2\ x\ 3{,}14\ x\ 60$$

$$= 376{,}8\ \frac{rad}{det},$$

$$X_L = \omega L = 2\pi f = 376{,}8\ x\ 0{,}5 = 188{,}4\ \Omega$$

Maka impedansi rangkaian adalah

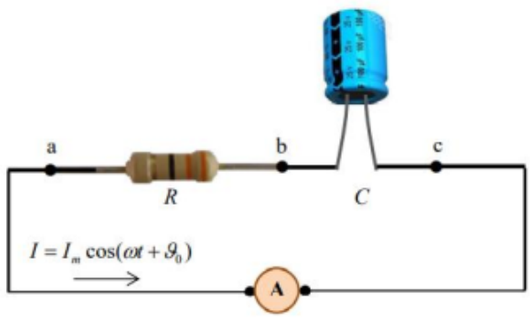
$$Z = \sqrt{R^2 + {X_L}^2} = \sqrt{(3x10^4)^2 + (188{,}4)^2}$$

$$Z = 3\ x\ 10^4\ \Omega = 30\ \Omega$$

6.2. Rangkaian RC Seri

Sebuah rangkaian yang mempunyai hambatan (resistor) dan reaktansi kapasitif (kapasitor) yang tersusun secara seri dan dihubungkan dengan tegangan bolak balik, seperti pada **Gambar 4.26.**

Kita ingin mencari tegangan antara titik **a** dan **b**, antara titik **b** dan **c**, dan antara titik **a** dan **c**. Mari kita analisis.



Gambar 4.26 Rangkaian Seri RC

Diberikan $\boldsymbol{I = I_m \cos(\omega t + \varphi_o)}$. Tegangan antara dua ujung hambatan memiliki fasa yang sama dengan arus. Maka kita langsung dapat menulis

$$\boldsymbol{V_{ab} = I_m R \cos(\omega t + \varphi_o)}$$

Tegangan antara dua ujung kapasitor memiliki fasa yang mengikuti arus dengan keterlambatan sebesar $\frac{\pi}{2}$. Maka kita langsung dapat menulis

$$\boldsymbol{V_{bc} = I_m X_C \cos\left(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2}\right)}$$

dengan

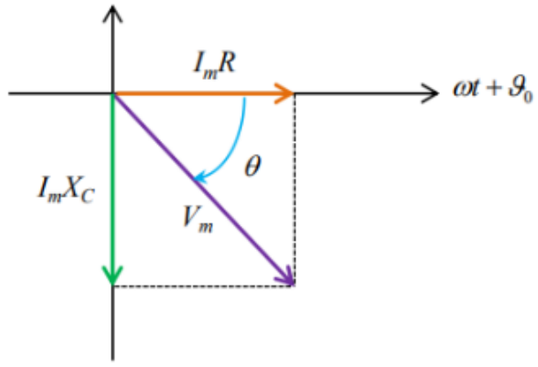
$$\boldsymbol{X_C = \frac{1}{\omega C}}$$

Tegangan antara ujung kiri resistor dengan ujung kanan kapasitor menjadi

$$\boldsymbol{V_{ac} = V_{ab} + V_{bc}}$$

$$V_{bc} = I_m R \cos(\omega t + \varphi_o) + I_m X_C \cos\left(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2}\right)$$

Di sini kita menemui penjumlahan trigonometri yang tidak sefasa. Maka kita dapat menggunakan diagram fasor untuk menyelesaikannya. **Gambar 4.27** adalah diagram fasor yang kita gunakan



Gambar 4.27 Diagram fasor untuk penjumlahan tegangan pada rangkalan seri RC

Kita memilih sumbu datar memiliki sudut fasa $(\omega t + \varphi_o)$ agar memudahkan penyelesaian. Dengan rumus Phitagoras maka

$$V_m = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_C)^2} = I_m \sqrt{R^2 + {X_C}^2}$$

dan

$$\tan\theta = \frac{I_m X_C}{I_m R} = \frac{X_C}{R}$$

Perhatikan **Gambar 4.27**, Sudut **θ** ada di bawah sumbu datar. Fase yang dimiliki tegangan total sama dengan fase sumbu datar dikurangi sudut **θ.** Dengan demikian kita dapatkan bentuk umum tegangan antara titik **a** dan **c** sebagai berikut

$$V_{ac} = V_m \cos(\omega t + \varphi_o - \theta)$$

$$V_{ac} = I_m \sqrt{R^2 + {X_C}^2} \cos(\omega t + \varphi_o - \theta)$$

yang dapat ditulis sebagai sebagai

$$\boldsymbol{V_{ac} = I_m Z \cos(\omega t + \varphi_o - \theta)} \quad dengan\ \boldsymbol{Z} = \sqrt{\boldsymbol{R^2 + {X_C}^2}}$$

dimana $\mathbf{Z}$ disebut dengan impedansi rangkaian seri RC.

Karena XC merupkan fungsi frekuensi maka impedansi rangkaian RC bergantung pada frekuensi. Kita dapat menulis secara eksplisit kebergantungan Z pada frekuensi sebagai berikut

$$Z = \sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}$$

$$Z = R \sqrt{1 + (\frac{1}{\omega R C})^2}$$

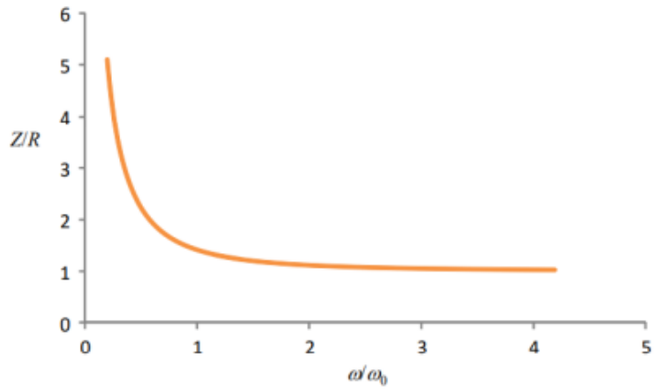
Selanjutnya kita definisikan

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{R C}}$$

Sehingga dapat ditulis

$$\boldsymbol{Z = R \sqrt{1 + (\frac{\omega_o}{\omega})^2}}$$

Gambar 4.28 adalah plot rasio Z terhadap hambatan resistor terhdap **ω** yang dinyatakan dalam satuan **ω₀**. Tampak bahwa makin tinggi frekuensi maka impedansi makin kecil. HaL ini disebabkan karena pengaruh kapasitor makin kecil (pada frekuensi yang makin tinggi maka impedansi kapasitif makin kecil).



Gambar 4.28 plot rasio Z terhadap hambatan resistor terhdap ω yang dinyatakan dalam satuan ω_0 pada rangkaian RC.

Contoh Soal

Rangkaian seri RC mengandung hambatan 100 Ω dan kapasitansi 1 μF. Jika tegangan antara dua ujung kapasitor adalah 10 cos(2000 t + π/6) volt, tentukan : (a) arus yang mengalir, (b) Tegangan antara dua resistor, (c) Tegangan total antara ujung resistor dan ujung kapasitor.

Penyelesaian

Tegangan antara dua ujung kapasitor, $\mathbf{V_C = 10\ cos(2000\ t + \pi/6)}$ volt

Dari persamaan sini diperoleh V_{Cm} = 10 V dan ω = 2000 rad/s.

a) Impedansi Kapasitif, $X_C = \frac{1}{\omega\ C} = \frac{1}{2000\ x\ 10^{-6}} = 500\ \Omega$

Amplitude arus yang mengalir, $I_m = \frac{V_{Cm}}{X_C} = \frac{10}{500} = 2\ x\ 10^{-2} A$

Pada rangkaian seri RC, fase tegangan antara dua ujung kapasitor mengikuti arus dengan keterlambatan fase $\frac{\pi}{2}$. Atau fase arus mendahului fase tagangan antara dua ujung kapasitor dengan beda fase $\frac{\pi}{2}$. Karena fase tagangan

antara dua ujung kapasitor adalah (2000t + $\frac{\pi}{6}$), maka fase arus adalah (2000t + $\frac{\pi}{6}$ + $\frac{\pi}{2}$) = (2000t + $\frac{4\pi}{6}$). Dengan demikian, fungsi arus adalah

$$I = I_m \cos\left(2000\, t + \frac{4\pi}{6}\right)$$
$$= 2\, x\, 10^{-2} \cos\left(2000\, t + \frac{4\pi}{6}\right) A$$

b) Tegangan antara dua ujung resistor,
Fase tegangan antara dua ujung resistor sama dengan fase arus. Amplitudo tegangan antara dua ujung resistor adalah

$$V_{Rm} = I_m\, R = 2\, x\, 10^{-2}\, x\, 100 = 2\, V$$

Karena sama dengan fase arus, maka

$$V_R = V_{Rm} \cos\left(2000\, t + \frac{4\pi}{6}\right)$$

c) Tegangan total antara ujung resistor dan ujung kapasitor
Impedansi total antara dua ujung komponen adalah

$$Z = \sqrt{R^2 + {X_C}^2} = \sqrt{100^2 + 500^2} = 500{,}1\ \Omega$$

Amplitudo tegangan

$$V_m = I_m\, Z = 2\, x\, 10^{-2}\, x\, 500{,}1 = 10\, V$$

Beda fase antara tegangan total dan arus adalah **θ** yang memenuhi

$$\tan\theta = \frac{X_C}{R} = \frac{500}{100} = 5 \quad atau \quad \theta = 1{,}373\ rad$$
$$= 0{,}44\pi\ rad$$

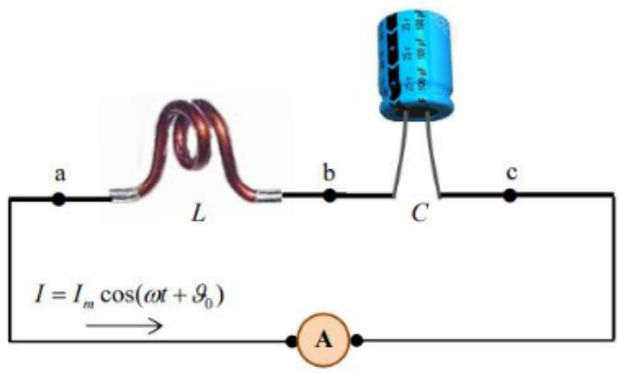
Untuk rangkaian RC, fase tegangan mengikuti arus dengan keterlambatan fase **θ = 0,44π**. Karena fase arus adalah (2000 t + $\frac{4\pi}{6}$) maka fase tegangan adalah (2000 t + $\frac{4\pi}{6}$ - θ) = (2000t + $\frac{4\pi}{6}$ - 0,44π) = (2000t + 0,23π). Jadi, kebergantungan tegangan total terhadap waktu memenuhi

$$V = V_m \cos(2000\, t + 0{,}23\, \pi)$$
$$= 10 \cos(2000\, t + 0{,}23\, \pi)$$

6.3. Rangkaian LC Seri

Sebuah rangkaian yang mempunyai reaktansi induktif (inductor) dan reaktansi kapasitif (kapasitor) yang tersusun secara seri dan dihubungkan dengan tegangan bolak balik, seperti pada **Gambar 4.29.**

Kita ingin mencari tegangan antara titik **a** dan **b**, antara titik **b** dan **c**, dan antara titik **a** dan **c**. Mari kita analisis,



Gambar 4.29 Rangkaian LC Seri

Diberikan $I = I_m \cos(\omega t + \varphi_o)$. Tegangan antara dua ujung induktor mendahului arus dengan fasa sebesar $\frac{\pi}{2}$ yang sama dengan arus. Maka kita langsung dapat menulis

$$\boldsymbol{V_{ab} = I_m X_L \cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2})}$$

dengan $\mathbf{X_L = \omega L}$. Tegangan antara dua ujung kapasitor memiliki fasa yang mengikuti arus dengan keterlambatan sebesar $\frac{\pi}{2}$. Maka kita langsung dapat menulis

$$\boldsymbol{V_{bc} = I_m X_C \cos(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2})}$$

Dengan $\boldsymbol{X_C = \frac{1}{\omega C}}$. Tegangan antara ujung kiri induktor dengan ujung kanan kapasitor menjadi

$$\boldsymbol{V_{ac} = V_{ab} + V_{bc}}$$

$$V_{ac} = I_m X_L \cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}) + I_m X_C \cos(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2})$$

Karena : $\cos\alpha = -\cos(\pi + \alpha)$, maka

$$\cos(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2}) = -\cos(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2} + \pi)$$

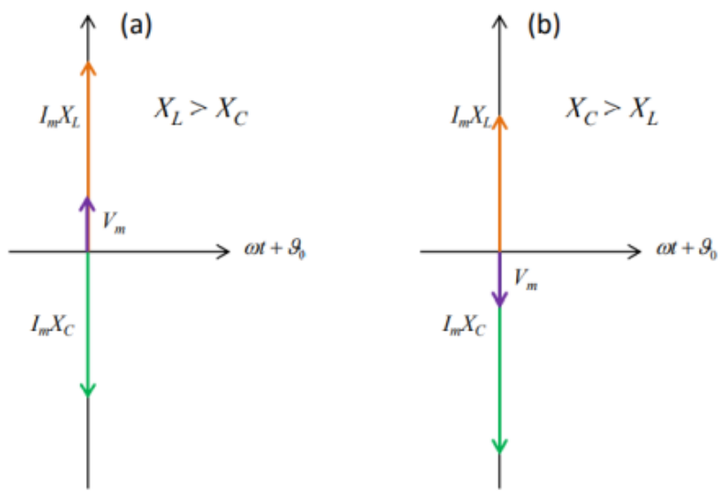
$$\cos(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2}) = -\cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2})$$

Dengan demikian kita peroleh

$$V_{ac} = I_m X_L \cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}) - I_m X_C \cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2})$$

$$\boldsymbol{V_{ac} = I_m (X_L - X_C) \cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2})}$$

Diagram fasor dari penjumlahan tersebut tampak pada **Gambar 4.30**,



Gambar 4.30 Diagram fasor untuk rangkaian seri LC. (a) Jika $X_L > X_C$ dan (b) jika $X_C > X_L$

Kasus menarik terjadi jika $\mathbf{X_L = X_C}$, karena $\mathbf{V_{ab} = 0}$. Kondisi ini terpenuhi jika

$$\boldsymbol{\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad atau \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad dimana \ \omega = 2\pi f}$$

Kondisi ini disebut *kondisi resonansi* dan $\boldsymbol{f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}}$ disebut *frekuensi resonansi*.

Pada kondisi resonansi, terdapat beda tegangan antara dua ujung induktor dan antara dua ujung kapasitor. Tetapi kedua tegangan tersebut *sama besar* dan *berlawanan fasa* sehingga *saling menghilangkan*. Akibatnya, ketika induktor dan kapasitor tersusun secara seri maka *tegangan antara ujung ujung luar induktor dan ujung luar kapasitor nol*.

Contoh Soal

Pada rengkaian seri RC terukur tegangan antara dua ujung induktor memenuhi ***2 sin(1000t)*** volt. Induktasi induktor adalah ***2 mH*** dan kapasitansi kapasitor adalah ***0,25 mF***. Tentukan

a) arus yang mengalir dalam rangkaian
b) tegangan antara dua ujung kapasitor
c) tegangan total antara ujung induktor dan ujung kapasitor
d) frekuensi arus agar tegangan total antara ujung kapasitor dan ujung induktor nol

Penyelesaian

Dari soal kita peroleh ω = 1000 rad/s dan V_{Lm} = 2 V. Reaktasi induktif

$$X_L = \omega L = 1000 \ x \ 2.10^{-3} = 2\ \Omega$$

Reaktansi kapasitif

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{1000 \ x \ 25.10^{-5}} = 4\ \Omega$$

a) Arus maksimum yang mengalir memenuhi

$$I_m = \frac{V_{Im}}{X_L} = \frac{2}{2} = 1\ A$$

Fase antara dua ujung induktor mendahului arus sebesar $\frac{\pi}{2}$ radian. Atau fase arus lebih terbelakang sebesar $\frac{\pi}{2}$ radian terhadap fase tegangan antara ujung induktor. Karena fase antara ujung induktor adalah sin(1000t), maka fase arus adalah sin(1000t - $\frac{\pi}{2}$). Dengan demikian, fungsi arus menjadi

$$I = I_m \sin\left(1000\,t - \frac{\pi}{2}\right) = 1 \sin\left(1000\,t - \frac{\pi}{2}\right)\ A$$

b) Tegangan maksimum antara ujung kapasitor memenuhi

$$V_{Cm} = I_m X_C = 1\ x\ 4 = 4\ volt$$

Fase antara dua ujung kapasitor mengikuti arus dengan keterlambatan sebesar $\frac{\pi}{2}$ radian. Karena fase arus adalah ***sin(1000t - $\frac{\pi}{2}$)*** maka fase antara dua ujung kapasitor adalah ***sin(1000t - $\frac{\pi}{2}$ - $\frac{\pi}{2}$) = sin(1000t - π)***. Dengan demikian, fungsi tegangan antara dua ujung kapasitor adalah

$$V_C = V_{Cm} \sin(1000\,t - \pi)$$
$$V_C = 4 \sin(1000\,t - \pi) = -4 \sin(1000\,t)$$

c) Tegangan total antara ujung induktor dan ujung kapasitor

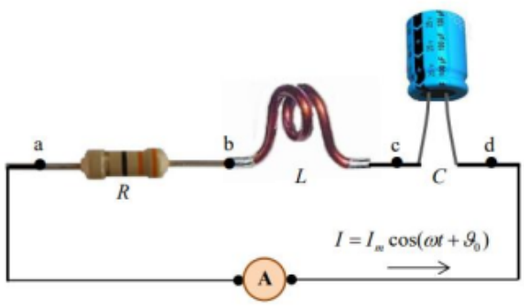
$$V = V_R + V_C$$
$$V = 1 \sin(1000t) - 4 \sin(1000t) = -3 \sin(1000t)$$

d) Frekuensi arus agar tegangan total antara ujung kapasitor dan ujung induktor nol. Kondisi ini dicapai saat resonansi yang memenuhi

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{L\,C}}$$
$$f = \frac{1}{2\ x\ 3{,}14}\ \frac{1}{\sqrt{(2\ x\ 10^{-3})(25\ x\ 10^{-5})}} = 225{,}12\ Hz$$

6.4. Rangkaian RLC Seri

Sebuah rangkaian yang lebih kompleks, yaitu mempunyai hambatan (resistor), reaktansi induktif (induktor), dan reaktansi kapasitif (kapasitor) yang tersusun secara seri dan dihubungkan dengan tegangan bolak balik, seperti pada **Gambar 4.31.**



Gambar 4.31 Rangkaian Seri RLC

Pada rangkaian tersebut mengalir arus $I = I_m \cos(\omega t + \varphi_o)$ dan kita akan menghitung V_{ab}, V_{bc}, V_{cd}, V_{ac}, V_{bd}, dan V_{ad}. Berdasarkan pembahasan di atas dengan segera kita dapatkan,

$$V_{ab} = I_m R \cos(\omega t + \varphi_o)$$

$$V_{bc} = I_m X_L \cos\left(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$V_{cd} = I_m X_C \cos\left(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2}\right)$$

Antara titik **a** dan **c** terdapat resistor dan induktor yang disusun secara seri sehingga

$$V_{ac} = I_m \sqrt{R^2 + {X_L}^2} \cos(\omega t + \varphi_o + \theta_1)$$

Dengan $\tan\theta_1 = \frac{X_L}{R}$. Antara titik **b** dan **d** terdapat induktor dan kapasitor yang disusun secara seri sehingga

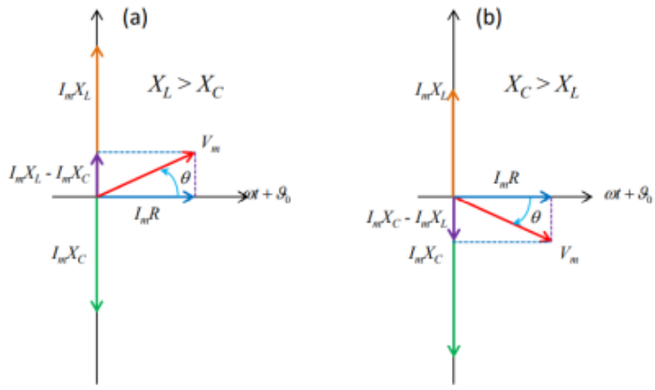
$$V_{bd} = I_m (X_L - X_C) \cos(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2})$$

Antara titik **a** dan **d** terdapat tiga komponen yang disusun secara seri sehingga tegangan total memenuhi

$$V_{ad} = V_{ab} + V_{bc} + V_{cd}$$

$$V_{ad} = I_m R \cos(\omega t + \varphi_o) + I_m X_L \cos\left(\omega t + \varphi_o + \frac{\pi}{2}\right) + I_m X_C \cos\left(\omega t + \varphi_o - \frac{\pi}{2}\right)$$

Penjumlahan tiga suku trigonometri di atas dapat diungkapkan dalam diagram fasor seperti pada **Gambar 4.32**.



Gambar 4.32 Diagram fasor untuk penjumlahan, (a) Jika $X_L > X_C$ dan (b) Jika $X_C > X_L$.

Dengan dalil Phitagoras, maka

$$V_m = \sqrt{(I_m R)^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2}$$
$$V_m = I_m \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
$$V_m = I_m Z$$

dimana,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

merupakan impedansi rangkaian seri RLC. Dari gambar kita juga melihat bahwa

$$\tan\theta = \frac{I_m X_L - I_m X_R}{I_m\, R} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Dengan demikian, bentuk umum tegangan antara titik **a** dan **d** sebagai fungsi waktu adalah

$$V_{ad} = I_m\, Z\, \cos(\omega t + \varphi_o + \theta)$$

Juga jelas di sini bahwa Z merupakan fungsi frekuensi arus. Jika dieksplistkan maka impendasi total rangkaian RLC adalah

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega\, L - \frac{1}{\omega\, C})^2}$$

$$Z = R\sqrt{1 + \left(\omega\frac{L}{R} - \frac{1}{\omega\, R\, C}\right)^2}$$

$$Z = R\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} - \frac{\omega_{02}}{\omega}\right)^2}$$

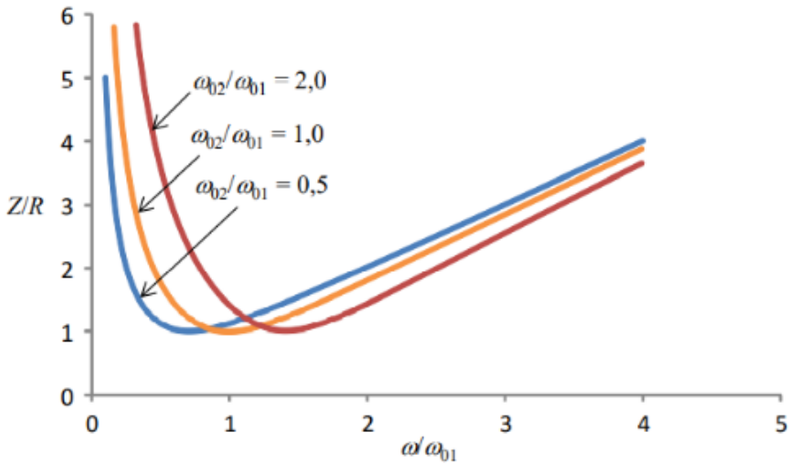
dimana,

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{R}{L}} \quad dan \quad \omega_{02} = \sqrt{\frac{1}{R\, C}}$$

Resonansi terjadi, jika

$$\frac{\omega}{\omega_{01}} - \frac{\omega_{02}}{\omega} = 0 \quad atau \quad \omega = \sqrt{\omega_{01}\, \omega_{02}}$$

Marilah kita lihat **Gambar 4.33**, yang menunjukkan contoh plot impedansi sebagai fungsi frekuensi. Impedansi dinyatakan dalam satuan R dan frekuensi dinyatakan dalam satuan $\boldsymbol{\omega_{01}}$. Kurva dibuat untuk berbagai rasio $\boldsymbol{\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}}}$**.** Tampak bahwa mula-mula impedansi turun dengan bertambahnya frekuensi, kemudian naik terus dengan naiknya frekuensi setelah mencapai nilai minimum. Nilai minimum tersebut bersesuaian dengan frekeunsi resonansi.



Gambar 4.33 contoh plot impedansi sebagai fungsi frekuensi. Impedansi dinyatakan dalam satuan R dan frekuensi dinyatakan dalam satuan ω_{01}. Kurva dibuat untuk berbagai rasio ω_{02}/ω_{01}= 0,5, 1,0, dan 2,0.

Untuk mendapatkan hubungan tegangan-tegangan terukur, terlebih dahulu digambar diagram fasor, kemudian digunakan dalil phytagoras, sama dengan cara untuk mendapatkan hubungan hambatan (resistor), induktif (induktor), dan kapasitif (kapasitor) sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya.

Dengan menggunakan diagram fasor dan dalil phytagoras, didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\boldsymbol{V = \sqrt{V_R{}^2 + (V_L - V_C)^2}}$$

dimana, V = tegangan rangkaian RLC
V_R = tegangan uung hambatan
V_L = tegangan ujung induktif
V_C = tegangan ujung kapasitif

Beda fasa rangkaian menurut tegangannya adalah sebagai berikut,

$$\tan\theta = \frac{V_L - V_C}{V_R}$$

dimana, θ = sudut fasa
V_R = tegangan uung hambatan
V_L = tegangan ujung induktif
V_C = tegangan ujung kapasitif

Contoh Soal

Rangkaian RLC seri mengandung hambatan **100 Ω**, induktor **0,05 H**, dan kapasitor **5 μF**. Tegangan antara dua ujung kapasitor adalah **8 cos(1000t + π/3)** volt. Tentukan

a) fungsi arus yang mengalir,
b) tegangan antara dua ujung resistor,
c) tegangan antara dua ujung induktor,
d) tegangan total antara ujung kiri komponen paling kiri dan ujung kanan komponen paling kanan.

Penyelesaian

Dari informasi soal kita dapatkan **ω = 1000 rad/s**. Tegangan antara dua ujung kapasitor,

$$V_C = 8\ \cos(1000t + \frac{\pi}{3})$$

Dari sini tampak bahwa $\mathbf{V_{Cm} = 8\ volt}$. Reaktansi induktif.

$$X_L = \omega\, L = 1000\ x\ 0{,}05 = 50\ \Omega$$

Reaktansi kapasitif,

$$X_C = \frac{1}{\omega\ C} = \frac{1}{1000\ x\ (5\ .10^{-6})} = 200\ \Omega$$

a) Arus maksimum yang mengalir

$$I_m = \frac{V_{Cm}}{X_C} = \frac{8}{200} = 0{,}04\ A$$

Fase arus mendahului fase tegangan antara ujung kapasator dengan fase sebesar $\frac{\pi}{2}$. Fase tegangan antara ujung kapasitor adalah $(1000t + \frac{\pi}{3})$. Maka fase arus adalah $(1000t + \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{2}) = (1000t + \frac{5\pi}{6})$. Jadi fungsi arus menjadi

$$I = I_m \cos\left(1000t + \frac{5\pi}{6}\right) = 0{,}04 \cos\left(1000t + \frac{5\pi}{6}\right)$$

b) Tegangan maksimum antara dua ujung resistor

$$V_{Rm} = I_m R = 0{,}04\, x\, 100 = 4\ volt$$

Fase tagangan antara ujung resistor sama dengan fase arus. Dengan demikian, fungsi tegangan antara ujung resistor adalah

$$V_R = V_{Rm} \cos\left(1000t + \frac{5\pi}{6}\right)$$
$$= 4 \cos\left(1000t + \frac{5\pi}{6}\right) volt$$

c) Tegangan maksimum antara dua ujung induktor

$$V_{Lm} = I_m X_L = 0{,}04\, x\, 50 = 2\ volt$$

Fase tagangan antara ujung induktor mendahui fase arus dengan fase sebesar $\frac{\pi}{2}$. Fase arus adalah $(1000t + \frac{5\pi}{6})$. Dengan demikian, fase tegangan antara ujung induktor adalah $(1000t + \frac{5\pi}{6} + \frac{\pi}{2}) = (1000t + \frac{8\pi}{6})$. Akhirnya, fungsi tegangan antara ujung induktor adalah

$$V_L = V_{Lm} \cos\left(1000t + \frac{8\pi}{6}\right)$$
$$= 2 \cos\left(1000t + \frac{8\pi}{6}\right) volt$$

d) Impedansi total rangkaian

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$
$$Z = \sqrt{100^2 + (50 - 200)^2} = \sqrt{32500} = 180\ \Omega$$

Tegangan maksimum antara ujung kiri dan ujung kanan rangkaian

$$V_m = I_m Z$$
$$V_m = 0{,}04\ x\ 180 = 7{,}2\ \ volt$$

Beda fase antara arus dengan tegangan maksimum ini memenuhi

$$\tan\theta = \frac{X_L - X_C}{R}$$
$$\tan\theta = \frac{50 - 200}{100} = -\frac{150}{100} = -1{,}5$$

atau

$$\theta = arc\ \tan(-1{,}5) = -0{,}98\ rad = -0{,}31\pi\ rad$$

Karena sifat kapasitif lebih kuat dari sifat konduktif maka secera keseluruhan rangkaian bersifat kapasitif. Fasa tegangan antara ujung ke ujung rangkaian mengalami keterlambatan dari fasa arus. Fasa arus adalah **(1000t +** $\frac{5\pi}{6}$**)**. Maka fasa tegangan adalah **(1000t +** $\frac{5\pi}{6}$ **– 0,31π) = (1000t + 0,52π)**. Jadi, fungsi tegangan total menjadi

$$V = V_m\ \cos(1000t + 0{,}52\pi) = 3{,}6\ \cos(1000t + 0{,}52\pi)\ \ volt$$

6.5. Resonansi Pada Rangkaian Seri RLC

Sebagiaman telah dijelaskan terjadinya resonansi pada penjelesan sebelumnya, tidak ada salahnya jika kita membahas lagi tentang resonansi. Jika sebuah rangkaian RLC dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik, maka terdapat tiga kemungkinan yang bisa terjadi, yaitu :

- Pertama, reaktansi induktif lebih besar daripada reaktansi kapasitif atau $\mathbf{X_L > X_C}$, maka sudut fasa impedansi berharga positif atau $\boldsymbol{\theta > 0}$, sehingga rangkaian seri RLC dikatakan bersifat induktif, yaitu *tegangan mendahului arus*.

- Kedua, reaktansi induktif lebih kecil darpada reaktansi kapasitif atau $\mathbf{X_L < X_C}$, maka sudut fasa impedansi bernilai negatif atau $\boldsymbol{\theta < 0}$, sehingga rangkaian seri RLC dikatakan bersifat kapasitif, yaitu *tegangan akan mengikuti arus*.

- Ketiga, reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitifnya atau $\mathbf{X_L = X_C}$, maka sudut fasa impedansi bernilai nol atau $\boldsymbol{\theta = 0}$, sehingga rangkaian seri RLC dikatakan bersifat *resistif murni*.

Keadaan Resonansi adalah keadaan ketika *sifat induktif saling meniadakan dengan sifat kapasitif*. Sehingga syarat terjadinya resonansi adalah

$$\boldsymbol{X_L = X_C}$$

Besarnya frekuensi resonansi pada rangkaian seri RLC dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{f_{Res} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L\,C}} \quad atau \quad f_{Res} = \frac{\omega_{Res}}{2\pi}}$$

Sedangkan besarnya kuat arus rangkian seri RLC pada keadaan resonansi dapat diketahui dengan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{I_{Res} = \frac{V}{R}}$$

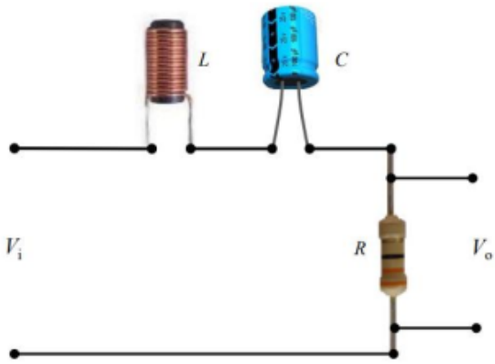
dimana, V = tegangan rangkaian RLC
I_{Res} = tegangan uung hambatan
R = hambatan

Jadi, pada keadaan resonansi, *impedansi rangkaian seri RLC mencapai harga terkecil atau minimum*, sedangkan *kuat arusnya mencapai harga terbesar atau maksimum*.

7. Filter

Berdasar pada rangkaian RLC seri, dan rangkaian seperti pada **Gambar 4.34**. Tegangan AC diberikan sebagai input (bukan arus) dan kita bermaksud mengukur tegangan antara dua kaki hambatan. Misalkan tegangan masukan yang diberikan memenuhi,

$$\boldsymbol{V_i = V_o \cos(\omega t)}$$



Gambar 4.34 Rangkaian seri RLC dimana yang dimasukkan adalah tegangan dan kita mengukur tegangan output pada dua ujung hambatan.

Marilah kita analisa gambar di atas,

Langkah pertama adalah mencari impedansi rangkaian dan nilai itu diberikan oleh persamaan $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, serta perubahan fasa diberikan oleh persamaan $\tan\theta = \frac{X_L - X_C}{R}$. Dengan demikian, arus yang mengalir dalam rangkaian dapat ditulis

$$\boldsymbol{I = \frac{V_o}{Z} \cos(\omega t - \theta)}$$

dengan

$$\boldsymbol{Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

dan

$$\boldsymbol{\tan\theta = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}}$$

Setelah arus diperoleh maka kita dapat segera menentukan beda potensial antara dua ujung resistor. Karena fase tegangan pada resistor sama dengan fase arus maka tegangan antara dua kaki resistor menjadi,

$$\boldsymbol{V_o = I\,R}$$

$$V_o = \frac{R\,V_o}{\sqrt{R^2 + \left(\omega\,L - \frac{1}{\omega\,C}\right)^2}}\cos(\omega t - \theta)$$

$$V_o = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} - \frac{\omega_{02}}{\omega}\right)^2}}\,V_o\cos(\omega t - \theta)$$

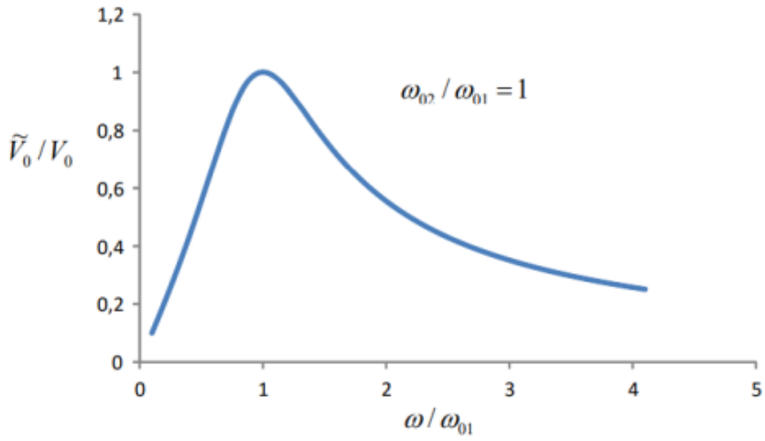
$$V_o = \widetilde{V_o}\cos(\omega t - \theta)$$

dengan

$$\boldsymbol{\widetilde{V_o} = \frac{V_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{01}} - \frac{\omega_{02}}{\omega}\right)^2}}}$$

Apa yang menarik dari persamaan di atas? Yang menarik adalah ketika sinyal dengan frekuensi sudut **ω** dimasukkan dalam rangkaian dengan amplitudo $\mathbf{V_0}$, maka pada dua ujung hambatan kita deteksi sinyak dengan amplitudo baru yang memenuhi persamaan di atas. Jelas di sini bahwa $\boldsymbol{\widetilde{V_o} < V_o}$. Jika frekuensi sinyal yang masuk sangat besar ($\boldsymbol{\omega \to \infty}$), maka $\boldsymbol{\widetilde{V_o} \to 0}$**.** Sebaliknya, jika frekuensi yang masuk sangat kecil atau $\boldsymbol{\omega \to 0}$, maka $\boldsymbol{\widetilde{V_o} \to 0}$. Marilah kita lihat **Gambar 4.35**, yang mana plot $\frac{\widetilde{V_o}}{V_o}$ berbagi frekuansi. Tampak jelas bahwa pada frekuensi sangat tinggi maupun sangat rendah, nilai $\frac{\widetilde{V_o}}{V_o}$ menuju nol.

Lalu apa yang menarik dari sifat ini? ikuti penjelasan setelah **Gambar 4.35** di bawah ini.



Gambar 4.35 Plot $\frac{\widetilde{V_o}}{V_o}$ pada berbagai frekuensi

Jika kita masukkan secara bersama-sama pada input beberapa sinyal AC yang memiliki frekuensi yang berbeda-beda, maka sinyal dengan frekuensi sangat kecil maupun sangat besar mengalami pengurangan amplitudio yang tajam sedangkan sinyal dengan frekuensi di sekiatar puncak kurva pada **Gambar 4.35** hampir tidak mengalami perubahan amplitudo. Inilah prinsip filter. *Filter adalah piranti atau rangkaian yang hanya meloloskan sinyal dengan frekuensi tertentu dan tidak meloloskan sinyal dengan frekuensi lainnya*. Sinyal yang amplitudonya menjadi sangat kecil artinya tidak diloloskan. Sinyal yang frekuensinya tidak berubah jauh dari amplitudo yang dimasukkan artinya sinyal yang diloloskan.

$$\omega_1 = 0{,}1\sqrt{\omega_{01}\,\omega_{02}}$$
$$\omega_2 = \sqrt{\omega_{01}\,\omega_{02}}$$
$$\omega_3 = 10\sqrt{\omega_{01}\,\omega_{02}}$$

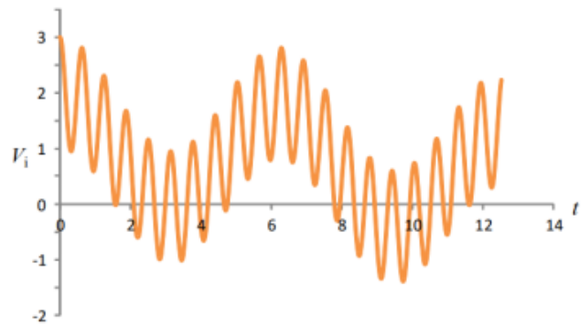
Misalkan amplitudo semua sinyal tersebut sama. Bentuk sinyal input dapat ditulis

$$V_1 = V_o\,\cos(\omega_1 t)$$
$$V_2 = V_o\,\cos(\omega_2 t)$$
$$V_3 = V_o\,\cos(\omega_3 t)$$

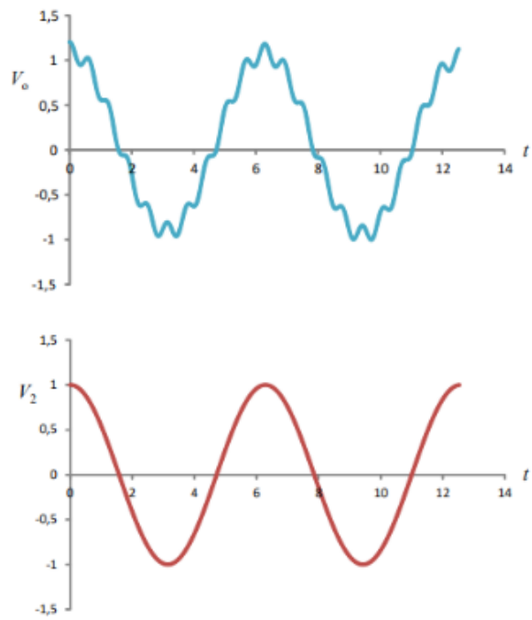
Tegangan total yang dimasukkan menjadi

$$V_i = V_1 + V_2 + V_3$$

Gambar 4.36 adalah plot tegangan yang dimasukkan di input rangkaian. Tampak bahwa tegangan yang dimasukkan tidak memiliki frekuensi yang jelas dan perubahannya pun tidak teratur. Namun, setelah melewati rangkaian maka tegangan yang dideteksi pada ujung dua hamnbatan berubah. Tegangan yang dideteksi sangat menyerupai tegangan $\mathbf{V_2}$ seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.37**. Inilah *proses filtering*. Semua tegangan dengan frekuensi sangat kecil dan sangat besar ditahan atau dihilangkan. Yang dilewatkan hanya tegangan dengan frekuensi tertentu. Dalam kasus ini tegangan $\mathbf{V_1}$ dan $\mathbf{V_3}$ ditahan, sedangkan tegangan $\mathbf{V_2}$ diloloskan.



Gambar 4.36 Pola tegangan yang dimasukkan pada rangkaian yang merupakan jumlah tiga tegangan yang memiliki frekuensi berbeda.



Gambar 4.37 (atas) Pola tegangan yang dideteksi antara dua ujung hambatan dan (bawah) pola tegangan $\mathbf{V_2}$.

Mekanisme filtering memegang peranan vital dalam teknologi komunikasi. Komunikasi radio atau televisi mengandalkan mekanisme filtering. Misalnya antene radio menerima gelombang dari semua stasiun radio. Jadi sinyal yang ditangkap antena sangat rumit. Sinyal yang ditangkap antene kemudian dilewatkan pada filter sehingga hanya sinyal dengan frekuensi tertentu saja yang diloloskan. Sinyal ini kemudian diperkuat dan terakhir dikirim ke *loudspeaker*. Akibatnya kita hanya mendengar siaran dari satu pemancar walaupun antene menangkap sinyal dari semua pemancar.

8. Daya Pada Arus Bolak Balik (Faktor Daya)

Marilah kita menghitung disipasi daya pada rangkaian RLC yang disusun secara seri.

Jika rangkaian tersebut dialiri arus $\boldsymbol{I = I_m \cos(\omega t)}$, maka dengan segera kita dapat menentukan tegangan antara ujung kiri komponen paling kiri dengan ujung kanan komponen paling kanan adalah

$$V = I_m Z \cos(\omega t + \theta)$$

dimana

$$\tan\theta = \frac{X_L - X_C}{R}$$

Maka daya dalam rangkaian

$$P = I_m V$$

$$P = I_m I_m Z \cos(\omega t)\cos(\omega t + \theta)$$

$$= {I_m}^2 Z \cos(\omega t)\cos(\omega t + \theta)$$

dengan menggunakan rumus trigonometri,

$$\cos\alpha \cos\beta = \frac{1}{2}\cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2}\cos(\alpha - \beta)$$

Maka,

$$\cos(\omega t) \cos(\omega t + \theta) = \frac{1}{2}\cos\big((\omega t) + (\omega t + \theta)\big) + \frac{1}{2}\cos\big((\omega t) - (\omega t + \theta)\big)$$

$$\cos(\omega t) \cos(\omega t + \theta) = \frac{1}{2}\cos(2\omega t + \theta) + \frac{1}{2}\cos(\theta)$$

Sehingga disipasi daya menjadi,

$$P = \frac{{I_m}^2 Z}{2} \cos(2\omega t + \theta) + \frac{{I_m}^2 Z}{2} \cos(\theta)$$

Disipasi daya rata-rata menjadi,

$$\overline{P} = \frac{{I_m}^2 Z}{2} \overline{\cos(2\omega t + \theta)} + \frac{{I_m}^2 Z}{2} \overline{\cos(\theta)}$$

Kita dapat membuktikan bahwa $\boldsymbol{\overline{\cos(2\omega t + \theta)} = 0}$. Dan karena **cos(θ)** *konstan (tidak mengandung waktu)*, maka $\overline{\cos(\theta)}$ = $\cos(\theta)$. Akhirnya diperoleh,

$$\boldsymbol{P = \frac{{I_m}^2 Z}{2} \cos(\theta)}$$

Di sini, **cos θ** disebut **faktor daya**. Besaran ini menentukan daya yang dibuang pada rangkaian meskipun besar tegangan dan arus maksimum konstan. *Faktor daya* bergantung pada *frekuensi arus*. Jadi, untuk rangkaian yang sama, *disipasi daya yang dibuang bergantung pada frekuensi*. Nilai terbesar **cos θ** adalah **satu** atau $\boldsymbol{(\cos\theta)_{max} = 1}$. Kondisi ini menyebabkan disipasi daya mencapai *nilai maksimum*. Kondisi ini dicapai pada saat *resonansi*, di mana $\mathbf{X_L = X_C}$ sehingga **tan θ = 0** atau **cos θ = 1**.

Daya rata-rata dapat pula ditulis dalam bentuk lain. Mengingat $V_m = I_m Z$, maka

$$\overline{P} = \frac{I_m V_m}{2} \cos\theta = \frac{I_m V_m}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \cos\theta$$

$$\boldsymbol{\overline{P} = I_{ef} V_{ef} \cos\theta}$$

Contoh Soal

Tegangan **V = 4,8 sin (754t)** diterapkan pada rangkaian RLC seri. Jika L = 3,0 mH, R = 1,4 kΩ, dan C = 3,0 μF, maka tentukanlah disipasi daya dalam rangkaian!

Penyelesaian

Persamaan umum tegangan dapat ditulis,

$$V = V_m \sin(\omega t)$$

Dari bentuk tegangan yang diberikan kita dapat simpulkan, $\mathbf{V_m = 4,8}$ volt, $\boldsymbol{\omega = 754}$ rad/s.

Reaktansi kapasitif,

$$X_C = \frac{1}{\omega\, C} = \frac{1}{754\, x\, (3\, .10^{-6})} = 442{,}1\ \Omega$$

Reaktansi induktif,

$$X_L = \omega\, L = 754\, x\, (3\, .10^{-3}) = 2{,}26\ \Omega$$

Impedansi rangkaian,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$Z = \sqrt{(1{,}4\, x\, 10^3)^2 + (2{,}26 - 442{,}1)^2} = 1467\ \Omega$$

Sudut fase antara arus dan tegangan, $\boldsymbol{\theta}$, memenuhi,

$$\tan\theta = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{2{,}3 - 442}{1{,}4\, x\, 10^3} = -314{,}07$$

$$\theta = arc\ \tan(-314{,}07) = -17{,}4^o$$

Arus maksimum yang mengalir dalam rangkaian,

$$I_m = \frac{V_m}{Z} = \frac{4{,}8}{1467} = 3{,}3\, x\, 10^{-3}\ A$$

Disipasi daya rata-rata dalam rangkaian,

$$\overline{P} = \frac{I_m V_m}{2} \cos\theta$$

$$\overline{P} = \frac{(3{,}3\ x\ 10^{-3})\ (4{,}8)}{2} \cos(-17{,}4^o) = 0{,}015\ \ Watt$$

Sebagai penutup dalam bab arus bolak balik ini, kita tidak akan membahas rangkaian paralel untuk arus bolak-balik karena cukup rumit. Pembahasan rangkaian paralel yang melibatkan arus bolak-balik akan sederhana jika menggunakan bilangan komples secara intensif.

BAB V
KEMAGNETAN

Setelah membahas tentang Listik Arus Searah dan Arus Bolak Balik, pada bagian ini kita akan membahas fenomena lain yang tidak kalah pentingnya yaitu tentang Kemagnetan. Fenomena Kemagnetan adalah pergerakan jarum kompas menuju arah utara selatan (lebih tepatnya mendekati arah utara selatan), tarikan atau tolakan dua batang magnet, suara dari *loudspeaker*, perputaran motor listrik, penempel kertas yang biasa dipasang di dinding kulkas atau lemari, dan sebagainya. Ternyata hubungan yang amat erat antara fenomena kelistrikan dengan kemagnetan. Kelistrikan dapat dihasilkan oleh proses pada magnet, dan sebaliknya kemagnetan dapat dihasilkan oleh proses pada listrik. Oleh karena itu kelistrikan dan kemagnetan dapat dipandang sebagai satu fenomena saja yang sekarang dinamai electromagnet (elektro dan magnet).

1. Medan Magnet Di Sekitar Arus Listrik

Ilmuwan yang pertama kali yang melakukan penelitian untuk menentukan adanya medan magnet di sekitar kawat yang berarus listrik adalah *Oersted*.

Percobaan *Oersted* menunjukkan bahwa :

- Arus listrik menghasilkan gaya yang dapat memutar sebuah magnet yang berada di sekitarnya.
- Besarnya gaya itu bergantung pada kedudukan relatif antara arus dan magnet.

Berdasarkan percobaan-percobaan yang dilakukan oleh *Oersted* dapat disimpulkan bahwa di sekitar arus listrik ada magnet, atau perpindahan muatan listrik dapat menimbulkan medan magnet sehingga dapat mempengaruhi kedudukan magnet jarum, yang disertai dengan arah garis-garis medan magnet sesuai dengan kaidah tangan kanan atau aturan sekrup putar kanan.

Lain lagi dengan percobaan yang dilakukan oleh *Ampere*. *Ampere* menyatakan bahwa *dua buah kawat yang berarus listrik*

mengadakan gaya listrik atau gaya tolak satu dengan yang lainnya.

Jadi, dua arus yang sama arahnya akan saling menarik dan dua arus yang berlawanan arahnya akan saling menolak. Ampere menganggap bahwa sifat-sifat magnetik dari suatu magnet disebabkan oleh arus-arus listrik yang berada di dalam magnet tersebut.

Untuk mengetahui lebih jauh tentang filosofi medan magnet, marilah mengikuti dan memperhatikan penjelasan di bawah ini.

Salah satu gejala kemagnetan yang dapat kita amati dengan mudah adalah tertariknya paku atau potongan besi oleh batang magnet. Batang magnet semacam ini dikatagorikan sebagai *magnet permanen*. Disebut magnet permanen karena sifat kemagnetan tetap ada kecuali dikenai gangguan luar yang cukup besar seperti pemanasan pada suhu yang cukup tinggi atau pemukulan yang cukup keras. Batang tersebut tetap menjadi magnet selama tidak ada gangguan luar yang menghilangkan sifat magnetnya. Bahan yang memiliki sifat magnet permanen disebut bahan *ferromagnetic*.

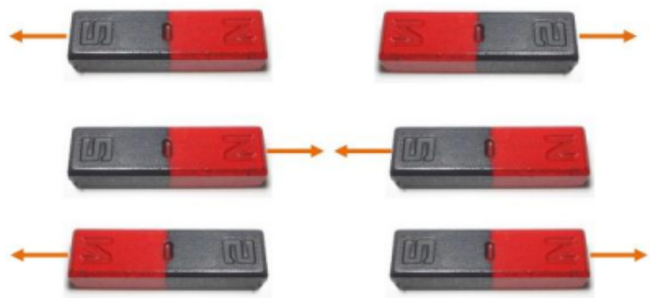
Sebaliknya *magnet tidak permanen* adalah magnet yang hanya muncul ketika diberi pengaruh dari luar. Ketika pengaruh tersebut ditiadakan maka sifat magnetik juga hilang. Contohnya adalah paku yang dililiti kawat beberapa lilitan. Jika kawat dialiri arus listrik maka paku berubah menjadi magnet. Namun, jika arus listrik pada kawat dihentikan maka sifat kemagnetan paku hilang. Bahan dengan sifat magnetik sementara seperti ini disebut bahan *paramagnetic*.

Setiap magnet memiliki dua kutub yang berlawanan. Salah satu kutub dinamai kutub utara dan kutub lainnya dinamai kutub selatan. Dinamakan kutub utara karena kutub tersebut cenderung mengarah ke kutub utara geografi bumi. Sebaliknya, kutub selatan cenderung mengarah ke kutub selatan geografi bumi.

Dua magnet yang didekatkan akan melakukan gaya. Gaya tersebut cenderung mengorientasikan kutub-kutub dua magnet berada pada posisi berlawanan. Kutub utara satu magnet cenderung mendekati kutub selatan magnet lainnya. Mengapa demikian? Karena posisi seperti inilah yang menghasilkan energy interkasi

paling kecil. Ingat bahwa semua proses di alam cenderung menuju kondisi setimbang dengan energy minimum. Makin dekat dua maget maka gaya yang dilakukan makin besar. Percobaan yang dilakukan terhadap sejumlah magnet didapoatkan sifat gaya antar kutub magnet, yaitu

- Kutub sejenis melakukan gaya tolak-menolak, perhatikan Gambar 5.1.
- Kutub tidak sejenis melakukan gaya tarik-menarik.
- Besarnya gaya tarik atau gaya tolak antar dua kutub berbanding lurus dengan kekuatan masing-masing kutub dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar dua kutub.



Gambar 5.1 Kutub magnet sejenis tolak-menolak dan kutub tak sejenis tarik-menarik. Besarnya gaya bergantung pada kekuatan kutub serta jarak antar kutub.

Sifat ini sangat serupa dengan gaya antar muatan listrik yang diungkapkan oleh hukuk Coulomb. Secara matematika, besar gaya antar kutub magnet dapat ditulis

$$\boldsymbol{F = k\frac{m_1 m_2}{r^2}}$$

dimana,

F = gaya antar kutub

m_1 = kekuatan kutub pertama (Ampere meter)

m_2 = kekuatan kutub kedua

r = jarak antara ke dua kutub

k = konstanta yang besarnya $10^{-7}\ \frac{Weber}{(Ampere\ meter)}$.

Namun, rumus ini bukanlah merupakan rumus yang terlalu eksak. Rumus tersebut cukup teliti kalau jarak antara dua kutub sangat berdekatan. Jika jarak antara dua kutub cukup jauh, maka penyimpangan bisa terjadi. Penyebabnya adalah magnet selalu memiliki kutub utara dan selatan (selalu dalam bentuk *dipol*). Jika jarak antara dua kutub yang berhadapan sangat berjauhan, maka pengaruh kutub di seberang batang mulai muncul dan mengganggu gaya antara dua kutub yang berhadapan. Hal ini berbeda dengan gaya antara dua muatan listrik yang dapat muncul dalam bentuk *monopol* (satu jenis muatan terpisah).

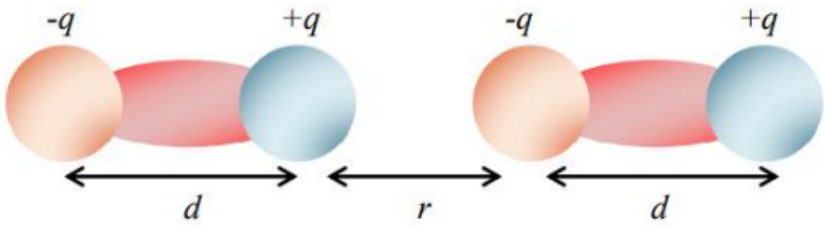
Gaya antara dua kutub magnet serupa dengan gaya antara dua dipol listrik. Perhatikan dua dipol listrik yang didekatkan seperti pada **Gambar 5.2**. Jarak antar muatan pada masing-masing *dipol* adalah **d** dan jarak muatan berdekatan pada *dua dipol* adalah **r**. Gaya antara dua dipol merupakan *jumlah gaya yang dihasilkan semua muatan (empat muatan)*. Besar gaya yang dialami dipol sebelah kanan adalah

$$F = k\frac{-q^2}{r^2} + k\frac{q^2}{(r+d)^2} + k\frac{q^2}{(r+d)^2} - k\frac{q^2}{(r+2d)^2}$$

Jika jarak antara dua muatan berdekatan jauh lebih kecil daripada panjang dipol, atau $\mathbf{r} \ll \mathbf{d}$ maka suku kedua, ketiga, dan keempat memiliki nilai jauh lebih kecil dibandingkan dengan suku pertama sehingga dapat diabaikan. Akibatnya gaya antar dipole dapat diaproksimasi dengan

$$\boldsymbol{F \approx -k\,\frac{q^2}{r^2}}$$

Bentuk gaya seperti inilah yang dialami dua kutub magnet yang sangat berdekatan.



Gambar 5.2 Dua dipol didekatkan. Gaya antara dua dipole merupakan jumlah gaya yang dihasilkan semua muatan (empat muatan).

Sebaliknya, jika jarak antar dipol jauh lebih besar daripada panjang dipol maka perubahan yang berbanding terbalik dengan **r** tidak lagi terjadi. Tetapi gaya antar dipole dapat diaproksimasi dengan

$$F \approx -6k \frac{q^2 d^2}{r^2}$$

Berarti gaya antar dipole berbanding terbalik dengan pangkat empat jarak antar dipol.

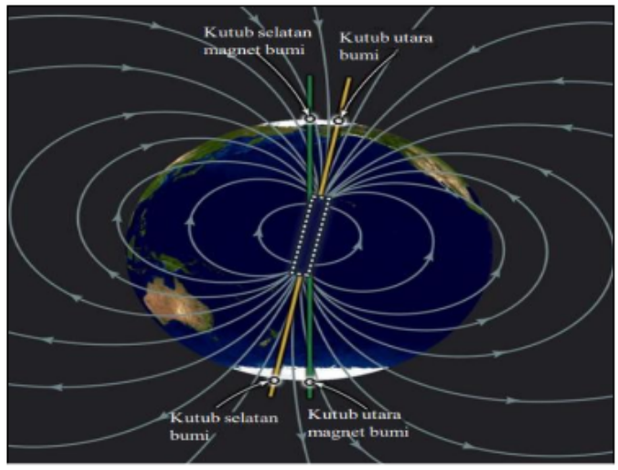
Muncul pertanyaan*, *Mengapa kutub magnet cenderung mengambil arah utara – selatan?

Marilah kita tempatkan sebuah magnet batang yang cukup besar di atas meja dengan kutub-kutubnya berarah barat-timur. Kutub utara magnet mengarah ke barat dan kutub selatan magnet mengarah ke timur. Kemudian ikatkan sebuah magnet jarum dengan benang sehingga berada dalam posisi horizontal. Dekatkan magnet jarum di atas magnet batang. Amati bagaimana arah kutub magnet jarum? Kita amati kutub utara magnet jarum menghadap ke timur dan kutub selatan magnet jarum mengarah ke barat. *Mengapa?* Karena kutub utara magnet jarum ditarik oleh kutub selatan magnet batang dan kutub selatan magnet jarum ditarik oleh kutub utara magnet batang. Karena massa magnet batang jauh lebih besar daripada massa magnet jarum maka jarum yang mengatur arah orientasinya

mengikuti batang. Pengamatan ini dapat menjelaskan mengapa megnet yang menggantung bebas selalu mengambil arah utara selatan. Ini akibat bumi kita sebenarnya sebuah magnet permanen dengan arah kutub sebagai berikut:

- Kutub selatan magnet bumi berada di sekitar kutub utara geograi bumi.
- Kutub utara magnet bumi berada di sekitar kutub selatan geografi bumi

Mari kita lihat **Gambar 5.3**, lokasi kutub magnet bumi tidak tepat berimpit dengan kutub geografi bumi sehingga jarum kompas tidak tepat mengarah ke kutub-kutub bumi. Massa bumi sangat besar sehingga magnet manapun yang berada di permukaan bumi akan mengatur orientasinya mengikuti tarikan magnet bumi.



Gambar 5.3 Bumi adalah magnet yang sangat besar. Kutub selatan magnet bumi berada di sekitar kutub utara geografi bumi dan kutub utara magnet bumi berada di sekitar kutub selatan geografi bumi.

Saat ini kutub selatan magnet bumi berada pada koordinat 86,4^{o} LU dan 166,3^{o} BB sedangkan kutub utara berada pada koordinat 64,28^{o} LS dan 136,59^{o} BT. Dari nilai koordinat ini menjadi jelas bahwa *garis penguhubung dua kutup megnet bumi*

tidak melewati pusat bumi. Ini berarti *jarak antara dua kutub magnet bumi lebih pendek dari jari-jari bumi*.

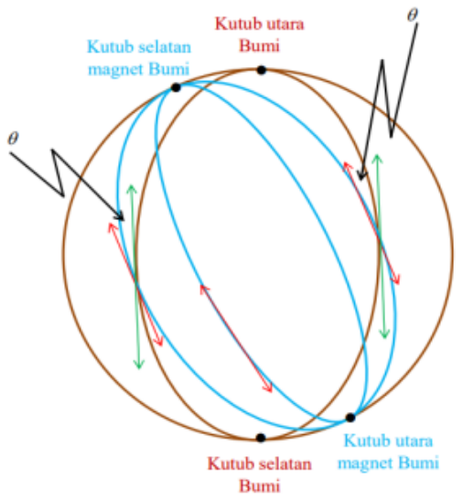
Karena perubahan yang selalu terjadi dalam mantel bumi yang menjadi sumber medan magnet bumi maka lokasi kutub magnet bumi tidak tetap. Lokasi kutub magnet bumi selalu bergeser setiap tahun. **Tabel 5.1** adalah koordinat kutub-kutub bumi pada berbagai waktu. Sepanjang umurnya hingga saat ini, kutub magnet bumi telah mengalami pembalikan beberapa kali. Secara rata-rata diperlukan waktu 200.000 – 300.000 tahun untuk membalik arah kutub magnet bumi (utara menjadi selatan dan selatan menjadi utara). Dengan demikian satu siklus perubahan arah kutub bumi (kutub utara kembali menjadi kutub utara dan sebaliknya) diperkukan waktu antara 400.000 – 600.000 tahun (*Mikrajuddin Abdullah, 2017*).

Tabel 5.1 Lokasi koordinat kutub magnet bumi pada berbagai waktu

Tahun	Koordinat kutub selatan magnet bumi	Koordinat kutub utara magnet bumi
2004	**82,3^o LU, 113,4^o BB**	**63,5^o LS, 138,0^o BT**
2005	**83,1^o LU, 117,8^o BB**	**64o31'48"LS, 137o51'36" BT**
2015	**86,4^o LU, 166,3^o BB**	**64,28^o LS, 136,59^o BT**

Sumber : Mikrajuddin Abdullah (2017)

Apakah itu…. Sudut Deklinasi? Kutub selatan magnet bumi berada di bagian utara Canada, pada jarak sekitar 1300 km dari kutub utara geografi bumi. Akibatnya, jarum kompas tidak tepat menunjuk arah utara selatan. Beda antara sudut yang ditunjukkan oleh jarum kompas dengan arah kutub geografi bumi disebut *sudut deklinasi*. **Gambar 5.4** memperlihatkan *sudut deklinasi* bumi. Lingkaran cokelat adalah garis bujur bumi dan lingkaran bitu adalah arah medan magnet bumi. Sudut yang terbentuk pada perpotongan dua lingkaran itulah yang didefinisikan sebagai *sudut deklinasi*.



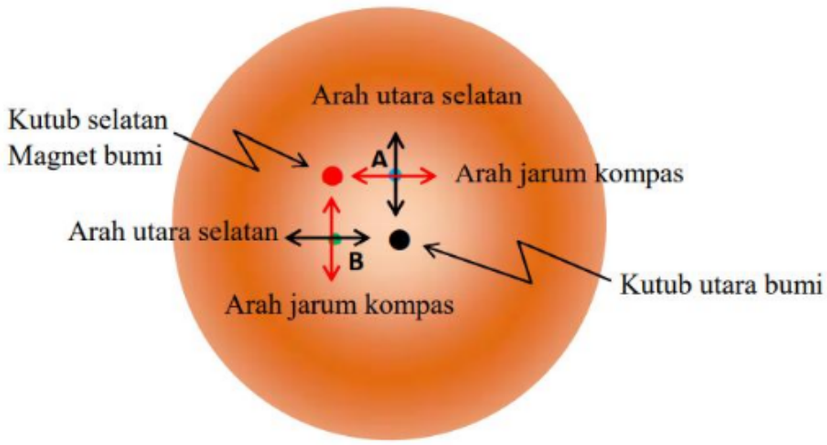
Gambar 5.4 Panah warna merah menunjukkan arah utara-selatan di suatu tempat. Panah warna hijau menunjukkan arah rarum kompas di tempat tersebut. Umuanya dua anak panah tersebut tidak searah. Sudut antara sumbu jarum kompas dan arah utara selatan (sudut antara dua anak panah), θ, disebut sudut deklinasi. Pada lokasi yang berbeda di permukaan bumi, sudut deklinasi umunya berbeda.

Untuk menentukan sudut *deklinasi* kalian tempatkan jarum kompas di atas poros yang memungkinan jarum tersebut dapat berputar bebas dalam arah horisontal. Amati arah kutub selatan dan utara jarum kompas dan amati arah selatan-utara geografi di tempat tersebut. Sudut yang dibentuk oleh ke dua arah tersebut disebut sudut deklinasi. Berapakah rentang nilai sudut deklinasi di permukaan bumi. Jika di suatu tempat di permukaan bumi kita melihat arah kutub geografi bumi dan kutub magnetic bumi berada pada satu garis berimpit maka sudut deklinasi sama dengan nol. Di manakah lokasi tersebut? Lokasinya sulit ditentukan secara teoretis (perhitungan) karena

a) *Medan magnet bumi tidak homogen di berbagai tempat di permukaan bumi.*
b) *Posisi kutub magnet bumi tidak diametrik.*
c) *Sudut deklinasi pada berbagai tempat harus secara eksak diperoleh dengan pengukuran. Dengan demikian, tempat yang memiliki deklinasi nol juga harus diukur langsung.*

Seperti diuraikan di atas, wilayah Arcamanik, Kota Bandung masuk dalam katagori wilayah tersebut.

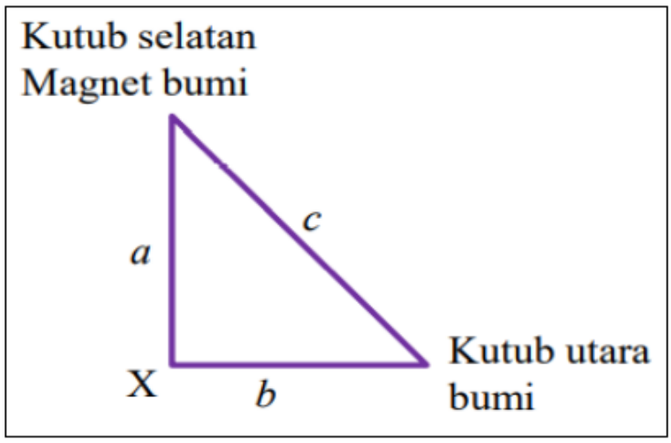
Pada daerah di sekitar kutub, arah utara selatan dapat tegak lurus dengan arah jarum kompas. Sebagai ilustrasi **Gambar 5.5** memperlihatkan permukaan bumi diamati dari atas kutub utara. Pada lokasi A dan B arah jarum kompas dan arah utara selatan saling tegak lurus. Jadi sudut deklinasi adalah **-90^o** dan **+90^o**. Di sekitar kutub selatan juga terdapat lokasi di mana arah jarus kompas dan arah utara selatan saling tegak lurus.



Gambar 5.5 Lokasi di sekitar kutub utara bumi

Ada berapakah lokasi yang memiliki *sudut deklinasi* -90^o atau +90$^{o?}$ Jawabannnya banyak. Bagaimana membuktikannya? Perhatikan **Gambar 5.6**. Misalkan jarak kutub utara bumi ke kutub selatan magnet bumi adalah **c**. Perhatikan lokasi X yang memiliki jarak **a** dari kutub selatan magnet bumi dan jarak **b** dari kutub utara bumi. Garis X-kutub selatan magnet bumi menunjukkan arah jarum kompas sedangkan garis X-kutub utara bumi menunjukkan arah utara selatan. Kedua garis tersebut tegak lurus jika terpenuhi persamaan Phitagoras

$$\boldsymbol{c^2 = a^2 + b^2}$$



Gambar 5.6 Ilustrasi lokasi di mana arah jarum kompas tegak lurus arah utara selatan. Lokasi tersebut disimbolkan dengan X *(Mikrajuddin Abdullah)*

Karena nilai **c** konstan maka untuk setiap nilai **a**, pasti ada dua nilai **b** yang memenuhi

$$\boldsymbol{b = \pm\sqrt{c^2 - a^2}}$$

Terdapat tak berhingga cara memilik nilai **a** asal **a < c**. Dengan demikian terdapat *tak berhingga* nilai **b** yang diperoleh. Ini berarti terdapat *tidak terhingga* pasangan **(a, b)** yang menyebabkan arah jarum kompas tegak lurus dengan arah utara selatan.

Pertanyaan berikutnya, membetuk lintasan seperti apakah lokasi-lokasi dengan *deklinasi* $\mathbf{90^o}$? Untuk menjawabnya, marilah kita letakkan kutub geografi bumi dan kutub magnetic bumi pada **sumbu-xy**. Kita letakkan kutup geografi bumi pada posat koordinat **(0, 0)** sedangkan kutub magnetik bumi pada **sumbu-y**, yaitu koordinat **(0, c)** seperti ditunjukkan pada **Gambar 5.7(a)**. Ini berarti jarak dua kutub tersebut adalah **c**. Perhatikan titik dengan koordinat **(x, y).** Jarak titik ter sebut ke kutub geografi dan kutub magnet bumi adalah

$$\boldsymbol{a = \sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$\boldsymbol{b = \sqrt{x^2 + (c - y)^2}}$$

Garis a dan b saling tegak lurus jika terbentuk segitiga siku-siku sehingga memenuhi teorema phytagoras

$$\boldsymbol{a^2 + b^2 = c^2}$$

$$\boldsymbol{\left(x^2 + y^2\right) + \left(x^2 + (c - y)^2\right) = c^2}$$

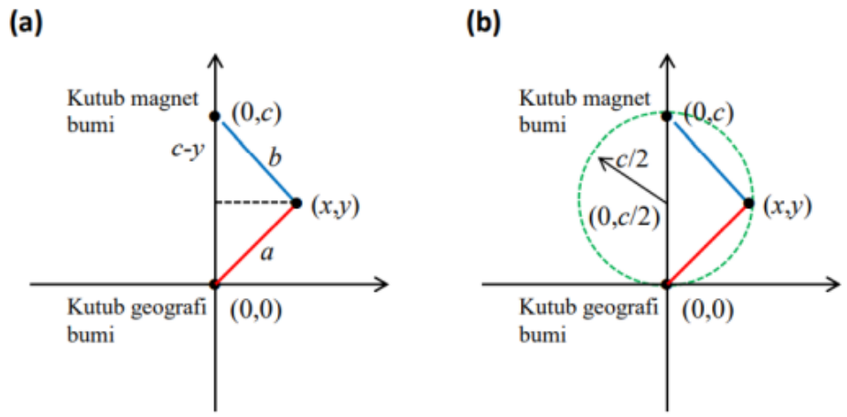
Jika disederhanakan maka kita akan dapatkan persamaan

$$\boldsymbol{x^2 + y^2 - cy = 0}$$

Yang dapat ditulis ulang menjadi

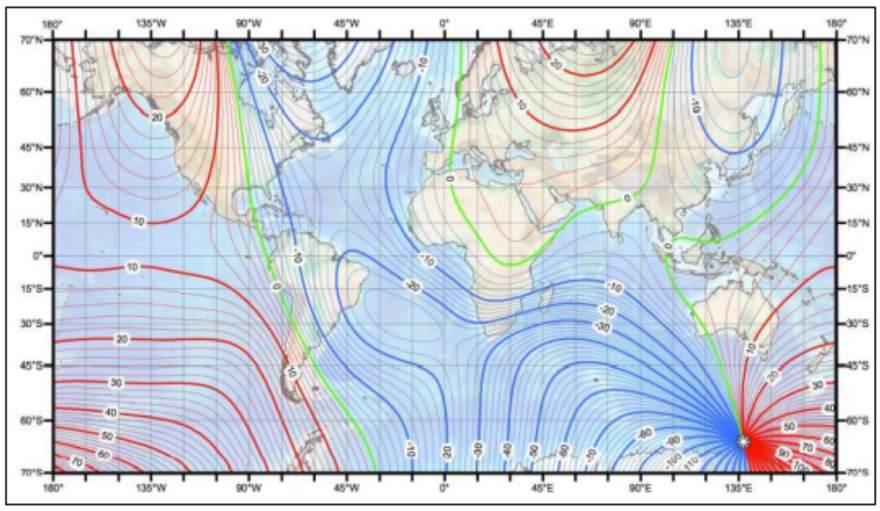
$$\boldsymbol{x^2 + \left(y - \frac{c}{2}\right)^2 = \left(\frac{c}{2}\right)^2}$$

Ini adalah persamaan lingkaran yang memiliki jari-jari $\frac{c}{2}$ dan berpusat pada koordinat $\boldsymbol{(0, \frac{c}{2})}$. Dengan demikian lokasi dengan *sudut deklinasi* tegak lurus berada pada lingkaran yang melewati kutub geografi dan kutub magnet bumi dan berpusat pada titik di tengah-tengah dua kutub tersebut seperti ditunjukkan pada **Gambar 5.7(b)**.



Gambar 5.7 (a) Sistem koordinat yang digunakan untuk menentukan lokasi yang memiliki sudut deklinasi tegak lurus, (b) lokasi pada lingkaran memiliki sudut deklinasi tegak lurus.

Sudut deklinasi pada berbagai tempat di permukaan bumi telah dipetakan. Peta tersebut dikoreksi setiap 5 tahun karena pergeseran lokasi kutub magnet bumi. Pergeseran lokasi kutub magnet bumi menyebabkan perubahan *sudut deklinasi* di suatu tempat. **Gambar 5.8** adalah peta *sudut deklinasi* tahun 2015. Kurva biru menyatakn *sudut deklinasi negatif*, atau arah jarum mompas menyimpang ke kiri dibandingkan dengan arah garis bujur. Sebaliknya, kurva merah menyatakan sudut deklinasi positif, yang beradrti arah jarum kompas mempimang ke kanan dibandingkan dengan arah garis bujur bumi.

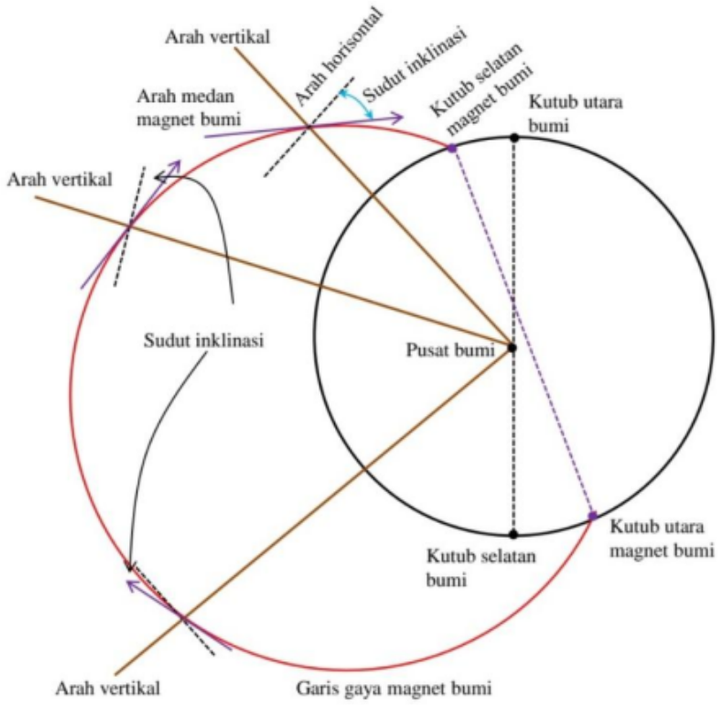


Gambar 5.8 Peta sudut deklinasi tahun 2015. Kurva biru menyatakn sudut deklinasi negative, atau arah jarum mompas menyimpang ke kiri dibandingkan dengan arah garis bujur. Sebaliknya, kurva merah menyatakan sudut deklinasi positif, yang beradrti arah jarum kompas mempimang ke kanan dibandingkan dengan arah garis bujur bumi *(blog.geogarage.com)*

Apakah itu … Sudut Inklinasi? *Sudut inklinasi* didefiniskan sebagai sudut yang dibentuk oleh garis hubung kutub utara-selatan jarum kompas dengan garis horisontal pada tempat tersebut. Untuk menentukan sudut inlkinasi kalian tempatkan jarum kompas pada poros yang memungkinkan jarum berputar bebas dalam arah vertikal. Amati arah kutub selatan-utara jarum kompas terhadap arah garis horisontal. Sudut yang dibentuk oleh

ke dua arah tersebut disebut sudut inklinasi. **Gambar 5.9** adalah ilustrasi *sudut inklinasi*.

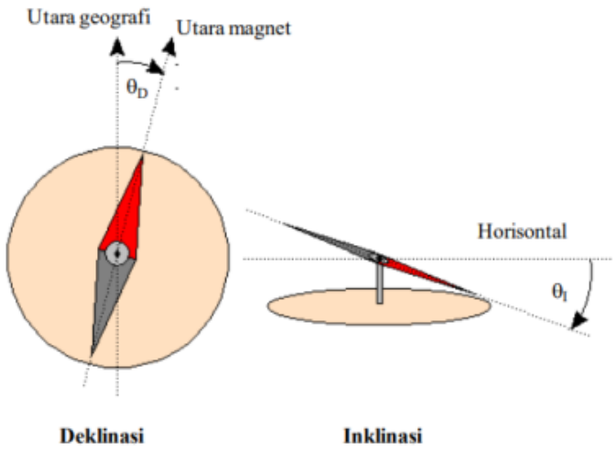
Jika kutub utara jarum kompas berada di sebelah atas garis horisontal kita sebut tempat tersebut memiliki *sudut inklinasi positif*. Sebaliknya jika kutub utara jarum kompas berada dibawah garis horisontal kita sebut tempat tersebut memiliki *inklinasi negatif*. **Gambar 5.10** adalah ilustrasi *sudut deklinasi dan inklinasi*.



Gambar 5.9 Sudut antara sumbu jarum kompas dan arah horisontal disebut sudut inklinasi

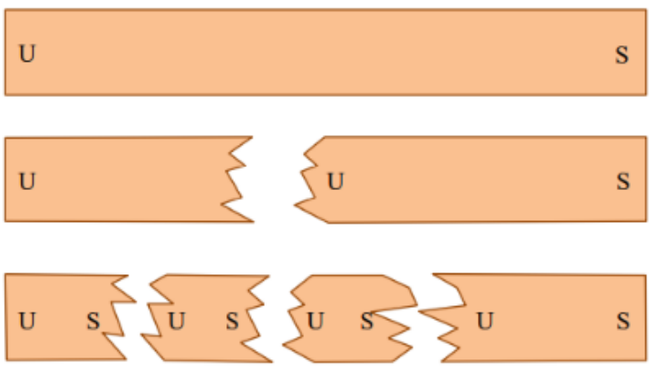
Tanpa terlalu sulit, kalian dapat menunjukkan bahwa di kutub selatan magnet bumi *sudut inklinasi* **+90^o**, sedangkan di kutub utara magnet bumi *sudut inklinasi* **-90^o**. Pada tempat lain di permukaan bumi *sudut inklinasi* berada antara **-90^o** sampai **+90^o**. Karena kutub utara dan selatan magnet bumi tidak tepat berimpit dengan kutub utara dan selatan geografi bumi, maka pada daerah yang memiliki lintang yang berbeda, *sudut inklinasi* berbeda walaupun cukup

kecil. Pada lintang tertentu selalu ada dua tempat yang memiliki *sudut deklinasi* yang sama.



Gambar 5.10 Ilustrasi sudut deklinasi dan inklinasi

Apakah itu…. ***Domain Magnet?*** Untuk menjawab pertanyaan ini, marilah kita mengambil sebuah magnet batang yang agak panjang, lalu potong menjadi dua. Apa yang akan kamu dapatkan? Tiap potong juga merupakan magnet bukan? Masing-masing memiliki kutub utara dan selatan sendiri-sendiri. Jika potongan yang diperoleh dipotong lagi maka tiap potongan baru tetap merupakan magnet dengan kutub utara dan selatan masing-masing (lihat ilustrasi **Gambar 5.11**). Mengapa demikian ?



Gambar 5.11 Jika magnet permanen dipotong maka tiap potongan tetap merupakan magnet.

Jawabannya adalah sebuah magnet permanen sebenarnya terdiri atas domain-domain magnet yang ukurannya sangat kecil. Tiap domain sudah merupakan magnet. Jika sebuah magnet dipotong maka masing-masing potongan mengandung sejumlah domain sehingga masing-masing memperlihatkan sifat kemagnetan. Jika hasil potongan dipotong lagi maka masing-masing potongan baru masih mengandung sejumlah domain sehingga meperlihatkan sifat kemagnetan.

Sifat kemagnetan mungkin akan hilang jika ukuran potongan lebih kecil daripada ukuran domain dan ini biasanya dalam *orde micrometer*. Penyebabnya adalah domain magnet dibentuk oleh atom-atom yang membawa sifat magnetik yang saling berinteraksi dan membentuk satu kesatuan. Tarikan antar atom tersebut dapat menyebabkan orientasi atom-atom dapat mengambil arah orientasi yang sama. Atom-atom yang membentuk arah orientasi yang sama inilah yang dinamakan *domain magnetik*. Agar dapat terwujud arah orientasi yang sama, maka jumlah atom harus cukup banyak. Jika jumlah atom tidak cukup banyak maka interaksi antar atom tidak cukup kuat mengarahkan orientasi atom ke arah yang sama dan *domain magnetik* tidak dapat terwujud. Dengan demikian, ada ukuram minimum suatu material magnetik agar dapat menghasilkan *domain magnetik*. Jika ukuran lebih kecil dari batas maksimum maka arah orientasi atom-atom menjadi acak dan kemagnetan tidak muncul.

Jika magnetik permanen yang telah disusn oleh *domain-domain magnetik* dipanaskan maka *atom-atom di dalamnya akan bergetar lebih kencang*. Akibatnya, ikatan antar atom yang telah membentuk arah orientasi yang sama bisa lepas dan atom-atom kembali mengambil arah orientasi sembarang. Akibatnya, sifat kemagnetan menjadi hilang. Dengan demikian, *pemanasan dapat menghilangkan kemagnetan bahan*.

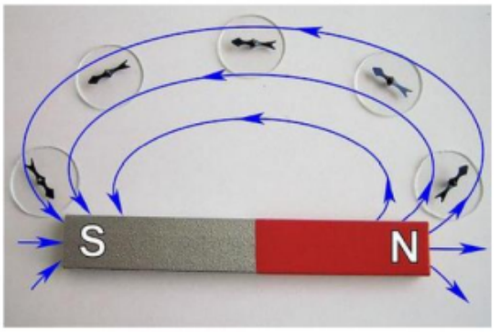
Begitu pula jika magnetik permanen dipukul-pukul maka atom-atom di dalamnya mendapat tambahan energi yang umumnya berupa energi getar. Getaran atom menjadi lebih kencang sehingga

ikatan antar atom yang telah membentuk arah orientasi yang sama bisa lepas dan atom-atom kembali mengambil arah orientasi sembarang. Akibatnya, sifat kemagnetan menjadi hilang. Dengan demikian, *pemukulan berulang-ulang dapat menghilangkan kemagnetan bahan*.

***Kemudian, Perlukan kita mempelajari* Garis Gaya Magnet?** Perlu diketahui bahwa keberadaan gaya antar muatan listrik dapat dijelaskan dengan sederhana bila diperkenalkan konsep garis gaya listrik. Garis gaya listrik dilukiskan keluar dari muatan positif dan masuk pada muatan negatif. Untuk mendapatkan kemudahan yang sama, maka diperkenalkan juga konsep *garis gaya* pada magnet.

- *Garis gaya magnet dilukiskan keluar dari kutub utara dan masuk di kutub selatan*.
- *Kerapatan garis gaya per satuan luas di suatu titik menggambarkan kekuatan medan magnet di titik tersebut*.
- *Kerapatan garis gaya terbesar diamati di kutub magnet. Ini berarti medan magnet paling kuat di daerah kutub*.
- *Makin jauh dari kutub maka makin kecil kerapatan garis gaya. Ini berarti makin jauh dari kutub maka makin lemah medan magnet*.

Ilustrasi garis gaya magnet dan arah jarum kompas yang diletakkan dekat magnet tersebut, dapat kita lihat pada **Gambar 5.12**.



Gambar 5.12 Lukisan garis gaya magnet. Garis gaya magnetic didefiniskan keluar dari kutup utara dan masuk di kutub selatan.

Apakah *Tidak Ada Muatan Magnet?* Mari kita ikuti penjelasan berikut untuk mendapatkan jawabannya.

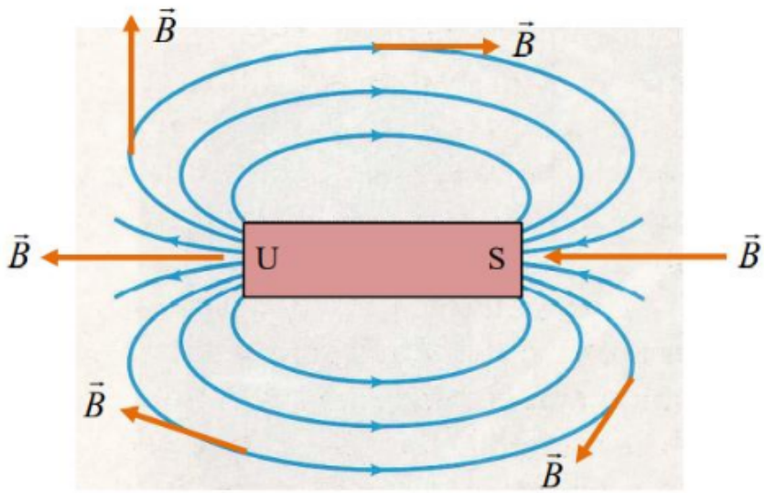
Pada muatan listrik kita mendapatkan bahwa garis gaya keluar dari muatan positif dan masuk pada muatan negatif. Kedua muatan dapat dipisahkan sejauh-jauhnya sehingga kita dapat memperoleh muatan positif yang teriosolasi atau muatan negatif yang terisolasi. Namun, tidak demikian dengan magnet. Kita tidak pernah menemukan kutub utara magnet saja (tanpa kutub selatan) atau kutub selatan magnet saja (tanpa kutub utara). Kutub utara dan kutub selatan magnet selalu muncul berpasangan.

Kutub utara yang terpisah atau kutub selatan yang terpisah disebut muatan magnet. Karena tidak pernah ditemukan kutub utara atau kutub selatan yang terpisah, maka kita menemukan jawabanya, bahwa *tidak ada muatan magnet*. Dalam filosofi fisika, *muatan magnet dikenal dengan monopol magnet*.

Lalu, ***bagaimana definisi Medan Magnet?*** Seperti pada definisi medan listrik, kita juga mendefinisikan medan magnet. Di sekitar suatu magnet dihasilkan medan magnet dengan sifat sebagai berikut:

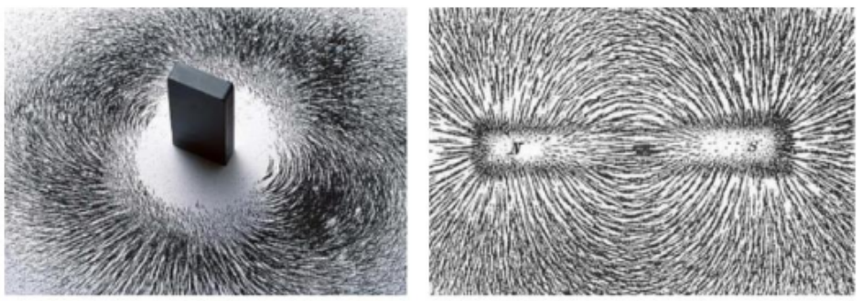
- *Arah medan magnet sama dengan arah garis gaya magnet.*
- *Besar medan magnet sebanding dengan kerapatan garis gaya magnet.*

Seperti diilustrasikan pada **Gambar 5.13**, di sekitar kutub magnet kerapatan garis gaya magnet paling besar sehingga didapati medan magnet yang paling besar. Arah garis gaya keluar dari kutub utara dan masuk ke kutub selatan. Dengan demikian, arah medan magnet keluar dari kutub utara dan masuk di kutub selatan. Kita simbolkan medan magnet dengan $\overline{\boldsymbol{B}}$, yang merupakan sebuah besaran vector. Satuan medan magnet adalah Tesla yang disingkat **T**.



Gambar 5.13 Lukisan medan maget. Arah medan magnet di suatu titik sama dengan arah garis singgung garis gaya magnet di titik tersebut dan mengikuti orientasi garis gaya magnet di titik tersebut. Dengan demikian, di kutub utara magnet, arah medan tegak lurus kutub dank e arah luar. Di kutub selatan magnet, arah medan magnet tegak lurus kutub dan mengarah masuk menuju kutub.

Untuk menunjukkan keberaadaan bedan magnet, kakian ambil magnet permanen lalu tempatkan di sekitar tanah kering yang mengandung butir-butiran halus. Kalian goyang-goyangkan batang magnet tersebut maka akan muncul pola sekitar batang magnet. Butir-butir tanah yang halus mengelilingi magnet dalam pola garis-garis melengkung, seperti ditunjukkan pada **Gambar 5.14**. Garis melengkung tersebut merupakan garis gaya magnet. Tanah halus yang dipengaruhi oleh medan magnet mengandung material besi, umunya besi oksida seperti $\mathbf{Fe_2O_3}$ atau $\mathbf{Fe_3O_4}$. Karena mengandung besi maka material ini datak ditarik oleh magnet.



Gambar 5.14 Magnet batang mempengaruhi butir-butir tanah halus kering di sekitarnya sehingga butir-butir tanah membentuk pola tertentu. Pola yang dihasilkan merupakan representasi garis gaya magnet

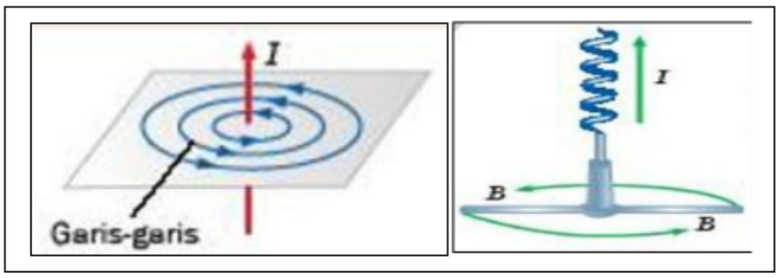
1.1. Arah Kuat Medan Magnet

a) Kaidah Penarik Gabus

Arah kuat medan magnet dapat ditentukan dengan kaidah penarik gabus, yaitu

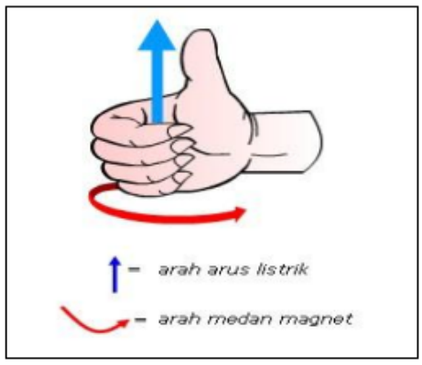
Jika arah gerak penarik gabus memnggambarkan arah arus listrik, maka arah putaran penarik gabus menunjukkan arah kuat medan atau garis gaya.

Hal tersebut dinyatakan denan sepotong kawat yang berarus listrik yang ditembuskan melalui sehelai karton. Dari percobaan tersebut diketahui bahwa kutub utaranya searah kuat medan atau garis gaya dan kutub selatannya berlawanan arah dengan garis gaya.



b) Kaidah Tangan Kanan

Jika kita menggenggam kawat dengan tangan kanan sedemikian hingga ibu jari menunjukkan arah arus, maka lipatan keempat jari lainnya menyatakan arus putarannya garis-garis gaya magnet.



Gambar 5.16 Kaidah Tangan Kanan

Besarnya rapat garis gaya listrik di suatu titik di dalam medan listrik menyatakan kuat medan listrik di titik tersebut, sedangkan di dalam medan magnet rapat garis gaya menunjukkan besar induksi magnetic di suatu titik.
Arus listrik mengubah sifat lingkungan di sekitarnya sehingga sepertinya besi yang berada di dalamnya mengalami gaya. Gaya ini ditimbulkan oleh interaksi antara medan magnetik arus listrik dan besi. Jadi, bukan interaksi antara arus listrik dan besi secara langsung.

1.2. Hukum Biot Savart

Secara teoritis seorang berkebangsaan Perancis bernama *Laplace* telah menyatakan besar kuat medan magnet atau induksi magnet di sekitar arus listrik. Berdasarkan teori *Laplace*, besarnya induksi magnet yang disebabkan oleh elemen arus adalah

- *Berbanding lurus dengan arus listrik (I)*
- *Berbanding lurus dengan panjang kawat (l)*
- *Berbanding terbalik dengan kuadrat jarak titik yang diamati ke kawat (r)*
- *Arah induksi magnetnya tegak lurus terhadap bidang yang melalui elemen arus.*

Kemudian pada tahun 1820, *Biot* dan *Savart* melakukan penyelidikan tentang besarnya induksi magnetik yang ditimbulkan oleh pengantar yang dialiri arus. Berdasarkan hasil penyeldikan,

ditentukan bahwa induksi magnetik pada suatu titik yang ditimbulkan oleh sebuah penghantar yang dialiri oleh arus adalah

- *Berbanding lurus (sebanding) dengan kuat arus listrik (I)*
- *Berbanding lurus (sebanding) dengan panjang elemen kawat penghantar (dl)*
- *Berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara titik itu ke elemen kawat penghantar*
- *Berbanding lurus (sebanding) dengan sinus sudut apit antara arah arus dari garis penghubung titik tersebut ke elemen kawat penghantar*.

Berdasarkan *Hukum Biot-Savart*, maka besarnya induksi magnet di suatu titik karena pengaruh elemen yang berarus listrik dapat diketahui melalui persamaan berikut :

$$\boldsymbol{dB = k\frac{I\,dl\ \sin\theta}{r^2}} \quad atau \quad \boldsymbol{dB = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{I\,dl\ \sin\theta}{r^2}}$$

dimana,

Db = induksi magnetik pada suatu titik (weber/m^2)

I = kuat arus pada kawat penghantar (ampere)

dl = elemen kawat penghantar (m)

θ = sudut apit

r = jarak titik elemen kawat penghantar (m)

k = tetapan

μ_o = permeabilitas udara/vakum

π = 3,14 = $\frac{22}{7}$

Jadi besarnya tetapan (k) untuk magnet dapat diketahui persamaannya adalah

$$\boldsymbol{k = \frac{\mu_o}{4\pi}}$$

dimana, k = tetapan

μ_o = permeabilitas udara/vakum

π = 3,14 = $\frac{22}{7}$

Sedangkan besarnya induksi magnetik di suatu tempat yang berjarak a dan penghantar kawat lurus yang sangat panjang dan dalam arus dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{B = \frac{\mu_o I}{2\pi a}}$$

dimana,

B = induksi magnetik pada suatu titik (weber/m^2)

I = kuat arus pada kawat penghantar (ampere)

r = jarak titik ke penghantar (m)

μ_o = permeabilitas udara/vakum

π = 3,14 = $\frac{22}{7}$

Contoh Soal

Sebuah kawat lurus panjang dialiri arus sebesar 30 A, berada pada ruang hampa. Tentukanlah induksi magnetik pada sebuah titik yang berjarak 5 cm dari pusat kawat yang vertikal.

Penyelesian

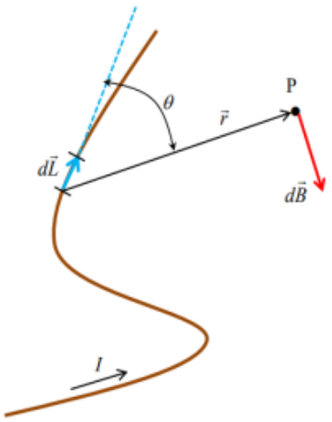
$$B = \frac{\mu_o I}{2\pi a}$$

$$B = \frac{(4\pi\ 10^{-7})\ (30)}{2\pi\ (5\ 10^{-2})} = 1{,}2\ x\ 10^{-4}\ \frac{weber}{m^2}$$

Bagaimana Filosofi Hukum Biot-Savart? Untuk mengetahui lebih mendalam filosofi Hukum Biot-Savart, ikutilah penjelasan di bawah ini.

Berapa besar medan magnet di sekitar arus listrik? Besarnya medan magnet di sekitar arus listrik dapat ditentukan dengan hukum Biot-Savart. Misalkan kita memiliki sebuah kawat konduktor yang dialiri arus **I**. Ambil elemen kecil kawat tersebut yang memiliki panjang **dL**. Arah **dL** sama dengan *arah arus*. Elemen kawat tersebut dapat dinyatakan dalam notasi vektor $\boldsymbol{d\bar{L}}$. Misalkan kita ingin menentukan medan magnet pada posisi P

dengan vektor posisi $\bar{r}$ terhadap elemen kawat. Lihat ilustrasi pada **Gambar 5.17** agar lebih jelas.



Gambar 5.17 Elemen kawat yang dialiri arus listrik menghasilkan medan magnet di sekitarnya. Medan magnet total di suatu titik sama dengan jumlah medan magnet yang dihasilkan oleh semua elemen tersebut. Karena medan magnet adalah besaran vektor maka penjumlahan dilakukan secara vektor.

Kuat medan magnet di titik **P** yang dihasilkan oleh elemen $\boldsymbol{d\bar{L}}$ saja diberikan oleh hukum Biot-Savart,

$$\boldsymbol{d\bar{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{d\bar{L}\, x\, \bar{r}}{r^3}}$$

dengan μ_o disebut permeabilitas magnetik vakum = $4\pi \times 10^{-7}$ T m/A.

Dari bentuk ruas kanan menjadi jelas bahwa arah medan magnet yang dihasilkan satu elemen tegak lurus bidang yang dibentuk elemen terebut dengan vector jarak dari elemen ke posisi pengamatan.

Persamaan $d\bar{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{d\bar{L}\, x\, \bar{r}}{r^3}$ adalah medan yang dihasilkan oleh satu elemen saja. Medan total yang dihasilkan oleh semua elemen sepanjang kawat diperoleh dengan melakukan integral, menjadi

$$\overline{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int \frac{d\overline{L}\, x\, \overline{r}}{r^3}$$

Kalau kita ingin hitung besarnya saja (nilai scalar) maka medan magnet yang dihasilkan seluruh bagian kawat, maka

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int \frac{dL\ \sin\theta}{r^2}$$

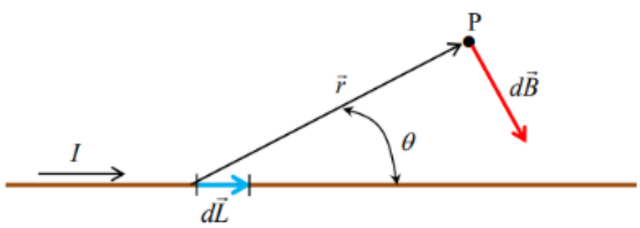
dengan **θ** adalah sudut antara elemen dengan vector jarak yang mengarah ke posisi pengamatan.

Ingat sudut tersebut tidak konstan tetapi bergantung pada orientasi elemen sepanjang kawat. Dengan kata lain sudut tersebut merupakan fungsi jarak sepanjang kawat.

Penyelesaian integral pada persamaan di atas sangat bergantung pada bentuk kawat. Untuk kawat yang bentuknya rumit, penyelesaian tidak dapat dilakukan dengan mudah. Kita harus menggunakan komputer untuk mencari medan magnet. Pada bagian ini kita akan mencari medan magnet di sekitar kawat yang bentuknya sederhana. Dengan bentuk yang sederhana maka integral menjadi relatif mudah untuk dikerjakan.

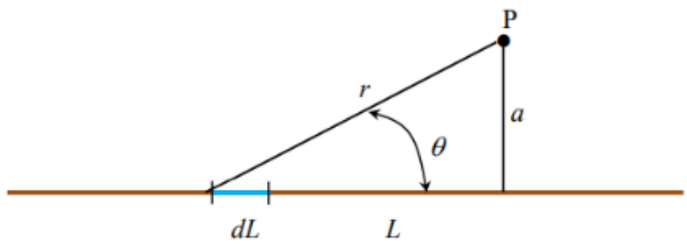
1.2.1. Medan Magnet Oleh Kawat Lurus Tak Berhingga

Untuk mencari medan magnet yang dihasilkan kawat lurus tak berhingga cukup mudah akibat arah vektor $d\overline{L}$ yang selalu tetap, yaitu mengikuti arah kawat sehingga orientasi elemen kawat selalu sama. Untuk kawat lurus panjang, **Gambar 5.17** dapat dibuat ulang menjadi **Gambar 5.18**.



Gambar 5.18 Kuat medan magnet yang dihasilkan oleh elemen dari kawat lurus panjang

Untuk memudahkan perhitungan, kita dapat langsung menggunakan persaman bentuk scalar. Kita melakukan perhitungan besarnya medan dahulu. Setelah medan diperoleh baru menentukan arahnya. Pada ruas kanan persamaan di atas, baik **dL**, **r**, maupun **sin θ** merupakan variable. Agar integral dapat dikerjakan maka ruas kanan hanya boleh mengandung satu variable. Oleh karena itu kita harus menyatakan dua variable lain ke dalam salah satu variable saja. Untuk maksud ini, mari kita lihat **Gambar 5.19**.



Gambar 5.19 Jarak tegak lurus titik P ke kawat adalah a dan proyeksi vektor $\bar{r}$ sepanjang kawat adalah L

Jarak tegak lurus titik **P** ke kawat adalah **a** dan proyeksi vektor $\bar{r}$ sepanjang kawat adalah **L**. Tampak dari **Gambar 5.19** bahwa

$$r = \sqrt{L^2 + a^2} \quad dan \quad \sin\theta = \frac{a}{r}$$

Dengan demikian, persamaan Biot-Savart dapat ditulis menjadi

$$\bar{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int \frac{d\bar{L} \sin\theta}{r^2} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int \frac{d\bar{L}}{(\sqrt{L^2 + a^2})^2} \frac{a}{r}$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int \frac{d\bar{L}}{L^2 + a^2} \frac{a}{\sqrt{L^2 + a^2}}$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I\, a \int \frac{d\bar{L}}{(L^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Sekarang kita menentukan batas integral. Karena kawat memiliki panjang tak berhingga maka salah satu ujung berada pada posisi **-∞** dan ujung lain berada pada posisi **+∞**. Dengan demikian batas integral adalah dari **-∞** sampai **+∞**. Medan magnet yang dihasilkan menjadi,

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I\, a \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\bar{L}}{(L^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I\, a \left[\frac{L}{a^2\sqrt{L^2 + a^2}}\right]_{-\infty}^{+\infty}$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I\, a \left[\left(\frac{\infty}{a^2\sqrt{\infty^2 + a^2}}\right) - \left(\frac{-\infty}{a^2\sqrt{(-\infty)^2 + a^2}}\right)\right]$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I\, a \left[\left(\frac{\infty}{a^2\infty}\right) - \left(\frac{-\infty}{a^2\infty}\right)\right]$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I\, a \left[\left(\frac{1}{a^2}\right) - \left(\frac{-1}{a^2}\right)\right]$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I\, a \left[\left(\frac{1}{a^2}\right) - \left(\frac{-1}{a^2}\right)\right]$$

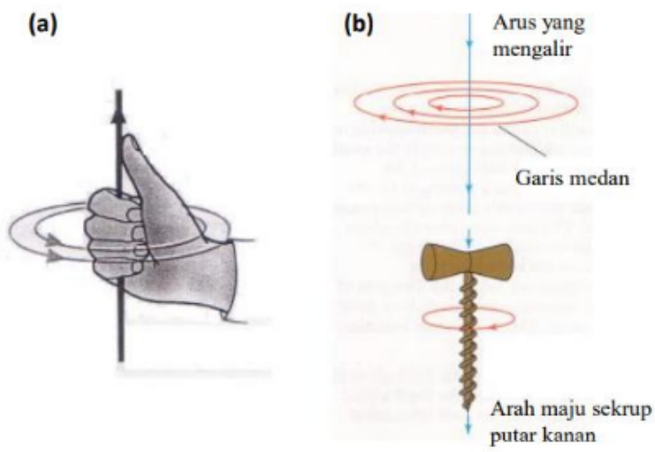
$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{I\, a\, 2}{a^2}$$

$$\boldsymbol{B = \frac{\mu_o I}{4\pi a}}$$

Tampak bahwa besar medan magnet yang dihasilkan kawat lurus panjang di suatu titik sebanding dengan kuat arus dan berbanding terbalik dengan jarak terdekat titik tersebut ke kawat.

Ke manakah arah medan magnet yang dihasilkan arus listrik? Karena medan magnet sama dengan perkalian vektor elemen kawat dan vektor jarak ke titik pengamatan maka kita dapat menentukan dengan *aturan tangan kanan* perkalian vektor. Jika kita genggam empat jari tangan kanan dan ibu jari dibiarkan lurus seperti pada **Gambar 5.20(a)**, maka

i. Arah ibu jari bersesuaian dengan arah arus,
ii. Arah jari-jari yang digenggam bersesuaian dengan arah medan magnet di sekitar arus tersebut.

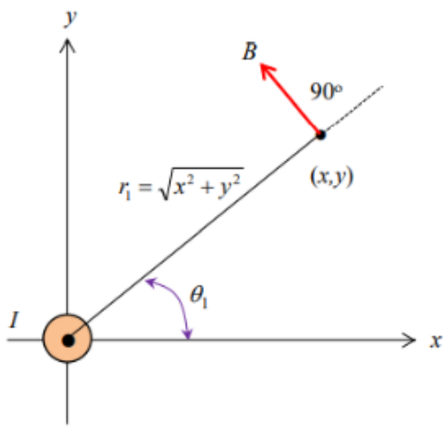


Gambar 5.20 Arah medan magnet di sekitar arus listrik dapat ditentukan dengan aturan tangan kanan atau sekrup putar kanan. Gambar (a) menunjukkan takan kanan memegang kawat. Arah ibu jari sama dengan arah aliran arus dan arah genggaman sama dengan arah garis medan magnet. Pada gambar (b) arah sekrup putar kanan disamakan dengan arah arus. Arah putaran sekrup sehingga sekrup bergerak maju sama dengan arah garis medan magnet.

Cara lain menentukan arah medan magnet adalah berdasarkan arah masuk sekrup putar kanan. Arah masuk sekrup sesuai dengan arah arus sedangkan arah putar sekrup sesuai dengan arah medan magnet seperti pada **Gambar 5.20(b)**.

Menarik untuk menggambar profil komponen medan magnet yang dihasilkan oleh kawat lurus panjang pada berbagai posisi di sekitar kawat. Perhatikan **Gambar 5.21**. Sebuah kawat lurus panjang dialiri arus **I**. Kita tempatkan kawat pada pusat koordinat. Perhatikan titik dengan koordinat **(x, y)**. Jarak titik tersebut ke kawat adalah

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$



Gambar 5.21 Kawat lurus panjang dipandang dari arah datangnya arus (arus mengalir dari belakang kertas kea rah depan). Juga digambarkan arah medan magnet pada koordinat (x,y)

Dengan demikian, besar medan magnet di titik **(x, y)** adalah

$$B = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{I}{r}$$

$$B = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{I}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Dengan memerhatikan **Gambar 5.21** maka medan tersebut membentuk sudut ($\theta_1 + 90^o$) terhadap arah horizontal. Maka komponen medan dalam arah **x** dan **y** adalah

$$B_x = B\ \cos(\theta_1 + 90^o)$$

$$B_x = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{I}{\sqrt{x^2 + y^2}}\ [\cos\theta_1 \cos 90^0 - \sin\theta_1 \sin 90^o]$$

$$B_x = -\frac{\mu_o}{2\pi}\frac{I}{\sqrt{x^2 + y^2}}\ \sin\theta_1$$

Tetapi dari **Gambar 5.21** jelas bahwa $\boldsymbol{\sin\theta_1 = \frac{y}{r} = \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}}$ sehingga

$$B_x = -\frac{\mu_o I}{2\pi}\frac{y}{x^2+y^2}$$

Komponen medan dalam arah **y** adalah

$$B_y = B\ \sin(\theta_1 + 90^o)$$

$$B_y = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{I}{\sqrt{x^2+y^2}}\sin\theta_1\cos 90^o + \cos\theta_1 \sin 90^o)$$

$$B_y = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{I}{\sqrt{x^2+y^2}}\cos\theta_1$$

Tetapi dari **Gambar 5.21** jelas bahwa $\boldsymbol{\cos\theta_1 = \frac{x}{r} = \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}}$ sehingga

$$B_y = \frac{\mu_o I}{2\pi}\frac{x}{x^2+y^2}$$

Contoh Soal

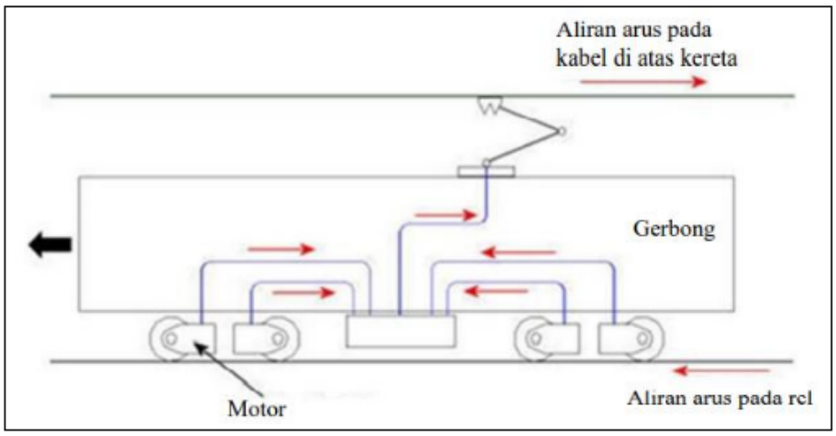
Kabel *jumper* yang sering digunakan untuk menstater kendaraan sering dialiri arus 15 A. Berapa kuat medan magnet pada jarak 15 cm dari kabel tersebut ?

Penyelesaian

Kuat medan magnet adalah

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi a} = 10^{-7}\ \frac{15}{0{,}15} = 10^{-6}\ T$$

Sekarang… marilah kita membahas tentang aplikasinya dalam bentuk suatu pertanyaan…. yaitu : Berapakah Medan Magnet yang Dihasilkan oleh Rel Kereta Listrik? Agar dapat menjawab dan membahasnya, marilah kita melihat **Gambar 5.22**.



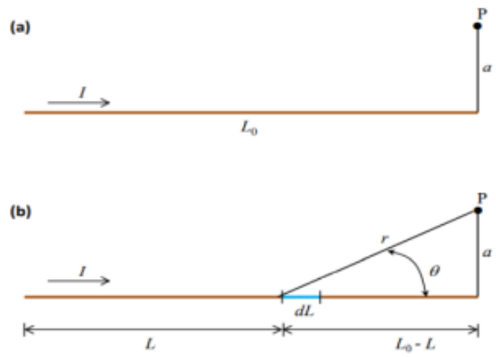
Gambar 5.22 Skema aliran arus listrik pada kereta api listrik.

Gambar 5.22 adalah skema aliran arus pada kereta listrik. Arus listrik diambil dari kawat yang menggelantung di atas kereta, kemudian mengalir ke arah mesin kereta (motor listrik) dan mengalir menuju ke rel. Daya yang dimiliki kebanyakan motor kereta api listrik berada antara 4,5 MW sampai 5,2 MW *(World Book Encyclopedia, 2000 / Mikrajuddin Abdullah, 2017)*. Kereta api listrik yang bekerja pada jaringan AC 50 Hz seperti di Indonesia menggunakan tegangan sekitar 25 kV. Dengan demikian, arus yang ditarik dari kabel di atas kereta menuju motor dan menuju ke rel dihitung dengan persamaan $\boldsymbol{I = \frac{P}{V}}$. Hasil yang diperoleh adalah antara 180 A – 208 A. Medan magnet yang dihasilkan di sekitar rel dihitung dengan persamaan *Biot-Savart* untuk kawat lurus tak berhingga. Pada ketinggain sekitar 25 cm di atas rel (kira-kira sama dengan ketinggian mesin mobil yang sedang melintasi rel, besar medan magnet sekitar 0,000144 T sampai 0,000166 T. Nilai ini sangat kecil dan tidak mungkin memberikan efek pada mesin kendaraan yang sedang melintasi rel.

Medan sebesar ini kira-kira sama dengan medan magnet pada jarak sekitar 20 cm di depan loudspeaker kecil saat diputarkan musik.

1.2.2 Medan Magnet Oleh Kawat Lurus Berhingga

Kita akan membahas kasus yang sedikit rumit, yaitu menentukan medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik pada kawat lurus yang panjangnya berhingga. Misalkan kita memiliki kawat yang panjangnya $\mathbf{L_0}$. Kita akan menentukan kuat medan magnet pada titik yang berjarak **a** dari kawat dan dan sejajar dengan salah satu ujung kawat seperti diilustrasikan pada **Gambar 5.23**.



Gambar 5.23 (a) Menentukan medan magnet di titik P oleh kawat lurus yang panjangnya berhingga. Lokasi titik P tepat sejajar dengan salah satu ujung kawat. (b) variable-variabel yang digunakan untuk melakukan perhitungan.

Untuk menentukan kuat medan magnet di titik pengamatan menggunakan *hukum Biot-Savart*, kita tentukan variabel-variabel seperti pada **Gambar 5.23**. Serupa dengan pembahasan untuk kawat yang panjangnya tak berhingga, besar medan magnet yang dihasilkan vektor $d\overline{L}$ saja, yaitu persamaan $B = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int \frac{dL \sin\theta}{r^2}$

$$r = \sqrt{a^2 + (L_o - L)^2}$$

$$\sin\theta = \frac{a}{r}$$

$$\sin\theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + (L_o - L)^2}}$$

Dengan demikian,

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int \frac{dL \ \sin\theta}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_o \, I \, a}{4\pi} \int \frac{a \, dL}{[a^2 + (L_o - L)^2]^{\frac{3}{2}}}$$

Batas integral untuk L adalah dari L = 0 sampai L = L_0. Dengan demikian

$$B = \frac{\mu_o \, I \, a}{4\pi} \int_0^{+L_o} \frac{dL}{[a^2 + (L_o - L)^2]^{\frac{3}{2}}}$$

maka kita peroleh

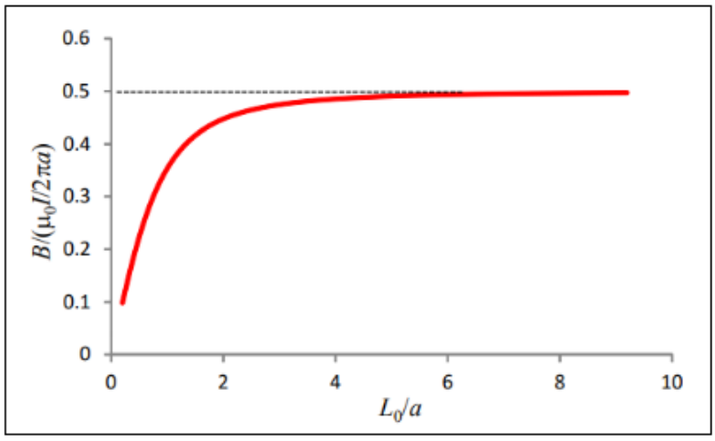
$$B = \frac{\mu_o \, I \, a}{4\pi} \left[\frac{L_o - L}{a^2 \sqrt{a^2 + (L_o - L)^2}} \right] \begin{matrix} L_o \\ 0 \end{matrix}$$

$$B = \frac{\mu_o \, I}{4\pi \, a} \frac{L_o}{\sqrt{a^2 + {L_o}^2}}$$

$$B = \frac{\mu_o \, I}{4\pi \, a} \frac{\frac{L_o}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_o}{a}\right)^2}}$$

Gambar 5.24 adalah kuat medan magnet di titik **P** sebagai fungsi $\frac{L_o}{a}$. Tampak kuat medan magnet naik secara monoton dengan

bertambahnya panjang kawat dan mencapai saturasi jika kawat sangat panjang.



Gambar 5.24 Kuat medan magnet pada satu titik pada jarak a dari salah satu ujung kawat sebagai fungsi panjang kawat. Variabel horizontal dinyatakan dalam L_0/a.

Jika panjang kawat di satu sisi sangat besar, atau $L_o \rightarrow \infty$ maka $L_0/a \rightarrow \infty$ sehingga $\frac{\frac{L_o}{a}}{\sqrt{1+\left(\frac{L_o}{a}\right)^2}} \rightarrow \frac{\frac{L_o}{a}}{\sqrt{\left(\frac{L_o}{a}\right)^2}} \rightarrow 1$,

Dengan demikian

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi a}$$

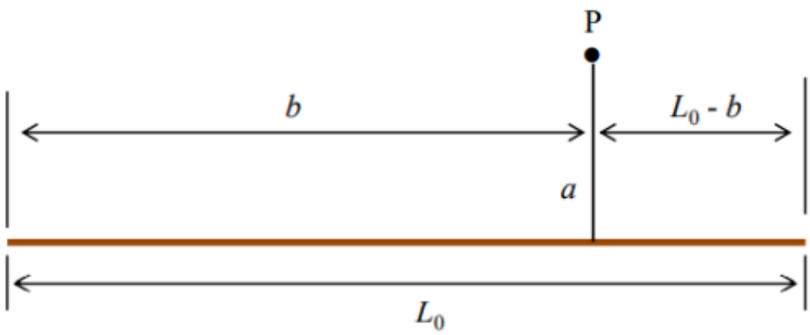
Persamaan di atas juga berlaku kalau titik pengamatan jaraknya sangat dekat ke kawat. Jadi, walaupun panjang satu sisi kawat tidak menunju tak berhingga, namun jarak pengamatan sangat dekat dengan ujung kawat, maka kita tetap dapat menghitung medan dengan persamaan tersebut di atas. Besar medan ini persis sama dengan setengah dari kuat medan yang dihasilkan oleh kawat yang panjangnya tak berhingga di dua sisi (lihat persamaan $B = \frac{\mu_o I}{2\pi a}$).

Sebaliknya jika kawat cukup pendek dibandingkan dengan jarak pengamatan, yaitu a ≫ L, maka $\frac{\frac{L_o}{a}}{\sqrt{1+\left(\frac{L_o}{a}\right)^2}} \rightarrow \frac{\frac{L_o}{a}}{\sqrt{1+0}} \rightarrow \frac{L_o}{a}$. Dengan demikian, kuat medan listrik pada titik pengamatan menjadi

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi a}\left(\frac{L_o}{a}\right)$$

$$B = \frac{\mu_o I L_o}{4\pi a^2}$$

Selanjutnya kita bahas kasus yang lebih umum lagi di mana titik pengamatan berada di antara dua ujung kawat. Misalkan titik tersebut berjarak **a** dari kawat secara tegak lurus dan berjarak **b** dari salah satu ujung kawat. Kasus ini sebenarnya tidak terlalu sulit. Kita dapat memandang bahwa medan tersebut dihasilkan oleh dua potong kawat yang panjangnya **b** dan panjangnya $\mathbf{L_0 - b}$, seperti pada **Gambar 5.25**, di mana titik pengamatan berada di ujung masing-masing potongan kawat tersebut.



Gambar 5.25 Menentukan kuat medan magnet pada posisi sembarang di sekitar kawat. Kuat medan di titik P dapat dipandang sebagai jumlah kuat medan yang dihasilkan oleh potongan kawat di sebelah kiri dan potongan di sebelah kanan titik pengamatan.

Kuat medan yang dihasilkan oleh potongan kawat kiri adalah

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi\, a} \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Kuat medan yang dihasilkan oleh potongan kawat kanan adalah

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi\, a} \frac{L_o - b}{\sqrt{a^2 + (L_o - b)^2}}$$

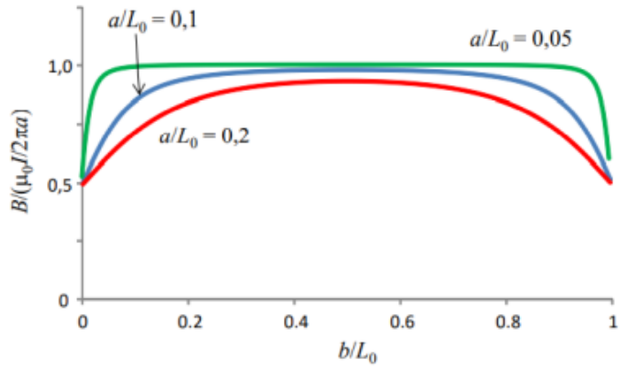
Medan yang dihasilkan dua kawat memiliki arah yang sama sehingga kuat medan total di titik pengamatan adalah

$$B = B_1 + B_2$$

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi\, a} \left[\frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} + \frac{L_o - b}{\sqrt{a^2 + (L_o - b)^2}} \right]$$

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi\, a} \left[\frac{\frac{b}{L_o}}{\sqrt{\left(\frac{a}{L_o}\right)^2 + \left(\frac{b}{L_o}\right)^2}} + \frac{1 - \frac{b}{L_o}}{\sqrt{\left(\frac{a}{L_o}\right)^2 + \left(1 - \frac{b}{L_o}\right)^2}} \right]$$

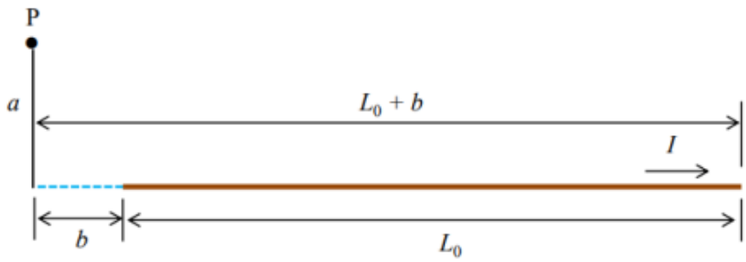
Gambar 5.26 adalah kuat medan magnet sebagai fungsi **b/L₀**. Dalam perhitungan kita mencoba berbagai **a/L₀**, yaitu 0,05, 0,1 dan 0,2. Tampak bahwa jika menggunakan **a/L₀** = 0,01 kuat medan magnet hampir sama di semua posisi sepanjang kawat, kecuali pada posisis dekat sekali dengan ujung. Ini disebabkan karena jarak titik pengamatan yang sangat dekat dengan kawat sehingga ketika kita bergerak sepanjang kawat kita merasakan medan magnet yang hamper sama. Ketika menggunakan **a/L₀** yang *besar*, atau jarak pengamatan cukup *jauh* dari kawat maka terjadi *variasi medan magnet yang cukup besar*.



Gambar 5.26 Kuat medan magnet sebagai fungsi jarak dari salah satu ujung kawat. Kita melakukan perhitungan untuk berbagai nilai jarak dari kawat yang dinyatakan oleh variable a/L_0. Gambar dari atas ke bawah telah dihitung menggunakan $a/L_0 = 0{,}05$, 0,1, dan 0,2

Medan magnet paling besar pada posisi di tengah-tengah kawat. Kemudian medan langsung mengecil begitu kita bergeser dari tengah-tengah kawat.

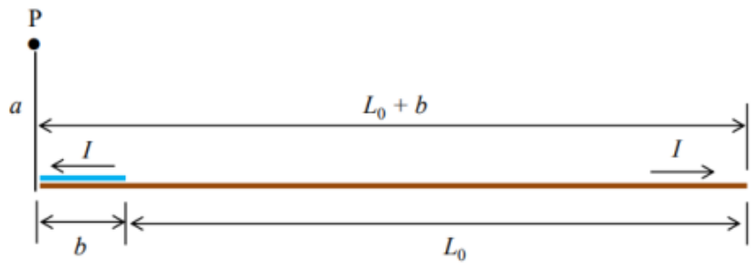
Selanjutnya kita mencari kuat medan magnet pada titik yang berada di luar area kawat, misalnya pada jarak **b** di sebelah kiri kawat seperti diilustrasikan pada **Gambar 5.27**. *Bagaimana memecahkan masalah ini ?*



Gambar 5.27 Menentukan kuat medan magnet pada jarak sembarang di luar kawat

Kita gunakan *trik sederhana*. Masalah ini dapat dipandang sebagai dua potong kawat berimpit. Satu potong kawat panjangnya $\mathbf{L_o + b}$ dan dialiri arus ke kanan dan potong kawat lain panjangnya **b** dan dialiri arus ke kiri, seperti diilustrasi pada **Gambar 5.28**.

Besar arus yang mengalir pada dua kawat sama. Ujung kiri dua potongan kawat diimpitkan.



Gambar 5.28 Kawat pengganti skema pada Gambar 5.27

Kuat medan magnet yang dihasilkan potongan kawat panjang adalah

$$B_1 = \frac{\mu_o I}{4\pi\, a} \frac{L_o + b}{\sqrt{a^2 + (L_o + b)^2}}$$

Kuat medan magnet yang dihasilkan potongan kawat pendek adalah

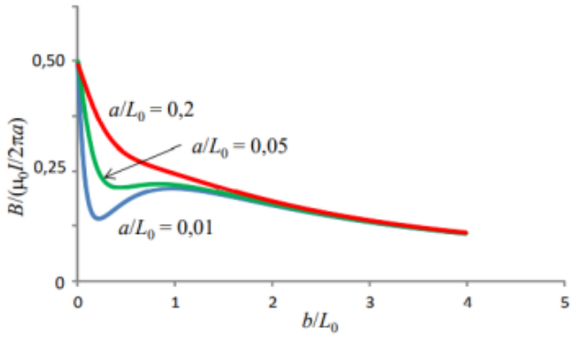
$$B_2 = -\frac{\mu_o I}{4\pi\, a} \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Tanda *minus* menyatakan bahwa arah medan yang dihasilkan potongan kawat pendek berlawanan dengan arah medan yang dihasilkan potongan kawat panjang karena arah arus dalam dua potongan tersebut berbeda. Medan total di titik **P** adalah

$$B = B_1 + B_2$$

$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi\, a}\left[\frac{L_o + b}{\sqrt{a^2 + (L_o + b)^2}} - \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right]$$

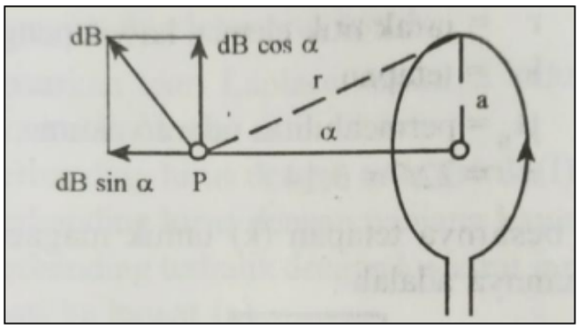
$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi a}\left[\frac{1+\frac{b}{L_o}}{\sqrt{\left(\frac{a}{L_o}\right)^2+\left(1+\frac{b}{L_o}\right)^2}} - \frac{\frac{b}{L_o}}{\sqrt{\left(\frac{a}{L_o}\right)^2+\left(\frac{b}{L_o}\right)^2}}\right]$$



Gambar 5.29 Kuat medan magnet sebagai fungsi jarak dari salah satu ujung kawat. Kita melakukan perhitungan untuk berbagai nilai jarak dari kawat yang dinyatakan oleh variable a/L_0. Gambar dari atas ke bawah telah dihitung menggunakan a/L_0 = 0,01, 0,05, dan 0,2.

Gambar 5.29 adalah illustrasi kuat mnedan magnet pada berbagai jarak dari salah satu ujung kawat. Yang menarik dari kurva yang diperoleh adalah ketika **a/L_0** *sangat kecil*. Mucul nilai minimum local jika **b/L_0** *kecil*. Namun, jika **a/L_0** *besar* maka *tidak ada minimum minimum lokal yang muncul*. Kurva menjadi monoton turun dan minimum terjadi ketika **$b/L_0 \rightarrow \infty$**.

1.3. Induksi Magnetik Pada Pusat Arus Melingkar



Gambar 5.30 Medan Magnet Pada Sumbu Kawat Melingkar

Besarnya induksi magnetik di **P** dari seluruh bagian lingkaran diketahui melalui persamaan berikut,

$$B = \frac{\mu_o I a}{2 r^2} \sin \alpha$$

dimana, B = induksi magnetik
I = kuat arus
α = sudut titik dengan lingkaran
r = jarak titik denan keliling lingkaran
a = jari-jari lingkaran
μ_o = permeabilitas udara/vakum

Sedangkan besarnya induksi magnetik pada pusat arus melingkar dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$B = \frac{\mu_o I}{2 a}$$

dimana, B = induksi magnetik
I = kuar arus
a = jari-jari
μ_o = permeabilitas udara/vakum

Jika jumlah kawat lilitan lebih dari satu, maka besarnya induksi magnetik dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$B = N \frac{\mu_o I}{2 a}$$

dimana, B = induksi magnetik di pusat (Tesla)
N = jumlah lilitan kawat
I = kuar arus (A)
a = jari-jari (m)
μ_o = permeabilitas udara/vakum ((Wb.m)/a)

Contoh Soal
Induksi magnetik di suatu pusat lingkaran yang berarus listrik 7,5 A da terdiri atas 4 lilitan sebesar $2\ \pi\ 10^{-5}$ Tesla. Tentukanlah jari-jari dari lingkaran kawat tersebut!

Penyelesaian

$$B = \frac{\mu_o I}{2\,a}$$

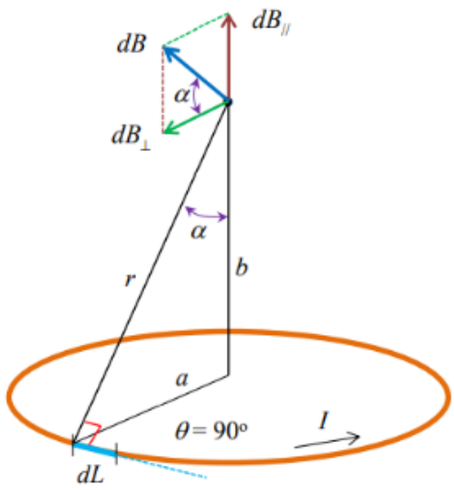
$$a = \frac{\mu_o I}{2\,B} = \frac{(4)(4\pi 10^{-7})(7{,}5)}{2\,(2\pi\ 10^{-5})} = 30\ 10^{-2}\ m = 30\ cm$$

Bagaimana Filosofi Induksi Magnetik Pada Pusat Arus Melingkar? Untuk mengetahui lebih mendalam filosofinya, ikutilah penjelasan di bawah ini.

Lingkaran adalah bentuk geometri lain yang memungkinkan kita menentukan medan magnet dengan cukup mudah menggunakan *hukum Biot-Savart*. Lebih khusus lagi jika kita ingin menghitung kuat medan magnet sepanjang sumbu lingkaran.

Misalkan sebuah lingkaran dengan jari-jari **a** dialiri arus **I.** Kita ingin menentukan kuat medan magnet sepanjang sumbu lingkaran pada jarak **b** dari pusat lingkaran. Berdasarkan Gambar 5.31, besarnya medan magnet di titik **P** yang dihasilkan oleh elemen cincing sepanjang **dL** adalah

$$dB = \frac{\mu_o I}{4\pi\ a}\ \frac{dL\ \sin\theta}{r^2}$$



Gambar 5.31 Medan magnet di sumbu cincin yang dihasilkan oleh elemen pada cincin. Arah elemen medan magnet membentuk sudut α terhadap horizontal. Elemen medan tersebut dapat diuraikan atas komponen yang saling tegak lurus: searah dengan sumbu dan tegak lurus dengan sumbu.

Tampak pada **Gambar 5.31**, **dL** selalu tegak lurus **r** sehingga $\theta = 90^o$ atau $\sin\theta = 1$. Dengan demikian persamaan $dB = \frac{\mu_o I}{4\pi a}\frac{dL \sin\theta}{r^2}$ menjadi lebih sederhana sebagai berikut,

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{dL}{r^2}$$

Tampak juga dari **Gambar 5.31**, **dB** dapat diuraikan atas dua komponen yang saling tegak lurus, yaitu komponen tegak lurus dan sejajatr sumbu. Besarnya nilai komponen-komponen tersebut adalah

$$dB_\perp = dB\cos\alpha$$

$$dB_\parallel = dB\sin\alpha$$

Tiap elemen kawat memiliki pasangan di seberangnya (lokasi *diametrik*). di mana komponen *medan yang tegak lurus sumbu memiliki besar sama tetapi arah tepat berlawanan*. Dengan demikian kedua komponen tersebut saling *meniadakan*. Oleh

karena itu, untuk menentukan kuat medan total kita cukup melakukan integral pada komponen yang sejajar sumbu saja. Besar medan total menjadi

$$B = \int dB_{\parallel} = \int dB \ \sin\alpha$$

$$B = \int \frac{\mu_o}{4\pi} \ I \ \frac{dL}{r^2} \ \sin\alpha$$

Semua parameter dalam integral konstan kecuali **dL**. Dengan demikian kita peroleh

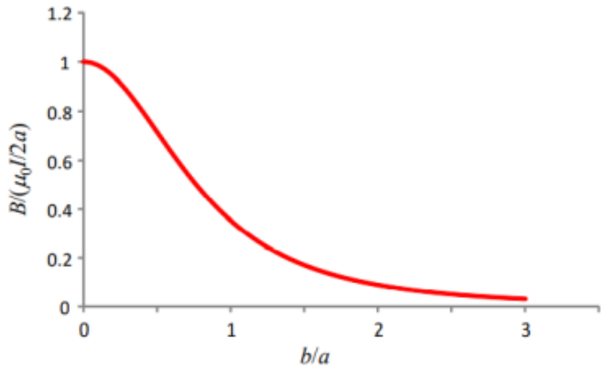
$$B = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{I}{r^2} \ \sin\alpha \int \ dL$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{I}{r^2} \ \sin\alpha \ \ (2\pi \ a)$$

Dari **Gambar 5.31** tampak bahwa $\boldsymbol{r^2 = a^2 + b^2}$ dan $\boldsymbol{\sin\alpha = \frac{a}{r}}$. Akhirnya kita dapatkan

$$B = \frac{\mu_o \, I}{2a} \ \frac{a^3}{(a^2 + b^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$\boldsymbol{B = \frac{\mu_o \, I}{2a} \ \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \ persamaan \ ASBS}$$

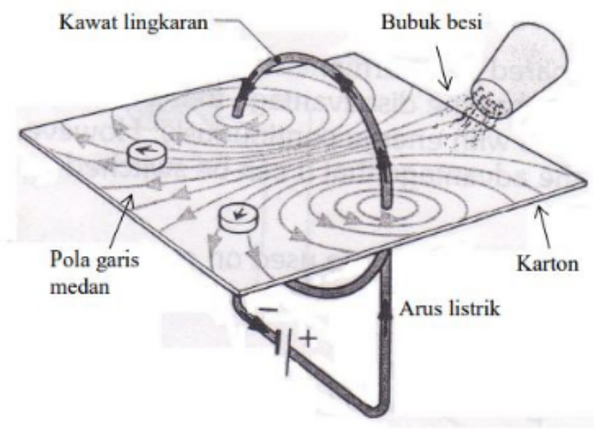


Gambar 5.32 Plot perubahan kuat medan magnet sebagai fungsi jarak dari pusat lingkaran. Jarak dinyatakan dalam besaran *b*/*a*.

Gambar 5.32 adalah plot perubahan kuat medan magnet sebagai fungsi jarak dari pusat lingkaran. Jarak dinyatakan dalam besaran **b/a**. Tampak bahwa kuat medan magnet turun secara monoton dengan bertambahnya jarak dari pusat lingkaran, mula-mula rutun secara lambat lalu turun secara cepat. Untuk kasus khusus titik di pusat lingkaran, kita dapatkan **b = 0** sehingga

$$B = \frac{\mu_o}{2}\frac{I}{a}$$

Arah medan magnet yang dihasilkan lingkaran dapat ditentukan juga dengan *aturan tangan kanan*. Kita genggam kawat melingkar tersebut dengan empat jari. Jika *ibu jari searah dengan arus* maka *arah genggaman sesarah dengan medan magnet*. Karena bentuk lingkaran yang melengkung maka *superposisi* medan yang dihasilkan elemen-elemen lingkaran menghasilkan medan total seperti pada **Gambar 5.33**.



Gambar 5.33 Pola medan magnet di sekitar lingkaran yang dialiri arus listrik. Jika karton ditempatkan di tengah lingkaran di mana lingkaran menembus karton seperti pada gambar, kemudian di atas karton ditaburi bubuk besi, maka bubuk besi membentuk pola garis yang merepresentasikan garis gaya magnet.

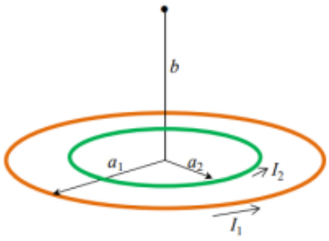
Contoh Soal

Kita memiliki dua cincin konsentris dengan jari-jari $\mathbf{a_1}$ dan $\mathbf{a_2}$. Masing-masing cincin dialiri arus $\mathbf{I_1}$ dan $\mathbf{I_2}$ dalam arah yang sama. Berapa kuat medan magnet pada lokasi:

a) berjarak **b** dari pusat cincin sepanjang sumbu cincin
b) pada pusat cincin

Penyelesaian

Gambar 5.34 adalah ilustrasi yang diberikan oleh soal di atas.



Gambar 5.34 Gambar untuk Menjawab Contoh Soal

a) Kuat medan magnet yang dihasilkan cincin berarus $\mathbf{I_1}$ adalah

$$B_1 = \frac{\mu_o I}{2\, a_1} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{a_1}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Kuat medan magnet yang dihasilkan oleh cincin berarus $\mathbf{I_2}$ adalah

$$B_2 = \frac{\mu_o I}{2\, a_2} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{a_2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Karena arah arus sama maka kedua medan saling menguatkan. Dengan demikian, kuat medan magnet total

$$B = B_1 + B_2$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2 a_1} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{a_1}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_o I}{2 a_2} \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{b}{a_2}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

b) Di pusat cincin terpenuhi $b = 0$ sehingga

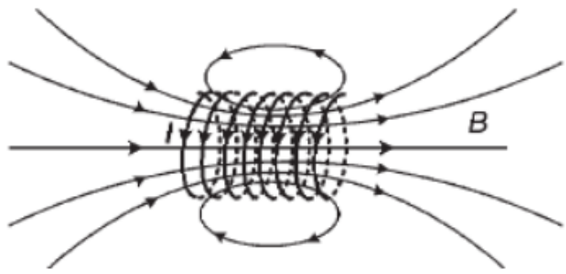
$$B = \frac{\mu_o I}{2 a_1} + \frac{\mu_o I}{2 a_2}$$

1.4. Induksi Magnetik Di Pusat dan Ujung Solenoida

Sebuah solenoida adalah kawat penghantar beraliran listrik yang digulung menjadi sebuah kumparan panjang. Medan magnet yang ditimbulkan oleh sebuah kumparan yang dialiri arus lsitrik lebih kuat daripada medan magnet yang ditimbulkan oleh sebuah lingkaran.

Spektrum magnet yang dihasilkan oleh sebuah solenoida sama dengan spektrum yang dihasilkan oleh sebuah magnet batang. Jadi, sebuah solenoida berkelakuan sama dengan magnet batang yaitu jika pada tiap ujung kumparan ditempatkan sebuah magnet jarum maka kutub utara salah satu magnet akan ditarik oleh ujung kumparan yang satu sedangkan kutub utara magnet yang lain ditolak oleh ujung kumparan yang lainnya.

Jika di dalam kumparan ditempatkan inti besi lunak, maka kemagnetannya menjadi jauh lebih besar, dimana susunan seperti itu disebut elektromagnet.



Gambar 5.35 Solenoida

Jika sebuah solenoida diketahui, maka besarnya induksi magnet di tiitk **P** pada sumbu solenoida dapat diketahui dengan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{dB = \frac{\mu_o\, n\, I\, a}{2\, r^2}\, \sin\alpha\; d\alpha}$$

dimana, dB = induksi magnetik
n = jumlah lilitan tiap satuan panjang
I = kuat arus
α = sudut bentukan
r = jarak kumparan dengan titik
a = jari-jari kumparan
μ_o = permeabilitas udara/vakum
π = 3,14 = $\frac{22}{7}$

Sedangakan untuk pusat kumparan, induksi magnetiknya adalah

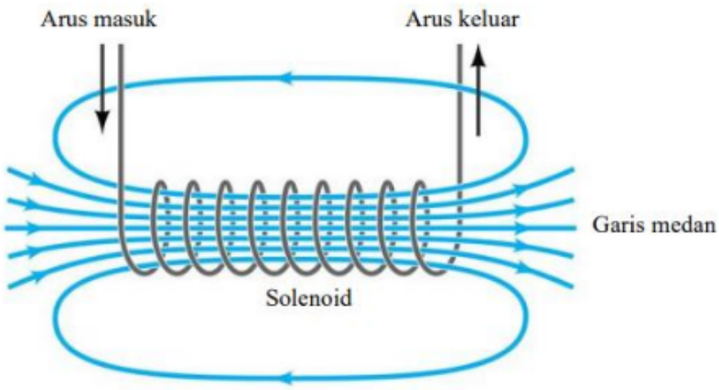
$$\boldsymbol{B = \frac{\mu_o I\, N}{l}}$$

dimana, B = induksi magnetic di pusat kumparan
N = jumlah lilitan
I = kuat arus
l = panjang solenoida
μ_o = permeabilitas udara/vakum

Atau

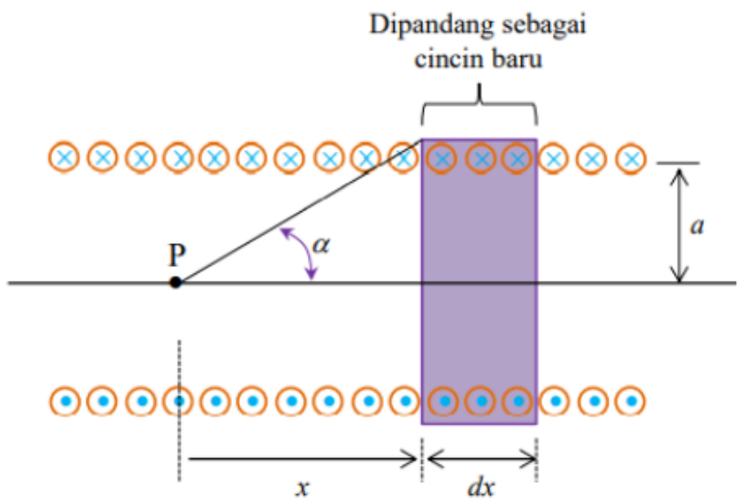
$$\boldsymbol{B = \mu_o\, I\, \frac{N}{l} = \mu_o\, I\, n} \quad dengan\ \boldsymbol{n = \frac{N}{l}}$$

Mau Tahu Filosofi Medan Magnet di Pusat Solenoida? Solenoid adalah lilitan kawat yang berbentuk pegas. Panjang solenoid dianggap tak berhingga seperti diilustrasikan pada **Gambar 5.35**. Kita akan mencari kuat medan magnet di pusat solenoid tersebut.



Gambar 5.35 Contoh solenoid dan pola medan magnet yang dihasilkan. Solenoid dapat dipandang sebagai susunan kawat lingkaran.

Jika kita perhatikan, solenoid dapat dipandang sebagai susunan lingkaran (cincin) sejenis yang jumlahnya sangat banyak. Tiap cincin membawa arus **I**. Medan di dalam solenoid merupakan *jumlah dari medan yang dihasilkan oleh cincin-cincin tersebut*. Jika solenoid pada **Gambar 5.35** dibelah dua maka tampak penampang seperti pada **Gambar 5.36**.



Gambar 5.36 Penampang solenoid jika dibelah dua. Lingkaran menyatakan penampang kawat solenoid. Tanda titik pada lingkaran menyatakan arah arus dari belakang ke depan (menuju wajah pembaca) dan tanda silang menyatakan arus yang mendarah dari depan ke belakang kertas.

Misalkan jumlah lilitan per satuan panjang adalah **n**. Kita lihat elemen solenoid sepanjang **dx**. Jumlah lilitan dalam elemen ini adalah

$$dN = n\,dx$$

Elemen tersebut dapat dipandang sebagai sebuah cincin dengan besar arus

$$dI = I\,dN = I\,n\,dx$$

Karena elemen tersebut dapat dipandang sebagai sebuah cincin, maka medan magnet yang dihasilkan di titip **P** memenuhi ***persamaan ASBS*** , dengan mengganti **I** pada ***persamaan ASBS*** dengan **dI** dan mengganti **b** pada ***persamaan ASBS*** dengan variable **x** seperti pada **Gambar 5.36**. Kita akhirnya peroleh

$$dB = \frac{\mu_o\,dI}{2}\,\frac{1}{\left(1+\left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$dB = \frac{\mu_o\,I\,n}{2a}\,\frac{dx}{\left(1+\left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Medan total di titik **P** merupaka integral dari persamaan di atas. Jika solenoid sangat panjang maka batas integral adalah **x =** $-\infty$ sampai **x =** $+\infty$. Dengan demikian, medan total di titik **P** adalah

$$B = \frac{\mu_o\,I\,n}{2a}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{dx}{\left(1+\left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B = \frac{\mu_o\,I\,n}{2a}\left[\frac{x}{\sqrt{1+\left(\frac{x}{a}\right)^2}}\right]_{-\infty}^{+\infty}$$

$$\boldsymbol{B = \mu_o\,I\,n}$$

Tampak dari persamaan di atas bahwa untuk solenoid yang panjangnya tak berhingga, *kuat medan listrik di pusat solenoid tidak bergantung pada dimensi solenoid, seperti besar jari-jari. Kuat medan magnet semata-mata bergantung pada julma lilitan per satuan panjang serta arus yang mengalir*.

Untuk ujung solenoida, besarnya induksi magnetik dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{B = \frac{1}{2}\frac{\mu_o I N}{l}}$$

dimana, B = induksi magnetik
I = kuat arus
N = jumlah lilitan
l = panjang solanoida
μ_o = permeabilitas udara/vakum

Dan jika solenoida tersebut sangat panjang, maka besarnya induksi magnetik di tengah sumbu solenoida dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{B = \mu_o n I}$$

dimana, B = induksi magnetik
I = kuat arus
n = jumlah lilitan per satuan panjang
μ_o = permeabilitas udara/vakum

Sedangkan jika titik berada di ujung solenoida, maka besarnya induksi magnetik dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{B = \frac{1}{2}\mu_o N I}$$

dimana, B = induksi magnetik
I = kuat arus
N = jumlah lilitan
μ_o = permeabilitas udara/vakum

Contoh Soal

Suatu solenoid panjangnya 4 meter memiliki lilitan sebanyak 1600 lilitan. Bila solenoid itu dialiri arus sebesar 0,5 A, maka tentukanlah induksi magnet pada ujung solenoida yang memiliki jari-jari sebesar 2 cm!

Penyelesaian

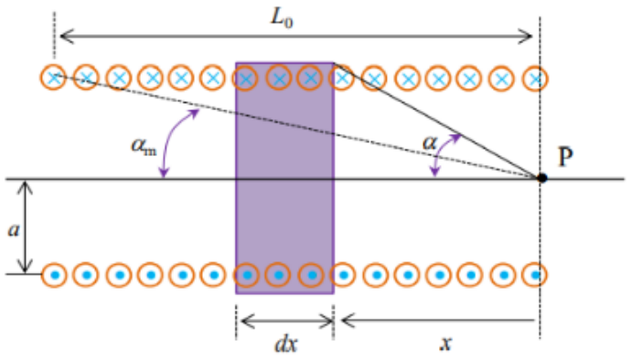
$$n = \frac{N}{l} = \frac{1600}{4} = 400\,\frac{lilitan}{m}$$

$$B = \mu_o\, I\, N = (4\pi\ 10^{-7})\ x\ 0{,}5\ x\ 400\ = 8\pi\ 10^{-5}\ \frac{Wb}{m^2}$$

Mau Tahu *Filosofi Medan Magnet di Ujung Solenoida ?*

Untuk mengetahuinya, marilah kita tentukan n kuat medan magnet di tepi solenoid yang panjangnya berhingga, yaitu $\mathbf{L_o}$. Kita anggap titik pengamatan berada di tepi kanan solenoid (**Gambar 5.37**). Lokasi pengamatan adalah di sumbu solenoid. Kita tetap dapat menggunakan persamaan

$$\boldsymbol{dB = \frac{\mu_o\, I\, n}{2a}\ \frac{dx}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}}$$



Gambar 5.37 Menentukan medan magnet di tepi solenoid. Panjang solenoid adalah L_0.

Namun di sini batas integral bukan lagi dari negative tak berhingga ke positif tak berhingga, tetapi dari $\mathbf{x = -L_o}$ sampai $\mathbf{x = 0}$. M aka medan magnet di titik **P** menjadi

$$B = \frac{\mu_o\, I\, n}{2a} \int_{-L_o}^{0} \frac{dx}{\left(1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

$$B = \frac{\mu_o\, I\, n}{2a} \left[\frac{x}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2}}\right]_{-L_o}^{0}$$

$$B = \frac{\mu_o\, I\, n}{2a} \frac{L_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_o}{a}\right)^2}}$$

Tampak dari persamaan di atas bahwa kuat medang magnet yang dihasilkan solenoid yang panjangnya berhingga masih bergantung pada jari-jari solenoida.

Untuk kasus khusus di mana panjang salah satu sisi solenoida sangat panjang, atau $\mathbf{L_o \rightarrow \infty}$ maka $\mathbf{\left(\frac{L_o}{a}\right)^2 \gg 1}$ sehingga kita dapat melakukan *aproksimasi* berikut ini

$$\frac{L_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{L_o}{a}\right)^2}} = \frac{L_o}{\sqrt{\left(\frac{L_o}{a}\right)^2}} = a$$

Dengan demikian, medan magnet di titik **P** menjadi

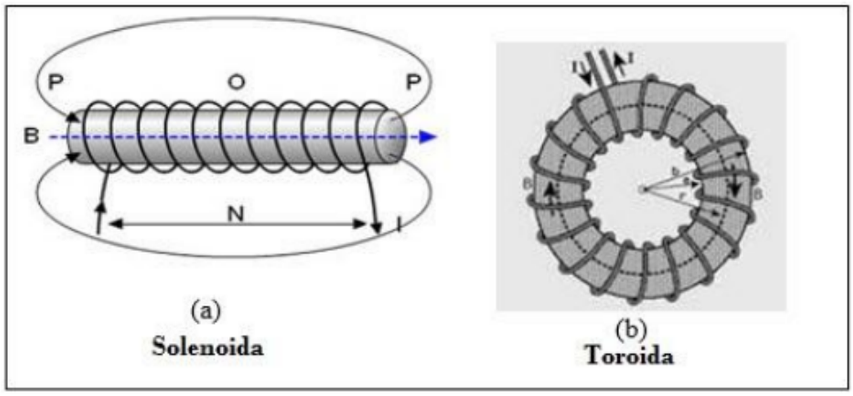
$$\boldsymbol{B = \frac{1}{2}\, \mu_o\, I\, n}$$

yang nilainya sama dengan setengah kuat medan yang dihasilkan oleh solenoida yang panjangnya tak berhingga pada dua ujungnya.

1.5. Induksi Magnetik Pada Sumbu Toroida

Toroida adalah kawat yang dililitkan pada inti yang berbentuk lingkaran atau solenoida yang dilengkungkan sehingga sumbunya membentuk sebuah lingkaran. Jadi pada prinsipnya *toroida*

merupakan *solenoida* yang intinya dibengkokkan sehingga brbentuk lingkaran.



Gambar 5.38 (a) Soelnoida, (b) Toroida

Oleh sebab itu, besarnya induksi magnetik di penampang kumparan toroida sama dengan solenoida yang memenuhi persamaan berikut,

$$\boldsymbol{B = \frac{\mu_o I N}{l}} \quad atau \quad \boldsymbol{B = \frac{\mu_o I N}{2\pi a}}$$

dimana,

B	=	induksi magnetik
N	=	jumlah lilitan
I	=	kuat arus
l	=	keliling lingkaran inti
a	=	jari-jari efektif toroida
μ_o	=	permeabilitas udara/vakum
π	=	$3{,}14 = \frac{22}{7}$

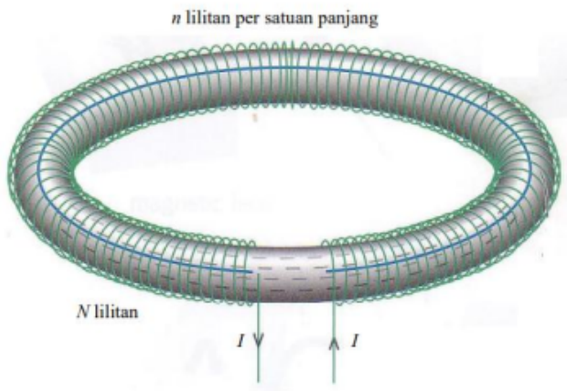
Sedangkan besarnya induksi magnet pada sumbu toroida dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{B = \mu_o I n}$$

dimana,

B	=	induksi magnetik
I	=	kuat arus
n	=	jumlah lilitan per satuan panjang
μ_o	=	permeabilitas udara/vakum

***Ingin tahu* Filosofinya Medan Magnet Dalam Toroida?** Kita telah membahas sebelumnya, bahwa solenoid adalah kumparan yang bentuknya lurus. *Solenoid ideal* memiliki panjang tak berhingga. Kuat medan magnetik di luar *solenoid ideal* adalah *nol*. Jika solenoid yang panjangnya berhingga kita gabungkan ujungnya, maka kita mendapatkan sebuah bentuk seperti kue donat. Bentuk ini dinamakan toroid seperti diilustrasikan pada **Gambar 5.39**.

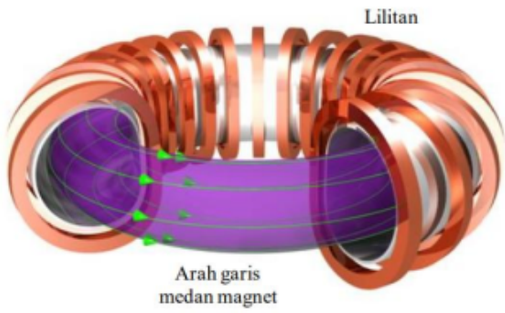


Gambar 5.39 Toroida. Bentuknya seperti donat berongga.

Jika kita bergerak sepanjang rongga solenoid ideal (panjang tak berhingga) maka kita tidak pernah menemukan ujung solenoid tersebut. Dengan cara yang sama, apabila kita bergerak sepanjang rongga toroid, kita pun tidak pernah menemukan ujung toroid tersebut. Sehingga, *toroid akan serupa dengan solenoid ideal*. Oleh karena itu, menjadi sangat logis apabila kita berkesimpulan bahwa *kuat medan magnet dalam toroid sama dengan kuat medan magnet dalam solenoid ideal*. Jadi kuat medan magnet dalam toroida adalah

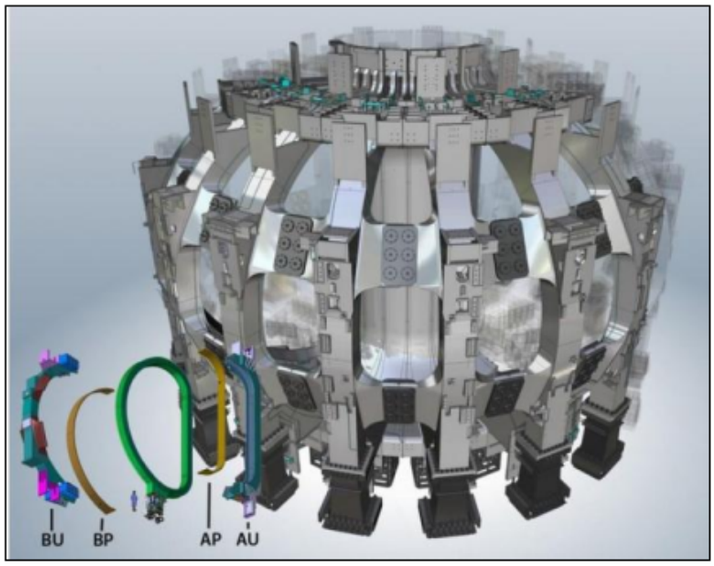
$$B = \mu_o I n$$

dengan **n** jumlah kumparan per satuan panjang dan **I** arus yang mengalir pada kawat toroida. *Untuk toroid ideal, kuat medan magnet di luar Toroida nol*, hal yang juga kita jumpai pada *solenoida ideal*.



Gambar 5.40 Ilustrasi penampang toroid. Arah garis medan sama dengan arah keliuling lingkaran yang pusatnya berimit dengan pusat toroida.

Gambar 5.40 adalah ilustrasi medan yang dihasilkan di dalam rongga toroida. Agar garis medan sama dengan arah keliling lingkaran yang pusatnya berimit dengan pusat toroid. *Besar medan bergantung pada jumlah lilitan per satuan panjang dan kuat arus yang mengalir dalam toroida*.



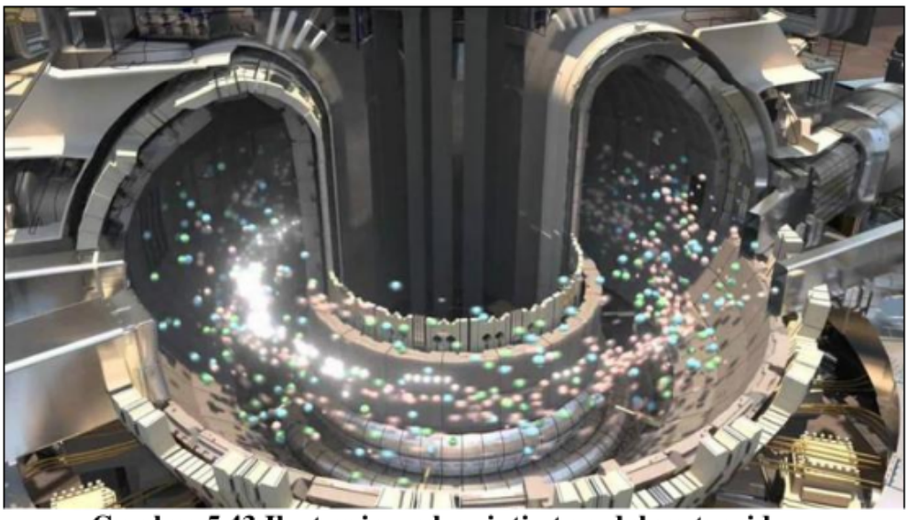
Gambar 5.42 Sistem magnet yang projek ITER. Komponen utamanya adalah toroida terbesar yang diproduksi oleh Mitsubishi Heavy Industries, Jepang. Kumparan toroida berupa bahan superkonduktor dengan massa total 3.400 ton

Gambar 5.42 adalah system magnet yang dipasang pada ITER yang bagian utamanya adalah salah satu toroida terbesar yang diproduksi oleh *Mitsubishi Heavy Industries, Jepang*. ITER adalah proyek energi paling ambisius di dunia saat ini yang

berlokasi di Prancis dan melimbatkan kolaborasi 35 negera. Lilitan pada toroida tersebut memiliki massa total 3.400 ton yang terbuat dari bahan *superkonduktor*.

Medan magnet yahg dihasilkan dalam rongga toroid dapat digunakan untuk memerangkap partikel bermuatan listrik. Partikel yang bergerak melingkar mengikuti garis medan yang dihasilkan toroida tidak mendapat gaya magnet karena arah gerak sejajar dengan arah medan. Namun, jika gerak partikel menyimpang dari arah tersebut maka ada komponen medan yang tegak lurus keepatan. Akibatnya pertikel mendapat *gaya Lorentz* yang memaksan aprtikel kembali ke lintasan lingkaram. Jika medan cukup kuat maka petket dapat dikontrol sehingga tidak pernah menyinggung dinding toroida. Prinsip inilah yang digunakan dalam pembanguan *reaktor fusi nuklir*.

Reaksi fusi nuklir (penggabungan inti atom ringan) terjasi pada suhu yang sangat tinggi (puluhan juta Kelvin). Pada suhu tersebut tidak ada material yang dapat bertahan pada wujud padat maupun cair. Semua material hanya dapat bertahan pada wujud plasma (ion-ion yang terpisah). Agar reaksi fussi dapat dikontrol maka ruang tempat reaksi fusi harus jauh dari material. Dengan sistem toroida ini, maka reaksi dapat dikendalikan pada lokasi dengan pusat lubang toroida dan cukup jauh dari dinding toroida. Inti atom yang berekasi tidak bersentuhan dengan dinding torioda sehingga dinding toroida dapat bertahan dalam wujud padat*(Mikrajuddin Abdullah, 2017)*. Konsep pertama reacktor ini adalah *Tokamak* yang dibangun oleh Uni Soviet. **Gambar 5.43** adalah ilustrasi gerakan di dalam lubang toroid. Inti tersebut hanya bergerak secara tangensial sepanjang dan hamper tidak memiliki komponen radial.



Gambar 5.43 Ilustrasi gerakan inti atom dalam toroida

2. Gaya Lorentz

2.1. Pengertian

Apabila ada sebuah penghantar yang dialiri arus listrik dan penghantar tersebut berada di dalam sebuah medan magnetik, maka akan timbul gaya yang disebut dengan nama gaya magnetik atau dikenal juga nama *gaya lorentz*.

> ***Gaya Lorentz*** *adalah gabungan antara 2 gaya yaitu: gaya elektrik dan gaya magnetik pada suatu medan elektromagnetik. Gaya Lorentz merupakan sebuah gaya yang dihasilkan oleh sebuah muatan listrik yang bergerak oleh sebuah arus listrik yang berada di dalam suatu medan magnet B.*

Nama *Lorentz* adalah sebuah nama yang diambil dari nama belakang seorang ahli Fisika yang berasal dari *Arnhem, Belanda*, yaitu *Hendrik Anton Lorentz*. *Hendrik Anton Lorentz* meneliti tentang interaksi yaitu sebuah penghantar berarus yang diletakan di dalam sebuah medan magnet. Dari penelitian tersebut, akirnya menghasilkan sebuah gaya yang kemudian diberikan nama ***Gaya Lorentz***.

Dari gaya inilah kemudian ditemukan motor listrik yang berfungsi untuk menggerakkan berbagai alat yang bermanfaat seperti: kipas angin, blender, mesin cuci, dan lain sebagainya.

2.2. Besar Gaya Lorentz

Magnet tidak hanya melakukan gaya pada magnet lain, tetapi juga dapat melakukan gaya pada arus listrik. Jika kawat yang dialiri arus listrik ditempatkan dalam medan magnet, maka kawat tersebut mendapat gaya dari magnet. Besar dan arah gaya yang dialami kawat yang dialiri arus listrik dalam medan magnet diberikan oleh *hukum Lorentz*.

$$\overline{F} = \overline{B}\, I\, \overline{L}$$

Dimana, $\overline{F}$ = gaya yang dilami kawat berarus listrik (N),
I = besar arus listrik (A),
$\overline{B}$ = vektor medan magnet (T),
$\overline{L}$ = vektor panjang kawat yang dikenai medan magnet (m)

Besar vektor $\overline{L}$ sama dengan bagian panjang kawat yang dikenai medan magnet saja sedangkan arahnya sama dengan arah arus dalam kawat. Karena perkalian silang dua vektor menghasilkan vector baru yang tegak lurus dua vektor tersebut maka arah gaya Lorentz tegak lurus vektor $\overline{L}$ dan vektor $\overline{B}$. Dengan kata lain, Jika kita membuat bidang datar di mana vektor $\overline{L}$ dan vektor $\overline{B}$ berada pada bidang tersebut, Maka vektor gaya berarah tegak lurus bidang tersebut. Ilustrasnya tampak pada **Gambar 5.44**.

Besarnya gaya Lorentz yang dialami kawat berarus listrik dapat ditulis,

$$F = B\, I\, L\, \sin\theta$$

dengan θ adalah sudut antara vektor $\overline{L}$ dan vektor $\overline{B}$.

Jadi, berdasarkan persamaan di atas dapat diketahui bahwa besarnya *gaya Lorentz* yang dialami oleh kawat berarus listrik di dalam medan magnet adalah

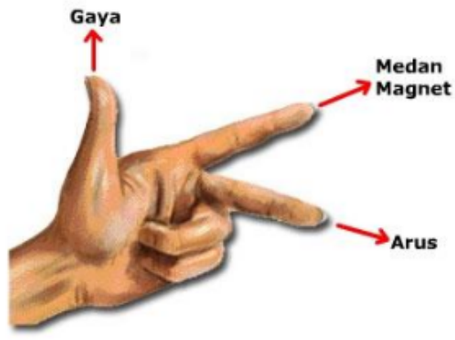
- *Sebanding dengan kuat arus yang mengalir,*
- *Sebanding dengan panjang kawat,*
- *Sebanding dengan besar induksi magnetik,*
- *Sebanding dengan sinus sudut antara arus dan arah induksi magnet*.

Sedangkan untuk muatan listrik yang bergerak dengan medan magnet homogen, maka besarnya gaya Lorentz untuk muatan tersebut dapat diketahui dengan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{F = B\,q\,v\,\sin\theta}$$

dimana, F = gaya Lorentz untuk muatan bergerak
B = induksi magnetik
q = muatan listrik
v = kecepatan muatan listrik
θ = sudut antara kawat dengan medan magnet

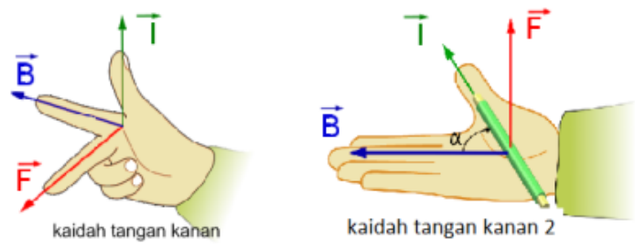
Arah gaya Lorentz adalah tegak lurus arah medan magnetik dan juga arah arus. Untuk menentukan arah gaya Lorentz dapat dugunakan juga dengan ***kaidah tangan kiri***, dimana



Gambar 5.44 Kaidah Tangan Kiri

- *Ibu jari sebagai arah gaya Lorentz*
- *Telunjuk sebagai arah medan magnet*
- *Jari tengah sebagai arah arus listrik*

Selain kaidah tangan kiri, arah gaya Lorentz juga dapat ditentukan dengan menggunakan aturan tangan kanan.



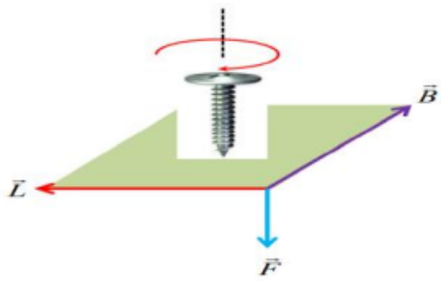
Gambar 5.45 Kaidah Tangan Kanan

Jika tangan kanan dibuka dengan jari-jari dirapatkan kecuali ibu jari seperti **Gambar 5.45 Tangan Kanan 2** di atas, maka didapatkan bahwa :

- *Ibu jari sebagai arah arus,*
- *Jari-jari lainnya sebagai arah induksi magnet*
- *Arah gaya Lorentz keluar dari telapak tangan.*

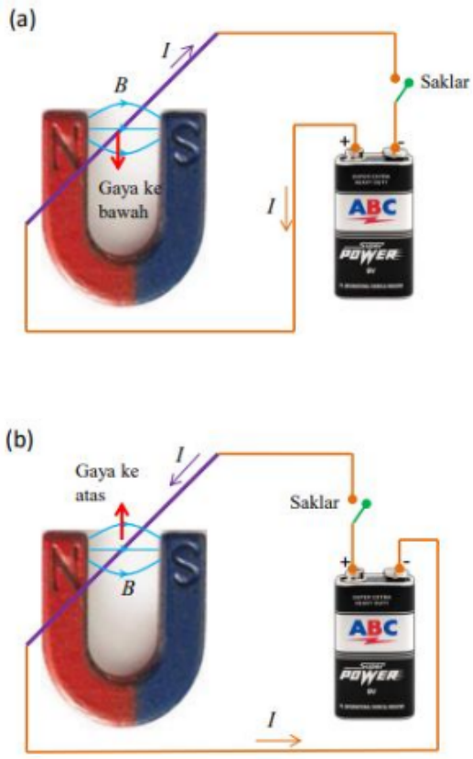
Filosofi tentang arah gaya Lorentz, awalnya dari aturan sekrup. Untuk menentukan arah gaya Lorentz, kita gunakan aturan sekrup putar kanan. Caranya sebagai berikut,

i. *Tempatkan vektor panjang kawat dan vektor medan magnet sehingga titik pangkalnya berimpit.*
ii. *Putar sekrup putar kanan dari arah vektor panjang kawat ke arah vektor medan magnet.*
iii. *Arah maju sekrup sama dengan arah gaya Lorentz pada kawat.*



Gambar 5.46 Arah gaya Lorentz tegak lurus bidang yang dibentuk oleh vektor $\vec{L}$ dan vektor $\vec{B}$

Kita dapat mendemonstrasikan dengan mudah gaya Lorentz menggunakan sebuah magnet permanen bentuk U atau dua magnet permanen batang, sebuah baterei, dan kabel yang bisa diluruskan tetapi mudah dibengkokkan. Buat rangkaian seperti pada **Gambar 5.47**.



Gambar 5.47 Medan magnet melakukan gaya pada kawat yang dialiri arus listrik. Arah gaya ditentukan oleh arah medan dan arah arus listrik.

Jika saklar ditutup maka kabel di antara dua kaki magnet yang semula lurus menjadi *bengkok*. Jika hubungan kabel ke kutub baterai ditukar maka arah belokan kabel terbalik. Belokan kabel disebabkan adanya gaya yang bekerja pada kabel ketika arus mengalir. Gaya itulah yang merupakan *gaya Lorentz*. Kita dapat mengembangkan eskperimen dengan menggunakan sejumlah baterai. *Makin banyak baterai yang digunakan maka arus listrik yang mengalir makin besar sehingga gaya Lorentz makin besar*. Akibatnya, *kabel membelok makin besar*. Jika kita hanya memiliki satu baterai maka kita dapat mengubah arus dengan memasang sebuah *potensiometer* dalam rangkian.

2.3. Definis Satu Tesla

Jika arah arus dan arah medan magnet saling tegak lurus ($\theta = 90^o$ atau $\sin\theta = 1$), maka gaya Lorentz pada kawat memenuhi,

$$\boldsymbol{F = B\ I\ L}$$

Jika kawat dialiri arus satu ampere dan panjang kawat yang dikenai medan magnet adalah satu meter, maka besarnya medan magnet sama dengan satu tesla jika gaya yang bekerja pada kawat adalah satu Newton.

2.4. Gaya Lorentz Pada Muatan Yang Bergerak

Kita sudah tahu bahwa muatan yang bergerak menghasilkan arus listrik bukan? Dengan demikian, muatan yang bergerak dalam medan magnet juga mengalami gaya Lorentz, karena muatan tersebut menghasilkan arus listrik. Pada dasarnya, *gaya Lorentz pada kawat yang dialiri arus sama dengan superposisi* (penjumlahan) *gaya Lorentz pada semua muatan listrik yang sedang mengalir dalam kawat dan yang merasakan medan magnet*. Jadi, yang lebih mendasar, ***gaya Lorentz*** *adalah gaya yang dilakukan oleh medan magnet pada muatan listrik yang sedang bergerak*.

Kita dapat menurunkan persamaan gaya Lorentz untuk muatan yang bergerak dari persamaan gaya Lorentz untuk arus

pada kawat. Telah kita bahas, gaya Lorentz pada kawat yang dialiri arus listrik adalah $\overline{F} = \overline{B}\, I\, \overline{L}$. Jika bagian kawat yang dikenai medan magnet adalah $\Delta\overline{L}$, maka gaya Lorentz yang dihasilkan adalah

$$\boldsymbol{\overline{F} = \overline{B}\, I\, \Delta\overline{L}}$$

Tetapi, kita tahu definisi arus listrik sama dengan muatan yang mengalir per satuan waktu, atau

$$I = \frac{q}{\Delta t}$$

dengan **Δt** adalah selang waktu dan **q** adalah muatan yang mengalir dalam selang waktu tersebut. Selanjutnya kita dapat menulis gaya Lorentz pada kawat berarus listrik sebagai berikut,

$$\overline{F} = \overline{B}\, \frac{q}{\Delta t}\, \Delta\overline{L} = \overline{B}\, \frac{\Delta\overline{L}}{\Delta t}\, q$$

Tetapi, $\frac{\Delta\overline{L}}{\Delta t}$ adalah elemen panjang per satuan waktu yang merupakan definisi kecepatan dan tidak lain merupakan kecepatan muatan, atau

$$\overline{v} = \frac{\Delta\overline{L}}{\Delta t}$$

Akhirnya, kita peroleh ungkapan gaya Lorentz untuk muatan yang bergerak sebagai berikut

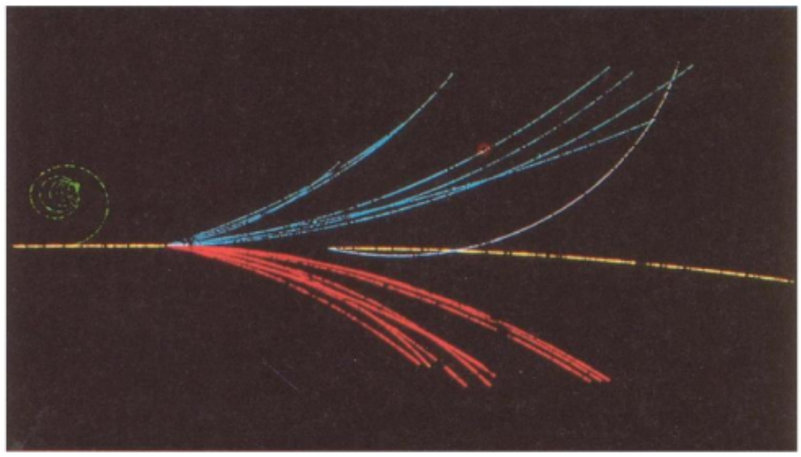
$$\overline{F} = \overline{B}\, q\, \overline{v}$$

Besarnya gaya Lorentz menjadi

$$\boldsymbol{\overline{F} = \overline{B}\, q\, \overline{v}\ \sin\theta}$$

dengan **θ** adalah sudut antara vektor $\overline{v}$ dan vektor $\overline{B}$.

Juga tampak dari persamaan $\overline{F} = \overline{B}\, q\, \overline{v}$ bahwa arah gaya Loretz selalu tegak lurus vektor medan dan tegak lurus vektor kecepatan, dan ditentukan oleh tanda muatan. Dengan arah seperti itu maka, jika ada muatan listrik yang bergerak dalam medan magnet maka muatan tersebut selalu membelok dalam arah tegak lurus arah gerak pada saat itu. Akibatnya, lintasan muatan menjadi melengkung, seperti diilustrasikan pada **Gambar 5.48**. Ada dua arah lengkungan yang mungkin terjadi dan semata-mata ditentukan oleh jenis muatan listrik. Muatan listrik yang berbeda tanda akan menelngkung dalam arah yang berbeda.



Gambar 5.48 Lintasan muatan listrik yang bergerak dalam medan magnet mengalami pembelokan akibat gaya Lorentz. Muatan positif dan negatif membelok ke arah yang berlawanan. Jika medan magnet pada perobaan ini mengarah dari kertas ke wajah kita,yang manakah lintasan partikel bermuatan positif dan yang manakah yang memuatan negatif? Bisakah kita jelaskan apa penyebab lintasan biru tidak berimpit dan lintasan merah tidak berimpit padahal jenis partikel yang membentuk lintasan merah dan jenis partikel yang membentuk lintsan biru adalah sama.

2.5. Gaya Lorentz Pada Partikel Yang Bergerak Melingkar

Jika sebuah partikel bermuatan listrik bergerak tegak lurus dengan medan magnet homogeny yang mempengaruhinya, maka lntasan partikel tersebut akan berupa partikel lingkaran. Besarnya

gaya yang dialami medan magnet daapt diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{F = B\ q\ v}$$

dimana, F = gaya
v = keepatan partikel
q = muatan partikel
B = induksi magnetik

Karena partikel tersebut bergerak melingkar, maka partikel tersebut akan mendapatkan gaya sentipetal yang diperoleh dari gaya Lorentz sehingga didapatkan persamaan gaya pada partikel gerak melingkar berikut,

$$\boldsymbol{q\ v\ B = m\frac{v^2}{R}}$$

dimana, B = induksi magnet homogen
v = keepatan partikel
q = muatan partikel
R = jari-jari lintasan

Berdasarkan persamaan di atas, dapat diketahui persamaan untuk mengethaui besarnya jari-jari lintasan berikut,

$$\boldsymbol{R = m\frac{v}{q\ B}}$$

Untuk mengetahui lebih jelas tentang partikel bergerak melingkar, silahkan mengikuti penjelasan setelah contoh soal di bawah ini.

Contoh Soal

Sebuah partikel yang mempunyai massa 200 miligram dan membawa muatan 2×10^{-8} coulomb daitembakkan tegak lurus dan horizontal pada medan magnet serba sama yang horizontal dengan kecepatan 5×10^4 m/s. Jika partikel itu tidak mengalami perubahan arah, tentukan kuat medan magnet! (ambil g = 10 m/s^2)

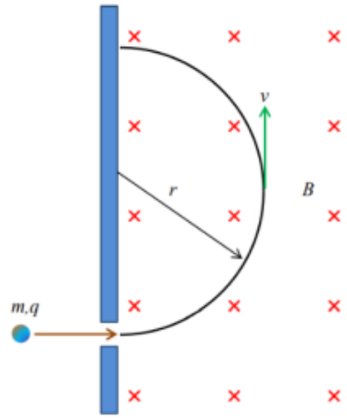
Penyelesaian

Di sini ada dua gaya yang bekerja. Pertama adalah gaya gravitasi ke bawah. Kedua adalah Gaya Lorentz. Agar lintasan partikel tidak berubah maka besar gaya Lorentz sama dengan besar gaya gravitasi. Besar gaya gravitasi = **m g**. Karena lintasan partikel tegak lurus medan magnet, maka besar gaya Lorentz = **q v B sin 90^o = q v B**. Karena kedua gaya sama maka **q v B = m g** atau

$$\boldsymbol{B = \frac{m\,g}{q\,v}} \quad atau \quad B = \frac{(2\ 10^{-4})\ (10)}{(2\ 10^{-8})\ (5\ 10^{4})} = 2\ T$$

Lalu, Bagaimanakah jika Muatan Mengalami Pembelokan Dalam Medan Magnet? Marilah kita *telaah* penjelasan berikut.

Seperti yang dibahas di atas, arah gaya Lorentz selalu tegak lurus **B** dan tegak lurus **v**. Arah gaya yang selalu tegak lurus arah gerak pada partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet persis sama dengan gaya pada benda yang sedang bergerak melingkar beraturan. Pada benda yang bergerak melingkar, selalu bekerja gaya ke arah pusat lingkaran (*Andi Suryanto & Syamsul Bakhri (2021)*, sedangkan arah gerak selalu menyinggung lintasan (tegak lurus gaya). Dengan demikian, kita bisa mamastikan bahwa lintasan muatan yang masuk dalam medan magnet dalam arah tegak lurus membentuk lintasan lingkaran (**Gambar 5.49**). Karena lintasan berbentuk lingkaran maka pada muatan ada gaya sentripetal sebesar $\boldsymbol{F = m\,\frac{v^2}{R}}$



Gambar 5.49 Massa atom dapat ditentukan berdasarkan jari-jari lintasan dalam medan magnet. Tanda silang artinya medan magnet berarah ke belakang menembus kertas.

Sumber gaya sentripetal adalah gaya Lorentz yang dihasilkan oleh medan magnet yang besarnya **q v B**. Dengan menyamakan nilai ke dua gaya tersebut kita peroleh,

$$\boldsymbol{q\,v\,B = m\frac{v^2}{R}} \quad atau \quad \boldsymbol{m = \frac{q\,R\,B}{v}}$$

Tampak dari persamaan di atas, bahwa, jika laju dan muatan partikel diketahui maka dengan mengukur jari-jari lintasan, kita dapat menentukan massa partikel.

Contoh Soal

Sebuah partikel yang memiliki satu muatan elementer memasuki daerah yang mengandung medan magnet **0,010 T** dengan laju **$2{,}0 \times 10^7$ m/s** arah tegak lurus medan magnet. Diamati bahwa partikel tersebut bergerak dalam lintasan lingkaran dengan jari-jari **11 mm**, Tentukan massa partikel tersebut!

Penyelesaian

Massa partikel, $\boldsymbol{m = \frac{q\,v\,B}{v}}$

Maka, $m = \frac{q\,v\,B}{v} = \frac{(1{,}602\,10^{-19})(0{,}011)(0{,}01)}{2\,10^7} = 9\,10^{-31}\ kg$

2.6. Gaya Lorentz Pada Dua Kawat Sejajar

Dua buah kawat lurus yang dialiri arus listrik dan dipasang sejajar akan terjadi gaya tarik menarik bila kedua arusnya searah, dan terjadi gaya tolak menolak bila arusnya berlawanan arah. Hal ini menunjukkan bahwa antara kedua kawat tersebut timbul *gaya Lorentz*.

Besarnya gaya Lorentz yang terjadi dapat diketahui dengan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{F = \frac{\mu_o I_1 I_2}{2\pi a}}$$

dimana, F = gaya lorentz
μ_o = permeabilitas udara/vakum
I_1, I_2 = kuat arus pada masing-masing kawat
a = jarak antara kedua kawat
π = 3,14 = $\frac{22}{7}$

Sedangkan jika kedua kawat sama, maka besarnya gaya dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{F = \frac{\mu_o I^2}{2\pi a}}$$

dimana, F = gaya lorentz
μ_o = permeabilitas udara/vakum
I = kuat arus pada kawat
a = jarak antara kedua kawat
π = 3,14 = $\frac{22}{7}$

2.7. Sifat Kemagnetan Suatu Bahan

Bahan yang sangat kuat menarik garis-garis gaya magnet disebut ferromagnetic, contohnya nikel, kobalt, besi, dan baja. Sedangkan bahan yang kurang kuat menarik garis-garis gaya magnet disebut paramegnetik, contohnya alumunium, platina, kayu. Untuk bahan yang sedikit menolak garis-garis gaya magnet

disebut diamagnetic, contoh bismuth, tembaga, emas, seng, dan garam dapur.

Besaran yang digunakan untuk menunjukkan kekuatan suatu bahan adalah permeabilitas (μ), dimana :

- *Ferromagnetic* adalah bahan yang memiliki permeabilitas jauh lebih besar daripada permeabilitas vakum ($\boldsymbol{\mu \gg \mu_o}$),
- *Paramagnetic* adalah bahan yang memiliki permeabilitas sedikit lebih besar daripada permeabilitas vakum ($\boldsymbol{\mu > \mu_o}$),
- *Diamagnetic* adalah bahan yang memiliki permeabilitas lebih kecil daripada permeabilitas vakum ($\boldsymbol{\mu < \mu_o}$).

Menurut bangunan atom dan molekul-molekul, cenderung berpasangan *spin*, sehingga

- Pada bahan *diagmagnetik*, hamoir semua elektron berpasangan *spin* sehingga bahan ini tidak menarik garis-garis gaya,
- Pada bahan *paramagnetic*, terdapat sedikit elektron yang tidak berpasangan *spin* sehingga bahan ini sedikit menarik garis-garis gaya, ‘
- Pada bahan *ferromagnetic*, terdapat bayak elektron yang tidak berpasangan *spin* sehingga bahan ini sangat kuat menarik garis-garis gaya.

3. Medan Magnet Oleh Magnet Batang

Di dalam daerah sekitar kawat yang berarus listrik terdapat medan magnet yaitu berupa garis-garis gaya berbentuk lingkaran yang arahnya bergantung pada arah arus. Di sekitar magnet batang juga terdapat medan magnet yang digambarkan oleh garis-garis yang disebut garis-garis gaya magnet.

Arah garis-garis gaya magnet di luar magnet dari arah kutub utara ke ketub selatan, sedangkan di dalam magnet dari selatan ke utara. Setiap magnet batang memiliki dua buah kutub yang berlainan, yaitu Kutub Utara (U) dan Kutub Selatan (S), dimana

dua buah kutub yang senama akan terjadi gaya tolak menolak jika didekatkan dan dua buah kutub yang berlainan akan terjadi gaya tarik menarik jika didekatkan.

3.1. Hukum Coulomb Untuk Magnet

Besarnya gaya-gaya dalam medan magnet telah diukur oleh Coulomb dengan cara yang sama seperti mengukur gaya-gaya yang ditimbulkan oleh muatan-muatan listrik menurut Coulomb. Menurut Coulomb, Gaya tolak atau gaya tarik dari dua buah kutub magnet besarnya berbanding lurus dengan kuat kutub masing-masing dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya.

Dari hukum Coulomb dapat dituliskan sebuah persamaan tentang gaya sebagai berikut,

$$\boldsymbol{F = k\,\frac{m_1\,m_2}{r^2}}$$

dimana, F = gaya tarik atau gaya tolak (N)
m_1, m_2 = muatan kutub magnet (amp. m)
k = tetapan = 10^{-7} wb/(amp. m)
r = jarak antara kutub magnet (m)

Sedangkan jika medan magnet itu disebabkan oleh beberapa kutub magnet, maka kuat medan di suatu titik terhitung dengan menjumlahkan vektor-vektor kuat medan parsialnya. Besarnya kuat medan listrik dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{H = \frac{B}{m}}$$

dimana, H = kuat medan listrik
B = induksi magnetik
m = permeabilitas absolut bahan

permeabilitas absolut bahan untuk udara $\boldsymbol{\mu = 1}$, sedangkan untuk bahan atau benda lain adalah $\boldsymbol{\mu > 1}$. Untuk kuat medan magnet di titik sekitar suatu kutub magnet dapat diketahui besarnya dengan menggunakan persamaan berikut,

$$H = k\,\frac{m}{r^2}$$

dimana, H = kuat medan listrik
k = tetapan = tetapan = 10^{-7} wb/(amp. m)
B = induksi magnetik
m = permeabilitas absolut bahan

3.2. Suhu Curie

Jika suatu bahan yang awalnya bersifat *ferromagnetic* dipanaskan sehingga pada suatu saat bahan tersebut akan berubah sifatnya menjadi bahan *paramagnetic*, hal tersebut dapat terjadi karena *pemanasan*.

Suhu tertinggi dari bahan *ferromagnetic* sebelum brubah menjadi bahan paramagnetic disebut sebagai *suhu Curie*. Di bawah ini terdapat suhu Curie dari beberapa bahan ferromagnetic,

BAHAN	SUHU CURIE
KOBALT	1131 °C
BESI	770 °C
NIKEL	358 °C
GADOLIUM	16 °C

4. Hukum-Hukum Induksi Elektromagnetik

Fluks Magnetik adalah banyaknya garis gaya magnet yang dilengkapi oleh luas daerah tertentu dalam arah gerak lurus. Besarnya *fluks magnetik* yang melalui suatu bidang adalah *besar induksi magnetik dikalikan dengan luas bidang yang tegak lurus pada medan magnetik*.

Jika medan magnet tidak memotong tegak lurus bidang atau dengan kata lain bahwa *medan magnetik membuat sudut tertentu dengan bidang, maka fluks magnetik yang akan memotong bidang lebih kecil*. Besarnya fluks magnetik jika medan magnet memotong tegak lurus dengan bidang dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\Phi = B\,A$$

dimana, Φ = fluks magnetik (weber)
B = induksi magnetik (weber/m^2)
A = luas bidang (m^2)

Jika medan magnet tidak memotong tegak lurus atau membentuk sudut tertentu, maka besarnya fluks magnetik dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{\Phi = B\,A\,\cos\theta}$$

Untuk menghasilkan arus induksi dalam suatu rangkaian tertutup, fluks magnetik yang melalui loop tersebut harus berubah. Sehingga besarnya Gaya Gerak Listrik (GGL) induksi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

dengan $\boldsymbol{\Delta t}$ selang waktu (detik).

Jika diketahui kawat loopnya (rangkaian tertutup) dan perubahan fluks magnetik terjadi dalam waktu yang singkat ($\Delta t \rightarrow 0$), maka besarnya GGL induksi dapat diketahui dengan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}} \quad atau \quad \boldsymbol{\varepsilon = -N\frac{d\Phi}{dt}}$$

dengan **N** adalah jumlah lilita dan $\boldsymbol{\frac{d\Phi}{dt}}$ adalah turunan (differensial) pertama fungsi fluks atau sama dengan kecepatan fluks magnetic (weber/detik).

Contoh Soal

Sebuah magnet batang digerakkan menjauhi kumparan yang terdiri atas 600 lilitan. Fluks magnetik yang melingkupi kumparan berkurang dari $8x10^{-5}$ weber menjadi $2x10^{-2}$ dengan selang waktu 0,015 detik. Hitunglah GGL induksi pada kumparan tersebut.

Penyelesaian

$\Delta\Phi = F_{awal} - F_{akhir}$

$$\varepsilon = -N\,\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -(600)\frac{2\text{x}10^{-2} - 8\text{x}10^{-5}}{0{,}015} = 2{,}4\ volt$$

5. Penerapan Induksi Elektromagnetik

Penerapan induksi elektromagnetik dapat dijumpai pada berbagai peralatan listrik misalnya arus pusaran, transformator, dan dinamo.

5.1. Arus Pusaran

Jika suatu penghantar dalam medan magnetik yang fluks magnetiknya berubah, maka akan timbul gaya gerak listrik pada ujung penghantar. Apabila penghantarnya berbentuk pelat, perubahan fluks magnetik akan menimbulkan arus-arus yang berputar yang disebut dengan *arus pusar*.

Arus pusaran yang timbul pada sebuah kumparan karena adanya induksi elektromegnaetik dapat memberikan suatu keuntungan atau dapat juga memberikan kerugian.

5.1.1. Arus Pusar yang Menguntungkan pada Rem Magnetik

Pada suatu bahan tertentu, dengan memberikan arus induksi dalam selang waktu yang pendek, bahan ini akan memiliki sifat kemagnetan sisa yang cukup kuat sehingga dapat digunakan sebagai alat pengangkat bahan-bahan besi yan berat.

Sifat kemagneta sisa ini yang disebut sebagai rem magnetic yang hanya dapat dihapuskan dengan melakukan induksi dalam arah yang berlawanan. Efek arus pusar dan prinsip induksi elektromagnetik pada rem magnetik digunakan pada sistem pengereman kebanyakan kereta bawah tanah dan mobil-mobil angkutan cepat. Disamping itu sistem kemagnetan sisa dapat dipakai sebagai penyimpan ingatan atau memori dalam ukuran yang sangat kecil dan digunakan pada komputer.

5.1.2. Arus Pusar yang Menguntungkan pada Tungku Induksi

Pada dasarnya tungku induksi adalah sebuah tempat untuk melebur logam yang dikelilingi oleh tabung kumparan tembaga. Tungku induksi dapat juga ditemui pada kumparan pemanas air.

Di samping itu, setrika listrik merupakan alat yang dapat merubah energi listrik menjadi energi kalor dimana hal ini disebabkan karena adanya arus pusaran yang dapat menimbulkan kalor.

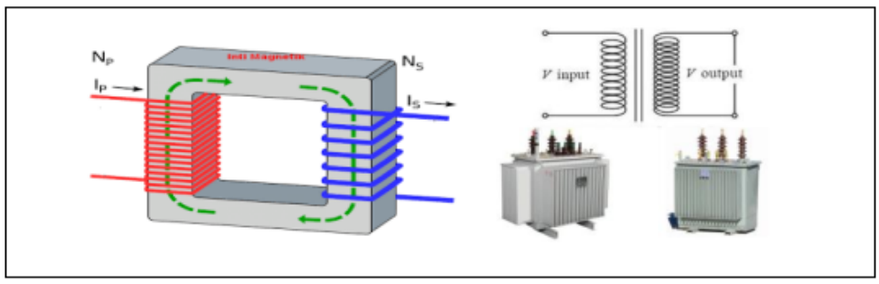
5.1.3. Arus Pusar yang Merugikan pada Transformator

Pada prinsipnya transformator adalah kawat yang diaktifkan pada inti besi dan lilitan primernya dihubungkan dengan sumber arus bolak balik. Dalam inti transformator akan terjadi arus pusar yang akan menimbulkan panas pada inti. Hal ini akan merugikan karena panas yang dihasilkan bukan hanya suatu daya hilang tetapi juga harus dibuang.

Daya hilang oleh arus pusar dalam inti transformator dapat dikurangi dengan membuat inti transformator dan lapisan-lapisan pelat tipis. Dengan demikian tampaklah panjang jalan yang dialiri arus menjadi lebih besar sehingga hambatan yang dihadapi juga besar.

5.2. Transformator

Transformator adalah alat yang digunakan untuk mengubah arus bolak balik tegangan rendah menjadi arus bolak balik tegangan tinggi atau dari tegangan tinggi menjadi tegangan rendah. Transformator terdiri atas pasangan kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi secara listrik dan dililitkan pada inti besi lunak.



Gambar 5.50 Transformator

Transformator bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik. Jika terjadi fluks magnetik pada kumparan transformator (trafo), maka perubahan fluks ini akan menghasilkan GGL induksi ataupun arus induksi pada keluaran transformator. Supaya dapat terjadi perubahan magnet pada transformator, maka arus yang dimasukkan dan transformator harus berubah-ubah terhadap waktu atau merupakan arus bolak balik.

Transformator dapat memindahkan energi listrik dengan jalan induksi melalui kumparan primer dan kumparan sekunder. *Kumparan primer* adalah kumparan yang dihubungkan dengan sumber arus yang hendak dirubah tegangannya, sedangkan *kumparan sekunder* adalah kumparan dimana arus dikeluarkan.

Tegangan primer adalah beda tegangan yang dihubungkan dengan ujung-ujung kumparan primer, sedangkan *tegangan sekunder* adalah beda tegangan yang dihubungkan dengan tegangan sekunder. Apabila tidak terdapat daya yang hilang pada transformator maka akan berlaku persamaan berikut,

$$\boldsymbol{V_1\, I_1 = V_2\, I_2} \quad \boldsymbol{atau} \quad \boldsymbol{V_2\, N_1 = V_1\, N_2}$$

dengan $\mathbf{V_1}$ tegangan pada kumparan priemr, $\mathbf{V_2}$ tegangan sekunder, $\mathbf{I_1}$ arus primer, $\mathbf{I_2}$ arus sekunder, $\mathbf{N_1}$ lilitan primer, dan $\mathbf{N_2}$ lilitan sekunder.

Jika fluks magnetik bocor diabaikan, maka besarnya gaya gerak listrik induksi (GGL induksi) pada kumparan sekunder dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{\varepsilon_2 = \frac{N_1}{N_2}\, \varepsilon_1}$$

dengan $\boldsymbol{\varepsilon_1}$ GGL induksi primer, $\boldsymbol{\varepsilon_2}$ GGL induksi sekunder, $\mathbf{N_1}$ jumlah lilitan primer, dan $\mathbf{N_2}$ jumlah lilitan sekunder.

Dari persaman-persamaan di atas dapat diketahui bahwa *perbandingan arus primer dengan arus sekunder berbanding*

terbalik dengan perbandingan lilitannya. Dalam kenyataannya tidak ada transformator yang ideal atau sempurna, jadi selalu terjadi kehilangan energi dari kumparan primer ke kumparan sekunder. Kehilangan energi ini disebabkan oleh adanya *Pemanasan Joule* dan *Pemanasan Arus Pusar*. Jadi pada dasarnya, bagaimanapun sempurnanya transformator yang dibuat, tidak mungkin dapat tercapai daya/energi keluaran sama dengan daya/energi masukan atau dengan kata lain bahwa *tidak mungkin tercapai efisiensi 100%*.

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara daya keluaran dengan daya masukan. Daya yang hilang terdiri atas daya hilang karena adanya arus pusar pada inti transformator dan daya hilang pada lilita kawat. Untuk memperkecil terjaidnya kehilangan tersebut maka pasangan kumparan primer dan sekunder dibuat dalam susunan tertutup dengan teras besi lunak dimana teras besi dibuat berlapis-lapis dan dilekatkan satu sama lain dengan bahan isolasi untuk mengurangi terjadinya arus pusar. Besarnya efisiensi pada transformator dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut,

$$\boldsymbol{\eta = \frac{P_s}{P_p}\, x\, 100\%} \quad atau \quad \boldsymbol{\eta = \frac{V_s\, I_s}{V_p\, I_p}\, x\, 100\%}$$

dengan $\boldsymbol{\eta}$ efisiensi, $\mathbf{P_s}$ daya sekunder, $\mathbf{P_p}$ daya primer, $\mathbf{V_s}$ tegangan sekunder, $\mathbf{V_p}$ tegangan primer, $\mathbf{I_s}$ kuat arus sekunder, dan $\mathbf{I_p}$ kuat arus primer.

Contoh Soal
Sebuah transformator step down memiliki efisiensi sebesar 80% dengan jumlah lilitan primer sebanyak 1000 lilitan dan jumlah lilitan sekundernya sebanyak 500 lilitan. Apabila daya yang diberikan pada primernya sebesar 2000 watt dengan kuat arus sebesar 4 ampere. Tentukanlah besarnya daya pada kumparan sekundernya dan kuat arusnya.

Penyelesaian

$$\eta = \frac{P_s}{P_p}\ x\ 100\% \ \rightarrow\ P_s = \ \eta \frac{P_p}{100\%}$$

$$P_s = \ 0{,}8\ x\ 2000 = 1600\ \ watt$$

Lalu,

$$P_1 = \ V_1\ N_1 \ \rightarrow \ \ V_1 = \frac{2000}{4} = 500\ volt$$

$$V_2\ N_1 = \ V_1\ N_2 \ \ \rightarrow \ \ V_2 = \frac{500\ x\ 500}{1000} = \ 250\ volt$$

Jadi,

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} = \frac{1600}{250} = 6{,}4\ Ampere$$

5.3. Dinamo dan Alternatornya

Dinamo adalah alat yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Tetapi secara umum dynamo etrsbeut dinamakan *generator*.

Prinsip kerjanya adalah terjadinya peristiwa induksi dimana perubahan fluks magnetik yang melalui suatu kumparan penghantar menginduksikan arus listrik dalam kumparan tersebut. Generator terdiri atas dua bagian utama, yaitu *stator* dan *rotor*. *Stator* adalah bagian yang terdiri atas kumparan-kumparan tembaga dan kumparan ini ditanam di dalam celah inti besi (ujung-ujungnya kelihatan pada arah lampu pijar). Sedangkan *Rotor* adalah suatu bagian yang terdiri atas magnet yang menghasilkan fluks magnetik. *Rotor* memiliki poros yang berputar melalui *pusat stator*. Jika *rotor* bergerak, maka *fluks magnetik yang dilingkupi kumparan dalam stator berubah secara periodik terhadap waktu*. Generator hanyalah sebuah alat perubah (*konvester*) eenrgi dari suatu bentuk ke bentuk enrgi lainnya.

Dalam generator diperlukan usaha mekanik yang digunakan untuk memutar poros generator. Jadi, jika kumparan penghantar

digerakkan di dalam medan magnet dan memotong garis-garis gaya magnet, akan menimbulkan GGL induksi. Besarnya GGL induksi yang terjadi dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}}$$

5.3.1. Generator Arus Bolak Balik (AC)

Azas kerja generator AC adalah sebagai berikut :

- Kumparan dalam generator diputar dengan sudut tetap,
- Ujung-ujung kumparan dihubungkan dengan cincin logam (kolektor),
- Pada kolektor dihubungkan sekat-sekat dengan kutub generator,
- Setelah beberapa detik kumparan berputar dari kedudukan tegak lurus medan akan menjadi GGL induksi.

Besarnya GGL induksi yang terjadi dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut,

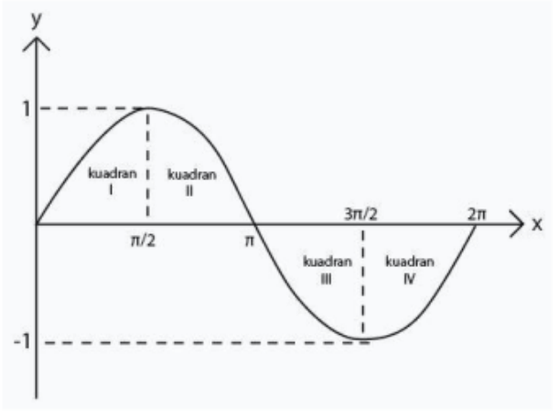
$$\boldsymbol{\varepsilon = N\,B\,A\,\omega\,\sin(\omega t)} \quad atau \quad \boldsymbol{\varepsilon = \varepsilon_{maks}\,\sin(\omega t)}$$

dengan $\boldsymbol{\varepsilon}$ GGL induksi sesaat (volt), $\boldsymbol{\varepsilon_{maks}}$ GGL induksi maksimum (volt), **N** jumlah lilitan kumparan, **A** luas kumparan atau loop (m^2), **B** induksi magnetik (weber/m^2), $\boldsymbol{\omega}$ kecepatan sudut (rad/detik), dan **t** waktu kumparan berputar (detik).

Jadi, dari persamaan di atas dapat diketahui bahwa besarnya GGL induksi maksimum atau amplitudo GGL induksi dapat diketahui melalui persamaan berikut,

$$\boldsymbol{\varepsilon_{maks} = N\,B\,A\,\omega}$$

Maka dapat diketahui bahwa GGL induksi yang dihasilkan pada loop atau kumparan berubah terhadap waktu setiap satu periode dan GGL induksi dari suatu generator arus bolak balik adalah sebagai fungsi sinus.



Gambar 5.51 Grafik Fungsi Sinus

5.3.2. Generator Arus Searah (DC)

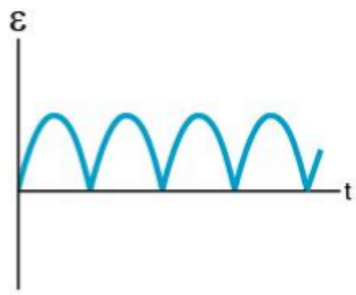
Prinsip kerja generator arus searah hampir sama dengan generator arus bolak balik dan hanya berbeda pada bentuk cincin terminalnya, dimana pada generator arus searah terminalnya hanya satu buah yang disebut sebagai cincin belah atau *komutator*.

Jadi, generator arus searah dapat menghasilkan GGL induksi ke satu arah.

- Cincin kolektor diputus dan disekat,
- Ujung-ujung kumparan dieprlukan pada setiap segmen kolektor,
- Apabila kumparan telah berputar dan selama putaran tersebut berlangsung terjadi GGL induksi yang arahnya tetap.
- Pada saat telah mencapai sudut π, sekat-sekat bersinggungan dengan isolator dan dalam rangkaian luar tidak ada arus listrik,
- Pada putaran berikutnya terjadi GGL induksi
- Karena bentuk kolektor dibuat sedemikian rupa, maka pada rangkaian luar aeah GGL induksi tetap seperti semula,

- Dengan demikian arah GGL induksi yang dihasilkan pada rangkaian searah.

GGL induksi yang dihasilkan oleh generator arus searah ditunjukkan oleh grafik sebagai berikut,



Gambar 5.52 Grafik GGL induksi Arus Searah

DAFTAR PUSTAKA

Abdul Jamal dan Tamrin, Buku Pintar Fisika, Tahun 2005.

Andi Suryanto dan Syamsul Bakhri, Buku Fisika 1, Penerbit Insan Cendekia Mandiri (Group Penerbitan CV Insan Cendekia Mandiri), Tahun 2021.

Mikrajuddin Abdullah, Buku Ajar Fisika II Untuk Mahasiswa, Tahun 2017.

Mitsubishi Heavy Industries, Jepang.

Situs : *www.iter.org/newsline/-/2602*

Situs: https://serviceacjogja.pro/prinsip-kerja-galvanometer/

Situs: https://rumusbilangan.com/gaya-lorentz/

Situs: www.engineeringlearn.com

Situs: www.sciencestruck.com

Situs:https://pengertianmenurut2.blogspot.com/2017/11/pengertian-arus-listrik-atau-electric.html

Situs:https://mafia.mafiaol.com/2013/04/pengertian-dan-besar-kuat-arus-listrik.html

Situs:https://www.google.com/search?q=arah+arus+listrik&hl=en&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjhidPHzfj4AhWARmwGHYPHAI4Q_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=657&dpr=1#imgrc=FZw-75m1gmExpM

Situs: *www.ideen2020.de*

PROFIL PENULIS



Andi Suryanto lahir di Tellongeng Kabupaten Bone, 10 Agustus 1972, menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Muslim Indonesia Makassar (1992-1998). Bernama lengkap **Dr. Ir. Andi Suryanto, ST, MT, IPM, ASEAN Eng**, melanjutkan pendidikan S2 di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya (2002-2004). Pria yang besar dalam keluarga kampung Tellongeng ini, kemudian melanjutkan pendidikan S3 di Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) Surabaya dan meraih gelar Doktor dalam bidang Teknologi Proses (2012-2016).

Doktor Teknologi Proses ini dengan *nickname* AS, saat ini selain aktif sebagai Dosen pada mahasiswa S1 di Jurusan Teknik Kimia FTI UMI dan mahasiswa S2 di Program Magister Teknik Kimia Pascasarjana UMI, juga beberapa jabatan yang pernah diamanahkan di Universitas Muslim Indonesia yaitu Penanggungjawab Sistem Mutu Fakultas Teknologi Industri Universitas Muslim Indonesia (2016-2020), Kepala Laboratorium Operasi Teknik Kimia FTI-UMI (2016-2020), Ketua Program Studi Magister Teknik Kimia (2017-2019), Ketua Program Studi Teknik Kimia FTI-UMI (2019-Sekarang). Secara khusus, AS selain mengajar mata

kuliah inti pada Program Studi Teknik Kimia, juga mengajar mata kuliah Fisika Dasar bagi mahasiswa S1 yang masih menempuh tahun pertama di FTI UMI.



Syamsul Bakhri lahir di Makassar, 5 Desember 1973, menyelesaikan pendidikan S1 di Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri (FTI) Universitas Muslim Indonesia (UMI) Makassar (2005). Bernama lengkap **Ir. Syamsul Bakhri, ST, MT, IPM**, melanjutkan pendidikan S2 di Program Magister Teknik Kimia Pascasarjana Universitas Muslim Indonesia (UMI) Makassar (2016-2018).

Saat ini aktif sebagai Dosen mahasiswa S1 di Program Studi Teknik Kimia FTI UMI. Secara khusus, pria yang biasa disapa *Bang Syam* ini, spesialis mengajar mata kuliah Matematika (Kalkulus), Fisika Dasar, dan Kimia Dasar bagi mahasiswa S1 yang masih menempuh tahun pertama di Fakultas Teknologi Industri (FTI) Universitas Muslim Indonesia (UMI) Makassar.

BUATBUKU.COM
---- BUAT Aja DULU----

LISTRIK DAN MEDAN MAGNET



Buku ini sangat bermanfaat bagi siapa saja yang ingin mengetahui lebih mendalam tentang ilmu fisika yang membahas tentang Listrik dan Magnet, bahkan dapat menjadi pegangan dalam membangun utility dalam prarancangan pabrik. Fisika merupakan ilmu pengetahuan yang memiliki peranan penting dalam memahami perilaku dan struktur materi. Materi akan mengantarkan pemahaman dalam menelusuri pengetahuan atomik hingga partikel yang paling elementer, bahkan mengarungi samudera alam, melintas dari satu gugus bintang ke gugus bintang lain, dari satu gugus galaksi ke gugus galaksi lain, dan seterusnya hingga ke lapisan terluar jagad raya. Mempelajari ilmu fisika mengantarkan kita, Insya Allah membawa kita semakin memahami fenemona alam dan semakin dekat kepada Sang Pencipta seluruh alam, yaitu ALLAH Subhana Wataala.

WADE GROUP
BUATBUKU.COM
ISBN

Listrik dan Medan Magnet

ORIGINALITY REPORT

20%	19%	1%	3%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

MATCH ALL SOURCES (ONLY SELECTED SOURCE PRINTED)

1%

★ summer-absolutely.icu

Internet Source

Exclude quotes	On	Exclude matches	< 24 words
Exclude bibliography	On		